

**DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA,
INGENIERÍA ELECTRÓNICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

**CONTROL VISUAL DE ROBOTS PARALELOS.
ANÁLISIS, DESARROLLO Y APLICACIÓN A LA
PLATAFORMA ROBOTENIS**

Tesis Doctoral

Autor
Luis Ángel Silva
Ingeniero Electrónico

Directores
José Maria Sebastián y Zúñiga
Doctor Ingeniero Industrial

Roque Jacinto Saltaren Pazmiño
Doctor Ingeniero Industrial

2005

(D-15)

Tribunal nombrado por el Magnífico. Y Excmo. Sr Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día _____ de _____ de 2005.

Presidente: Rafael Aracil Santonja

Vocal: Carlos Balaguer Bernaldo de Quirós

Vocal: Carlos Cerrada Somolinos

Vocal: Oscar Reinoso García

Secretario: Ramón Galán López

Suplente: Francisco Manuel Sánchez Moreno

Suplente: Margarita Bachiller Mayoral

Realizado el acto de defensa de la Tesis el día _____ de _____ de 2005 en la E.T.S.I.I. / Facultad _____.

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A Dios, a quien debo lo que soy y lo que tengo,

a Claudia, el amor de mi vida,

a yiya y davinci, la alegría de vivir.....

AGRADECIMIENTOS

Cuando se llega a este punto, y se echa la vista atrás, se observa que este trabajo es el fruto de muchas situaciones y personas que de una u otra forma, han aportado lo mejor de sí para su realización. A todas estas personas, que me han acompañado en este camino quisiera expresarles mis agradecimientos.

En primer lugar quisiera dar las gracias a mis directores de Tesis, Roque Jacinto Saltarén Pazmiño y José María Sebastián y Zúñiga. A Roque por su continuo apoyo, su confianza, y acertados consejos. A José María por todo su tiempo y dedicación, trabajar a su lado a sido un gusto, su capacidad de trabajo y su pasión por la investigación, ha supuesto para mi, un continuo enriquecimiento en muchos aspectos tanto profesionales como docentes e incluso también personales, gracias sobre todo por ser mas un amigo que un director de tesis.

También agradezco a los miembros del Departamento de Automática de la Universidad Politécnica de Madrid por toda la ayuda que me han prestado en todo este período. En particular mencionar a Rafael Aracil, Agustín Jiménez, Pascual Campoy, Sergio Domínguez, Fernando Matia, Ernesto Gamba, Antonio Barrientos, Manolo Ferre, Ángel Luis Martínez, Teresa Olmos, Rosa Ortiz, Carlos Sánchez, y en general, a todos los que han colaborado en la realización de esta tesis (Nicolas Reguenes, Miguel Cuesta, Anders Hannsson, David Gutiérrez, Félix Sánchez...). De manera especial, agradezco a Ramón Galán, la amistad, el apoyo y la constante ayuda desinteresada que de él he recibido.

A todos los compañeros del Laboratorio de Automática, Adrián Mora, Luis Mejías, Nicolás Dennis, José Sanpedro, Lizardo Parí, Juan Manuel Bogado, María Antonieta Scarano, María Auxiliadora Artigas, Pedro Gutiérrez, Raúl Gutiérrez, y a todos aquellos que he olvidado, quiero darles las gracias

por su amistad, acogida y por los ratos amenos compartidos durante este tiempo.

Quiero dar las gracias a Jairo Arturo Correa (q.e.p.d), a Edgar Barrios, a Luis Felipe Casas, a Luis Aramburu, a Alex Monclou, y a toda la familia de la Universidad Pontificia Bolivariana (Colombia) la apuesta de futuro de la cual soy protagonista.

A mis padres y a mis suegros, agradecer su continuo apoyo y comprensión.

Por último, agradecer el amor y comprensión de mi mujer Claudia Rocío y la alegría constante de mis hijos Ingrid Milena y David, gracias a los cuales, he podido superar los momentos difíciles encontrados a lo largo de estos años de trabajo.

Luis Ángel Silva

RESUMEN

La robótica ocupa en la actualidad un papel preponderante en el proceso de modernización e innovación de las industrias. La mayoría de los sistemas robotizados operan en fábricas, donde el espacio de trabajo ha sido ideado para adecuarse al robot. Sin embargo los robots han tenido menos impacto en aplicaciones dentro de entornos dinámicos, donde el área de trabajo y la ubicación de los objetos no puede controlarse exactamente. Esta limitación se debe implícitamente a la falta de capacidad sensorial en los sistemas robóticos comerciales. La integración sensorial es fundamental para incrementar la versatilidad y el dominio de aplicación de los robots.

En la actualidad, los sensores visuales son cada vez mas frecuentes en las aplicaciones robóticas. Su principal ventaja es que permiten una descripción muy completa del entorno de forma no intrusiva. La expresión control visual se aplica a sistemas guiados visualmente, los cuales hacen uso de una o varias cámaras para obtener información del entorno en forma de imágenes, que es empleada para controlar el efector final del robot durante la realización de una tarea.

Las aplicaciones robóticas en entornos estructurados con presencia de objetos cuya posición y orientación es perfectamente conocida, es un problema suficientemente estudiado en la actualidad. Sin embargo, aplicaciones en las que la variabilidad del entorno añade un alto grado de incertidumbre al mismo, presenta numerosas dificultades aun no suficientemente resueltas. La realización de tareas robóticas en este tipo de entornos, requieren de estructuras robóticas de bajo peso y alta rigidez, actuadores que permitan altas aceleraciones y altas velocidades, sensores con procesamiento rápido y esquemas de control sofisticados que tomen en cuenta la dinámica no lineal del sistema.

En éste ámbito, se centra el desarrollo de la presente **Tesis Doctoral**, en la cual, se pretende evaluar el nivel de integración entre un sistema robótico y un sistema de visión, en aplicaciones con entornos no estructurados y dinámi-

cos. Para ello, se plantea el diseño, construcción e implementación de una innovadora plataforma experimental basada en un robot paralelo, que utilice la información suministrada por un sistema de visión, para modelar el entorno y lograr el control de las trayectorias del sistema robótico, en aplicaciones con alta variabilidad del entorno.

La plataforma llamada **RoboTennis**, se construye con dos propósitos en mente: *i*) desarrollar una estructura abierta para la investigación en el campo del control visual de robots paralelos, y *ii*) evaluar el nivel de integración entre un robot paralelo de alta velocidad y un sistema de visión en aplicaciones con entornos dinámicos. El diseño de la plataforma plantea la construcción del robot de estructura paralela, el control articular a bajo nivel, la integración del sistema de visión y el desarrollo de algoritmos de control servo-visual.

Para demostrar su versatilidad, en la presente tesis se implementa una arquitectura de control visual para el Sistema RoboTennis, la cual, permite el seguimiento tridimensional de objetos móviles a alta velocidad. Esta integración es novedosa con respecto al tipo de manipulador (robot paralelo), al sistema de control (control visual) y a la velocidad de trabajo (1.0 m/s). Según la revisión bibliográfica, se puede afirmar que el Sistema RoboTennis, es el primer sistema que plantea el control de un robot paralelo de alta velocidad mediante realimentación visual. Los resultados experimentales muestran la versatilidad del sistema en la implementación de estrategias de control visual con altos requerimientos temporales.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos de la tesis.....	11
1.2. Contribuciones aportadas.....	12
1.3. Estructura del documento.....	15
2. Estado del arte de los robots paralelos y del control visual.....	19
2.1. Estado del arte de los robots paralelos.....	20
2.1.1. Líneas actuales de investigación.....	27
2.1.1.1. Diseño mecánico.....	27
2.1.1.2. Cinemática.....	28
2.1.1.3. Análisis de singularidades.....	28
2.1.1.4. Espacio de trabajo.....	30
2.1.1.5. Dinámica.....	31
2.1.1.6. Control.....	32
2.1.1.7. Calibración.....	33
2.1.2. El robot DELTA.....	33
2.1.2.1. El robot Delta en el mercado.....	35

2.1.2.2.	El robot Delta a nivel académico.....	39
2.1.3.	Aplicaciones de los robots paralelos.....	40
2.2.	Estado del arte del control visual de robots.....	48
2.2.1.	Control visual: Vista general.....	52
2.2.2.	Definición de la función de la tarea.....	53
2.2.3.	Realización de un control en velocidad.....	55
2.2.4.	Elección de la consigna.....	58
2.2.4.1.	Consigna en el espacio de la imagen.....	59
2.2.4.2.	Consigna en el espacio cartesiano.....	64
2.2.4.3.	Consigna en el espacio de la imagen y en el espacio cartesiano.....	66
2.3.	Conclusiones.....	67
3.	Análisis cinemático del Sistema RoboTennis.....	69
3.1.	Introducción.....	69
3.2.	Modelo de simulación en ADAMS.....	70
3.3.	Modelo geométrico.....	72
3.4.	Modelo cinemático inverso.....	75
3.5.	Modelo cinemático directo.....	77
3.6.	Matriz jacobiana del robot.....	79
3.6.1.	Obtención de la matriz jacobiana para el Sistema RoboTennis.....	81
3.7.	Simulaciones y resultados.....	84
3.8.	Conclusiones.....	88
4.	Diseño del Sistema RoboTennis.....	89
4.1.	Introducción.....	89
4.2.	Optimización cinemática.....	91
4.3.	Optimización dinámica.....	95
4.3.1.	Análisis de las trayectorias de la pelota.....	95
4.3.1.1.	La tarea de jugar al tenis de mesa.....	96
4.3.1.2.	Simulación en Matlab.....	97
4.3.2.	Elección de los motores.....	99
4.4.	Prototipo construido.....	102
4.4.1.	Estructura mecánica del robot.....	105
4.4.2.	Sistemas de accionamiento y seguridad.....	107
4.4.3.	Sistema de visión.....	108
4.4.4.	Hardware de control.....	110

4.5. Conclusiones.....	110
5. Análisis dinámico del Sistema RoboTennis.....	113
5.1. Introducción.....	113
5.2. Formulación de Lagrange.....	116
5.3. Formulación de Lagrange para el Sistema RoboTennis.....	118
5.4. Validación del modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTennis.....	124
5.5. Resultados de simulación.....	125
5.5.1. Validación del modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTennis.....	125
5.5.2. Influencia de las inercias de los antebrazos en el comportamiento del modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTennis.....	136
5.5.3. Influencia de la velocidad de operación en el comportamiento del modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTennis.....	137
5.6. Conclusiones.....	140
6. Control articular del Sistema RoboTennis.....	141
6.1. Introducción.....	141
6.2. Métodos de control de robots.....	142
6.2.1. Control clásico.....	143
6.2.2. Métodos basados en el modelo dinámico del robot.....	144
6.2.3. Métodos adaptativos.....	150
6.3. Control del robot Delta.....	154
6.3.1. Clavel, Reymond.....	154
6.3.2. Codourey, Alan.....	154
6.3.3. Miller, Karol.....	156
6.3.4. Guglielmetti, P.....	156
6.4. Control articular del Sistema RoboTennis.....	158
6.4.1. Hardware de control.....	159
6.4.2. El motor y el variador de velocidad.....	161
6.4.3. Puesta en marcha del motor.....	163
6.4.3.1. Configuración del variador de velocidad....	163
6.4.3.2. Control del motor en modo servo.....	164
6.5. Resultados experimentales.....	170

6.5.1. Control de posición.....	171
6.5.2. Control de movimiento.....	177
6.6. Conclusiones.....	182
7. Planificador de trayectorias para el Sistema RoboTennis.....	183
7.1. Introducción.....	183
7.2. Planificador de trayectorias.....	189
7.2.1. Metodología.....	190
7.2.2. Aproximación general.....	192
7.2.3. Limitaciones en distancia y cambio de velocidad.....	194
7.2.4. Generación de trayectorias entre dos puntos deseados..	196
7.3. Resultados de simulación.....	199
7.4. Resultados experimentales.....	201
7.5. Conclusiones.....	207
8. Estimación de la posición y de la velocidad 3D de objetos a través de una secuencia de imágenes.....	209
8.1. Introducción.....	209
8.2. Estrategia de adquisición de imágenes.....	210
8.2.1. Requisitos previos.....	212
8.3. Segmentación de la escena.....	212
8.4. Detección de las características bidimensionales.....	214
8.4.1. Calculo del centroide de la pelota.....	214
8.4.1.1. Imagen binaria.....	215
8.4.1.2. Imagen en niveles de intensidad.....	215
8.4.2. Calculo del radio de la pelota.....	216
8.4.2.1. Calculo a través del área de la imagen binaria.....	216
8.4.2.2. Calculo a través del área de la imagen en niveles de gris.....	217
8.4.2.3. Diámetro a partir de la transición de una línea.....	217
8.4.2.4. Comparación entre los métodos de estimación del radio de la pelota.....	218
8.5. Estimación de la posición tridimensional de la pelota.....	219
8.6. Sincronización de la adquisición y del procesamiento de imágenes.....	221
8.6.1. Modo síncrono.....	221

8.6.2.	Modo asíncrono.....	221
8.6.3.	Estimación del tiempo de ciclo.....	222
8.7.	Estimación de la posición y de la velocidad de la pelota mediante el Filtro de Kalman.....	222
8.7.1.	Notación matricial del Filtro de Kalman.....	223
8.7.2.	Modelo del sistema.....	225
8.7.2.1.	Modelo del sistema con velocidad constante.....	226
8.7.2.2.	Modelo del sistema con aceleración constante.....	227
8.7.3.	Modelo del sensor.....	228
8.7.3.1.	Medida de posición.....	228
8.7.3.2.	Medida de posición y velocidad.....	229
8.7.4.	Ajuste del filtro de Kalman.....	230
8.8.	Pruebas realizadas.....	231
8.8.1.	Pruebas con varios modelos del sistema.....	231
8.8.2.	Pruebas con varios modelos del sensor.....	234
8.8.3.	Ajuste de las matrices Q y R.....	236
8.8.4.	Predicción de la posición.....	240
8.9.	Conclusiones.....	242
9.	Control visual del Sistema RoboTennis.....	245
9.1.	Introducción.....	245
9.2.	Consideraciones previas.....	247
9.2.1.	Nomenclatura empleada.....	249
9.3.	Estructura básica.....	251
9.3.1.	Ajuste del parámetro λ	255
9.3.2.	Estabilidad del sistema.....	256
9.4.	Algoritmo propuesto.....	256
9.5.	Pruebas efectuadas.....	262
9.5.1.	Control predictivo frente a control proporcional.....	266
9.5.2.	Influencia de la constante de inercia.....	272
9.5.3.	Influencia de la constante de error.....	278
9.6.	Conclusiones.....	279
10.	Conclusiones y Trabajos futuros.....	281
	Bibliografía.....	285

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Disposición del sistema de visión en control visual: (a) cámara en un lugar fijo de escena, (b) cámaras en el extremo del robot....	3
1.2	Control Visual basado en Posición.....	4
1.3	Control Visual basado en Imagen.....	5
1.4	Esquema “mirar y mover” estático.....	6
1.5	Esquema “mover y mirar” dinámico.....	7
1.6	Esquema de Control Visual directo.....	7
1.7	Robot paralelo: (a) modelo de simulación en ADAMS, (b).prototipo.....	10
2.1	La plataforma de Gough.....	20
2.2	Plataforma de Stewart: (a) 3-3, (b) 6-6, (c) 6.6.....	22
2.3	Plataforma de Stewart: (a) 6-SPS, (b) 6-UPS.....	23
2.4	Robot paralelo para mecanizado.....	23
2.5	Prototipo del robot DELTA patentado en EEUU (1990) por Clavel. (Patente No. 4.972-580).....	34

2.6	El robot Delta en la industria del empaquetado.....	35
2.7	El robot Delta en aplicaciones quirúrgicas.....	36
2.8	Robots Delta de Hitachi-Seiki.....	37
2.9	Robot Delta IRB 340 FlexPicker (ABB).....	38
2.10	Robot Delta, modelos C33 y CE33, fabricados por SIG.....	39
2.11	Robot NUWAR.....	40
2.12	Robot paralelo FANUC, empleado en tareas de soldadura.....	41
2.13	Joystick esférico de la Universidad de Laval (Canada).....	42
2.14	Cyber Air Base.....	43
2.15	F-2006 Hexapod.....	43
2.16	Simulador de movimiento de barcos.....	44
2.17	Delta lab EX 800.....	44
2.18	Fanuc F-100i.....	45
2.19	Hexabot.....	45
2.20	Plataforma de Stewart para tele operación.....	46
2.21	Robot HEXA.....	47
2.22	Robot paralelo trepador.....	48
2.23	Configuración de la cámara: (a) en un lugar fijo de la escena, (b) en el extremo del robot.....	48
3.1	Entorno de trabajo y modelo de simulación del Sistema RoboTennis en ADAMS.....	71
3.2	Modelo geométrico del robot.....	73
3.3	Parámetros geométricos del robot.....	73
3.4	Posibles soluciones del modelo cinemático inverso para la articulación $i=1$. Intersección de la esfera (3.5) centrada en B_i y el círculo (3.7) centrado en Σ_i : (a) Vista frontal, (b) Vista isométrica.....	76
3.5	Ocho posibles soluciones del modelo cinemático inverso.....	77
3.6	Posibles soluciones del problema cinemático directo. Intersección de tres esferas (3.5) centradas en C_i y de radios L_b : (a) Vista superior, (b) Punto de intersección superior, y (c) Punto de intersección sobre el centro del efector final.....	79
3.7	Validación de los modelos cinemáticos directo e inverso empleando planificado en lenguaje C y un modelo de simulación ADAMS: (a) perfil de posición, (b) perfil de velocidad y (c) perfil de aceleración para el efector final en la simulación 1.....	86
3.8	Validación de los modelos cinemáticos directo e inverso em-	

	pleando planificado en lenguaje C y un modelo de simulación ADAMS: (a) perfil de posición, (b) perfil de velocidad y (c) perfil de aceleración para el efector final en la simulación 2.....	87
4.1	Manipulabilidad global, como una función de L_a y L_b para $R = 210$ y $r = 50$ mm.....	93
4.2	Manipulabilidad del Sistema RoboTennis para $Z = 800$ mm.....	94
4.3	Espacio de trabajo del Sistema RoboTennis.....	94
4.4	Modelo ADAMS del robot: (a) vista lateral, (b) vista superior....	95
4.5	Relación entre el espacio de trabajo del robot y las condiciones iniciales de movimiento en velocidad y ángulo para la pelota.....	98
4.6	Trayectorias de la pelota en la etapa continua, para unas condiciones iniciales de velocidad y ángulo para la pelota de 2 m/s y 100°	99
4.7	Ejemplo de una trayectoria crítica analizada.....	100
4.8	Perfil de par para los motores, en la ejecución de trayectoria críticas.....	101
4.9	Perfil de velocidad para el efector final en la ejecución de trayectorias críticas.....	101
4.10	Perfil de aceleración para el efector final en la ejecución de trayectorias críticas.....	102
4.11	Modelo CAD del Sistema RoboTennis: (a) robot, (b) estructura portante.....	103
4.12	Prototipo del Sistema RoboTennis.....	104
4.13	Estructura mecánica del sistema RoboTennis.....	105
4.14	Algunos componentes de la estructura mecánica del Sistema RoboTennis: (a) vista del brazo telescópico y de la articulación universal superior, (b) vista de la plataforma móvil, (c) vista del efector final, de la cámara y los motores de accionamiento neumático.....	106
4.15	Sistema de accionamiento del Sistema RoboTennis: (a) conjunto motor+reductor, (b) drive UNIDRIVE SP.....	107
4.16	Discos de seguridad montados en cada eje de motor.....	108
4.17	Cámara Sony XC-HR 50.....	109
4.18	Tarjeta de adquisición Matrox Meteor II-MC/4.....	110
5.1	Modelo geométrico del robot.....	118
5.2	Validación del modelo dinámico empleando ADAMS.....	124

5.3	Perfiles de (a) posición, (b) velocidad, (c) aceleración y (d) par, en el seguimiento de la trayectoria 1.....	126
5.4	Pares generados por el modelo dinámico inverso propuesto para el Sistema RoboTenis, en el seguimiento de trayectoria 1.....	127
5.5	(a) comparación entre los pares generados por el modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTenis y los pares del modelo de simulación ADAMS, (b) diferencia entre los modelos dinámicos en el seguimiento de la trayectoria 1.....	127
5.6	Perfiles de (a) posición, (b) velocidad, (c) aceleración y (d) par, en el seguimiento de la trayectoria 2.....	129
5.7	Pares generados por el modelo dinámico inverso propuesto para el Sistema RoboTenis, en el seguimiento de trayectoria 2.....	129
5.8	(a) comparación entre los pares generados por el modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTenisy los pares del modelo de simulación ADAMS, (b) diferencia entre los modelos dinámicos en el seguimiento de la trayectoria 2.....	130
5.9	Perfiles de (a) posición, (b) velocidad, (c) aceleración y (d) par, en el seguimiento de la trayectoria 3.....	131
5.10	Pares generados por el modelo dinámico inverso propuesto para el Sistema RoboTenis, en el seguimiento de trayectoria 3.....	132
5.11	(a) comparación entre los pares generados por el modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTenisy los pares del modelo de simulación ADAMS, (b) diferencia entre los modelos dinámicos en el seguimiento de la trayectoria 3.....	133
5.12	Perfiles de (a) posición, (b) velocidad, (c) aceleración y (d) par, en el seguimiento de la trayectoria 4.....	134
5.13	Pares generados por el modelo dinámico inverso propuesto para el Sistema RoboTenis, en el seguimiento de trayectoria 4.....	135
5.14	(a) comparación entre los pares generados por el modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTenisy los pares del modelo de simulación ADAMS, (b) diferencia entre los modelos dinámicos en el seguimiento de la trayectoria 4.....	135
5.15	Comparación entre los pares generados por el modelo de simulación ADAMS y por el modelo dinámico simplificado para un movimiento en línea recta entre los puntos (0.0, 0.0, 750) mm y (200, 200, 1000) mm, a una velocidad de 2 m/s.....	136
5.16	Comparación entre los pares generados por el modelo de simulación ADAMS y por el modelo dinámico simplificado para un	

	movimiento en línea recta entre los puntos (0.0, 0.0, 750) mm y (200, -200, 750) mm, a una velocidad de 2 m/s.....	137
5.17	Comparación entre los pares generados por el modelo de simulación ADAMS y por el modelo dinámico simplificado para un movimiento en línea recta entre los puntos (0.0, 0.0, 750) mm y (200, -200, 750) mm, a una velocidad de 5 m/s.....	138
5.18	Comparación entre los pares generados por el modelo de simulación ADAMS y por el modelo dinámico simplificado para un movimiento en línea recta entre los puntos (0.0, 0.0, 750) mm y (200, 200, 1000) mm, a una velocidad de 5 m/s.....	139
6.1	Esquema de un control básico PID.....	143
6.2	Control clásico PIC con pre compensación.....	144
6.3	Control feed forward compensation.....	145
6.4	Principio de control por desacoplamiento no lineal.....	148
6.5	Control por desacoplamiento no lineal.....	149
6.6	Control predictivo.....	150
6.7	Control adaptativo con modelo de referencia.....	151
6.8	Control adaptativo con identificación de los parámetros del modelo.....	152
6.9	Control por aprendizaje.....	153
6.10	Control de trayectoria del Sistema RoboTennis.....	158
6.11	Subsistemas de la tarjeta DSPACE 1103.....	160
6.12	Interfaz grafica del controlador para el Sistema RoboTennis.....	161
6.13	Estructura de menús y parámetros de configuración para el variador.....	164
6.14	Perfiles de: (a) movimiento del efector final, (b) velocidad de operación espacial, (c) error de posición cartesiana, y (d) error de posición articular, para un movimiento crítico propuesto con velocidad de 100 mm/s.....	172
6.15	Perfiles de: (a) movimiento del efector final, (b) velocidad de operación espacial, (c) error de posición cartesiana, y (d) error de posición articular, para un movimiento crítico propuesto con velocidad de 500 mm/s.....	173
6.16	Perfiles de: (a) movimiento del efector final, (b) velocidad de operación espacial, (c) error de posición cartesiana, y (d) error de posición articular, para un movimiento crítico propuesto con velocidad de 1000 mm/s.....	174

6.17	Perfiles de: (a) movimiento del efector final, (b) velocidad de operación espacial, (c) error de posición cartesiana, y (d) error de posición articular, para un movimiento crítico propuesto con velocidad de 1500 mm/s.....	175
6.18	Perfiles de: (a) movimiento del efector final, (b) velocidad de operación espacial, (c) error de posición cartesiana, y (d) error de posición articular, para un movimiento crítico propuesto con velocidad de 2000 mm/s.....	176
6.19	(a)movimiento espacial del efector final a 1000 mm/s, (b) movimiento espacial del efector final a 2000 mm/s, (c) velocidad espacial máxima, (d) error de seguimiento espacial para velocidades de 1000, 1500 y 2000 mm/s, en la ejecución del movimiento crítico 1.....	178
6.20	(a)movimiento espacial del efector final a 1000 mm/s, (b) movimiento espacial del efector final a 2000 mm/s, (c) velocidad espacial máxima, (d) error de seguimiento espacial para velocidades de 1000, 1500 y 2000 mm/s, en la ejecución del movimiento crítico 2.....	179
6.21	(a)movimiento espacial del efector final a 1000 mm/s, (b) movimiento espacial del efector final a 2000 mm/s, (c) velocidad espacial máxima, (d) error de seguimiento espacial para velocidades de 1000, 1500 y 2000 mm/s, en la ejecución del movimiento crítico 3.....	180
6.22	(a)movimiento espacial del efector final a 1000 mm/s, (b) movimiento espacial del efector final a 2000 mm/s, (c) velocidad espacial máxima, (d) error de seguimiento espacial para velocidades de 1000, 1500 y 2000 mm/s, en la ejecución del movimiento crítico 4.....	181
7.1	Perfiles de aceleración.....	188
7.2	Trayectoria suave generada con una secuencia de polinomios de quinto orden(* indican los puntos de control).....	193
7.3	Perfiles de: (a) posición, (b) velocidad, (c) aceleración, y (d) jerk, para el efector final en la simulación de un movimiento crítico, con trayectorias suaves generadas por polinomios de quinto orden.....	200
7.4	Perfil de movimiento para el efector final, en el seguimiento de la trayectoria propuesta en el movimiento 1: (a) en el espacio	

3D, (b) en el plano XY, (c) en el plano XZ, y (d) en el plano YZ.	203
7.5 Error para el efector final en el seguimiento de las trayectorias propuestas en el movimiento 1.....	204
7.6 Perfil de velocidad para el efector final en la ejecución de movimiento 1.....	204
7.7 Perfil de movimiento para el efector final, en el seguimiento de la trayectoria propuesta en el movimiento 2: (a) en el espacio 3D, (b) en el plano XY, (c) en el plano XZ, y (d) en el plano YZ.	205
7.8 Error para el efector final en el seguimiento de las trayectorias propuestas en el movimiento 2.....	206
7.9 Perfil de velocidad para el efector final en la ejecución de movimiento 2.....	206
8.1 Entorno de trabajo.....	211
8.2 Imagen capturada en modo binning (240x640).....	211
8.5 Píxeles iniciales de búsqueda.....	213
8.6 Modelo pinhole para la cámara.....	220
8.7 Adquisición y procesamiento de imagen en modo asíncrono.....	222
8.8 Etapas del filtro de kalman.....	225
8.9 Velocidad estimada con vector de estado en posición y velocidad	232
8.10 Velocidad estimada con vector de estado en posición, velocidad y aceleración.....	233
8.11 Error de velocidad estimada con modelo de aceleración constante.....	234
8.12 Error en la velocidad con sensor de posición.....	235
8.13 Error en la velocidad con sensor de posición y velocidad.....	235
8.14 Velocidades con modelo sin error en la aceleración.....	237
8.15 Velocidades con modelo con error en la aceleración.....	238
8.16 Error en la velocidad con un modelo sin error en la aceleración..	239
8.17 Error en la velocidad con un modelo con error en la aceleración..	239
8.18 Error de predicción en el eje X con 15 muestras.....	241
8.19 Error de predicción en el eje Z con 15 muestras.....	242
9.1 Control visual basado en posición.....	246
9.2 Sistemas de coordenadas involucradas.....	248
9.3 Estructura básica de control visual.....	251
9.4 Algoritmo propuesto.....	257
9.5 Algoritmo propuesto con filtrado de la posición del objeto.....	261

9.6	Evolución tridimensional de la pelota.....	262
9.7	Proyección de la evolución de la pelota en el plano XY.....	263
9.8	Proyección de la evolución de la pelota en el plano XZ.....	263
9.9	Proyección de la evolución de la pelota en el plano YZ.....	264
9.10	Proyección en el plano XZ de las evoluciones del efector del robot y de la pelota.....	264
9.11	Posición del efector final con algoritmo proporcional.....	267
9.12	Error posición relativa de la pelota con algoritmo proporcional...	268
9.13	Velocidad estimada de la pelota con algoritmo proporcional.....	268
9.14	Velocidad del efector final con algoritmo proporcional.....	269
9.15	Posición del efector final con algoritmo predictivo.....	270
9.16	Error posición relativa de la pelota con algoritmo predictivo.....	270
9.17	Velocidad estimada de la pelota con algoritmo predictivo.....	271
9.18	Velocidad del efector final con algoritmo predictivo.....	271
9.19	Velocidad de salida del regulador con algoritmo predictivo.....	272
9.20	Posición del efector final con constante de inercia 1.0.....	274
9.21	Error posición relativa de la pelota con constante de inercia 1.0...	274
9.22	Velocidad estimada de la pelota con constante de inercia 1.0.....	275
9.23	Velocidad del efector final con constante de inercia 1.0.....	275
9.24	Posición del efector final con constante de inercia 0.5.....	276
9.25	Error posición relativa de la pelota con constante de inercia 0.5...	277
9.26	Velocidad estimada de la pelota con constante de inercia 0.5.....	277
9.27	Velocidad del efector final con constante de inercia 0.5.....	278

ÍNDICE DE TABLAS

4.1	Dimensiones optimas del robot.....	93
4.2	Propiedades cinemáticas del prototipo final.....	94
6.1	Parámetros dinámicos del robot.....	171
7.1	Parámetros para el movimiento 1 usando polinomios de quinto orden.....	201
7.2	Parámetros para el movimiento 1 usando polinomios de quinto orden.....	202
8.1	Estimacion del radio de la pelota.....	219
9.1	Resultado proporcional frente a predictivo.....	266
9.2	Resultados al variar la constante de inercia.....	273
9.3	Resultados al variar la constante de error.....	279

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La robótica ocupa en la actualidad un papel preponderante en el proceso de modernización e innovación de las industrias. Es conocido que ésta contribuye fundamentalmente a la calidad del producto y al mejoramiento de la productividad. Los manipuladores robóticos son una de las mejores soluciones para sustituir al hombre en procesos repetitivos, trabajos que se desarrollan en ambientes tóxicos, con factores de riesgo elevados, en tareas complejas, en tareas muy rápidas, en elaboraciones a escala micro o macroscópica, etc. Esto a motivado que una parte del ambiente científico internacional este inmerso en el desarrollo de estos mecanismos. Un aspecto relevante de este proceso, es el diseño del sistema de control encargado de guiar al robot para que ejecute la tarea encomendada con eficiencia y exactitud.

En general, un robot esta compuesto de una estructura mecánica y un sistema de control. La estructura mecánica consta de un conjunto de eslabones interconectados mediante juntas cinemáticas denominadas articulaciones. Los llamados *Robots Series*, presentan una configuración de eslabones conectados en forma secuencial, empezando por la base hasta el extremo operativo o efec-

tor final. Cada eslabón de la cadena esta unido al anterior mediante una articulación rotacional o prismática y en todas la articulaciones hay un generador de movimiento o actuador. Un *Robot Paralelo* se define como aquella estructura en la cual, el efector final esta unido a la base por más de una cadena cinemática cerrada independiente. Esta configuración, confiere a los robots paralelos ventajas con respecto a los robots series en términos de rigidez, velocidad, precisión, inercia en movimiento y relación carga/peso. La mayor desventaja de este tipo de manipuladores, es su limitado rango de movimiento.

En cuanto al sistema de control, esta compuesto por los actuadores, los sensores, el controlador, el planificador de trayectorias, y el sistema de supervisión y decisión. Los actuadores son los encargados de accionar cada una de las articulaciones con el fin de posicionar y orientar el efector final. Estos pueden ser de tipo eléctrico, neumático o hidráulico. Los sensores por su parte, son los encargados de medir las variables de interés para el control del robot. Los sensores pueden ser de dos clases: los que proveen el reconocimiento del estado mecánico del manipulador (por ejemplo: sensores de posición, velocidad, fuerza), y los que permiten una realimentación del entorno del manipulador (por ejemplo: cámaras, sensores de ultrasonidos, etc.). El controlador recibe las consignas de referencia de las variables asociadas a la trayectoria del extremo operativo, generadas por el sistema de planificación de trayectorias. De acuerdo a la información entregada por los sensores, se generan las acciones de control adecuadas para cada actuador según el algoritmo de control empleado.

La mayoría de los sistemas robotizados operan en fábricas, donde el espacio de trabajo ha sido ideado para adecuarse al robot. Sin embargo los robots han tenido menos impacto en aplicaciones dentro de entornos dinámicos, donde el área de trabajo y la ubicación de los objetos no pueden controlarse exactamente. Esta limitación se debe implícitamente a la falta de capacidad sensorial en los sistemas robóticos comerciales. La integración sensorial es fundamental para incrementar la versatilidad y el dominio de aplicación de los robots.

En la actualidad, los sensores visuales son cada vez mas frecuentes en las aplicaciones robóticas. Su principal ventaja es que permiten una descripción muy completa del entorno de forma no intrusiva. Se puede decir, que facilitan la integración de dispositivos robóticos en entornos menos estructurados y di-

námicos, que los que se encuentran en las aplicaciones clásicas de automatización. La expresión control visual se aplica a sistemas guiados visualmente, los cuales hacen uso de una o varias cámaras para obtener información del entorno en forma de imágenes, que es empleada para controlar el efector final del robot durante la realización de una tarea. Los sistemas de control visual se clasifican a partir de tres criterios (Weiss, 1980): la configuración física del sistema de visión, la utilización de las características extraídas de la imagen y la arquitectura del robot.

La configuración física del sistema de visión, define la relación cinemática del sistema de visión con respecto al robot y al entorno. El sistema de visión puede estar formado por uno o varios sensores visuales y puede tratarse de cámaras estáticas y/o móviles. La disposición del sistema de visión permite distinguir dos tendencias diferenciadas (Hutchinson et al., 1996): cámaras en un lugar fijo de la escena (*eye-to-hand*) y cámaras en el extremo del robot (*eye-in-hand*).

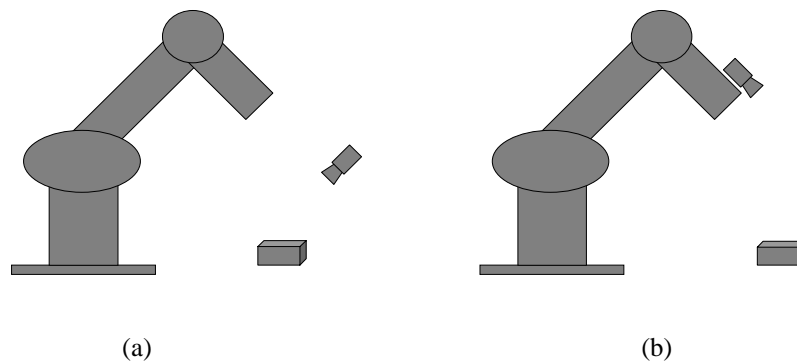


Figura 1.1 Disposición del sistema de visión en control visual: (a) cámaras en un lugar fijo de la escena, (b) cámaras en el extremo del robot.

En el caso de cámaras en un lugar fijo de la escena (Figura 1.1(a)), el sistema de visión se encuentra dispuesto en una ubicación fija y observa la escena en la que deben estar permanentemente visibles tanto el robot (típicamente, el efector final) como el objeto de interés. No existe una relación mecánica entre el sistema de visión y el robot, pero es conocida la relación entre la cámara y el sistema de referencia asociado a la base del robot. Para la configuración de cámaras en el extremo del robot (Figura 1.1(b)), el sistema de visión es mó-

vil y se encuentra solidario al efector final. La relación entre la localización de la cámara y la del efector final del robot es conocida y constante. La atención se centra en la observación del objeto, mientras que la disposición del robot queda implícita en la información extraída de las imágenes. El empleo de cámaras estáticas, presenta como principal desventaja la eventual *oclusión* que puede producirse cuando el robot se interpone entre la cámara y el objeto.

Desde el punto de vista del procesamiento de imágenes, las principales estrategias para realizar el control visual son: control basado en posición (control visual 3D), control basado en imagen (control visual 2D), o una mezcla de los dos anteriores (control visual 2½D).

En el control visual basado en posición (Figura 1.2), las características extraídas de las imágenes, s , son usadas junto al modelo geométrico del objeto y el conocimiento del modelo de la cámara, para estimar explícitamente la localización del objeto respecto al sistema de visión, x . La señal de error se genera en el espacio 3D. Como principales ventajas de este método destacan: la tarea se especifica en términos de localización cartesiana similares a los empleados en robótica, la trayectoria de la cámara es una línea recta, ausencia de singularidades en el espacio de la tarea y mínimos locales prácticamente inexistentes. Como desventajas destacan, la excesiva dependencia de los errores de calibración debidos a la calibración de la cámara o al modelo geométrico impreciso del objeto, y el uso de información adicional para reconstruir las coordenadas cartesianas de los puntos en el espacio.

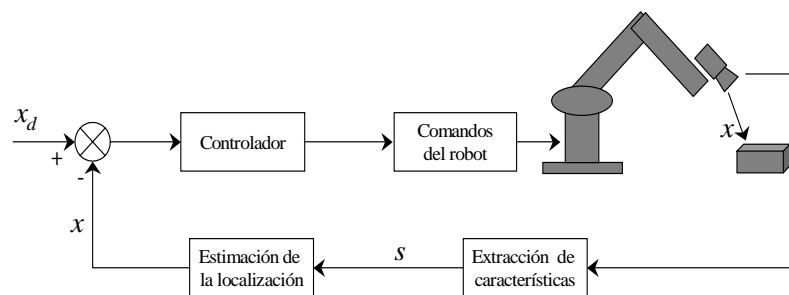


Figura 1.2 Control visual basado en posición.

En los sistemas de control basados en imagen (Figura 1.3), el control se realiza directamente a partir de las características extraídas por el sistema de visión, que representan la proyección del objetivo a alcanzar en el plano de la imagen. De esta forma, la señal de error se define directamente en términos de las propias características de la imagen. En esta estrategia de control, el concepto clave es el de *matriz de interacción* o *matriz jacobiana de la imagen*. Esta matriz establece la relación mediante la cual, un cambio en la posición y orientación del objeto respecto a la cámara induce un cambio en las características observadas en la imagen. Esta matriz puede estimarse *off-line* o estimarse en cada iteración de la ley de control. La principal ventaja de esta estrategia de control es la precisión obtenida independiente del proceso de calibración y del conocimiento del modelo del objeto. Entre los principales inconvenientes están: trayectoria de la cámara no controlable, no se puede asegurar la estabilidad global y la aparición de singularidades en el espacio de características, como oclusiones parciales.

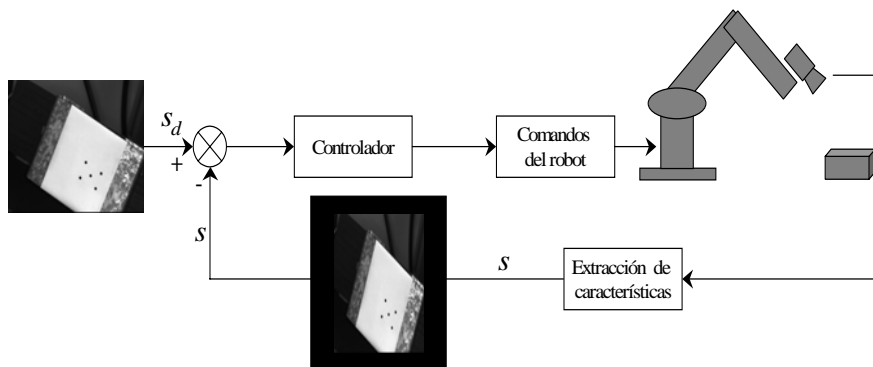


Figura 1.3 Control visual basado en imagen.

El control visual 2½D (Malis et al., 1998) está a medio camino entre el control visual basado en posición y el control visual basado en imagen, explotando las ventajas de ambos. Además, permite evitar sus desventajas respectivas, ya que contrariamente al control visual basado en posición, no necesita ningún modelo geométrico del objeto y en comparación con el control visual

basado en imagen, asegura la convergencia de la ley de control en todo el espacio de trabajo.

A partir de la arquitectura del robot, los diversos esquemas de control visual se clasifican en (San, 1980): control visual indirecto y control visual directo. En el esquema de control visual indirecto están presentes además del lazo de realimentación visual, los bucles internos de control de los servomotores del robot. Este esquema de control comúnmente se denomina “mirar y mover” (*look-then-move*) y puede ser estático o dinámico.

En el esquema “*mirar y mover estático*”, Figura 1.4, los algoritmos de visión y el movimiento del robot operan en forma secuencial. En primer lugar, la cámara captura una imagen, extrayéndose la información necesaria para dar el próximo comando de movimiento al robot. Hecho esto, se envía la orden de movimiento al robot y se espera a que haya finalizado dicho movimiento antes de tomar una nueva imagen. El robot ejecuta la tarea suponiendo que el entorno no se modificó. La dinámica de los bucles internos de control de los servomotores del robot, en tanto sea estable, no tiene ninguna influencia sobre el bucle de control visual. En la variante “*mirar y mover dinámico*”, Figura 1.5, el robot puede encontrarse aun en movimiento mientras la siguiente imagen esta siendo tomada. En este caso, se tiene en cuenta la dinámica de los bucles internos de control de los servomotores del robot, lo que lleva a implementaciones de control bifrecuencial, en el cual, el lazo de control visual opera a una frecuencia más baja, proporcionando valores de referencia al bucle de control interno, de mayor frecuencia.

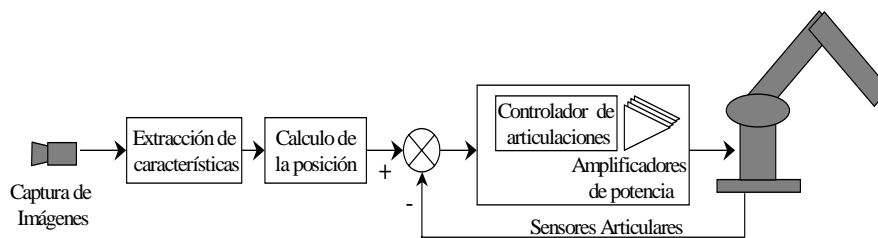


Figura 1.4 Esquema de control visual “*mirar y mover estático*”

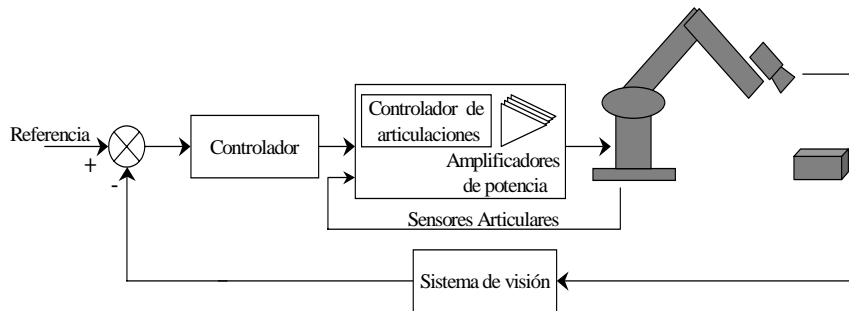


Figura 1.5 Esquema de control visual “mirar y mover dinámico”

En el esquema de control visual directo, Figura 1.6, comúnmente llamado control “*servo-visual*” (*visual servoing*), desaparece el lazo de control a nivel articular. El bucle de realimentación visual controla directamente los servomotores del robot, lo que genera un fuerte nivel de acoplamiento dinámico en el lazo de control visuo-motor.

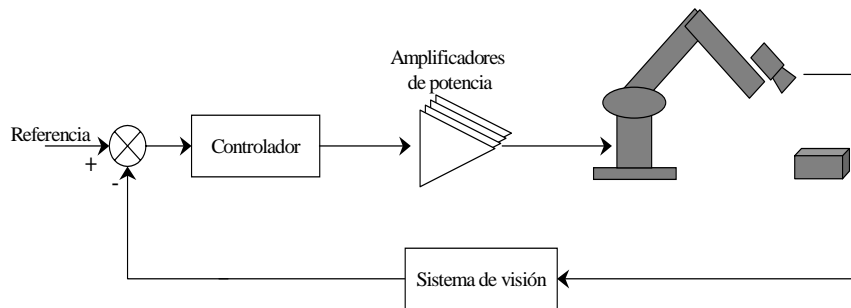


Figura 1.6 Esquema de control visual directo

Un factor a tener en cuenta en aplicaciones de control visual, es la dinámica del entorno. Las aplicaciones en entornos estructurados con presencia de objetos cuya posición y orientación es perfectamente conocida, es un problema suficientemente estudiado en la actualidad. Sin embargo, aplicaciones en las que la variabilidad del entorno añade un alto grado de incertidumbre al

mismo, presenta numerosas dificultades aun no suficientemente resueltas. La realización de tareas robóticas en este tipo de entornos, requieren de estructuras robóticas de bajo peso y alta rigidez, actuadores que permitan altas aceleraciones y altas velocidades, sensores con procesamiento rápido y esquemas de control sofisticados que tomen en cuenta la dinámica no lineal del sistema.

En éste ámbito, se centra el desarrollo de la presente **Tesis Doctoral**, en la cual, se pretende evaluar el nivel de integración entre un sistema robótico y un sistema de visión en aplicaciones con entornos no estructurados y dinámicos. Para ello, se plantea el diseño, construcción e implementación de una innovadora plataforma experimental basada en un robot paralelo, que utilice la información suministrada por un sistema de visión, para modelar el entorno y lograr el control de las trayectorias del sistema robótico, en aplicaciones con alta variabilidad del entorno.

La plataforma llamada **RoboTenis**, se construye con dos propósitos en mente: *i*) desarrollar una estructura abierta para la investigación en el campo del control visual de robots paralelos, y *ii*) evaluar el nivel de integración entre un robot paralelo de alta velocidad y un sistema de visión en aplicaciones con entornos dinámicos. El diseño de la plataforma plantea la construcción del robot de estructura paralela, el control articular a bajo nivel, la integración del sistema de visión y el desarrollo de algoritmos de control servo-visual.

Para demostrar su versatilidad, en la presente tesis se implementa una arquitectura de control visual para el Sistema RoboTenis, la cual, permite el seguimiento tridimensional de objetos móviles a alta velocidad. Esta integración es novedosa con respecto al tipo de manipulador (robot paralelo), al sistema de control (control visual) y la velocidad de trabajo (1.0 m/s). Según la revisión bibliográfica, se puede afirmar que el Sistema RoboTenis, es el primer sistema que plantea el control de un robot paralelo de alta velocidad mediante realimentación visual. Como aplicación futura, se pretende que el robot juegue al tenis de mesa con ayuda de un sistema de visión.

Un sistema robótico que juegue al ping-pong es una aplicación tratada por muchos autores en el pasado pero ninguna considera el control visual de un robot paralelo. Toshiba construye un robot articular de 7 grados de libertad para jugar ping-pong contra una pared. El sistema de visión esta compuesto por

un par estereo y permite mantener el movimiento de la pelota durante 4 golpes consecutivos (Hartley, 1987). Anderson (1987), como culminación de una serie de proyectos de los Laboratorios Bell, desarrolla un robot que juega ping-pong usando el robot comercial PUMA 260 y cuatro cámaras de video. El Instituto Federal de Tecnología Suizo construye un sistema de 6 grados de libertad para jugar ping-pong usando un par estero (Flassler et al., 1990). La Universidad de Wollongong diseña un mecanismo de 4 grados de libertad (2 cartesianos y 2 rotacionales) que permiten posicionar y orientar una raqueta. El robot utiliza dos cámaras (Naghdy et al., 1993). El prototipo más reciente, es el desarrollado por Acosta et al. (2003). El robot diseñado posee 5 grados de libertad, dos raquetas y emplea una cámara para detectar la pelota.

Actualmente, los problemas relacionados con el diseño óptimo y al análisis dinámico representan las principales líneas de investigación en el área de los robots paralelos y en el caso del Sistema RoboTennis no es la excepción. El diseño permite seleccionar la estructura mecánica del manipulador y optimizar sus dimensiones, mientras que el análisis dinámico permite seleccionar comercialmente los actuadores y definir las estrategias de control para una aplicación deseada.

La estructura mecánica del Sistema RoboTennis está inspirada en el robot DELTA (Clavel, 1988). La selección de la estructura mecánica del robot es una consecuencia de los altos requerimientos del sistema en cuanto a velocidad, aceleración y exactitud. Un modelo de simulación dinámica desarrollado en ADAMS y una fotografía del prototipo construido se muestran en las Figuras 1.7(a) y 1.7(b), respectivamente. El robot está constituido por dos plataformas (una fija (1) y una móvil (2)), y tres cadenas cinemáticas cerradas separadas por un ángulo de 120°. Cada cadena cinemática está formada por dos eslabones (el brazo (3) y el antebrazo (4)), y cuatro articulaciones esféricas pasivas. Los motores (5) están colocados sobre la base del robot (plataforma fija) y transfieren el movimiento a la plataforma móvil mediante la combinación de movimientos de cada cadena cinemática cerrada. La posición fija de los motores, permite que la carga inercial manejada sea reducida, logrando mayores velocidades y aceleraciones en el efector final.

Cada antebrazo está formado por un par de barras paralelas. Estas aseguran que la plataforma móvil siempre permanece paralela a la base del robot,

lo que permite posicionar el efector final de acuerdo a los ejes x , y , z . Para la aplicación de jugar al tenis de mesa, la raqueta se monta sobre la plataforma móvil. La rotación de la raqueta, usa un motor fijo en la base del robot y un brazo telescópico (6) que une la plataforma fija con la plataforma móvil mediante dos uniones universales.

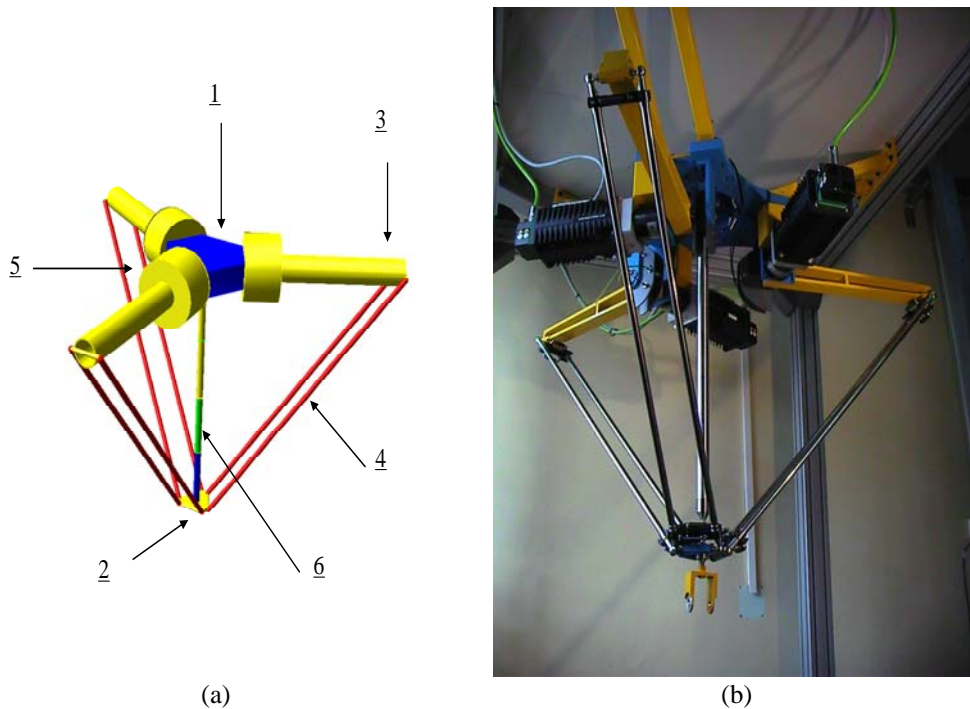


Figura 1.7 Robot paralelo: (a) modelo de simulación en ADAMS, (b) prototipo

El sistema de visión está ubicado en el efector final del robot (*eye-in-hand*) y formado por una sola cámara de escaneo progresivo y adquisición múltiple, que unido a la potencia de cálculo de los ordenadores actuales, permite trabajar con periodos de adquisición y procesamiento cercanos a los 8,33 ms con escaneo total y 4 ms con escaneo parcial. La posición de la pelota se estima a partir del conocimiento geométrico de la pelota (diámetro) y de la extracción de características de la imagen (centro de gravedad y diámetro de la pelota).

El hardware de control esta formado por una tarjeta DSPACE 1103. En ella se ejecuta la planificación de trayectorias, el cálculo de los modelos cinemático y dinámico del manipulador, así como la implementación de los diferentes algoritmos de control. Además, permite supervisar las estrategias de control, modificar sus parámetros en tiempo real y seguir la evolución de las variables relevantes del sistema.

El desarrollo de esta tesis doctoral se encuadra dentro del proyecto de investigación “Arquitecturas de Teleoperación en Entornos Dinámicos Modelables” (DPI 2001-3827-C02-01) subvencionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España.

1.1 OBJETIVOS DE LA TESIS

El Sistema RoboTenis es una estructura abierta que permitirá la investigación en el campo del control visual. Su diseño y desarrollo plantea los siguientes objetivos generales: construcción de un robot de estructura paralela, selección e integración del sistema de visión y desarrollo de algoritmos de control servo-visual.

Dentro del alcance de esta tesis, los objetivos cumplidos son:

- *Selección y diseño del robot paralelo,*
- *Construcción y ensamblado del prototipo,*
- *Implementación del control de posición,*
- *Análisis dinámico del robot,*
- *Desarrollo de un planificador de trayectorias on-line que permite el seguimiento de objetos en movimiento a alta velocidad,*
- *Detección de las características visuales de una pelota con movimiento tridimensional,*
- *Obtención de las características visuales en secuencias de imágenes,*
- *Control visual de un robot paralelo de alta velocidad: seguimiento de una pelota con movimiento tridimensional.*

1.2 CONTRIBUCIONES APORTADAS

El presente trabajo contiene contribuciones originales al diseño y control visual de robots paralelos. Como contribución principal de esta tesis destaca, el gran nivel de integración alcanzado entre sistemas robóticos paralelos y sistemas de visión en aplicaciones con altos requerimientos temporales.

Las aportaciones por orden de aparición son las siguientes:

- **Elección, diseño y construcción de un robot paralelo de alta velocidad y aceleración.** El diseño se ha optimizado desde el punto de vista cinemático y dinámico. El prototipo obtenido posee altas capacidades cinemáticas, un excelente índice global, un gran espacio de trabajo y sin singularidades (Angel et al., 2005a).
- **Análisis dinámico y control de posición del Sistema RoboTennis.** El modelo dinámico se obtiene a partir de la formulación de Lagrange. A diferencia de los modelos dinámicos establecidos en la revisión bibliografía hasta el momento, el modelo dinámico obtenido para el Sistema RoboTennis emplea antebrazos con inercias no despreciables. El controlador emplea una ley de control PD con prealimentación. Los resultados experimentales muestran que el prototipo puede alcanzar velocidades superiores a 2.5 m/s en el efector final (Ángel et al., 2005b).
- **Desarrollo de un método *on-line* para la generación de trayectorias suaves con jerk limitado.** El planificador es sencillo computacionalmente y emplea polinomios de quinto orden para generar una trayectoria suave entre dos puntos. Las trayectorias respetan los límites cinemáticos del manipulador (velocidad, aceleración y jerk) durante todo el movimiento.
- **Estimación de la posición y de la velocidad tridimensional de objetos en movimiento a través de una secuencia de imágenes.** La estimación se realiza cada 8.33 ms y emplea el filtro de Kalman

para filtrar las mediciones ruidosas, como es el caso de la estimación de la profundidad (componente Z) (Gutiérrez et al., 2005).

- **Control visual de un robot paralelo para el seguimiento de objetos móviles a alta velocidad (1.0 m/s).** Emplea la configuración cámara en mano y un sistema de control bifrecuencial. El lazo externo de control visual se actualiza cada 8,33 ms, mientras que el lazo interno de control de movimiento del robot se actualiza cada 0.5 ms.

De momento, las contribuciones de esta tesis han dado lugar a diferentes publicaciones tanto nacionales como internacionales:

CONGRESOS INTERNACIONALES

- L. Ángel, J.M. Sebastián, R. Saltaren, R. Aracil, “RoboTennis System. Part II: Dynamics and Control”, To Appear in *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC'05)*, Seville, Spain, December 2005.
- L. Ángel, J.M. Sebastián, R. Saltaren, R. Aracil, J. Sanpedro, “RoboTennis: Optimal Design of a Parallel Robot with High Performance”, In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'05)*, Edmonton, Canada, August 2005.
- L. Ángel, J.M. Sebastián, R. Saltaren, R. Aracil, R. Gutierrez, “RoboTennis: Design, Dynamic Modeling and Preliminary Control”, In *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'05)*, Monterrey, California, USA, July 2005.
- J.M. Sebastián, L. Pari, C. González, L. Ángel, “A New Method for the Estimation of the Image Jacobian for the Control of an Uncalibrated Joint System”, In *Proc. 2nd Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis (IbPRIA'05)*, Estoril, Portugal, June 2005.

- J.M. González, J.M. Sebastián, D. García, F. Sánchez and L. Ángel, “Recognition of 3D Object from One Image Based on Projective and Permutative Invariants”, In *Proc. International Conference on Image Analysis and Recognition (ICIAR’04)*, Oporto, Portugal, September-October 2004.
- L. Angel, R. Saltaren, J.M. Sebastián, A. Hansson and R. Aracil, “RoboTennis: Parallel Robot with Visual Control”, In *Proc. World Automation Congress (WAC’04)*, Seville, Spain, June 2004.
- J.M. González, J.M. Sebastián, D. García, F. Sánchez and L. Ángel, “3D Object Recognition from a Single Image”, In *Proc. World Automation Congress (WAC’04)*, Seville, Spain, June 2004.
- L. Ángel, J.M. Sebastián, R. Saltaren, R. Aracil, “RoboTennis: Diseño y Construcción del Robot Paralelo”, In *Proc. III Jornadas Argentinas de Robotica (JAR’04)*, San Juan, Argentina, Junio 2004.

CONGRESOS NACIONALES

- D. Gutiérrez, L. Ángel, L. Pari, J.M. Sebastián, “Estimación de la posición y de la velocidad de un objeto móvil. Aplicación al Sistema RoboTennis”, *Proc. XXVI Jornadas de Automática*, Alicante, España, Septiembre 2005.
- L. Parí, C. González, L. Ángel, J.M. Sebastián, “Un nuevo método para la estimación del jacobiano de la imagen utilizando la matriz fundamental”, *Proc. XXVI Jornadas de Automática*, Alicante, España, Septiembre 2005.
- L. Ángel, R. Saltaren, N. Ragueneas, J.M. Sebastián, R. Aracil, “Control Visual de un Robot Paralelo: Análisis y Diseño de la Plataforma RoboTennis”, *Proc. XXIV Jornadas de Automática*, León, España, Septiembre 2003.

PUBLICACIONES REFERENCIADAS EN EL ISI

- J.M. Sebastián, L. Parí, C. González, L. Ángel, “A New Method for the Estimation of the Image Jacobian for the Control of an Uncalibrated Joint System”. *Lecture Notes in Computer Science*, ISSN: 0302-9743, Springer Verlag GmgH, 3522, pp. 631-638, 2005.
- J.M. González, J.M. Sebastián, D. García, F. Sánchez and L. Ángel, “Recognition of 3D Object from One Image Based on Projective and Permutative Invariants”. *Lecture Notes in Computer Science*, ISSN: 0302-9743, Springer Verlag Heidelberg, 3211, pp. 705-712, 2004.

1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento esta dividido en 10 capítulos, en el primer capitulo se recogen aspectos fundamentales como son: la motivación, objetivos y contribuciones aportadas por esta tesis con un breve resumen de las publicaciones y conferencias donde se ha presentado dichas aportaciones.

En el capitulo 2 se presenta el estado del arte de los robots paralelos y los fundamentos teóricos del control visual de robots. El capitulo esta compuesto de tres partes. En la primera parte se lleva a cabo una revisión del estado actual de la técnica de robots paralelos de seis grados de libertad. La segunda parte profundiza de manera especial en la estructura Delta. La tercera y última se dedica a revisar el estado actual del control visual de robots.

En el capitulo 3 se estudia el problema cinemático del robot paralelo seleccionado. Se presentan los modelos cinematicos directo e inverso y se obtiene la matriz jacobiana del robot. Se desarrollan un conjunto de herramientas computacionales (MATLAB y Lenguaje C) que permiten solucionar el problema cinemático inverso y directo del robot paralelo. Por último, se realiza el análisis de posición, velocidad y aceleración, verificando los resultados con otro software comercial (ADAMS).

El diseño del robot paralelo se presenta en el capítulo 4. El diseño es optimizado desde el punto de vista cinemático y dinámico. Inicialmente, la optimización cinemática define las dimensiones de la estructura mecánica del manipulador y emplea un índice de optimización global basado en el número de condición de la matriz jacobiana. Usando un modelo de simulación en ADAMS, se obtiene la velocidad máxima del efector final y el máximo par de los motores para un conjunto de trayectorias típicas de la pelota en tenis de mesa. Finalmente, se presenta el prototipo del robot paralelo construido.

En el capítulo 5 se derivan las ecuaciones de movimiento para el sistema robótico. El modelo dinámico emplea la formulación de Lagrange escrita en términos de un conjunto de coordenadas generalizadas. Para un conjunto de trayectorias del efector final, se valida del modelo dinámico obtenido para el Sistema RoboTenis empleando el modelo de simulación en ADAMS. Los resultados de estas simulaciones permiten analizar la influencia de las inercias de los antebrazos en la validez del modelo dinámico para el robot paralelo.

En el capítulo 6, se implementa el control articular del Sistema RoboTenis. En primer lugar se describe la arquitectura de control del sistema y los procedimientos de implantación de control de posición y de movimiento del robot paralelo. Basado en los resultados del capítulo 5, se describe el proceso experimental de sintonización de los controladores implementados. Diferentes trayectorias han sido programadas y ejecutadas sobre el prototipo. Los resultados experimentales muestran que el Sistema RoboTenis es capaz de alcanzar velocidades superiores a 2.5 m/s.

En el capítulo 7 se presenta un método on-line para la generación de trayectorias suaves, aplicado al prototipo. El algoritmo es sencillo computacionalmente e incluye: *i*) capacidad para producir movimientos rectilíneos con un jerk limitado entre puntos intermedios con distintas velocidades, *ii*) movimiento articular coordinado, y *iii*) planificación en tiempo real de trayectorias para n puntos intermedios del camino, teniendo en cuenta las posiciones y velocidades deseadas en estos puntos.

El procesamiento de la imagen, la detección de las características visuales y estimación de la posición y velocidad tridimensional de la pelota en movimiento se presentan en el capítulo 8. El sistema de visión está ubicado en el

extremo del robot y formado por una sola cámara. La adquisición se efectúa cada 8,33 ms y emplea el sistema de doble buffering. Las características usadas son el centro de gravedad y el diámetro de la pelota. Dado el reducido tiempo de adquisición, se emplea el filtro de Kalman para filtrar las señales de posición y velocidad y conseguir una estimación mucho más fiable. Estos parámetros permiten predecir la posición y velocidad de la pelota, de forma que el robot pueda anticipar su movimiento.

En el capítulo 9, se presenta el control visual del Sistema RoboTennis. La arquitectura de control visual propuesta, permite el seguimiento tridimensional de una pelota en movimiento a alta velocidad. Los resultados experimentales obtenidos muestran la versatilidad del sistema en la implementación de estrategias de control visual con altos requisitos temporales.

Finalmente, en el capítulo 10 se presentan las conclusiones y futuros trabajos, así como los apéndices y la bibliografía.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE DE LOS ROBOTS PARALELOS Y DEL CONTROL VISUAL

En este apartado se revisa el estado actual de la técnica de los robots paralelos y del control visual de robots. Inicialmente, se presenta el estado del arte de los robots paralelos con de 6 y menos grados de libertad. Seguidamente, se presentan las principales líneas actuales de investigación en el campo de los robots paralelos. Luego, se profundiza de manera especial en la estructura DELTA, que es la empleada en el Sistema RoboTenis. Finalmente, la última parte se dedica a revisar el estado actual del control visual de robots.

El robot paralelo mas conocido es la plataforma de Stewart. Esta estructura paralela posee 6 grados de libertad, y se pensó utilizar en un principio para el Sistema RoboTenis. Pero, después de un largo proceso de simulación en ADAMS, este tipo de plataforma fue descartada, ya que no se obtuvo motores

lineales comerciales que cumplieran los requisitos de par exigidos para la aplicación deseada.

2.1 ESTADO DEL ARTE DE LOS ROBOTS PARALELOS

Se define un robot paralelo como

“Aquellos robots en los que el extremo final está unido a la base por más de una cadena cinemática independiente”.

La arquitectura de los robots paralelos es muy diferente a la de los robots serie, lo que conduce a que la mayoría de los problemas teóricos se deban reconsiderar. De hecho existe una extraña dualidad entre ambos tipos de mecanismos, ya que un problema de difícil solución para un tipo de estructura, es fácilmente resoluble por el otro tipo de estructura, y viceversa (Zamanov, 1991), (Waldron, 1991). La estructura cinemática de los robots paralelos se conoce desde hace mucho tiempo. Ya en 1813, Cauchy estudió la rigidez de un octaedro articulado. Sin embargo, fue mucho más tarde cuando Gough y Whitehall (1962) propusieron un mecanismo similar para el ensayo de neumáticos, Figura 2.1.



Figura 2.1 La plataforma de Gough.

En 1965, Stewart (1965) propuso el uso de una estructura paralela de seis grados de libertad para generar movimiento en el espacio, como la solución más práctica en la construcción de simuladores de vuelo. La elección de este tipo de mecanismo se justifica por la buena relación carga admisible/peso propio. De hecho, en una plataforma de Gough se distribuye la carga, de modo que cada uno de sus 6 actuadores soporta aproximadamente 1/6 de los esfuerzos totales, siendo además, estos esfuerzos de tracción y compresión, lo que proporciona gran rigidez al mecanismo. Esto queda ilustrado con el ejemplo de un prototipo de robot paralelo que con 35 kg de peso tiene una carga nominal de 600 kg.

El mecanismo de Stewart, consistía en una plataforma triangular unida mediante articulaciones esféricas a tres actuadores lineales ajustables en longitud, que se conectaban a su vez, a una base fija mediante articulaciones universales. A pesar de que el mecanismo de Stewart es menos representativo que el de Gough, los robots paralelos son llamados frecuentemente plataformas de Stewart. Con el tiempo, la arquitectura de la plataforma de Stewart fue sufriendo modificaciones. La plataforma de Stewart tal como se la conoce hoy día, consiste en dos plataformas (la base y la plataforma móvil) unidas a través de seis actuadores extensibles mediante articulaciones esféricas en ambos lados, o con articulaciones esféricas a un lado y universales al otro.

Hasta mediados de la década de los 80, la mayoría de los diseños se centraron en dos configuraciones. Una con la base y el efector final con forma triangular y los actuadores de dos en dos coincidiendo en los vértices de cada triángulo; y otra, con la plataforma móvil de forma triangular y los actuadores coincidiendo dos a dos en los vértices del triángulo y con seis puntos distintos contenidos en el plano de la base con forma hexagonal. Estas configuraciones se denotan como 3-3 plataforma de Stewart (Figura 2.2a) y 6-3 plataforma de Stewart (Figura 2.2b), respectivamente. Muy pronto se observó que la coincidencia de las articulaciones esféricas restringía de forma severa la movilidad del manipulador, sin embargo la configuración 6-3 todavía se mantuvo popular por algún tiempo. Otra configuración que empezó a ser muy popular es la que tenía hexágonos semirregulares como puntos de conexión tanto en la base como en el efector final (6-6 plataforma de Stewart) (Figura 2.2c).

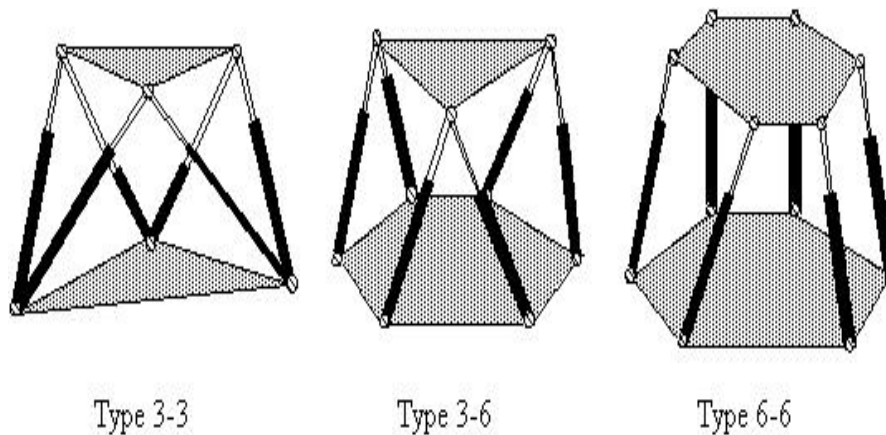


Figura 2.2 Plataforma de Stewart: (a) 3-3, (b) 3-6, (c) 6-6.

Existe una gran variedad de configuraciones mecánicas para este tipo de robots, según sea la estructura de las cadenas cinemáticas que unen la base con el efector final. La estructura cinemática con articulaciones esféricas a ambos lados de cada actuador (Figura 2.3a), se denota como plataforma de Stewart 6-SPS, donde 6 se refiere al número de grados de libertad del robot y SPS viene del inglés (Spherical – Prismatic – Spherical). De igual forma, la estructura con articulaciones universales en la base y esféricas en el efector final se denota como plataforma de Stewart 6-UPS (Universal – Prismatic – Spherical) (Figura 2.3b). Estas dos estructuras son idénticas salvo que la plataforma 6-SPS presenta seis grados de libertad pasivos que permite la rotación de cada cadena cinemática sobre su eje.

Más tarde en 1978, Hunt (1978) sugirió que los mecanismos actuados de forma paralela de los simuladores de vuelo, se usaran como robots manipuladores y destacó, que los manipuladores paralelos requerían de un estudio más detallado en el contexto de las aplicaciones robóticas a la vista de las ventajas en cuanto rigidez y precisión respecto a los robots serie convencionales.

Además de la excelente relación carga admisible/peso propio, los robots paralelos presentan otras características interesantes. En 1979, McCallion y Truong (1979) propusieron usar la plataforma de Stewart como un manipulador paralelo dentro de una célula de ensamblaje robotizada (Figura 2.4), fundamen-

talmente porque la posición del efector final es mucho menos sensible a los errores que los sensores articulares de los robots en serie. La gran rigidez asegura que las deformaciones de los actuadores sean mínimas. Esta característica contribuye en gran manera a la precisión en el posicionamiento del manipulador.

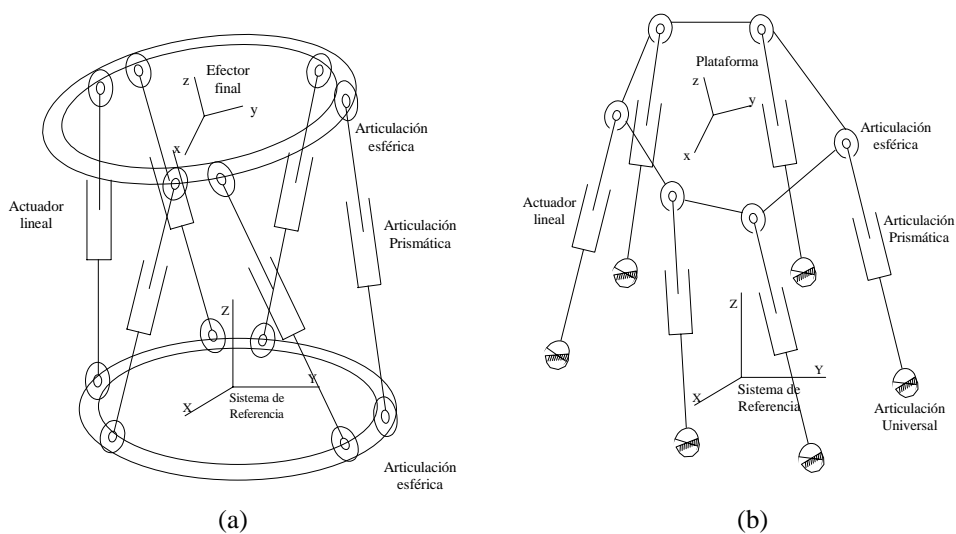


Figura 2.3 Plataforma Stewart: (a) 6-SPS, (b) 6-UPS.



Figura 2.4 Robot paralelo para mecanizado.

Earl y Rooney (1983) analizaron la estructura cinemática para aplicaciones robóticas y las dualidades entre mecanismos serie y paralelos, presentando métodos de síntesis de nuevas estructuras cinemáticas. Hunt (1983) estudió la estructura cinemática de los manipuladores paralelos basándose en la “teoría screw”, y enumeró varias estructuras cinemáticas con futuro prometedor. También analizó las singularidades en términos geométricos clasificándolas en “configuraciones estacionarias” y en “configuraciones con incertidumbre”, discutiendo las diferentes formas de ensamblaje de los manipuladores paralelos.

Fichter y McDowell aplicaron el método convencional de los manipuladores serie, para resolver la cinemática inversa de cada eslabón individual de un manipulador paralelo. Este método fue implementado en la plataforma de Stewart. Mohamed y Duffy (1983,1985) estudiaron la cinemática de los manipuladores paralelos basándose en la teoría Screw y presentaron la solución para la transformación inversa y directa.

Yang y Lee (1984) desarrollaron un diseño práctico para el modelo cinemático de la plataforma de Stewart. Realizaron un primer intento de analizar el espacio de trabajo de la plataforma en un determinado plano, dando evidencias numéricas de que el espacio de trabajo y la maniobrabilidad del manipulador paralelo eran bastante limitados.

La fase inicial en el desarrollo de los robots paralelos como campo de investigación se consolidó a través de las contribuciones de Fichter y Merlet. Fichter derivó las ecuaciones cinemáticas de la plataforma de Stewart, y formuló las ecuaciones dinámicas de una forma rudimentaria (despreciando la masa de los actuadores y la fricción de las articulaciones). Enumeró unas cuantas configuraciones singulares y realizó varias recomendaciones para la construcción práctica de la plataforma de Stewart, describiendo el proceso de construcción del robot en la Universidad de Oregon. Merlet consideró los aspectos de diseño de la plataforma de Stewart, tratando las diferentes arquitecturas mencionadas anteriormente. Presentó una descripción del prototipo de plataforma de Stewart construida en el INRIA, Sophia-Antipolis, Francia, dando las directrices para solucionar las ecuaciones cinemáticas, desarrollar el Jacobiano, derivar las ecuaciones dinámicas en condiciones más generales que las propuestas

por Fichter y la determinación del espacio de trabajo. También mencionó el potencial de la plataforma de Stewart como sensor de fuerza y como dispositivo de acoplamiento pasivo.

Dadas las principales limitaciones de la plataforma de Stewart en cuanto a espacio de trabajo reducido, dificultad en la resolución de la cinemática directa y complejidad en el diseño mecánico, recientemente se han propuesto diferentes estructuras paralelas con menos grados de libertad. En comparación con un manipulador paralelo de 6 grados de libertad, un manipulador paralelo de menos grados de libertad tiene como ventajas, un diseño mecánico más simple, un bajo coste de fabricación, un espacio de trabajo mayor y un controlador más sencillo.

Particularmente, destaca el desarrollo de manipuladores paralelos con 3 grados de libertad, dados sus potenciales usos en aplicaciones industriales (Clavel, 1988), (Tsai, 1996), (Tsai et al., 1996), (Gosselin and Angeles, 1989), (Karouia and Hervé, 2000). Sin embargo, pocos reportes se tiene en el desarrollo de manipuladores paralelos con 4 o 5 grados de libertad. Esto se debe principalmente, a que los manipuladores de 4 o 5 grados de libertad, no pueden ser construidos empleando cadenas cinemáticas idénticas, como apuntaron Hunt (1983) y Tsai (1998).

Según la estructura cinemática, los manipulantes paralelos de tres grados de libertad, se clasifican en cuatro tipos: planar, esférico, espacial y mixto. Robots paralelos con dos grados de libertad rotacionales y uno trrnslacional han sido propuestos por (Agrawal 1991), (Fang and Huang, 1997), (Lee and Shah, 1987), (Lee and Arjuman, 1991), (Pfreundschuh et al., 1991), (Song and Zhang, 1995), (Waldron et al., 1989). Manipuladores paralelos planares y esféricos han sido estudiados por (Asada and Cro Granito 1985), (Cox and Tesar, 1989), (Gosselin eta al., 1992), (Gosselin and Lavoie, 1993), (Gosselin et al., 1996), (Carretero et al., 2000), (Vischer and Clavel, 2000). Las estructuras mixtas son empleadas como simuladores de movimiento, muñecas en robots híbridos serie-paralelo y en sistemas de mixtos de posicionamiento y orientación (Lee and Shah, 1988), (Waldron et al., 1989), (Carretero et al., 2000), (Di Gregorio and Parenti-Castelli, 2001).

Recientemente, se han presentado varios manipuladores paralelos de 4 grados de libertad con cadenas cinemáticas no simétricas. Hesselbach et al. (1998) desarrolla un manipulador paralelo de 4 grados de libertad, con dos cadenas cinemáticas asimétricas para el corte los paneles convexos de cristal. Lenarcic et al., (2000) utilizaron un mecanismo paralelo de 4 grados de libertad, con una cadena cinemática PS (Prismatic -Spherical) y tres cadenas cinemáticas SPS (Spherical-Prismatic-Spherical), para simular el hombro de un humanoide. Rolland (1999) empleó el concepto de paralelogramo, empleado en el robot Delta, para la construcción de dos manipuladores paralelos de 4 grados de libertad, llamados Kanuk y Manta, respectivamente. Los dos manipuladores poseen un grado de libertad rotacional y tres grados de libertad de translación. Tanev (1998) estudio la cinemática directa de un manipulador paralelo de 4 grados de libertad con una cadena cinemática RPR (Rotational-Prismatic-Rotational) y dos cadenas cinemáticas SPS (Spherical-Prismatic-Spherical). Wang y Gosselin (1988) investigan la cinemática y las singularidades de un robot paralelo de 4 grados de libertad con 4 cadenas cinemáticas RUS (Rotational-Universal-Spherical) y una cadena cinemática RS (Rotational-Spherical) pasiva. Chen et al., (2002) presentó un robot paralelo de 4 grados de libertad, con dos cadenas cinemáticas cerradas PRS (Prismatic-Rotational-Spherical) y dos cadenas cinemáticas PSS (Prismatic-Spherical-Spherical).

Un manipulador con cadenas cinemáticas no simétricas, da lugar a un espacio de trabajo no simétrico, lo cual, puede complicar el planeamiento de la tarea. En este aspecto, varios investigadores han hecho grandes esfuerzos en diseñar manipuladores paralelos de 4 grados de libertad con cuatro cadenas cinemáticas idénticas. Company and Pierrot (1999) presentan un nuevo manipulador paralelo 3T-1R (3 grados de libertad translacional y un grado de libertad rotacional). Pierrot and Company (1999) y Pierrot et al., (2001) investigaron una familia de manipuladores paralelos de 4 grados de libertad (H4) con cadenas cinemáticas idénticas. Utilizaron el principio del paralelogramo para construir dos conjuntos de cadenas cinemáticas. Cada conjunto esta formado por dos cadenas cinemáticas idénticas PUU (Prismatic-Universal-Universal) conectadas a la plataforma móvil por medio de una articulación rotacional común. Zlatanov y Gosselin (2001) proponen una estructura paralela de 4 grados de libertad con cadenas cinemáticas RRRRR(Rotational-R-R-R). Este es el

primer manipulador paralelo de 4 grados de libertad con cuatro cadenas seriales idénticas.

Hasta la fecha, se han propuesto muy pocos manipuladores paralelos de 5 grados de libertad. Wang y Gosselin (1997) investigaron la cinemática y las singularidades de un manipulador paralelo 5 grados de libertad con cinco cadenas RUS (Rotational-Universal-Spherical) y una cadena pasiva US (Universal-Spherical). Lee and Park (1999) investigan la cinemática y la dinámica de un manipulador paralelo de 5 grados de libertad. Merlet et al., (2000) investigaron el problema asociado al planeamiento de trayectorias de una máquina-herramienta de cinco ejes, basada en un manipulador paralelo de 6 grados de libertad. El algoritmo propuesto, hace uso del grado de libertad adicional para la evitar las posiciones singulares. Recientemente, Huang and Li (2002) presentaron dos manipuladores paralelos de 4 grados de libertad y dos manipuladores paralelos de 5 grados de libertad con estructuras idénticas de cada cadena cinemática.

2.1.1 LÍNEAS ACTUALES DE INVESTIGACIÓN

El análisis y desarrollo de nuevas estructuras paralelas, plantea actualmente grandes desafíos tanto en el aspecto teórico como en el aspecto práctico. A continuación se describen los avances y problemas abiertos en las principales líneas de investigación en el campo de los robots paralelos.

2.1.1.1 DISEÑO MECÁNICO

Un problema interesante es encontrar un método para diseñar la arquitectura de un robot paralelo dado el número y el tipo de grados de libertad. Una aproximación a este problema basada en la teoría de grupos fue presentada por Hervé (1992). Usando esta aproximación, el autor ha diseñado un nuevo robot, STAR, con tres grados de libertad traslacionales. Sin embargo queda trabajo por hacer, especialmente en el diseño de robots paralelos que combinen diferentes grados de libertad traslacionales y rotacionales.

2.1.1.2 CINEMÁTICA

Hay que distinguir dos aspectos: la cinemática inversa y la cinemática directa. El problema cinemático inverso, un problema difícil para los robots serie, es sencillo para los robots paralelos. Sin embargo, la cinemática directa es mucho más complicada. En general este problema tiene más de una solución, por ejemplo, la plataforma de Gough tiene 16 posturas diferentes dadas las 6 longitudes de sus actuadores (Merlet, 1989, 1990, 1992). Ronga (1992) demostró que en el caso más general no hay más de 40 soluciones. Algunos algoritmos se han presentado para resolver casos especiales (Merlet, 1992), (Innocenti, 1993), (Angeles, 1992), (Ait and Ahmed, 1993), pero soluciones analíticas solo se han encontrado en arquitecturas muy especiales (Lee, 1993). Ku (1999) propone el análisis del modelo cinemático directo de la plataforma de Stewart empleando el método de Newton-Raphson, mostrando una mayor simplicidad y eficiencia en cuanto a coste computacional comparado con la formulación en forma cerrada. Yang (1999) se centra en el diseño y análisis cinemático de robots modulares paralelos reconfigurables de tres cadenas cinemáticas y 6 grados de libertad. Para la solución del problema cinemático directo utiliza un algoritmo basado en información sensorial de las articulaciones pasivas para simulaciones en línea y el algoritmo de iteración numérica de Newton-Raphson para simulaciones fuera de línea.

Otra forma práctica de resolver la cinemática directa es implementar sensores de posición y de orientación para calcular la postura de la plataforma móvil (Inoue, 1985), (Arai, 1990), (Merlet, 1992). Recientemente Bonev (1999) propone un nuevo método de solución del problema directo usando tres sensores lineales adicionales. La información adicional proporcionada por los sensores reduce el problema a un sistema sobredeterminado de seis ecuaciones cuadráticas con tres incógnitas.

2.1.1.3 ANÁLISIS DE SINGULARIDADES

De forma análoga a los robots serie, los robots paralelos pueden adoptar configuraciones en las que las fuerzas articulares no puedan equilibrar los esfuerzos sobre la plataforma móvil. Es importante determinar estas configura-

ciones en cuya vecindad las fuerzas articulares tienden a infinito y el robot puede colapsar. Un estudio analítico elemental de este tipo de singularidades se puede encontrar en Gosselin y Angeles (1990) donde se denominan como ‘singularidades de segundo tipo’. Estas disposiciones singulares están caracterizadas por la anulación del determinante de la matriz jacobiana inversa. A pesar de que esta matriz sea conocida, en la mayoría de los casos la computación simbólica de este determinante no conduce a soluciones analíticas, por lo que hay que recurrir a procedimientos numéricos (Douady, 1991] o, más eficientemente, procedimientos geométricos para encontrar las configuraciones singulares (Merlet, 1989).

Merlet hizo un extenso uso de la geometría de Grassman para enumerar con detalle las condiciones geométricas singulares de diferentes robots paralelos. Liu et al. (1993) realizaron un estudio geométrico de las singularidades de la plataforma de Stewart, en el que analizaron la matriz jacobiana para cuatro posiciones singulares. Ma y Angeles (1991) mostraron que algunas arquitecturas simétricas de la plataforma de Stewart, presentan singularidades extendidas por todo el espacio del trabajo o regiones importantes dentro del mismo, caracterizadas por la capacidad de movimiento continuo de la plataforma móvil con todos los actuadores bloqueados. A estas singularidades las llamaron singularidades de arquitectura. Aunque estas singularidades dan lugar a serios problemas de control, estas se pueden eliminar en la fase de diseño. Gosselin estudió la asociación del condicionamiento de la matriz de transformación estática con la rigidez de la plataforma de Stewart, donde se perdía rigidez cerca de configuraciones singulares. Un problema que queda por resolver es determinar, de una forma simultánea, si existen configuraciones singulares dentro del espacio de trabajo de un robot paralelo (Sefrioui, 1992). Una completa descripción y caracterización de las singularidades sería parametrizar por completo las hiper-superficies en el espacio de trabajo del robot. Este análisis permitiría establecer las regiones del espacio de trabajo donde las singularidades restringen la maniobrabilidad del robot.

Un punto importante asociado, es la planificación de trayectorias evitando las singularidades. Bhattacharya et al. (1998) desarrollaron un esquema de planificación de trayectorias evitando singularidades, de forma que reestructuraba la planificación en la vecindad de una singularidad. Dasgupta y Mruthunjaya (1998) formularon el problema de la planificación de trayectorias evi-

tando singularidades y desarrollaron una estrategia para planificar entre dos puntos trayectorias bien condicionadas en el espacio de trabajo del robot. Sin embargo, un criterio riguroso sobre la existencia de dichas trayectorias no está todavía disponible. Aracil et al. (2000b) proponen un algoritmo de control de movimiento para la planificación de trayectorias de un robot paralelo de 6 grados de libertad, basado en la plataforma de Stewart, donde se evita el problema de las singularidades comprobando el determinante de la matriz jacobiana en posiciones discretas del camino.

2.1.1.4 ESPACIO DE TRABAJO

En contraste con los robots serie más comunes, con tres ejes intersecantes en la muñeca, en los robots paralelos el espacio de trabajo no se puede desacoplar en dos sub-espacios 3D caracterizando los movimientos de traslación y de orientación. Este acoplamiento hace que la representación del espacio de trabajo de la gran mayoría de los robot paralelos, sólo sea posible en seis dimensiones, lo que dificulta su representación y aun más su uso en aplicaciones prácticas. Ante esto, cabe desglosar el problema en dos: dada una orientación constante, representar el espacio de trabajo de todas las posibles posiciones 3D, o bien, dada una posición representar el espacio de trabajo de las posibles orientaciones (3D). Otra solución es representar algunas proyecciones del espacio de trabajo completo. Una forma usual es representar las posibles traslaciones de la plataforma móvil a una altura y orientación constantes, mediante un procedimiento de discretización (Fichter, 1986), (Arai, 1991) o, más eficientemente, por un algoritmo geométrico (Merlet, 1992), (Gosselin, 1990) que tenga en cuenta los límites de los actuadores, sus interferencias y las restricciones de las articulaciones. Haug (1989) desarrolló una formulación general para el análisis de la destreza y del espacio de trabajo de los manipuladores paralelos en términos de la matriz jacobiana y de las ecuaciones de restricción para la plataforma de Stewart. Masory y Wang (1995) consideraron el problema de determinar secciones del espacio de trabajo incluyendo los límites angulares de las articulaciones y la interferencia de los actuadores.

Aunque la mayoría de los autores estudiaron el espacio de trabajo manteniendo una orientación fija, Merlet (1993) desarrolló un algoritmo para la

representación de todas las posibles rotaciones dentro del espacio de trabajo, alrededor de un punto considerado fijo en la plataforma móvil.

Otro punto interesante desde el punto de vista práctico, es verificar que una trayectoria deseada esté contenida dentro del espacio de trabajo del manipulador. Merlet (1994) propone la inclusión completa de una trayectoria recta en el espacio de trabajo, para una orientación constante y para una variación lineal de los ángulos de orientación. Otro problema interesante es determinar las dimensiones de un robot para que abarque un espacio de trabajo deseado (Merlet, 1995).

2.1.1.5 DINÁMICA

El análisis dinámico de los robots paralelos es complicado dada la existencia de múltiples cadenas cinemáticas cerradas. Diferentes formulaciones han sido propuestas: Dasgupta y Mruthyunjaya, Do y Yang, Guglielmetti y Longchamp y, Tsai y Kholi proponen la formulación de Newton-Euler, Lebret y Liu, Miller y Chavel, Pang y Shahingpoor, proponen la formulación lagrangiana, y por último Miller, Codourey y Burdet, Tsai, Wang y Gosselin, Zang y Song proponen el principio de los trabajos virtuales, todas estas referencias se pueden encontrar en (Tsai, 1999).

Do y Yang (1988) solucionan la dinámica inversa de la plataforma de Stewart empleando la formulación de Newton-Euler. El modelo dinámico propuesto asume que las articulaciones no tienen fricción y que las cadenas cinemáticas son simétricas y delgadas (es decir, despreciando los momentos axiales de inercia). Geng et al. (1992) y Liu et al. (1993) desarrollaron las ecuaciones de movimiento de Lagrange para la plataforma de Stewart, asumiendo ciertas simplificaciones en cuanto a geometría y distribución inercial de la plataforma.

(Dasgupta and Mruthyunjaya, 1998) y (Gosselin, 1996) proponen un modelo dinámico inverso para la plataforma de Stewart, usando la formulación de Newton-Euler. Dasgupta and Mruthyunjaya (1998b) derivaron las ecuaciones de la dinámica en forma cerrada para las plataformas de Stewart 6-UPS y 6-SPS. Más recientemente Liu et al. (2000) proponen las ecuaciones del modelo dinámico directo para la plataforma de Stewart-Gough, empleando las ecua-

ciones de Kane. Este método considera cada cadena cinemática de la plataforma, como una estructura independiente. El sistema de ecuaciones dinámicas, asociado a la plataforma, estaba formado por las ecuaciones dinámicas de las cadenas cinemáticas independientes y el conjunto de las ecuaciones de restricción entre las mismas. Comparado con el tradicional método de Newton-Euler y la formulación de Lagrange, este proceso de modelado era más directo y sistemático, y las ecuaciones dinámicas finales más concisas.

2.1.1.6 CONTROL

El control de los robots paralelos es todavía un campo abierto y los trabajos aportados hasta la fecha no son muy rigurosos. Liu et al. (1990, 1992) discutieron varios aspectos prácticos en relación con el control dinámico de robots paralelos. El análisis es aplicado a una plataforma de Stewart dentro de un centro de mecanizado. Sin embargo, la aplicación de su esquema de control en tiempo real está en duda debido a las intensas tareas computacionales implicadas en la solución de la cinemática directa.

Otra estrategia de control dinámico fue desarrollada por Hatip y Ozgoren (1995). Empleaban una plataforma de Stewart para estabilizar el movimiento de un barco. Wang et al (1995) presentaron un esquema de control basado en redes neuronales y mostraron su superioridad respecto al control cinemático. Harris (1995) empleo el control cinemático y realizo un análisis sobre la eficiencia computacional entre trayectorias helicoidales y trayectorias en línea recta. Además, demuestra que en determinadas situaciones, un movimiento de rotación y traslación del efector final entre dos puntos requería menos movimiento en los actuadores.

En los robots paralelos rápidos, es necesario resolver el modelo dinámico para llegar a un control satisfactorio. Aun no se han establecido soluciones analíticas, pero, se suelen hacer ciertas simplificaciones que permiten simular el comportamiento dinámico de estas plataformas (Seguchi, 1990), (Reboulet, 1991), (Pierrot et al. 1991, 1994), (Do, 1988).

(Reboulet, 1992) y (Arai, 1991) emplean las señales de diferentes sensores de esfuerzo dentro del sistema de control, para una plataforma de Stewart

en aplicaciones de ensamblaje y seguimiento de superficies. La dinámica y el control de plataformas de Stewart teniendo en cuenta la flexibilidad de los actuadores fueron propuestos por Lee y Geng (1993), a través del modelado simplificado de la inercia y la flexibilidad de las cadenas cinemáticas.

2.1.1.7 CALIBRACIÓN

La precisión de un robot paralelo no solo depende del control, sino también del buen conocimiento de sus características geométricas. En función de las tolerancias de fabricación muchos factores intervienen en la precisión del robot. Wang (1993) demostró que en una plataforma de Gough son necesarios 132 parámetros para describir sus características geométricas. Sin embargo mediante un cuidadoso diseño estos parámetros se pueden reducir al conjunto de coordenadas articulares (36 parámetros) y los recorridos de los actuadores (6 parámetros). La calibración de robots paralelos sigue como un problema abierto aunque ha sido tratado (Masory, 1993), (Wampler, 1992).

2.1.2 EL ROBOT DELTA

En este apartado, se llevará a cabo una revisión del estado del arte en cuanto al robot Delta se refiere, dado que su geometría es semejante a la del Sistema RoboTennis.

En los años 80, Reymond Clavel, profesor en EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) irrumpe con la idea brillante de usar paralelogramos para construir una estructura paralela robusta con tres grados de libertad de translación y un rotatorio. Al contrario de las publicaciones científicas hasta el momento, su inspiración era verdaderamente original y no viene de un mecanismo paralelo patentado por Willard L. Pollard en 1942. A esta estructura se le dio el nombre de robot Delta, sin sospechar que al final de siglo, sería uno de los diseños paralelos más acertados con varios cientos de estructuras activas en todo el mundo. En 1999, el Dr. Clavel es premiado con el “Golden Robot Award” (patrocinado por ABB) por su trabajo innovador en el robot paralelo Delta.

En la Figura 2.5, se muestra un esquema mecánico del robot Delta. En ella, se pueden observar las tres cadenas cinemáticas idénticas, que unen la plataforma fija y la móvil, además del brazo central que dota al sistema de un 4º grado de libertad rotativo.

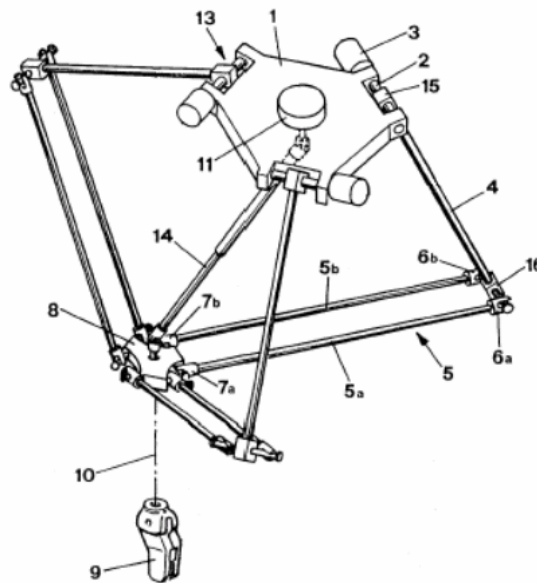


Figura 2.5 Prototipo del robot DELTA patentado en EEUU (1990) por Clavel.
(Patente No. 4.976.582).

La idea básica que estaba detrás del diseño del robot paralelo Delta es el uso de paralelogramos. El uso de tres de estos paralelogramos restringe totalmente la orientación de la plataforma móvil, que permanece con sólo 3 grados de libertad puramente traslacionales. Los acoplamientos de entrada de los tres paralelogramos están montados en ejes rotativos (3) y estos ejes pueden ser actuados:

- mediante motores eléctricos de C.C o C.A, o,
- mediante actuadores lineales.

Finalmente, un cuarto brazo se utiliza para transmitir el movimiento rotatorio de la base a un efector final montado en la plataforma móvil.

El uso de actuadores montados en la base y la escasa masa de los acoplamientos permiten aceleraciones en la plataforma móvil de hasta 50g en entornos experimentales y de 12g en aplicaciones industriales. Esto hace del Delta el perfecto candidato para operaciones de “pick and place” de objetos ligeros (desde 10 gr hasta 1 kg). Los robots Delta disponibles en el mercado tienen un espacio de trabajo cilíndrico con 1 m de diámetro y 0.2 m de altura.

2.1.2.1 EL ROBOT DELTA EN EL MERCADO

La historia del marketing del robot Delta es larga y complicada. Todo comenzó en 1983, cuando los hermanos suizos Marc-Olivier y Pascal Demarex crearon la compañía Demarex con base en Laussane (Suiza). Después de obtener una licencia para el robot Delta en 1987, su mayor objetivo era llegar a comercializar el robot paralelo para la industria del empaquetado (Figura 2.6). Después de varios años, Demarex ocupaba un importante lugar en este mercado. Cuatro versiones eran comercializadas bajo los nombres de: Pack-Place, Line-Placer, Top-Placer, y Presto.



Figura 2.6 El robot Delta en la industria del empaquetado.

La patente del robot Delta fue comprada por los hermanos Demarex de EPFL en 1996. Sin embargo, antes de que se llevara a cabo la transacción, EPFL había vendido ya dos licencias. El primer referente a robots de pequeña dimensión (brazo + paralelogramo <800mm) fue atribuido exclusivamente a Demarex en 1987. El segundo, referente a robots de mayores dimensiones fue vendido a AID y después revendido a DeeMed. Esta compañía, comprada después por la sueca Elekta, se especializa en intervenciones quirúrgicas y diseña el robot Delta para llevar un microscopio pesado (unos 20 Kg), Figura 2.7. La tecnología del robot Delta fue consecuentemente vendida a Medtronic al final de 1999.



Figura 2.7 El robot Delta en aplicaciones quirúrgicas.

Antes de la transacción de SurgiScope, Elekta IGS inició negociaciones acerca de la licencia de su Delta con el grupo ABB de Zurich. Como resultado, ABB obtuvo una licencia para fabricar robots Delta de grandes dimensiones. Al mismo tiempo, Demarex anunció su decisión de producir robots de mayo-

res dimensiones (entorno a 1200 mm). Sin embargo, Demarex no puede producir robots de mayor tamaño, ya que la compañía tiene la obligación de no entrar en el mercado de dimensiones superiores a 1200 mm.

Demarex también dio licencia a la compañía japonesa Hitachi Seiki para fabricar robots Delta de pequeñas dimensiones, para empaquetado (DELTA) y para perforación (PA35), Figura 2.8. De hecho, Hitachi Seiki representa a Demarex en Japón.



Figura 2.8 Robots Delta de Hitachi-Seiki.

ABB Flexible Automation, lanzó su robot Delta en 1999 bajo el nombre **IRB 340 FlexPicker** (Figura 2.9). Tres sectores de la industria eran su objetivo: el alimentario, farmacéutico y las industrias electrónicas. El FlexPicker está equipado con un sistema de vacío capaz de transportar objetos de un punto a otro con un peso de más de 1 Kg. El robot está guiado con un sistema de visión diseñado por Cognex y un controlador S4C de ABB. Las velocidades alcanzables con este sistema son de 10 m/s y 3.6 grados/s (unos 150 movimientos por minuto), y unas aceleraciones de hasta 100 m/s² y 1.2 rad/s². El robot está dis-

ponible en dos versiones, una de las cuales es sellada, resistente a la corrosión y diseñada para su uso en ambientes extremadamente limpios.



Figura 2.9 Robot Delta IRB 340 FlexPicker (ABB).

Después de más de quince años como única empresa en el mercado, Demarex se encontró repentinamente con la decisión del gigante sueco ABB de entrar en este mercado. En un intento de asegurar su estabilidad a largo plazo, Demarex cambió su línea de producción y comenzó a fabricar robots con células completas. Sin embargo, con el objetivo de hacerse con un mercado mundial, el “pequeño” Demarex comenzó a buscar un socio. Y tanto es así, que a finales de 1999, Demarex fue adquirido por el grupo suizo SIG.

El grupo SIG está formado por tres ramas, una de las cuales (rama de empaquetado) emplea ella sola cerca de 2000 trabajadores, lo que convierte a SIG en una compañía lo suficientemente grande como para atender la necesidad de Demarex de acceder al mercado mundial. Demarex mantiene su nombre y a sus dos fundadores. Actualmente, se están fabricando tres modelos diferentes del Delta ofrecidos por “SIG Pack Systems”, mientras que los modelos C23 y C33 son fabricados por Demarex, el modelo CE33 es fabricado por “SIG Pack Systems”, Figura 2.10.

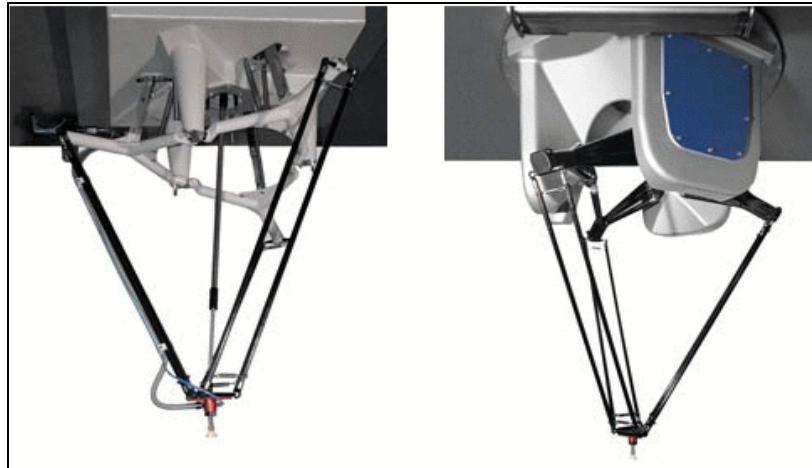


Figura 2.10 Robots Delta, modelos C33 y CE33 fabricados por SIG.

2.1.2.2 EL ROBOT DELTA A NIVEL ACADÉMICO

El diseño del robot Delta ha atraído gran interés no sólo en el mundo de la industria sino también en laboratorios académicos. Un gran número de variantes han sido propuestas pero la mayoría de esos prototipos son muy similares al modelo original. Uno de estos robots modificados fue construido en la Universidad de Maryland (Stamper et al, 1998). Otra versión modificada fue construida en la Universidad de Génova. En esos diseños los paralelogramos son sustituidos por mecanismos equivalentes.

Otra versión más optimizada (**NUWAR**), está en construcción en el Departamento de Mecánica y Materiales de la Universidad de Australia Occidental (UWA), Figura 2.11. Este robot forma parte de la próxima generación de los robots paralelos y cuando esté terminado se espera que sea el más rápido del mundo. El diseño del NUWAR está basado en el robot Delta 4, capaz de alcanzar aceleraciones de hasta 500 m/s^2 , y su configuración trae consigo mejoras en dos aspectos: El espacio de trabajo, y la rigidez que presenta el sistema (Miller, 1995, 1996).

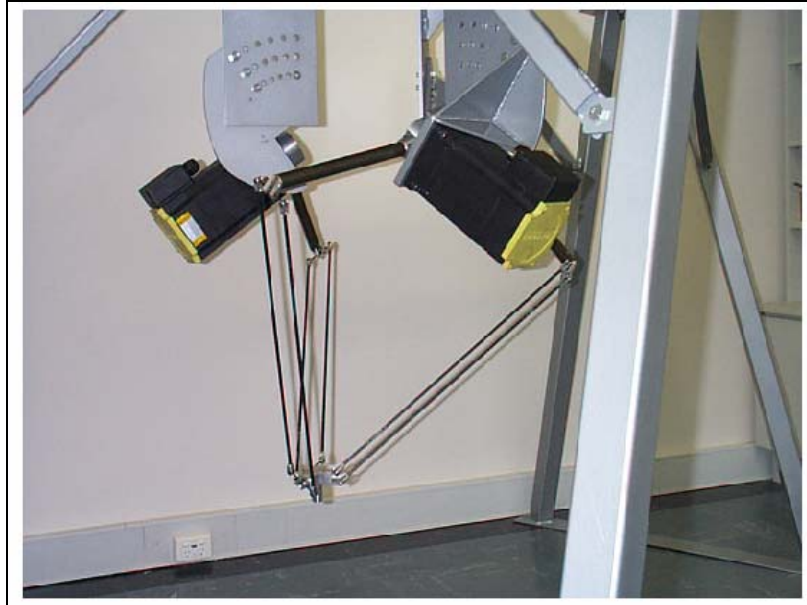


Figura 2.11 Robot NUWAR.

Tres versiones del robot Delta con motores lineales, han sido construidas en Ferdinand-von Steinbeis Schule, ETH Zurcú, y la Universidad de Stuttgart. Otras versiones lineales fueron fabricadas para la realización de proyectos de final de carrera en la Universidad de Michigan.

Como es natural, la mayor parte de los miembros de la familia de robots Delta se encuentra en su lugar de nacimiento, l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Además varias estructuras Delta (Delta 720 y Microdelta 240), han sido construidas por el grupo de robótica paralela dirigido por el profesor Reymond Clavel.

2.1.3 APLICACIONES DE LOS ROBOTS PARALELOS

La realización práctica de prototipos para robots paralelos, ha surgido en función de los desarrollos de su cinemática y dinámica. La gran precisión en el posicionamiento y orientación de la plataforma, ha propiciado su aplicación en muñecas para brazos manipuladores (Arai, 1993) (Innocenti, 1993). Los seis

grados de libertad hacen que su aplicación sea atractiva en simuladores de vuelo para los que fueron originalmente usados, simuladores de movimientos ecuestres, aplicaciones de realidad virtual.

A pesar de lo reciente que es el concepto de robots paralelos, varios laboratorios han propuesto prototipos muy interesantes (Fichter, 1986), (Arai, 1990). Deben ser mencionados los robots paralelos desarrollados por MEL en Japón: uno de los cuales es un micro manipulador cuyos actuadores lineales tiene un rango de trabajo de pocos micrómetros y permiten realizar movimientos de nanómetros (Arai, 1993) y otro es un gigantesco manipulador para la industria minera (Nakashima, 1992).

El primer robot paralelo comercial, el “Gadfly”, un manipulador de 6 grados de libertad para el ensamblado de componentes electrónicos, fue diseñado por Marconi (Marconi, 1985). Posteriormente esta compañía diseñó un gran robot híbrido serie-paralelo, el “Tetrabot” (Marconi, 1986). Otro prototipo interesante es el robot paralelo desarrollado por Fanuc para tareas de soldadura en la industria del automóvil, Figura 2.12.



Figura 2.12 Robot paralelo FANUC, empleado en tareas de soldadura.

Especial mención merecen los prototipos para la cirugía oftalmológica (Merlet et al., 1991), (Grace et al., 1993), el joystick esférico desarrollado por Gosselin et al. (1998) en Canadá por la Universidad de Laval (Figura 2.13), y el uso de una clásica plataforma de Gough para la manipulación de cargas de hasta 230 kg, con alta repetitibilidad, en el European Synchrotron Radiation Facility (ESRF).

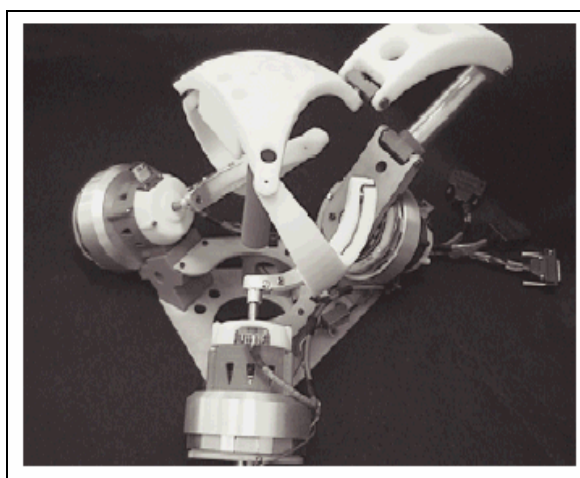


Figura 2.13 Joystick esférico de la Universidad de Laval (Canadá).

Recientemente están apareciendo numerosas aplicaciones y desarrollos de los robots paralelos. La tendencia es la aplicación en estaciones de mecanizado, aunque continúan los desarrollos en las primeras aplicaciones en simuladores de vuelo, y empiezan a aparecer más aplicaciones específicas, tales como el diseño de muñecas en brazos manipuladores, y el diseño de maestros y esclavos en aplicaciones de teleoperación.

La Cyber Air Base (C.A.B.) mostrada en la Figura 2.14, ha sido desarrollada por VIRtogo. Se usa como simulador de vuelo y para la producción de videojuegos por entidades tales como la Nasa, Universidad de Yale, SEGA. La plataforma requiere alimentación eléctrica e hidráulica para alzarse y sufrir procesos de aceleración que son automáticamente controlados desde la silla.



Figura 2.14 Cyber Air Base.

El robot F-206 Hexapod construido por Physik Instrumente, tiene como aplicación principal la micromanipulación. Es un sistema de microposicionamiento provisto de seis grados de libertad y una resolución de $0.1 \mu\text{m}$. El software utilizado es Labview (drivers y librerías), Simulation Tools Terminal Software que se comunica con el robot utilizando los puertos serie RS-232 (Figura 2.15).

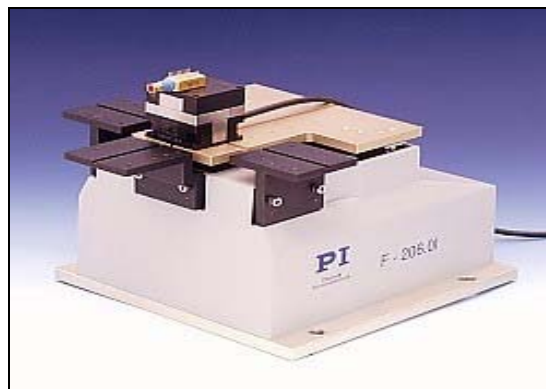


Figura 2.15 F-206 Hexapod.

AUGUST Company ha diseñado y construido un simulador de movimiento de un barco (Figura 2.16). El sistema permite al usuario simular físicamente el movimiento de cualquier nave.

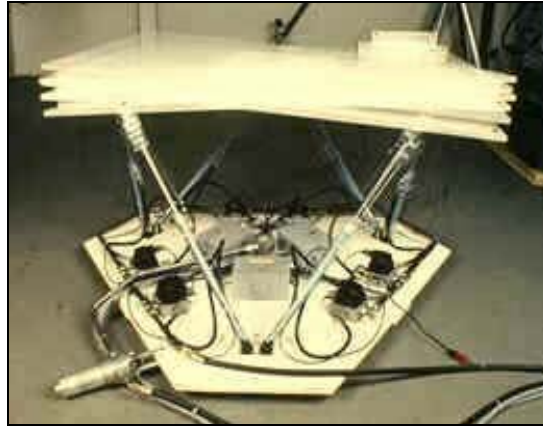


Figura 2.16 Simulador de movimiento de barcos.

La Plataforma Deltalab EX 800 (Figura 2.17), es una maqueta de seis grados de libertad con la que se puede estudiar el comportamiento de mecanismos complejos como los empleados, en aviones comerciales, simuladores de vehículos con motor, herramientas de maquinaria, montajes dinámicos de cámaras cinematográficas, robots o grandes telescopios astronómicos.



Figura 2.17 Delta Lab EX 800.

El robot F-100i de Fanuc, Figura 2.18, es un mecanismo paralelo de seis grados de libertad, de una alta precisión. La fabricación del robot de una alta rigidez se plasma en su capacidad de carga 140 Kg en dirección vertical, y

75 Kg en desplazamientos horizontales. El cuerpo compacto del robot permite instalarlo en espacios reducidos. Las aplicaciones del robot son manipulación y ensamblaje.

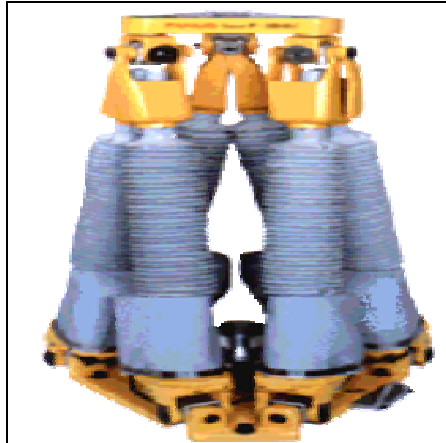


Figura 2.18 Fanuc F-100i.

El robot Hexabot de seis grados de libertad, es un robot que combinado con una máquina tradicional de mecanizado da lugar a una máquina CNC, que puede producir piezas de una alta calidad, con una fácil programación y configuración, Figura 2.19.



Figura 2.19 Hexabot.

Un prototipo basado en la plataforma Stewart y empleado en aplicaciones de tele-manipulación, Figura 2.20, fue desarrollado entre Pacific Northwest National Laboratory y DARPA. Sobre el prototipo se investiga alternativas en el diseño de los robots manipuladores. Los componentes del sistema en el manipulador esclavo son todos de alimentación neumática y, unos sensores colocados en la base del maestro controlan la tele-operación. Este sistema se diseñó con la intención de proveer al operador con el mismo rango de movimientos y grados de libertad que el ser humano. El prototipo puede moverse a la velocidad de un brazo humano y cargas de 5 a 7.5 Kg.

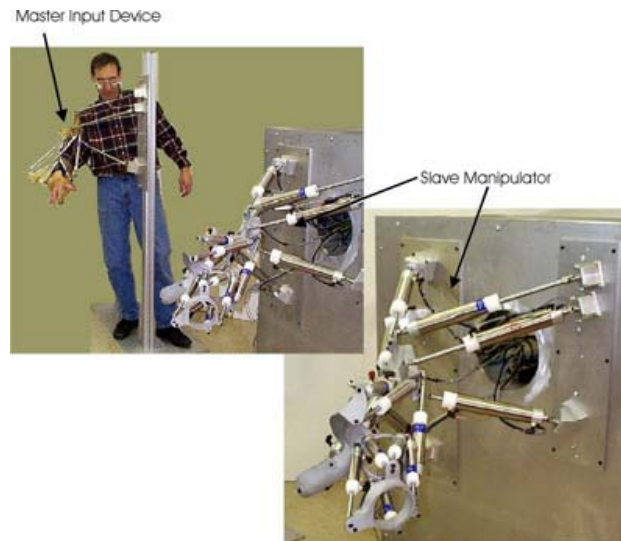


Figura 2.20 Plataforma de Stewart para Tele operación.

(Pierrot et al, 1991) propone un robot paralelo rápido de 6 GDL, el “HEXA” cuya estructura paralela esta basada en el robot DELTA, Figura 2.21. El robot construido por Tohoku University (Japón) está formado por seis cadenas cinemáticas ligeras e idénticas, compuestas por una varilla, y dos uniones esféricas. La base del robot HEXA es fija y los seis motores están colocados en ella. Cada motor maneja una cadena cinemática y actúa directamente sobre ella. Cada cadena cinemática posee tres articulaciones aunque solo una de ellas es activa, la que está unida a la base, mientras que el resto son articulaciones pasivas. Dichas cadenas proporcionan los seis grados de libertad activos que posee el robot.

Los motores seleccionados son DM1015B, de la empresa Yokogawa Precisions, tienen un par máximo de 15 N·m, y una velocidad máxima de 2.4 rps. Cada motor está equipado con un encoder óptico de alta precisión. Se usa un sensor adicional para medir el par que efectúa el extremo del robot con la superficie sobre la que actúa.

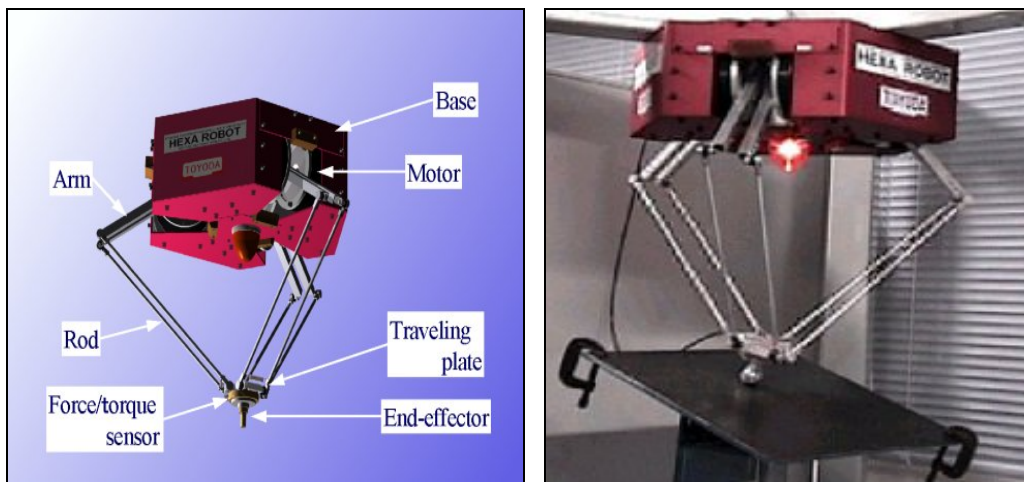


Figura 2.21 Robot HEXA.

Por último, comentar las recientes aplicaciones de los robots paralelos como robots móviles (Saltarén et al., 1999), (Aracil et al., 1999). Un ejemplo de ello, se muestra en la Figura 2.22, donde se propone el uso de la plataforma de Stewart como robot trepador, para el mantenimiento de palmeras y estructuras cilíndricas alargadas (Almonacid et al., 2003).



Figura 2.22 Robot paralelo trepador.

2.2 ESTADO DEL ARTE DEL CONTROL VISUAL DE ROBOTS

La comunidad científica internacional ha desarrollado un importante esfuerzo desde que Shirai and Inoue (1973) describiera como un bucle de realimentación visual puede ser usado para incrementar la precisión de la posición de un robot y Hill et al., (1979) introdujera el término *Visual Servoing*. Durante la década de los ochenta y principio de la década de los noventa, se realizan algunas investigaciones pioneras en las que la información visual de la escena ayuda a la realización de tareas robotizadas. En 1981, Geschke (1981) describe la tarea de inserción de un tornillo utilizando la información proveniente del sistema de visión estereoscópico con una frecuencia de obtención de las características de la imagen de 10Hz. En 1984, Weiss (1984) propone el uso de un control adaptativo a sistemas de servo control visual basado en las características de la imagen. Presenta simulaciones para distintos manipuladores de hasta 3 grados de libertad.

Sin embargo no ha sido hasta la presente década cuando los desarrollos han alcanzado resultados satisfactorios, debido principalmente al espectacular avance de los equipos especializados en tratamiento de imágenes. Aunque inicialmente se planteo la posibilidad de que el sistema sensorial suministrase información directa a los controladores del robot, en la actualidad se ha optado mayoritariamente por un control orientado a tarea. De esta forma se aísla al sistema de visión de los problemas de las singularidades cinemáticas del robot (Chieaverini et al., 1991).

En 1996, Hutchinson et al.,(1996) recogen en su artículo las distintas aplicaciones en las que se utiliza el servo control visual hasta ese instante. De igual forma Corke and Paul (1989a), (1989b) describen un sistema capaz de posicionar un robot de 2 grados de libertad paralelo a una superficie plana mediante un esquema de control basado en las características de la imagen. Se utiliza un control independiente para cada uno de los ejes y no se hace uso de un generador de trayectorias. En trabajos posteriores analiza lo efectos dinámicos inherentes al servo control visual de un robot (Corke, 1991), (Corke et al., 1992). Chaumette et al., (1989, 1991) describen los resultados obtenidos en el posicionamiento de un robot utilizando un objeto que dispone de cuatro círculos pintados sobre su superficie cuyos centros son las características de la imagen que realimentan el lazo de control

Durante los últimos años, la investigación y estudio en relacionar los sistemas de visión y los sistemas robotizados de una forma homogénea y completa ha adquirido notable importancia. Se presentan en la actualidad numerosos desarrollos que no están todavía resueltos como: estrategias de control o diseño de controladores (Tarbouriech, 2000), (Cadenat et al., 1999), relaciones no lineales entre los pares a aplicar al robot y las características de la imagen (Sun and Doeschner, 1999), combinar sistemas sensoriales (servo control visual y realimentación de esfuerzos) (Baeten et al., 1999), cámara montada en el extremo del robot frente a cámara observando el extremo del robot o ambos sistemas cooperando (Flandy et al., 2000).

Adicionalmente hay aplicaciones en las que la variabilidad del entorno añade un alto grado de incertidumbre al mismo, dotándole de movimiento no previsto, pero que debe ser conocido por el sistema de control, para la correcta realización de la tarea encomendada. En éste ámbito es donde se centra la pre-

sente propuesta, cuando se trabaja en entornos dinámicos predecibles (se puede estimar la trayectoria aproximada de los objetos), ya sea de forma automática o como ayuda a la teleoperación.

En la actualidad, los sensores visuales son elementos cada vez mas frecuentes en las aplicaciones robóticas. Su principal ventaja es que permiten obtener una descripción del entorno bastante completa de una forma no intrusiva. Se puede decir, que facilitan la integración de dispositivos robóticos en entornos menos estructurados y dinámicos que los que se encuentran en las aplicaciones clásicas de automatización.

La interacción entre sistemas de visión y sistemas robóticos ha sido y es objeto de gran interés en la investigación de los últimos años. Tiene especial relevancia, las aplicaciones en las que el manipulador tiene que interactuar con objetos estáticos o móviles, cuya localización o perfil de movimiento no sea conocido, como es el caso de la presente tesis doctoral.

El objetivo del control visual es la integración en tiempo real de las informaciones visuales obtenidas por una o varias cámaras en el bucle de control del robot para gobernar su movimiento. Los primeros trabajos sobre sistemas de control en bucle abierto se describen en (Rosen, 1976), (Tani, 1977). La precisión obtenida dependía directamente de la exactitud de los modelos utilizados y de la calidad de la calibración de las cámaras y del robot.

Se ha adoptado extensamente el principio del bucle cerrado para mejorar el rendimiento de los sistemas. Los primeros trabajos en este sentido se deben a Shirai e Inoue, que describen y realizan una tarea de ensamblado en (Shirai, 1973). Los sistemas de control visual pueden clasificarse, de manera general, según dos criterios (Sanderson, 1980):

- la utilización o no de un bucle interno
- el espacio de control

En caso de que el sistema no posea bucle interno, el sistema de visión proporcionará directamente una estimación del estado articular del robot al controlador. La estabilización se realiza únicamente a través de la salida al sistema de visión (Sanderson, 1983). En este caso, el sistema debe proporcionar una esti-

mación del estado con una frecuencia elevada. Este esquema de control se ha utilizado poco a causa de la excesiva influencia de las perturbaciones sobre la estimación en tiempo real del estado (Bishop, 1994). Weiss utiliza esta estructura para controlar un robot planar de tres grados de libertad cuyas articulaciones son observadas por una cámara en (Weiss, 1987). Se encuentra la misma estructura en (Wijesoma, 1993) para un robot de dos ejes. Se han realizado también trabajos de este tipo con robots de seis grados de libertad (Hashimoto, 1993b), (Gangloff, 2000).

En el caso de que el sistema de control sea jerárquico (utilización de un bucle interno), el sistema de control proporciona una consigna al controlador del robot, que calcula los desplazamientos a realizar en el espacio articular por medio de un bucle cerrado interno que estabiliza el sistema. Al utilizar esta estructura, la frecuencia del proceso puede ser la proporcionada por vídeo en tiempo real de 40 ms. El proceso de visión y el sistema robótico están claramente separados, lo que permite una mayor portabilidad y simplicidad de los procesos de control visual. Para un estudio del rendimiento dinámico de esta estructura se puede leer (Corke, 1993).

El segundo punto que caracteriza los esquemas de control se refiere al tipo de información visual utilizada para definir la señal de error a regular. Desde este punto de vista, se pueden distinguir tres clases de métodos:

- control visual basado en posición, o control visual 3D, donde, a partir de primitivas extraídas de la imagen, y mediante un modelo del objeto a controlar o un conjunto de imágenes de la escena, se determina la posición y la orientación de la cámara con respecto a un marco de referencia. El error entre la configuración deseada y la configuración actual se expresa en el espacio de trabajo del robot.
- control visual basado en imagen, o control visual 2D, donde la ley de control se expresa directamente en el espacio de coordenadas de la cámara.
- control visual híbrido o control visual 2D1/2, resultado del trabajo desarrollado en IRISA (Malis, 1998), (Malis, 1999) y estudiado después

por (Morel, 2000) y (Camillo, 2000). En este caso, el error a regular se compone tanto de información 3D como de información 2D.

Los sistemas de control visual pueden también clasificarse en función de la posición de las cámaras:

- cuando la cámara no está unida mecánicamente al robot controlado por visión, se habla de control visual con cámara separada. La cámara se sitúa de modo que pueda observar el efector final del robot (Flandin, 2000), o la configuración articular del robot (Ruf, 2000), o bien que pueda observar simultáneamente el efector final del robot y objetos de interés presentes en el espacio de trabajo (Horaud, 1998). La cámara puede estar fija o bien montada sobre otro sistema mecánico (Marchand, 2001).
- cuando la cámara está montada sobre el efector final del robot, se habla de control visual con cámara en mano. Esta configuración es la más extendida (Hashimoto, 1993a), (Hutchinson, 1996). Se estudiará este tipo de configuración durante esta tesis, si bien la mayoría de los resultados puede extenderse a la configuración con cámara fija.

2.2.1 CONTROL VISUAL: VISTA GENERAL

Se pueden aplicar numerosos tipos de control a sistemas provistos de cámaras. Algunos controles tienen en cuenta la dinámica del robot (Rives, 1997), (Koibo, 1991), (Nelly, 1996), (Chiang, 1997), (Tarbouriech, 2000). En (Gangloff, 1999), (Gangloff, 2000), se aplica un control de tipo GPC al seguimiento rápido de en el espacio de la cámara con una arquitectura de control directo (sin bucle interno de regulación de las posiciones articulares del robot).

Una gran parte de los trabajos se centran en el control cinemática y consideran el robot como un integrador perfecto. En (Zanne, 2000), se aplica un control en modo pasante al seguimiento de una trayectoria cartesiana de la cámara. En este caso, la trayectoria de la cámara se define simplemente como una línea recta entre su posición inicial y su posición final. Se proponen controles por retorno de estado no lineales y por posición de polos en (Martinet, 1999) y

(Papanikolopoulos, 1991), respectivamente. En (Weiss, 1987) se propone un control adaptativo. Se describen controles de tipo LQ o LQG basados en la minimización de un criterio cuadrático tiempo-energía en (Hashimoto, 1996), (Smith, 1997). Se propone un control por retorno de estado continuo y no estacionario para robots no holonómicos en (Tsakiris, 1998).

Los controles de tipo proporcional, que permiten garantizar un error exponencialmente decreciente, son los más comunes en el dominio del control visual (Chaumette, 1990), (Hager, 1997), (Hashimoto, 1997), (Martinet, 1996), (Hutchinson, 1996).

La formulación de la función de la tarea permite construir de manera simple leyes de control directamente en el espacio de las cámaras. Esta formulación ha sido adaptada a los problemas del control visual en los trabajos de tesis descritos en (Chaumette, 1990). Esta técnica de control puede tener en cuenta la dinámica del sistema. En la sección siguiente, se verá cómo la aplicación de este enfoque para el establecimiento de un control en velocidad, son tener en cuenta la dinámica del robot, permite idealmente una disminución exponencial de un error bien elegido.

2.2.2 DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA TAREA

En la formulación desarrollada en (Samson, 1991), se considera el caso de que las tareas robóticas a realizar pueden expresarse bajo la forma de una regulación a cero sobre un horizonte temporal finito de una función de la tarea, $\mathbf{e}(\mathbf{q}, t)$, que expresa el error entre la configuración deseada y la configuración actual:

$$\mathbf{e}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{C}(\mathbf{x}^*(t) - \mathbf{x}(\mathbf{q}, t)) \quad (2.1)$$

donde:

- \mathbf{q} representa el vector de coordenadas articulares del robot

- \mathbf{C} es una matriz de dimensión $n \times m$, donde n es el número de grados de libertad que se desean controlar y m es la dimensión del vector de medidas. Esta matriz se conoce como **matriz de combinación**, y permite tener en cuenta una eventual redundancia de la información
- \mathbf{x} es el **vector de medidas** obtenido a partir de la información visual actual
- $\mathbf{x}^*(t)$ es la trayectoria deseada de $\mathbf{x}(t)$ (en lo sucesivo, se empleará el término **consigna** para designar a $\mathbf{x}^*(t)$).

El problema de la regulación de la función de la tarea está bien planteado si \mathbf{e} posee ciertas propiedades. En particular, debe existir, por una parte, una trayectoria ideal y única de \mathbf{q} tal que la función de la tarea sea nula a cada instante sobre el horizonte temporal, y por otra parte, el jacobiano de la tarea:

$$\mathbf{J}_e = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{q}} \quad (2.2)$$

debe ser regular en torno a esta trayectoria. Ésta es la propiedad de admisibilidad de la función de la tarea.

En el marco del control visual, es también necesario que las primitivas visuales permanezcan observables a lo largo del tiempo. En el caso de control visual 2D, esto implica que un número suficiente de primitivas visuales permanezca dentro del campo de visión de la cámara: ésta es la condición de visibilidad. En el caso de los controles visuales 2D1/2 y 3D, se requiere simultáneamente que la condición de visibilidad se respete y que la estimación de primitivas 3D sea realizable sobre el horizonte temporal. En general, estas condiciones no se consideran explícitamente en la elaboración de las leyes de control. Como resultado, la elección de la función de la tarea condicionará significativamente la observabilidad.

La formulación de la función de la tarea permite manejar fácilmente los grados de libertad no constreñidos por la tarea definida en la ecuación (2.1) a fin de conseguir un objetivo secundario. En efecto, realizar la tarea \mathbf{e} (tarea

principal) no siempre requiere la utilización de todos los grados de libertad del robot. Para un mejor uso de toda la funcionalidad de éste, es posible definir una tarea secundaria que se pre-multiplica por el operador de proyección ortogonal sobre el núcleo de \mathbf{J}_e (a fin de que la tarea secundaria no afecte a la principal). La tarea secundaria puede consistir en la navegación alrededor de un objeto (Berry, 2000), en evitar las singularidades del robot (Marchand, 1996), las paradas articulares (Marchand, 1996), (Chaumette, 2000b], los obstáculos y ocultamientos (Marchand, 1998) u otros obstáculos (Cadenat, 1999). En (Flandin, 2000), se utiliza una tarea secundaria para controlar la traslación de una cámara montada sobre un brazo manipulador observado por una segunda cámara. Téngase en cuenta, sin embargo, que la utilización de una tarea secundaria sólo es posible cuando no se utilizan todos los grados de libertad del robot para la realización de la tarea principal.

Como ya se ha indicado, los métodos de control visual pueden distinguirse según el espacio de control de los movimientos de la cámara. Esto se traduce en la elección del vector \mathbf{x} en la función de la tarea.

2.2.3 REALIZACIÓN DE UN CONTROL EN VELOCIDAD

La variación del vector de estado \mathbf{x} en función del tensor cinemático de la cámara $\boldsymbol{\tau}_c$ juega un papel principal en la elaboración de una ley de control visual. Se considera el vector de estado \mathbf{x} como una función diferenciable de \mathbf{r} (pose de la cámara), su derivada puede entonces describirse de manera general como:

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = \mathbf{L}_x \boldsymbol{\tau}_c + \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} \quad (2.3)$$

donde \mathbf{L}_x expresa la relación entre la velocidad de la cámara y las variaciones del vector de estado \mathbf{x} . En el caso de que \mathbf{x} esté definido a partir de primitivas 2D, \mathbf{L}_x se conoce como matriz de interacción. Del mismo modo, se puede definir el jacobiano de la tarea \mathbf{J}_t que relaciona las variaciones de la función de la tarea con las variaciones de la posición de la cámara:

$$\mathbf{J}_t = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{r}} \quad (2.4)$$

Si la matriz de combinación \mathbf{C} no depende explícitamente de \mathbf{r} , la matriz de interacción y el jacobiano de la tarea se relacionan por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{J}_t = \mathbf{C}\mathbf{L}_x \quad (2.5)$$

Considérese ahora la función de la tarea \mathbf{e} bajo la forma de la ecuación (2.1). Si se desea un comportamiento exponencialmente decreciente con una constante de tiempo λ de la función de la tarea \mathbf{e} , considerando únicamente la cinemática del robot, esto se traduce en la siguiente ecuación diferencial de orden 1:

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e} \quad (2.6)$$

Por otra parte, la derivada temporal de la función de la tarea viene dada por:

$$\dot{\mathbf{e}}(\mathbf{q}, t) = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} \quad (2.7)$$

la cual se puede escribir como:

$$\dot{\mathbf{e}}(\mathbf{q}, t) = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} \quad (2.8)$$

El término $\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{q}}$ puede descomponerse en un producto de dos jacobianos:

- el jacobiano que relaciona el tensor cinemático de la cámara $\boldsymbol{\tau}_c$ con la velocidad del efector final del robot. El tensor puede obtenerse en la fase de calibración (Rémy, 1998), (Andreff, 2001).

- el jacobiano que expresa la relación entre la velocidad del efector final del robot y la velocidad articular del robot: ésta es la matriz jacobiana del robot.

Se supondrá a continuación que estas dos matrices son perfectamente conocidas e invertibles. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que los esquemas de control que unen la planificación de trayectorias en el espacio de la cámara y el control visual 2D son robustos frente a errores de calibración porque los controles visuales en la imagen son poco sensibles cuando las configuraciones inicial y deseada están próximas (Espiau, 1995). El jacobiano $\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{q}}$ se notará como \mathbf{J} , y corresponde a la matriz jacobiana del robot. Esta matriz caracteriza la relación entre la velocidad de la cámara y la velocidad articular del robot:

$$\boldsymbol{\tau}_c = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (2.9)$$

Se considerará que \mathbf{J} es suficientemente conocida, con lo que se buscará un control que defina la tensor cinemático de la cámara $\boldsymbol{\tau}_c$. La ecuación (2.8) puede escribirse de la siguiente forma:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{J}_t \boldsymbol{\tau}_c + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} \quad (2.10)$$

Según las ecuaciones (2.6) y (2.10) el tensor cinemático de la cámara puede expresarse como:

$$\boldsymbol{\tau}_c = -\mathbf{J}_t^{-1} \left(\lambda \mathbf{e} + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} \right) \quad (2.11)$$

En la práctica, sólo las estimaciones (que se distinguirán de los valores reales mediante el símbolo $\hat{}$) del jacobiano de la tarea y de $\frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t}$ pueden ser utilizadas en la ecuación anterior: la ley de control calculada será entonces:

$$\boldsymbol{\tau}_c = -\hat{\mathbf{J}}_t^{-1} \left(\lambda \mathbf{e} + \frac{\hat{\partial} \mathbf{e}}{\partial t} \right) \quad (2.12)$$

Introduciendo esta última ecuación en (2.8), se llega a:

$$\dot{\mathbf{e}} = -\mathbf{J}_t \hat{\mathbf{J}}_t^{-1} \left(\lambda \mathbf{e} + \frac{\hat{\partial} \mathbf{e}}{\partial t} \right) + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} \quad (2.13)$$

lo que permite obtener la siguiente condición suficiente de decrecimiento de $\|\mathbf{e}\|$:

$$\mathbf{J}_t \hat{\mathbf{J}}_t^{-1} > 0 \Leftrightarrow \mathbf{CL}_x \left(\mathbf{CL}_x \right)^{-1} > 0 \quad (2.14)$$

2.2.4 ELECCIÓN DE LA CONSIGNA

La definición de la consigna $\mathbf{x}^*(t)$ es un problema primordial para la construcción de la función de la tarea. Los métodos más habituales de la literatura consideran una consigna fija $\mathbf{x}^*(t) = \mathbf{x}^*$. Esta elección necesita la utilización de leyes de control que estabilicen globalmente el sistema a fin de garantizar la convergencia de la función de la tarea. Además, en presencia de errores del modelo y cuando el desplazamiento a efectuar es considerable, las trayectorias obtenidas pueden estar muy alejadas de las esperadas. Por consiguiente, es difícil controlar las trayectorias efectuadas e integrar las restricciones. Ha de tenerse en cuenta también que las propiedades de estabilidad global en presencia de errores de modelado sólo han sido establecidas por esquemas de control 3D y 2D1/2 bajo ciertas hipótesis. Para el 3D, en (Zanne, 2000) se estudia el efecto de los errores de calibración sobre un algoritmo particular de estimación de la pose de la cámara (Tsai, 1986). Bajo la hipótesis fuerte de que los errores de calibración conducen a un error limitado en posición, se obtiene un control en modo pasante que estabiliza el sistema. En (Camillo, 2000) se obtienen resultados sobre los límites de estabildades en presencia de errores de calibra-

ción de la cámara y de la relación efector final - cámara de un control visual 3D, bajo la hipótesis de que la matriz de homografía en el infinito pueda medirse durante toda la fase de control. En (Malis, 1998) se utiliza la misma hipótesis para obtener los límites de estabilidad de controles visuales 2D1/2.

La consigna (fija) se obtiene generalmente bien fijando a priori la posición de la cámara o bien por aprendizaje. En el primer caso, cuando las informaciones 2D son necesarias, se obtienen utilizando un modelo preciso de la escena y de la cámara aplicando las ecuaciones de proyección perspectiva. Las informaciones 3D las establece el usuario, y son obtenidas en distintas posiciones utilizando matrices de relación conocidas. Este método requiere un conocimiento perfecto del sistema de visión y del objeto de interés para obtener una consigna que sea físicamente realizable y que se corresponda con el objetivo marcado.

En el segundo caso, el método consiste en efectuar un aprendizaje experimental de la consigna. En primer lugar el robot se lleva a la configuración deseada y se adquiere la imagen correspondiente. A continuación se obtiene el vector x^* aplicando los métodos utilizados para el cálculo del estado actual x . Este método tiene sobre el primero la ventaja de que proporciona una consigna que se corresponde efectivamente con el objetivo marcado aún en presencia de eventuales errores de modelado. Por ello, este método se adapta mejor a los problemas que se plantean en el control visual.

A continuación se diferenciarán los distintos esquemas de control visual según el espacio en que se efectúa la regulación de la tarea. Se verá que los controles en los que la función de la tarea se obtiene directamente al usar la información extraída de la imagen son los que mejor se adaptan a la problemática del control visual.

2.2.4.1 CONSIGNA EN EL ESPACIO DE LA IMAGEN

Se habla de control visual 2D cuando el vector de medidas x se compone únicamente de información extraída de la imagen. En este caso, el vector x se llamará s para utilizar una notación estándar. Se considerará también que

la información visual sólo depende de la situación de la cámara en el instante t . La función de la tarea a regular se escribe entonces como:

$$\mathbf{e}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{C}(s^*(t) - s(r(t))) \quad (2.15)$$

Se pueden utilizar distintos tipos de información extraída de la imagen. La mayoría de los trabajos de control visual 2D se basan en la utilización de coordenadas de puntos en las imágenes (Feddema, 1989), (Chaumette, 1990), (Papanikolopoulos, 1993), (Hager, 1997). Se ha comprobado que el uso de estas primitivas puede ser problemático en algunos casos (Chaumette, 1998). Pueden utilizarse otras primitivas geométricas, como rectas (Chaumette, 1990), (Andreff, 2000), cilindros o elipses (Chaumette, 1990). Para objetos más complejos, pueden utilizarse también momentos centrales de superficies (Bien, 1993), (Welles, 1996), descriptores de Fourier (Welles, 1996), (Collewet, 1999), o los invariantes proyectivos en (Hager, 1994). En (Colombo, 1999), (Drummond, 1999), las escenas complejas se tratan suponiendo que los píxeles de la imagen sufren una transformación afín durante el desplazamiento del robot (lo cual es una hipótesis bastante fuerte). En el caso de que las primitivas geométricas no puedan ser extraídas con facilidad de la imagen, pueden elegirse informaciones de tipo movimiento (Sundareswaran, 1994), (SantosVictor, 1997, (Crétual, 1998a), (Crétual, 1998b), (Crétual, 2000).

En todos los casos, el comportamiento del sistema controlado dependerá fuertemente de las informaciones visuales elegidas (Hashimoto, 1998), (Chaumette, 1998), de su número y configuración (Michel, 1993), (Hashimoto, 1998), y también del punto de vista desde el que son observadas (Sharma, 1995), (Nelson, 1996).

Una vez elegidas las informaciones visuales \mathbf{s} , el cálculo del control hace intervenir una estimación del jacobiano de la tarea, que viene dado por:

$$\hat{\mathbf{J}}_t = \mathbf{C}\hat{\mathbf{L}}_s$$

donde \mathbf{C} es la matriz de combinación y $\mathbf{L}_s = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}}$. Ésta última matriz depende de \mathbf{s} , pero también, en general, de los parámetros intrínsecos de la cámara y de ciertos parámetros geométricos de la escena observada. Se encontrarán un método general de cálculo para esta matriz y su expresión para ciertas primitivas geométricas en (Chaumette, 1990).

De ahora en adelante se tratarán primitivas de tipo punto. Para un punto de coordenadas en píxeles $\mathbf{p} = [u \ v \ 1]$, obtenido de la proyección en el plano de la imagen de un punto tridimensional \mathbf{M} de coordenadas $\mathbf{M} = [X_c \ Y_c \ Z_c]^T$ en el espacio de la cámara, la matriz de interacción vendrá dada por:

$$\mathbf{L}_p(Z_c) = \mathbf{a} \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z_c} & 0 & \frac{x}{Z_c} & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & -\frac{1}{Z_c} & \frac{y}{Z_c} & (1+y^2) & -xy & -x \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

con:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \alpha_u & \alpha_{uv} \\ 0 & \alpha_v \end{bmatrix} \quad y \quad \mathbf{m} = [x \ y \ 1]^T = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{p}$$

Cuando \mathbf{s} está compuesta por las coordenadas de n puntos \mathbf{p}^j de la imagen, la matriz de interacción correspondiente vendrá dada por:

$$\mathbf{L}_s(\mathbf{Z}_c) = \left[\mathbf{L}_{p^1}^T(Z_c^1) \ \cdots \ \mathbf{L}_{p^n}^T(Z_c^n) \right]^T \quad (2.17)$$

donde $\mathbf{Z}_c = \begin{bmatrix} Z_c^1 & \cdots & Z_c^n \end{bmatrix}^T$.

La ley de control y su condición de estabilidad hacen intervenir la matriz de combinación y una estimación de la matriz de interacción. En general, la elección de \mathbf{C} está ligada a la elección de la matriz de interacción.

La elección más habitual consiste en escoger una matriz de combinación igual a la identidad $\mathbf{C} = \mathbf{I}_m$. En este caso, la condición de estabilidad será:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{L}_s \hat{\mathbf{L}}_s^+ > 0 \quad (2.18)$$

Si se es capaz de estimar con una precisión suficiente el valor actual de la matriz de interacción, se estará cerca del comportamiento deseado, dado por la ecuación (2.1). En este caso, para que la tarea sea admisible, es necesario que el vector \mathbf{s} sea de dimensión seis. Desgraciadamente, la elección de seis informaciones 2D tales que ciertas configuraciones de la cámara no entrañen una pérdida de rango de la matriz de interacción y/o no conduzcan a un mínimo global no deseado de la función de la tarea, permanece como un problema abierto. En el caso en que el vector \mathbf{s} sea de dimensión superior a seis, la función de la tarea ya no será admisible. Esto implica que ciertas trayectorias de las primitivas en la imagen, impuestas por el control, no corresponden a un desplazamiento realizable por el robot. La estimación de la matriz de interacción, a partir de esta elección para \mathbf{C} , puede obtenerse de diversas maneras:

- utilizando una formulación de diferencias finitas de la matriz de interacción y estimándola experimentalmente efectuando una serie de movimientos incrementales conocidos y cuyas repercusiones en la imagen serán medidas (Hosoda, 1994), (Jägersand, 1997), (Suh, 1993), (Domingo, 1996), (Wu, 1997). Este método no necesita un modelo del objeto a controlar, pero resulta imposible estudiar la estabilidad del control.
- calculando la matriz de interacción, dada por su forma analítica, en cada iteración del bucle de control. Esta matriz depende del tipo de primitiva elegido para efectuar el control, y hace aparecer parámetros 3D que pueden estimarse si son conocidos el modelo del objeto a controlar (Hashimoto, 1991) o el desplazamiento de la cámara (Feddem, 1990),

Papanikolopoulos, 1994). Téngase en cuenta que esta elección puede llevar al sistema a alcanzar un mínimo local no deseado y/o una singularidad en la matriz de interacción (Chaumette, 1998).

A fin de tener en cuenta la redundancia de informaciones, la matriz de combinación puede ser elegida como igual a una estimación de la pseudoinversa de la matriz de interacción en la convergencia $\hat{\mathbf{L}}_{s^*}^+$ (Espiau, 1992). En este caso, la tarea es admisible. Como antes, son posibles diferentes elecciones para la matriz de interacción estimada:

- puede ser estimada en cada iteración del bucle de control de la misma manera que para una matriz de combinación elegida igual a la identidad.
- puede ser tomada como constante y tal que $\hat{\mathbf{L}}_s = \hat{\mathbf{L}}_{s^*}$. La trayectoria de las primitivas de la imagen estará en este caso menos restringida que en el caso anterior; dichas primitivas pueden eventualmente salirse del campo de visión de la cámara. El jacobiano estimado de la tarea $\hat{\mathbf{J}}_t$ vale entonces la identidad, y el estudio de la estabilidad se reduce al estudio del signo del jacobiano de la tarea real dado por $\hat{\mathbf{J}}_t = \hat{\mathbf{L}}_{s^*}^+ \mathbf{L}_s$. En el caso ideal de que $\hat{\mathbf{L}}_{s^*} = \mathbf{L}_s$, este tipo de control es estable en el entorno de la posición deseada, y realiza un desacoplamiento del bucle cerrado. Éste será el caso que se tratará, por ser el mejor adaptado para el seguimiento de la trayectoria tomando $\hat{\mathbf{L}}_{s^*} = \mathbf{L}_{s^*(t)}$. Se realizará entonces un control estable en el entorno de cada punto de la trayectoria planificada, y un desacoplamiento del bucle cerrado.

En (Hashimoto, 1993c) la matriz de combinación es elegida igual a la transpuesta de la matriz de interacción en la convergencia. La matriz de interacción puede ser elegida tal que $\hat{\mathbf{L}}_s = \mathbf{L}_{s^*}^{T+}$. El jacobiano estimado de la tarea $\hat{\mathbf{J}}_t$ vale de nuevo la identidad, y el estudio de la estabilidad se reduce al estudio del signo del jacobiano de la tarea real, dado por $\hat{\mathbf{J}}_t = \hat{\mathbf{L}}_{s^*}^T \mathbf{L}_s$. En el caso ideal

en que $\hat{\mathbf{L}}_{s^*} = \mathbf{L}_{s^*}$, este tipo de control es estable en el entorno de la posición deseada puesto que $\mathbf{J}_t = \hat{\mathbf{L}}_{s^*}^T \mathbf{L}_s > 0$, pero no realiza un desacoplamiento en el bucle cerrado.

El estudio analítico del dominio de convergencia y de la robustez de las leyes de control 2D es problemático en razón de la complejidad de las ecuaciones que intervienen en la condición de estabilidad. Sin embargo, para ciertos casos simples, se han obtenidos resultados en (Espiau, 1995). Se puede observar experimentalmente la convergencia de este tipo de control aún en presencia de importantes errores de modelado cuando el desplazamiento a efectuar no es importante. De hecho, este tipo de control está muy bien adaptado al seguimiento de la trayectoria en el espacio de la imagen.

2.2.4.2 CONSIGNA EN EL ESPACIO CARTESIANO

Cuando el vector de medida \mathbf{x} está compuesto únicamente por informaciones que caracterizan la situación de la cámara en el espacio de trabajo del robot, se habla de control visual 3D. El control de la cámara se realiza entonces en el espacio cartesiano. La ecuación (2.1) se escribe como:

$$\mathbf{e}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{C}(\mathbf{x}^*(t) - \mathbf{x}(\mathbf{s}(\mathbf{r}), t)) \quad (2.19)$$

A excepción de los trabajos descritos en (Martinet, 1996), donde el vector \mathbf{x} está compuesto por coordenadas de puntos 3D expresados en una referencia ligada a la cámara, las informaciones \mathbf{x} describen la pose de la cámara (Wilson, 1996), (Martinet, 1996), (Martinet, 1997), (Martinet, 1999), (Daucher, 1997), (Rizzi, 1996), (Fagerer, 1994). El vector \mathbf{x} es entonces una parametrización de la posición \mathbf{r} de la cámara. El vínculo entre las variaciones de esta parametrización y las variaciones de \mathbf{r} está dado por la matriz de interacción

$$\mathbf{L}_x = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{r}} \quad \text{con} \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{L}_x \boldsymbol{\tau}_c .$$

Seis informaciones son suficientes para caracterizar de manera unívoca la situación de la cámara dentro de su entorno. La matriz de combinación pue-

de entonces ser elegida igual a la identidad. El estudio de la estabilidad del control se reduce entonces al estudio del signo de la matriz $\mathbf{L}_x \hat{\mathbf{L}}_x^+$.

En condiciones ideales se obtienen fácilmente las condiciones de estabilidad del control a causa de la forma particularmente simple de las matrices de interacción. Sin embargo, en presencia de errores en los modelos (objeto a controlar, cámara...) o de ruidos en las medidas, el modelado del bucle cerrado es muy difícil. Esta dificultad aparece claramente cuando se expresa explícitamente la dependencia de la matriz de interacción con las primitivas extraídas de la imagen \mathbf{s} permitiendo despejar el vector \mathbf{x} :

$$\mathbf{L}_x = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{s}} \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}} = \mathbf{J}_{xs} \mathbf{L}_s \quad (2.20)$$

El segundo término de esta expresión no es otro que la matriz de interacción ligada a \mathbf{s} y puede, en general, obtenerse de manera analítica. Por el contrario, el primer término es en general desconocido, y está directamente ligado al método utilizado para la obtención del estado \mathbf{x} :

- si para reconstruir la escena 3D se utiliza un método numérico iterativo (Yuan, 1989), (Lowe, 1991), (Dementhon, 1995), (Tsai 1986), (Martinet, 1996), se hace imposible expresar \mathbf{J}_{xs} y estudiar la estabilidad del sistema en presencia de eventuales errores de modelado. Para obtener ciertos resultados, se debería trabajar bajo hipótesis más fuertes (Zanne, 2000). Esto sería cierto para los métodos que utilizan para reconstruir la escena 3D el filtro de Kalman, extendido o no (Wilson, 1996), (Wunsch, 1997). De igual manera se hace notar que estos métodos necesitan un modelo 3D del objeto de interés.
- si para reconstruir la escena 3D se utilizan los métodos que provienen de la geometría epipolar (Faugeras, 1988), entonces, por una parte, el modelo del objeto ya no será necesario (Basri, 1998), y, por otra parte, podrán obtenerse resultados sobre la estabilidad del sistema en presencia de errores de modelado (Camillo, 2000), pero bajo la hipótesis de

que la matriz de homografía en el infinito sea medible en cada iteración del bucle de control.

En la práctica, la etapa de reconstrucción de las informaciones tridimensionales entraña una fuerte sensibilidad de este tipo de control a los ruidos en las medidas. Esto es particularmente cierto cuando la reconstrucción se obtiene a partir de matrices fundamentales o de homografía, ya que su estimación es muy sensible al ruido. Esto puede ser muy crítico cerca de la convergencia. Por lo tanto, este tipo de esquema parece estar mal adaptado a seguimientos de la trayectoria, puesto que en este contexto la medida actual permanece cercana a la situación deseada en cada instante.

En resumen, el control de los movimientos del robot en su espacio de trabajo permite obtener trayectorias muy satisfactorias del efector final. En contrapartida, este tipo de regulación no permite el control de las trayectorias de las primitivas en la imagen, por lo que éstas pueden perfectamente salirse del campo de visión de la cámara y hacer fallar el control.

2.2.4.3 CONSIGNA EN EL ESPACIO DE LA IMAGEN Y EN EL ESPACIO CARTESIANO

Cuando el vector de medidas \mathbf{x} está compuesto a la vez de informaciones tridimensionales y de primitivas extraídas de la imagen, se habla de control híbrido o control 2D1/2. En este caso las informaciones tridimensionales, como para los controles 3D, pueden obtenerse utilizando o bien el modelo del objeto a controlar en un método iterativo (Cervera, 1999), (Corke, 2000), (Morel, 2000) o bien varias imágenes de la escena (imágenes actual y deseada) (Malis, 1999). Tal esquema de control reúne a la vez un control de la trayectoria de la cámara dentro de su espacio de trabajo y un control de la trayectoria de ciertas primitivas en la imagen. De esta manera, el objeto de interés tiene una gran probabilidad de permanecer dentro del campo de visión de la cámara. Además, como en el caso de los controles 3D, seis informaciones son suficientes para controlar los seis grados de libertad de la cámara. La matriz de combinación puede ser elegida igual a la identidad, y la condición de estabilidad es $\mathbf{L}_x \hat{\mathbf{L}}_x^+ > 0$. La matriz de interacción y por lo tanto la condición de estabilidad tienen una forma sencilla.

Se han podido obtener resultados formales sobre la estabilidad y la robustez frente a errores de modelado en el caso de informaciones 3D estimadas a partir de la matriz de homografía relativa a un plano de referencia (Malis, 1998).

Se hace notar, sin embargo, que este tipo de esquema necesita la estimación del desplazamiento de la cámara en cada iteración del bucle de control. Esta fase puede resultar delicada para ciertas configuraciones. Esta etapa es particularmente penalizante cerca de la convergencia (a causa de la sensibilidad al ruido en la medida). Además, aunque con este método se podría asegurar que un cierto número de primitivas (en general, una única primitiva visual) permanece en la imagen, es imposible garantizar la observabilidad de la tarea durante todo el control (es decir, que un número suficiente de primitivas visuales permanezca dentro de la imagen para estimar los parámetros 3D).

2.3 CONCLUSIONES

En esta sección se han presentado las principales líneas de investigación en el campo de los robots paralelos, así como las principales técnicas que permiten la realización de tareas robóticas a partir de información visual.

La elección de un robot de estructura paralela para el Sistema RoboTennis es una consecuencia de sus ventajas con respecto a los robots series, y de los altos requerimientos temporales en cuanto a velocidad y aceleración para la ejecución de la tarea propuesta. Se ha presentado la evolución de las diferentes arquitecturas paralelas con diferentes grados de libertad, y se ha hecho hincapié en la estructura DELTA, en la cual esta inspirada el Sistema RoboTennis.

En cuanto a las estrategias de control visual, las técnicas de control visual 3D necesitan del conocimiento del objeto observado. La etapa de la estimación de los parámetros 3D puede ser crítica, en particular cuando los parámetros de la cámara o el modelo del objeto son erróneos. Además, la restricción de la visibilidad es difícil de integrar en la estructura de control. Las trayectorias de las informaciones visuales dentro de la imagen pueden ser inadecuadas.

cuadas, puesto que los movimientos del robot son controlados directamente dentro del espacio de trabajo. Por el contrario, el control directo de los desplazamientos del robot en el espacio cartesiano permite obtener trayectorias muy satisfactorias del efector final.

Las técnicas de control visual híbrido necesitan igualmente una fase de estimación del desplazamiento. Ésta se efectúa en general utilizando varias imágenes de la escena. En este caso, el modelo del objeto a controlar no es necesario. Como para los controles 3D, esta etapa puede resultar crítica cuando las posiciones inicial y deseada están muy próximas (a causa de los inevitables ruidos en la medida) y por lo tanto cerca de la convergencia. En esta técnica, una parte de la señal de error se obtiene directamente de la imagen, lo que permite mejorar la observabilidad de la tarea sin llegar a garantizarla.

Las técnicas de control visual 2D permiten tener en cuenta más directamente la restricción de la visibilidad, puesto que la señal de error se obtiene directamente a partir de la información extraída de la imagen. Sin embargo, el objeto de interés puede salirse de la imagen durante el control cuando los errores de modelado o el desplazamiento a efectuar son importantes. Además, la trayectoria del efector final del robot dentro de su espacio de trabajo no está del todo controlada, permaneciendo ésta imprevisible (o por lo menos suboptimizada), y puede conducir a un fallo del control. Cuando las configuraciones inicial y deseada son próximas, este tipo de métodos aparecen como muy eficaces. En particular, se hacen notar su estabilidad y robustez frente a errores de modelado. En el contexto del seguimiento de trayectorias este punto es primordial, puesto que el objetivo es que la medida actual permanezca razonablemente cerca de la consigna actual. El aspecto muy local de este método puede ser plenamente explotado en el curso de un seguimiento de trayectoria.

En resumen, las técnicas de control visual son un campo abierto de investigación y en continua evolución, prueba de ello, los avances en seguimiento de objetos (Bachiller, 1999), (Acosta et al., 2004), soluciones a posibles singularidades en el plano de imagen (García, 2005), (García et al., 2005), planeamiento de trayectorias en el plano de la imagen (Mezouar and Chaumette, 2000), el control visual-fuerza (Pomares, 2004), problemas de estabilidad local (Chaumette, 1998), problemas de robustez (Malis, 2003), (Kragick, 2001), entre otros.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL SISTEMA ROBOTENIS

3.1 INTRODUCCIÓN

La cinemática estudia los movimientos que puede realizar un mecanismo sujeto por un lado, a las restricciones geométricas del mismo, y por otro, a las restricciones que imponen las articulaciones que unen los cuerpos que lo constituyen. El análisis cinemático resuelve dos problemas, el problema cinemático inverso y el problema cinemático directo. La cinemática inversa permite determinar los valores de las coordenadas articulares, a partir de una posición y orientación del efector final dada. El problema cinemático directo, permite calcular la posición y orientación del efector final dadas las coordenadas articulares.

Si bien, el análisis cinemático en el espacio de sistemas mecánicos con un elevado número de grados de libertad ya implica cierta complejidad, el

hecho de que el sistema mecánico incluya cadenas cinemáticas cerradas (robots paralelos), lo acentúa mucho más. De hecho, un problema sencillo en robots serie como es la cinemática directa, es complicado en los robots paralelos y viceversa.

La matriz jacobiana es una matriz de transformación lineal que proporciona la transformación de la velocidad del efector final en el espacio cartesiano a las velocidades de las articulaciones actuadas. La matriz jacobiana proporciona información sobre el comportamiento del manipulador; y su estudio es útil, en la generación de trayectorias, en el análisis de singularidades, y en la definición de índices empleados para optimizar el diseño del manipulador, entre otros.

En este capítulo se presenta el análisis cinemático el Sistema RoboTennis. Este análisis permite resolver el problema cinemático inverso, el problema cinemático directo y plantear la matriz jacobiana del robot. Además, se introduce el entorno de simulación en ADAMS empleado a lo largo de esta tesis, y que permite validar tanto los modelos cinemáticos como el modelo dinámico del robot. Finalmente, se presentan resultados de las simulaciones empleando Lenguaje C y ADAMS, que permiten verificar el modelo cinemático del manipulador.

3.2 MODELO DE SIMULACIÓN EN ADAMS

La simulación de sistemas robotizados esta íntimamente ligada a la potencia computacional de los procesadores de cálculo. El gran avance producido con los microprocesadores actuales, ha permitido el desarrollo de diferentes paquetes de simulación dinámica capaces de simular el comportamiento dinámico de casi cualquier mecanismo multicuerpo. En esta tesis, el modelo de simulación para el Sistema RoboTennis es construido en ADAMS, un software comercial empleado para la simulación dinámica de sistemas multicuerpo, fabricado por Mechanical Dynamics Inc.

Normalmente, el desarrollo de cualquier modelo en ADAMS es un proceso tedioso que implica un tiempo considerable, sobre todo en los casos de

optimización, en los que el diseño de un prototipo requiere de numerosas modificaciones del modelo de simulación. Para el Sistema RoboTennis, las librerías desarrolladas en ADAMS permiten construir el modelo de simulación en un tiempo relativamente corto, reduciendo considerablemente el tiempo de simulación y validación empleado en el proceso de diseño. El entorno de trabajo y el modelo conceptual del robot en ADAMS se muestran en la Figura 3.1.

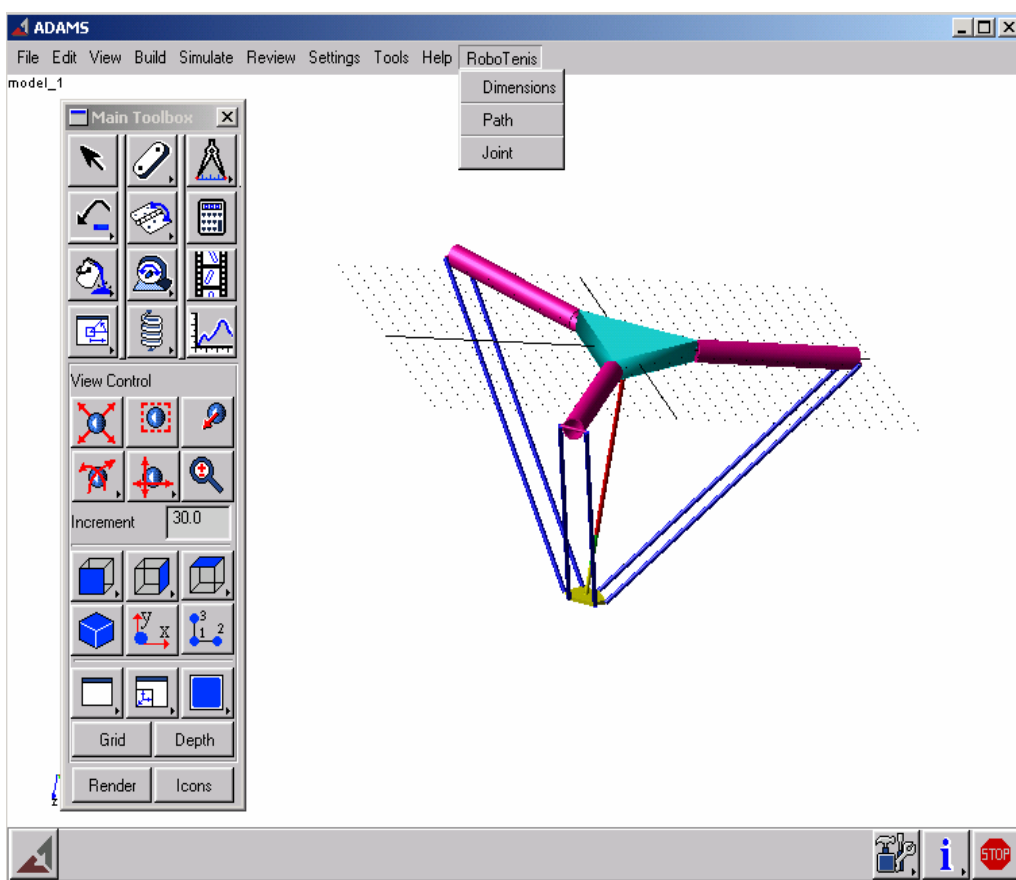


Figura 3.1 Entorno de trabajo y modelo de simulación del Sistema RoboTennis en ADAMS.

La librería llamada **RoboTennis**, está ubicada en la barra de herramientas del espacio de trabajo de ADAMS y permite tres opciones: **Dimensions**, **Path** y **Joint**. El menú *Dimensions*, genera un modelo de simulación para unas

dimensiones determinadas de la estructura mecánica del manipulador; y los menús *Path* y *Joint*, permiten asignar a cada actuador del modelo de simulación, un perfil de movimiento con unas características deseadas de posición, velocidad y aceleración para el efector final del robot. El perfil de movimiento se obtiene a partir de un generador de trayectorias en el espacio cartesiano y del modelo cinemático inverso del manipulador. La librería **RoboTenis** desarrollada en ADAMS se presenta con detalle en el **Anexo 1**.

3.3 MODELO GEOMÉTRICO

El modelo geométrico del robot se desarrolla a partir de la Figura 3.2. El sistema de referencia global $\Sigma (X, Y, Z)$ está ubicado sobre el centro de la plataforma fija, con el eje z perpendicular a la misma y el eje x perpendicular al eje del motor 1. Un segundo sistema de coordenadas $\Sigma_{eff} (X_{eff}, Y_{eff}, Z_{eff})$ es colocado en el centro de la plataforma móvil y representa la posición operacional del robot con respecto al sistema Σ .

Dada la triple simetría del robot, cada cadena cinemática (brazo + antebrazo) puede ser tratada por separado. Las longitudes de cada brazo y antebrazo son L_a y L_b , respectivamente. Sobre cada brazo, se selecciona un sistema de coordenadas $\Sigma_i (X_i, Y_i, Z_i)$ localizado a una distancia R del sistema de referencia global Σ , y rotado un ángulo θ_i (0° , 120° y 240°).

Las articulaciones ubicadas en los sistemas Σ_i son activas y sus posiciones articulares se representan por α_i . Las articulaciones en los puntos B_i y C_i son pasivas. Los radios de las plataformas fija y móvil son R y r , respectivamente.

De la Figura 3.3, los parámetros geométricos del robot son ($i = 1,2,3$):

$$\|\Sigma \Sigma_i\| = R, \quad \|\Sigma_{eff} B_i\| = r, \quad \|B_i C_i\| = L_b, \quad \|\Sigma_i C_i\| = L_a. \quad (3.1)$$

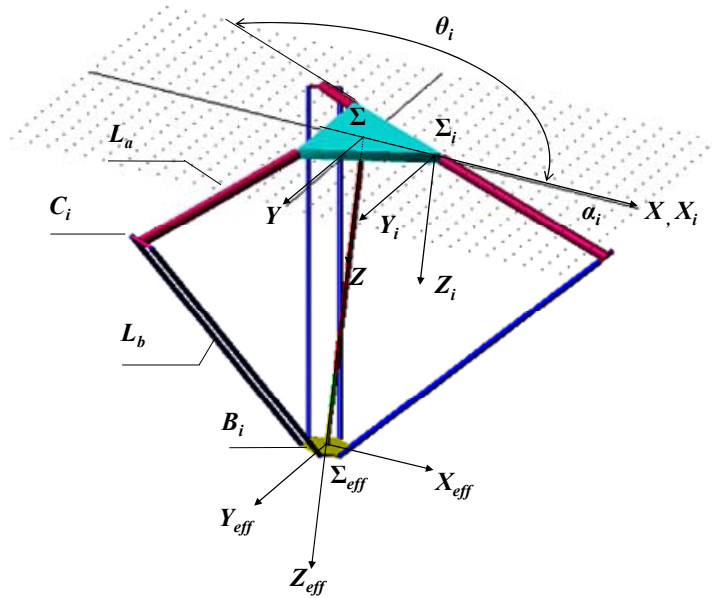


Figura 3.2 Modelo geométrico del robot.

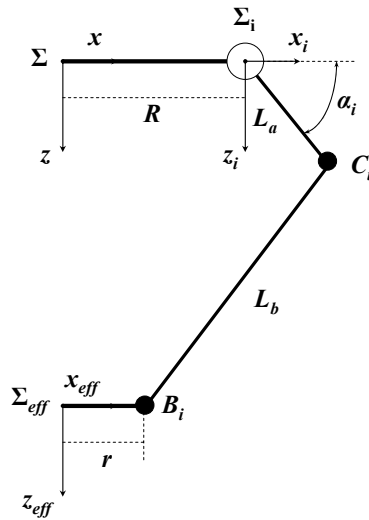


Figura 3.3 Parámetros geométricos del robot.

La ecuación cinemática para cada cadena, está dada por la relación vectorial:

$$\mathbf{B}_i \mathbf{C}_i = \mathbf{C}_{i\Sigma} - \mathbf{B}_{i\Sigma}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.2)$$

donde, $\mathbf{C}_{i\Sigma}$ y $\mathbf{B}_{i\Sigma}$ representan los vectores de posición de las articulaciones esféricas no actuadas \mathbf{C}_i y \mathbf{B}_i , con respecto al sistema de referencia global Σ .

La ecuación (3.2) puede ser expresada en términos de los parámetros geométricos del robot (3.1) y de la posición espacial de la plataforma móvil (x , y , z) con respecto al sistema de referencia global Σ , como

$$\mathbf{B}_i \mathbf{C}_i = {}^\Sigma R_{\Sigma_i} \begin{bmatrix} L_a \cos(\alpha_i) \\ 0 \\ L_a \sin(\alpha_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta r \cos(\theta_i) \\ \Delta r \sin(\theta_i) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.3)$$

donde, $\Delta r = R - r$, y ${}^\Sigma R_{\Sigma_i}$ es la matriz de rotación entre los sistemas Σ_i y Σ .

Considerando los antebrazos como cuerpos rígidos y de longitud constante, las ecuaciones de restricción para el robot están dadas por:

$$\|\mathbf{B}_i \mathbf{C}_i\|^2 = L_b^2, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.4)$$

las cuales pueden ser expresadas como

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = L_b^2, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.5)$$

con,

$$\begin{aligned} x_i &= (\Delta r + L_a \cos(\alpha_i)) \cos(\theta_i), \\ y_i &= (\Delta r + L_a \cos(\alpha_i)) \sin(\theta_i), \\ z_i &= L_a \sin(\alpha_i). \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.4 MODELO CINEMÁTICO INVERSO

El modelo cinemático inverso encuentra los ángulos de entrada al robot (α_i) para una posición dada del punto Σ_{eff} . El modelo usa el resultado encontrado por Clavel (1991). En este caso, la ecuación (3.5) representa una esfera de radio L_b , centrada en B_i , la cual da el lugar geométrico de C_i . Una segunda restricción es impuesta por la trayectoria circular de C_i centrada en Σ_i y con radio L_a :

$$(x - R)^2 + z^2 = L_a^2. \quad (3.7)$$

El punto C_i se localiza sobre la intersección de la esfera (3.5) y el círculo (3.7) en el plano

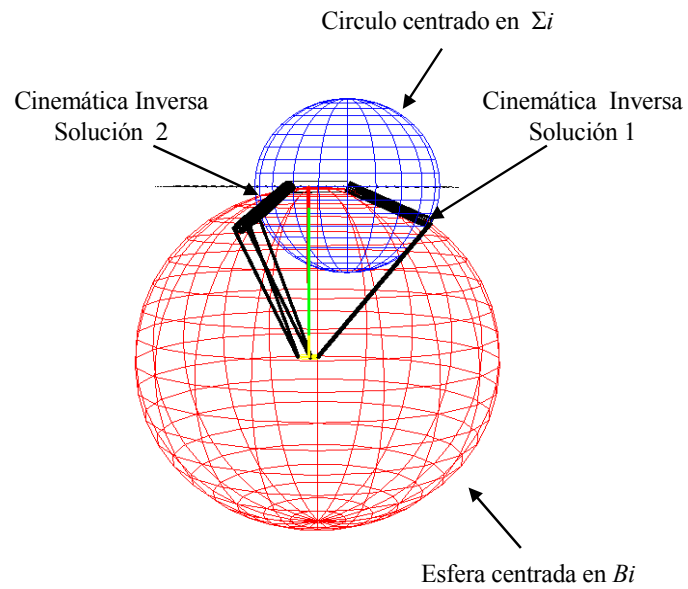
$$y = 0. \quad (3.8)$$

Las ecuaciones (3.5), (3.7) y (3.8) generan una ecuación cuadrática en x , necesaria para encontrar

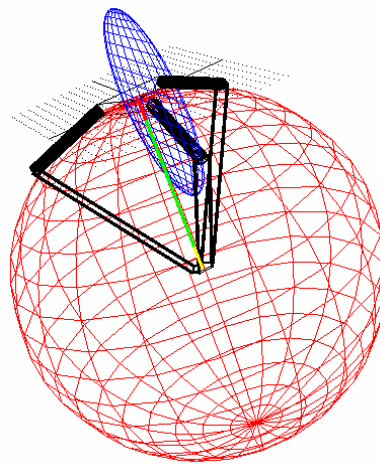
$$\alpha_i = \text{Sin}^{-1}\left(\frac{z}{L_a}\right). \quad (3.9)$$

La ecuación (3.9) define dos posibles soluciones para cada articulación. Solo una de ellas puede ser alcanzada físicamente por el manipulador, como se muestra en la figura 3.4. Este resultado permite concluir que existen ocho soluciones posibles del modelo cinemático inverso para una posición operacional dada (Figura 3.5). Con el fin de evitar singularidades y asegurar una realización práctica, la elección de cada posición articular está sujeta a las siguientes condiciones geométricas:

Si	$x - R \geq 0$	α_i esta dada por la ecuación (3.9),
y si	$x - R < 0$	α_i es corregida por $\alpha_i = \pi - \alpha_i$.



(a)



(b)

Figura 3.4 Posibles soluciones del modelo cinemático inverso para la articulación $i=1$. Intersección de la esfera (3.5) centrada en B_i y del círculo (3.7) centrado en Σ_i .
(a) Vista Frontal, (b) Vista isométrica.

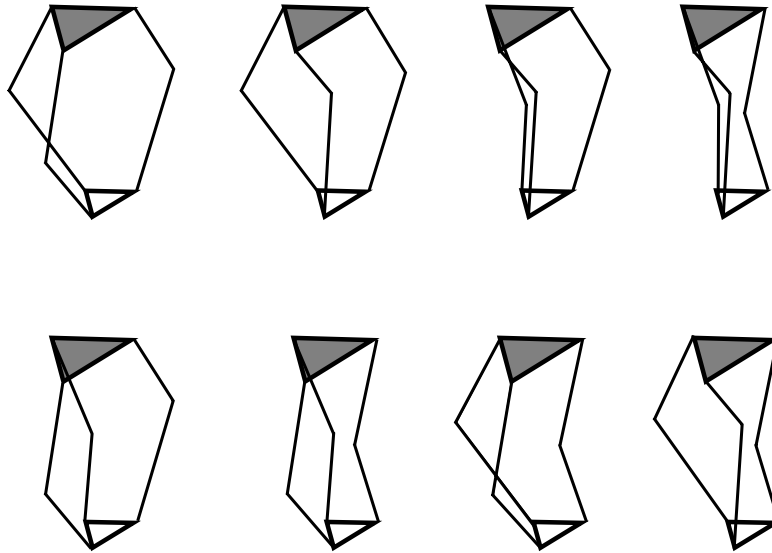
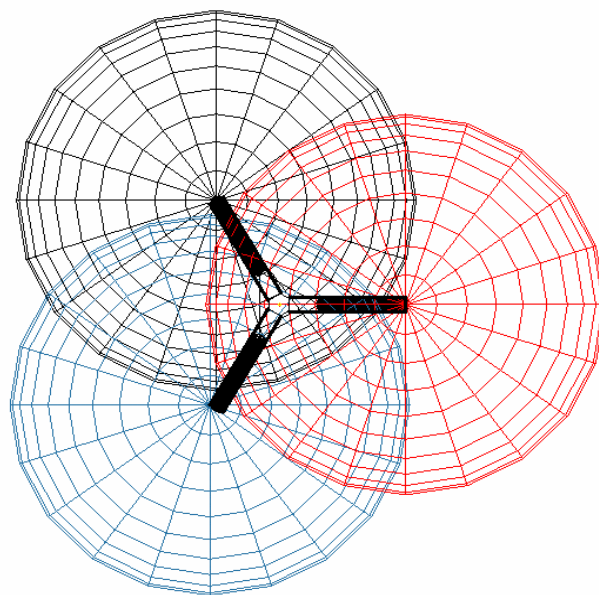


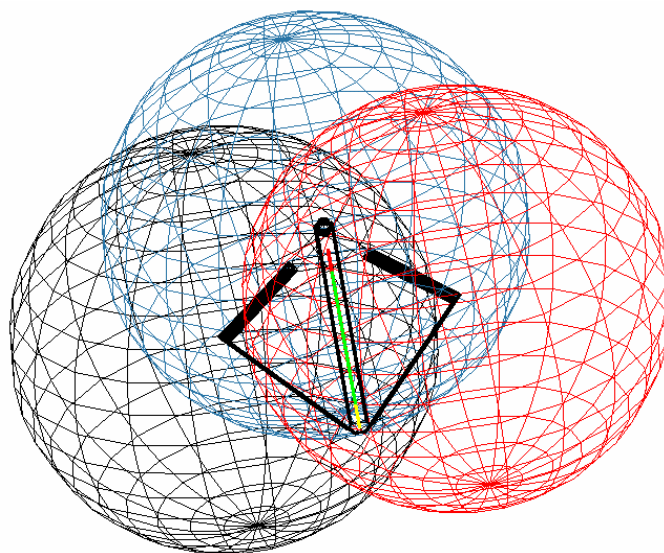
Figura 3.5 Ocho posibles soluciones del problema cinemático inverso.

3.5 MODELO CINEMÁTICO DIRECTO

Aquí, los ángulos α_i son dados y se debe determinar la posición del punto Σ_{eff} . El centro del anillo móvil es la intersección de tres esferas (ecuación (3.5)) centradas en C_i y con radios L_b . Existen dos posibles puntos de intersección, pero solamente uno se puede alcanzar físicamente (Figura 3.6). La solución analítica del modelo cinemático directo, tiene un planteamiento similar a al empleado en la técnica de posicionamiento global, GPS.



(a)



(b)

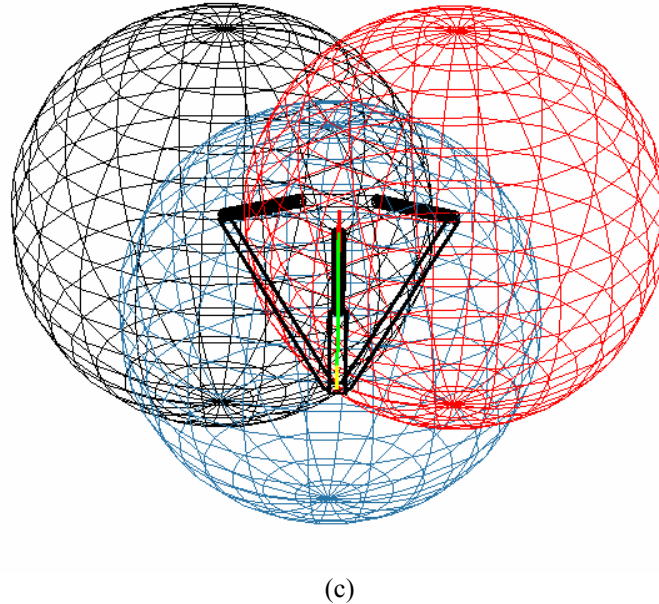


Figura 3.6 Posibles soluciones del problema cinemático directo. Intersección de tres esferas (3.5) centradas en C_i y de radios L_b . (a) Vista superior, (b) Punto de intersección superior, (c) Punto de intersección sobre el centro del efector final

3.6 MATRIZ JACOBIANA DEL ROBOT

Los modelos cinemáticos desarrollados anteriormente, buscan las relaciones entre las variables articulares y la posición operacional del robot. En esta relación no se tienen en cuenta las fuerzas o pares que actúan sobre el robot y que pueden originar el movimiento del mismo. Sin embargo, sí se puede conocer, además de la relación entre las coordenadas articulares y las coordenadas operacionales, la relación entre sus respectivas derivadas. La relación entre ambos vectores de velocidad se obtiene a través de la matriz jacobiana.

Para los robots paralelos, la matriz jacobiana proporciona una transformación de la velocidad del efector final en el espacio cartesiano, a las velocidades de las articulaciones actuadas (Gosselin and Angeles, 1988), (Wang and Gosselin, 1996).

Esta transformación esta dada por:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{x}}, \quad (3.10)$$

donde, $\dot{\mathbf{q}}$ es un vector de dimensión m que representa el conjunto de velocidades de las articulaciones actuadas, $\dot{\mathbf{x}}$ es un vector de dimensión n que representa la velocidad resultante en el efector final, y \mathbf{J} es la matriz jacobiana de dimensión $m \times n$. Para el Sistema RoboTennis, la matriz jacobiana es una matriz cuadrada, ya que hay, tres articulaciones actuadas para las tres coordenadas cartesianas de la plataforma móvil.

Ésta definición de la matriz jacobiana, es ligeramente distinta de la definición tradicional para manipuladores serie, donde la matriz jacobiana proporciona la transformación de las velocidades articulares a la velocidad del efector final. Este cambio en la definición para manipuladores paralelos es una consecuencia lógica de la dualidad entre manipuladores serie y paralelos (Waldron and Hunt, 1988).

Independientemente de la forma que tome, la matriz jacobiana proporciona información muy útil sobre el funcionamiento del manipulador. El Jacobiano suele utilizarse para la generación de trayectorias, ya que para una velocidad deseada del efector final, se pueden obtener las velocidades articulares correspondientes. El análisis del jacobiano sirve también para determinar las posiciones singulares del manipulador, ya que para estas posiciones la matriz jacobiana también es singular (Gosselin and Angeles, 1990), (Gosselin and Sefrioui, 1992), (Wang and Gosselin, 1996). Según la clasificación presentada por Gosselin and Angeles (1990), las singularidades de un robot paralelo pueden ser de tres tipos. El primer tipo de singularidad se produce cuando convergen distintas ramas del problema cinemático inverso, lo que da como resultado una pérdida de movilidad. Este tipo de singularidades usualmente ocurren en los límites del espacio de trabajo. El segundo tipo de singularidad se da cuando convergen distintas ramas del problema cinemático directo, lo cual acarrea la aparición de grados de libertad adicionales en el extremo del robot. Esto implica que podrían aplicarse fuerzas o pares en el efector final que los actuadores no podrían soportar. El tercer tipo de singularidad se da cuando el manipulador

está en una posición tal que se producen simultáneamente singularidades de los dos primeros tipos.

De manera similar, el jacobiano también se emplea para describir los límites del espacio de trabajo del manipulador (Oblak and Kohli 1988). Además, el jacobiano resulta útil al caracterizar la rigidez de un manipulador, la cual, proporciona información acerca de la ventaja mecánica del efector final con respecto a las articulaciones (Gosselin, 1990), (Tahmasebi and Tsai, 1995). El número de condición del Jacobiano también se ha utilizado como índice de funcionamiento para optimizar el diseño del manipulador, ya que da una medida de la amplificación del error entre las posiciones articulares y la posición del efector final (Gosselin and Angeles 1988, 1989, 1991).

3.6.1 OBTENCIÓN DE LA MATRIZ JACOBIANA PARA EL SISTEMA ROBOTENIS

El método más empleado para obtener la relación entre las velocidades articulares y del efector del robot consiste en diferenciar con respecto al tiempo las ecuaciones correspondientes al modelo cinemático directo. Sin embargo, en los robots paralelos, la presencia de cadenas cinemáticas cerradas impone el uso de las ecuaciones de restricción cinemática, para obtener la relación entre ambos vectores de velocidad.

Las ecuaciones de restricción cinemática (3.4) pueden ser escritas en forma general como

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (3.11)$$

donde \mathbf{f} es una función implícita n -dimensional de la posición articular \mathbf{q} y de la posición operacional del efector final \mathbf{x} , $\mathbf{0}$ es un vector n -dimensional de ceros.

Diferenciando con respecto al tiempo la ecuación 3.11, la relación entre las velocidades articulares y del efector final del robot esta dada por:

$$\mathbf{J}_x \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_q \dot{\mathbf{q}}, \quad (3.12)$$

donde,

$$\mathbf{J}_x = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \quad \text{y} \quad \mathbf{J}_q = -\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{q}}.$$

La ecuación (3.12) expresa la matriz jacobiana en dos componentes. Esta representación permite identificar varios tipos de configuraciones singulares del robot. La matriz jacobiana del robot \mathbf{J} , puede ser escrita como:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_q^{-1} \mathbf{J}_x. \quad (3.13)$$

Las matrices \mathbf{J}_x y \mathbf{J}_q son dependientes de la configuración del robot, lo que conlleva a que el valor numérico de cada uno de los elementos (i, j) de la matriz jacobiana, dependa de los valores instantáneos de la posición del efector final. Así, la matriz jacobiana será diferente en cada uno de los puntos del espacio operacional.

En el caso del Sistema RoboTennis, al diferenciar con respecto al tiempo la ecuación de restricción cinemática dada por la ecuación (3.5), se obtiene:

$$\begin{aligned} L_a [(\Delta r - x \cos(\theta_i) - y \sin(\theta_i)) \sin(\alpha_i) + z \cos(\alpha_i)] \dot{\alpha}_i \\ = (x - x_i) \dot{x} + (y - y_i) \dot{y} + (z - z_i) \dot{z}, \quad i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (3.14)$$

La ecuación (3.14) puede ser expresada en términos de la ecuación (3.12), con los vectores de velocidades articulares y del efector final del robot iguales a

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}} &= [\dot{\alpha}_1 \quad \dot{\alpha}_2 \quad \dot{\alpha}_3]^T \\ \dot{\mathbf{x}} &= [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}]^T \end{aligned} \quad (3.15)$$

y,

$$\mathbf{J}_x = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\mathbf{J}_q = \text{diag}(b_{11}, b_{22}, b_{33}),$$

con

$$\begin{aligned} a_{i1} &= (x - x_i), \\ a_{i2} &= (y - y_i), \\ a_{i3} &= (z - z_i), \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$b_{ii} = L_a [(\Delta r - x \cos(\theta_i) - y \sin(\theta_i)) \sin(\alpha_i) + z \cos(\alpha_i)], \quad i = 1, 2, 3.$$

Dado que las matrices \mathbf{J}_x y \mathbf{J}_q son matrices cuadradas de 3×3 , la matriz jacobiana del robot puede ser expresada por (3.13).

De las matrices jacobianas dadas por la ecuación 3.16, las singularidades de la cinemática inversa ocurren cuando el determinante de \mathbf{J}_q se anula,

$$\det(\mathbf{J}_q) = 0. \quad (3.18)$$

Cuando \mathbf{J}_q es singular y la dimensión del espacio nulo de \mathbf{J}_q es diferente de cero, existen algunos vectores $\dot{\mathbf{q}}$ que producen vectores $\dot{\mathbf{x}}$ que son cero. Es decir, en una configuración singular de la cinemática inversa, el manipulador paralelo pierde uno a más grados de libertad, siendo imposible que su efector final se mueva en determinadas direcciones cartesianas. Este tipo de singularidades se presentan en los límites del espacio de trabajo.

Algunas veces el Jacobiano de un robot paralelo no es uniforme dimensionalmente, lo que causa problemas cuando se utiliza para otro tipo de análisis, como estudiar la rigidez o la condición del espacio de trabajo del manipulador. No obstante, en el caso del Sistema RoboTennis, se considera que el Jacobiano dado en la ecuación (3.13) es uniforme dimensionalmente. Cada ele-

mento de \mathbf{J} tiene dimensiones de (longitud)⁻¹. Esto ocurre, porque el robot sólo tiene grados de libertad traslacionales en la plataforma móvil y todas las articulaciones actuadas son rotativas. En consecuencia, todos los elementos del vector \mathbf{x} , tienen dimensiones de longitud, y todos los elementos del vector \mathbf{q} , tienen dimensiones de radianes, por lo que la jacobiana es uniforme dimensionalmente.

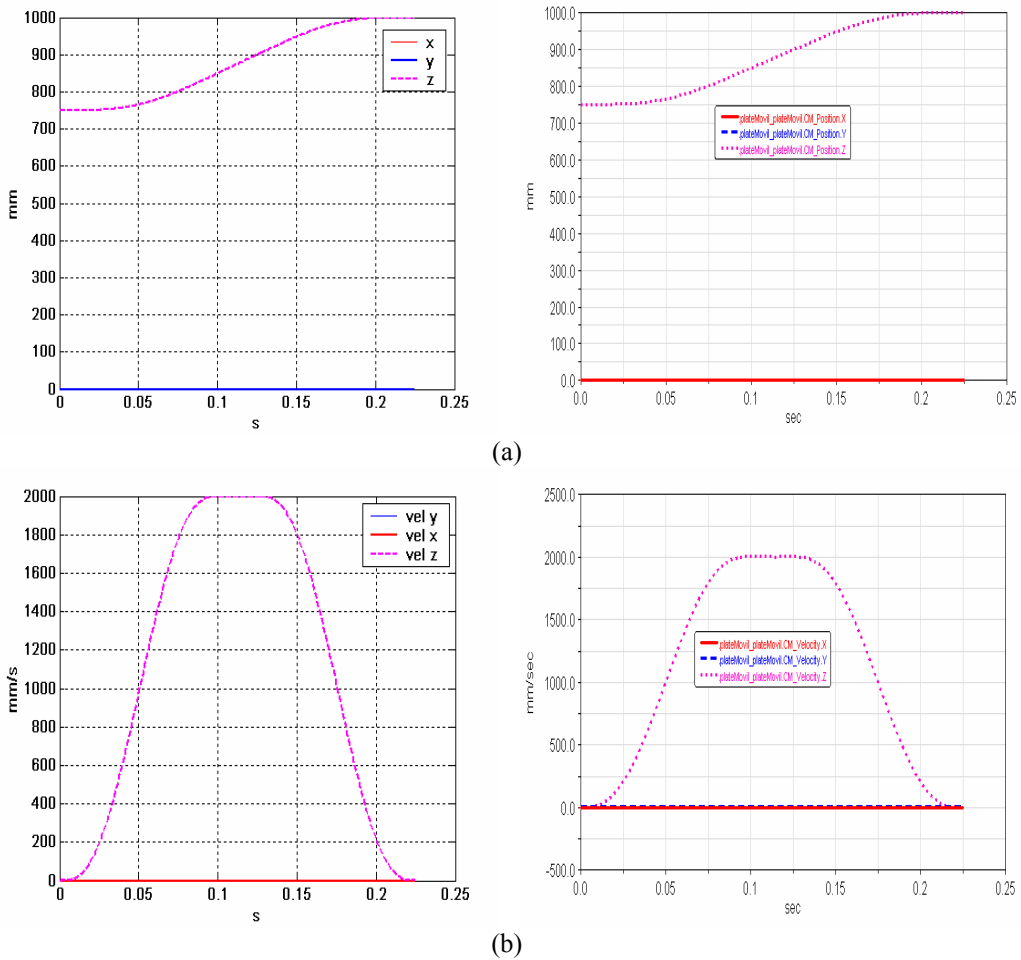
3.7 SIMULACIONES Y RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la verificación de los modelos cinemáticos para el Sistema RoboTenis. El proceso de simulación realizado consta de los siguientes pasos:

- Codificar los modelos cinemáticos directo e inverso en Lenguaje C,
- Para unas dimensiones dadas del robot y empleando un planificador de trayectorias en el espacio cartesiano, generar una trayectoria en línea recta entre cada par de puntos deseados,
- Para cada punto de la trayectoria generada, obtener la correspondiente posición, velocidad y aceleración articular del manipulador, empleando el modelo cinemático inverso y la matriz jacobiana del manipulador. Estos datos se almacenan en un fichero .txt,
- Empleando la herramienta RoboTenis dentro del entorno ADAMS, generar un modelo de simulación para el Sistema RoboTenis, teniendo en cuenta las dimensiones dadas para el robot,
- Asignar a cada actuador, el perfil de movimiento articular deseado y que está almacenado en el fichero .txt,
- Realizar la simulación dinámica del sistema, teniendo en cuenta el tiempo para el movimiento planificado,
- Comparar los datos generados por el planificador, con los datos producidos por el modelo de simulación.

SIMULACIÓN 1

Trayectoria lineal entre los puntos (0, 0, 750) mm y (0, 0, 1000) mm, con una velocidad de movimiento de 2 m/s. Los perfiles deseados y los perfiles obtenidos mediante el modelo de simulación ADAMS para la posición, velocidad y aceleración del efector final son mostrados en la Figura 3.7



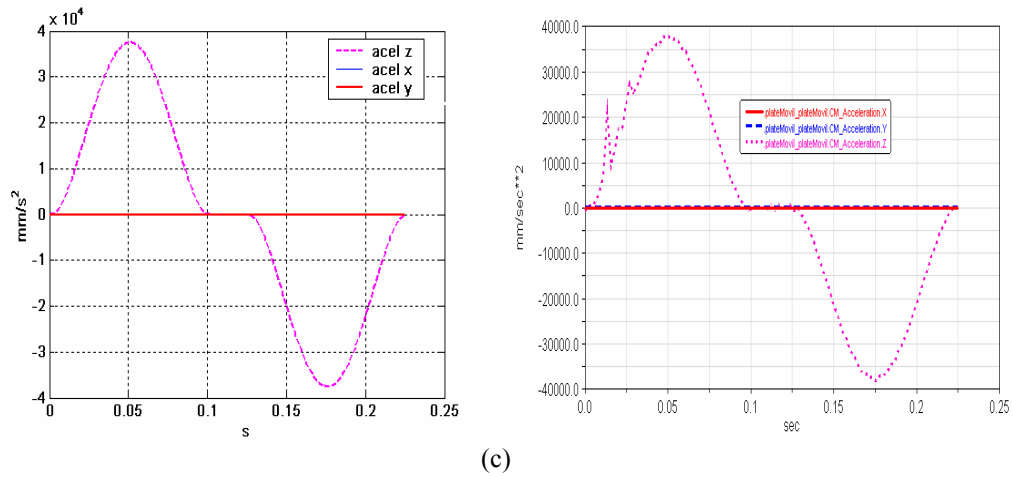
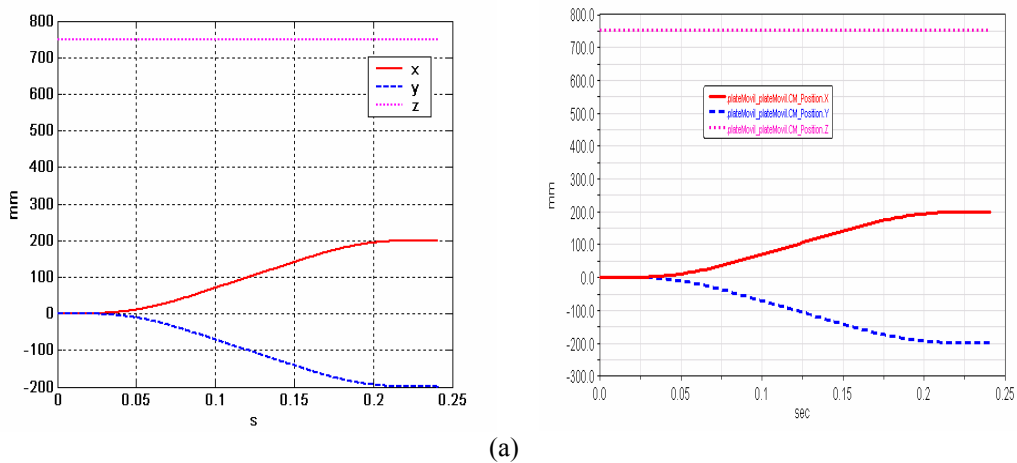


Figura 3.7 Validación de los modelos cinemáticos directo e inverso empleando planificador en lenguaje C y un modelo de simulación ADAMS: (a) Perfil de posición, (b) Perfil de velocidad, y (c) Perfil de aceleración para el efector final en la simulación 1.

SIMULACIÓN 2

Trayectoria lineal entre los puntos (0, 0, 750) mm y (200, -200, 750) mm, con una velocidad de movimiento de 2 m/s. Los perfiles deseados y los perfiles obtenidos mediante el modelo de simulación ADAMS para la posición, velocidad y aceleración del efector final son mostrados en la Figura 3.8.



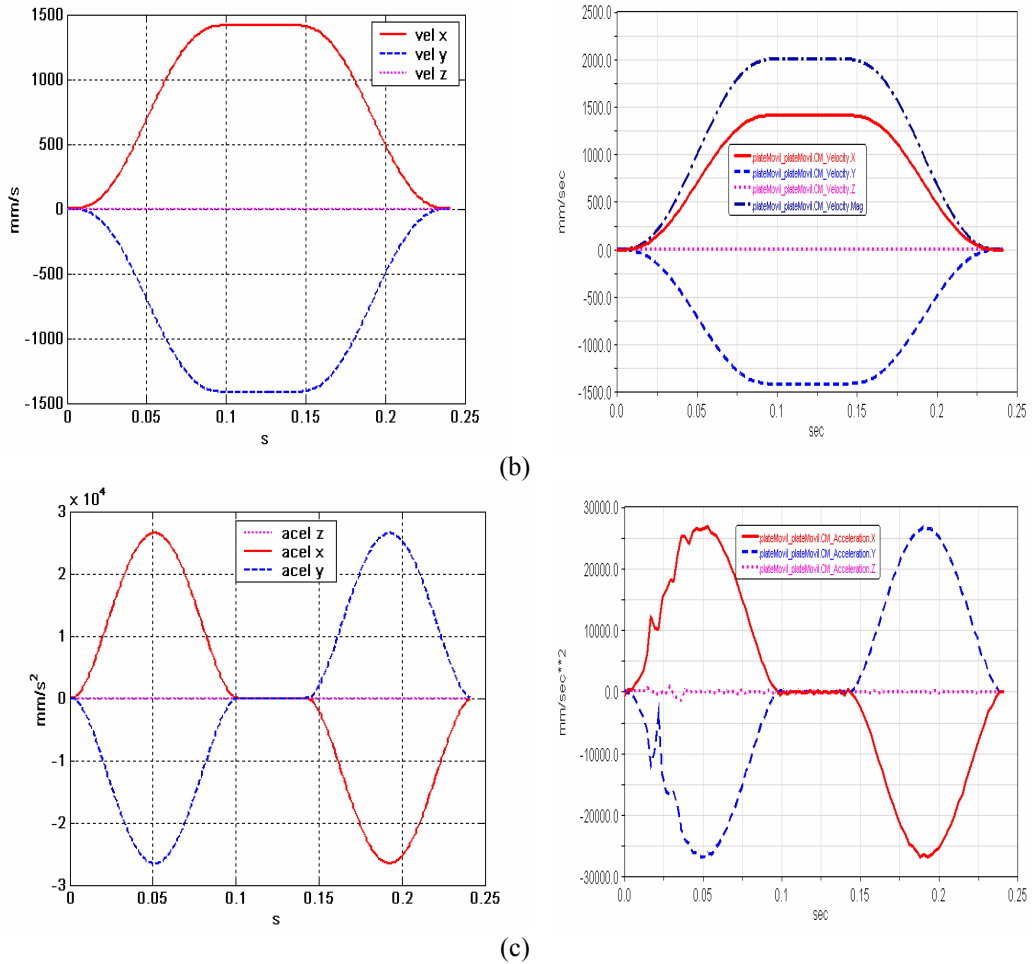


Figura 3.8 Validación de los modelos cinemáticos directo e inverso empleando planificador en lenguaje C y un modelo de simulación ADAMS: (a) Perfil de posición, (b) Perfil de velocidad, y (c) Perfil de aceleración para el efector final en la simulación 1.

Las simulaciones presentadas anteriormente, permiten validar los modelos cinemáticos del manipulador, así como observar la robustez de la matriz jacobiana, a partir de los errores mínimos obtenidos (menores al 1%).

3.8 CONCLUSIONES

En este capítulo, se han presentado los modelos cinemáticos para el Sistema RoboTennis. El modelo cinemático inverso tiene 8 posibles soluciones geométricas, pero solo una solución se puede alcanzar físicamente. La selección de esta solución evita problemas de tipo tecnológico. El modelo cinemático directo, posee dos soluciones geométricas, pero al igual que en el modelo cinemático inverso, solo una de ellas puede ser alcanzada físicamente. Se ha obtenido la matriz Jacobiana del robot en dos componentes. La matriz Jacobiana es una matriz cuadrada de 3x3. Además, se propone una herramienta para simulación dinámica del Sistema RoboTennis, empleando ADAMS. Los modelos cinemáticos son validados empleando un planificador de trayectorias en el espacio cartesiano y el modelo simulación dinámica desarrollado en ADAMS.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA ROBOTENIS

4.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, los problemas relacionados con el diseño óptimo y el análisis dinámico representan las principales líneas de investigación en el área de los manipuladores paralelos. El diseño permite elegir la estructura mecánica del manipulador y establecer sus dimensiones; mientras que el análisis dinámico permite seleccionar los actuadores y definir las estrategias de control para una aplicación deseada.

Usualmente, el diseño involucra la selección de un grupo de parámetros que definen la estructura mecánica del manipulador. Estos parámetros deben ser optimizados mediante la introducción de índices o criterios de funcionamiento que permiten caracterizar el manipulador de acuerdo a la tarea a realizar. La elección de cualquiera de estos índices para un grupo de parámetros dado, podría dar como resultado un manipulador cuyo funcionamiento no co-

responda necesariamente al valor óptimo de los otros criterios (Stamper et al., 1998). La gran mayoría de los procedimientos de diseño propuestos se centran en la optimización de una o varias características del manipulador, tales como, el espacio de trabajo, la rigidez o la manipulabilidad.

El espacio de trabajo de un manipulador describe el conjunto de posiciones que el efector final del manipulador puede alcanzar. Varios métodos han sido propuestos para determinar y evaluar el espacio de trabajo de manipuladores series y paralelos (Basaravaj and Duffy, 1993), (Masory and Wang, 1995), (Parenti-Castelli et al., 1999), (Merlet, 2001), (Ceccarelli and Angeles, 2000), (Ottaviano and Ceccarelli, 2001). Estos métodos están relacionados con la maximización del volumen del espacio de trabajo.

En la gran mayoría de aplicaciones robóticas, el efector final de un manipulador puede ejercer una fuerza sobre su entorno. Las fuerzas de reacción causarán que el efector final se desvíe de su localización deseada. Esta desviación es una función de la fuerza aplicada y de la rigidez del manipulador. La rigidez como parámetro de optimización es tratada en (Tahmasebi and Tsai., 1995), (Bhattacharya et al., 1995).

El concepto de manipulabilidad fue introducido inicialmente por Yoshikawa (1985), y propone una medida para el funcionamiento cinemático del manipulador a partir de los valores singulares de la matriz jacobiana. El número de condición de la matriz jacobiana da una medida de la exactitud cinemática del manipulador, ya sea en la habilidad para cambiar arbitrariamente de posición y orientación, o en la aplicación de fuerzas y pares en direcciones arbitrarias. El número de condición ha sido usado por Gosselin and Angeles (1988, 1989), en la optimización de manipuladores planares y esféricos. Además, proponen en (Gosselin and Angeles, 1991) un índice de condición global basado en el número de condición y que permite caracterizar la exactitud cinemática de un manipulador sobre el espacio de trabajo total. Salisbury and Craig (1982), usan el número de condición para optimizar el diseño de una mano articulada y al mismo tiempo introducen el concepto de configuración isotrópica. En esta posición el manipulador tiene la habilidad de generar fuerzas y movimientos de la misma magnitud en todas las direcciones. Las configuraciones isotrópicas son consideradas como índice de optimización por Zanganeh and Angeles (1997), Fattah and Ghasemi (2002) y Carricato and Parenti-Castelli (2002).

En cuanto a la optimización de varias características del manipulador, Ottaviano and Ceccarelli (2002) emplean el espacio de trabajo y el análisis de las singularidades, mientras que Miller (2004) considera la suma ponderada de la manipulabilidad y el volumen del espacio de trabajo.

Este capítulo presenta el diseño óptimo del robot paralelo. El método de diseño resuelve dos problemas: encontrar las dimensiones del robot paralelo y seleccionar los actuadores que permitan la implementación de la aplicación deseada (jugar al tenis de mesa). La optimización cinemática define las dimensiones del manipulador y emplea como índices de optimización el volumen del espacio de trabajo y la manipulabilidad de la estructura mecánica. Usando un modelo de simulación dinámica para el robot en ADAMS, se obtiene la máxima velocidad en efector final y el máximo par de los motores para el seguimiento de trayectorias típicas de la pelota en tenis de mesa.

4.2 OPTIMIZACIÓN CINEMÁTICA

Para la aplicación de jugar al tenis de mesa, los índices de optimización empleados son la manipulabilidad y el volumen del espacio de trabajo del robot. La manipulabilidad local está definida en términos del número de condición de la matriz jacobiana como (Gosselin and Angeles, 1991)

$$\zeta = \frac{1}{\lambda}; \quad 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (4.1)$$

Este índice es función de la matriz jacobiana. Su valor varía con la configuración de robot y con los parámetros geométricos del robot. Un valor de ζ igual a 1 corresponde a una configuración con muy buena exactitud cinemática, mientras que un valor de ζ igual a 0 se obtiene cuando el manipulador está en una configuración singular.

Dado que la manipulabilidad (4.1) es un índice local que varía con la configuración del manipulador, un índice de condición global ha sido propuesto en (Gosselin and Angeles, 1991).

Este índice está definido como,

$$\eta = \frac{\int \zeta dW}{\int_w dW}. \quad (4.2)$$

Este índice es normalizado por el volumen del espacio de trabajo (W), y su valor da una medida del comportamiento cinemático del manipulador como una función de su arquitectura.

El volumen del espacio de trabajo del robot (W) puede ser calculado mediante diferentes procedimientos. Usualmente pueden emplear métodos de discretización o métodos geométricos. Los métodos de discretización pueden ser aplicados a cualquier tipo de arquitectura. Estos métodos discretizan el espacio 3D, resuelven la cinemática inversa para cada punto y verifican las restricciones que limitan el espacio de trabajo. El más conocido de estos métodos, es el método de Monte Carlo (Alciatore and Ng, 1994), (Stamper et al., 1997). De otra parte, los métodos geométricos son introducidos por Gosselin (1990). Merlet (1994) extiende esta línea de investigación incluyendo la limitación en los rangos de movimiento de las articulaciones pasivas y la interferencia entre las cadenas cinemáticas.

El proceso de optimización para el Sistema RoboTennis emplea la probabilidad para la manipulabilidad local (4.1) y el índice de manipulabilidad global (4.2). El objetivo del proceso de optimización es determinar los valores de las variables de diseño del manipulador que den como resultado una probabilidad para la manipulabilidad local superior a 0.4, y un índice de condición global máximo. Las variables de diseño para este manipulador incluyen las longitudes de los brazos y antebrazos, así como los radios para las plataformas fija y móvil. Con el objetivo de encontrar una solución y asegurar la realización práctica, el proceso de optimización está sujeto a las siguientes restricciones: la longitud total de cada cadena cinemática ($R+L_a+L_b+r$) no debe exceder un valor predefinido de diseño, todas las longitudes deben ser positivas y α_i dentro del rango $(-90^\circ,+180^\circ)$. El volumen del espacio de trabajo se ha aproximado mediante el método de Monte Carlo.

La Figura 4.1 presenta la evolución de la manipulabilidad global como una función de algunas de las variables de optimización. Las variables de diseño optimizadas para el Sistema RoboTennis son presentadas en la Tabla 4.1.

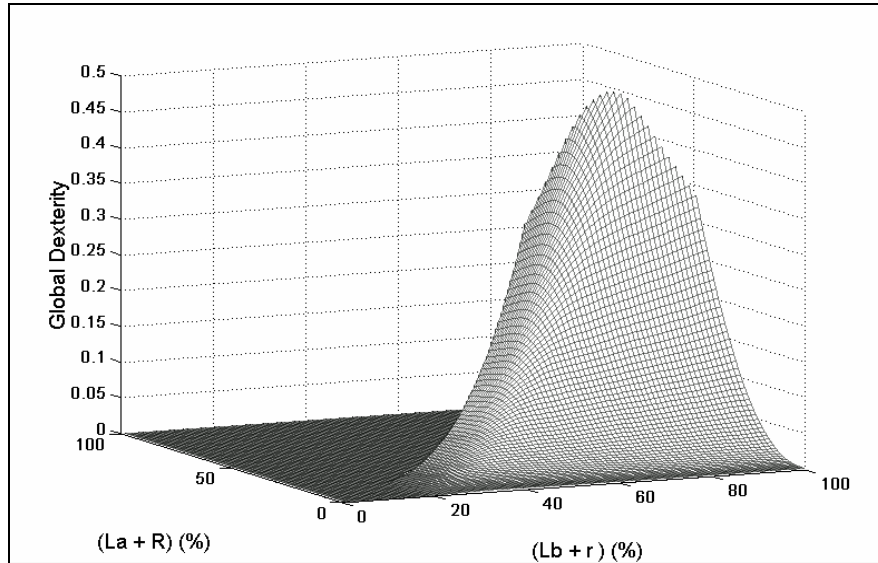


Figura 4.1 Manipulabilidad Global como una función de L_a y L_b para $R=210$ mm y $r=50$ mm.

Tabla 4.1
Dimensiones Óptimas del Robot

Parámetros Geométricos	Valor Óptimo
Radio del anillo fijo (R)	210 mm
Radio del anillo móvil (r)	50 mm
Longitud del brazo (L_a)	620 mm
Longitud del antebrazo (L_b)	880 mm

Las características cinemáticas del manipulador asociadas con los parámetros óptimos son presentadas en la Tabla 4.2. La manipulabilidad local y el espacio de trabajo se muestran en las Figuras 4.2 y 4.3. Como puede verse, se ha obtenido un manipulador con altas capacidades cinemáticas, con excelente índice global, gran espacio de trabajo y sin singularidades. Además, se observa que las configuraciones en las cuales la manipulabilidad es baja son localizadas en los extremos del espacio de trabajo, dando un excelente comportamiento del sistema sobre los puntos centrales.

Tabla 4.2
Propiedades Cinemáticas del Prototipo Final

Propiedades	Valor
$\zeta > 0.4$	96%
η	0.4217
Espacio de Trabajo	0.9332 m ³

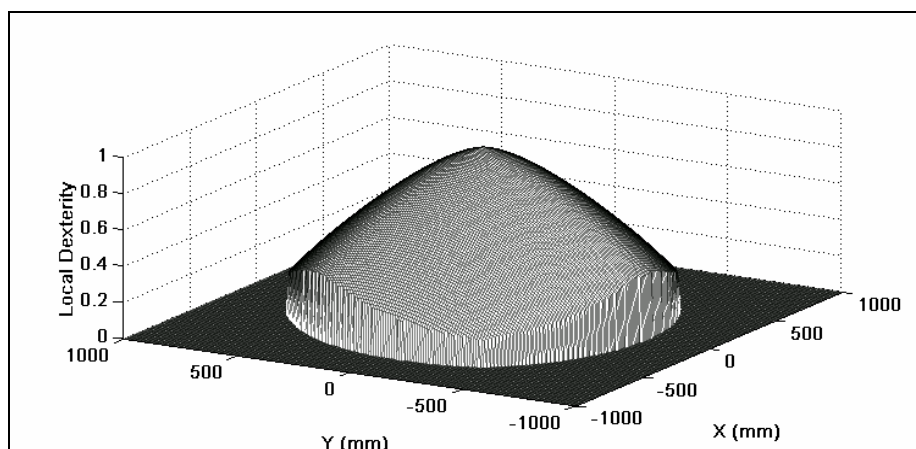


Figura 4.2 Manipulabilidad del Sistema RoboTennis para $z = 800$ mm.

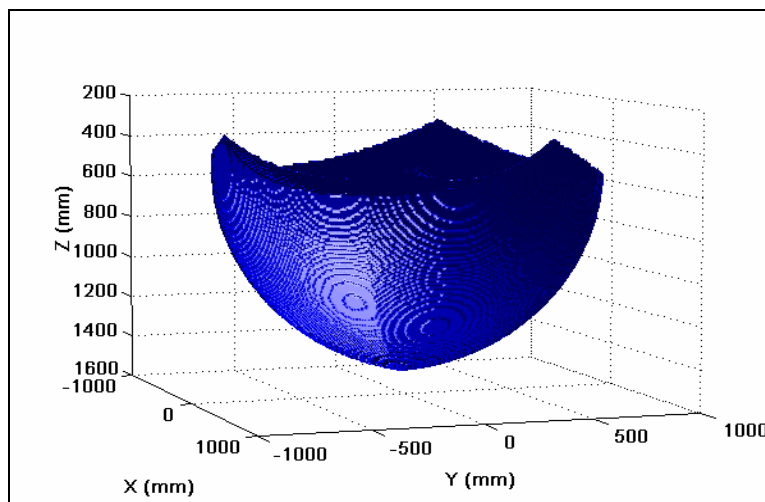


Figura 4.3 Espacio de trabajo del Sistema RoboTennis.

4.3 OPTIMIZACIÓN DINÁMICA

La simulación dinámica del manipulador permite seleccionar los motores para la aplicación deseada. Los motores se eligen considerando la velocidad máxima del efector final y el máximo par, para un conjunto de trayectorias típicas de la pelota en tenis de mesa. Un modelo de simulación para el manipulador es desarrollado en ADAMS® (Figura 4.4), utilizando los parámetros geométricos dados por la Tabla 4.1.

4.3.1 ANÁLISIS DE LAS TRAYECTORIAS DE LA PELOTA

El análisis de las trayectorias de la pelota en tenis de mesa establece la relación entre la velocidad de la pelota y la velocidad de la raqueta. Esta relación da una estimación de la velocidad del efector final que permita a la pelota estar en movimiento. Inicialmente, el análisis considera un caso particular: el robot juega tenis de mesa consigo mismo, es decir, una vez golpeada, la pelota retorna al espacio de trabajo del robot después de rebotar en una pared. Para ello, la raqueta debe posicionarse con respecto a la pelota con ayuda del sistema de visión, golpearla y asegurar que a su retorno, la pelota alcance de nuevo el espacio de trabajo del robot.

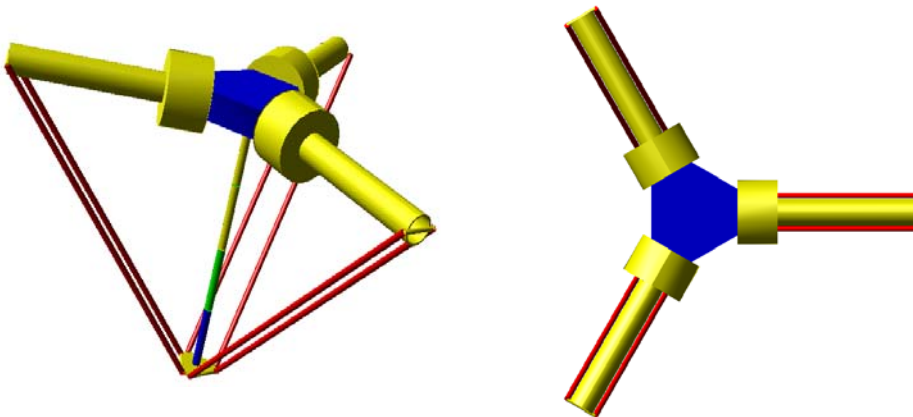


Figura 4.4 Modelo ADAMS del robot: (a) vista lateral, (b) vista superior.

El análisis considera dos etapas: etapa de inicialización y etapa continua. En la etapa de inicialización, se define el conjunto de velocidades y ángulos de partida que se deben aplicar a la pelota “externamente” y que garanticen que después del primer rebote, la pelota alcance el espacio de trabajo del robot. Este conjunto es único para cada altura de partida. En la etapa continua, se halla la velocidad del efector final que permita impulsar y mantener el movimiento de la pelota.

4.3.1.1 LA TAREA DE JUGAR AL TENIS DE MESA

La tarea comienza impulsado “externamente” la pelota a través de un solenoide, para unas condiciones iniciales (altura, velocidad y ángulo de disparo) que garanticen que la pelota estará dentro del espacio de trabajo del robot. A continuación se realiza el seguimiento de la pelota y se estima la trayectoria hacia el robot. Según esta estimación, el robot debe calcular el movimiento a realizar para que la pelota caiga sobre la raqueta y a la vez, golpearla con la velocidad y el ángulo adecuados en el momento preciso. Una vez se ha efectuado el movimiento e impulsado la pelota, se repite la secuencia de seguimiento, calculo y golpeo.

Inicialmente, se utiliza una cámara para el seguimiento de la pelota. Para cada imagen se calcula el centroide y el diámetro de la pelota. Esta información visual se transforma en coordenadas 3D del robot con la ayuda del filtro de Kalman. Sobre la pelota en movimiento, actúan tres fuerzas importantes: la fuerza de la gravedad, la resistencia del aire y el efecto Magnus o spin debido a la rotación de la pelota sobre sí misma. Como una primera aproximación, el análisis de las trayectorias de la pelota considera el siguiente modelo balístico simplificado:

$$\begin{aligned}x &= x_i + \dot{x}_i t \\y &= y_i + \dot{y}_i t \\z &= z_i + \dot{z}_i t - (1/2)gt^2\end{aligned}\tag{4.3}$$

donde i indica el valor inicial de las posiciones y velocidades, g es la aceleración de la gravedad, y t el tiempo.

Partiendo de las coordenadas del centroide de la pelota, el modelo dado por (4.3) estima el punto de impacto de la pelota con la raqueta y el instante del impacto. Según la posición estimada del impacto y teniendo en cuenta el objetivo de la tarea, el modelo balístico inverso de la ecuación (4.3) calcula la nueva trayectoria deseada de la pelota. Una vez estimadas las trayectorias de la pelota antes y después del impacto, se calculan el ángulo y la velocidad con los que debe golpearse la pelota. El ángulo se calcula como el promedio de los ángulos entre la pelota y la raqueta antes y después del golpe (Beer and Johnston, 2003), y la velocidad se calcula usando el coeficiente de restitución estimado. El modelo cinemático inverso, relaciona el ángulo y la velocidad deseadas de la raqueta con las velocidades y posiciones articulares del robot.

4.3.1.2 SIMULACIÓN EN MATLAB

Los modelos balísticos dados por la ecuación (4.3), unidos al modelo de conservación de la cantidad de movimiento para el impacto pelota-raqueta, se implementan en Matlab. Estas simulaciones permiten encontrar las condiciones de movimiento en la etapa de inicialización, y estimar la velocidad de la raqueta, que permita impulsar y mantener el movimiento de la pelota en la etapa continua.

A manera de ejemplo, a continuación se presentan los resultados de las simulaciones de cada etapa, para una altura inicial de lanzamiento de la pelota de 0,6 m. El modelo de simulación emplea el siguiente modelo del entorno:

- **Mesa de Ping-Pong:** Superficie rectangular de 2.74 m. de largo y 1,525 m. de ancho. Reposo sobre un plano horizontal a 0,76 m. del suelo. El modelo de simulación emplea una longitud para la mesa de 1,37 m, asumiendo que la otra parte será contra la cual rebotará la pelota.
- **Pelota:** Diámetro de 40 mm y peso de 2,7 gr.
- **Coefficiente de Restitución:** 0.91. Se ha estimado experimentalmente empleando un modelo balístico de caída libre para la pelota.

- **Raqueta:** Diámetro de 150 mm y peso de 200 gr.
- **Robot:** Se asume un espacio de trabajo cilíndrico de diámetro 1000mm y altura 300 mm. El efector final puede posicionarse entre alturas de 250 mm y 550 mm arriba de la mesa.

La Figura 4.5 muestra la relación entre la altura del espacio de trabajo del robot y el conjunto de velocidades y ángulos de partida válidos aplicados “externamente” a la pelota. Cualquier dupla velocidad-ángulo que pertenezca a este conjunto, permitirá el primer impacto pelota-raqueta.

Las trayectorias de la pelota en la etapa continua para unas condiciones iniciales de 2 m/s y 100°, se observan en la Figura 4.6. La máxima velocidad de la raqueta que permite mantener el movimiento de la pelota es 3,98 m/s.

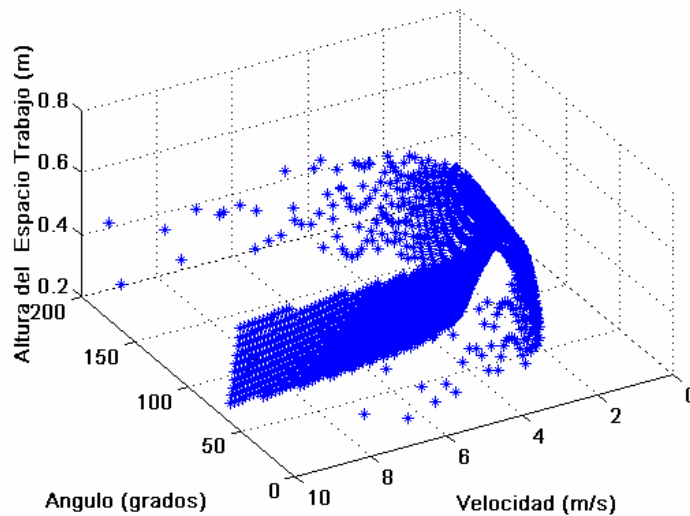


Figura 4.5 Relación entre el espacio de trabajo del robot y las condiciones iniciales de movimiento en velocidad y ángulo para la pelota.

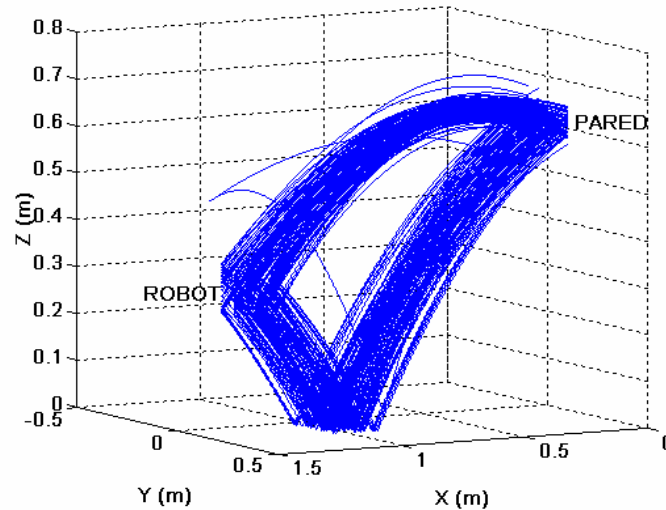


Figura 4.6 Trayectorias de la pelota en la etapa continua, para unas condiciones iniciales de velocidad y ángulo para la pelota de 2m/s y 100°.

4.3.2 ELECCIÓN DE LOS MOTORES

Conocida la velocidad de operación del efector final, la simulación dinámica del robot en ADAMS® permite conocer el par nominal y el par pico requerido para la ejecución de un conjunto de movimientos. Para ello, se sitúa el robot en sus posiciones críticas (posiciones de mayor par) aplicando un perfil de movimiento suave a cada una de las articulaciones a las velocidades y aceleraciones máximas permitidas.

Varias trayectorias han sido programadas y analizadas. La Figura 4.7 muestra un ejemplo de trayectoria crítica analizada. Las trayectorias son planeadas en el espacio cartesiano y luego generadas en el espacio articular usando polinomios 4-3-4. El perfil de movimiento articular tiene una velocidad máxima de 100π rad/s y un tiempo de aceleración/desaceleración de 100 ms.

Las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 presentan la evolución del par, la aceleración y la velocidad del efector final para un conjunto de movimientos críticos

de la pelota. Empleando un reductor de 10, el par pico obtenido es 12 Nm y el par nominal 4 Nm. El tiempo mínimo para el retorno de la pelota es 0.6 s y la raqueta tiene una velocidad promedio de 2.5 m/s, una velocidad máxima de 5 m/s y una aceleración de 10g. Estos parámetros permiten seleccionar comercialmente los motores.

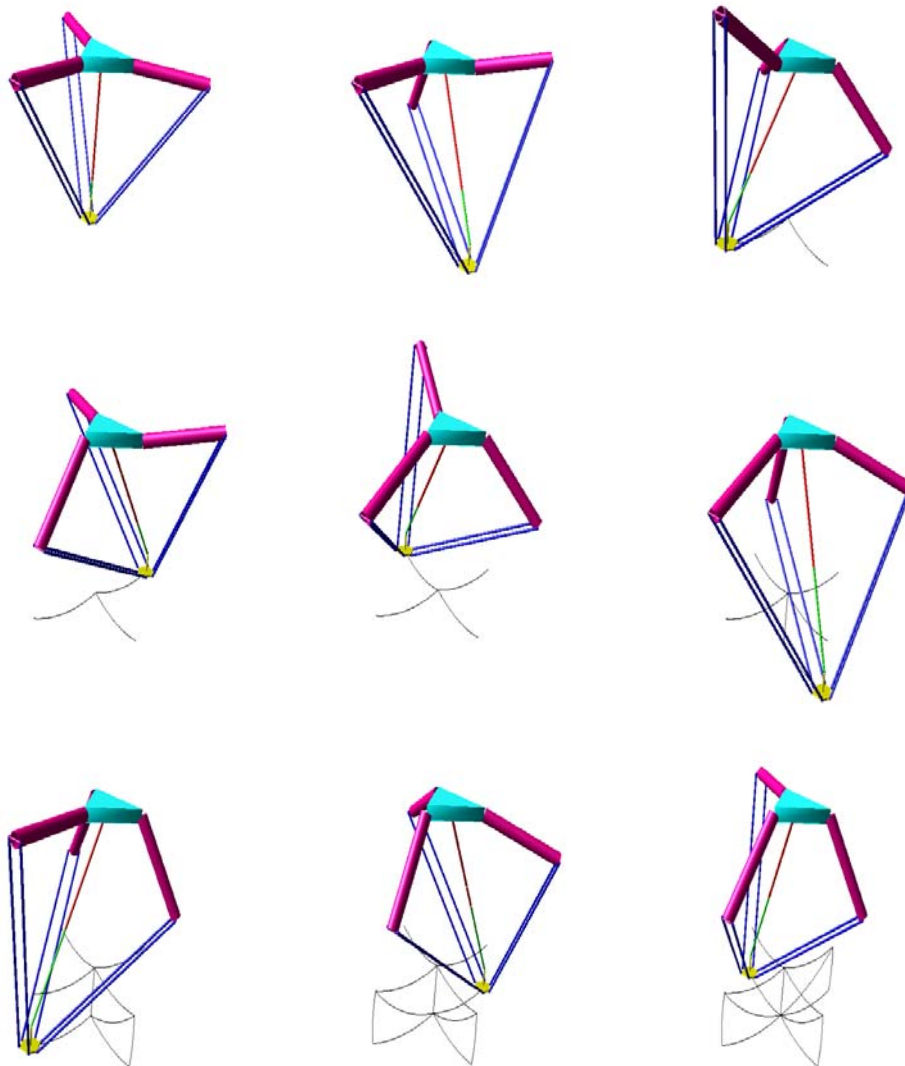


Figura 4.7 Ejemplo de una trayectoria critica analizada.

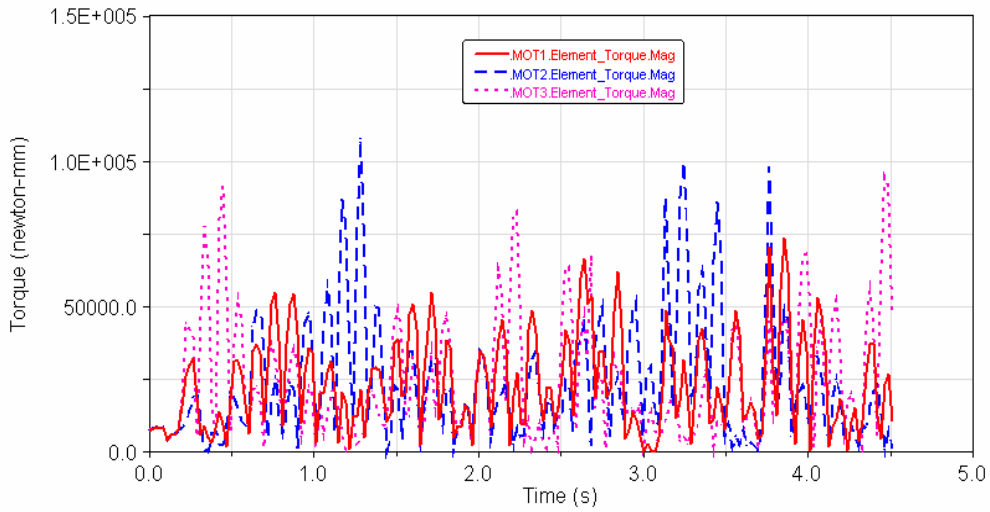


Figura 4.8 Perfil de par para los motores en la ejecución de trayectorias críticas.

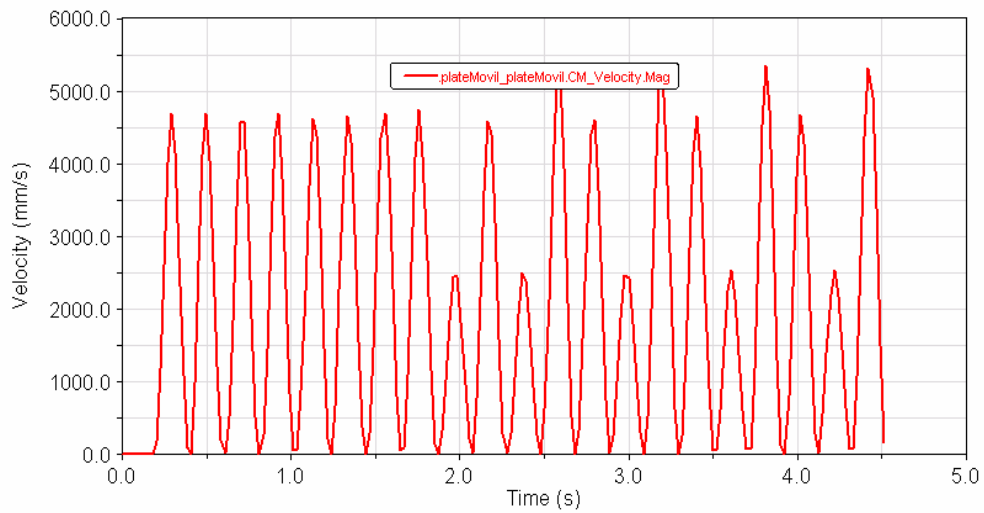


Figura 4.9 Perfil de velocidad para el efector final en la ejecución de trayectorias críticas.

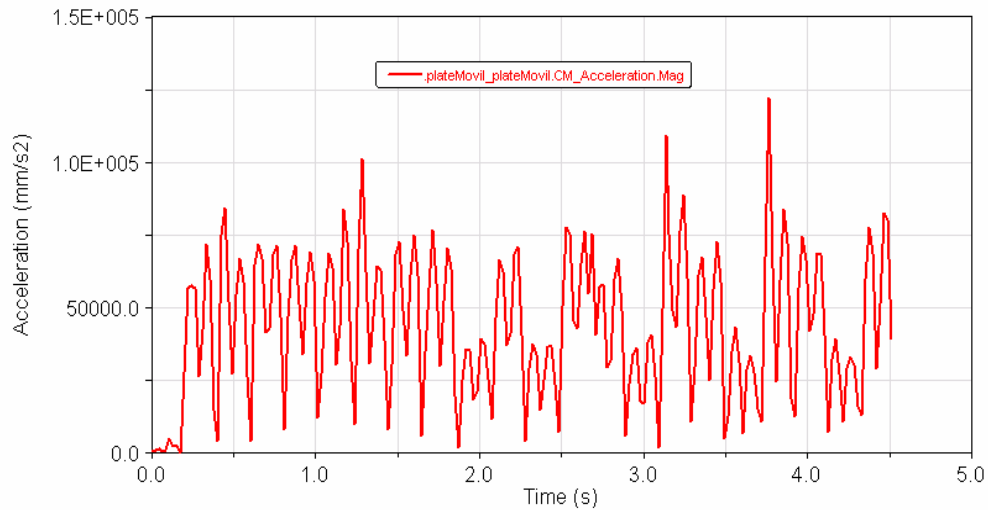
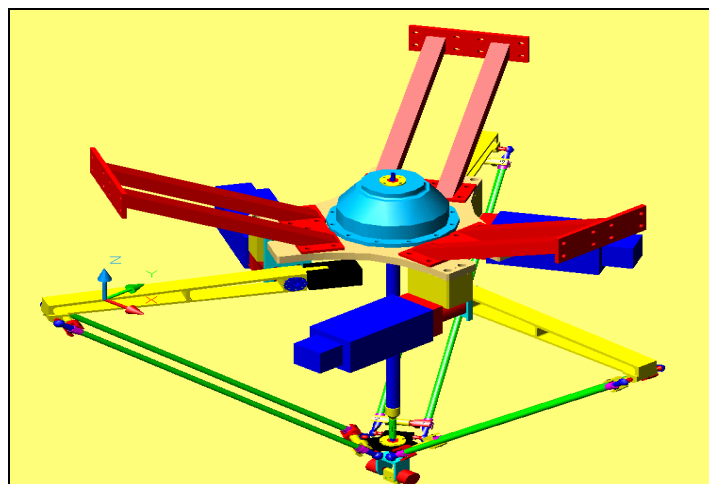


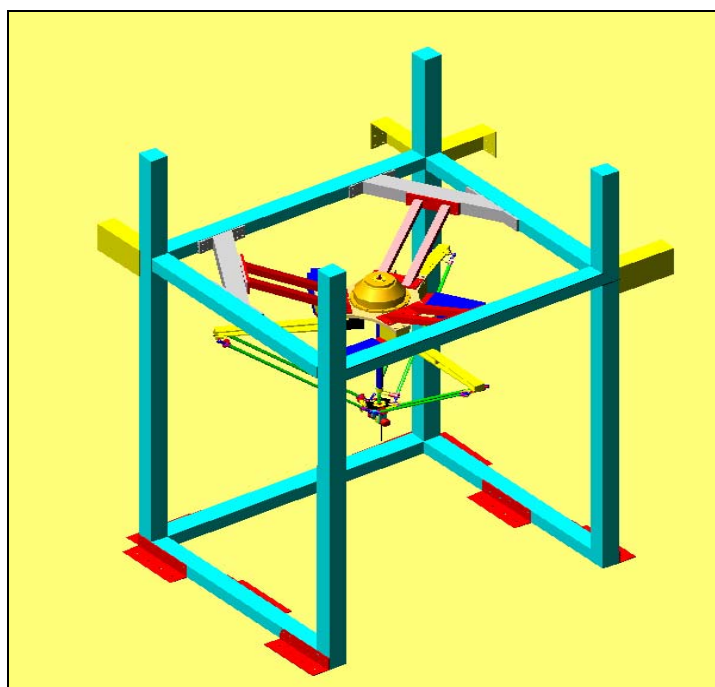
Figura 4.10 Perfil de aceleración para el efector final en la ejecución de trayectorias críticas.

4.4 PROTOTIPO CONSTRUIDO

El modelo CAD y el prototipo construido para el Sistema RoboTennis se muestran en las Figuras 4.11 y 4.12. Además, la Figura 4.12 presenta la relación entre los principales componentes del sistema: la estructura mecánica, el sistema de accionamiento (driver + motor + reductor), el sistema de seguridad, el sistema de visión y el hardware de control.



(a)



(b)

Figura 4.11 Modelo CAD del Sistema RoboTennis: (a) robot, (b) estructura portante.

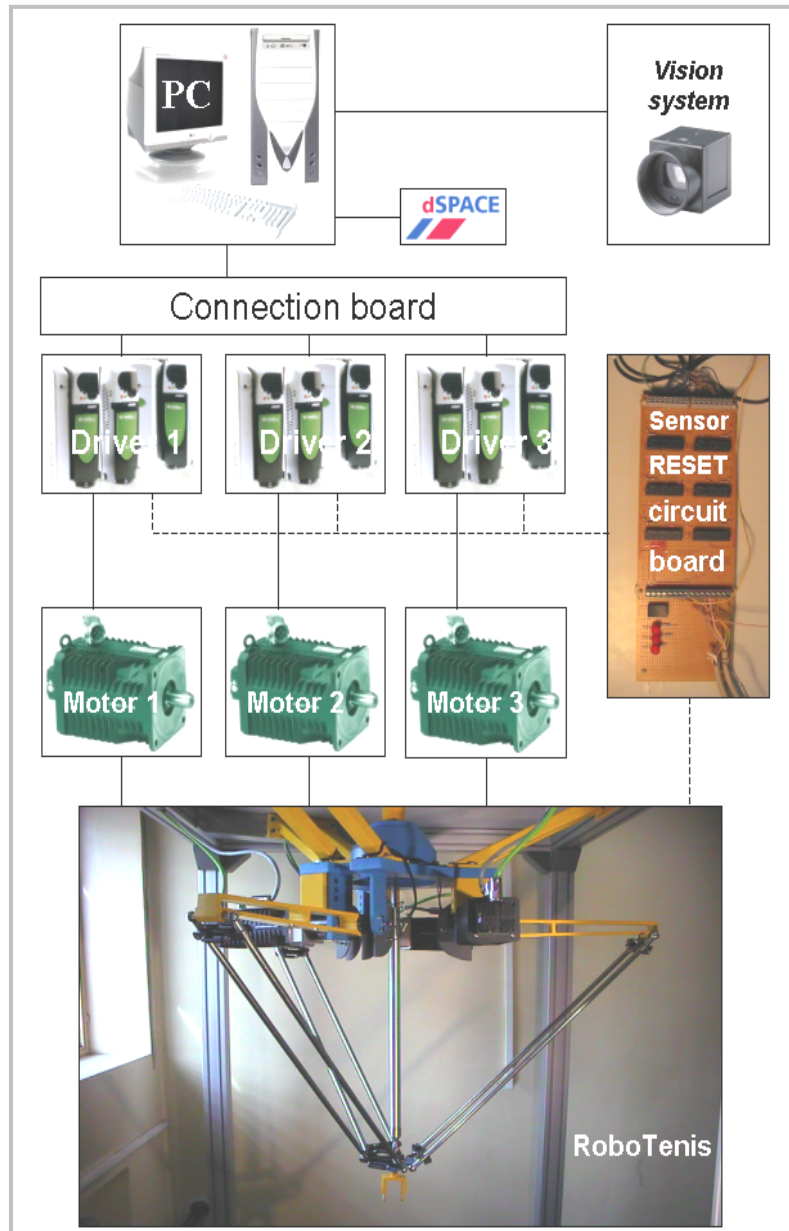


Figura 4.12 Prototipo del Sistema RoboTennis.

4.4.1 ESTRUCTURA MECÁNICA DEL ROBOT

Fotografías del prototipo construido y de algunos componentes de la estructura mecánica del robot se muestran en las Figuras 4.13 y 4.14. Los brazos y la plataforma móvil son fabricados de aluminio. Los antebrazos se fabricaron en acero y están formados por dos barras paralelas que transfieren y convierten el movimiento articular en desplazamientos lineales de la plataforma móvil. Un total de 6 resortes mantienen la cadena cinemática brazo-antebrazo y antebrazo-plataforma móvil. Los resortes se observan con claridad en la Figura 4.14 (b).

La raqueta es accionada en dos sentidos: giro y golpeo. Un motor eléctrico montado en la base del robot, transmite el sentido de giro a la raqueta a través de un brazo telescópico y dos articulaciones universales. El sentido de golpeo, se obtiene mediante dos motores de accionamiento neumático montados a cada lado del efector final. Detalles del brazo telescópico, de las articulaciones universales, y de los elementos dispuestos sobre el efector final (cámara, motores neumáticos y otros) se muestran en la Figura 4.14. Las masas del brazo, antebrazo y plataforma móvil son 2.213 kg, 1.315 kg, y 0.824 kg, para un total de 11,4 kg de masa en movimiento.

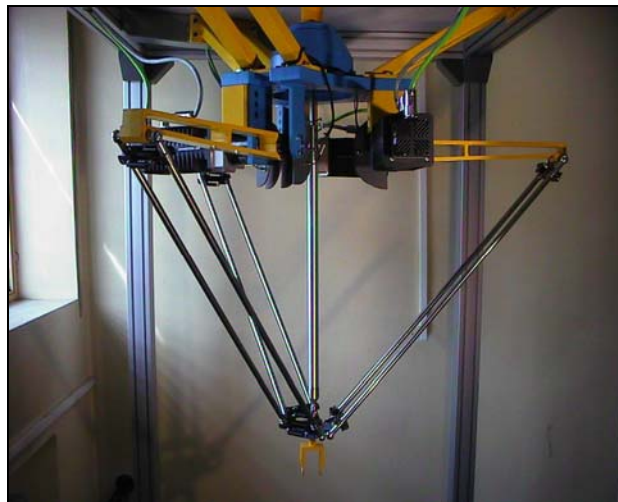
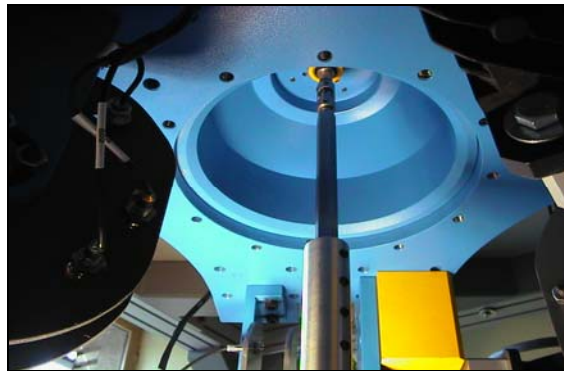


Figura 4.13 Estructura mecánica del Sistema RoboTennis.



(a)



(b)

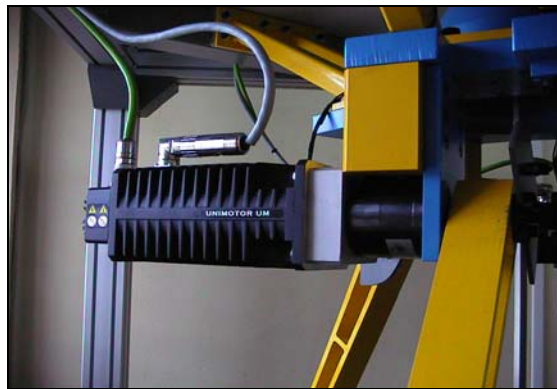


(c)

Figura 4.14 Algunos componentes de la estructura mecánica del Sistema RoboTennis: (a) vista del brazo telescópico y de la articulación universal superior,(b) vista de la plataforma móvil, (c) vista del efector final, la cámara, y los motores de accionamiento neumático.

4.4.2 SISTEMAS DE ACCIONAMIENTO Y SEGURIDAD

El sistema de accionamiento seleccionado se presenta en la Figura 4.15. Está compuesto por: servomotores brushless AC (UNIMOTOR), variadores de velocidad (UNIDRIVE SP) y elementos reductores. Los motores son trifásicos, de imanes permanentes, con 8 polos y poseen encoder óptico incremental de 4096 pulsos por revolución (ppr). Pueden generar un par máximo de 9.4 Nm, y un par pico de 27 Nm durante 1 s. La tensión de alimentación es de 400 Vac y la velocidad máxima es de 100π rad/s (3000 rpm).



(a)



(b)

Figura 4.15 Sistema de accionamiento del Sistema RoboTennis: (a) conjunto motor + reductor, (b) drive UNIDRIVE SP

Los variadores de velocidad, regulan la frecuencia del voltaje aplicado a los motores. Esto permite controlar de forma eficiente sus velocidades. Los reductores tienen un factor de reducción 10, y varían las condiciones de par y velocidad a la salida del motor para adecuarlas a las características requeridas. Una descripción más completa de sistema de accionamiento se presenta en (Cuesta, 2004).

Sobre cada eje de motor se montan discos de seguridad (Figura 4.16). Cada disco contiene tres sensores inductivos y permiten dos funciones fundamentales: sincronizar los brazos del robot en la etapa de inicialización (sensor central), y, activar la electrónica que limita el movimiento articular dentro de un rango de seguridad mecánica (sensores extremos).

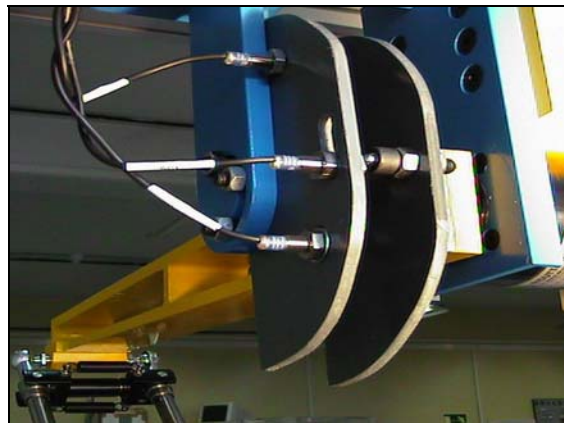


Figura 4.16 Discos de seguridad montados sobre cada eje de motor.

4.4.3 SISTEMA DE VISIÓN

El sistema de visión está ubicado en el efector final del robot y formado inicialmente por una sola cámara. De los altos requerimientos en el tiempo de ejecución, se ha seleccionado una cámara Sony modelo XC-HR 50 (Figura 4.17). Las características principales con las que cuenta esta cámara son:

- Captura de imágenes a alta velocidad. Incluye las siguientes opciones en función de las características de la tarea a realizar:
 - Imagen Completa (525 líneas) a 60 cuadros por segundo. Tiempo de adquisición 16 ms.
 - Imagen re-escalada (263 líneas) a 120 cuadros por segundo. Tiempo de adquisición 8 ms.
 - Imágenes parciales (completa o re-escalada) hasta 362 cuadros por segundo.
- Integración progresiva: todos los píxeles se integran a la vez, lo que evita el efecto del movimiento de entre las líneas pares e impares.
- Mínima iluminación de 1 lux.
- Tiempo de integración de hasta 1/100.000 segundos.
- Reducido tamaño: 29 x 29 x 32 mm. Esta característica es fundamental para su integración en un sistema robotizado.



Figura 4.17 Cámara Sony XC-HR 50

El sistema de visión usa la tarjeta METEOR II-MC/4 de MATROX (Figura 4.18). Las características más destacadas con las que cuenta la tarjeta son las siguientes:

- Digitalizador color/monocromo para bus PCI.
- 4MB de memoria.
- Captura video estándar o no estándar hasta 30 MHz.

- Doble buffering: permite capturar una imagen mientras se procesa la imagen previamente grabada.



Figura 4.18 Tarjeta de adquisición Matrox Meteor II-MC/4.

4.4.4 HARDWARE DE CONTROL

Finalmente, el hardware de control está formado por una tarjeta DSPACE 1103. En ella se ejecutan: la generación de trayectorias, el cálculo de los modelos cinemático y dinámico del manipulador, así como la implementación de diferentes algoritmos de control. Además, permite supervisar las estrategias de control, modificar sus parámetros en tiempo real y seguir la evolución de las variables relevantes del sistema.

4.5 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha presentado el diseño del Sistema RoboTennis y el prototipo construido en el Departamento de Automática, Electrónica e Informática (DISAM), perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid. El diseño cinemático define las dimensiones del manipulador y emplea un índice de condición global basado en el número de condición de la matriz jacobiana. Usando ADAMS®, se obtiene la velocidad máxima del efector final y el máximo par

de los motores para un conjunto de trayectorias típicas de la pelota en tenis de mesa. El resultado del proceso de simulación dinámica permite elegir los motores. El prototipo diseñado tiene altas capacidades cinemáticas y un gran espacio de trabajo. En el siguiente capítulo se desarrollarán las ecuaciones de movimiento para el Sistema RoboTennis y se analizará la influencia de los componentes inerciales en el comportamiento del modelo dinámico propuesto.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DINÁMICO DEL SISTEMA ROBOTENIS

5.1 INTRODUCCIÓN

La dinámica de un manipulador desempeña un papel importante en el comportamiento del sistema robótico, especialmente durante la realización de tareas de alta velocidad. El propósito de este capítulo es desarrollar un conjunto de ecuaciones que describan el comportamiento dinámico del manipulador.

El desarrollo de un modelo dinámico es importante por varias razones. Primero, un modelo dinámico puede ser usado para la simulación del movimiento del robot. Examinando el comportamiento del modelo bajo varias condiciones de funcionamiento, es posible predecir como se comportará un sistema robótico, cuando éste sea construido. En este aspecto, varias tareas de automatización pueden ser examinadas sin la necesidad de un sistema real. En segundo lugar, el modelo dinámico puede ser utilizado para el desarrollo de las

estrategias de control. Un regulador sofisticado requiere el uso de un modelo dinámico realista que permita alcanzar un funcionamiento óptimo bajo condiciones de alta velocidad. Esto último es de gran importancia, pues de la calidad del control dinámico del robot depende la precisión y velocidad de sus movimientos. Tercero, el análisis dinámico de un manipulador revela todas las fuerzas de reacción (y momentos) necesitados para el diseño y evaluación de la estructura mecánica del robot, y el dimensionamiento de los actuadores.

Hay dos tipos de problemas dinámicos: dinámica directa y dinámica inversa. El problema dinámico directo encuentra la respuesta articular de un manipulador en función de los pares y/o fuerzas que intervienen. Es decir, dado un vector de pares y/o fuerzas aplicados, expresa el movimiento resultante en el manipulador como una función de tiempo. El problema dinámico inverso encuentra los pares y/o fuerzas de los actuadores requeridos para generar una trayectoria deseada del manipulador. En general, la eficacia de cómputo para la dinámica directa no es crítica, puesto que ésta se utiliza sobre todo para las simulaciones por ordenador de un manipulador. Por otra parte, un modelo dinámico inverso eficiente llega a ser extremadamente importante para el control por pre-compensación en tiempo real de un manipulador.

Dada la presencia de múltiples cadenas cinemáticas cerradas en la estructura mecánica de los robot paralelos, el análisis dinámico no es tan evidente como en el caso de los robots series. Varias formulaciones para el análisis dinámico de manipuladores paralelos se han propuesto, incluyendo la formulación de Newton-Euler (Do and Yang, 1988), (Guglielmetti and Longchamp, 1994), (Tsai and Kohli, 1990), la formulación Lagrangiana (Lebret, et al., 1993), (Miller and Clavel, 1992), (Pang and Shahinpoor, 1994), y el principio del trabajo virtual (Codourey and Burdet, 1997), (Miller, 1995), (Tsai, 1998), (Wang and Gosselin, 1997). Otras formulaciones son propuestas en (Baiges and Duffy, 1996), (Freeman and Tesar, 1988), (Luh and Zheng, 1985), (Murray and Lovell, 1989), (Sugimoto, 1987).

La formulación tradicional de Newton-Euler requiere que las ecuaciones de movimiento sean escritas para cada cuerpo de un manipulador, lo que conduce inevitable a una gran cantidad de ecuaciones y de resultados en eficiencia de cómputo pobre. La formulación lagrangiana elimina todos los fuerzas y momentos reacción indeseados. Es más eficiente que la formulación de

Newton-Euler. Sin embargo, dadas las numerosas restricciones impuestas por las cadenas cinemáticas cerradas de un manipulador paralelo, el derivar las ecuaciones explícitas de movimiento en términos de un sistema de coordenadas generalizadas independientes, puede convertir ésta formulación en una tarea prohibitiva. Para simplificar el problema, se introduce a menudo un conjunto de coordenadas adicionales junto con un sistema de multiplicadores de Lagrange. En algunos casos, los componentes del sistema robótico son aproximados por masas puntuales, sin que esta aproximación introduzca errores significativos de modelado (Lebret et al., 1993), (Pfreundschuh et al., 1994), (Stamper, 1997), (Stamper and Tsai, 1998). En este contexto, el principio del trabajo virtual aparece ser el método de análisis más eficiente. Un estudio comparativo de la dinámica inversa de manipuladores con geometría paralela puede ser encontrado en el trabajo de Lin y Song (Lin and Song, 1990).

La manipulación rápida y exacta por parte de sistemas robóticos, requiere de algoritmos del control que hacen el mejor uso de la información extraída del análisis dinámico del robot. Varias formulaciones se han utilizado para caracterizar la dinámica del robot DELTA. Las formulaciones más comunes se basan en el uso del principio virtual del trabajo (Codourey, 1995), (Pierrot et al., 1990), la formulación de Lagrange (Miller and Clavel, 1992), la aplicación del principio de Hamilton [Miller, 1995], y la aplicación directa de las ecuaciones de movimiento de Newton (Guglielmetti and Longchamp, 1994). En estos trabajos, el controlador del prototipo usado para la validación experimental asume que los antebrazos tienen inercia insignificante, y que sus masas se divide y refleja en los brazos y la plataforma móvil de acuerdo a la aplicación del principio virtual del trabajo. Esta suposición permite usar un modelo dinámico simplificado del robot.

En este capítulo se presentan las ecuaciones de movimiento para el Sistema de RoboTenis. El modelo dinámico emplea la formulación de los multiplicadores de Lagrange. Esta formulación permite una caracterización más completa de la dinámica del manipulador, y asume que el manipulador es un sistema de cuerpos rígidos interconectados por pares cinemáticos sin fricción. La innovación principal en el modelado dinámico del robot, es el uso de los antebrazos con inercias no-insignificantes (1.315 kg). La validación del modelo dinámico obtenido para el Sistema RoboTenis, emplea un modelo de simulación dinámica desarrollado en ADAMS. Los resultados de la simulación per-

miten observar el efecto de las inercias de los antebrazos en el comportamiento del sistema.

5.2 FORMULACIÓN DE LAGRANGE

La formulación Lagrangiana esta basada en consideraciones energéticas del sistema. Las ecuaciones de movimiento son escritas en términos de un conjunto de coordenadas redundantes. Además, la formulación requiere un conjunto de ecuaciones de restricción obtenidas de la cinemática del mecanismo. Estas ecuaciones de restricción y sus derivadas deben ser adicionadas a las ecuaciones de movimiento para producir un número de ecuaciones que es igual al número incógnitas.

La formulación Lagrangiana establece la ecuación:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j + \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial q_j}, \quad \text{para } j = 1 \text{ a } n, \quad (5.1)$$

donde

- i índice de restricción,
- j índice de coordenada generalizada,
- k número de ecuaciones de restricción,
- n número de coordenadas generalizadas,
- L función de Lagrange, donde $L = T - V$,
- T energía cinética total del manipulador,
- V energía potencial total del manipulador,
- q_j coordenada generalizada j ,
- λ_i multiplicador de Lagrange,
- f_i ecuación de restricción cinemática,
- Q_j fuerza externa generalizada.

La solución de las ecuaciones de movimiento se facilita reacomodando las ecuaciones de Lagrange en dos sistemas. El primer sistema contiene los multiplicadores de Lagrange como las únicas incógnitas, y el otro sistema contiene las fuerzas externas generalizadas generadas por los actuadores como las incógnitas adicionales. Las primeras k ecuaciones son asociadas con las coordenadas redundantes y las restantes $n-k$ ecuaciones son asociadas con las variables articulares actuadas. El primer sistema de ecuaciones puede ser escrito en la forma

$$\sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial q_j} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} - \hat{Q}_j, \quad (5.2)$$

donde \hat{Q}_j la fuerza generalizada aplicada externamente. Para la dinámica inversa, la parte derecha de la ecuación (5.2) es conocida. Escribiendo la Ecuación (5.2) para cada una de las coordenadas redundantes se obtiene un sistema de k ecuaciones que puede ser resuelto para los k multiplicadores de Lagrange.

Una vez los multiplicadores de Lagrange son encontrados, los pares y/o fuerzas de los actuadores pueden ser determinadas directamente de las ecuaciones restantes. Específicamente, el segundo sistema de ecuaciones puede ser escrito como

$$Q_j = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} + \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial q_j}, \quad \text{para } j = k+1 \text{ a } n, \quad (5.3)$$

donde, Q_j es el par y/o fuerza del actuador.

5.3 FORMULACIÓN DE LAGRANGE PARA EL SISTEMA ROBOTENIS

En esta sección se analiza la dinámica del robot paralelo del sistema RoboTennis empleando la formulación Lagrangiana. Por conveniencia, el modelo geométrico del robot se presenta nuevamente en la Figura 5.1. Esta figura muestra con detalle los sistemas de coordenadas, la longitud de los eslabones y los ángulos articulares del manipulador. α_1 , α_2 , y α_3 son las articulaciones actuadas.

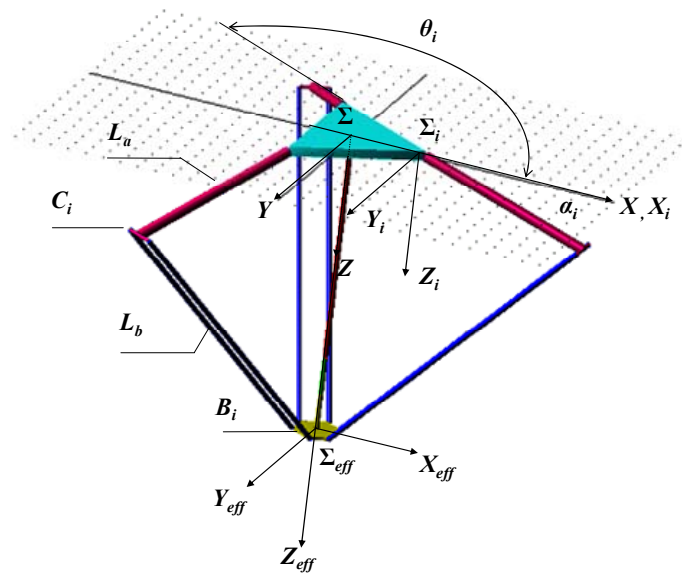


Figura 5.1 Modelo geométrico del robot.

Las ecuaciones de Lagrange emplearán tres coordenadas redundantes, x , y y z . Este conjunto de coordenadas corresponde a la posición del efector final con respecto al sistema de referencia global Σ . Así, el vector de coordenadas generalizadas se expresa como

$$q_j = [x, y, z, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3], \text{ con } j = 6. \quad (5.4)$$

La ecuación (5.1) representan un sistema de seis ecuaciones con seis variables, donde las seis variables son: los multiplicadores de Lagrange, λ_i , para $i = 1, 2, 3$; y los tres pares de los actuadores, Q_j , para $j = 4, 5$ y 6 . La fuerza externa generalizada, Q_j , para $j = 1, 2$ y 3 , es cero, ya que no existe fuerza externa aplicada a la plataforma móvil, y, las articulaciones en los puntos C_i son pasivas.

Esta formulación necesita tres ecuaciones de restricción, f_i para $i = 1, 2, 3$. Las ecuaciones de restricción cinemática han sido presentadas en el capítulo 3. Estas ecuaciones asumen que el manipulador esta formado por cuerpos rígidos y que la distancia entre las articulaciones B_i y C_i es siempre igual a la longitud del antebrazo, L_b ; esto es,

$$\begin{aligned} f_i &= \|\mathbf{B}_i \mathbf{C}_i\|^2 - L_b^2 = 0 \\ &= (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 - L_b^2 = 0 \end{aligned} \quad (5.5)$$

con,

$$\begin{aligned} x_i &= (\Delta r + L_a \cos(\alpha_i)) \cos(\theta_i), \\ y_i &= (\Delta r + L_a \cos(\alpha_i)) \sin(\theta_i), \\ z_i &= L_a \sin(\alpha_i). \end{aligned}$$

para $i = 1, 2$ y 3 .

La función Lagrangiana (L) esta definida como la diferencia entre la energía cinética (T), y la energía potencial, V , de un sistema mecánico. La energía cinética total para el Sistema RoboTennis es

$$T = T_c + \sum_{i=1}^3 (T_{ai} + T_{bi}) \quad (5.6)$$

donde, T_c es la energía cinética del anillo móvil, T_{ai} es la energía cinética del brazo superior y rotor i , y T_{bi} es la energía cinética del antebrazo i . Específicamente,

$$\begin{aligned} T_{ai} &= \frac{1}{2} m_a I_t \dot{\alpha}_i^2, \\ T_{bi} &= \frac{1}{2} m_b \left[\frac{1}{3} (\dot{x}c\theta_i + \dot{y}s\theta_i + L_a \dot{\alpha}_i s\alpha_i)^2 + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{3} (-\dot{x}s\theta_i + \dot{y}c\theta_i)^2 + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{3} (\dot{z} - L_a \dot{\alpha}_i c\alpha_i)^2 - \right. \\ &\quad \left. L_a (\dot{x}c\theta_i + \dot{y}s\theta_i) \dot{\alpha}_i s\alpha_i + \right. \\ &\quad \left. L_a \dot{z} \dot{\alpha}_i c\alpha_i \right], \\ T_c &= \frac{1}{2} m_c (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2), \end{aligned} \quad (5.7)$$

donde, m_a , m_b y m_c son las masas de el brazo, el antebrazo y la plataforma móvil, respectivamente. I_t es la inercia del brazo+motor, y θ_i es el ángulo de rotación entre el sistema Σ_i y el sistema de referencia global Σ . Además, $cX = \cos(X)$ y $sX = \sin(X)$.

Asumiendo que la aceleración de la gravedad (g) apunta en la dirección $+Z$, la energía potencial total del robot relativa al plano x - y sobre la plataforma fija es

$$V = V_c + \sum_{i=1}^3 (V_{ai} + V_{bi}), \quad (5.8)$$

donde, V_c es la energía potencial de la plataforma móvil, V_{ai} es la energía potencial del brazo i y V_{bi} : es la energía potencial del antebrazo i . Específicamente,

$$\begin{aligned} V_{ai} &= -\frac{1}{2} m_a g L_a s \alpha_i, \\ V_{bi} &= -\frac{1}{2} m_b g (z + L_a s \alpha_i), \\ V_c &= -m_c g z. \end{aligned} \quad (5.9)$$

En forma general, la función lagrangiana esta dada por la diferencia entre las ecuaciones (5.6) y (5.8).

Para primer sistema de ecuaciones dado por (5.2), las incógnitas son los tres multiplicadores de Lagrange, λ_i , para $i = 1, 2, 3$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial x} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} \\ \sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial y} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} \\ \sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial z} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial L}{\partial z}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

A partir de los multiplicadores de Lagrange, los pares de los motores pueden ser determinados directamente mediante las ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \tau_1 &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha_1} - \lambda_1 \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_1} \\
 \tau_2 &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha_2} - \lambda_2 \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_2} \\
 \tau_3 &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_3} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha_3} - \lambda_3 \frac{\partial f_3}{\partial \alpha_3}
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

donde, τ_i es el par del motor para el brazo i .

Para las ecuaciones (5.10) y (5.11), las derivadas de la función Lagrangiana y de las ecuaciones de restricción f_i , con respecto a las seis coordenadas generalizadas, son

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) &= (m_b + m_c) \ddot{x} - \frac{1}{6} m_b L_a \sum_{i=1}^3 (c\theta_i (\ddot{\alpha}_i s\alpha_i + \dot{\alpha}_i^2 c\alpha_i)), \\
 \frac{\partial L}{\partial x} &= 0, \\
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) &= (m_b + m_c) \ddot{y} - \frac{1}{6} m_b L_a \sum_{i=1}^3 (s\theta_i (\ddot{\alpha}_i s\alpha_i + \dot{\alpha}_i^2 c\alpha_i)), \\
 \frac{\partial L}{\partial y} &= 0, \\
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) &= (m_b + m_c) \ddot{z} + \frac{1}{6} m_b L_a \sum_{i=1}^3 (\ddot{\alpha}_i c\alpha_i - \dot{\alpha}_i^2 s\alpha_i), \\
 \frac{\partial L}{\partial z} &= (m_c + \frac{3}{2} m_b) g,
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

y, para $i = 1, 2,$ y 3 :

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_i} \right) &= (I_t + \frac{1}{3} m_b L_a^2) \ddot{\alpha}_i \\
 &\quad - \frac{1}{6} m_b L_a [s \alpha_i (c \theta_i \ddot{x} + s \theta_i \ddot{y} + \dot{z} \dot{\alpha}_i) \\
 &\quad + c \alpha_i (c \theta_i \dot{x} \dot{\alpha}_i + s \theta_i \dot{y} \dot{\alpha}_i - \ddot{z})], \tag{5.13} \\
 \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} &= \frac{1}{2} g L_a c \alpha_i (m_a + m_b) - \\
 &\quad \frac{1}{6} m_b L_a \dot{\alpha}_i (c \theta_i c \alpha_i \dot{x} + s \theta_i c \alpha_i \dot{y} + s \alpha_i \dot{z}).
 \end{aligned}$$

Las derivadas parciales de la función de restricción f_i con respecto a las seis coordenadas generalizadas, son

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_i}{\partial x} &= 2(x - \Delta r(c \theta_i) - L_a(c \theta_i) c \alpha_i), \\
 \frac{\partial f_i}{\partial y} &= 2(y - \Delta r(s \theta_i) - L_a(s \theta_i) c \alpha_i), \tag{5.14} \\
 \frac{\partial f_i}{\partial z} &= 2(z - L_a s \alpha_i),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_i}{\partial \alpha_i} &= 2(x - \Delta r(c \theta_i) - L_a(c \theta_i) c \alpha_i)(L_a c \theta_i s \alpha_i) + \\
 &\quad 2(y - \Delta r(s \theta_i) - L_a(s \theta_i) c \alpha_i)(L_a s \theta_i s \alpha_i) + \\
 &\quad 2(z - L_a s \alpha_i)(-L_a c \alpha_i), \tag{5.15}
 \end{aligned}$$

para $i = 1, 2$, y 3 .

5.4 VALIDACIÓN DEL MODELO DINÁMICO PROPUESTO PARA EL SISTEMA ROBOTENIS

La validación del modelo dinámico para el Sistema RoboTennis emplea un modelo de simulación desarrollado en ADAMS. Este modelo de simulación fue presentado en el Capítulo 4. Para una trayectoria deseada, los pares son hallados a partir de la ecuación (5.11) y luego comparados con los pares obtenidos por el modelo de simulación ADAMS (Figura 5.2).

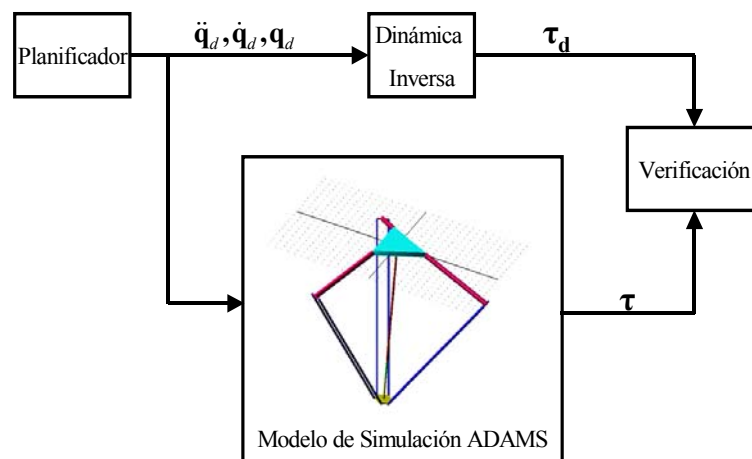


Figura 5.2 Validación del modelo dinámico empleando ADAMS.

Los parámetros óptimos para robot (dimensiones y masas) empleados en la validación dinámica, se presentaron en el Capítulo 4, Tabla 4.1 y Sección 4.4.1.

Varias trayectorias han sido programadas y simuladas. Las trayectorias son de tipo lineal. A continuación se presentan los resultados de simulación para algunos movimientos críticos (movimientos de mayor par) de la plataforma móvil: un movimiento sobre el eje x , un movimiento sobre el eje y , un movimiento sobre el plano xy , y un movimiento tridimensional. Cada trayectoria

esta dada en el espacio cartesiano y definida por un punto inicial, un punto final, una velocidad de movimiento, y una serie de puntos intermedios generados mediante funciones polinomiales, las cuales producen un movimiento suave de la plataforma móvil.

Como parámetros adicionales de validación, se analiza la influencia de las inercias de los antebrazos y de la velocidad de la plataforma móvil en el comportamiento del modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTenis.

5.5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

5.5.1 VALIDACIÓN DEL MODELO DINÁMICO PRO- PUESTO PARA EL SISTEMA ROBOTENIS

TRAYECTORIA 1

Movimiento de la plataforma móvil sobre el eje x

Los parámetros de movimiento son:

- Punto inicial: (0, 0, 750) mm
- Punto Final: (300, 0, 750) mm
- Velocidad: 2 m/s
- Tipo de trayectoria: lineal

Los perfiles de posición, velocidad, y aceleración para la plataforma móvil, así como, los pares de los motores necesarios para el seguimiento de la trayectoria, generados por el modelo de simulación ADAMS, se muestran en la Figura 5.3. El movimiento tiene una duración de 0.25 s, una aceleración 3.3g y un par máximo de 3.25 Nm para el motor 1 (asumiendo la presencia de un elemento reductor de 10).

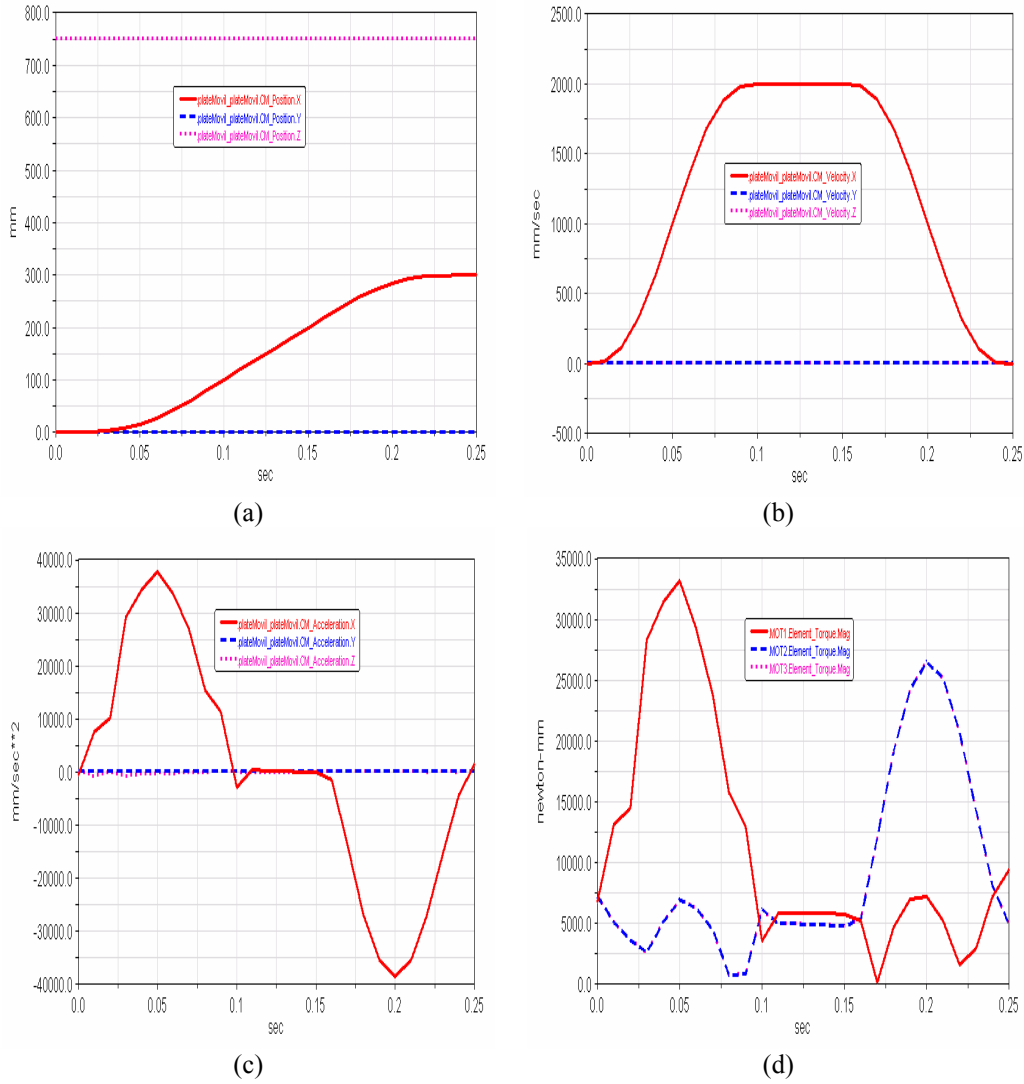


Figura 5.3 Perfiles de (a) posición, (b) velocidad, (c) aceleración y (d) par, en el seguimiento de la trayectoria 1.

Los pares obtenidos a través del modelo dinámico inverso propuesto para el Sistema RoboTennis (Ecuación 5.11), se presentan en la Figura 5.4. La comparación entre los pares obtenidos del modelo dinámico propuesto y los pares obtenidos por el modelo de simulación ADAMS, así como la diferencia

entre los dos modelos dinámicos se muestran en la Figura 5.5. La máxima diferencia entre los dos modelos es de 10%.

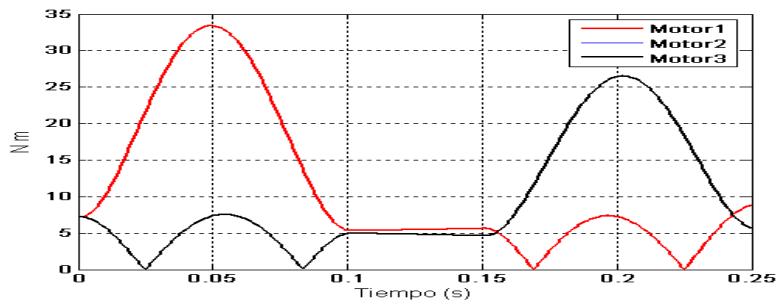
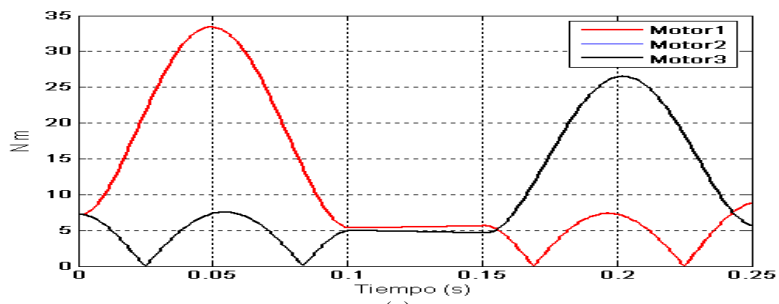
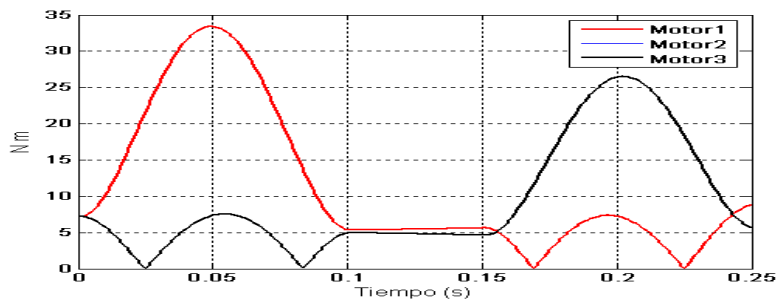


Figura 5.4 Pares generados por el modelo dinámico inverso propuesto para el Sistema RoboTennis, para el seguimiento de la trayectoria 1.



(a)



(b)

Figura 5.5 (a) Comparación entre los pares generados por el modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTennis y los pares del modelo de simulación ADAMS, (b) diferencia entre los modelos dinámicos para el seguimiento de la trayectoria 1.

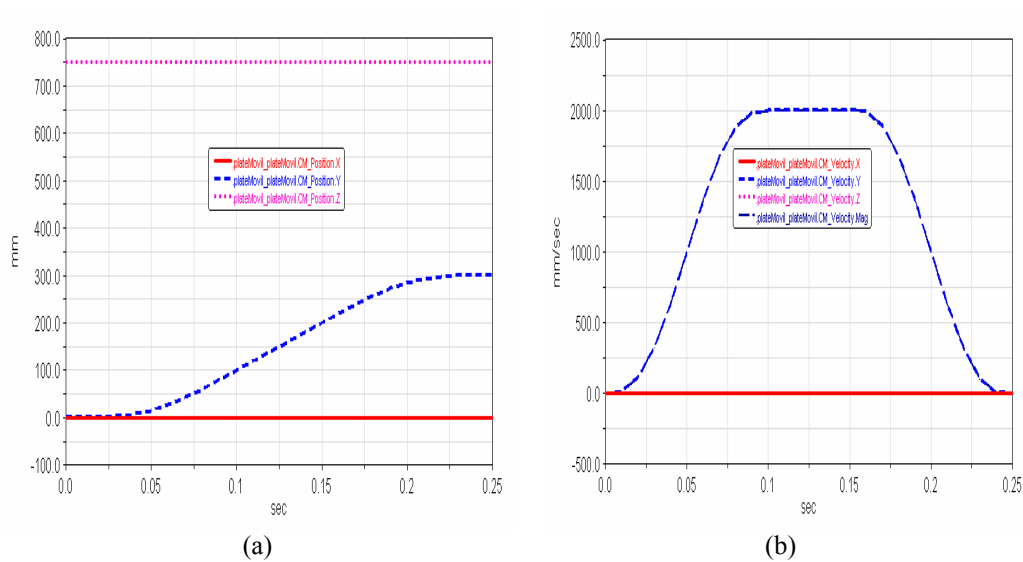
TRAYECTORIA 2

Movimiento de la plataforma móvil sobre el eje y

Los parámetros de movimiento son:

- Punto inicial: (0, 0, 750) mm
- Punto Final: (0, 300, 750) mm
- Velocidad: 2 m/s
- Tipo de trayectoria: lineal

Los perfiles de posición, velocidad, y aceleración para la plataforma móvil, así como, los pares de los motores necesarios para el seguimiento de la trayectoria, generados por el modelo de simulación ADAMS, se muestran en la Figura 5.6. El movimiento tiene una duración de 0.25 s, una aceleración de 4g y un par máximo de 3.64 Nm para el motor 3 (asumiendo la presencia de un elemento reductor de 10).



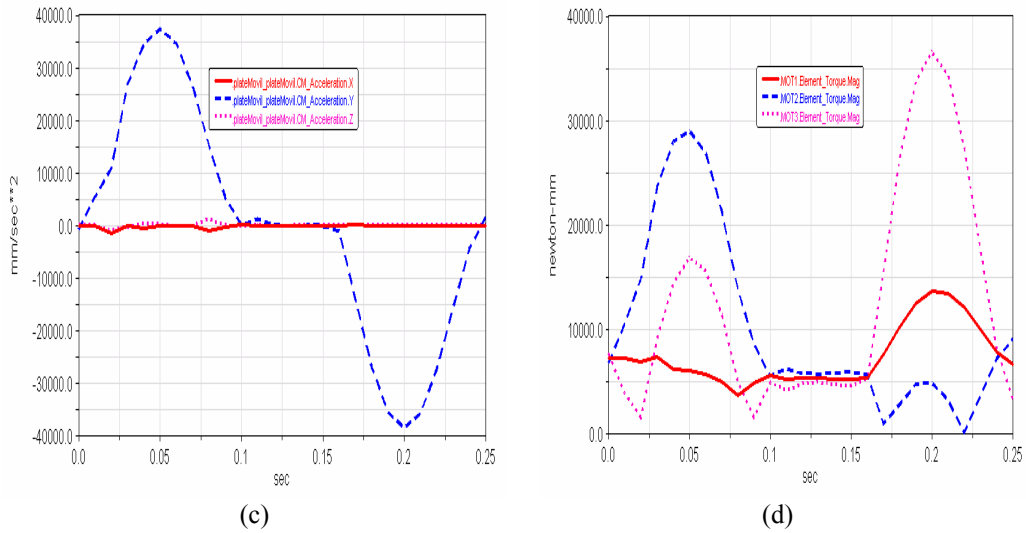


Figura 5.6 Perfiles de (a) posición, (b) velocidad, (c) aceleración y (d) par, en el seguimiento de la trayectoria 2.

Los pares obtenidos a través del modelo dinámico inverso propuesto para el Sistema RoboTenis (Ecuación 5.11), se presentan en la Figura 5.7. La comparación entre los pares obtenidos por los dos modelos dinámicos, así como la diferencia entre los dos modelos dinámicos se muestran en la Figura 5.8. La máxima diferencia entre los dos modelos es de 3%.

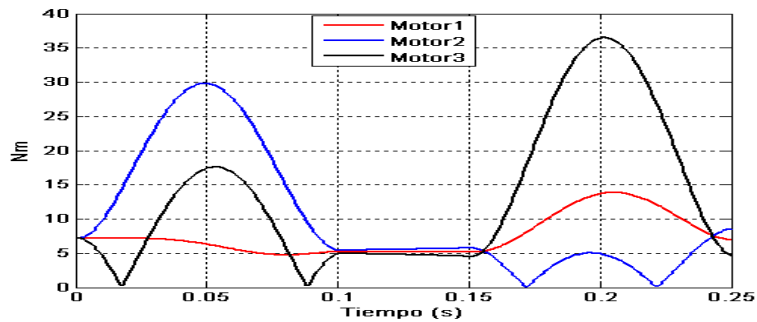


Figura 5.7 Pares generados por el modelo dinámico inverso propuesto para el Sistema RoboTenis, para el seguimiento de la trayectoria 2.

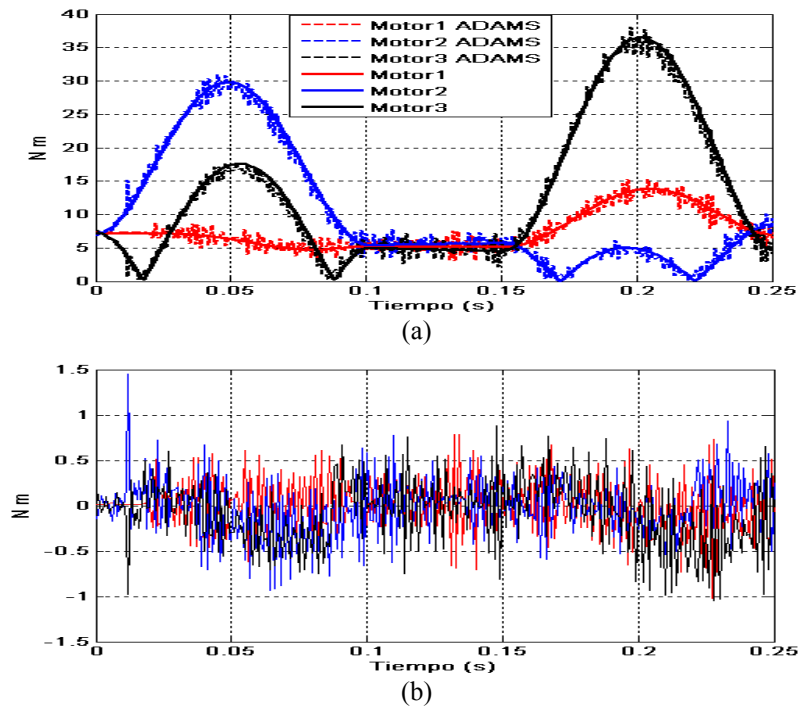


Figura 5.8 (a) comparación entre los pares generados por el modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTennis y los pares del modelo de simulación ADAMS, (b) diferencia entre los modelos dinámicos para el seguimiento de la trayectoria 2.

TRAYECTORIA 3

Movimiento de la plataforma móvil sobre el plano xy

Los parámetros de movimiento son:

- Punto inicial: (0, 0, 750) mm
- Punto Final: (200, -200, 750) mm
- Velocidad: 2 m/s
- Tipo de trayectoria: lineal

Los perfiles de posición, velocidad, y aceleración para la plataforma móvil, así como, los pares de los motores necesarios para el seguimiento de la trayectoria, generados por el modelo de simulación ADAMS, se muestran en la Figura 5.9.

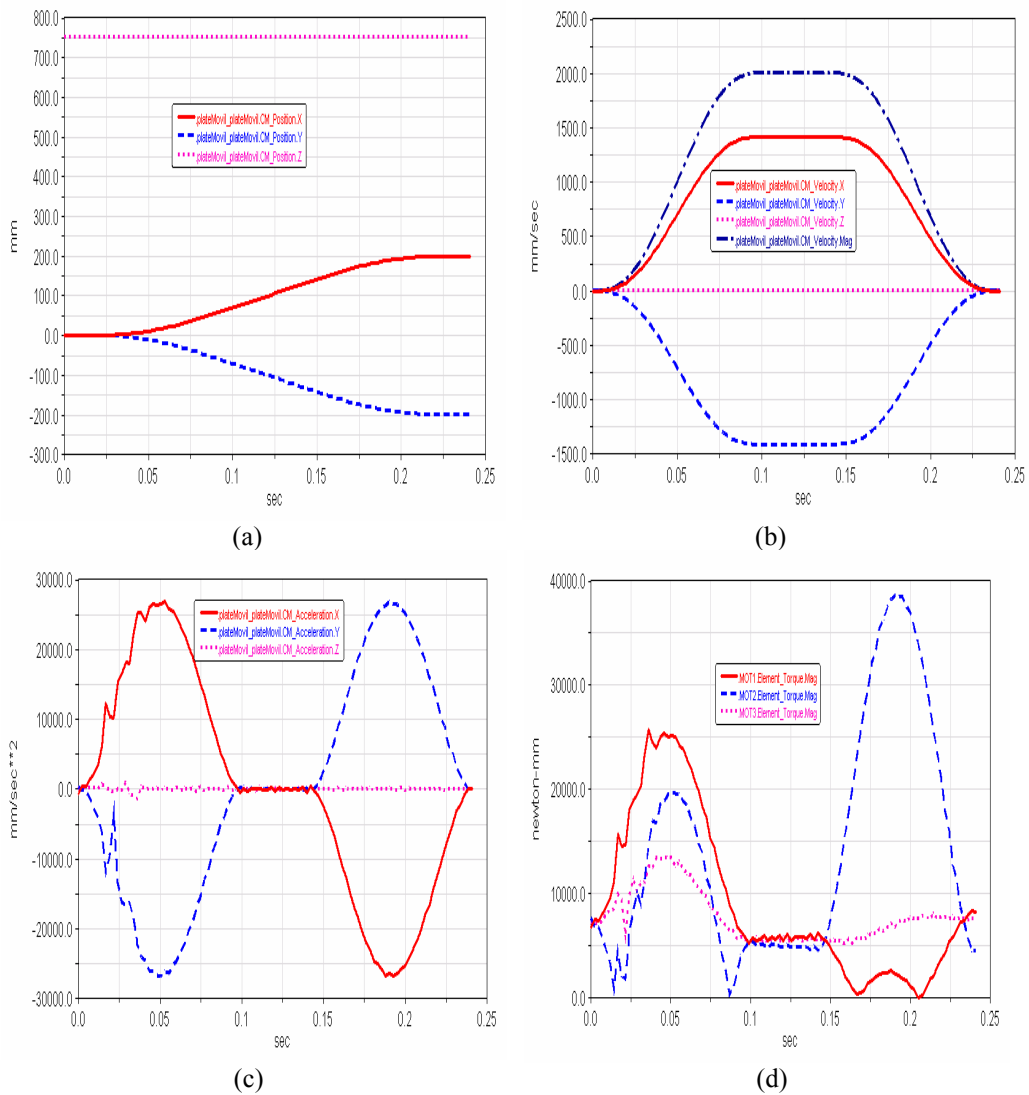


Figura 5.9 Perfiles de (a) posición, (b) velocidad, (c) aceleración y (d) par, en el seguimiento de la trayectoria 3.

El movimiento tiene una duración de 0.24 s, una aceleración de 4.2g y un par máximo de 3.9 Nm para el motor 2 (asumiendo la presencia de un elemento reductor de 10).

Los pares obtenidos a través del modelo dinámico inverso propuesto para el sistema RoboTennis (5.11), se presentan en la Figura 5.10. La comparación entre los pares obtenidos por los dos modelos dinámicos, así como la diferencia entre los dos modelos dinámicos se muestran en la Figura 5.11. La máxima diferencia entre los dos modelos es cerca de 3%.

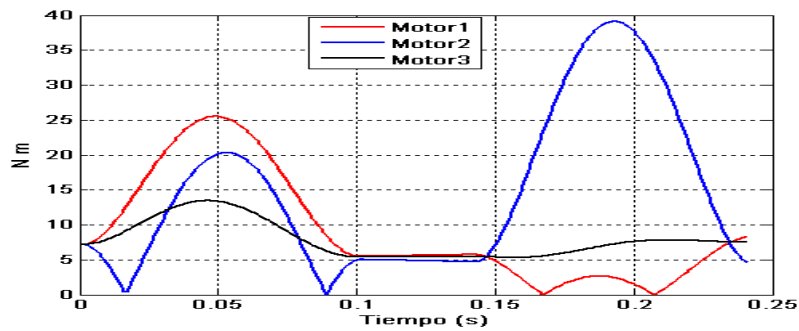
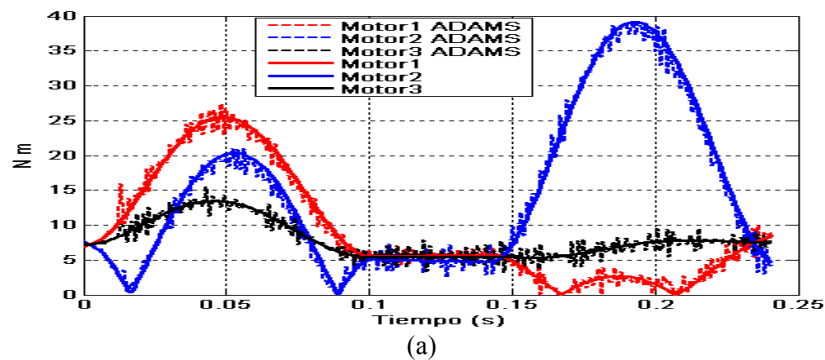


Figura 5.10 Pares generados por el modelo dinámico inverso propuesto para el Sistema RoboTennis, para el seguimiento de la trayectoria 3.



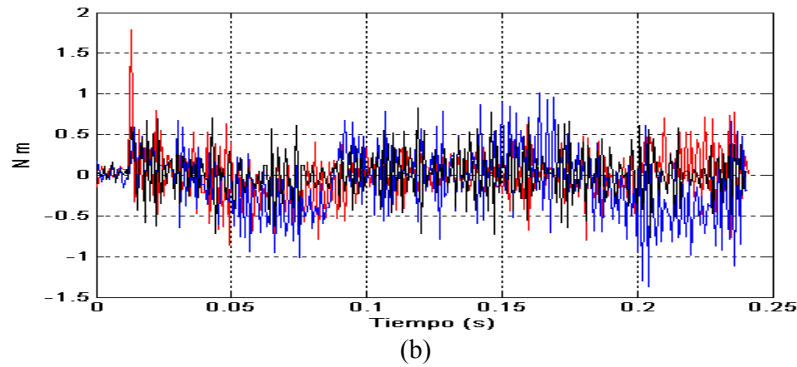


Figura 5.11 (a) comparación entre los pares generados por el modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTennis y los pares del modelo de simulación ADAMS, (b) diferencia entre los modelo dinámicos para el seguimiento de la trayectoria 3.

TRAYECTORIA 4

Movimiento tridimensional de la plataforma móvil

Los parámetros de movimiento son:

- Punto inicial: (0, 0, 750) mm
- Punto Final: (200, 200, 1000) mm
- Velocidad: 2 m/s
- Tipo de trayectoria: lineal

Los perfiles de posición, velocidad, y aceleración para la plataforma móvil, así como, los pares de los motores necesarios para el seguimiento de la trayectoria, generados por el modelo de simulación ADAMS, se muestran en la Figura 5.12. El movimiento tiene una duración de 0.24 s, una aceleración de 3.8g y un par máximo de 4.2 Nm para el motor 3 (asumiendo la presencia de un elemento reductor de 10).

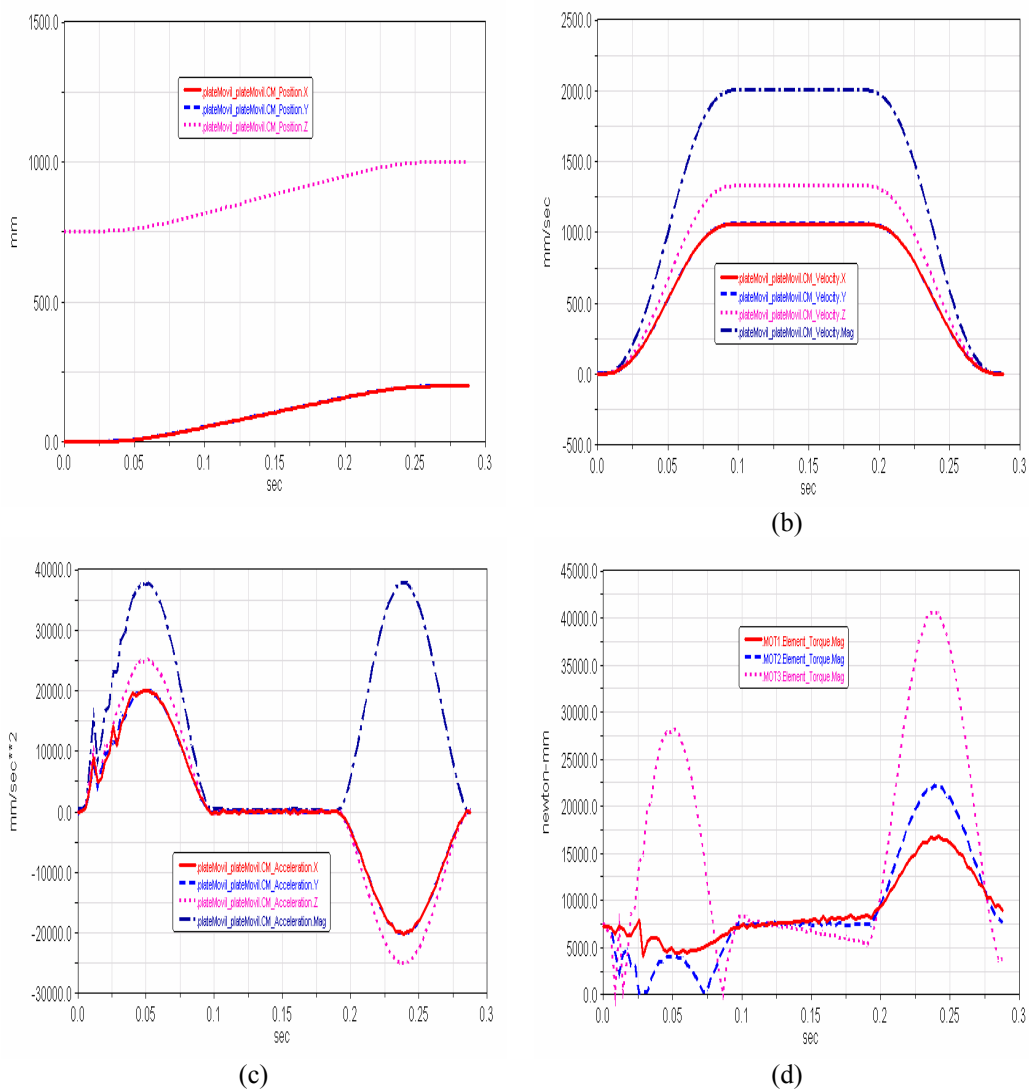


Figura 5.12 Perfiles de (a) posición, (b) velocidad, (c) aceleración y (d) par, en el seguimiento de la trayectoria 4.

Los pares obtenidos a través del modelo dinámico inverso propuesto para el Sistema RoboTennis (5.11), se presentan en la Figura 5.13. La comparación entre los pares obtenidos por los dos modelos dinámicos, así como la diferencia

entre los dos modelos dinámicos se muestran en la Figura 5.14. La máxima diferencia entre los dos modelos es cerca de 3%.

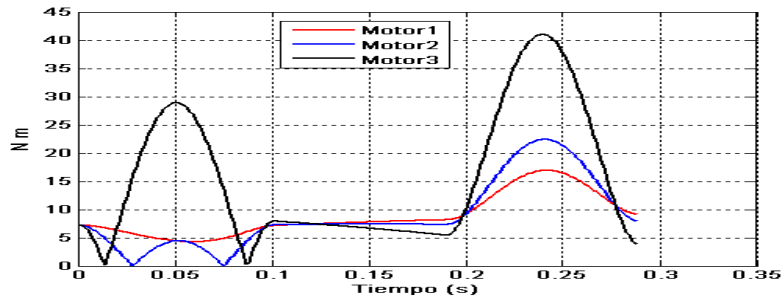
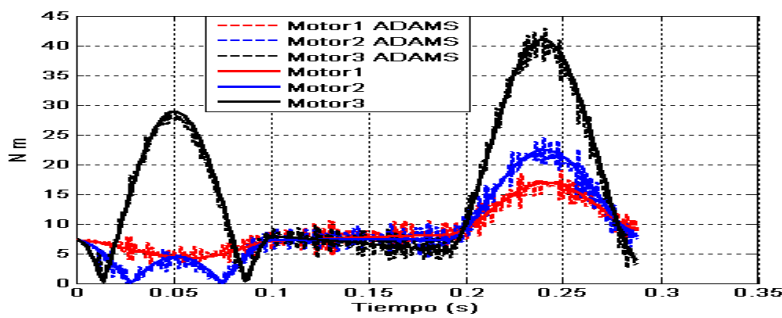
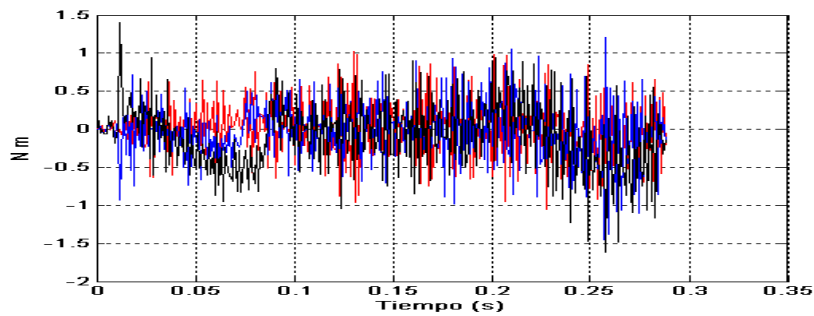


Figura 5.13 Pares generados por el modelo dinámico inverso propuesto para el Sistema RoboTenis, para el seguimiento de la trayectoria 4.



(a)



(b)

Figura 5.14 (a) comparación entre los pares generados por el modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTenis y los pares del modelo de simulación ADAMS, (b) diferencia entre los modelos dinámicos para el seguimiento de la trayectoria 4.

5.5.2 INFLUENCIA DE LAS INERCIAS DE LOS ANTEBRAZOS EN EL COMPORTAMIENTO DEL MODELO DINÁMICO PROPUESTO PARA EL SISTEMA ROBOTENIS

Para observar la influencia de las inercias de los antebrazos en el comportamiento dinámico del Sistema RoboTennis, a manera de ejemplo, se han efectuado dos simulaciones de trayectorias críticas. Los resultados permiten observar el error cometido, cuando se emplea un modelo dinámico simplificado (ignorando las inercias de los antebrazos) para el Sistema RoboTennis.

En la Figura 5.15, se presentan los pares generados por el modelo simulación ADAMS y un modelo dinámico simplificado para el Sistema RoboTennis, para un movimiento en línea recta, entre los puntos (0.0, 0.0, 750) mm y (200, 200, 1000) mm a una velocidad de 2 m/s. La diferencia entre los modelos es cerca del 41%.

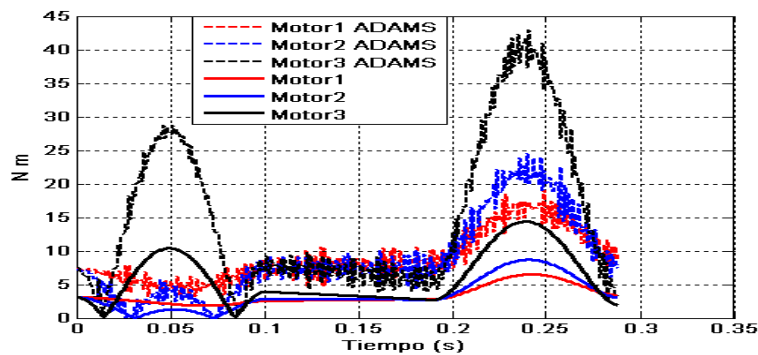


Figura 5.15 Comparación entre los pares generados por el modelo de simulación ADAMS y por el modelo dinámico simplificado para un movimiento en línea recta entre los puntos (0.0, 0.0, 750) mm y (200, 200, 1000) mm, a una velocidad de 2 m/s.

Para un movimiento entre los puntos (0.0, 0.0, 750) mm y (200, -200, 750) mm a una velocidad de 2 m/s, la diferencia es cerca del 60%, Figura 5.16.

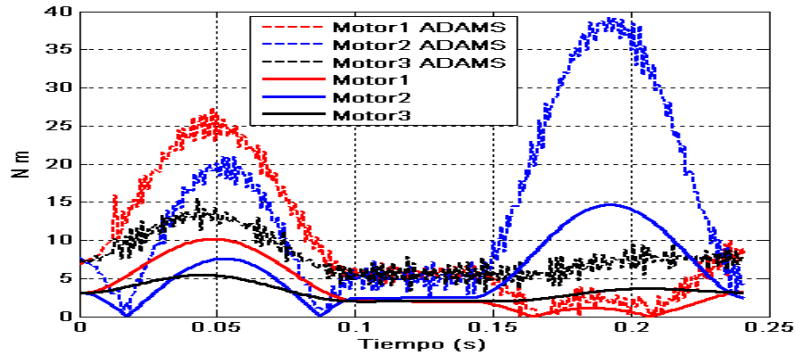


Figura 5.16 Comparación entre los pares generados por el modelo de simulación ADAMS y por el modelo dinámico simplificado para un movimiento en línea recta entre los puntos (0.0, 0.0, 750) mm y (200, -200, 750) mm, a una velocidad de 2 m/s.

5.5.3 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO DEL MODELO DINÁMICO PROPUESTO PARA EL SISTEMA ROBOTENNIS

La dinámica de un sistema se manifiesta de manera notable en aplicaciones de alta velocidad. Por esta razón, a continuación se presentan el comportamiento del modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTennis, en la ejecución de los movimientos relacionados en el apartado anterior, pero a una velocidad de 5 m/s.

Las Figuras 5.17 y 5.18 presentan el compartimiento del modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTennis en movimientos de alta velocidad. En las Figuras 5.17(a) y 5.18(a), se observa el comportamiento del modelo de simulación ADAMS. Las Figuras 5.17(b) y 5.18(b) compara los dos modelos dinámicos, y las Figuras 5.17(c) y 5.18(c), presentan el error entre los dos modelos. Se observa que el modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTennis presenta un excelente comportamiento en aplicaciones de alta velocidad. La máxima diferencia entre los dos modelos es menor al 3%.

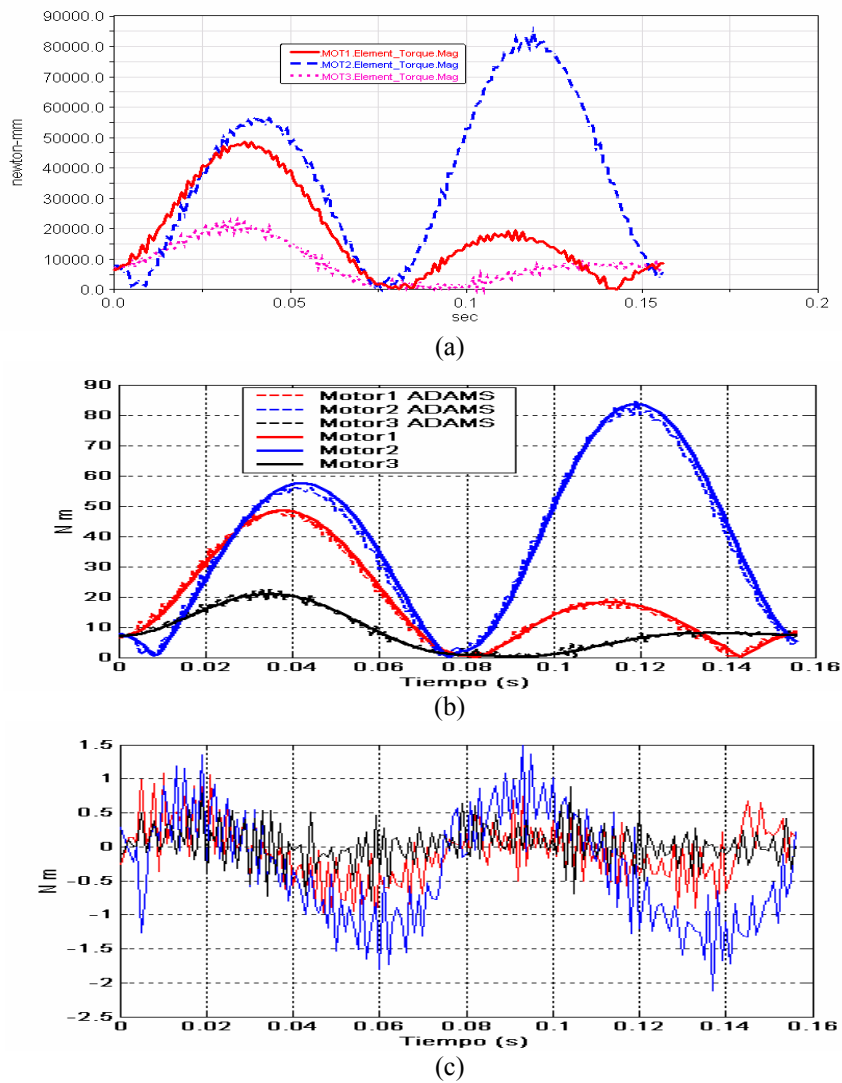


Figura 5.17 Comparación entre los pares generados por el modelo de simulación ADAMS y por el modelo dinámico simplificado para un movimiento en línea recta entre los puntos (0.0, 0.0, 750) mm y (200, -200, 750) mm, a una velocidad de 5 m/s.

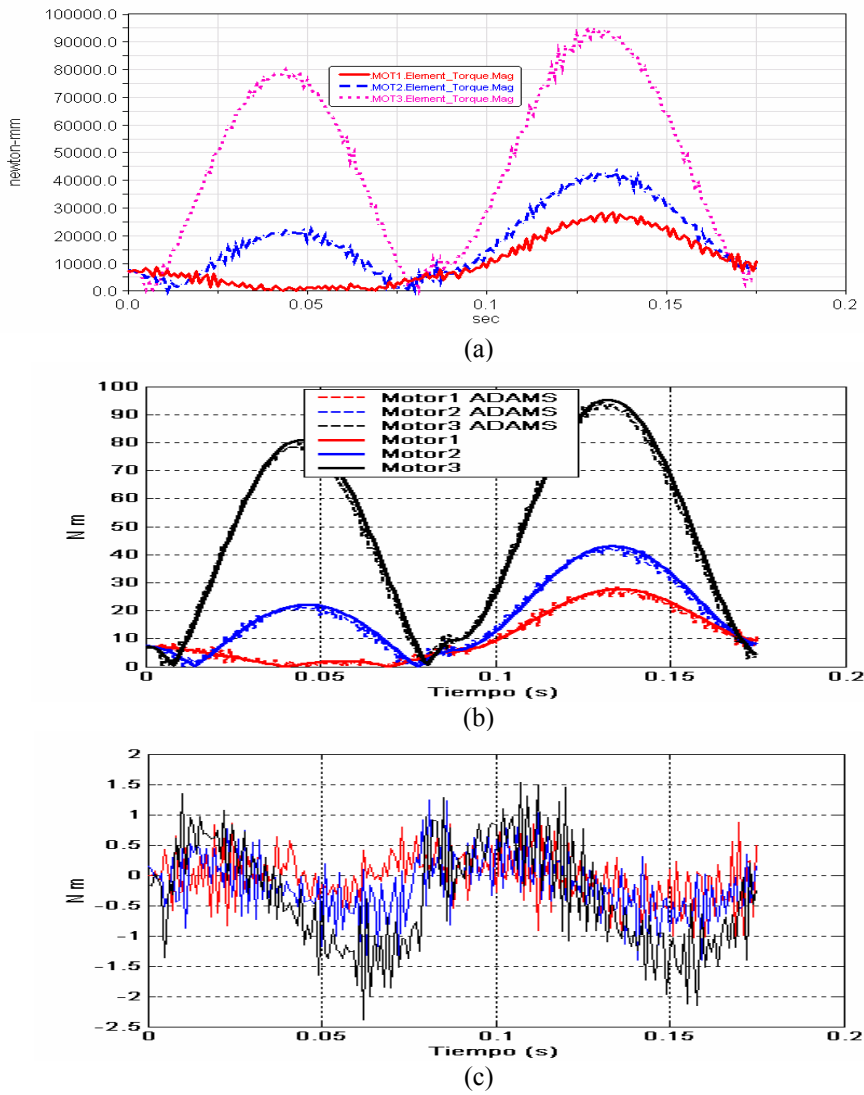


Figura 5.18 Comparación entre los pares generados por el modelo de simulación ADAMS y por el modelo dinámico simplificado para un movimiento en línea recta entre los puntos (0.0, 0.0, 750) mm y (200, 200, 1000) mm, a una velocidad de 5 m/s.

5.6 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha presentado un modelo dinámico para el sistema RoboTennis, empleando la formulación de Lagrange. Como innovación principal, el modelo propuesto tiene en cuenta la inercia de los antebrazos del robot. La herramienta para la validación del modelo dinámico, emplea un modelo de simulación dinámica desarrollado en ADAMS. El proceso de validación tiene en cuenta movimientos críticos del robot (movimientos en los que se requiere mayor par). Además, se analiza la influencia de las inercias de los antebrazos y de la velocidad de la plataforma móvil en el comportamiento del modelo dinámico propuesto para el Sistema RoboTennis. Los resultados obtenidos, muestran que las ecuaciones de movimiento propuestas, modelan de forma muy “aproximada” el compartimiento dinámico del Sistema RoboTennis (diferencia entre el modelo dinámico propuesto y el modelo de simulación ADAMS menores a 3%). En el siguiente capítulo, se validará experimentalmente el modelo dinámico propuesto, y su influencia en el desarrollo de las diferentes estrategias de control sobre prototipo construido.

CAPÍTULO 6

CONTROL ARTICULAR DEL SISTEMA ROBOTENIS

6.1 INTRODUCCIÓN

Generalmente, el sistema de control un manipulador esta compuesto por los siguientes modulos: los actuadores, los sensores, el controlador, el planificador de trayectorias, y el sistema de supervisión y decisión. Los actuadores son los encargados de accionar cada una de las articulaciones con el fin de posicionar y orientar el efector final. Estos pueden ser de tipo eléctrico, neumático o hidráulico. Los sensores por su parte, son los encargados de medir las variables de interés para el control del robot, y pueden ser de dos clases: los que proveen el reconocimiento del estado mecánico del manipulador (por ejemplo: sensores de posición, velocidad, fuerza), y los que permiten una realimentación del entorno del manipulador (por ejemplo: cámaras, sensores de ultrasonidos, etc.). El controlador recibe las consignas de referencia de las variables asociadas a la trayectoria del efector final, y que son generadas por el sistema de pla-

nificación de trayectorias. De acuerdo a la información entregada por los sensores, se generan las acciones de control adecuadas para cada actuador según el algoritmo de control empleado.

En este capítulo se propone el controlador articular para el Sistema RoboTenis. Para reducir el efecto de las perturbaciones externas y que la señal de control sea robusta frente a errores de modelado, el controlador debe considerar términos de realimentación de posición y velocidad. La dificultad de realizar el control en bucle cerrado proviene del hecho de que el robot es un sistema multidimensional, no lineal, fuertemente acoplado, y muy variable en el tiempo (modificación de la carga transportada). A pesar de que el control de robots ha sido estudiado en numerosos trabajos, la dificultad es tal, que aún queda mucho por hacer en este campo.

A fin de encontrar la solución más sencilla y eficaz para conseguir control articular del Sistema RoboTenis, inicialmente este capítulo describe los distintos métodos encontrados en la literatura especializada. A continuación se discute su posible aplicación al control de robots rápidos y precisos. Se elige y describe detalladamente un método basado en el modelo dinámico del robot para el control del Sistema RoboTenis. Los resultados experimentales permiten validar la estrategia de control empleada.

6.2 MÉTODOS DE CONTROL DE ROBOTS

No es posible, en el marco de este trabajo, tratar en detalle todos los distintos métodos propuestos en la literatura especializada. Sólo se considerarán los métodos más importantes, y en especial aquellos métodos susceptibles de ser utilizados para el control del robot Delta. Se puede encontrar más información en (Dombre and Khalil, 1988), (Lind, 1988), (Craig, 1986, 1988), (Khosla, 1986), (Asada and Slotine, 1986).

6.2.1 CONTROL CLÁSICO

El modelo dinámico de un manipulador, describe un sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden, no lineales y acopladas. Por lo tanto en un control clásico, como es el de la mayoría de los robots industriales actuales, el mecanismo se considera un sistema lineal y cada una de las articulaciones se controla localmente con un regulador de tipo PID de ganancias constantes. Las ventajas de este sistema son la facilidad de implantación y el pequeño coste computacional. Las desventajas son que la respuesta temporal del robot varía según su configuración, se producen sobreoscilaciones e imprecisión en los movimientos rápidos. En muchas aplicaciones, estos inconvenientes no son graves, y a menudo se atenúan con la utilización de un reductor entre el motor y el brazo. El esquema de la Figura 6.1, ilustra este acercamiento, donde cada eje se regula independientemente de los otros.

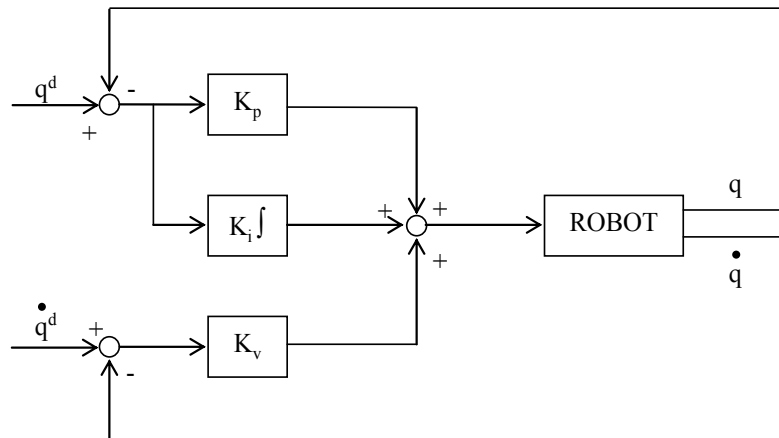


Figura 6.1 Esquema de un control clásico PID

Con un esquema como el de la Figura 6.1, se puede demostrar que el término integral es indispensable para eliminar el error estático en posición

debido a la fuerza de gravedad y al rozamiento. No obstante, para una consigna de tipo rampa (velocidad constante) subsiste un error constante de arrastre. Para una consigna parabólica (aceleración constante), este error se hace infinito. Para evitar estos problemas, algunos autores realizan un control a partir de la velocidad y/o aceleración local sobre cada uno de los ejes. Si no es posible medir la velocidad directamente, un término derivador sobre la posición jugará el mismo papel. El esquema de este tipo de control es el siguiente (Figura 6.2):

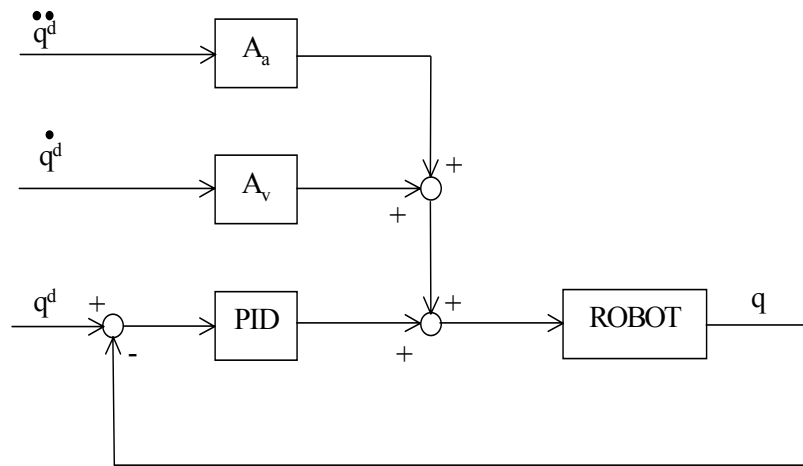


Figura 6.2 Control clásico PID con pre compensación.

A pesar de que este esquema es más completo que el anterior, no tiene en cuenta las no linealidades y acoplamientos del robot. Esto ha llevado a los investigadores a desarrollar otros métodos de control.

6.2.2 MÉTODOS BASADOS EN EL MODELO DINÁMICO DEL ROBOT

Puesto que la aplicación para el Sistema RoboTennis, requiere evoluciones rápidas del robot y una gran precisión en el movimiento, es necesario con-

cebir un sistema de control más sofisticado que tenga en cuenta las fuerzas de interacción dinámicas.

Un primer esquema conocido como “feed-forward compensation” (Khosla, 1986), Figura 6.3, utiliza el modelo dinámico completo del robot para el control articular. El modelo dinámico inverso permite calcular los pares necesarios en cada articulación para seguir la trayectoria deseada. Este cálculo puede realizarse antes del movimiento (fuera de línea) o durante el movimiento (en línea o en tiempo real). En este último caso, debe desarrollarse un modelo con un coste computacional aceptable. Al aplicar el par calculado a cada articulación, la trayectoria se seguirá sin error si el modelo del robot es exacto y si no hay perturbaciones externas. En la práctica, ningún modelo es perfecto y debe introducirse un bucle de realimentación.

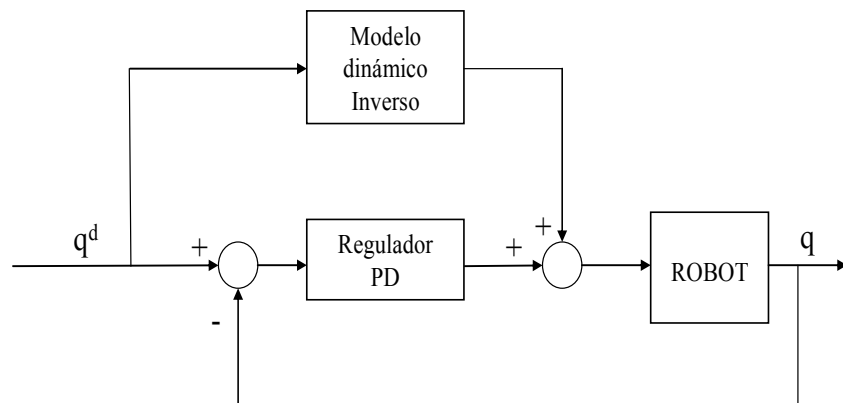


Figura 6.3 Control feed-forward Compensation.

El modelo dinámico inverso del manipulador se calcula en función del movimiento deseado, tomando la forma general:

$$\tau^d = \tilde{A}(q^d)\ddot{q}^d + \tilde{H}(q^d, \dot{q}^d) \quad (6.1)$$

El bucle de realimentación está formado por n reguladores PD independientes, siendo n el número de ejes del robot. Los pares aplicados a los distintos ejes del robot son:

$$\tau = \tau^d + K_p(q^d - q) + K_v(\dot{q}^d - \dot{q}) \quad (6.2)$$

donde K_p, K_v son las matrices diagonales de ganancias definidas positivas.

Un análisis de este método demuestra que el término de control, τ^d , desplaza el punto de funcionamiento del regulador de manera no lineal, y hace que el sistema se considere localmente lineal y desacoplado.

Si se desea desacoplar el robot globalmente, se necesita otro esquema. El uso del control por desacoplamiento no lineal conocido como ‘computed-torque controller’ constituye un buen acercamiento (An et al., 1988), (Dombre and Khalil, 1988). Teóricamente, este método asegura el desacoplamiento y la linealización de las ecuaciones del modelo, lo que se traduce en una respuesta uniforme independientemente de la configuración del robot.

El modelo dinámico de un robot puede expresarse como:

$$\tau = A(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) \quad (6.3)$$

donde τ, q, H son vectores de dimensión n , y A es la matriz de inercia del robot, de dimensión $n \times n$ donde n representa el número de ejes del robot.

A partir de (6.3) es posible calcular la relación inversa, llamada también modelo dinámico directo:

$$\ddot{q} = A^{-1}(q)[\tau - H(q, \dot{q})] \quad (6.4)$$

Sean \tilde{A}, \tilde{H} las estimaciones respectivas de A, H , obtenidas mediante el modelado matemático del robot. Se escoge entonces un control tal que:

$$\tau = \tilde{A}(q)\omega + \tilde{H}(q, \dot{q}) \quad (6.5)$$

donde ω es un nuevo vector de control de dimensión n . Operando en las ecuaciones anteriores, se obtiene:

$$\ddot{q} = A^{-1}(\tilde{A}\omega + \tilde{H} - H) \quad (6.6)$$

Así, en el caso de que el modelo se suponga perfecto ($\tilde{A} = A$ y $\tilde{H} = H$), el sistema está gobernado por la ecuación:

$$\ddot{q} = I\omega \quad (6.7)$$

donde I representa la matriz identidad de orden $n \times n$. Así, al utilizar la relación no lineal que describe el modelo dinámico inverso del robot en la ecuación (6.5), es posible linealizar y desacoplar el sistema. Se tiene entonces un problema de control de n sistemas lineales, invariantes, desacoplados y de segundo orden (integrador doble) como el de la Figura 6.4.

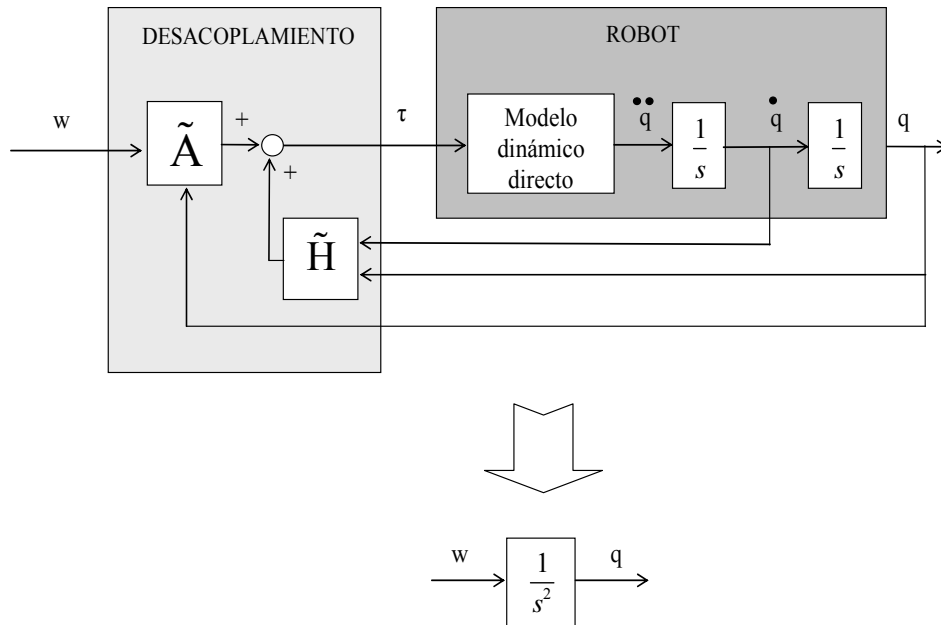


Figura 6.4 Principio del control por desacoplamiento no lineal.

El vector de control ω se identifica por lo tanto con la aceleración deseada, y se calcula normalmente como combinación lineal de una señal de referencia y una señal de realimentación. Hay distintas posibilidades a la hora de hacer este cálculo: la más frecuentemente utilizada consiste en utilizar un regulador PD para la señal de realimentación, y un control a priori basado en la aceleración deseada \ddot{q}^d para la señal de referencia, lo que permite limitar en gran medida los errores de arrastre. Si el modelo fuera perfecto y no existiesen perturbaciones externas, esta señal sería suficiente para controlar el robot, sin necesidad de que hubiera señal de realimentación. La Figura 6.5 muestra este esquema de desacoplamiento no lineal.

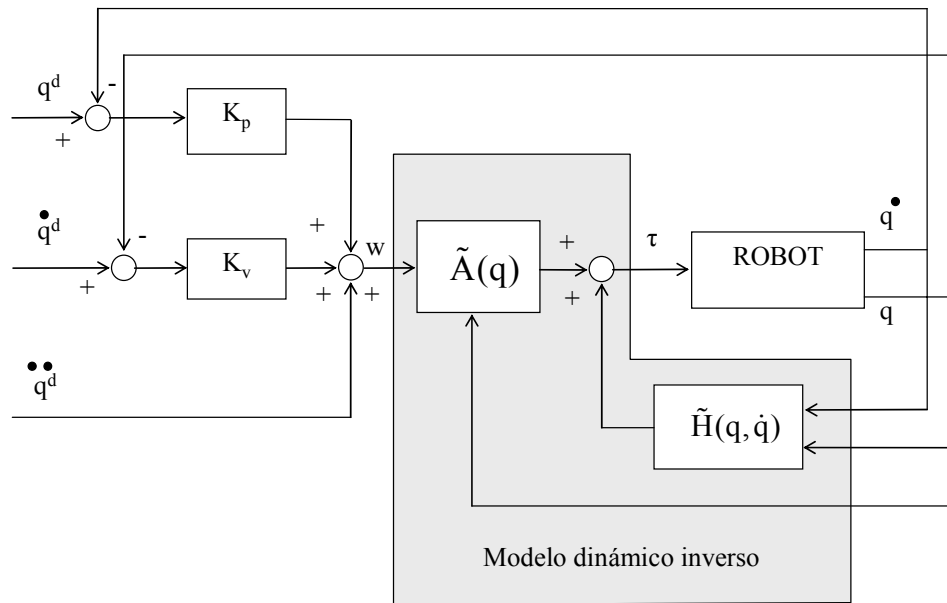


Figura 6.5 Control por desacoplamiento no lineal

Evidentemente, el uso del control por desacoplamiento no lineal supone el cálculo del modelo dinámico en tiempo real, lo cual no siempre es fácil. Así, Khali (1978) propone otro esquema llamado “control predictivo”, en el cual, el cálculo de \tilde{A} y \tilde{H} se hace en función del movimiento deseado q^d, \dot{q}^d , en lugar de hacerse con los valores actuales q, \dot{q} . Si no hay errores de modelado ni perturbaciones, este control linealiza y desacopla las ecuaciones del sistema como en el caso anterior. El esquema se muestra en la Figura 6.6.

Luh et al. (1980) proponen un método que permite hacer el desacoplamiento no lineal directamente en el espacio del trabajo del robot cuando la trayectoria se especifica en este espacio de trabajo, pero su descripción sale del marco de este trabajo. No obstante, se puede decir que este método necesita el cálculo de la inversa de la matriz jacobiana y de su derivada, lo que compromete su utilización en la mayoría de los sistemas de tiempo real.

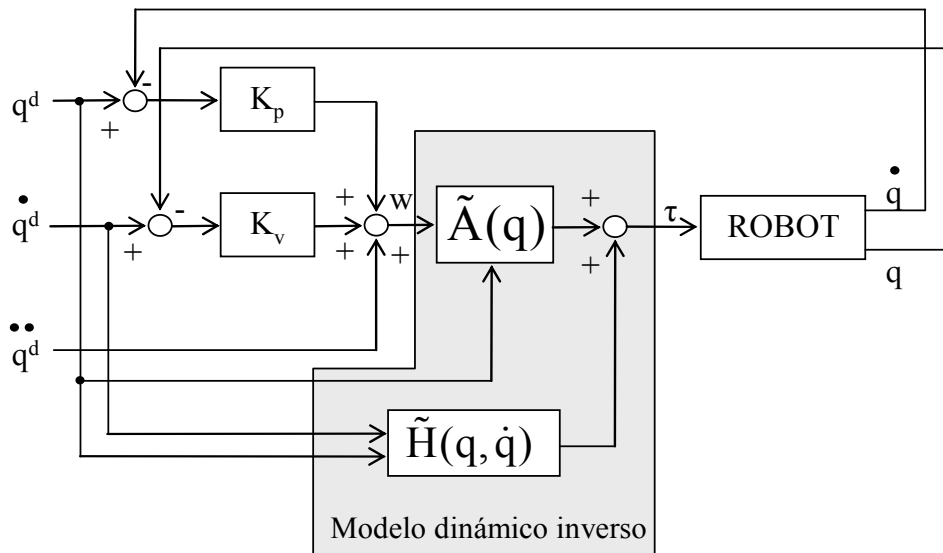


Figura 6.6 Control predictivo.

6.2.3 MÉTODOS ADAPTATIVOS

Parece interesante utilizar el modelo dinámico del robot en el bucle de regulación, sin embargo, el tiempo empleado en establecer el modelo y el desconocimiento de sus parámetros han llevado a los investigadores a desarrollar otros métodos de control. En concreto, en los últimos años se ha concentrado un esfuerzo considerable en el control adaptativo. Estos métodos se basan en adaptar la ley de control según un criterio de error específico.

El control adaptativo con modelo de referencia o MRAC (Model Reference Adaptive Control) es un esquema encontrado a menudo en la literatura. Esta estructura de control se muestra en la Figura 6.7.

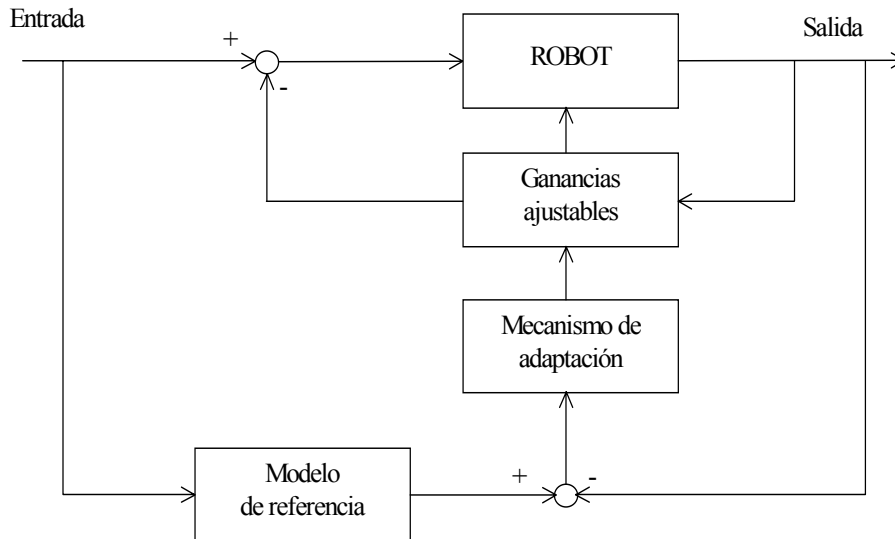


Figura 6.7 Control adaptativo con modelo de referencia.

La idea fundamental, es forzar al robot a seguir un modelo de referencia lo mejor posible, esto se hace ajustando las ganancias de realimentación del control en función del error entre la respuesta del modelo y la del sistema real. A menudo, el modelo de referencia escogido es una ecuación diferencial lineal de segundo orden para cada grado de libertad (Dobowsky and Desformes, 1979). Evidentemente, un modelo así no tiene en cuenta las fuerzas de gravedad y desprecia los efectos no lineales. Además, la estabilidad global de este esquema no está siempre garantizada, lo que lo convierte en inutilizable en la práctica, especialmente si, como en el caso de los robots rápidos, los parámetros varían tan rápidamente como el fenómeno de la adaptación. Se han propuesto otros esquemas MRAC basados en distintos conceptos; se puede hallar una síntesis de estos métodos en (Hsia, 1986), (Craig, 88).

Se encuentran en la literatura otros algoritmos basados en la teoría de los reguladores autoadaptativos (Koivo and Guo, 1981), (Van and Griethuysen, 1987), pero tienen la desventaja de que el robot debe modelarse como un sistema lineal desacoplado, lo cual no se corresponde con la realidad.

Así, la mayoría de los trabajos basados en el control adaptativo simplemente han querido aplicar a los robots las teorías desarrolladas para los sistemas lineales, de modo que a pesar de las numerosas publicaciones sobre el tema, los resultados obtenidos son poco prometedores.

Por esta razón, en los últimos años se ha producido la reaparición del uso del modelo dinámico en los métodos adaptativos; Craig (1988) propone un método adaptativo basado en el esquema del control por desacoplamiento no lineal que se muestra en la Figura 6.8.

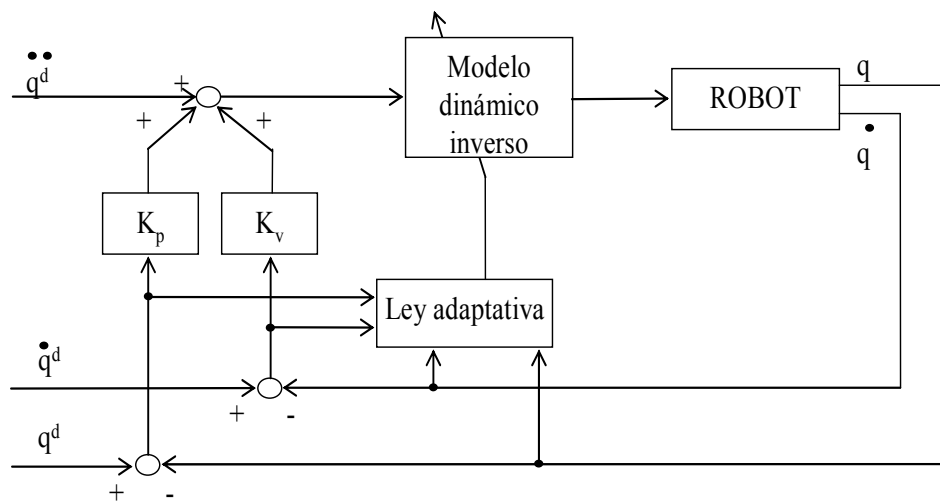


Figura 6.8 Control adaptativo con identificación de los parámetros del modelo.

La idea consiste en identificar los parámetros del modelo no lineal completo antes que los de un modelo lineal que no refleja la realidad. Faessler (1988a) también adopta este esquema, pero lo amplía con un modelo de referencia lineal de segundo orden del sistema desacoplado.

Cuando la trayectoria es repetitiva, como es a menudo el caso en las aplicaciones robóticas, se puede utilizar un control por aprendizaje para corregir los fenómenos no modelados, y de este modo el robot irá corrigiendo sus errores de seguimiento de la trayectoria. Craig (1988) propone un esquema de este tipo, Figura 6.9.

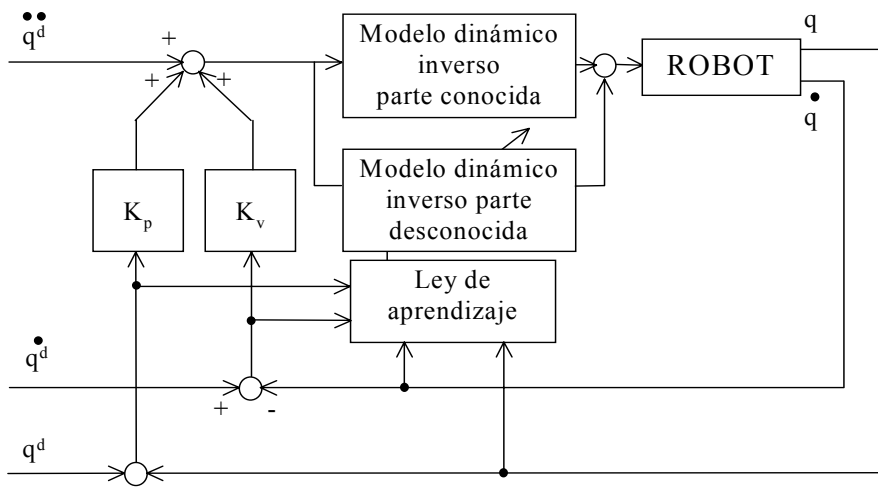


Figura 6.9 Control por aprendizaje.

6.3 CONTROL DEL ROBOT DELTA

El uso de esquemas de control basados en el modelo dinámico del robot (Sección 6.2.2) ha sido ampliamente utilizado para el control de los robots de alta velocidad y de alto rendimiento (An et al., 1988), (Youce, 1985). En el caso del robot DELTA, el método de control más empleado usa el modelo dinámico del robot y la trayectoria deseada para calcular los comandos de par de los motores (Codourey,1991(a)), (Miller, 1995), (Guglielmetti, 1994). Varios investigadores han trabajado en el control del robot DELTA. Las principales aportaciones en este campo serán presentadas en forma muy breve en las siguientes secciones.

6.3.1 CLAVEL, REYMOND

R. Clavel es el inventor tanto del diseño como de la geometría del robot DELTA. Su artículo (Clavel, 1991) describe en profundidad varios aspectos de relacionados con la concepción y diseño de la estructura DELTA. También incluye la elección de los materiales de construcción, selección de la longitud de los eslabones para unas dimensiones deseadas del espacio de trabajo, así como la selección de los actuadores y reductores de transmisión.

Una comparación con el manipulador serie industrial, SCARA, reveló las ventajas obtenidas con el uso de un robot DELTA equivalente. Las simulaciones llevadas a cabo usan la matriz jacobiana y el modelo dinámico completo del robot DELTA. El modelo dinámico fue desarrollado usando el principio de D'Alembert del trabajo virtual. Esta formulación requería un alto costo computacional por lo que fue utilizada solamente para propósitos de simulación.

6.3.2 CODOUREY, ALAN

A. Codourey construyó la primera versión del robot DELTA y diseñó su controlador. El objetivo de este trabajo fue el estudio e implementación los

requerimientos necesarios de control para la aplicación de este robot a nivel industrial.

En este trabajo se presentó una formulación para el modelo dinámico inverso del robot Delta basada en la aproximación Newton-Euler. El modelo dinámico obtenido fue simplificado al desprestigiar las inercias de las barras paralelas (antebrazos). Esta simplificación permitió su procesamiento en tiempo real en un intervalo de 353ms sobre un módulo dedicado “transputer” T800. La arquitectura de control usó una red de tres “transputers” T800. Las ventajas ofrecidas por el controlador basado en T800 sobre la tradicional solución industrial basada en el procesador Motorola (familia 68xxx), son demostrados por los resultados experimentales. La ganancia en la potencia de procesamiento fue incrementada en un factor de tres.

Diferentes trayectorias del robot DELTA (líneas rectas, elipses y “clothoids”), y perfiles de velocidad (parabólico y “sine-on-ramps”) fueron estudiados e implementados en este trabajo. La influencia del tipo de trayectoria en el posicionamiento final fue también investigada.

Dos estrategias de control han sido usadas. Una estrategia para el seguimiento de trayectoria (Figura 6.3), y la otra para el posicionamiento (Figura 6.1). La constante eléctrica del motor y el retardo puro del amplificador fueron tomados en cuenta en la estrategia de control propuesta. Esta estrategia, adelanta la fase de la trayectoria en el cálculo del modelo dinámico inverso con respecto a la trayectoria del controlador PD. Adelantar la fase significa que señal de trayectoria fue retardada en tiempo 2ms con respecto a la señal de par. Gracias a esto fue posible compensar los efectos de retardo en el motor y el amplificador con anticipación. Como consecuencia, se obtuvo una magnitud de error absoluto sobre la trayectoria del orden de 2mm para una carga transportada de valor cero.

Para reducir los efectos de acoplamiento, se sugiere un esquema de desacoplamiento usando la matriz de inercias del robot. Un procedimiento para el cálculo de la matriz de inercias del robot DELTA es desarrollado en el este trabajo.

6.3.3 MILLER, KAROL

K. Miller desarrolló dos modelos completos de dinámica inversa para el robot DELTA (sin simplificaciones inerciales). El primero se basó en una aproximación Lagrangiana (Miller, 1992), y el segundo en una variación de la aplicación del Principio de Hamilton (Miller, 1993), (Miller, 1995). Los modelos son adecuados para el cálculo de la dinámica en tiempo real. El modelo basado en el Principio de Hamilton tenía una mejor eficiencia numérica y fue utilizado para su implementación.

El cálculo del modelo dinámico completo, ejecutado en un “transputer” con operación “pipeline” tardó 480 μ s. Esto representa un incremento en el tiempo de cálculo de la implementación de éste modelo dinámico del orden del 36% con respecto al modelo dinámico inverso simplificado Newton-Euler propuesto por Codourey (1991(a)). Con el modelo dinámico completo el error de seguimiento de trayectoria media se redujo a 1.75mm. Esto es una mejora de 12.5% en el error obtenido con respecto al modelo simplificado basado en la formulacion Newton-Euler.

La matriz de inercia del robot no fue derivada partir del modelo dinámico propuesto, lo cual constituye la principal desventaja de estos trabajos.

6.3.4 GUGLIELMETTI, P.

El trabajo de Guglielmetti (Guglielmetti, 1994)se concentró en la unificación y tratamiento global de varios aspectos de control y diseño de un robot paralelo. Se presento una metodología generalizada para el desarrollo del modelo dinámico de robots paralelos y series, empleando la solución analítica de la matriz jacobiana para un manipulador paralelo arbitrario, la formulación dinámica Lagrangiana, y la versión modificada de la rutina numérica de Newton-Euler,. Se hizo énfasis en las propiedades de la matriz jacobiana, sus inversas, los determinantes y las derivadas temporales, así como en las similitudes y diferencias significativas de los mecanismos paralelos y serie.

Además, incluye una caracterización de la cinemática, dinámica y control de los robots paralelos, así como el análisis de singularidades, la rigidez mecánica y las variaciones inerciales como funciones de la configuración del robot. Un ejemplo fue hecho para un robot DELTA con estas consideraciones, usando en parte el modelo Lagrangiano desarrollado en (Miller, 1992).

Se intento reunir bajo un solo enfoque las estrategias de control “resolved acceleration” de (Luh, 1980) y “computed torque” descrita en (Craig, 1986), a través del uso de la matriz jacobiana y las relaciones cinemáticas y dinámicas del robot. La primera estrategia de control se basa en la dinámica el manipulador expresada en el espacio articular, y la segunda en el espacio operacional (espacio cartesiano). Las dos estrategias emplean un modelo linealizado del manipulador, el desacoplamiento entre ejes, y supresión de perturbaciones de fuerzas cuadráticas a través del uso de ganancias de realimentación no lineal. Estas ganancias de realimentación están programadas por los elementos del modelo dinámico inverso del robot. Desafortunadamente, los pocos resultados presentados en este trabajo no permiten observar claramente el comportamiento de los controladores propuestos.

En resumen, los esquemas de control de Codourey y Guglielmetti son de algún modo similares. Ambos usan el modelo de dinámica inversa del robot, aunque en diferentes secciones del lazo de control. En estos modelos se despreciaron previamente la fricción y otros efectos parásitos que ocurrían en la estructura del robot y en los elementos de transmisión. Los controladores propuestos en estos trabajos emplean un modelo dinámico simplificado del robot (despreciando la inercia de los antebrazos) para el control de trayectoria.

Un modelo dinámico inverso completo para el robot DELTA fue desarrollado por K. Miller y empleado en la implementación de estrategias de control de trayectoria “feed-forward torque” en paralelo con un controlador PD (Figura 6.3).

6.4 CONTROL ARTICULAR DEL SISTEMA ROBOTENIS

Puesto que la aplicación para el Sistema RoboTenis, requiere evoluciones rápidas del robot y una gran precisión en el movimiento, es necesario concebir un sistema de control tenga en cuenta las fuerzas de interacción dinámicas.

El Sistema RoboTenis emplea la estrategia de control propuesta por Codourey (1991(a)). Este esquema de control conocido como “feed-forward compensation”, Figura 6.10, utiliza el modelo dinámico en el lazo de prealimentación y un controlador PD en el lazo de realimentación del robot para el control de trayectoria. El modelo dinámico inverso permite calcular los pares necesarios en cada articulación para seguir la trayectoria deseada. Este cálculo se realiza durante el movimiento (en línea o en tiempo real) a partir de la ecuación (5.1). Al aplicar el par calculado a cada articulación, la trayectoria se seguirá sin error si el modelo del robot es exacto y si no hay perturbaciones externas. En la práctica, ningún modelo es perfecto. Por lo que el regulador PD permite minimizar los errores en el modelo del robot y dar robustez al sistema ante perturbaciones externas.

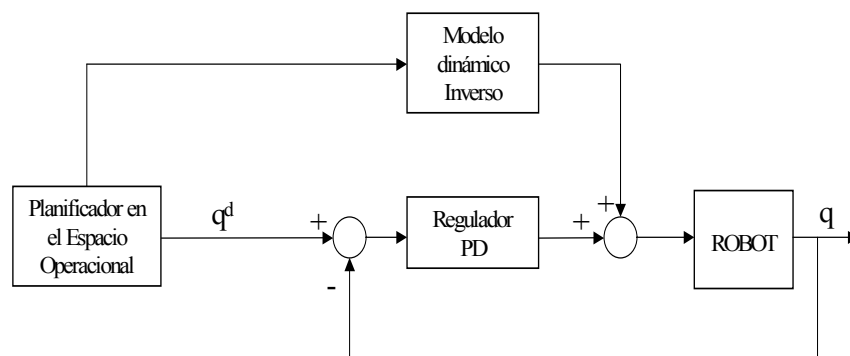


Figura 6.10 Control de trayectoria del Sistema RoboTenis.

La planificación de trayectorias se realiza en el espacio operacional y emplea trayectorias de tipo lineal. Los puntos intermedios generados en el espacio operacional, son mapeados al espacio articular mediante el modelo cinemático inverso del robot (Ecuación 3.9).

6.4.1 HARDWARE DE CONTROL

El hardware de control del Sistema RoboTenis emplea una tarjeta DSPACE 1103. En esta tarjeta se ejecutan en tiempo real los algoritmos de planificación y generación de trayectorias, calculo de los modelos cinemáticos y dinámicos del robot, y los algoritmos de control. El control esta definido como una tarea periódica de 2 Khz.

En forma resumida, en la DSPACE 1103 se pueden distinguir los siguientes elementos (Figura 6.11):

- **PPC:** La DS1103 es una sistema de placa única basado en un procesador PowerPC (PPC) 604e de Motorola, que forma la unidad principal de procesamiento.
- **Unidades E/S:** Se ha añadido en placa junto al PPC un conjunto de periféricos usados frecuentemente en sistemas de control digital. Como convertidores analogico/digital y digital/analogico, puertos de E/S digital (Bit I/O), un interfaz serie y control de encoders incrementales, quienes permiten el desarrollo de controladores avanzados para robots hasta seis articulaciones.
- **Subsistema DSP:** El subsistema DSP, basado en un TMS320F240 DSP de Texas Instrument, esta especialmente diseñado para el control de amplificadores eléctricos. Entre otras capacidades de E/S, el DSP proporciona generadores PWM de 3 fases.
- **Subsistema CAN:** Un subsistema mas, basado en un microcontrolador (MC) 80C164 de Siemens, se usa para la conexión a un bus CAN.

- **PPC Maestro, DSP Esclavo, MC Esclavo:** El PPC tiene acceso a ambos subsistemas el DSP y el CAN. Hablando en términos de comunicación entre procesos, el PPC es el maestro, mientras el DSP y el MC CAN son esclavos.

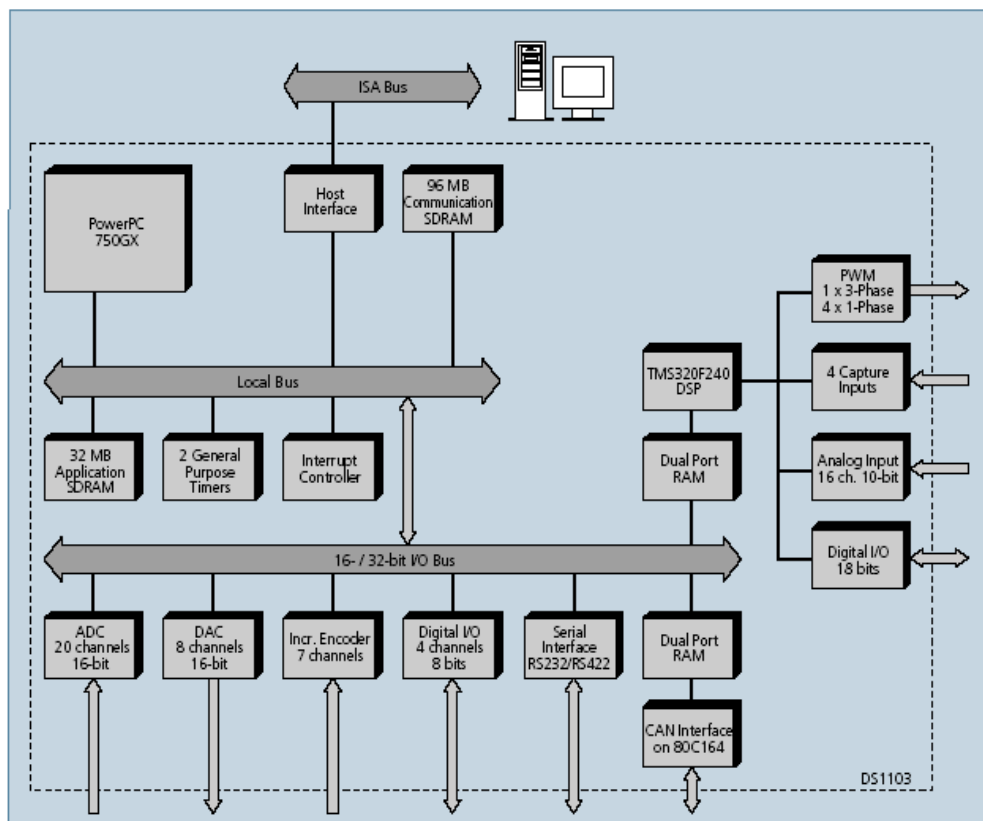


Figura 6.11 Sub-sistemas de la Tarjeta DSAPCE 1103

La interfaz gráfica de usuario (GUI) emplea el software Control Desk y permite supervisar las estrategias de control, modificar sus parámetros en tiempo real y seguir la evolución de las variables relevantes del sistema, Figura 6.12.

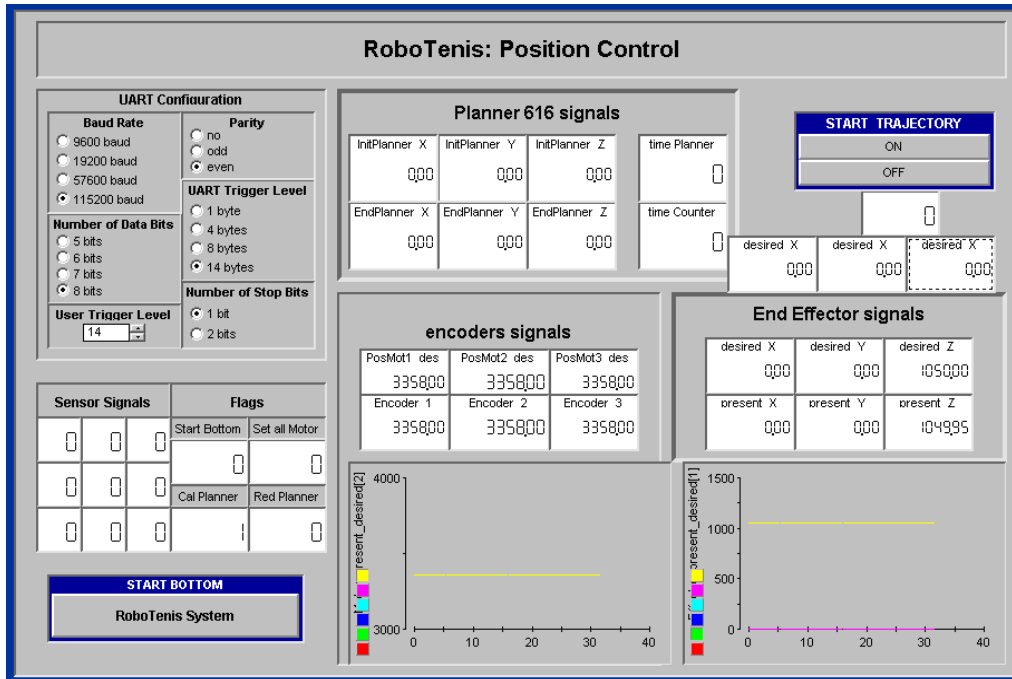


Figura 6.12 Interfaz grafica del controlador para el Sistema RoboTennis.

6.4.2 EL MOTOR Y EL VARIADOR DE VELOCIDAD

De acuerdo con los resultados obtenidos en el proceso de diseño y que son recogidos en el Capítulo 4, se han seleccionado los motores y los accionamientos para el Sistema RoboTennis. Los motores UNIMOTOR (Control Techniques) son servomotores de corriente alterna sin escobillas disponibles en forma de motores trifásicos de imán permanente de 8 polos con característica EMF de realimentación sinusoidal. Los motores dan un par elevado, una mínima modulación de par y poseen un diseño mecánico de alta rigidez y un diseño óptimo desde el punto de vista térmico.

El modelo de motor seleccionado (115UMC300CACAA) posee encoder óptico incremental de 4096 pulsos por revolución (ppr), puede generar un

par máximo de 9.4 Nm, y un par pico de 27 Nm durante 1 s. La tensión de alimentación es de 400 Vac y la velocidad máxima es de 100π rad/s (3000 rpm).

El accionamiento o variador de frecuencia, regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el motor.

En general, los variadores de frecuencia están compuestos por:

- **Etapa Rectificadora** Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc.
- **Etapa intermedia** Filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos..
- **Inversor** Convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Actualmente se emplean IGBT's para generar los pulsos controlados de tensión. La frecuencia portadora de los IGBT se encuentra entre 2 a 16kHz.
- **Etapa de control** Esta etapa controla los IGBT para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia. Generalmete de emplea modulación PWM (Modulación por Ancho de Pulso)

De las características mecánicas y eléctricas (par, velocidad y tensión de alimentación) de los motores seleccionados para el Sistema RoboTennis, el modelo de variador seleccionado es el UNIDRIVE SP1404. Este variador puede manejar corriente máxima de 5.8 A y una potencia nominal de 2,2 Kw a 400 Vac.

La selección de los conductores de potencia, la instalación eléctrica, y las conexiones de alimentación del conjunto accionamiento-motor se presentan con mayor detalle en (Cuesta, 2004).

6.4.3 PUESTA EN MARCHA DEL MOTOR

El Unidrive SP se ha diseñado para funcionar en cualquiera de los siguientes modos:

- Modo de bucle abierto
 - Vectorial de bucle abierto
 - Modo de T/f fija (VHz)
 - Modo de T/f cuadrática (VHz)
- Vectorial de bucle cerrado
- Servo
- Regen

En el Sistema RoboTenis, el accionamiento funciona en modo Servo, para uso con motores sin escobillas de imán permanente equipados con dispositivo de realimentación. El accionamiento controla directamente la velocidad del motor mediante un dispositivo de realimentación para garantizar el ajuste preciso de la velocidad del rotor a las exigencias. El control de flujo no es necesario debido a que los imanes permanentes, que forman parte del rotor, producen la autoexcitación del motor. El dispositivo de realimentación debe proporcionar información de posición absoluta para garantizar una perfecta adecuación de la tensión de salida a los campos electromagnéticos posteriores del motor. El par completo se proporciona hasta la velocidad cero.

6.4.3.1 CONFIGURACIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD

La estructura del accionamiento está organizada en menús y parámetros. Los menús avanzados están formados por grupos de parámetros o parámetros relacionados con una función o característica específica del accionamiento, Figura 6.13. La configuración del variador de velocidad permite sintonizar los lazos de corriente y velocidad entre el accionamiento y el motor. Tanto el lazo de corriente como el de velocidad contiene controladores PI.

La configuración de los distintos parámetros del accionamiento se realiza utilizando el software “CT Soft” proporcionado por Control Techniques.

Para almacenar los datos configurados en el accionamiento se utiliza un cable de comunicaciones serie que permite comunicar el PC de configuración con el variador de velocidad.

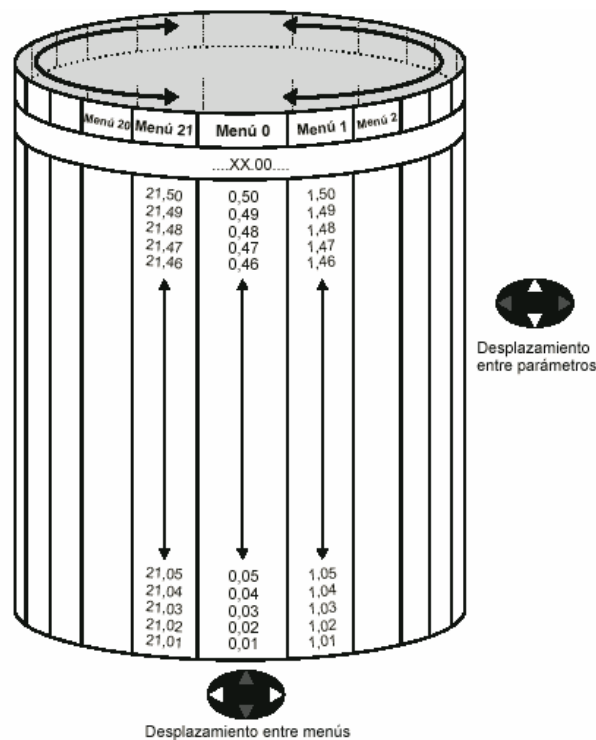


Figura 6.13 Estructura de menús y parámetros de configuración para el variador.

6.4.3.2 CONTROL DEL MOTOR EN MODO SERVO

PARÁMETROS DEL MOTOR (Pr):

- **Pr 0.46 {5.07} Intensidad nominal del motor**
Este parámetro define la corriente continua máxima del motor. Se utiliza para establecer los límites de intensidad y la protección térmica del motor.

- **Pr 0.42 {5.11} Número de polos del motor**

Este parámetro define el número de giros eléctricos para una revolución mecánica del motor. Este parámetro tiene que ajustarse correctamente para que los algoritmos de control proporcionen resultados óptimos.

AUTOAJUSTE Pr 0.40 {5.12}

Existen tres pruebas de autoajuste en el modo servo: breve a baja velocidad, normal a baja velocidad y de medición de inercia. La prueba normal a baja velocidad debe realizarse siempre que sea posible, ya que el accionamiento mide la resistencia de estátor y la inductancia del motor para calcular las ganancias del bucle de corriente. La prueba de medición de inercia debe realizarse por separado con el autoajuste breve a baja velocidad y el autoajuste normal a baja velocidad.

- La prueba breve a baja velocidad hace girar eléctricamente el motor 2 vueltas (es decir, hasta 2 revoluciones mecánicas) en la dirección seleccionada. El accionamiento aplica la intensidad nominal al motor durante la prueba y mide el ángulo de fase del codificador (Pr 3.25). El ángulo de fase se mide al final de la prueba cuando el motor está parado y, por consiguiente, es importante que el motor no tenga carga alguna mientras está en reposo para que la medición del ángulo sea correcta. Esta prueba tarda unos 2 en realizarse y sólo puede utilizarse si el rotor se acopla en una posición estable en poco tiempo.
- La prueba normal a baja velocidad hace girar eléctricamente el motor 2 vueltas (es decir, hasta 2 revoluciones mecánicas) en la dirección seleccionada. El accionamiento aplica la intensidad nominal al motor durante la prueba y mide el ángulo de fase del codificador (Pr 3.25). El ángulo de fase se mide al final de la prueba cuando el motor está parado y, por consiguiente, es importante que el motor no tenga carga alguna mientras está en reposo para que la medición del ángulo sea correcta. Entonces se miden la resistencia (Pr 5.17) y la inductancia (Pr 5.24) del motor, cuyos valores permiten configurar las ganancias del bucle de corriente (Pr 0.38 {4.13} y Pr 0.39 {4.14}). Esta prueba tarda unos 2 en

realizarse y puede utilizarse con motores que tardan en acoplarse después de que el rotor se haya puesto en movimiento. Durante la medición de la inductancia del motor, el accionamiento aplica impulsos de corriente al motor que producen un flujo contrario al generado por los imanes. La intensidad máxima aplicada es un cuarto de la nominal (Pr **0.46**). Aunque es poco probable que afecte a los imanes del motor, la intensidad nominal debe ajustarse en un nivel inferior durante las pruebas para evitar que el nivel de corriente desmagnetice los imanes de forma permanente.

- La prueba de inercia permite medir la inercia total de la carga y el motor. Su finalidad es definir las ganancias del bucle de velocidad y proporcionar las realimentaciones positivas de par que se necesiten durante la aceleración. En el transcurso de la medición de inercia, el accionamiento intenta acelerar el motor en la dirección seleccionada según un valor máximo equivalente a $3/4 \times \text{rpm}$ con carga nominal, y después vuelve a la posición de reposo. Aunque el accionamiento utiliza el par nominal/16, aumenta el par de forma progresiva hasta $\times 1/8$, $\times 1/4$, $\times 1/2$ y $\times 1$ si el motor no se acelera a la velocidad necesaria. Cuando tampoco se alcanza la velocidad adecuada durante el último intento, la prueba se cancela y se produce una desconexión tuNE1. Si la prueba se realiza correctamente, los tiempos de aceleración y deceleración se usan en el cálculo de la inercia del motor y la carga, que se introduce en Pr **3.18**. Antes de realizar una prueba de medición de inercia es preciso configurar correctamente el par motor por amperio en Pr **5.32** y la velocidad nominal del motor en Pr **5.08**. Para realizar un autoajuste de medición de inercia, ajuste Pr **0.40** en 3 y envíe una señal de activación (terminal 31) y otra de ejecución (terminal 26 o 27) al accionamiento.

GANANCIAS DEL BUCLE DE CORRIENTE (Pr 0.38 {4.13} / 0.39 {4.14})

Las ganancias proporcional (K_p) e integral (K_i) del bucle de corriente controlan la respuesta de dicho bucle a las variaciones experimentadas por la demanda de intensidad (par). La aplicación de los valores por defecto ofrece resultados satisfactorios en la mayoría de los motores. No obstante, es posible que tenga que modificar las ganancias para mejorar el rendimiento si desea

obtener resultados óptimos en aplicaciones dinámicas. La ganancia proporcional (Pr **4.13**) se considera el factor más importante de control del rendimiento.

Los valores correspondientes a las ganancias del bucle de corriente se obtienen de varias formas:

- El accionamiento calcula el valor después de realizar un autoajuste estático o por rotación (consulte Pr **0.40**, Autoajuste).
- El usuario utiliza las ecuaciones siguientes para hallar su valor.

Ganancia proporcional (Pr **0.38**):

$$K_p = K \times L \times 10^{-3} \times \text{Intensidad nominal del accionamiento}$$

Ganancia integral (Pr **0.39**):

$$K_i = 0,0427 \times K \times R \times \text{Intensidad nominal del accionamiento}$$

donde L es la inductancia del motor en mH. En los servomotores corresponde a la mitad de la inductancia fase a fase normalmente especificada por el fabricante. Además, es el valor que se guarda en Pr **5.24** después de efectuar la prueba de autoajuste. El valor numérico de Pr **5.24** puede introducirse directamente en la ecuación anterior.

K depende de la tensión nominal del accionamiento:

Tensión nominal del accionamiento (Pr 11.33)

200 V	400 V	575 V	690 V
2902	1451	1217	1013

La corriente nominal del accionamiento es el valor introducido en el parámetro Pr **11.31** del accionamiento. R es la resistencia del estátor del motor por fase (es decir, la mitad de la resistencia medida entre dos fases). Coincide con el valor guardado en Pr **5.17** después de una medición correcta. Consulte Autoajuste (Pr **0.40**).

Esta configuración proporciona una respuesta transitoria con sobreimpulso mínimo después de un cambio gradual de la referencia de intensidad. La ganancia proporcional se puede incrementar en 1,5 para obtener un aumento del ancho de banda similar; sin embargo, esto genera una respuesta transitoria con sobreimpulso del 12,5% aproximadamente. La ecuación de la ganancia integral arroja un valor con amplio margen de seguridad. En aplicaciones en las que resulta imprescindible para que el sistema de referencia utilizado por el accionamiento se adecue en lo posible al flujo de forma dinámica, puede requerirse una ganancia integral con valor mucho más alto.

GANANCIAS DE BUCLE DE VELOCIDAD (Pr 3.10, 3.11, 3.12)

Las ganancias del bucle de velocidad controlan la respuesta del controlador de velocidad a los cambios experimentados por la demanda de velocidad. El controlador de velocidad incluye términos de realimentación positiva proporcional (K_p) e integral (K_i), así como un término de realimentación diferencial (K_d).

El accionamiento conserva dos grupos de ganancias, que pueden seleccionarse con Pr 3.16 para que el controlador de velocidad las utilice. Si Pr 3.16 = 0, se utilizan las ganancias K_{p1} , K_{i1} y K_{d1} (Pr 0.07 a Pr 0.09). Si Pr 3.16 = 1, se utilizan las ganancias K_{p2} , K_{i2} y K_{d2} (Pr 3.13 a Pr 3.15). Pr 3.16 puede modificarse con el accionamiento activado o desactivado. Con inercia constante y par constante como cargas predominantes, el accionamiento puede calcular las ganancias K_p y K_i que permiten obtener el ángulo de deformación o el ancho de banda necesarios en función del valor de Pr 3.17.

- **Ganancia proporcional (K_p), Pr 0.07 y Pr 3.13**

Si la ganancia proporcional tiene un valor y la integral es cero, el controlador sólo presenta un término proporcional y debe producirse un error de velocidad para que se genere la referencia de par. Por consiguiente, se establecerá una diferencia entre la velocidad de referencia y la real conforme aumente la carga del motor. Este efecto, denominado regulación, depende del nivel de ganancia proporcional: a mayor ganancia, menor error de velocidad para una carga dada. Si la ganancia proporcional es demasiado elevada, el ruido acústico generado

por la cuantificación de la realimentación de velocidad pasa a ser inaceptable o se alcanza el límite de estabilidad del bucle cerrado.

- **Ganancia integral (Ki), Pr 0.08 y Pr 3.14**

La finalidad de la ganancia integral es evitar la regulación de velocidad. El error acumulado durante un intervalo de tiempo permite generar la demanda de par necesaria sin error de velocidad. El aumento de la ganancia integral reduce el tiempo que tarda en alcanzarse la velocidad correcta y multiplica la rigidez del sistema; es decir, reduce el desplazamiento que conlleva la aplicación de un par de carga al motor. El efecto negativo que produce el aumento de este valor es la reducción de la amortiguación del sistema, que da lugar a un sobreimpulso después de un fenómeno transitorio. Mediante el aumento de la ganancia proporcional es posible mejorar la amortiguación con una ganancia integral determinada. No obstante, es preciso establecer un equilibrio de manera que la respuesta, la rigidez y la amortiguación del sistema sean igualmente adecuadas para la aplicación.

- **Ganancia diferencial (Kd), Pr 0.09 y Pr 3.15**

La ganancia diferencial se ofrece en la realimentación del controlador de velocidad a fin de proporcionar mayor amortiguación. El término diferencial se aplica de manera que se evita la introducción de ruido excesivo normalmente asociada con este tipo de función. Aunque el aumento del término diferencial reduce el sobreimpulso generado por la escasa amortiguación, las ganancias proporcional e integral son suficientes en la mayoría de aplicaciones.

Existen tres formas de ajustar con precisión las ganancias del bucle de velocidad en función del ajuste de Pr 3.17:

- **Configuración de usuario, Pr 3.17 = 0**

Implica la conexión de un osciloscopio a la entrada analógica 1 para vigilar la realimentación de velocidad. Se introduce un cambio gradual en la referencia de velocidad del accionamiento y se observa su reacción en el osciloscopio. La ganancia proporcional (K_p) debe configurarse al inicio y aumentarse hasta que la velocidad se rebase y vuelva a descender levemente. Luego debe aumentarse la ganancia integral (K_i) hasta que la velocidad sea inestable y vuelva a descender ligeramente. En ese momento es posible incrementar el valor de la ga-

nancia proporcional. El proceso debería repetirse hasta que el sistema reaccione de forma deseada.

- **Configuración de ancho de banda, Pr 3.17 = 1**

Cuando se requiere una configuración basada en el ancho de banda, el accionamiento calcula K_p y K_i si los ajustes de los siguientes parámetros son correctos:

- Pr 3.20 - Ancho de banda necesario
- Pr 3.21 - Factor de amortiguación necesario
- Pr 5.32 - Par motor por amperio (K_t)
- Pr 3.18 - Inercia de carga y del motor.

El accionamiento puede medir estos valores mediante un autoajuste de medición de inercia (consulte Pr 0.40, Autoajuste).

- **Configuración de ángulo de deformación, Pr 3.17 = 2**

Cuando se requiere una configuración basada en el ángulo de deformación, el accionamiento calcula K_p y K_i si los ajustes de los siguientes parámetros son correctos:

- Pr 3.19 - Ángulo de deformación necesario
- Pr 3.21 - Factor de amortiguación necesario
- Pr 5.32 - Par motor por amperio (K_t)
- Pr 3.18 - Inercia del motor y la carga.

El accionamiento puede medir estos valores mediante un autoajuste de medición de inercia (consulte Pr 0.40, Autoajuste).

6.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el fin de evaluar el esquema de control propuesto para el Sistema RoboTennis (Figura 6.10), a continuación se presentan los resultados experimentales obtenidos para el posicionamiento y el seguimiento de trayectorias críticas (trayectorias de mayor par) dentro del espacio de trabajo del robot, a diferentes velocidades de operación. Los índices de evaluación empleados son

el error de posicionamiento y el error máximo de seguimiento para el efector final.

Los parámetros dinámicos del prototipo construido se han presentado en el Capítulo 4 y se recogen en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1
Parámetros dinámicos del Robot

Parámetro	Valor
Masa del brazo (m_a)	2.213 Kg
Masa del antebrazo (m_b)	1.315 Kg
Masa de la plataforma móvil (m_c)	0.824 Kg
Masa de carga (m_d)	0510 Kg
Inercia del motor (I_m)	$10 \cdot 10^{-4}$ Kgm ²
Inercia del brazo (I_a)	$1/3(m_a L_a^2)$ Kgm ²
Inercia del antebrazo (I_b)	$1/3(m_b L_b^2)$ Kgm ²

La masa de carga corresponde a la suma de las masas de los motores neumáticos, de la cámara y de la óptica.

6.5.1 CONTROL DE POSICIÓN

Para evaluar el error de posicionamiento, se propone para los diferentes pruebas la realización del mismo movimiento pero a diferentes velocidades de operación. La trayectoria propuesta es de tipo lineal, y une los puntos espaciales (0.0, 0.0, 750.0) mm y (0.0, 300.0, 750.0) mm a las siguientes velocidades de operación: 100.0, 500.0, 1000.0, 1500.0 y 2000.0 (mm/s).

Los datos tomados en cada prueba son: el perfil de movimiento del efector final (obtenido a través de la lectura de los encoders y la aplicación del modelo cinemático directo), el perfil de velocidad espacial del efector final, el perfil de error cartesiano y el perfil de error articular. Estos resultados se presentan en las Figuras 6.14 – 6.18.

La trayectoria se genera en tiempo real y el control está definido como una tarea periódica a 2 KHz.

CONTROL DE POSICIÓN - VELOCIDAD DE OPERACIÓN 100 mm/s

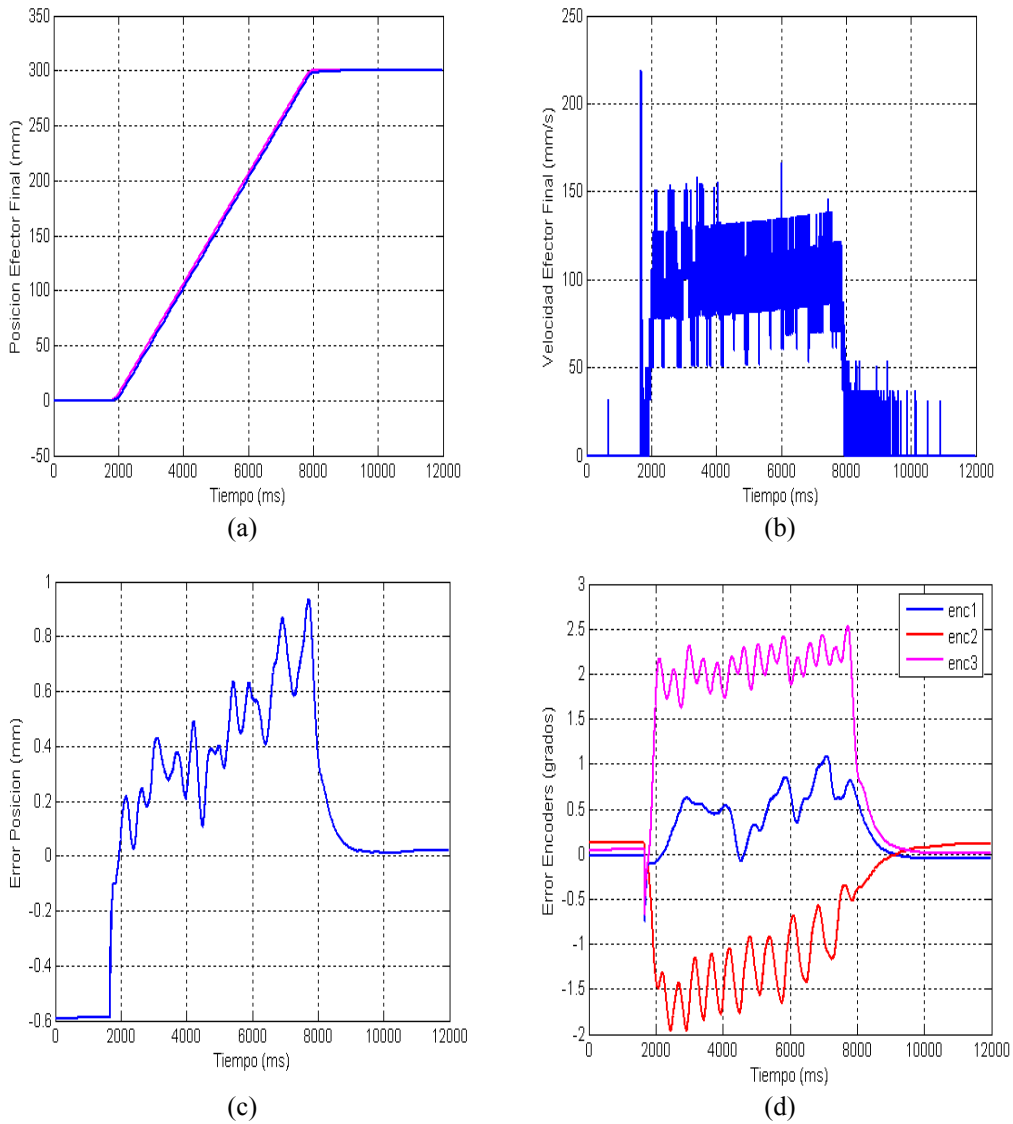


Figura 6.14 Perfiles de: (a) movimiento del efector final, (b) velocidad de operación espacial, (c) error de posición cartesiana, y (d) error de posición articular, para un movimiento crítico propuesto con velocidad de 100 mm/s.

CONTROL DE POSICIÓN - VELOCIDAD DE OPERACIÓN 500 mm/s

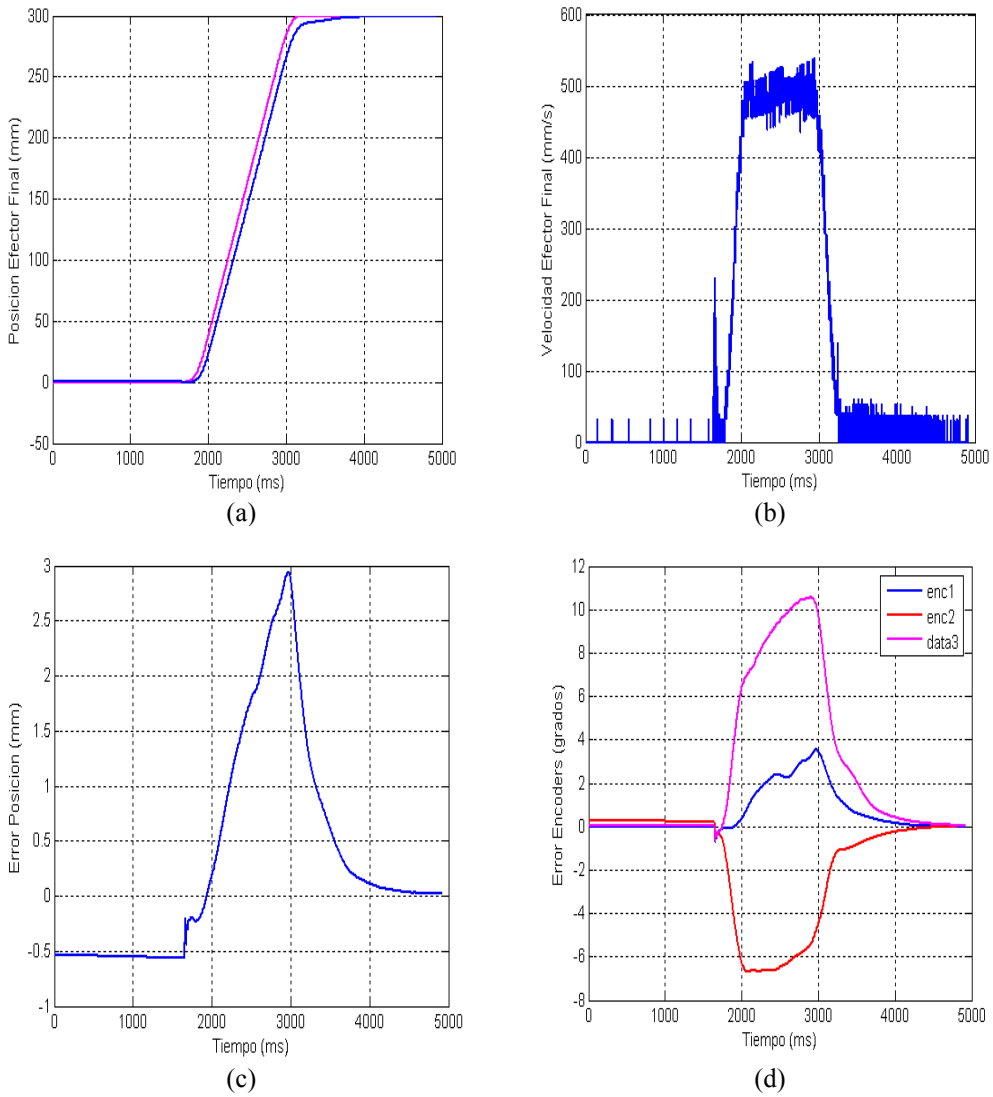


Figura 6.15 Perfiles de: (a) movimiento del efector final, (b) velocidad de operación espacial, (c) error de posición cartesiana, y (d) error de posición articular, para un movimiento crítico propuesto con velocidad de 500 mm/s.

CONTROL DE POSICIÓN - VELOCIDAD DE OPERACIÓN 1000 mm/s

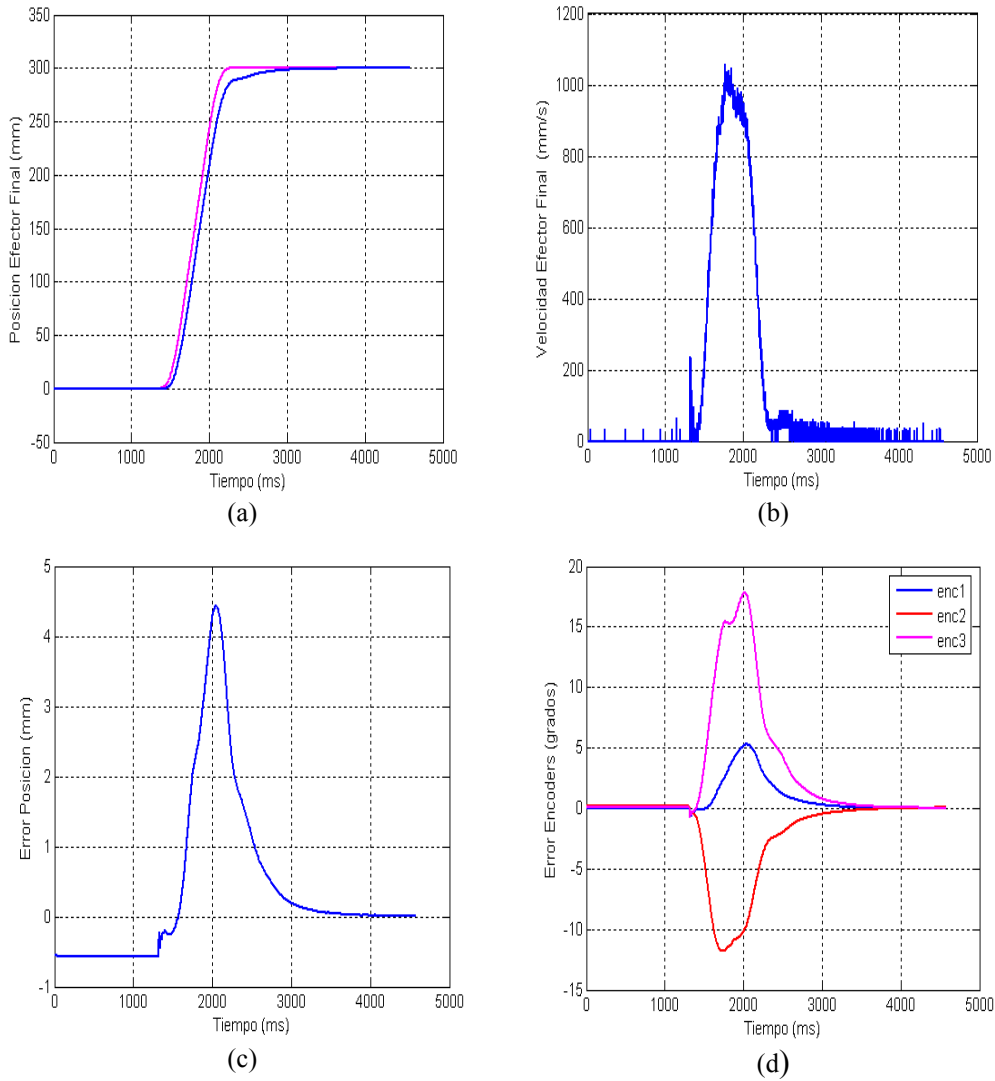


Figura 6.16 Perfiles de: (a) movimiento del efector final, (b) velocidad de operación espacial, (c) error de posición cartesiana, y (d) error de posición articular, para un movimiento crítico propuesto con velocidad de 1000 mm/s.

CONTROL DE POSICIÓN - VELOCIDAD DE OPERACIÓN 1500 mm/s

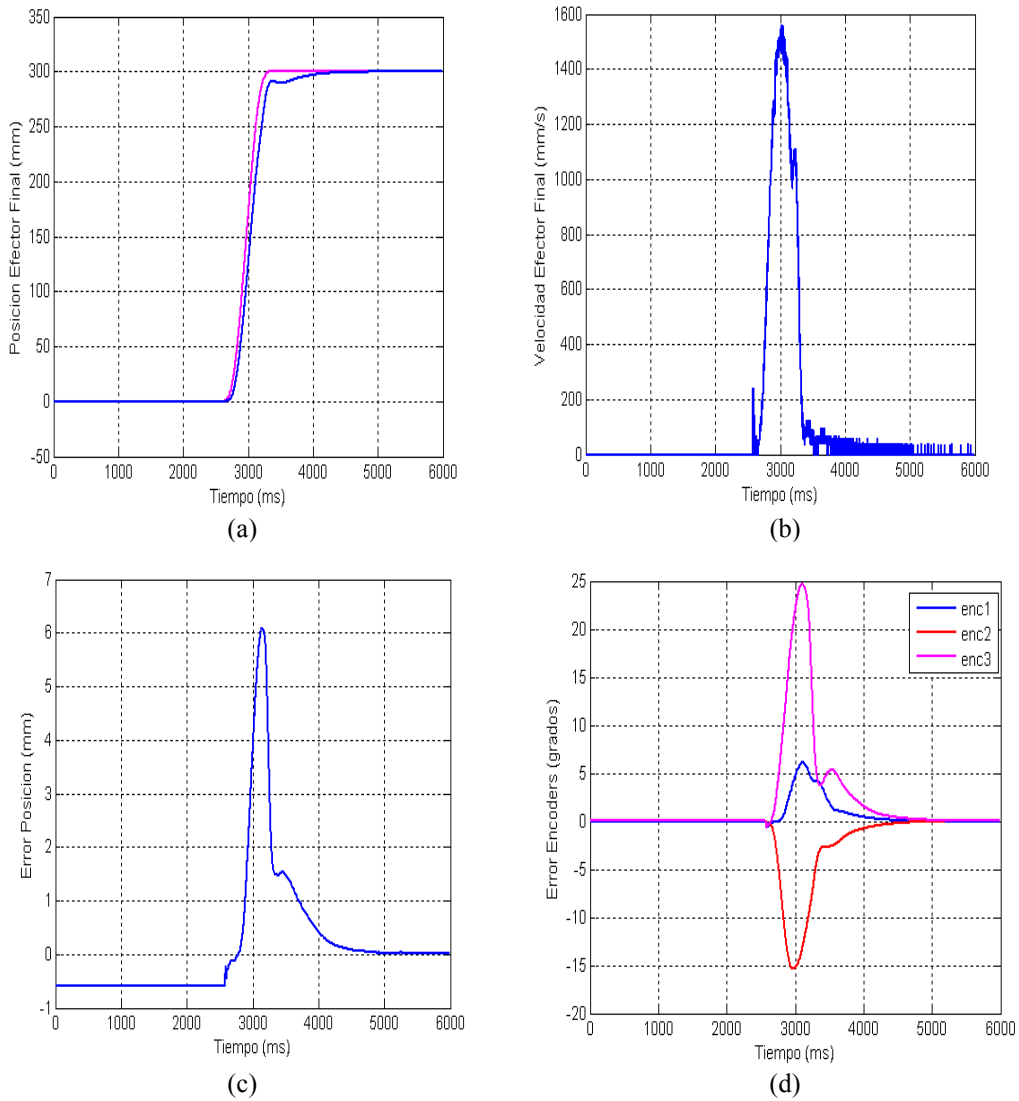


Figura 6.17 Perfiles de: (a) movimiento del efector final, (b) velocidad de operación espacial, (c) error de posición cartesiana, y (d) error de posición articular, para un movimiento crítico propuesto con velocidad de 1500 mm/s.

CONTROL DE POSICIÓN - VELOCIDAD DE OPERACIÓN 2000 mm/s

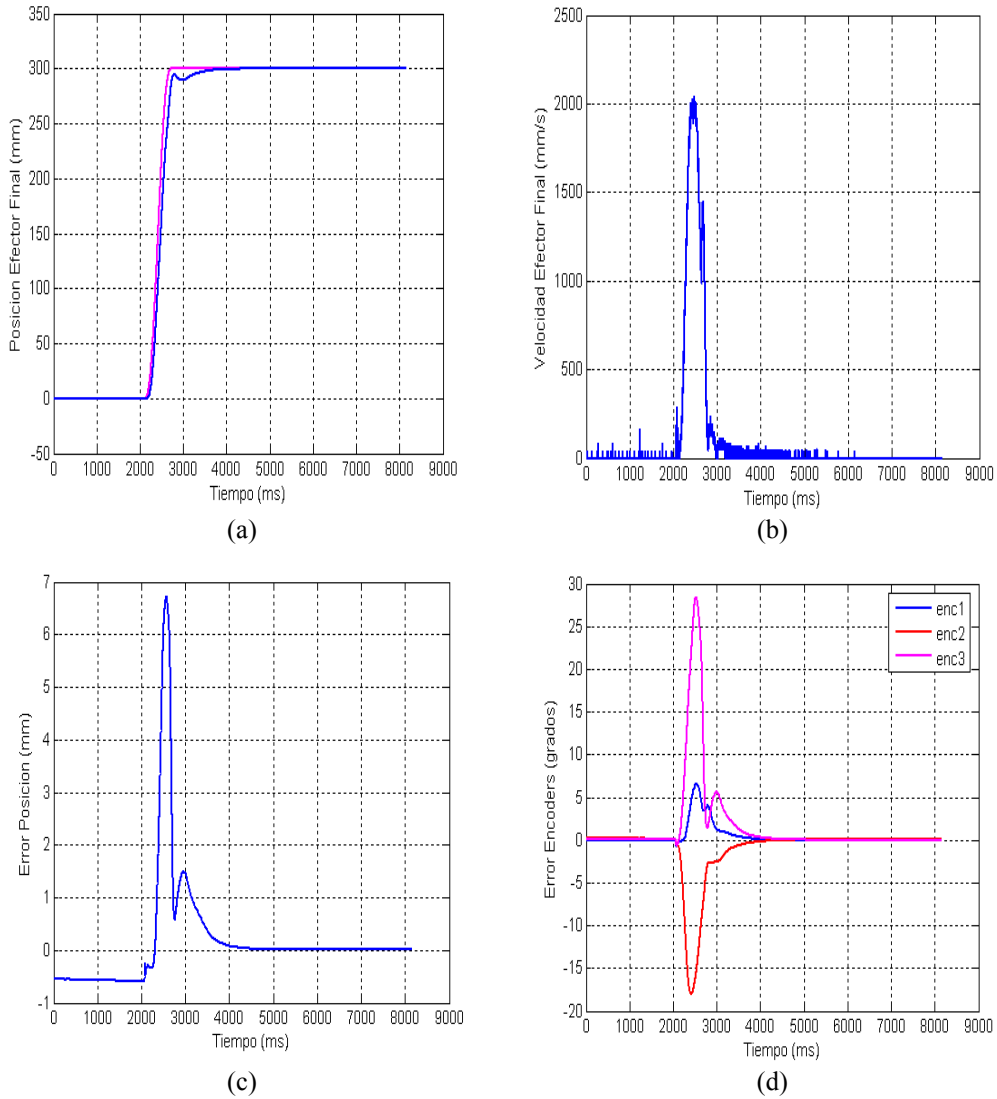


Figura 6.18 Perfiles de: (a) movimiento del efector final, (b) velocidad de operación espacial, (c) error de posición cartesiana, y (d) error de posición articular, para un movimiento crítico propuesto con velocidad de 2000 mm/s.

A partir de los resultados experimentales presentados anteriormente, se puede concluir que la velocidad de operación no afecta de manera notable el error de estado estacionario, el cual permanece en todos los casos menor a 1 mm. El error de seguimiento es directamente proporcional a la velocidad de operación. El sistema presenta pequeñas oscilaciones a altas velocidades, cosa que era de esperarse ya que el tiempo de asentamiento disminuye, a medida que la velocidad de operación aumenta. El perfil de error es decreciente lo que permite observar la estabilidad del sistema de control de control.

6.5.2 CONTROL DE MOVIMIENTO

Para la evaluación del control de movimiento, se proponen diferentes movimientos del efector final compuestos por varias trayectorias críticas dentro del espacio de trabajo del robot. Además, cada movimiento se repite con velocidades de 1000.0, 1500.0 y 2000.0 mm/s.

Los resultados experimentales presentados en las Figuras 6.19 – 6.22, permiten observar el movimiento espacial del efector final para velocidades de operación de 1000.0 y 2000.0 mm/s, el perfil de velocidad máxima para el efector final, así como el error de seguimiento. En la representación gráfica, la línea de color magenta representa el movimiento espacial deseado, y la línea de color azul, representa el movimiento espacial del efector final del robot.

La posición del efector final se halla a partir de la lectura de los encoders y de la aplicación del modelo cinemático directo. Las trayectorias son de tipo lineal y generadas en tiempo real.

CONTROL DE MOVIMIENTO – MOVIMIENTO 1

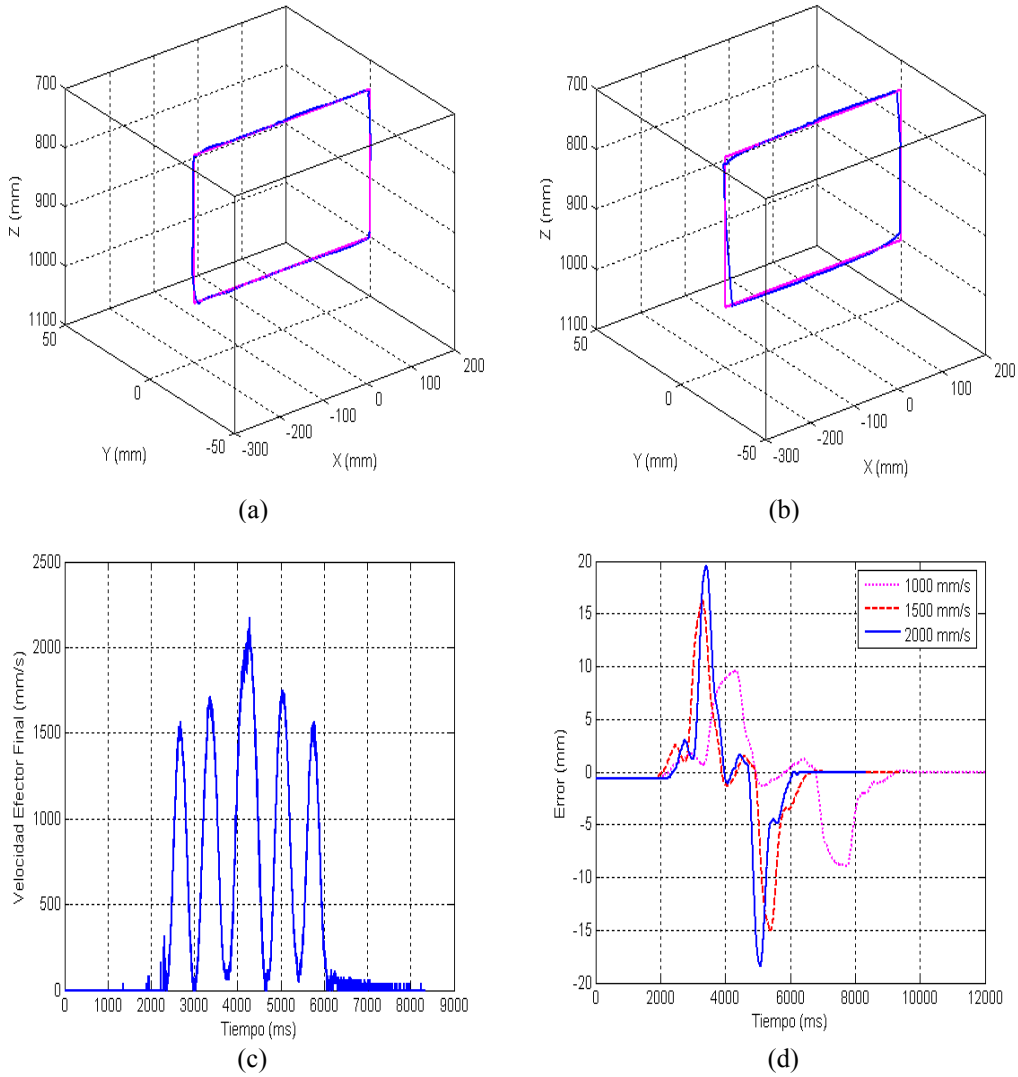


Figura 6.19 (a) movimiento espacial del efector final a 1000 mm/s, (b) movimiento espacial del efector final a 2000 mm/s, (c) velocidad espacial máxima, y (d) error de seguimiento espacial para velocidades de 1000, 1500 y 2000 mm/s, en la ejecución del movimiento crítico 1.

CONTROL DE MOVIMIENTO – MOVIMIENTO 2

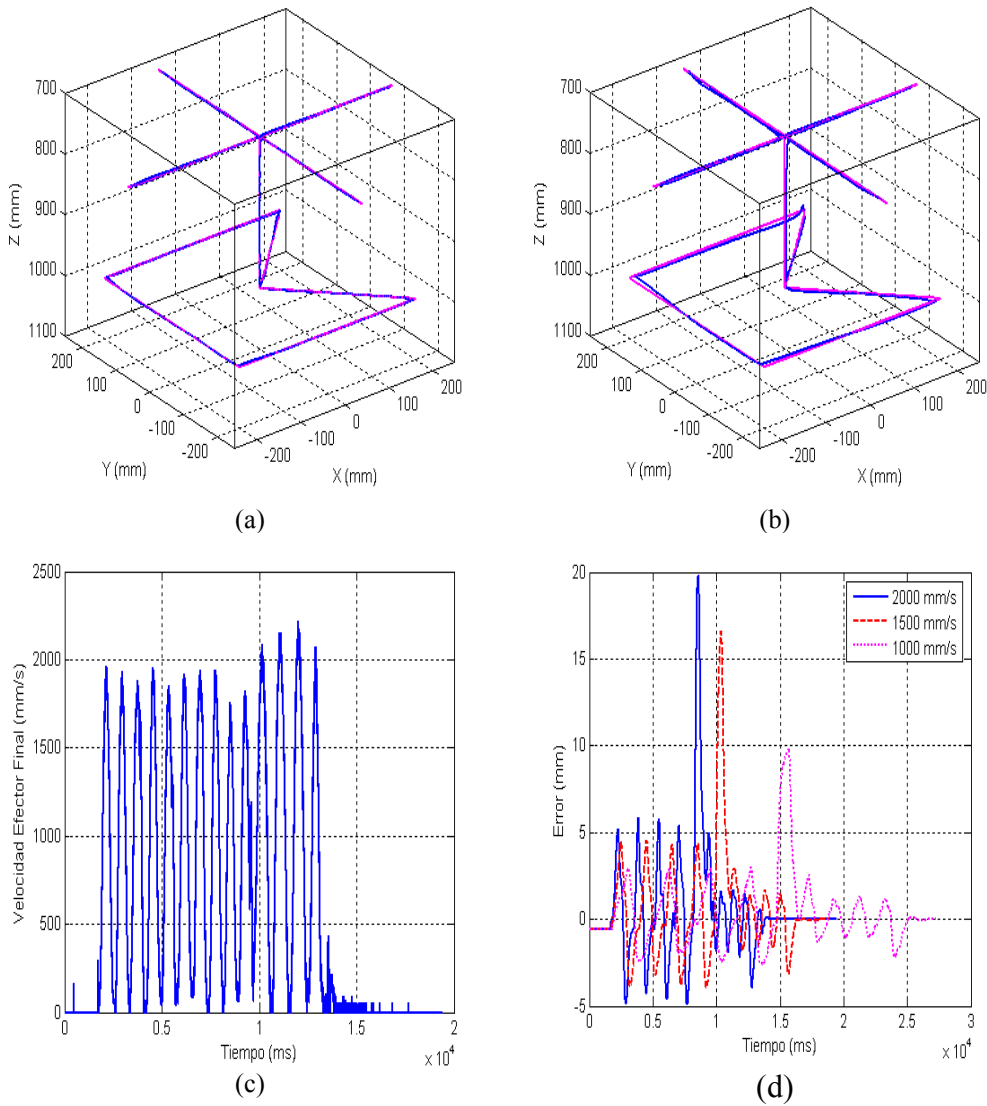


Figura 6.20 (a) movimiento espacial del efector final a 1000 mm/s, (b) movimiento espacial del efector final a 2000 mm/s, (c) velocidad espacial máxima, y (d) error de seguimiento espacial para velocidades de 1000, 1500 y 2000 mm/s, en la ejecución del movimiento crítico 2.

CONTROL DE MOVIMIENTO – MOVIMIENTO 3

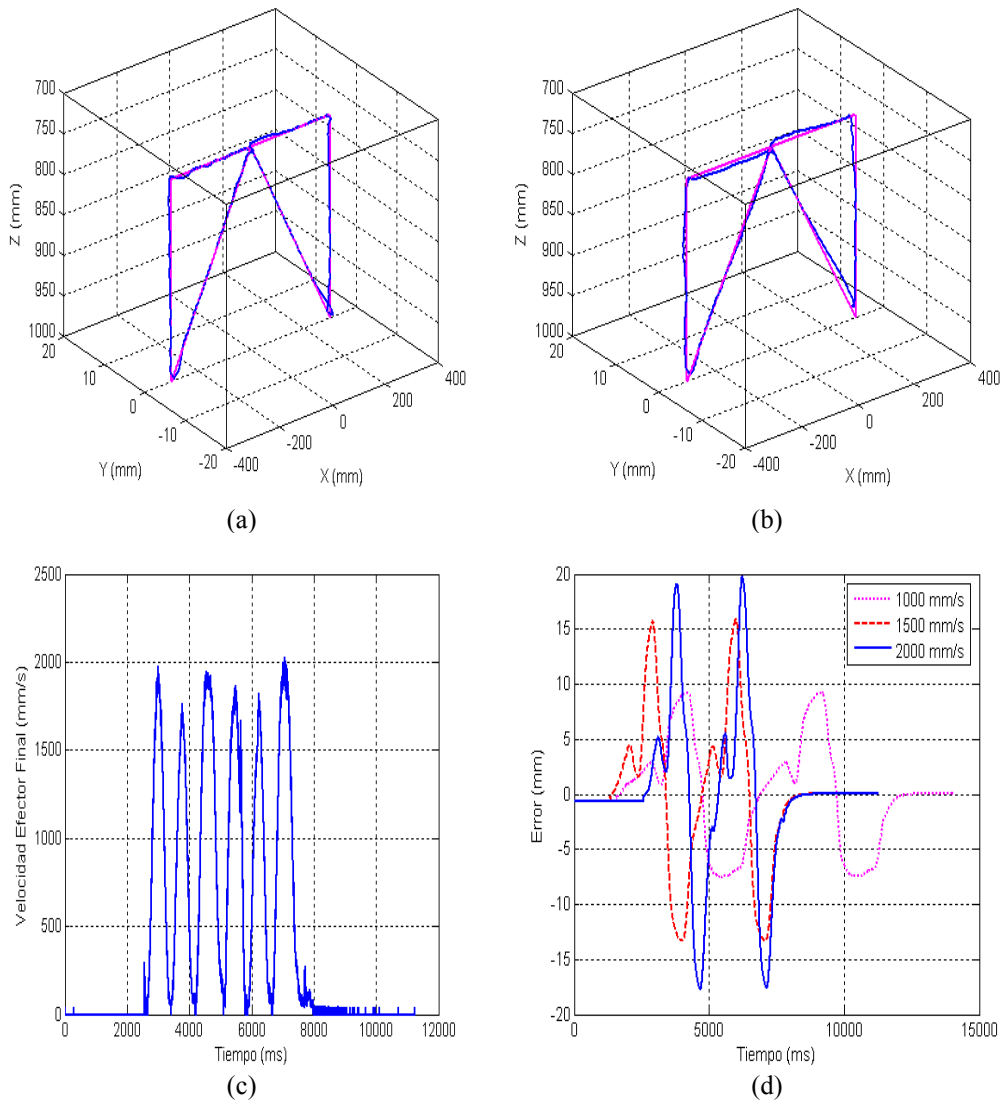


Figura 6.21 (a) movimiento espacial del efector final a 1000 mm/s, (b) movimiento espacial del efector final a 2000 mm/s, (c) velocidad espacial máxima, y (d) error de seguimiento espacial para velocidades de 1000, 1500 y 2000 mm/s, en la ejecución del movimiento crítico 3.

CONTROL DE MOVIMIENTO – MOVIMIENTO 4

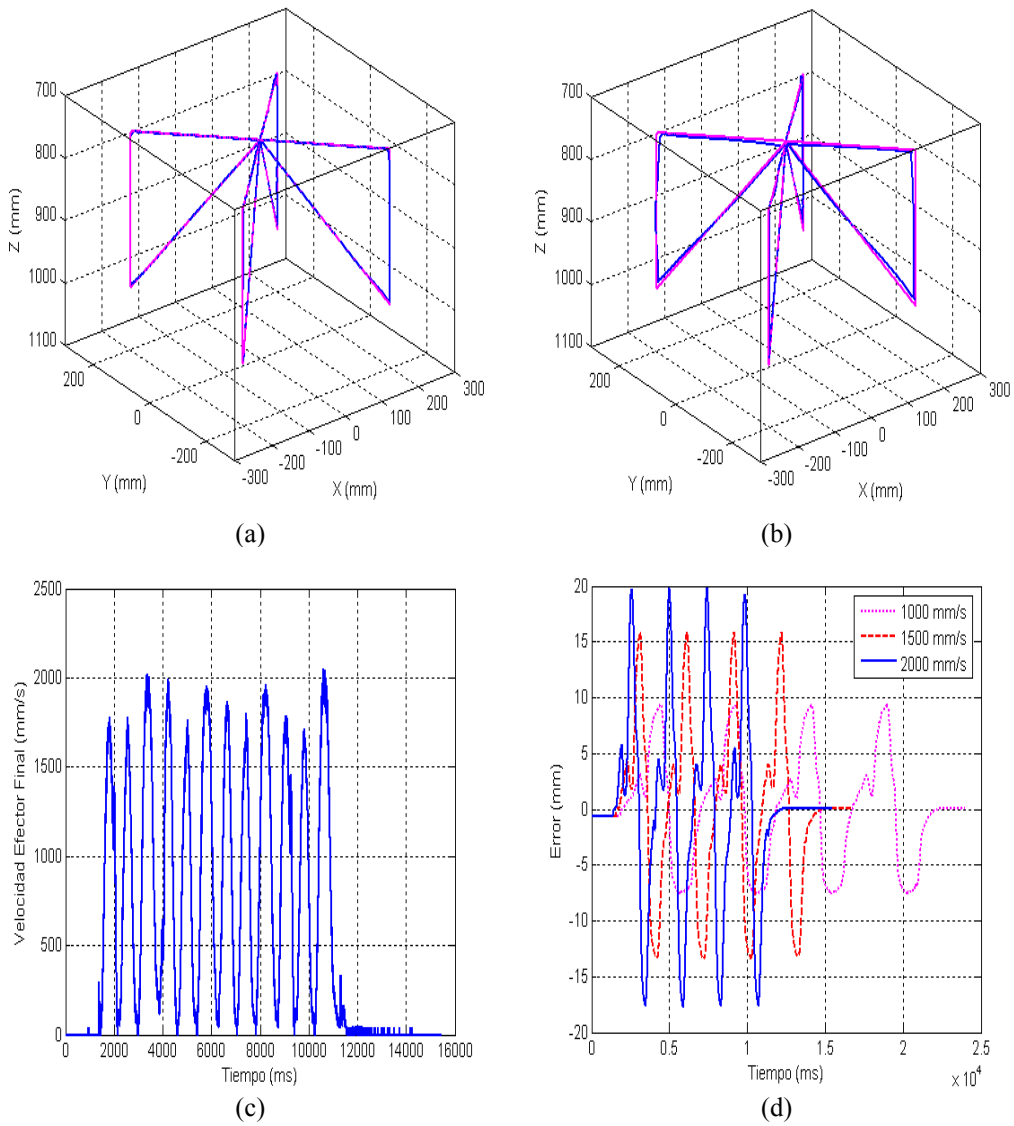


Figura 6.22 (a) movimiento espacial del efector final a 1000 mm/s, (b) movimiento espacial del efector final a 2000 mm/s, (c) velocidad espacial máxima, y (d) error de seguimiento espacial para velocidades de 1000, 1500 y 2000 mm/s, en la ejecución del movimiento crítico 4.

Los resultados experimentales presentados anteriormente, permiten observar que el mayor error de seguimiento se presenta en los movimientos del efector final a lo largo del eje z. El error de seguimiento es directamente proporcional a la velocidad de operación, y su valor máximo es muy similar para los diferentes movimientos propuestos (cerca de 20 mm).

6.6 CONCLUSIONES

En este capítulo, se implementa el control articular del Sistema Robo-Tenis. En primer lugar se describe la arquitectura de control del sistema y los procedimientos de implantación de control de posición y de movimiento del robot paralelo. La ley de control propuesta emplea el modelo de dinámico inverso del sistema desarrollado en el Capítulo 5, en paralelo con un controlador PD. Se describe el proceso experimental de sintonización de los controladores internos de corriente y velocidad del conjunto accionamiento-motor. Diferentes trayectorias críticas han sido programadas y ejecutadas sobre el prototipo. Los resultados experimentales muestran que el Sistema RoboTennis tiene un error máximo de seguimiento de 20 mm y es capaz de alcanzar velocidades superiores a 2.5 m/s.

CAPÍTULO 7

PLANIFICADOR DE TRAYECTORIAS PARA EL SISTEMA ROBOTENIS

7.1 INTRODUCCIÓN

Se define la trayectoria como un conjunto de puntos (en el espacio articular o en el espacio de trabajo) sobre los que se ha definido una ley temporal. Esta trayectoria puede ser de tipo punto a punto, en cuyo caso el robot irá de un punto inicial a otro final por cualquier camino intermedio (utilizado en operaciones de *pick-and-place*), o puede estar completamente definida mediante funciones polinómicas, este tipo de trayectorias se utiliza cuando el efector final del robot debe seguir un camino determinado o en presencia de obstáculos.

Se puede dividir el control del movimiento del robot en dos partes: la planificación del movimiento y su seguimiento. La planificación supone la generación del camino y la ley temporal, lo que da como resultado una señal de referencia para el controlador. El seguimiento se ocupa de alcanzar esta señal de referencia.

La planificación suele hacerse off-line, especialmente cuando los algoritmos de generación de trayectoria son computacionalmente costosos; sin embargo, a menudo se desea que la generación de la trayectoria se haga on-line para poder cambiar con facilidad la trayectoria del robot y que el sistema sea más robusto y adaptable. El planificador de alto nivel encargará tareas al manipulador en forma de puntos intermedios, de llegada y de parada, y el manipulador tendrá que realizar las tareas generando caminos y trayectorias hacia esos puntos y siguiendo las trayectorias según una ley de control.

Se puede definir una tarea robótica como una serie de puntos intermedios por los que debería pasar el manipulador. Sin embargo, a menudo es deseable especificar el camino entre los puntos intermedios para evitar obstáculos en el entorno de trabajo o para facilitar una tarea (por ejemplo, pintura con spray o soldadura). Las tareas para manipuladores suelen describirse con movimientos rectilíneos en el espacio de trabajo que se unen con splines polinómicos en los puntos intermedios. Los splines pasan por los puntos intermedios o cerca de ellos de modo que el robot no se detenga en ellos (Lloyd and Hayward, 1993), (Paul, 1981), (Volpe, 1993), y que siga el camino con precisión (Shiller et al., 1996).

El control de manipuladores optimizado en el tiempo es difícil debido a la dinámica no lineal y acoplada y a los límites articulares y de par de los manipuladores (Kim and Shin, 1985). En 1971, Kahn y Roth formularon el problema del control optimizado en el tiempo para un camino cualquiera con limitaciones de par utilizando el principio de Pontryagin y linealizando el modelo dinámico del manipulador, sin embargo, esta linealización daba errores de seguimiento significativos (Rajan, 1985).

En 1986 Geering et al. desarrollaron la estructura de un movimiento optimizado en el tiempo para trayectorias con par limitado, utilizando el principio

del mínimo de Pontryagin, y demostraron que estos movimientos eran de tipo *bang-bang* o de tipo *bang-singular-bang* con respecto al par.

Bobrow et al. (1985) y Shin and McKay (1985) quisieron optimizar en el tiempo, el movimiento de un manipulador por un camino especificado (PCTOM) teniendo en cuenta las limitaciones de par. Shin y McKay parametrizaron el camino en el espacio articular, mientras que Bobrow lo parametrizó en el espacio de la tarea, el movimiento resultante maximizaba la velocidad a lo largo del camino.

Sin embargo, las trayectorias óptimas basadas en el modelo dinámico del sistema con limitaciones de par dan una referencia de tipo *bang-bang* en el par, los actuadores no pueden seguir este tipo de referencia por sus limitaciones físicas (Brock and Kaczmarek, 1996), (Constantinescu, 1998), (Leahy and Saridis, 1987), (Shiller et al., 1996), lo que lleva a errores de seguimiento y vibraciones en el manipulador, además de ser el coste computacional de generar estas trayectorias muy alto.

Las trayectorias PCTOM obligan a que haya al menos un actuador saturado a lo largo de toda la trayectoria; además, los pares pueden ser discontinuos en los puntos de cambio o ‘switching points’ (puntos en los que debería producirse un cambio de máxima aceleración a máxima desaceleración), esto hace que las trayectorias no se puedan seguir con exactitud al no tenerse en cuenta la dinámica del sistema (Kieffer et al., 1997). Además, la saturación del actuador impide que se corrijan los errores de seguimiento que se produzcan (Dahl and Nielsen, 1990), (Dahl, 1994), (Kieffer et al., 1997), (Shiller et al., 1996). Las trayectorias de tipo PCTOM no son aplicables en la práctica a menos que se resuelvan estos inconvenientes, lo que puede hacerse bien introduciendo modificaciones en el controlador (Dahl and Nielsen, 1990), (Dahl, 1994), (Kieffer et al., 1997), (Shiller et al., 1996), (Tam, 1990) o bien modificando la trayectoria PCTOM (Shin and McKay, 1986), (Constantinescu, 1998).

Dahl y Nielsen (1990) desarrollaron un método on-line de modificación de la trayectoria para mejorar su seguimiento. El controlador principal del robot no se altera, pero se introduce un segundo controlador de velocidad con el que se obtiene una trayectoria para la que no se necesita más par que el disponible, lo cual aumenta el rendimiento del robot. En 1996, Shiller et al. propu-

sieron una implementación a mayor velocidad que el método anterior. Se trataba de compensar el retraso debido al controlador de realimentación mediante una preconfiguración de la trayectoria.

En 1996, Kieffer et al. propusieron dos estrategias para seguir trayectorias PCTOM con una cierta tolerancia. En el primer método, las ganancias del controlador se eligen experimentalmente mientras se sigue la trayectoria PCTOM; a continuación se calculan los pares de compensación necesarios y se recalcula la trayectoria PCTOM en función de estos pares. En el segundo método, se genera la trayectoria de referencia on-line como una función de realimentación. Estos métodos mejoran el tiempo del movimiento y eliminan la saturación de los actuadores.

Los pares de los actuadores no pueden variar inmediatamente, lo que lleva a la limitación de la variación del par. Dicha limitación reduce las vibraciones en el manipulador debidas a las discontinuidades de par (Brock and Kaczmarek, 1996), (Cao and Dodds, 1994), (Constantinescu and Croft, 2000), (Leahy and Saridis, 1987), (Lin and Chang, 1983), (Yang and Chou, 1994).

En 1986, Shin y McKay incorporaron las limitaciones de variación de par al diseño de trayectorias PCTOM usando un método de programación dinámico. Tan y Potts (1988) discretizaron el problema incluyendo limitaciones de par, de velocidad articular y de variación de par. Tarkiainen y Shiller desarrollaron un método que calculaba trayectorias PCTOM de tipo bang-bang en el jerk, excepto en puntos singulares. Constantinescu y Croft (2000) calcularon trayectorias suaves optimizadas en el tiempo para un camino especificado (SPCTOM), utilizando para ello splines cúbicos que parametrizaban la trayectoria en el espacio de estados. Experimentalmente, estas trayectorias SPCTOM resultaban ser más rápidas que las trayectorias PCTOM.

Al ser la dinámica del manipulador no lineal y acoplada, el cálculo de la trayectoria óptima resulta en general demasiado costoso computacionalmente para hacerse on-line. La planificación de la trayectoria se hace off-line, generando la secuencia necesaria de ángulos articulares. A continuación se realiza el seguimiento del camino on-line. Una alternativa a considerar el modelo dinámico completo del manipulador consiste en derivar los límites cinemáticos del manipulador (velocidad, aceleración y jerk), y planificar una trayectoria

utilizando funciones sencillas que permanezcan entre esos límites. Estos métodos cinemáticos pueden calcularse en un tiempo pequeño y tienen soluciones analíticas; sin embargo, no son óptimos dinámicamente.

En 1994, Cao et al. desarrollaron métodos para obtener movimientos suaves de tiempo mínimo tanto para caminos libres como para caminos especificados. Utilizaron para ello caminos articulares con splines cúbicos, minimizando una función objetivo y maximizando las velocidades, aceleraciones y jerks dentro de sus limitaciones. La planificación de la trayectoria se hacía off-line.

Para asegurar un movimiento factible y evitar el desgaste de los actuadores, es necesario respetar los límites cinemáticos del manipulador a lo largo de toda la trayectoria y no únicamente en los puntos intermedios (Brock and Kaczmarek, 1996), (Cao and Dodds, 1994), (Leahy and Saridis, 1987), (Lin and Chang, 1983), (Yang and Chou, 1994). La forma del perfil de posición también es importante. Suele darse una sobreoscilación indeseada al utilizar polinomios de orden elevado.

Un perfil de trayectoria usado con frecuencia es el de segmentos lineales con uniones parabólicas o LSPB (Sciavicco and Siciliano, 1996), que tiene el perfil de aceleración de onda cuadrada mostrado en la Figura 7.1(a). En 1988, Fisher et al. desarrollan un método para calcular el mínimo tiempo necesario para el movimiento, con un movimiento articular coordinado y velocidad y aceleración limitadas. Para este tipo de movimientos, una de las articulaciones se encuentra siempre en el límite de su aceleración, y otra en el límite de su velocidad (Bobrow et al., 1985), (Shin and McKay, 1985). Sin embargo, puede que el actuador no soporte cambios de velocidad instantáneos como los del LSPB, causando la aplicación de este perfil vibraciones y errores de seguimiento (Castain and Paul, 1984), (Red, 2000).

Castain y Paul modificaron el perfil LSPB limitando el tiempo de subida de la onda (Figura 7.1(b)), de manera que los cambios en la aceleración tienen un perfil de rampa (es decir, el perfil de la aceleración es de tipo trapezoidal). Se estableció el tiempo de subida como una proporción determinada del tiempo de movimiento entre dos puntos. Este perfil aumentaba el tiempo de movimiento total. Todos los movimientos entre dos puntos intermedios (cuya

posición y velocidad se especifican) se describen con seis ecuaciones de splines cúbicos. Las trayectorias resultantes son de movimiento suave y sin sobreoscilaciones, pero se requieren cálculos iterativos para asegurar que se respetan los límites de aceleración.

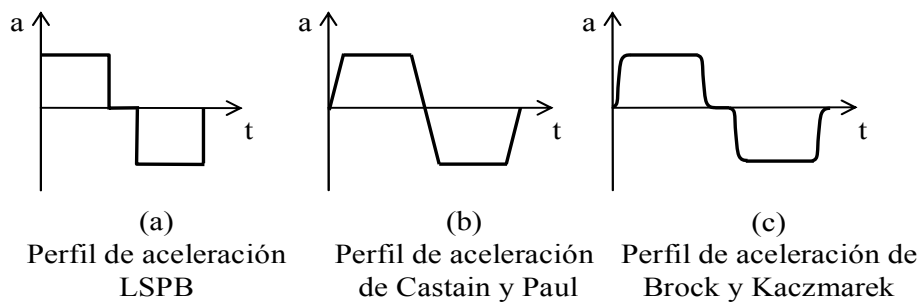


Figura 7.1 Perfiles de aceleración.

Erkorkmaz (1999) también utilizó un perfil de aceleración trapezoidal para generar un movimiento suave con velocidad, aceleración y jerk limitados; utilizaba un perfil formado por hasta siete segmentos (incluyendo uno de aceleración nula) y resolvía un sistema de ecuaciones mediante el método de Newton-Raphson para obtener los tiempos de los segmentos. La trayectoria de referencia se generaba con periodos de interpolación variables, lo que requería muestrear a la frecuencia de control.

Brock y Kaczmarek propusieron el uso de una función de tipo seno cuadrado para asegurar la continuidad de la aceleración (Figura 7.1(c)). Un perfil de referencia típico estaba compuesto por siete segmentos: tres de ellos constantes y cuatro de tipo seno cuadrado. El movimiento, que se aplicaba a caminos curvilíneos, resultaba suboptimizado.

En resumen, las técnicas de planificación de trayectorias han sido desarrolladas para mejorar la productividad y la precisión en el seguimiento. Las trayectorias puramente optimizadas en el tiempo (Bobrow et al., 1985), (Shin and McKay, 1985) se basan en la dinámica del manipulador y no tienen en

cuenta las limitaciones de variación de par en los actuadores, lo que lleva a la saturación del controlador en la práctica: esto causa desgaste en las máquinas y un seguimiento poco preciso. Se han propuesto soluciones basadas en el controlador y en la planificación (Cao et al., 1994), (Constantinescu, 1998), (Dahl and Nielsen, 1990), (Kieffer et al., 1997), sin embargo, es poco probable que vayan a implementarse métodos basados en el controlador en entornos industriales, ya que requieren leyes de control complejas. Además, los métodos de planificación de trayectorias que incluyen la dinámica del sistema no pueden utilizarse on-line ya que conllevan una carga computacional importante.

Se han desarrollado también técnicas de planificación basadas únicamente en la cinemática de los actuadores, que pueden ser implementadas on-line. Estos métodos están suboptimizados en el tiempo, ya que los límites cinemáticos se determinan experimentalmente para las peores condiciones posibles (Kim and Shin, 1985). Los métodos que presentan un mayor interés para esta tesis son aquellos que limitan la aceleración, la velocidad y el jerk durante toda la trayectoria entre dos puntos intermedios (Brock and Kaczmarek, 1996), (Castain and Paul, 1984), (Erkorkmaz, 1999).

El objetivo de este capítulo es desarrollar un método para la generación de trayectorias suaves para el Sistema RoboTennis que pueda aplicarse on-line. Las trayectorias deben estar optimizadas en el tiempo y respetar ciertas limitaciones de velocidad, aceleración y jerk durante todo el movimiento. Se consideran las limitaciones de aceleración y jerk para reducir el desgaste en los actuadores, e incrementar así el tiempo de vida del sistema. Por otra parte, al evitar la saturación del controlador mediante el uso de una trayectoria suave se mejora la precisión del seguimiento.

7.2 PLANIFICADOR DE TRAYECTORIAS

En este punto, se propone un nuevo método de generación de trayectoria entre puntos a seguir. Las restricciones del problema son las limitaciones cinemáticas (velocidad, aceleración y jerk) de los actuadores, dados por el fabricante. Los límites de aceleración y jerk son importantes para el diseño de la

trayectoria, pero en la práctica, deberían ser establecidos por medio de pruebas experimentales o por requerimientos específicos del sistema.

La metodología está basada en generar movimientos con jerk limitado. Esta metodología permite calcular en tiempo real una trayectoria punto a punto, a partir de un determinado número de puntos de control únicos para la ruta requerida. Las trayectorias generadas presentan un comportamiento similar a las trayectorias LSPB comúnmente utilizadas en la industria, pero a diferencia de éstas, se emplea la limitación de jerk. El método toma las propiedades ventajosas de la suavidad inherente de los polinomios de quinto orden (comúnmente llamados “polinomios quintic”) y su rapidez computacional, evitando su desventaja principal, a saber, su tendencia a oscilar.

A continuación se proporcionan los componentes básicos necesarios para generar una trayectoria de jerk limitado. Estos componentes son usados para generar una trayectoria unidimensional entre dos puntos del camino con diferentes condiciones iniciales y finales de posición, velocidad, aceleración.

7.2.1 METODOLOGÍA

Las trayectorias LSPB conmutan entre la máxima, mínima y aceleración nula para alcanzar un movimiento de tiempo óptimo, respetando los límites de velocidad. Sin embargo, este tipo de movimiento conlleva un jerk infinito, y en consecuencia, el movimiento no se puede ser seguido fácilmente, dando como resultado un tiempo de movimiento mayor que el esperado. Si el movimiento pudiera ser aproximado usando una serie de funciones suaves, que sean por lo menos continuas en C^2 , esto es, continuas en la segunda derivada, el movimiento resultante sería rápido y realizable.

Los polinomios de quinto orden son los de menor orden para los cuales es posible especificar condiciones finales de posición, velocidad y aceleración

$$p(t) = a_5t^5 + a_4t^4 + a_3t^3 + a_2t^2 + a_1t + a_0. \quad (7.1)$$

Las condiciones finales de los polinomios de quinto orden deben ser cuidadosamente especificadas con el fin de evitar perfiles de posición no-monótonas, como puede ser observado con polinomios de orden superior (Piazzini and Visioli, 2000), (Chand and Doty, 1985). Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando el cambio de posición demandado es pequeño, pero el cambio de velocidad deseado, es comparativamente grande. A fin de cumplir las condiciones finales deseadas, el polinomio de quinto orden devolverá una trayectoria con oscilaciones a lo largo de la ruta.

Un polinomio de quinto orden genera un perfil de jerk cuadrático, al contrario de un polinomio cúbico, que proporciona un perfil de jerk constante. En un mínimo, una trayectoria cúbica devolverá discontinuidades en el jerk, y potencialmente, un jerk infinito, en los puntos de paso de la trayectoria. (Andersson, 1988) usó polinomios de quinto orden para movimientos punto a punto y derivó el tiempo del movimiento quintic, tal que los límites de velocidad y aceleración fueron respetados. Sin embargo, extender este trabajo a casos donde el valor inicial o final de velocidad son no nulos, podría requerir resolver repetidamente una ecuación de tercer orden. Además, la trayectoria resultante será más lenta que la propuesta aquí, y podría tener indeseables oscilaciones.

Asumiendo unas condiciones adecuadas de comienzo y fin de los polinomios de quinto orden, puede ser encontrada una trayectoria suave que permita unir dos puntos de paso específicos, con una continuidad de aceleración (jerk limitado) en los puntos finales de la trayectoria. Esto es, una trayectoria entre dos puntos de paso se forma como una serie de polinomios de quinto orden unidos, cada uno teniendo unas condiciones iniciales iguales a las condiciones finales del predecesor. Así, tal trayectoria tiene continuidad C^2 .

Entre dos puntos de deseados, es deseable tener un conjunto de polinomios de quinto orden siguiendo una plantilla de trayectoria LSPB ideal sin efectos de oscilación. Esto requiere de una cuidadosa selección de una serie de puntos de control entre los cuales el polinomio de quinto orden se comportará de una forma determinada, respecto a límites de velocidad, aceleración y jerk. La trayectoria sigue un patrón de LSPB, esto es, la trayectoria está formada por una serie de rampas de velocidad y segmentos de velocidad de constante. Sin embargo, dado que las rampas de velocidad no son muy lineales, las rampas de

aceleración son generadas usando una plantilla sinusoidal restringiendo la aceleración aun perfil cúbico.

El patrón senoidal provee una relación constante entre su amplitud y el máximo valor de su derivada. Se selecciona el tiempo para las rampas de aceleración y deceleración, basadas en una onda senoidal, con las propiedades adecuadas que permitan que los límites de jerk sean respetados. La rampa de aceleración/desaceleración resultantes es suave y obligada a aproximar la plantilla del seno en dominios de posición, velocidad y aceleración.

7.2.2 APROXIMACIÓN GENERAL

En esta sección, se desarrolla el método usado para construir una trayectoria unidimensional suave entre dos puntos deseados (p_1, v_1) y (p_2, v_2) . Este método esta basado en el uso de una concatenación de polinomios de quinto orden y la aproximación de la onda seno (Figura 7.2). En este ejemplo, el cambio de posición requerido a lo largo de la rampa de velocidad es menor que la distancia entre dos puntos de paso, permitiendo al robot alcanzar la máxima velocidad, v_2 . La limitación de la aceleración es a_{\max} y el jerk máximo permitido es j_{\max} .

En la Figura 7.2, p_1 y p_2 son las posiciones inicial y final, mientras que v_1 y v_2 las velocidades inicial y final, respectivamente. v_a es la velocidad alcanzada al final de la rampa desde aceleración nula hasta a_{\max} . El tiempo tomado para llegar a a_{\max} es dt_{\max} . v_b es la velocidad alcanzada al final de la aceleración de régimen. Tres polinomios de quinto orden (y cuatro puntos de control, mostrados en negrita) son necesarios para describir la trayectoria mostrada en la Figura 7.2: el polinomio de quinto orden para la rampa de aceleración, el polinomio de quinto orden para la aceleración constante, y el polinomio de quinto orden para la rampa de desaceleración.

La plantilla sinusoidal para la rampa de subida de la aceleración tiene una amplitud igual a la mitad del límite de la aceleración, $a_{\max}/2$, y la máxima pendiente igual a j_{\max} . Siguiendo esta rampa por medio periodo, la trayectoria quintic puede subir suavemente sin aceleraciones violentas o jerks al límite. El tiempo asignado para la rampa de aceleración es, por lo tanto:

$$dt_{\max} = \frac{\pi a_{\max}}{2 j_{\max}} \quad (7.2)$$

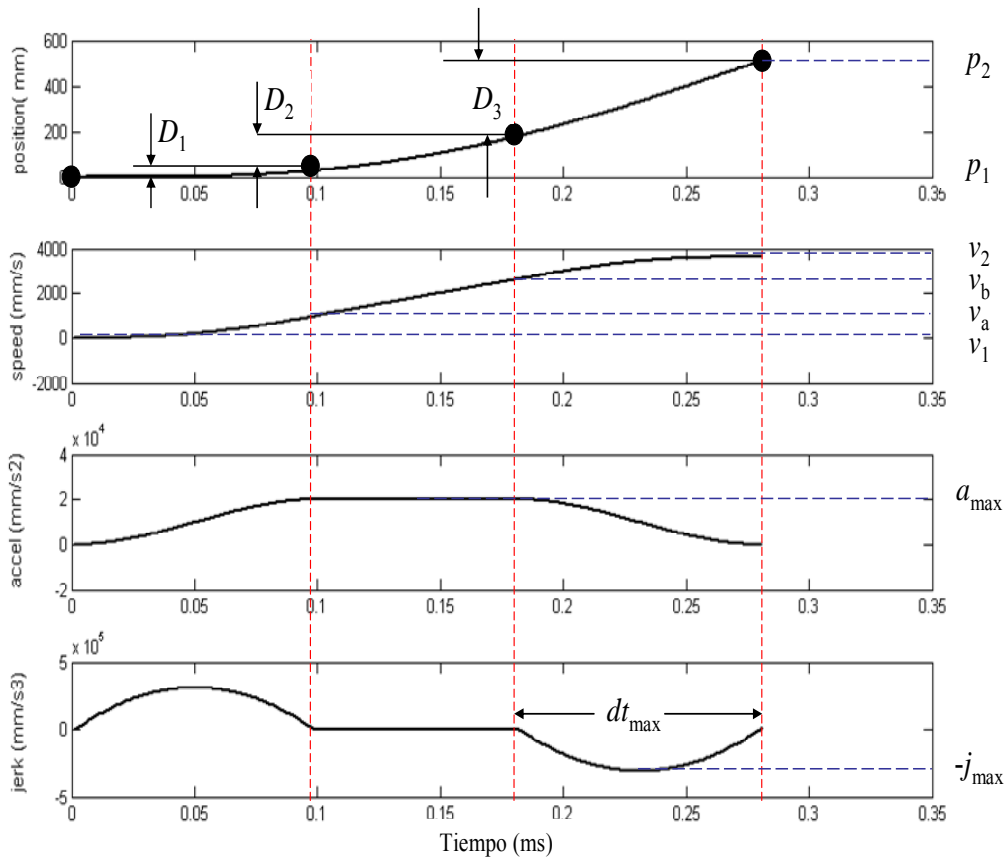


Figura 7.2 Trayectoria suave generada con una secuencia de polinomios de quinto orden (● indican los puntos de control).

Este patrón de rampa para la aceleración limita la aceleración a lo largo de la trayectoria al intervalo $[-a_{\max}, +a_{\max}]$ y al jerk al intervalo $[-0,98j_{\max}, +0,98 j_{\max}]$. El perfil de jerk impuesto por el patrón en la rampa de aceleración es parabólico y empieza y termina con $\pm 0,0505 j_{\max}$.

En la Figura 7.2, la rampa de subida de la aceleración hasta a_{\max} , es seguida por una aceleración de constante y después por una rampa de bajada hasta una aceleración nula. La rampa descendente comienza cuando el cambio de velocidad deseado es igual a dV_{rd} , donde

$$dV_{rd} = \frac{a_{\max} dt_{\max}}{2}. \quad (7.3)$$

Las rampas de aceleración y desaceleración son simétricas, lo que simplifica el proceso de integración. La rampa de velocidad es también simétrica respecto a una línea recta dibujada desde el comienzo de la rampa al final de la misma.

El tiempo correspondiente a una trayectoria LSPB para los mismos cambios de velocidad y posición, es menor que el tiempo de la trayectoria quintic propuesta en esta tesis (dt_{\max}), pero a diferencia de la anterior, la trayectoria quintic tiene un jerk limitado, lo que conlleva a un mejor seguimiento.

Para generar la trayectoria completa de la Figura 7.2, los puntos de control se calculan basándose en el Algoritmo de Aceleración Sostenida, SAP, (MacFarlane and Croft, 2003).

7.2.3 LIMITACIONES EN DISTANCIA Y CAMBIO DE VELOCIDAD

Es posible que para un movimiento de corta distancia, D , entre dos puntos deseados p_1 y p_2 , el pulso de aceleración a_{\max} diera como resultado un sobrepulso de la distancia D . Esto ocurre cuando:

$$D < D_{\min} \quad (7.4)$$

donde

$$D_{\min} = a_{\max} dt_{\max}^2 + 2v_1 dt_{\max}. \quad (7.5)$$

Además, si el cambio de velocidad deseado, $dV = (v_2 - v_1)$ es tal que:

$$dV < dV_{\min} \quad (7.6)$$

donde

$$dV_{\min} = dt_{\max} a_{\max} \quad (7.7)$$

luego, un pulso de aceleración a_{\max} , provocará un sobreimpulso en el cambio deseado de velocidad, dV .

En ambos casos, la máxima aceleración permitida, a_{\max} , no puede ser alcanzada sin sobrepasar los límites (D ó dV) de la trayectoria prescrita. En tales casos, el método usado debe ser modificado. El movimiento está ahora basado en una rampa de aceleración hasta una aceleración menor, a_{peak} , y luego, inmediatamente desacelera hasta aceleración nula.

Si $D < D_{\min}$ y $dV > D_{\min}$, solamente la distancia es limitada. En este caso, la ecuación que describe D , puede obtenerse integrando los perfiles del jerk, la aceleración y la velocidad:

$$D = \frac{2j_{\max}}{\pi} dt^3 + 2v_1 dt \quad (7.8)$$

donde dt es el tiempo necesario para acelerar hasta a_{peak} . Así, dt puede ser calculado resolviendo:

$$dt^3 + \frac{\pi v_1}{j_{\max}} dt - \frac{\pi D}{2j_{\max}} = 0. \quad (7.9)$$

Esta última ecuación tiene únicamente una raíz positiva (siempre que $v_1 > 0$).

El pico de aceleración, a_{peak} , es:

$$a_{\text{peak}} = \frac{2j_{\max} dt}{\pi}. \quad (7.10)$$

Si $dV < dV_{\min}$, y $D > D_{\min}$, sólo el cambio de velocidad es limitado. En este caso, el tiempo necesario para acelerar hasta a_{peak} puede ser calculado como:

$$dt = \sqrt{\frac{\pi(v_2 - v_1)}{2j_{\max}}}. \quad (7.11)$$

En el caso de un movimiento limitado por distancia o velocidad, son necesarios tres polinomios de quinto orden para describir el movimiento entre dos puntos de paso, la rampa de aceleración de quinto orden, la rampa de desaceleración de quinto orden, y, en el caso de la limitación por velocidad, la velocidad de cruce de quinto orden.

Para generar la trayectoria completa de un movimiento limitado por la velocidad, los tres primeros puntos de control son calculados basándose en un Algoritmo de Pulso de Aceleración (AP) presentado en (MacFarlane and Croft, 2003). Un cuarto punto de control (correspondiente al fin de la fase de velocidad de cruce) se asigna basándose en la distancia restante:

$$dD = D - (v_2 + v_1)dt. \quad (7.12)$$

7.2.4 GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS ENTRE DOS PUNTOS DESEADOS

Los métodos descritos anteriormente se combinan para generar una trayectoria suave entre dos puntos de paso deseados, teniendo en cuenta las condiciones finales de cada punto. Cada punto de paso previsto tiene una posición y velocidad específica, mientras que la aceleración de cada uno de esos puntos de paso es puesta a cero para asegurar un jerk limitado y reducir la carga computacional.

Una trayectoria unidimensional uniendo dos puntos de paso se calcula basándose en la distancia entre los puntos, la velocidad que debe ser alcanzada en cada punto de paso, tanto como en los límites de aceleración y jerk.

En los siguientes casos, D es la distancia entre dos puntos de paso p_1 y p_2 ; v_1 y v_2 es la velocidad deseada en los puntos 1 y 2, respectivamente; y v_{\max} es la mayor velocidad permitida mientras se realiza el movimiento entre los puntos 1 y 2. De nuevo, la máxima aceleración y el jerk límite son: a_{\max} y j_{\max} .

Si $v_2 < v_1$, las velocidades son intercambiadas de forma que todos los movimientos pueden ser tratados como incrementos de velocidad. Las modificaciones apropiadas se realizan por tanto al final del cálculo de la trayectoria. Esto permite que todos los movimientos puedan ser separados en tres categorías según la velocidad.

Caso 1: $v_1 \neq v_2$, $v_{\max} = v_2$: para conseguir que el movimiento se lleve a cabo tan rápidamente como sea posible, el movimiento comienza con una fase de aceleración:

IF $D > D_{\min}$ y $v_2 - v_1 > dV_{\min}$
Se usa la trayectoria SAP.

ELSE
Se usa la trayectoria AP.

Caso 2: $v_2 \neq v_1$; $v_{\max} > v_2$: muchos escenarios son posibles basados en la distancia, D , y en las velocidades v_1 , v_2 y v_{\max} .

1) IF la distancia necesaria para acelerar de v_1 a v_2 , D_v , es mayor que D , se asigna $v_{\max} = v_2$ y se va al **Caso 1**.

2) $v_{\max} - v_2 > dV_{\min}$

Se calcula la distancia mínima, D_{limit} . Es la mínima distancia necesaria para poder usar pulsos de aceleración sostenida cuando aceleramos de v_1 a v_{limit} y luego desacelerar de v_{limit} a v_2 . v_{limit} es la máxima velocidad alcanzada mediante el pulso de aceleración desde v_2 con a_{\max} . D_{limit} se compara con D para determinar si la trayectoria planificada estará compuesta por pulsos de aceleración o pulsos de aceleración sostenidos.

- a. $D > D_{\text{limit}} \rightarrow$ Se usa pulsos de aceleración sostenida (SAP).
Los pulsos de aceleración sostenida se usan para generar rampas de velocidad de v_1 a v_{peak} y luego de v_{peak} a v_2 , donde v_{peak} es la máxima velocidad alcanzada durante la trayectoria entre p_1 y p_2 .

IF D es suficientemente grande

$$v_{\text{peak}} = v_{\text{max}}$$

ELSE

$v_{\text{peak}} < v_{\text{max}}$, la aceleración de cruce correspondiente a las rampas de velocidad desde y hasta v_{max} son reportadas basándose en D .

- b. $D < D_{\text{limit}} \rightarrow$ Se usa al menos un pulso de aceleración (AP).
En este caso, se puede demostrar que $v_{\text{peak}} < v_{\text{max}}$. v_{peak} se basa en una rampa de velocidad de v_1 a v_2 , seguida por un pulso de velocidad de v_2 a v_{peak} , y vuelta atrás hacia v_2 .

- 3) $v_{\text{max}} - v_2 < dV_{\text{min}}$

En este caso, se necesita un pulso de aceleración (AP) para la rampa de desaceleración desde v_{peak} a v_2 . Como en el **Caso 2**, se calcula la distancia límite basado en $v_{\text{peak}} = v_{\text{max}}$.

IF D es suficientemente grande

$v_{\text{peak}} = v_{\text{max}}$. Se usa una rampa de velocidad para alcanzar v_{peak} desde v_1 , y se añade un segmento de velocidad de cruce a v_{peak} .

ELSE

Se usa el **Caso 2b**.

Así, para el **Caso 2**, la trayectoria está compuesta por una rampa de velocidad desde v_1 hasta v_{peak} , una velocidad de cruce de v_{peak} , si es necesaria, seguida de una rampa de velocidad desde v_{peak} hasta v_2 . Como máximo, siete polinomios de quinto orden (ocho puntos de control) se usan para describir una trayectoria de unión de dos puntos de paso. A saber, un máximo de tres polinomios de quinto orden para la rampa de velocidad de v_1 a v_{peak} , una velocidad de cruce de quinto orden, y más de tres polinomios de quinto orden para la rampa de velocidad de v_{peak} a v_2 .

Caso 3: $v_2 = v_1$; $v_{\max} = v_2$: este caso es trivial, los coeficientes b_5 , b_4 , b_3 , b_2 de la ecuación 7.1 resultan iguales a cero. Es decir, la ecuación (7.1) corresponde a un polinomio de primer orden.

7.3 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Inicialmente el algoritmo de generación de trayectoria para el Sistema RoboTenis propuesto en este capítulo, ha sido implementado en Matlab. Se ha simulado un movimiento espacial para efector final compuesto por 10 trayectorias críticas dentro del espacio de trabajo. Cada trayectoria tiene diferentes condiciones iniciales y finales de posición y velocidad.

La máxima velocidad del efector, v_{\max} , es 2000.0 mm/s, la máxima aceleración, a_{\max} , es 20000.0 mm/s², y el límite de jerk, j_{\max} , es 314160.0 mm/s³.

La Figura 7.3 muestra las trayectorias simuladas correspondientes al efector final del robot. En la Figura 7.3(a) se muestra la evolución espacial del efector final, mientras que en las Figuras 7.3(b) – (d), se presentan los perfiles de velocidad, aceleración y jerk. El perfil de velocidad es continuo, mientras que la aceleración es cero en cada cambio de velocidad. El jerk está limitado, permitiendo que las trayectorias deseadas sean seguidas como se mostrará en la siguiente sección.

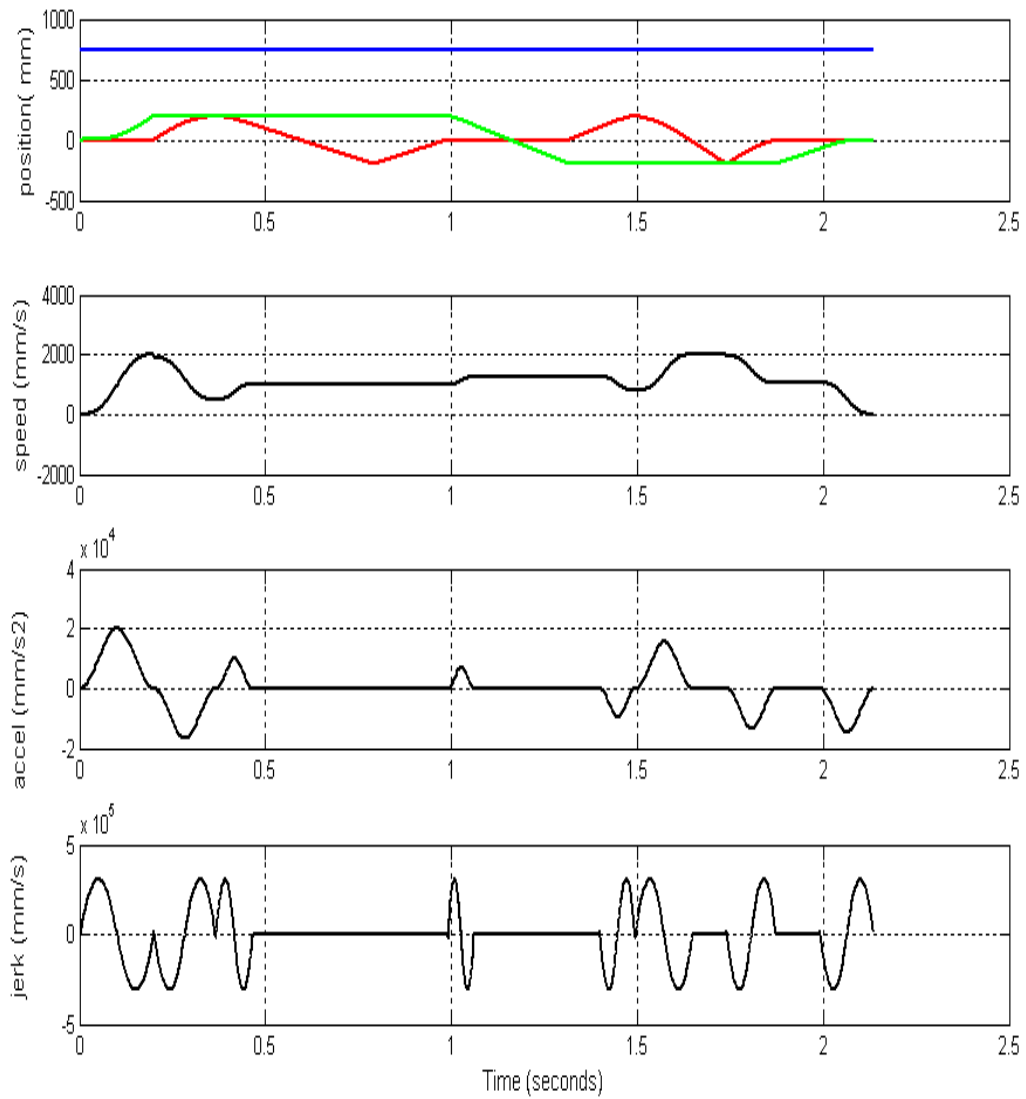


Figura 7.3 Perfiles de (a) posición, (b) velocidad, (c) aceleración, y (d) jerk, para el efector final en la simulación de un movimiento crítico, con trayectorias suaves generadas por una secuencia de polinomios de quinto orden.

7.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Varios movimientos han sido programados y ejecutados sobre el prototipo del Sistema RoboTenis. Cada movimiento esta compuesto por un conjunto de trayectorias criticas dentro del espacio de trabajo del manipulador. El objetivo de estos experimentos es observar el comportamiento del sistema cuando las trayectorias son generadas con una secuencia de polinomios de quinto orden para diferentes condiciones iniciales y finales de posición y velocidad. Con el fin de simplificar la ejecución en tiempo real, se asume que las condiciones iniciales y finales de aceleración para cada trayectoria son cero.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para dos movimientos representativos. El primer movimiento esta compuesto por un desplazamiento del efector final sobre el eje x seguido de un movimiento en forma de cuadrado sobre el plano yz . El segundo movimiento esta compuesto por un movimiento en forma de cuadrado sobre el plano xy seguido por un desplazamiento sobre el eje z . Las condiciones iniciales y finales de las trayectorias que componen cada movimiento se presentan en las Tablas 7.1 y 7.2.

Tabla 7.1
Parámetros para el Movimiento 1
usando polinomios de quinto orden

Posición (mm)	Velocidad (mm/s)
0.0, 0.0, 750.0	0
200.0, 0.0, 750.0	200
200.0, 200.0, 750.0	300
200.0, 200.0, 1000.0	400
200.0, -200.0, 1000.0	400
200.0, -200.0, 750.0	300
200.0, 0.0, 750.0	0

Tabla 7.2
Parámetros para el Movimiento 2
usando polinomios de quinto orden

Posición (mm)	Velocidad (mm/s)
0.0, 0.0, 750.0	0
200.0, 0.0, 750	500
200.0, -200.0, 750.0	700
-200.0, -200.0, 750.0	2200
-200.0, 200.0, 750.0	1000
200.0, 200.0, 750.0	800
200.0, 0.0, 750.0	600
0.0, 0.0, 750.0	300
0.0, 0.0, 1000.0	0

En las Figura 7.4 y 7.7, se presentan los perfiles de movimiento espacial del efector final para los movimientos de prueba 1 y 2, respectivamente. Estas Figuras muestran el movimiento espacial realizado, así como la proyección del movimiento en cada plano cartesiano. Las Figuras 7.5 y 7.8 muestran el error de seguimiento producido en cada movimiento, mientras que las Figuras 7.6 y 7.9 presentan los perfiles de velocidad para el efector final.

El error de seguimiento es relativamente bajo para las altas velocidades de operación del prototipo (<20 mm). El mayor error de seguimiento se da en las trayectorias a lo largo del eje z. La generación de trayectorias usando polinomios de 5 orden permiten generar movimientos rápidos y un perfil de velocidad suave.

MOVIMIENTO 1

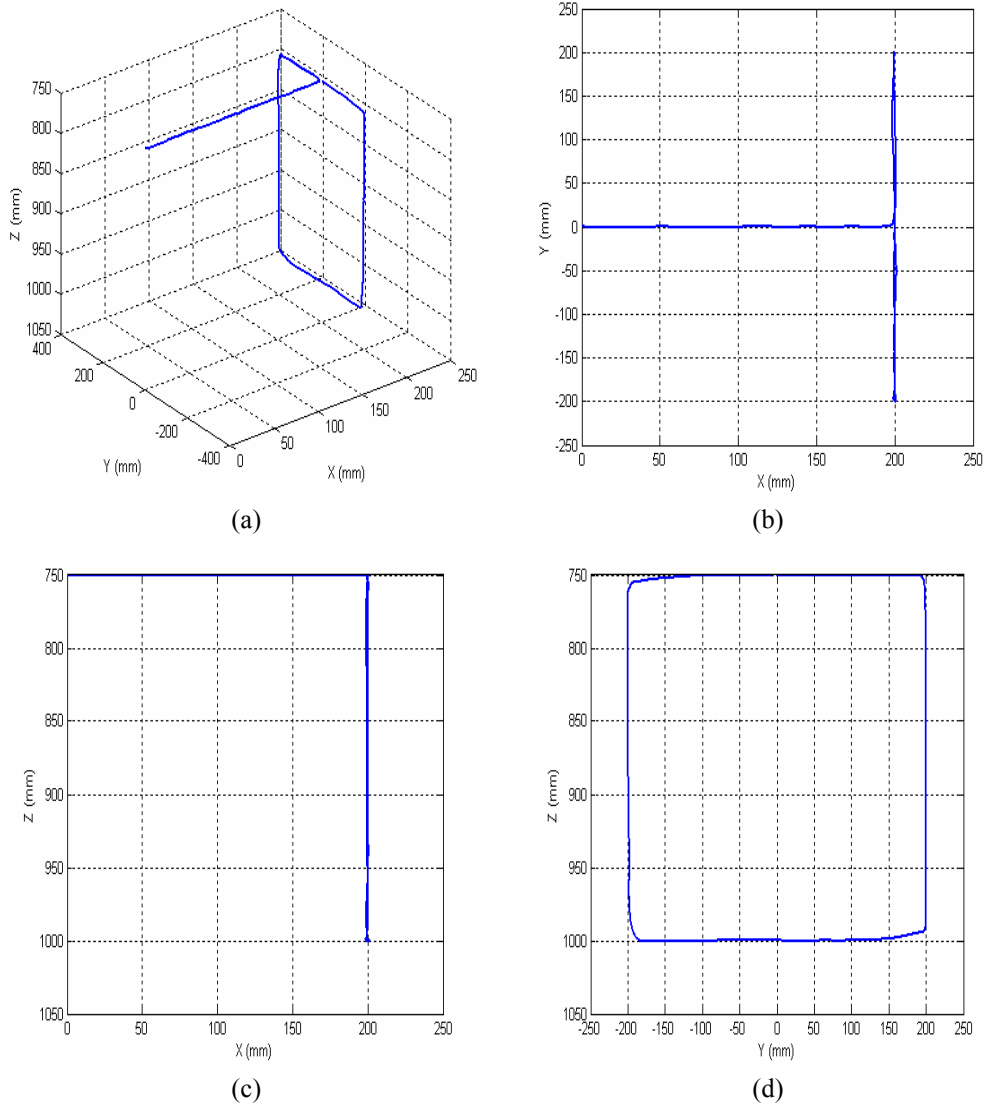


Figura 7.4 Perfil de movimiento para el efector final, en el seguimiento de la trayectoria propuesta en el movimiento 1: (a) en el espacio 3D, (b) en el plano XY, (c) en el plano XZ, y (d) en el plano YZ.

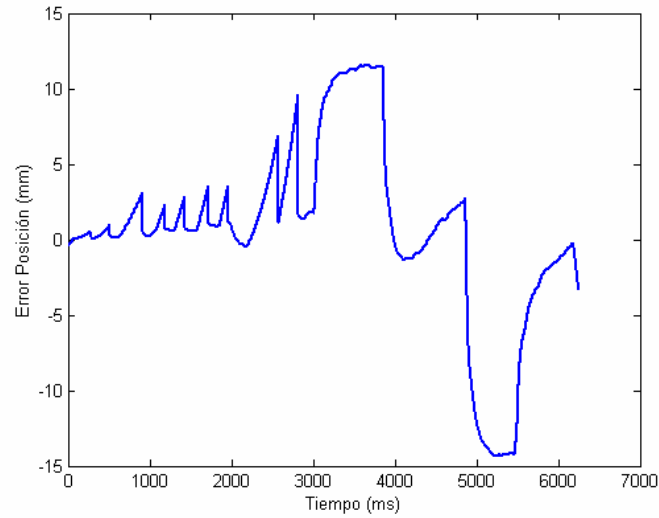


Figura 7.5 Error para el efector final, en el seguimiento de las trayectorias propuestas en el movimiento 1.

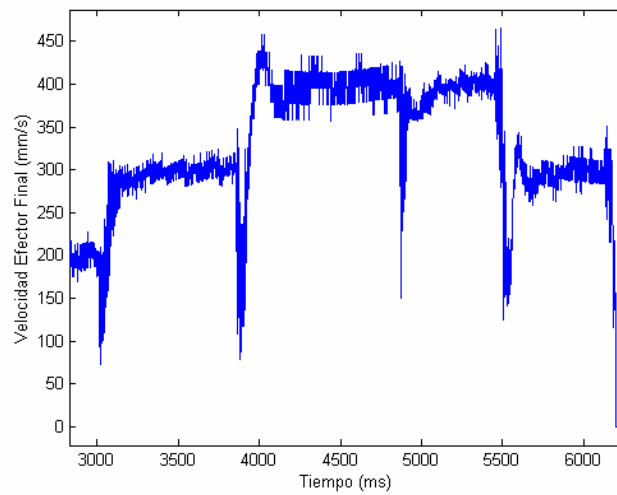


Figura 7.6 Perfil de velocidad para el efector final en la ejecución del movimiento 1.

MOVIMIENTO 2

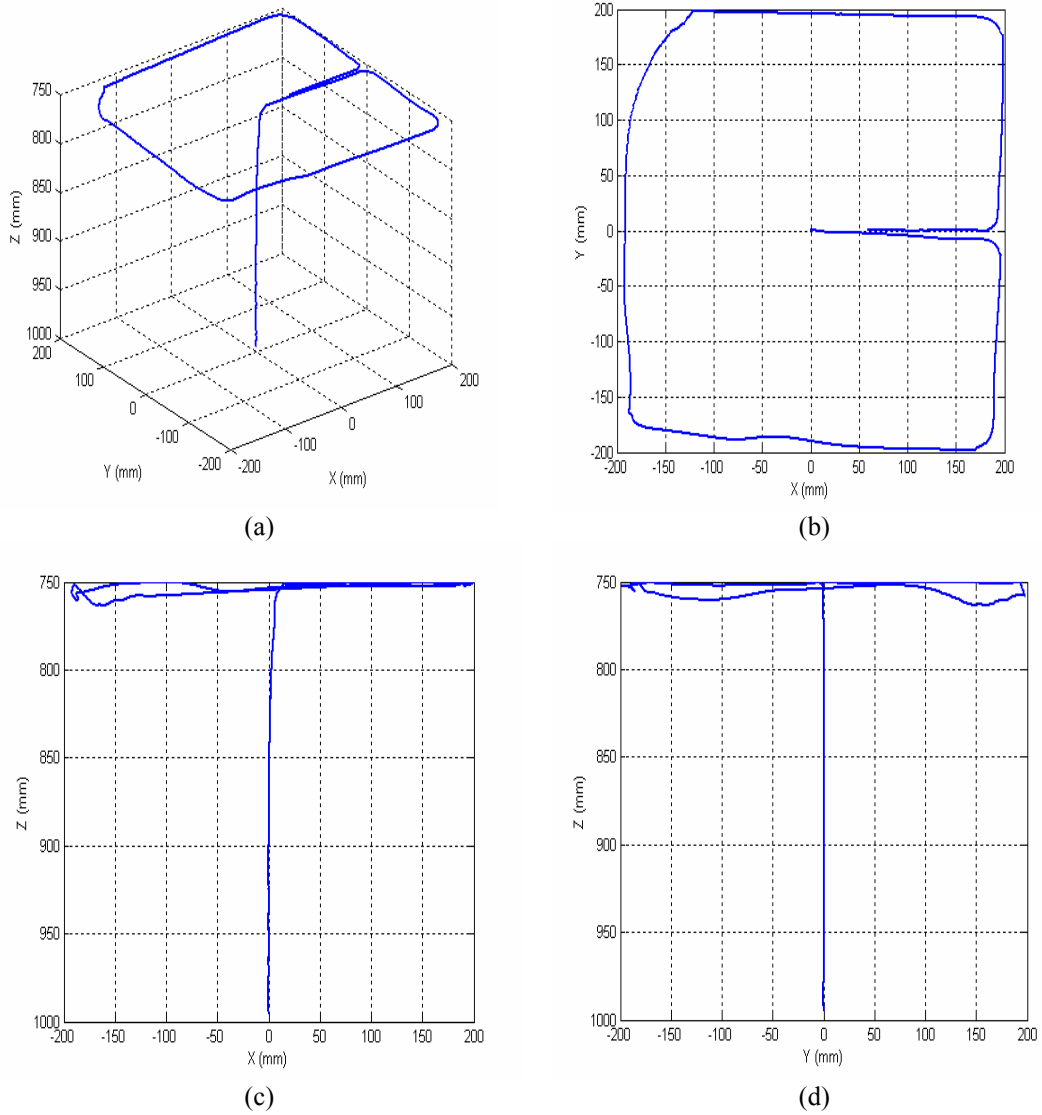


Figura 7.7 Perfil de movimiento para el efector final, en el seguimiento de las trayectorias propuestas en el movimiento 2: (a) en el espacio 3D, (b) en el plano XY, (c) en el plano XZ, y (d) en el plano YZ

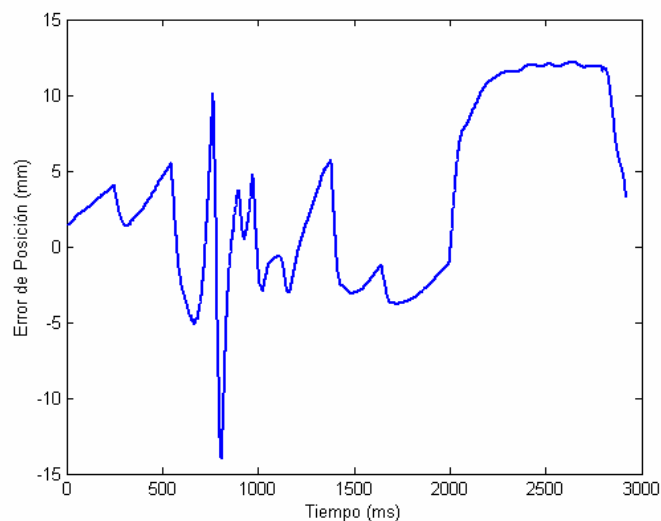


Figura 7.8 Error de Posición para el efector final, en el seguimiento de las trayectorias propuestas en el movimiento 2.

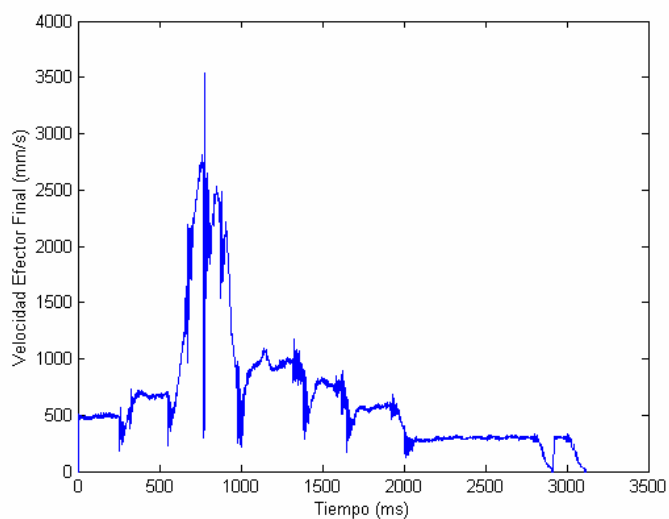


Figura 7.9 Perfil de velocidad para el efector final en la ejecución del movimiento 2.

7.5 CONCLUSIONES

En este capítulo, se ha presentado un método on-line para la generación de trayectorias suaves, aplicado al prototipo del Sistema RoboTenis. El algoritmo es sencillo computacionalmente e incluye: *i*) capacidad para producir movimientos rectilíneos con un jerk limitado entre puntos intermedios con distintas velocidades, *ii*) movimiento articular coordinado, y *iii*) planificación en tiempo real de trayectorias para n puntos intermedios del camino; teniendo en cuenta las posiciones y velocidades deseadas en estos puntos. El planificador emplea polinomios de quinto orden para generar una trayectoria suave entre dos puntos respetando los límites cinemáticos del manipulador (velocidad, aceleración y jerk) durante todo el movimiento. Los resultados experimentales sobre el prototipo son satisfactorios ya que el error de seguimiento es menor a 20 mm para velocidades superiores 1500 mm/s.

CAPÍTULO 8

ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN Y VELOCIDAD 3D DE OBJETOS A TRAVÉS DE UNA SECUENCIA DE IMÁGENES

8.1 INTRODUCCIÓN

En el procesamiento de la información visual del Sistema RoboTennis se emplea un sistema de visión por computador, compuesto por una cámara, una tarjeta de adquisición y una unidad de procesamiento. Su objetivo principal es estimar el estado de la pelota (la posición y la velocidad), con unos importantes requisitos de respuesta temporal y de precisión.

En este capítulo se presenta el procesamiento de la imagen, la detección de las características visuales y estimación de la posición y velocidad tridimensional de la pelota de una pelota en movimiento. El sistema de adquisición de

imagenes esta ubicado en el extremo del robot y formado por una sola cámara. La adquisición se efectúa aproximadamente cada 8,33 ms y emplea un sistema de doble buffering. Las características usadas son el centro de gravedad y el diámetro de la pelota. Se presentan varios metodos para la estimación del radio de la pelota. Dado el reducido tiempo de adquisición, se emplea el filtro de Kalman para filtrar las señales de posición y velocidad y conseguir una estimación mucho más fiable. Estos parámetros permiten predecir la posición y velocidad de la pelota, de forma que el robot pueda anticipar su movimiento.

8.2 ESTRATEGIA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

La opción elegida para la adquisición de imágenes es el empleo de una única cámara en el extremo del robot. Permite un amplio campo de vista (en función del movimiento del robot) y una buena precisión, sobre todo cuando la pelota está cerca del robot.

Entre las características diferenciales de la aplicación destaca la necesidad de una alta cadencia en la adquisición y procesamiento de imágenes, del orden de 8.33 ms, y la imposibilidad de utilizar equipos pesados, para no penalizar las características dinámicas del robot. Es importante resaltar, que la tridimensionalidad de la escena se obtiene en función del análisis del tamaño de la pelota.

Con el fin de simplificar el procesamiento se utiliza una pelota negra sobre fondo blanco (Figura 8.1). La iluminación empleada está formada por dos tubos fluorescentes de 36W con una reactancia electrónica de 20KHz, la cual permite disminuir las variaciones lumínicas. El hardware del sistema de visión se ha presentado con detalle en el Capitulo 4

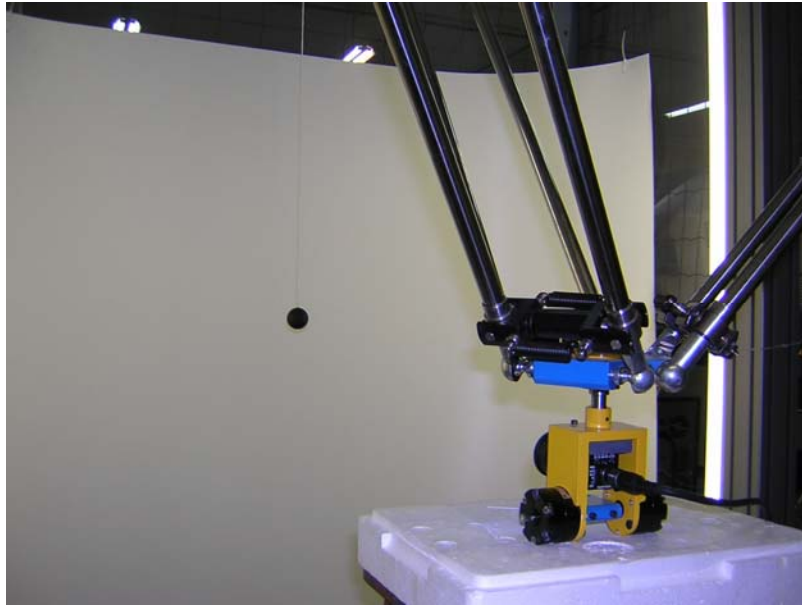


Figura 8.1 Entorno de trabajo.

La Figura 8.2 muestra una imagen capturada. La deformación de la pelota se debe al empleo del modo binning (240x640), que reduce la dimensión de la imagen a la mitad. Este modo disminuye la resolución vertical, manteniendo el campo visual.



Figura 8.2 Imagen capturada en modo binning (240x640).

8.2.1 REQUISITOS PREVIOS

El procesamiento de la imagen y la estimación del estado de la pelota (posición y velocidad) parten del conocimiento de los siguientes datos:

- **Parámetros intrínsecos de la cámara**, distancia focal, centro de la imagen, factores de escala, coeficientes de distorsión.
- **Calibración cinemática**, posición relativa entre la cámara y el extremo del robot.
- **Tamaño de la pelota en la imagen**, para diferentes distancias entre la pelota y la cámara.

8.3 SEGMENTACIÓN DE LA ESCENA

El empleo de una pelota negra sobre fondo blanco simplifica notablemente el proceso de segmentación, permitiendo cumplir los fuertes requisitos temporales de la aplicación. El tamaño de la pelota en la imagen, dependerá de la distancia relativa entre la cámara y la pelota, aspecto que tendrá que tenerse en cuenta en el procesamiento de la información, por su distinta carga computacional.

Las etapas seguidas en el proceso de segmentación son:

- **Uniformización de las condiciones lumínicas**. Se analiza la iluminación de la escena para adaptar los umbrales empleados a las posibles variaciones lumínicas.
- **Determinación de puntos semilla pertenecientes a la pelota**. El tiempo disponible para el procesamiento no permite una búsqueda secuencial en todos los píxeles de la imagen. Por este motivo, se ha optado por una determinación en dos niveles. Inicialmente se detectan aquellos

píxeles que están por debajo de un umbral restrictivo y que se denominan puntos semilla. La búsqueda se realiza solo en una fila de cada cuatro y en una columna de cada ocho, como se muestra en la Figura 8.5. Las condiciones de búsqueda aseguran que en la posición más alejada de la pelota con respecto a la cámara, al menos se detectan dos puntos semilla.

- **Determinación de la zona de influencia de la pelota.** A partir de los puntos semilla de la pelota se anexionan mediante un algoritmo recursivo aquellos píxeles vecinos que están por debajo de un umbral menos restrictivo. Si el número de puntos semilla detectado es elevado, se consideran solo como vecinos aquellos píxeles que están separados dos o cuatro filas o columnas, para no penalizar el tiempo de procesamiento. La zona hallada se expande para incluir los píxeles de transición, y recuperar parte de la información subpixel.

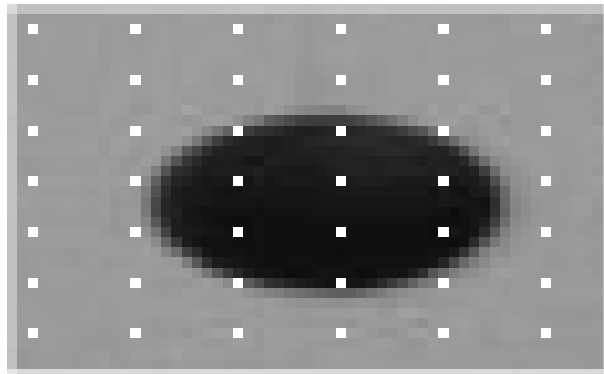


Figura 8.5 Píxeles iniciales de búsqueda

- **Determinación de si existe pérdida de información visual de la pelota al situarse en el límite del campo visual.** Ocasionalmente y en función del algoritmo de seguimiento, y para no penalizar la resolución de la aplicación, parte de la pelota puede quedar fuera del campo visual. Será necesario detectar esta situación y adaptar los datos obtenidos, pa-

ra que no influyan negativamente en la estimación de la posición y de la velocidad.

El tiempo invertido por el algoritmo de segmentación en el caso más desfavorable (pelota muy cercana a la cámara) es de 1 ms.

8.4 DETECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS BIDIMENSIONALES

Una vez segmentada la región de la pelota en el plano de la imagen, el siguiente paso es la interpretación de la información que en ella está contenida. El objetivo de esta interpretación, es la de obtener las coordenadas tridimensionales de la pelota a partir de la información que se recoge de una sola cámara (el centroide y el tamaño de la pelota).

Es necesario destacar que una esfera proyectada sobre una imagen, sometida a una transformación perspectiva, es un círculo perfecto, salvo las diferencias ocasionadas por los diferentes factores de escala en cada eje (muy acusado en el modo de adquisición binario) y la distorsión óptica. Se puede asegurar que la recta que pasa por el centroide de la imagen y por el centro óptico, atraviesa a la esfera por el centro de gravedad de la pelota. No es necesario corregir la información obtenida, contrariamente a cuando se proyecta un círculo en una imagen y el plano del círculo no es paralelo al plano de la imagen.

8.4.1 CÁLCULO DEL CENTROIDE DE LA PELOTA

Se han probado dos metodologías para la estimación del centroide: considerando la imagen binaria o considerando la imagen con su escala de intensidades o grises.

8.4.1.1 IMAGEN BINARIA

Definido un umbral de pertenencia a la pelota, se realiza la binarización de la imagen, obteniéndose dos campos: fondo y pelota. Considerando los píxeles que pertenecen al campo pelota se calcula el centroide mediante:

$$x_g = \frac{1}{nPelota} \sum_{i=1}^{nPelota} x_i \quad ; \quad y_g = \frac{1}{nPelota} \sum_{i=1}^{nPelota} y_i \quad (8.1)$$

siendo $nPelota$, el número de puntos pertenecientes a la pelota. Este método tiene el inconveniente de despreciar la información existente en la transición entre la pelota y el fondo. No obstante, la disposición circular de la pelota minimiza este efecto.

8.4.1.2 IMAGEN EN NIVELES DE INTENSIDAD

En este método de cálculo, se tiene en cuenta más información que en el método anterior, ya que, aparte de la posición de los píxeles, se considera también el nivel de gris de cada uno de ellos. De esta manera, los píxeles que se encuentran en el borde de la pelota se consideran en el cálculo de la posición del centroide, pero teniendo menor peso en la medida en que van adquiriendo un valor más cercano al blanco. Las fórmulas empleadas son:

$$x_g = \frac{\sum_{i=1}^{nZonaPelota} x_i (255 - nivel_i)}{\sum_{i=1}^{nZonaPelota} (255 - nivel_i)} \quad ; \quad y_g = \frac{\sum_{i=1}^{nZonaPelota} y_i (255 - nivel_i)}{\sum_{i=1}^{nZonaPelota} (255 - nivel_i)} \quad (8.2)$$

donde, $nZonaPelota$ es el entorno de la pelota, incluida su transición con el fondo, que ha sido obtenida en la etapa de segmentación, y, el valor de $nivel_i$ representa el nivel de gris del píxel i .

El método es muy sensible a los cambios en el blanco del fondo o a los efectos de reflejos de la iluminación en la pelota. Para evitarlos es conveniente fijar unos umbrales de nivel de intensidad de máximo para el fondo y de mínimo para la pelota que filtren estos aspectos, pese a disminuir la precisión.

Los resultados obtenidos utilizando la imagen en niveles de intensidad son superiores a los obtenidos en imágenes binarias, aunque exige una adecuada selección de estos últimos umbrales.

8.4.2 CÁLCULO DE RADIO DE LA PELOTA

El cálculo del radio de la pelota permite estimar la distancia entre la cámara y la pelota, por lo que su determinación con alta precisión es fundamental para el buen funcionamiento del sistema. Se han ensayado igualmente distintas alternativas para el cálculo del radio de la pelota: a través del área de la imagen binaria, a través del área de la imagen en niveles de gris, y medición del diámetro de la imagen de la pelota a través de la transición de una línea.

Las dos última técnicas se encuentran enmarcadas dentro de las técnicas de precisión subpixel, ya que aprovechan la información de la cuantificación de la imagen para obtener una mejor resolución espacial con precisiones menores de un píxel.

8.4.2.1 CÁLCULO A TRAVÉS DEL ÁREA DE LA IMAGEN BINARIA

El área de la pelota en la imagen binaria se calcula mediante la suma del número de píxeles que forman parte de la pelota según el umbral establecido. El radio se obtiene fácilmente a partir de:

$$Radio = \sqrt{\frac{\text{Área}}{\pi}} \quad (8.3)$$

Este método de cálculo tiene el problema ya mencionado con anterioridad de la poca precisión con la que se calcula el área de la pelota considerando la imagen binaria, siendo este error arrastrado en el cálculo del radio.

8.4.2.2 CÁLCULO A TRAVÉS DEL ÁREA DE LA IMAGEN EN NIVELES DE GRIS

La precisión con que se calcula el área de una imagen en niveles de gris es mayor, por lo que la estimación del radio es más precisa. El área se calcula mediante la ecuación

$$\text{Area} = \frac{\sum_{i=1}^{nZonaPelota} (\text{MáximaIntensidadFondo} - \text{FunciónSaturación}(\text{nivel}_i))}{(\text{MáximaIntensidadFondo} - \text{MínimaIntensidadPelota})} \quad (8.4)$$

donde, la *FunciónSaturación* mantiene el nivel entre la *MáximaIntensidad* admisible para el Fondo y la *MínimaIntensidad* admisible para la pelota. A partir de esta estimación del área es posible obtener un valor más preciso del radio de la pelota.

8.4.2.3 DIÁMETRO A PARTIR DE LA TRANSICIÓN DE UNA LÍNEA

Este método realiza una medición directa del radio de la pelota sin pasar por el cálculo del área, analizando las transiciones de las filas y columnas centrales. El cálculo parte del conocimiento del centro de gravedad y analiza las transiciones Fondo-Pelota y Pelota-Fondo de las tres filas y de las tres columnas centrales. Posteriormente se realiza un filtrado mediante la mediana de los valores.

Los datos obtenidos en cada transición es una secuencia de valores (creciente o decreciente según el tipo de transición) entre el valor del fondo y el valor de la pelota. Entre los métodos existentes en la literatura (Reinoso, 1999) se ha elegido el que proporciona como valor para una transición creciente:

$$x_{subpixel} = x_m + \frac{(MáximoValor - MínimoValor) - (nivel_{m+1} - nivel_m)}{2(nivel_{m+1} - nivel_m)} \quad (8.5)$$

siendo, *MáximoValor* y *MínimoValor*, los niveles extremos en el entorno de la transición. El subíndice *m* indica el índice del píxel que cumple

$$nivel_m < \frac{MáximoValor + MínimoValor}{2} \leq nivel_{m+1} \quad (8.6)$$

Para dar mayor robustez a la estimación del radio, se aplica este cálculo a las tres filas y columnas de píxeles centrales de la pelota y se calcula su mediana. Debido al tamaño de la pelota en la imagen, la diferencia de radios entre cualquiera de estas tres filas o columnas resulta despreciable, por lo que la mediana de los tres radios hallados proporcionará un valor más estable, como consecuencia de la ponderación de los errores que se comenten en la medición.

La mayor resolución en la coordenada horizontal (debido a la adquisición en modo binning) proporciona unos mejores valores en la estimación por filas que por columnas. Sin embargo, y debido a una posible pérdida de información al situarse la pelota en el límite del campo visual, es necesario manejar la estimación obtenida a partir del análisis de las columnas. Este método permite estimar el tamaño de la pelota en la imagen, aunque ésta no se visualice entera.

8.4.2.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DEL RADIO DE LA PELOTA

A fin de poder evaluar los métodos descritos anteriormente, se han realizado estudios comparativos de las medidas obtenidas al adquirir y analizar mil imágenes de la pelota inmóvil. Se ha calculado para cada algoritmo la media y la desviación típica de los valores obtenidos. De estas características, la

mas representativa es la desviación típica, pues las variaciones entre las medidas de los diversos métodos serán absorbidos en el proceso de calibración. Así para una media cercana a los 20 píxeles de radio, las desviaciones típicas se presentan en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1
Estimación del radio de la Pelota

Método Empleado	Desviación Típica
Área de una imagen binaria	0.2202
Área de una imagen en niveles de grises	0.0922
Transición de filas	0.0228
Transición de columnas	0.0266

Como se puede observar, es más fiable estimar el radio a partir de la transición de las filas. La diferencia con respecto a las columnas se debe al distinto factor de escala de cada eje.

8.5 ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA PELOTA

A partir de las características visuales obtenidas en el procesamiento de la imagen (centroide y radio de la pelota), es posible calcular la posición tridimensional de la pelota con respecto a la cámara. Esta estimación se realiza en las siguientes fases:

- Inicialmente y mediante una calibración previa es posible determinar la distancia de la cámara a la pelota (z_c en la Figura 8.6) a partir del radio de la pelota.
- A partir del centroide de la pelota (x_f, y_f) y conociendo los parámetros intrínsecos de la calibración, es posible determinar el centroide expresado en coordenadas centrales de la cámara (x_u, y_u) sin distorsión óptica.

- Considerando las ecuaciones (8.7) que definen el modelo de proyección de una lente Pinhole, se obtiene la posición espacial de la pelota referida al sistema de coordenadas centrado en el centro óptico (x_c, y_c, z_c) :

$$x_c = z_c \frac{x_u}{f} \quad ; \quad y_c = z_c \frac{y_u}{f} \quad (8.7)$$

donde, f es la distancia focal. Para la coordenada z_c , se emplea el diámetro estimado y la ecuación (8.8).

$$\frac{\text{Coordenada Z (mm)}}{\text{DistanciaDato (mm)}} = \frac{\text{DiámetroDato (píxeles)}}{\text{Diámetro (píxeles)}} \quad (8.8)$$

El diámetro y la coordenada z_c son inversamente proporcionales. A medida que aumenta el diámetro, la pelota se va acercando a la cámara. El *DiámetroDato* y la *DistanciaDato* se obtienen en la calibración previa.

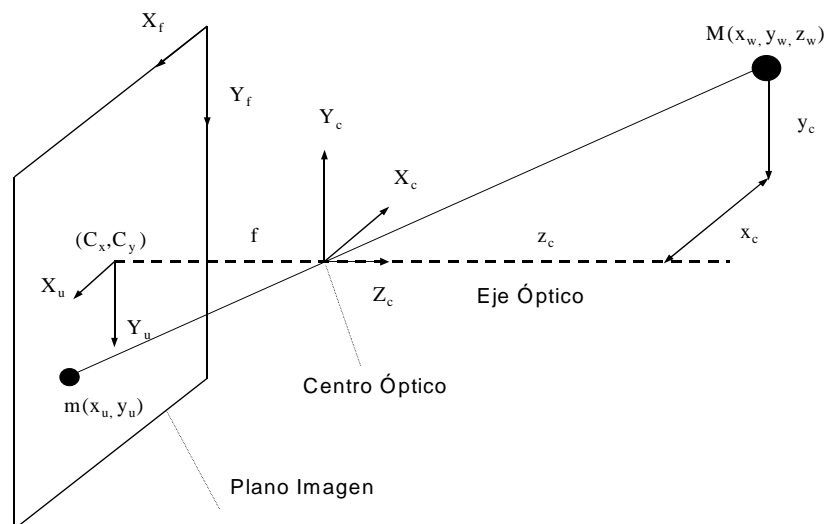


Figura 8.6 Modelo Pinhole para la cámara.

8.6 SINCRONIZACIÓN DE LA ADQUISICIÓN Y EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

La alta cadencia de funcionamiento requiere una adecuada sincronización entre la adquisición y el procesamiento, a fin de minimizar los tiempos invertidos en ambas tareas. En base a las posibilidades que permite la tarjeta de adquisición se han considerado dos formas de sincronización: modo síncrono y modo asíncrono.

8.6.1 MODO SÍNCRONO

Es un procedimiento secuencial en que las tareas se van realizando a medida que acaban las anteriores. Existe un único hilo de ejecución del programa. Se caracteriza porque en el momento en que se completa la adquisición de la imagen, se produce el procesamiento de la misma. Hay que esperar dos ciclos de adquisiciones para capturar la siguiente imagen a analizar.

8.6.2 MODO ASÍNCRONO

Permite la ejecución simultánea de dos procesos (adquisición y procesamiento) mediante la utilización de dos hilos de ejecución. En un hilo se realiza la adquisición de la imagen y en el otro el procesamiento de la imagen previamente adquirida. Para poder realizar este tipo de ejecución, es necesario que la tarjeta de adquisición posea ciertas características, como es la existencia de un doble buffer para alternar el almacenamiento de la información y evitar así su pérdida.

En la figura 8.7 se detalla la asignación temporal de los procesos. A destacar, que siempre se está procesando la información adquirida en un período anterior y que el tiempo de procesamiento no debe de sobrepasar el tiempo de adquisición (en la presente aplicación 1 ms frente a 8,33 ms).

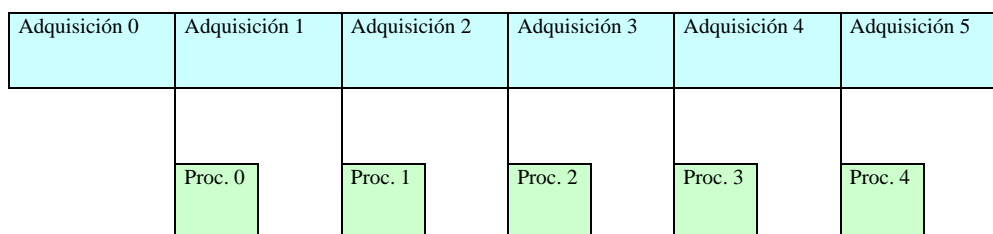


Figura 8.7 Adquisición y procesamiento de imagen en modo asíncrono.

8.6.3 ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CICLO

La utilización del sistema operativo Windows NT no permite asegurar un tiempo constante de adquisición, ya que existen procesos ejecutándose de forma paralela al programa de adquisición que pueden provocar interrupciones del mismo, y por tanto, retardos en las adquisiciones.

Con el fin de minimizar el efecto producido por estas variaciones, se ha optado por medir el tiempo de adquisición, a través de las rutinas existentes en las librerías MIL, e incorporarlo al modelo.

8.7 ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN Y LA VELOCIDAD DE LA PELOTA MEDIANTE EL FILTRO DE KALMAN

Una vez obtenida la posición tridimensional de la pelota, es necesario estimar su velocidad. Dada la alta componente aleatoria producida por el ruido en la adquisición y el tratamiento de los datos, es necesario realizar una estimación robusta tanto de la posición como de la velocidad.

El filtro de Kalman es una técnica de estimación bayesiana empleada para seguir sistemas estocásticos dinámicos observados mediante sensores ruidosos. Proporciona un buen marco para la estimación incremental de una can-

tividad en una situación en la cual las mediciones relacionadas con la misma están disponibles a lo largo del tiempo (Bar and Shalom, 1998), (Blackman, 1999), (Brookner, 1998), (Welch, 2002).

8.7.1 NOTACIÓN MATRICIAL DEL FILTRO DE KALMAN

Se considera como modelo del sistema la siguiente expresión,

$$x_{k+1} = A_k \cdot x_k + B_k \cdot u_k + w_k \quad ; \quad w_k \rightarrow N(0, Q) \quad (8.9)$$

donde, x_k representa el estado, u_k la entrada, w_k una variable aleatoria de media cero y varianza definida mediante la matriz de covarianzas Q .

Las medidas, z_k , se obtienen a través de un modelo para el sensor

$$z_k = H_k \cdot x_k + v_k \quad ; \quad v_k \rightarrow N(0, R) \quad (8.10)$$

donde, v_k es una variable aleatoria de media cero y varianza definida mediante la matriz de covarianzas R .

Se define el estado estimado a priori en el momento k , como el estado que se puede estimar a través de todos los datos conocidos hasta el instante $k-1$. Igualmente también se puede definir la matriz de covarianzas a priori:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^- &= \hat{x}(k | k-1) \\ P_k^- &= E \left[(x_k - \hat{x}_k^-) (x_k - \hat{x}_k^-)^T \right] \end{aligned} \quad (8.11)$$

De forma similar se definen el estado estimado a posteriori y la matriz de covarianzas a posteriori en el instante k . En este caso se incluye para la estimación los datos del instante considerado.

$$\begin{aligned}\hat{x} &= \hat{x}(k | k) \\ P_k &= E \left[(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T \right]\end{aligned}\tag{8.12}$$

El algoritmo se realiza en dos etapas:

- La fase de actualización del tiempo, de propagación o de predicción, en la cual se realiza la estimación del estado y matriz de covarianzas a priori:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_k^- &= A_{k-1}\tilde{x}_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} \\ P_k^- &= A_{k-1}P_{k-1}A_{k-1}^T + Q_{k-1}\end{aligned}\tag{8.13}$$

- La fase de actualización de la medida o de corrección, en la cual se calcula la matriz de ganancia de Kalman que sirve para cuantificar cuanto deben crecer las variables de estado que correspondan en función del ruido del sensor, la matriz de covarianzas a priori y la matriz que define el modelo del sensor

$$K_k = P_k^- H_k^T \left[H_k P_k^- H_k^T + R_k \right]^{-1}\tag{8.14}$$

Después se calcula el vector de estado a posteriori, como una corrección del vector de estado a priori al que se le suma el error cometido entre la medida del sensor y la estimación del modelo del sensor, tomando como estado el modelo a priori.

Con la matriz de covarianzas también se realiza una corrección similar

$$\begin{aligned}\tilde{x}_k &= \tilde{x}_k^- + K_k \left[z_k - H_k \tilde{x}_k^- \right] \\ P_k &= \left[I - K_k H_k \right] P_k^-\end{aligned}\tag{8.15}$$

Como se puede observar, se genera un proceso iterativo en el que va disminuyendo la incertidumbre de la medida según aumentan los datos medidos (Figura 8.8).

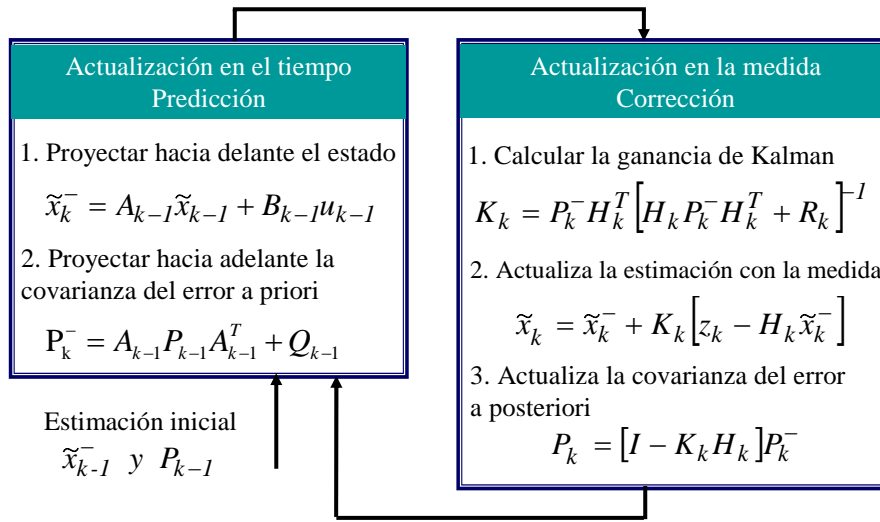


Figura 8.8 Etapas del filtro de Kalman.

8.7.2 MODELO DEL SISTEMA

Con el modelado del sistema lo que se pretende es establecer las ecuaciones que definan el movimiento de la pelota. Se utiliza el modelo de Kalman discreto y lineal. Las ecuaciones que describen el movimiento tridimensional de la pelota representan un movimiento no lineal. Por este motivo, se realizarán aproximaciones del movimiento de la pelota haciendo las consideraciones oportunas para comprobar que dichas aproximaciones no se alejan de las hipótesis.

8.7.2.1 MODELO DEL SISTEMA CON VELOCIDAD CONSTANTE

Uno de los posibles modelos que pueden definir el movimiento de la pelota, es el que considera, que ésta se mueve con velocidad constante. Esta hipótesis es válida considerando los bajos tiempos de adquisición, entre una imagen y la siguiente. La variación de la velocidad entre dos instantes de tiempo es muy pequeña, siendo esta variación corregida por el propio método del filtro de Kalman.

Las ecuaciones que reflejan este comportamiento son:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= x_k + T \cdot \dot{x}_k \\ \dot{x}_{k+1} &= \dot{x}_k\end{aligned}\tag{8.16}$$

donde, T representa el periodo de muestreo, y, puede considerarse como constante o variable con la muestra.

De las ecuaciones (8.16), se puede plantear el modelo del sistema, con el vector de estados (8.17).

$$\begin{aligned}x &= (u \quad v \quad w \quad \dot{u} \quad \dot{v} \quad \dot{w})^T \\ A &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\end{aligned}\tag{8.17}$$

siendo $x = (u \quad v \quad w)^T$ la posición espacial de la pelota.

8.7.2.2 MODELO DEL SISTEMA CON ACELERACIÓN CONSTANTE

Del mismo modo que en el apartado anterior, esta hipótesis de movimiento se puede asumir por los bajos tiempos de adquisición y que la velocidad varía poco de una imagen a la siguiente, lo que podría suponer una mínima variación en la aceleración.

Las ecuaciones que definen el modelo son:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= x_k + T \cdot \dot{x}_k + \frac{1}{2} T^2 \cdot \ddot{x}_k \\ \dot{x}_{k+1} &= \dot{x}_k + T \cdot \ddot{x}_k \\ \ddot{x}_{k+1} &= \ddot{x}_k\end{aligned}\tag{8.18}$$

La matriz de estado esta dada por la ecuación (8.19).

$$x = (u \quad v \quad w \quad \dot{u} \quad \dot{v} \quad \dot{w} \quad \ddot{u} \quad \ddot{v} \quad \ddot{w})^T$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & \frac{1}{2} T^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & \frac{1}{2} T^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & \frac{1}{2} T^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\tag{8.19}$$

Esta hipótesis de movimiento presenta una ventaja frente a la anterior. El filtro de Kalman asume el error que se comete en la consideración de aceleración constante, pero la velocidad, parámetro fundamental para la predicción futura de la posición de la pelota, se verá corregido por la aceleración y por el propio filtro. Esto podría proporcionar una mayor precisión en cuanto a la estimación de este parámetro.

8.7.3 MODELO DEL SENSOR

El otro modelo sobre el que se puede actuar para conseguir distintos resultados es el modelo del sensor. Este modelo viene limitado por el sensor que se usa en el sistema, en el caso del Sistema RoboTennis, la cámara.

8.7.3.1 MEDIDA DE POSICIÓN

Como ya se analizó durante la parte de procesamiento de la imagen, los parámetros que se pueden estimar son las coordenadas en el espacio 3D, por lo que resulta fácil ver que el vector de la medida del sensor será:

$$z_k = (u_k \quad v_k \quad w_k)^T \quad (8.20)$$

En consecuencia con este vector del sensor, la matriz H que relacionará dicho vector con el vector de estado del sistema, suponiendo el caso de modelo de aceleración constante, será la siguiente:

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8.21)$$

En este caso, el filtro de Kalman tratará de minimizar el valor de las posiciones del sensor con las posiciones dadas por el sistema.

8.7.3.2 MEDIDA DE POSICIÓN Y VELOCIDAD

Otra posibilidad que se plantea en cuanto a los parámetros que puede medir la cámara es la de que, a parte de la posición en esa adquisición, también pueda medir la velocidad como un cálculo en base a la posición en esa imagen y en la anterior.

De este modo, el vector de medida del sensor que se obtendría sería:

$$z_k = \left(u_k \quad v_k \quad w_k \quad \frac{u_k - u_{k-1}}{T} \quad \frac{v_k - v_{k-1}}{T} \quad \frac{w_k - w_{k-1}}{T} \right)^T \quad (8.22)$$

donde T es el periodo de muestreo, el cual puede considerarse como constante o dependiente de la muestra.

En consecuencia con la nueva dimensión del vector de medida del sensor, la matriz H queda de siguiente manera:

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8.23)$$

Ahora, el filtro de Kalman no sólo minimizaría el error en posición, si no que también minimiza el error en velocidad.

8.7.4 AJUSTE DEL FILTRO DE KALMAN

El filtro de Kalman es un algoritmo recursivo en el que el vector de estados se va actualizando a medida que se va introduciendo nueva información a través de las medidas que se adquieren a través del sensor.

De Figura 8.8, se observa que, hay que buscar tanto la matriz de covarianzas y el vector de estados que nos den una estimación buena del estado inicial que tendrá la pelota en la primera adquisición. La ventaja que presenta el filtro de Kalman es que los valores que se introduzcan en el filtro tienden a estabilizarse al cabo de un determinado número de ciclos. En el caso del vector de estado, se toma como valor inicial la primera medición que se extrae de la imagen en los parámetros de posición para evitar los primeros ciclos de establecimiento.

Otra dificultad que se presenta a la hora de definir el filtro de Kalman, es la estimación de los valores de los elementos de las matrices R y Q , debido a la dificultad en la medición del sistema real para poder compararlo con las estimaciones que proporcionan el modelo del sistema y el sensor.

En realidad, estas matrices son las que fijarán el comportamiento del filtro de Kalman ya que, en función del error que se modele en cada una de ellas, el propio filtro será capaz de tener en mayor o menor consideración el dato que da el modelo del sistema, en el caso de la matriz Q , y el dato que da el modelo del sensor, en el caso de la matriz R . Como es lógico, cuanto mayores sean los valores de los elementos de estas matrices, menor influencia tendrán en el proceso de filtrado el valor calculado por el modelo correspondiente.

En la presente tesis, estas matrices se usarán para la calibración del filtro. Esta calibración permite filtrar aquellas situaciones en las que el ruido que introducen los modelos, no responde a la estructura definida en teoría de ruido con media nula y varianza Q o R según el caso.

8.8 PRUEBAS REALIZADAS

Las prestaciones del control visual del Sistema RoboTenis dependerán en gran medida de la precisión y de la robustez de la estimación de la posición y de la velocidad de la pelota, por lo que son merecedores de un análisis exhaustivo. A tal fin se han realizado diversas pruebas para estudiar las opciones propuestas en el presente capítulo. Los ensayos se han efectuado con el robot parado y con la pelota oscilando en un movimiento pendular durante 1000 muestras (80 s), a fin de poder aislar los efectos de la estimación visual de los propios del control de un sistema real. No se ha tenido en cuenta la naturaleza específica del movimiento pendular, pues se desea que la estimación sea válida para otros problemas de seguimiento, como por ejemplo jugar al tenis de mesa. Se ha optado por la realización de pruebas reales frente a las simulaciones. De esta forma se trabaja más cercano a la realidad, aunque con el inconveniente de no poder repetir exactamente un ensayo para poder comparar los resultados.

8.8.1 PRUEBAS CON VARIOS MODELOS DEL SISTEMA

Se han planteado dos opciones para el modelo del sistema: velocidad constante y aceleración constante. En el primer caso se estiman la posición y la velocidad tridimensional de la pelota, y en el segundo caso se estiman la posición, la velocidad y la aceleración tridimensional de la pelota.

La estimación de la posición es similar en ambos casos, por lo que no se detalla el resultado. No así la estimación de la velocidad. En la Figura 8.9 se muestra la velocidad estimada en el primer caso, donde en color azul se representan los valores medidos y en color rojo la velocidad filtrada.

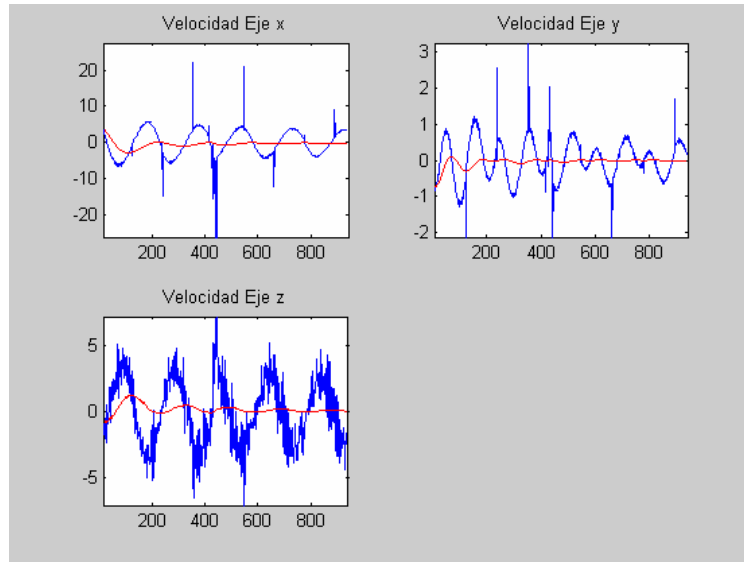


Figura 8.9 Velocidad estimada con vector de estado en posición y velocidad.

Bajo el supuesto de velocidad constante, el filtro de Kalman trata de ajustar la velocidad para que ésta sea constante y las variaciones debidas a la oscilación de la pelota las entiende como ruido que tiene que filtrar, de manera que de forma progresiva va atenuando su efecto. La atenuación no se realiza rápidamente porque, a través de la calibración de las matrices que definen el error del modelo del sistema, se le ha indicado al filtro que el ruido que tiene el modelo es mucho más pequeño que las variaciones de velocidad debidas al movimiento real.

En la figura 8.10 se representa la estimación de la velocidad, con un modelo de aceleración constante, y se aprecia como el sistema se ajusta a los valores del movimiento. Dada la importancia de la estimación de la velocidad para el buen comportamiento del Sistema RoboTennis, sólo se considerará el modelo de aceleración constante.

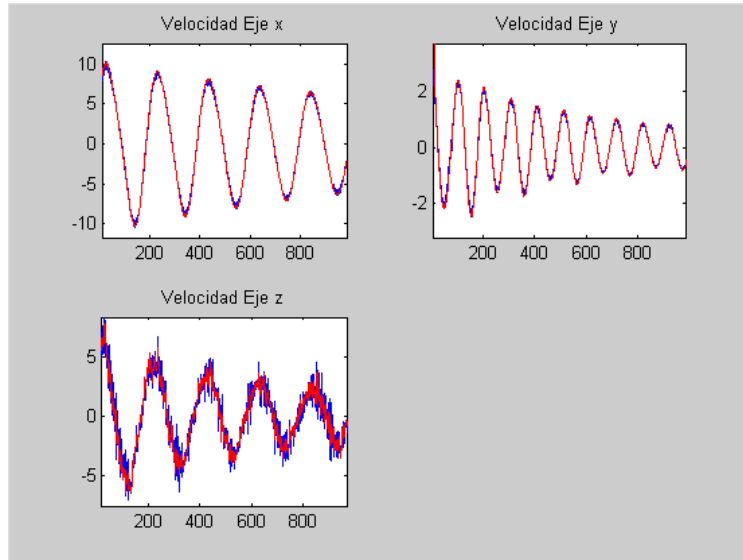


Figura 8.10 Velocidad estimada con vector de estado en posición, velocidad y aceleración.

A la vista de estos resultados, sólo tiene sentido comprobar en qué orden de magnitud se mueve el error de la velocidad bajo el supuesto de aceleración constante, como se representa en la Figura 8.11. Como era de esperar el error en el eje Z es mucho mayor que en los otros ejes porque pequeñas variaciones del diámetro producen grandes cambios en la coordenada Z, por lo que el ruido que se aprecia de la extracción directa de las características de la imagen es eliminado por el filtro ya en la medida filtrada.

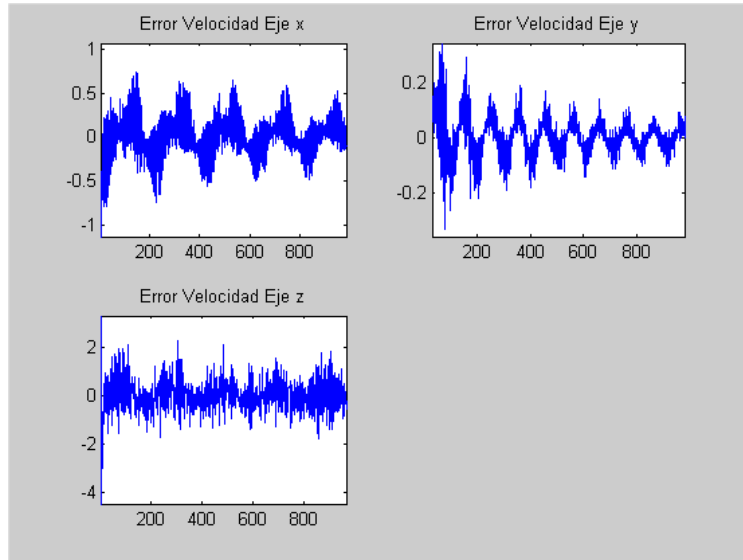


Figura 8.11 Error en la velocidad estimada con modelo de aceleración constante.

8.8.2 PRUEBAS CON VARIOS MODELOS DEL SENSOR

Se han planteado dos opciones para el modelo del sensor: medida de posición y medida de posición y velocidad. En la Figura 8.12 se representa el error en el primer caso, y en la Figura 8.13 se representa el error en el segundo caso, incorporando la información sobre el tiempo de adquisición del ciclo. Se observa una reducción en el error de la velocidad cuando el sensor suministra información de la posición y la velocidad.

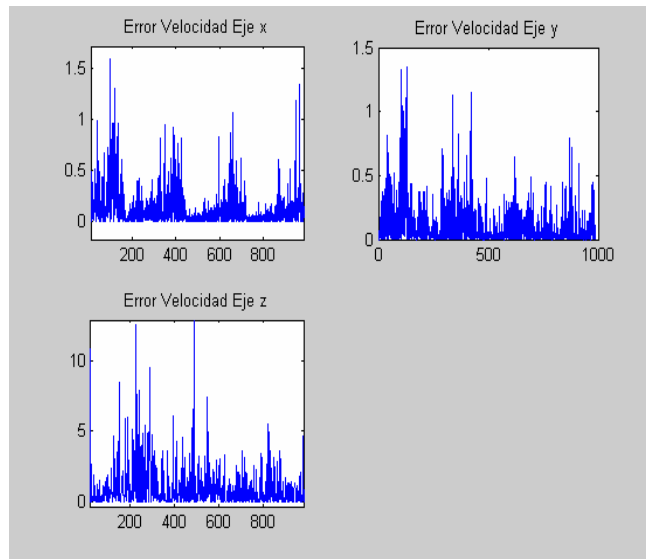


Figura 8.12 Error en la velocidad con sensor de posición.

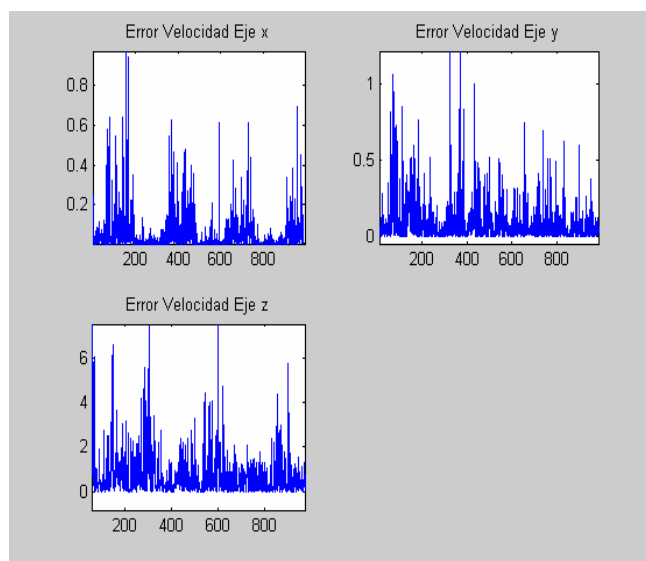


Figura 8.13 Error en la velocidad con sensor de posición y velocidad.

8.8.3 AJUSTE DE LAS MATRICES Q Y R

Las matrices Q y R representan respectivamente las covarianzas de los ruidos que modelan el comportamiento del sistema y del sensor. El comportamiento del filtro frente a distintos estímulos será distinto en función de los valores que se encuentren almacenados en estas matrices. Estos valores serán los que le indiquen al filtro si tienen que tener en más consideración la estimación realizada por el modelo o, por el contrario, hacer más caso a la estimación que se haya obtenido del análisis de la imagen.

Se van a considerar dos casos en los que se muestre el efecto de la modificación de estos valores. Estas matrices de error se han considerado diagonales ya que los elementos fuera de la diagonal principal hacen referencia a las interrelaciones de distintas medidas y sus efectos correlacionados son muy pequeños y por tanto se han despreciado.

En el primero de ellos se considerará que la estimación que realiza el modelo sobre la aceleración es perfecta, es decir, el error que se comete es nulo, por lo que los valores que se introducirán en los elementos de la matriz Q correspondientes a la aceleración son cero. Los elementos que hacen referencia al error en posición y velocidad se han determinado experimentalmente para conseguir la respuesta del filtro más adecuada al problema que se ha planteado (ecuación (8.24))

$$Q = \begin{pmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8.24)$$

En la Figura 8.14 se representa una ampliación de la evolución de la velocidad, para una mejor visualización del efecto que se está analizando.

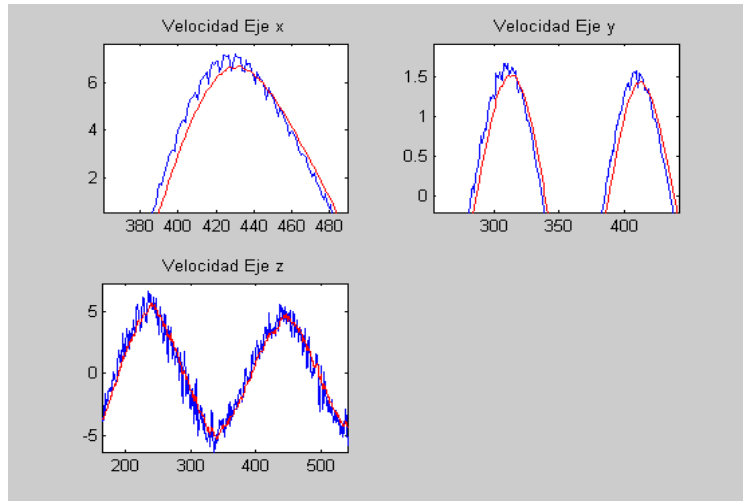


Figura 8.14 Velocidades con modelo sin error en la aceleración.

En el caso de que se quiera asumir el error que se comete en el modelado del sistema, y por tanto en la estimación de la aceleración, se deben introducir valores distintos de cero. Los que se reflejan en la ecuación (8.25) son los obtenidos experimentalmente para un mejor resultado en cuanto al comportamiento del filtrado de las medidas.

$$Q = \begin{pmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix} \quad (8.25)$$

En la Figura 8.15 se representa una ampliación de la evolución de la velocidad, para este segundo caso, donde se aprecia un mejor comportamiento que en el primero. La justificación de este comportamiento reside en que el filtro de Kalman considera que la aceleración dada por el modelo del sistema es exacta, por lo que no la corrige y por tanto no se actualiza. Como, evidentemente, el modelo no reproduce un movimiento pendular, sino un movimiento de aceleración constante, el efecto que tiene la aceleración sobre la velocidad es lo suficientemente acusado como para que se cometa un error bastante considerable.

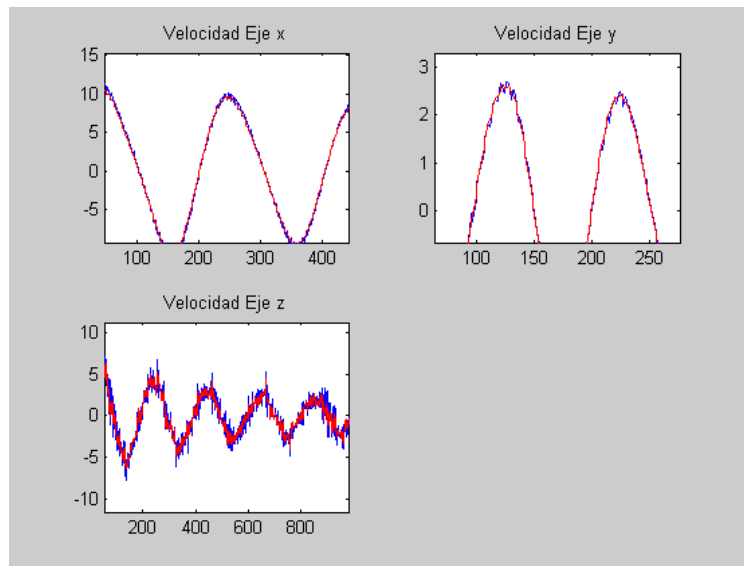


Figura 8.15 Velocidades con modelo con error en la aceleración.

El error de la estimación de la velocidad se representa en las Figuras 8.16 y 8.17. Resulta claro que el error cuadrático es mucho mayor en el caso en el que se hacen consideraciones de que el modelo es perfecto en la estimación de la velocidad.

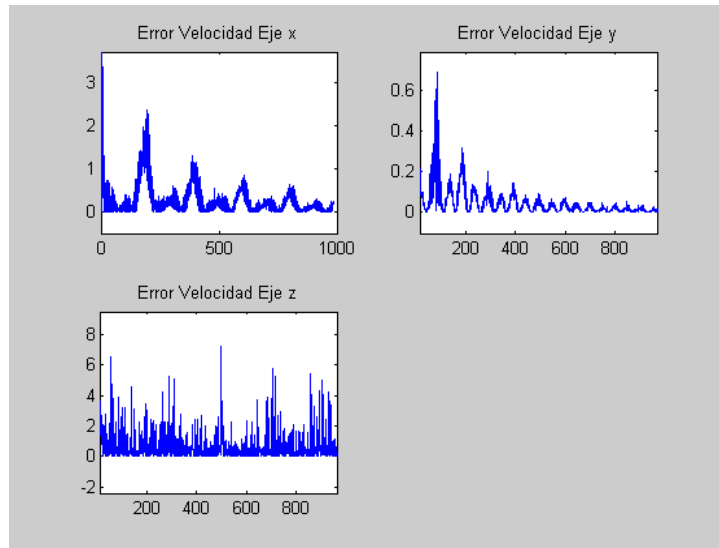


Figura 8.16 Error en la velocidad con un modelo sin error en la aceleración.

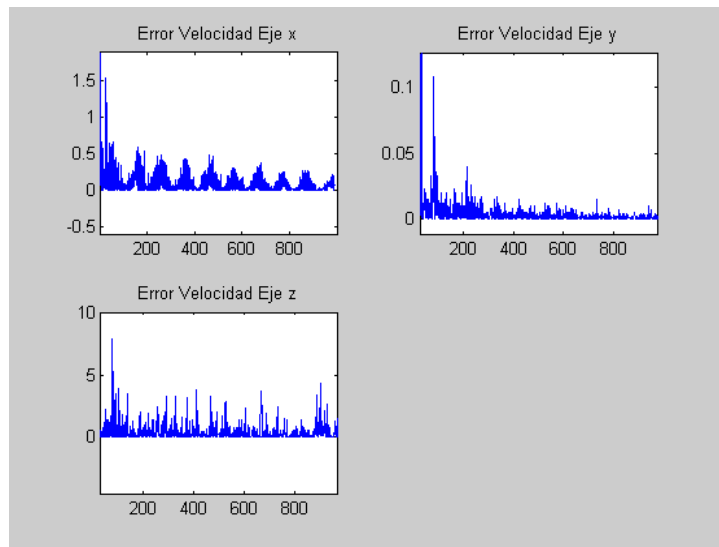


Figura 8.17 Error en la velocidad con un modelo con error en la aceleración.

Para la matriz R el efecto que se consigue es parecido, sólo que aplicado al modelo del sensor. De esta manera, si se considera que el error es nulo en alguna de las medidas que se extraen de la imagen, para el filtro tendrán mucho peso estas medidas sobre las estimaciones que se hagan con el modelo. Conviene destacar que el modelo del sensor es muy sensible frente retardos en la adquisición y sobre todo en la consideración de que el ruido en la coordenada Z es bastante elevado.

8.8.4 PREDICCIÓN DE LA POSICIÓN

La finalidad de obtener unas medidas carentes de ruido tiene por objetivo el realizar predicciones del futuro estado de la pelota al cabo de un número determinado de ciclos o muestras. Dadas una posición y una velocidad para un instante determinado, se desea saber la posición que tendrá la pelota al cabo de un número de ciclos posteriores. Para realizar esta predicción simplemente se extrapolará el valor de la posición con el dato de la velocidad para ese instante de tiempo. Evidentemente, como el resultado que se obtendrá se obtiene de la suposición de considerar un movimiento uniforme se comete un error que se va acrecentando en la medida en que aumentan el número de ciclos porque la velocidad va cambiando con el tiempo.

Por tanto, para poder dar validez a las predicciones, se debe determinar el posible margen de error que se comete. Este error vendrá dado por el funcionamiento del robot. Así se desea que el robot golpee a una pelota con una paleta de un radio de 50 mm, por que será este el margen de error con el que se juega para conseguir el objetivo final. A continuación se muestran los resultados que se han obtenido para la realización de las diferentes pruebas en cada uno de los ejes coordenados.

Para los ejes de coordenadas X e Y, los resultados son similares debido a que las predicciones que se realizan usan datos que se calculan, filtran y estiman de la misma manera, por lo que la fuente de error es similar en ambos casos, y por tanto con incluir el error en uno de estos ejes será suficiente. En la Figura 8.18 se representa este error de predicción en el eje X.

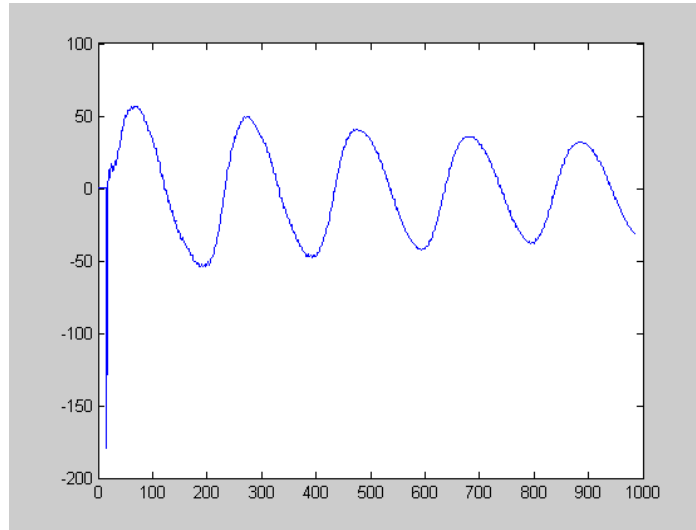


Figura 8.18 Error de predicción en el eje X con 15 muestras.

En este caso hay que fijarse que los primeros 2 ó 3 valores están fuera de rango debido a que la variable de velocidad no se pudo inicializar en el cálculo de valores iniciales en el filtro de Kalman. El error que se comete en estas muestras es consecuencia de que los valores que devuelve el filtro son los valores de transición hasta que se estabiliza en torno a su valor de funcionamiento. Se puede comprobar que en torno a las 15 muestras de diferencia en la predicción se consiguen unos valores en el error de 50 mm por lo que se estaría en el límite del error. Como las adquisiciones se están considerando de 8.33 ms, el margen sería de 125 ms.

El caso del eje Z (ver Figura 8.19) debe considerarse a parte porque el comportamiento de los datos según este eje es distinto al que se tiene en cualquiera de los otros dos. Del mismo modo, el error que es permisible cometer en este eje no viene dado por el tamaño de la paleta, si no por el espacio en el que se considera que la pelota debe ser golpeada. Por el recorrido que debe realizar el robot en el golpeo y la coordenada en la que se considera que se debe iniciar el movimiento del golpeo un error de 50 mm también parece razonable.

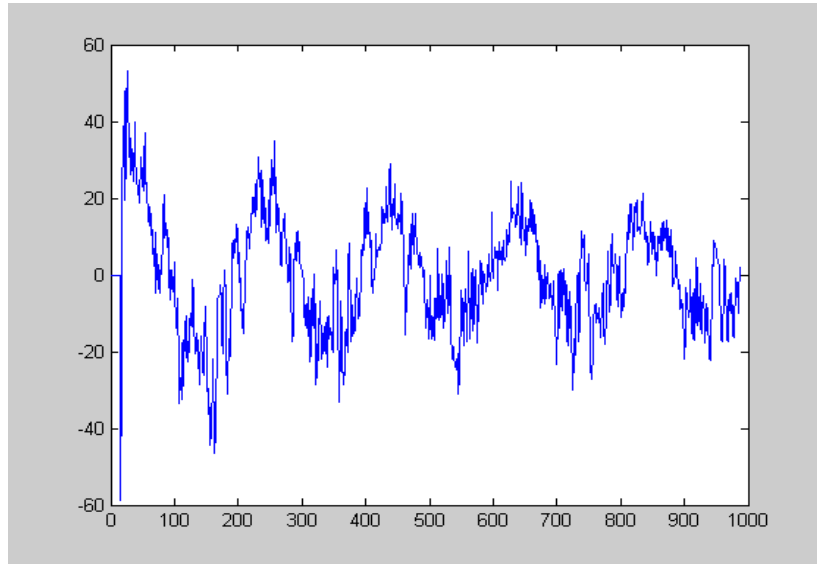


Figura 8.19 Error en la predicción en el eje Z con 15 muestras.

Aunque la medida es mucho más oscilante, el resultado que se obtiene es similar al del eje X por lo que se puede garantizar un correcto funcionamiento del sistema con predicciones de 125 ms. Evidentemente por razones de seguridad y de buen funcionamiento del robot las predicciones se realizarán a tiempos inferiores para guardar los márgenes de seguridad.

8.9 CONCLUSIONES

El procesamiento de la imagen, la detección de las características visuales y estimación de la posición y velocidad tridimensional de la pelota en movimiento se han presentado en este capítulo. El sistema de visión está ubicado en el extremo del robot y formado por una sola cámara. La adquisición se efectúa cada 8,33 ms y emplea el sistema de doble buffering. Las características usadas son el centro de gravedad y el diámetro de la pelota. Dado el reducido

Capítulo 8: Estimación de la Pos y Vel 3D de objetos a través de una secuencia de imágenes

tiempo de adquisición, se emplea el filtro de Kalman para filtrar las señales de posición y velocidad y conseguir una estimación mucho más fiable. Estos parámetros permiten predecir la posición y velocidad de la pelota, de forma que el robot pueda anticipar su movimiento.

CAPÍTULO 9

CONTROL VISUAL DEL SISTEMA ROBOTENIS

9.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describe el novedoso sistema de control visual basado en posición, desarrollado para lograr que el sistema RoboTenis siga a un objeto (en concreto una pelota de ping-pong) que se mueve a alta velocidad en el entorno de trabajo. Los resultados obtenidos son altamente satisfactorios, y constituyen una importante aportación de la tesis, pues en la literatura especializada no existe ningún robot paralelo con control visual para objetos móviles.

De entre las distintas alternativas descritas en el estado del arte del control visual del capítulo dos, se ha elegido la siguiente estructura:

- Empleo de una cámara en el extremo del robot. La ubicación de la cámara combina la adquisición de un amplio campo visual, cuando

el robot está alejado del objeto, con una adquisición más precisa cuando el robot está cerca del objeto. Este aspecto es muy importante para futuras aplicaciones del sistema, como puede ser golpear o coger una pelota. Igualmente hay que destacar las características de la cámara: Pequeño tamaño y peso y, adaptación a la adquisición de escenas con objetos con elevada velocidad.

- Sistema mono cámara. La simplicidad de la escena, pelota oscura sobre fondo claro, permite la reconstrucción tridimensional de la posición de la pelota a base de estimar el centroide y el radio de la pelota en la imagen, como se ha descrito en el capítulo ocho.
- Control basado en posición. Como se aprecia en el esquema básico de la Figura 9.1, la función de error se obtiene comparando la posición deseada del objeto con la posición obtenida por el sistema de visión. El controlador proporciona la velocidad deseada para el efector final. A través de un planificador en el espacio cartesiano y empleando la cinemática inversa se convierte en la variación articular del robot.

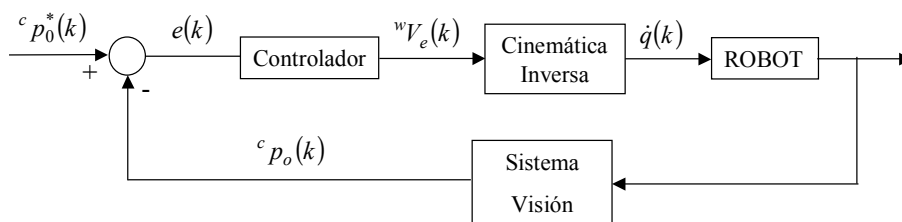


Figura 9.1 Control visual basado en posición

- Arquitectura de control visual indirecto con un esquema de “mirar y mover” dinámico. El sistema de control presenta dos bucles:
 - El interno o Control Articular, que adquiere la información a través de los encoders, y que se realiza a una frecuencia de 2.000 veces por segundo (cada 0,5 milisegundo). Ha sido descrito con más detalle en el capítulo seis.
 - El externo o Control visual, que adquiere la información a través del sistema de visión, y que se realiza con una

frecuencia de 120 veces por segundo (8,33 milisegundos). Se describe en el presente capítulo.

En las figuras del presente capítulo no se detalla el bucle de control interno, que se supone incluido dentro del robot. Igualmente es importante destacar que al ser un robot abierto, la referencia de posición puede cambiar antes de que el robot finalice el movimiento ordenado, lo que permita una eficaz gestión de la información visual según se adquiere y se procesa.

En el presente capítulo se detallan inicialmente las consideraciones previas del sistema desarrollado, así como la nomenclatura empleada. Posteriormente se expone un algoritmo básico de control visual, que sirve de introducción del algoritmo propuesto. Por último se detallan los resultados obtenidos.

9.2 CONSIDERACIONES PREVIAS

El control visual desarrollado está condicionado por las algunas de las características propias de la aplicación y del sistema RoboTennis. Entre ellas cabe destacar las siguientes:

- Elevados requisitos temporales. Dada la elevada velocidad de la pelota, hasta 2,5 metros/segundos, es necesario que el robot sea capaz de moverse rápidamente, el sistema de visión debe ser capaz de adquirir y procesar la información en un pequeño intervalo de tiempo, y el control debe permitir un eficiente seguimiento de la pelota.
- Alta incertidumbre en los datos suministrados por el sistema de visión. El bajo período de muestreo (8,33 milisegundos) magnifica los errores en la estimación de la velocidad. Así por ejemplo con la pelota a 600 mm de distancia el diámetro de la pelota mide unos 20 píxeles. Si se comete un error de 0,25 píxeles en la estimación del diámetro, el error propagado en la estimación de la distancia será de 8 milímetros aproximadamente. El bajo período de muestreo ocasiona un posible error de 1 metro/segundo, muy elevado para la necesaria continuidad del movimiento del robot. Como se ha descrito en el capítulo ocho, el filtro de Kalman disminuye este problema.
- Continuidad de la velocidad del robot. El planificador diseñado para el sistema RoboTennis, descrito en el capítulo siete, necesita una

cierta continuidad en la velocidad para evitar aceleraciones elevadas que penalizaría notoriamente el movimiento. Es necesario destacar que el sistema RoboTennis es un sistema abierto, por lo que está previsto el cambio de referencia mientras se mueve, para aumentar sus prestaciones. Así un error de 8 milímetros con un período de muestreo de 8,33 milisegundos ocasionaría una aceleración de 12g, superior a las prestaciones del sistema.

- El sistema RoboTennis posee, como cualquier sistema real, diversas limitaciones que deben de ser tenidas en cuenta en la estrategia de control para poder asegurar el éxito de la misma. Las dos principales son los retrasos y las saturaciones. Existe un retraso entre los datos suministrados por la cámara y los obtenidos de los sensores articulares. El retraso se estima en 2 periodos de muestreo (16.66 milisegundos), y es debido a la integración de la información luminosa, su transmisión y procesamiento. Igualmente es necesario resaltar que la velocidad del robot estará limitada por construcción (2.5m/sg) , y deberá ser tenida en cuenta por la estrategia de control.
- En la configuración actual y por construcción el sistema RoboTennis no permite el giro del efector con respecto al sistema de coordenadas del mundo (solidario con la base del robot), por lo que la matriz de rotación que las relaciona será constante (ver Figura 9. 2).

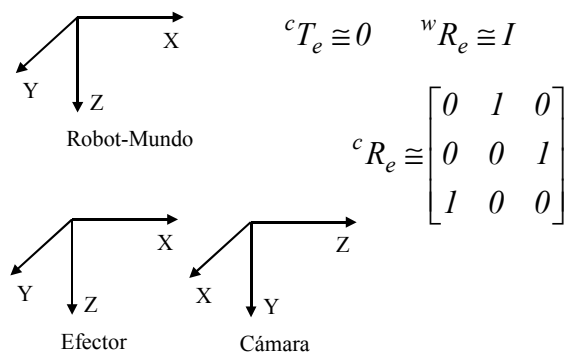


Figura 9. 2 Sistemas de coordenadas involucradas.

- La cámara y el efector del robot están unidos de forma solidaria, por lo que la relación entre ambas será constante y conocida en el proceso de calibración. La distancia entre ambas se supone que es nula (ver Figura 9. 2).
- De las anteriores consideraciones se deduce que la matriz de rotación que relaciona el sistema de coordenadas de la cámara con el del mundo es constante y conocida en el proceso de calibración (ver Figura 9. 2).
- Igualmente se supone que el robot y la pelota solo tienen movimientos de translación, no de rotación.

9.2.1 NOMENCLATURA EMPLEADA

En el presente apartado se detalla la nomenclatura empleada en el algoritmo de control visual. Las variables están definidas en el dominio temporal, como señales continuas, aunque al realizarse un control computador, se tratarán como discretas. Por comodidad el índice de la muestra se representa entre paréntesis, con la siguiente relación:

$$k \leftrightarrow kT \quad (9. 1)$$

Donde T es el período de muestreo (8,33 milisegundos).

Se consideran los siguientes sistemas de referencia (ver Figura 9. 2):

- Sistema de coordenadas ligado al mundo, con índice w . Está posicionado en la base del robot y es el sistema de coordenadas utilizado por las cinemática directa e inversa.
- Sistema de coordenadas ligado a la cámara, con índice c . Está posicionado en el centro óptico de la misma, con eje Z coincidente con el eje óptico.
- Sistemas de coordenadas ligado al efector, con índice e . Está posicionado en el efector.

Las variables involucradas son las siguientes:

- ${}^c p_o^*(k)$: Posición deseada del objeto (pelota) en el sistema de referencia de la cámara en el instante k

- ${}^c p_o(k)$: Posición del objeto (pelota) en el sistema de referencia de la cámara en el instante k
- ${}^w p_o(k)$: Posición del objeto (pelota) en el sistema de referencia del mundo en el instante k
- ${}^w \hat{p}_o(k)$: Posición estimada del objeto (pelota) en el sistema de referencia del mundo en el instante k
- ${}^w p_c(k)$: Posición de la cámara en el sistema de referencia del mundo en el instante k
- ${}^w p_e(k)$: Posición del efector del robot en el sistema de referencia del mundo en el instante k
- ${}^w v_o(k)$: Velocidad del objeto (pelota) en el sistema de referencia del mundo en el instante k
- ${}^w \hat{v}_o(k)$: Velocidad estimada del objeto (pelota) en el sistema de referencia del mundo en el instante k
- ${}^w v_c(k)$: Velocidad de la cámara en el sistema de referencia del mundo en el instante k
- ${}^w v_e(k)$: Velocidad del efector del robot en el sistema de referencia del mundo en el instante k
- $e(k)$: Error en la posición deseada en el instante k
- $q(k)$: Valores articulares en el instante k
- $\dot{q}(k)$: Velocidades articulares en el instante k

Las anteriores variables son vectores tridimensionales en la presente aplicación.

Igualmente se utilizan las siguientes expresiones:

- ${}^a R_b$: Matriz de rotación entre los sistemas de referencia a, b
- ${}^a T_b$: Vector de translación entre los sistemas de referencia a, b
- T : Periodo de muestreo (8,33 milisegundos).

La relación entre la posición de un punto en distintos sistemas de referencia (por ejemplo a, b) está definida por la ecuación (9. 2)

$${}^a p_p = {}^a R_b {}^b p_p + {}^a T_b \quad (9. 2)$$

9.3 ESTRUCTURA BÁSICA

El objetivo del control visual propuesto es mantener el objeto móvil (la pelota) a una determinada distancia del efector del robot. Un primer esquema básica está reflejado en la Figura 9.3. Los elementos que intervienen en el esquema son los siguientes:

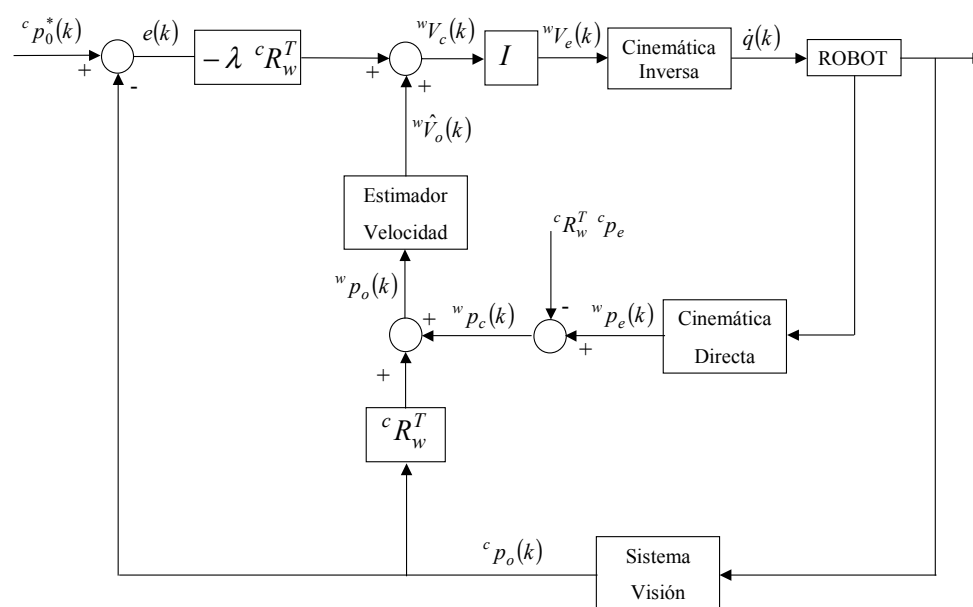


Figura 9.3 Estructura básica de control visual

- La función objetivo ${}^c p_o^*(k)$, es la distancia deseada entre el objeto y la cámara.
- El sistema de visión calcula la posición del objeto en el sistema de referencia de la cámara en el instante k : ${}^c p_o(k)$
- La posición relativa del objeto con respecto a la cámara se puede obtener en función de las posiciones del objeto y la cámara con respecto al sistema de coordenadas del mundo. Así a partir de la expresión (9.3):

$${}^c p_o(k) = {}^c R_w(k) {}^w p_o(k) + {}^c T_w(k) \quad (9.3)$$

Donde ${}^c R_w(k)$ es constante.

Sustituyendo el objeto por la cámara, y teniendo en cuenta que la posición de la cámara con respecto al sistema de la cámara es el vector nulo se obtiene la expresión:

$${}^c p_c(k) = {}^c R_w {}^w p_c(k) + {}^c T_w(k) = 0 \Rightarrow {}^c T_w(k) = -{}^c R_w {}^w p_c(k) \quad (9.4)$$

Si se reemplaza la ecuación (9.4) en la ecuación (9.3) se obtiene:

$${}^c p_o(k) = {}^c R_w {}^w p_o(k) - {}^c R_w {}^w p_c(k) = {}^c R_w ({}^w p_o(k) - {}^w p_c(k)) \quad (9.5)$$

Lo que permite obtener la posición de la pelota en el sistema de coordenadas del mundo:

$${}^w p_o(k) = {}^w p_c(k) + {}^c R_w^T {}^c p_o(k) = {}^w p_c(k) + {}^c R_w^T {}^c p_o(k) \quad (9.6)$$

- Las posiciones de la cámara y el efector del robot en el sistema de coordenadas del mundo se relacionan a partir de la ecuación (9.5) sustituyendo el objeto (o) por el efector final (e) y teniendo en cuenta que al estar la cámara rígidamente unida al efector, su posición relativa será constante (y prácticamente nula):

$${}^c p_e = {}^c R_w ({}^w p_e(k) - {}^w p_c(k)) \Rightarrow {}^w p_c(k) = {}^w p_e(k) - {}^c R_w^T {}^c p_e \quad (9.7)$$

- Mediante la Cinemática Directa se obtiene la posición del efector del robot en el sistema de referencia del mundo en el instante k : ${}^w p_e(k)$
- El filtro de Kalman obtiene una buena estimación de la posición y la velocidad a partir de la posición del objeto en el sistema de referencia del mundo

$${}^w p_o(k) \Rightarrow {}^w \dot{p}_o(k), {}^w \dot{v}_o(k) \quad (9.8)$$

- La función de error se define como:

$$e(k) = {}^c p_o^*(k) - {}^c p_o(k) \quad (9.9)$$

A destacar que la referencia ${}^c p_o^*(k)$ permanece constante para todo k . Sustituyendo en la ecuación (9.9) el valor obtenido en la ecuación (9.5).

$$e(k) = {}^c p_o^* - {}^c p_o(k) = {}^c R_w \left({}^w p_o(k) - {}^w p_c(k) \right) \quad (9.10)$$

- La ley de control elegida debe de asegurar que la función de error decrece exponencialmente, siempre que el sistema realimentado sea estable. Para ello se obliga a que el error cumpla la siguiente ecuación (con $\lambda > 0$)

$$\dot{e}(k) + \lambda e(k) = 0 \quad (9.11)$$

- Normalmente $\lambda > 0$ es un escalar. Si se desea que cada componente del error decrezca a distinto ritmo, se puede elegir una matriz diagonal con todos los elementos de la diagonal mayores que cero.
- La derivada del error se obtiene a partir de la expresión (9.10):

$$\dot{e}(k) = -{}^c R_w \left({}^w \dot{p}_o(k) - {}^w \dot{p}_c(k) \right) = -{}^c R_w \left({}^w v_o(k) - {}^w v_c(k) \right) \quad (9.12)$$

- Para obtener la ley de control se sustituye en la ecuación (9.11) los valores obtenidos en las expresiones (9.10) y (9.12).

$$\dot{e}(k) + \lambda e(k) = -{}^c R_w \left({}^w v_o(k) - {}^w v_c(k) \right) + \lambda \left[{}^c p_o^* - {}^c p_o(k) \right] = 0 \quad (9.13)$$

Lo que permite obtener la velocidad deseada de la cámara en el sistema de coordenadas del mundo:

$${}^w v_c(k) = {}^w v_o(k) - \lambda {}^c R_w^T \left[{}^c p_o^* - {}^c p_o(k) \right] \quad (9.14)$$

El último término de la expresión (9.14) muestra el valor del regulador proporcional, mientras que el primer sumando predice el movimiento del objeto.

- La expresión (9.14) implica el conocimiento de la velocidad de la pelota en el sistema de coordenadas del mundo, variable no medida directamente y que deberá ser estimada y filtrada por la alta influencia del ruido:

$${}^w v_c(k) = {}^w \hat{v}_o(k) - \lambda {}^c R_w^T \left[{}^c p_o^* - {}^c p_o(k) \right] \quad (9.15)$$

- La ley de control para el robot será la velocidad deseada del efector del robot en el sistema de coordenadas del mundo, que se obtiene derivando la ecuación (9.7):

$${}^w v_e(k) = {}^w v_c(k) \quad (9.16)$$

Con lo que la expresión de la velocidad del efector será:

$${}^w v_e(k) = {}^w \hat{v}_o(k) - \lambda {}^c R_w^T \left[{}^c p_o^* - {}^c p_o(k) \right] \quad (9.17)$$

A través de un planificador en el espacio cartesiano y empleando la cinemática inversa se obtiene la variación articular del robot.

- El empleo de la expresión (9.15) puede suponer una variación en la condición de la expresión (9.11), que en función de la bondad de la estimación de la velocidad influirá en la estabilidad del sistema realimentado.

9.3.1 AJUSTE DEL PARÁMETRO λ

Un aspecto fundamental en el funcionamiento del sistema es el ajuste del parámetro λ . En la presente Tesis se propone como alternativa determinar el parámetro mediante un algoritmo predictivo basado en conseguir que la posición futura de la pelota y de la cámara cumplan la función objetivo propuesta. Así partiendo de la ecuación (9. 5) que relaciona la posición de la pelota en el sistema de coordenada de la cámara con la posición de la pelota y la cámara en el sistema de coordenadas del mundo, se desea que sea igual a la referencia deseada, que es constate para cualquier k .

$${}^c p_o^*(k) \approx {}^c p_o(k) = {}^c R_w \left({}^w p_o(k) - {}^w p_c(k) \right) \quad (9. 18)$$

La posición futura de la pelota en el sistema de referencia del mundo en el instante $k+n$ será:

$${}^w p_o(k+n) = {}^w p_o(k) + {}^w \hat{v}_o(k) T n \quad (9. 19)$$

Mientras que la posición futura de la cámara en el sistema de referencia del mundo en el instante $k+n$ será:

$${}^w p_c(k+n) = {}^w p_c(k) + {}^w v_c(k) T n \quad (9. 20)$$

Obligando a que se cumpla la función objetivo en el instante $k+n$, y sustituyendo las expresiones (9. 19), (9. 20):

$$\begin{aligned} {}^c p_o^*(k+n) &= {}^c p_o^* \approx {}^c p_o(k+n) = {}^c R_w \left({}^w p_o(k+n) - {}^w p_c(k+n) \right) = \\ &= {}^c R_w \left({}^w p_o(k) + {}^w \hat{v}_o(k) T n - {}^w p_c(k) - {}^w v_c(k) T n \right) \end{aligned} \quad (9. 21)$$

Sustituyendo en la ecuación (9. 21) la ecuación (9. 6):

$$\begin{aligned}
 {}^c p_o^* &\approx {}^c R_w \left({}^c R_w^T {}^c p_o(k) + {}^w p_c(k) + {}^w \hat{v}_o(k) T n - {}^w p_c(k) - {}^w v_c(k) T n \right) = \\
 &= {}^c R_w \left({}^c R_w^T {}^c p_o(k) + {}^w \hat{v}_o(k) T n - {}^w v_c(k) T n \right) = \\
 &= {}^c p_o(k) + {}^c R_w {}^w \hat{v}_o(k) T n - {}^c R_w {}^w v_c(k) T n
 \end{aligned} \tag{9.22}$$

Despejando la velocidad de la cámara de la anterior expresión, se obtiene:

$${}^w v_c(k) = -\frac{1}{T n} {}^c R_w^T \left[{}^c p_o^* - {}^c p_o(k) \right] + {}^w \hat{v}_o(k) \tag{9.23}$$

Que coincide con la ecuación (9.15), sustituyendo

$$\lambda = \frac{1}{T n} \tag{9.24}$$

Esta fórmula proporciona un criterio para ajustar el parámetro λ , en función del número de muestras necesario para cumplir idealmente la función objetivo. A destacar que para su ejecución será necesario calcular la velocidad del efector del robot en el sistema de coordenadas del mundo (ecuación (9.17)).

9.3.2 ESTABILIDAD DEL SISTEMA

No forma parte de los objetivos de la presente Tesis el estudio detallado de la estabilidad del sistema. Las aproximaciones realizadas en el modelado del sistema, así como la utilización de estimaciones en los datos suministrados por el sistema de visión, unido a las saturaciones y no linealidades aumenta significativamente la complejidad del análisis. Tan sólo se ha tenido en cuenta que supuesto el sistema estable la ley de control diseñada obligue a que el error disminuya exponencialmente (ecuación (9.11)). Este aspecto será cierto si la estimación de la posición y la velocidad del objeto es la correcta.

9.4 ALGORITMO PROPUESTO

El algoritmo básico no recoge adecuadamente dos limitaciones reales del sistema RoboTennis: Inclusión de los retardos de cálculo y las saturaciones

de la velocidad del efector final. En la Figura 9. 4 se muestra la estructura propuesta. El término z^{-r} representa un retraso de dos periodos para la señal considerada. Las modificaciones realizadas son las siguientes:

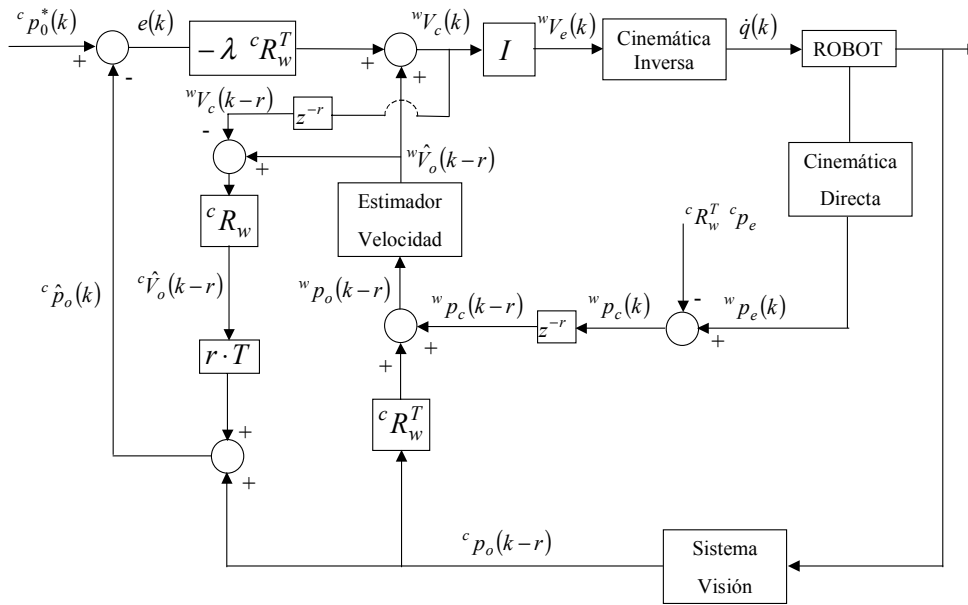


Figura 9. 4 Algoritmo Propuesto

- Se estima que los datos del sistema de visión (posición del objeto respecto al sistema de coordenadas de la cámara) sufren un retraso de r ($=2$) periodos de muestreo con respecto a los suministrados por el robot. Para mantener la coherencia en la utilización de los datos y no introducir errores adicionales en el seguimiento, es necesario:
 - Retrasar r periodos la posición de la cámara en el sistema de coordenadas del mundo suministrada por el robot.

$${}^w p_c(k) \Rightarrow {}^w p_c(k-r) \tag{9. 25}$$

- Calcular la posición del objeto respecto al sistema de coordenadas del mundo, retrasada r periodos.

$${}^w p_o(k-r) = {}^w p_c(k-r) + {}^c R_w^T {}^c p_o(k-r) \quad (9.26)$$

- Estimar mediante el filtro de Kalman, la velocidad del objeto respecto al sistema de coordenadas del mundo, retrasada r periodos.

$${}^w p_o(k-r) \Rightarrow {}^w \hat{v}_o(k-r) \quad (9.27)$$

- Retrasar r periodos la velocidad de la cámara en el sistema de coordenadas del mundo.

$${}^w v_c(k) \Rightarrow {}^w v_c(k-r) \quad (9.28)$$

- Calcular la velocidad del objeto respecto al sistema de coordenadas de la cámara, retrasada r periodos.

$${}^c \hat{v}_o(k-r) = {}^c R_w \left[{}^w \hat{v}_o(k-r) - {}^w v_c(k-r) \right] \quad (9.29)$$

- Predecir la posición del objeto respecto al sistema de coordenadas de la cámara, sin retraso.

$${}^c \hat{p}_o(k) = {}^c p_o(k-r) + {}^c \hat{v}_o(k-r) rT \quad (9.30)$$

- Predecir la velocidad del objeto respecto al sistema de coordenadas del mundo, suponiendo que es la misma que la estimada r muestras anteriores.

$${}^w \hat{v}_o(k) = {}^w \hat{v}_o(k-r) \quad (9.31)$$

- La ley de control genera una velocidad del efector en el sistema de coordenadas del mundo que puede no estar dentro de los límites admisibles. La opción básica no consideraba esta limitación, por lo que se saturarán todas las componentes de la velocidad a la vez, ocasionando velocidades muy dispares para cada periodo. Este aspecto dificulta la acción del planificador, con efectos muy negativos sobre el seguimiento del objeto, como ha quedado demostrado en las pruebas efectuadas. La opción propuesta se basa en disminuir la λ hasta que la velocidad del efector este en los límites permitidos. Para lograrlo y actuar de forma distinta para cada eje, es necesario introducir una matriz λ diagonal

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 T & 0 & 0 \\ 0 & n_2 T & 0 \\ 0 & 0 & n_2 T \end{bmatrix}^{-1} \quad (9.32)$$

Calculándose los λ_i a partir de predecir la posición en la que el robot puede alcanzar a la pelota, incluyendo el retraso r en la adquisición. Así la posición futura de la pelota en el sistema de referencia del mundo en el instante $k+n$ será:

$${}^w p_o(k+n) = {}^w p_o(k-r) + {}^w \hat{v}_o(k-r) T (n+r) \quad (9.33)$$

La posición futura de la cámara en el sistema de referencia del mundo en el instante $k+n$ será:

$${}^w p_c(k+n) = {}^w p_c(k) + {}^w v_c(k) T n \quad (9.34)$$

Se logrará la función objetivo cuando se cumpla:

$$\begin{aligned} {}^c p_o^*(k+n) &= {}^c p_o^* \approx {}^c p_o(k+n) = {}^c R_w \left({}^w p_o(k+n) - {}^w p_c(k+n) \right) = \\ &= {}^c R_w \left({}^w p_o(k-r) + {}^w \hat{v}_o(k-r) T (n+r) - {}^w p_c(k) - {}^w v_c(k) T n \right) \end{aligned} \quad (9.35)$$

Sustituyendo la ecuación (9. 6) particularizada para el instante $k-r$:

$${}^c p_o^* = {}^c R_w \left({}^w p_c(k-r) + {}^c R_w^T {}^c p_o(k-r) + {}^w \hat{v}_o(k-r) T(n+r) - {}^w p_c(k) - {}^w v_c(k) T n \right) \quad (9. 36)$$

Agrupando los términos:

$${}^c R_w^T \left[{}^c p_o^* - {}^c p_o(k-r) \right] = {}^w p_c(k-r) - {}^w p_c(k) + {}^w \hat{v}_o(k-r) T r + \left({}^w \hat{v}_o(k-r) - {}^w v_c(k) \right) T n \quad (9. 37)$$

Para poder calcular la velocidad real a la que se puede mover el robot, se despeja de esta expresión la muestra futura para cada eje (subíndice i), supuesto que el robot se mueve al producto de la máxima velocidad (*MáximaVelocidadRobot*) por un factor que penaliza el cambio brusco de velocidad (*ConstanteInercia*):

$$n_i = \frac{\left\{ {}^c R_w^T \left[{}^c p_o^* - {}^c p_o(k-r) \right] - {}^w p_c(k-r) + {}^w p_c(k) - {}^w \hat{v}_o(k-r) T r \right\}_{\text{eje } i}}{\left\{ {}^w \hat{v}_o(k-r) \mp \text{MáximaVelocidadRobot} \cdot \text{ConstanteInercia} \right\}_{\text{eje } i} T} \quad (9. 38)$$

El signo de la Máxima Velocidad del Robot se elige tal que origine una muestra futura positiva. De los tres valores obtenidos se calcula el máximo n_{max} , que corresponderá al eje con un movimiento más exigente. La velocidad final deseada para cada eje será:

$$\left\{ {}^w v_c(k) \right\}_{\text{eje } i} = \pm \text{MáximaVelocidadRobot} \frac{n_i}{n_{max}} \quad (9. 39)$$

- Con el fin de lograr la menor variación posible en la velocidad entre dos periodos de muestreo se ha optado por filtrar también la posición del objeto en el sistema de coordenadas de la cámara, como se aprecia en la Figura 9. 5. Se pretende elegir como valor filtrado el que estando dentro de unos márgenes, permite que la velocidad varíe lo mínimo posible entre los periodos de muestreo. A tal fin se compara el valor su-

ministrado por el sistema de visión ${}^c p_o(k)$ con el valor estimado ${}^c \hat{p}_o(k)$ por el filtro de Kalman. Se analiza dos casos:

- Si la diferencia entre ambos valores es inferior para todos los ejes a una cantidad establecida experimentalmente, $ConstanteError \cdot [6.0 \ 3.0 \ 3.0]^T$ expresada en milímetros, se considera que la diferencia de valores es debida al ruido y se utiliza el valor estimado.
- Si la diferencia entre ambos valores es mayor para algún eje, se considera que la diferencia se debe a una nueva tendencia en el movimiento del objeto, no recogida correctamente por el filtro, por lo que se utiliza el valor suministrado por el sistema de visión.

El parámetro Constante Error permite depurar el comportamiento del sistema. Cabe destacar igualmente el distinto margen de error admitido para eje, algo lógico por la incertidumbre de cada dato.

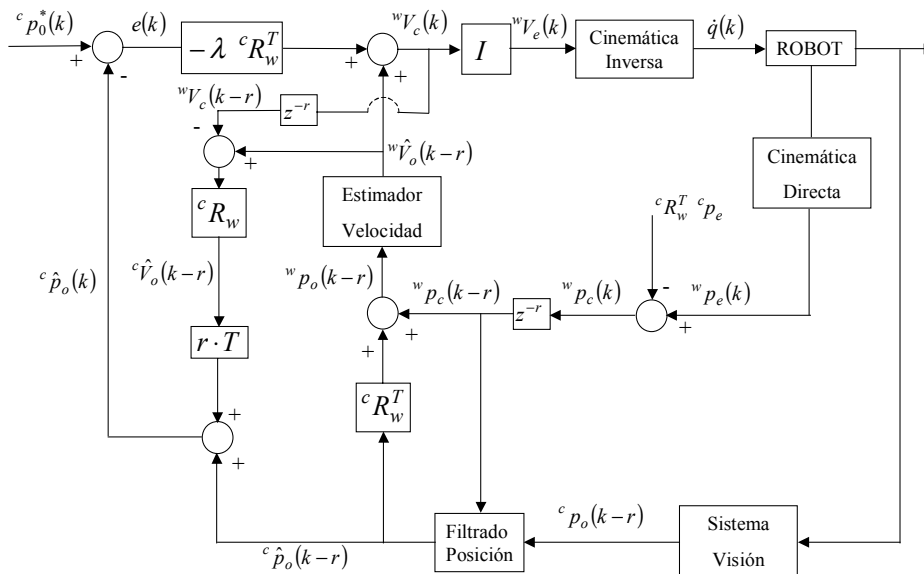


Figura 9.5 Algoritmo propuesto con filtrado de la posición del objeto

9.5 PRUEBAS EFECTUADAS

Las pruebas realizadas han mostrado la eficacia del algoritmo de control visual desarrollado en el sistema RoboTennis. El objetivo de dichas pruebas ha sido mantener el efector del robot (o la cámara) a una distancia constante, en concreto $[600, 0, 0]^T$ mm, de una pelota de ping-pong en movimiento. La pelota está sujeta mediante un hilo de la estructura superior y se mueve mediante un arrastre manual (ver Figura 8.1). Las pruebas se han realizado con velocidades de hasta 1000 mm/s. En la Figura 9.6 se representa la evolución tridimensional (sistema de coordenadas del mundo) de la pelota en una de las pruebas efectuadas, mientras que en la Figura 9.7, en la Figura 9.8, y en la Figura 9.9 se proyecta la evolución de la pelota sobre los planos XY, XZ e YZ respectivamente. La información se corresponde con los datos suministrados por el sistema de visión. Las características del movimiento ocasionan unas apreciables variaciones de la velocidad de la pelota, difíciles de predecir, lo que aumenta la dificultad del seguimiento.

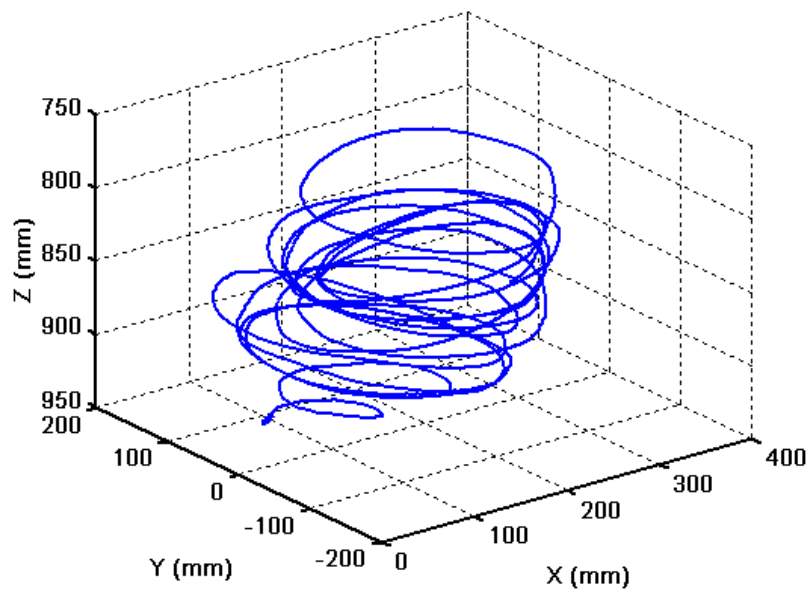


Figura 9.6 Evolución tridimensional de la pelota

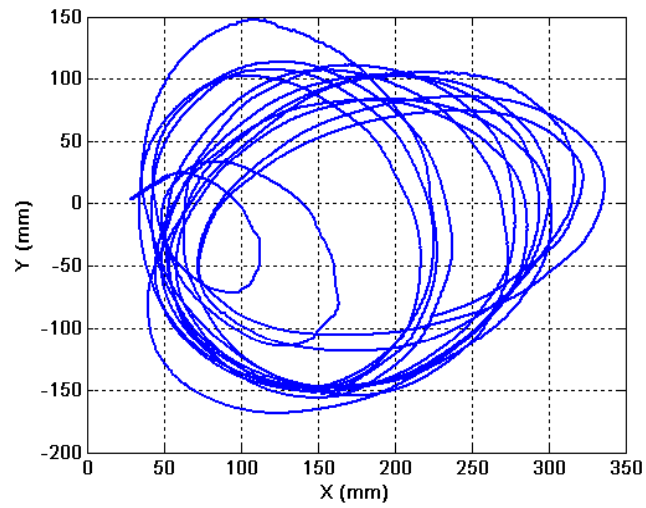


Figura 9.7 Proyección de la evolución de la pelota en el plano XY

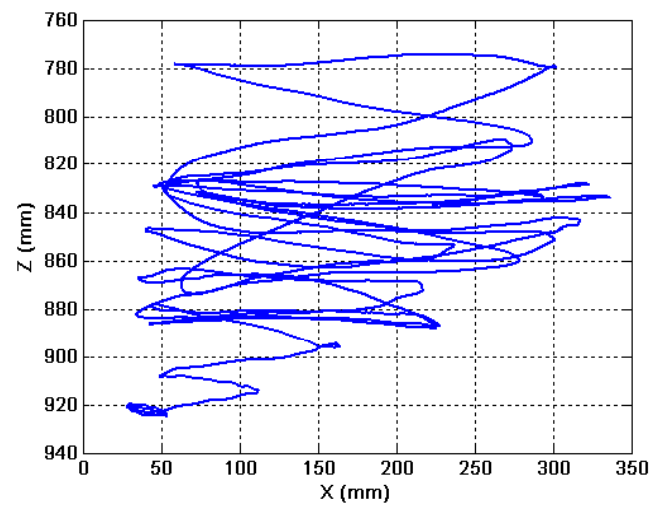


Figura 9.8 Proyección de la evolución de la pelota en el plano XZ

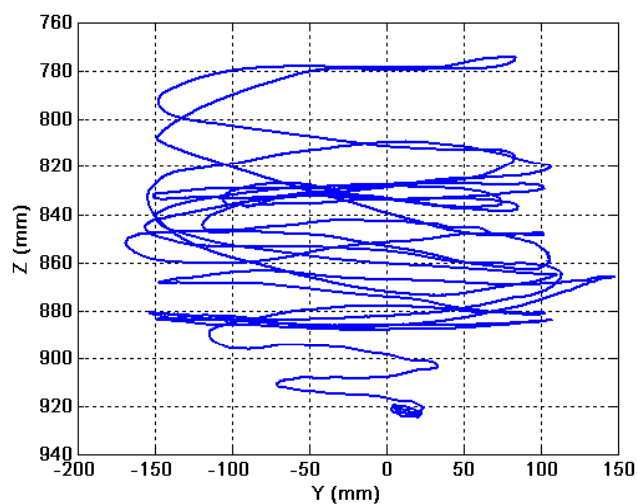


Figura 9.9 Proyección de la evolución de la pelota en el plano YZ

En la Figura 9.10 se representa la proyección en el plano XZ de la evolución del efector final (a la izquierda) y de la pelota (a la derecha).

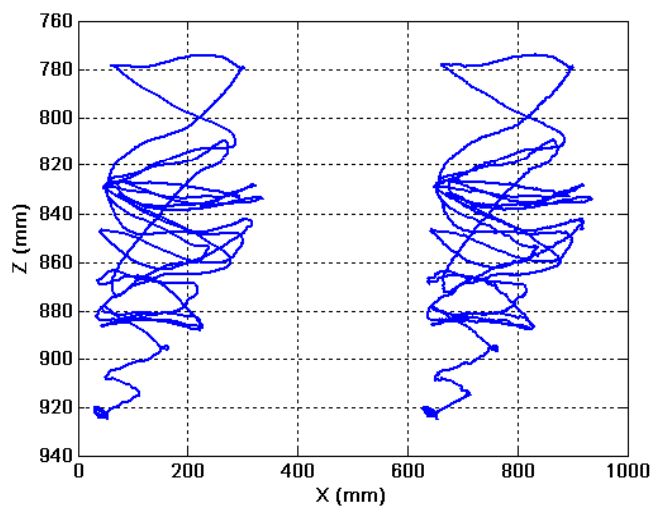


Figura 9.10 Proyección en el plano XZ de las evoluciones del efector del robot y de la pelota

Las pruebas se han caracterizado estudiando tanto el error entre la posición de la pelota respecto al efector (suministrada por el sistema de visión) y la distancia objetivo deseada, así como estudiando la velocidad de la pelota estimada por el filtro de Kalman. En concreto se han analizado:

- Evolución temporal del error: Módulo y valor por eje.
- Valor máximo del módulo del error.
- Evolución temporal de la velocidad estimada de la pelota: Módulo y valor por eje.
- Valor máximo del módulo de la velocidad.
- Relación de Seguimiento, definido como la media del módulo del error dividido por la media del módulo de la velocidad estimada de la pelota. Este índice permite aislar el resultado de la prueba de las características particulares del movimiento de la pelota en la prueba.

$$\text{RelaciónSeguimiento} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^3 \{e(k)\}_i \right)}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^3 \{w \hat{v}_o(k)\}_i \right)} \quad (9.40)$$

- Media del Error por Franjas según la velocidad. Se acumula el error en función del módulo de la velocidad de la pelota. Se han definido 5 franjas:
 - Velocidad menor de 200 mm/s.
 - Velocidad mayor de 200 mm/s y menor de 400 mm/s.
 - Velocidad mayor de 400 mm/s y menor de 600 mm/s.
 - Velocidad mayor de 600 mm/s y menor de 800 mm/s.
 - Velocidad mayor de 800 mm/s.

La componente aleatoria de las pruebas efectuadas, debido al arrastre manual, ha dificultado los estudios comparativos realizados. No ha sido posible repetir exactamente los experimentos, por lo que las conclusiones deben de ser extraídas a partir del estudio estadístico de las características obtenidas.

9.5.1 CONTROL PREDICTIVO FRENTE A CONTROL PROPORCIONAL

La primera prueba presentada compara el comportamiento del algoritmo predictivo propuesto con el comportamiento obtenido utilizando un regulador proporcional tal que la señal generada por el regulador sea:

$$w_{v_c}(k) = -\lambda \ ^c R_w^T \left(\ ^c p_o^*(k) - \ ^c \hat{p}_o(k) \right) \quad \text{con } \lambda = \frac{1}{T} \quad (9.41)$$

En la Tabla 9. 1 se representan la media de los resultados obtenidos con ambos algoritmos cuando se realizan 10 pruebas. Claramente se aprecia un mejor comportamiento con el algoritmo predictivo frente al proporcional, tanto en la Relación de Seguimiento como en el Error por Franjas. En ambos casos se realiza el filtrado de la posición de la pelota, empleando una Constante de Error de 2,0. En el seguimiento predictivo se ha empleado una Constante de Inercia 0,5.

Tabla 9. 1
Resultados Proporcional frente a Predictivo

Algoritmo	Relación Seguimiento	Error	Error	Error	Error	Error
		V<200	200<V<400	400<V<600	600<V<800	V>800
Proporcional	40,45	6,36	13,72	20,11	26,22	-
Predictivo	20,86	4,21	8,19	9,50	11,38	-

Para el algoritmo proporcional se detallan la siguientes figuras, donde la información de cada eje se representa en color, y el módulo en negro:

- En la **Figura 9. 11** se representa la posición del efector final, expresada en milímetros, para cada muestra.
- En la **Figura 9. 12** se representa el error en la posición relativa de la pelota respecto al efector, expresada en milímetros, para cada muestra.
- En la **Figura 9. 13** se representa la velocidad estimada de la pelota, expresada en milímetros por segundo, para cada muestra.

- En la **Figura 9. 14** se representa la velocidad del efector final, expresada en milímetros por segundo, para cada muestra.

El máximo error detectado es de 34,50 mm, y la máxima velocidad de la pelota es 779,97 mm/s.

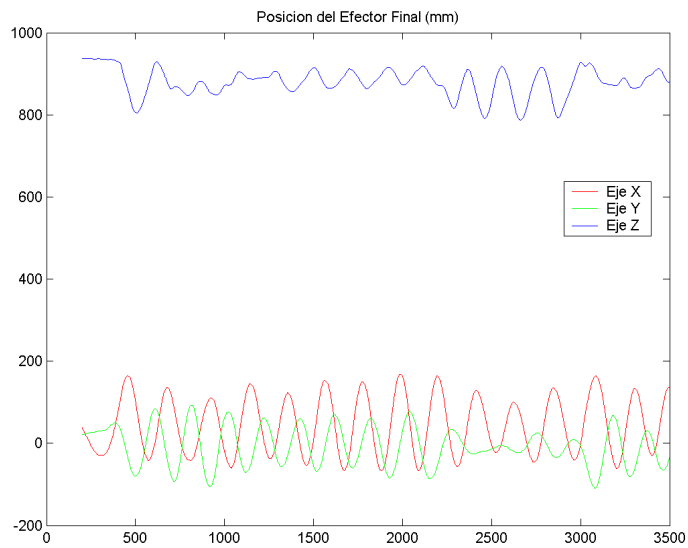


Figura 9. 11 Posición del Efector Final con Algoritmo Proporcional

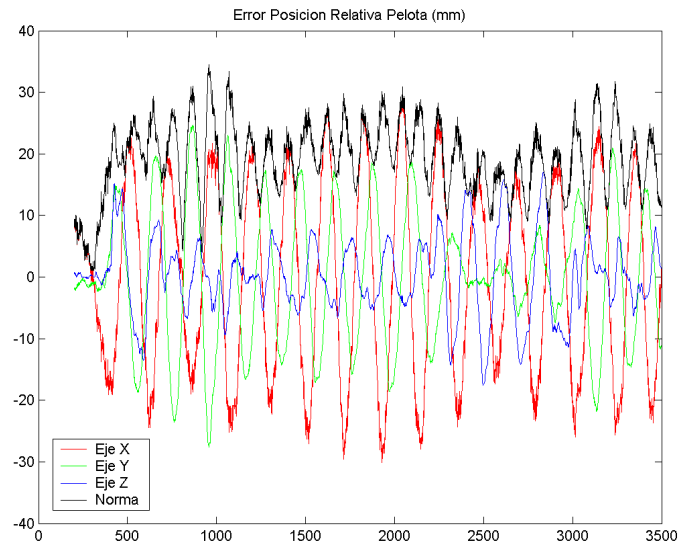


Figura 9.12 Error Posición Relativa de la Pelota con Algoritmo Proporcional

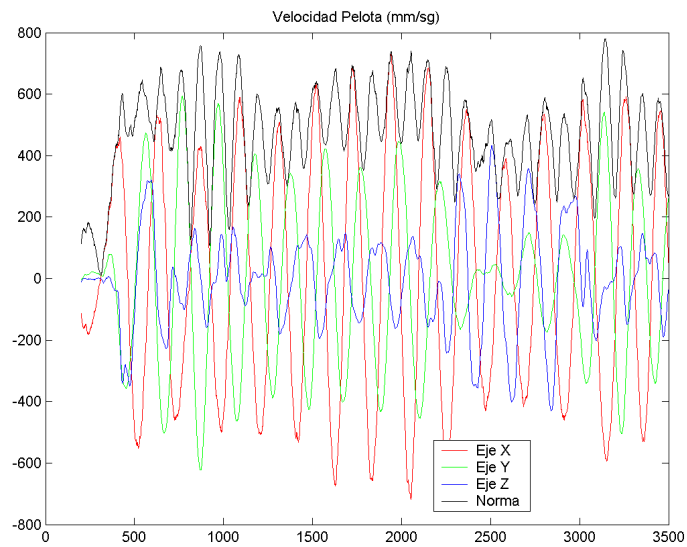


Figura 9.13 Velocidad estimada de la Pelota con Algoritmo Proporcional

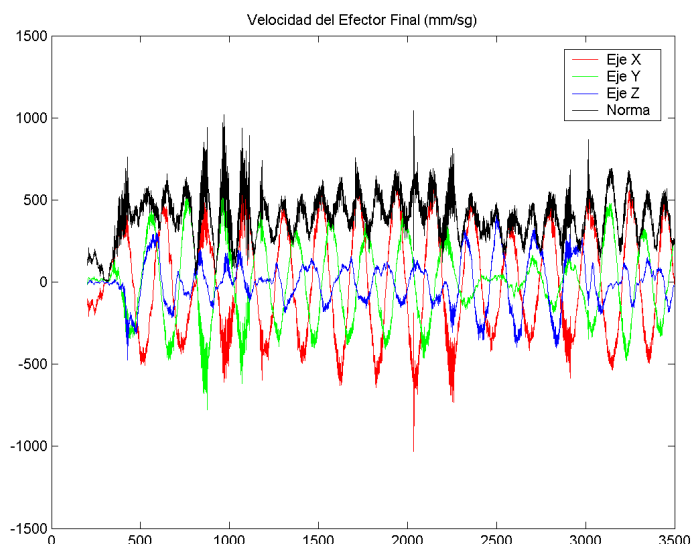


Figura 9. 14 Velocidad del Efector final con Algoritmo Proporcional

Para el algoritmo predictivo se detallan la siguientes figuras, donde la información de cada eje se representa en color, y el módulo en negro:

- En la **Figura 9. 15** se representa la posición del efector final, expresada en milímetros, para cada muestra.
- En la **Figura 9. 16** se representa el error en la posición relativa de la pelota respecto al efector, expresada en milímetros, para cada muestra.
- En la **Figura 9. 17** se representa la velocidad estimada de la pelota, expresada en milímetros por segundo, para cada muestra.
- En la **Figura 9. 18** se representa la velocidad del efector final, expresada en milímetros por segundo, para cada muestra.
- En la **Figura 9. 19** se representa la velocidad obtenida a la salida del regulador, expresada en milímetros por segundo, para cada muestra. Como se aprecia es muy superior a la velocidad del efector final. Esta diferencia se debe a la imposibilidad real del robot por cumplir los requisitos de control al exigirle una aceleración muy elevada.

El máximo error detectado es de 18,10 mm, y la máxima velocidad de la pelota es de 748,16 mm/s.

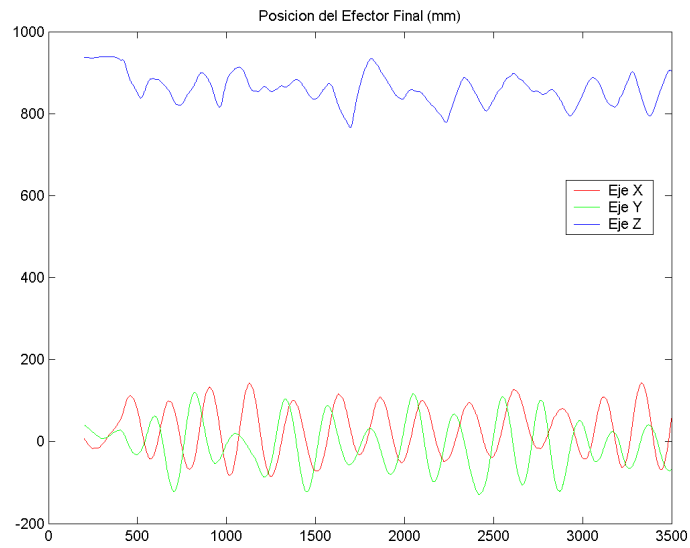


Figura 9. 15 Posición del Efector Final con Algoritmo Predictivo

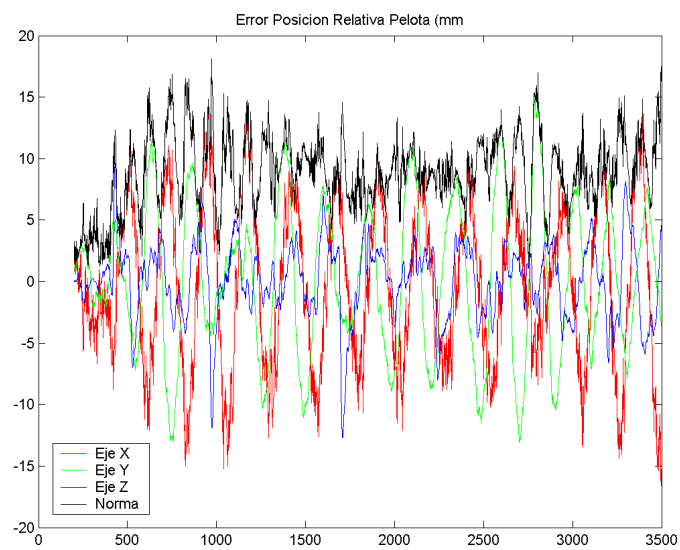


Figura 9. 16 Error Posición Relativa de la Pelota con Algoritmo Predictivo

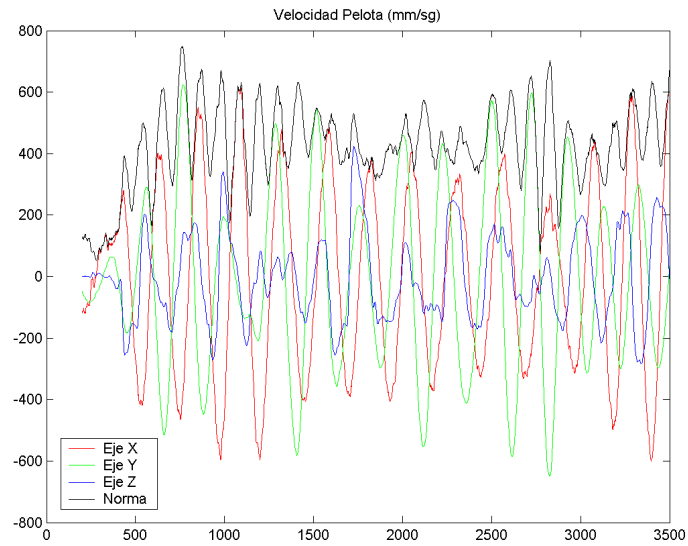


Figura 9.17 Velocidad estimada de la Pelota con Algoritmo Predictivo

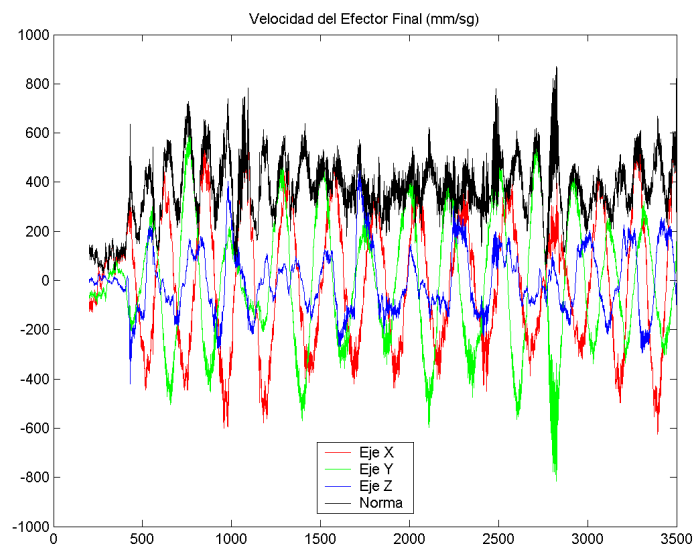


Figura 9.18 Velocidad del Efector final con Algoritmo Predictivo

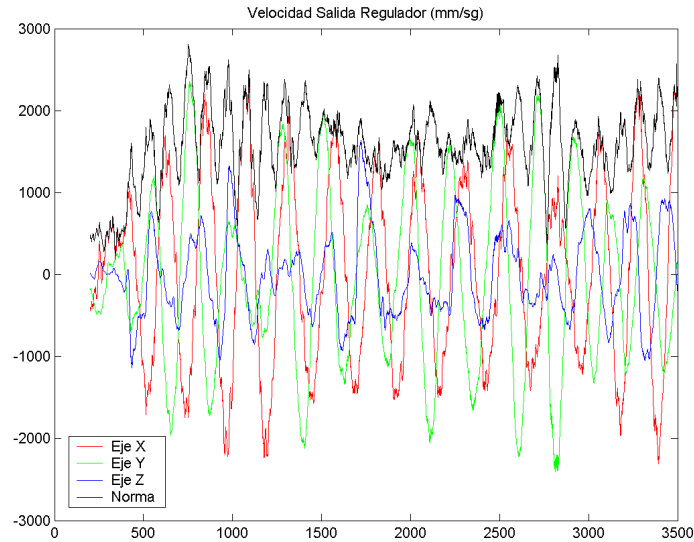


Figura 9. 19 Velocidad salida del Regulador con Algoritmo Predictivo

9.5.2 INFLUENCIA DE LA CONSTANTE INERCIA

La segunda prueba presentada compara la influencia de la Constante de Inercia en el algoritmo predictivo. Esta constante limita la máxima velocidad del robot. Un valor bajo de la constante aumenta el número de muestras, disminuyendo la velocidad requerida y sus variaciones. Las pruebas realizadas muestran un mejor comportamiento del sistema cuando disminuye de 1,0 a 0,5; a partir de ese valor el sistema se vuelve más lento.

En la Tabla 9. 2 se representan la media de los resultados obtenidos con los valores de 1,0 y 0,5 cuando se realizan 10 pruebas. Claramente se aprecia un mejor comportamiento con un valor de 0,5 tanto en la Relación de Seguimiento como en el Error por Franjas. En ambos casos se realiza el filtrado de la posición de la pelota, empleando una Constante de Error de 1,0.

Tabla 9. 2
Resultados al variar la Constante de Inercia

Constante Inercia	Relación Seguimiento	Error	Error	Error	Error	Error
		V<200	200<V V<400	400<V V<600	600<V V<800	V>800
1,0	26,52	6,06	9,67	13,25	17,14	20,96
0,5	13,33	3,34	6,45	6,43	7,27	13,32

Para una Constante de Inercia igual a 1,0 se detallan la siguientes figuras, donde la información de cada eje se representa en color, y el módulo en negro:

- En la **Figura 9. 20** se representa la posición del efector final, expresada en milímetros, para cada muestra.
- En la **Figura 9. 21** se representa el error en la posición relativa de la pelota respecto al efector, expresada en milímetros, para cada muestra.
- En la **Figura 9. 22** se representa la velocidad estimada de la pelota, expresada en milímetros por segundo, para cada muestra.
- En la **Figura 9. 23** se representa la velocidad del efector final, expresada en milímetros por segundo, para cada muestra.

El máximo error detectado es de 43,67 mm, y la máxima velocidad de la pelota es de 874,77 mm/s.

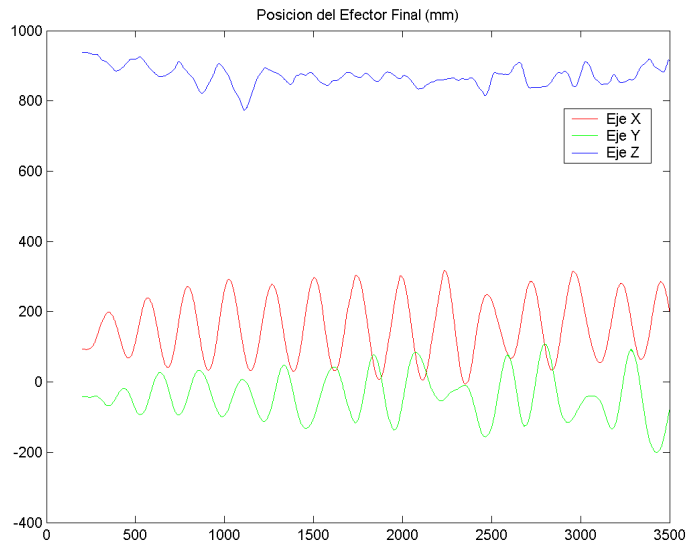


Figura 9. 20 Posición del Efecto Final con Constante Inercia 1,0

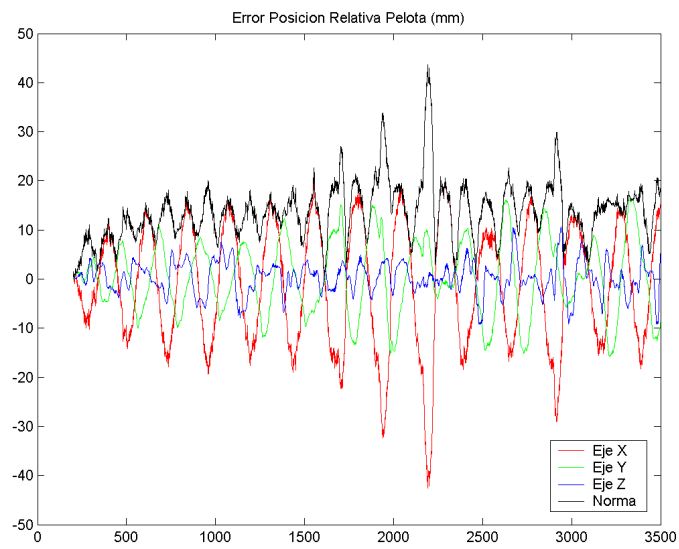


Figura 9. 21 Error Posición Relativa de la Pelota con Constante Inercia 1,0

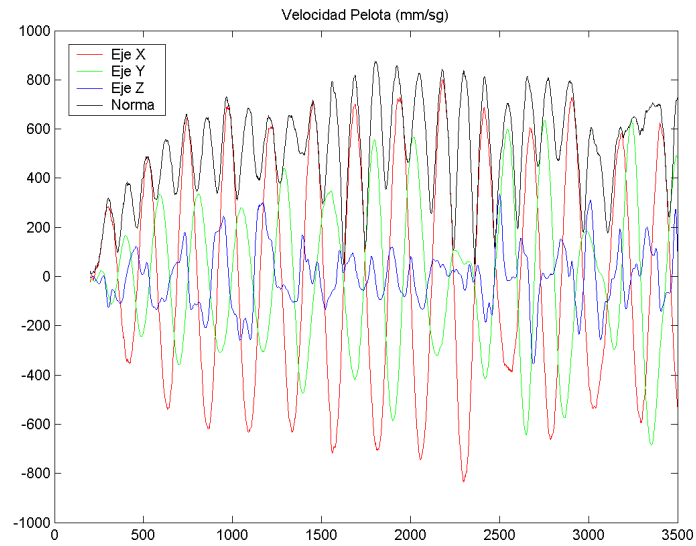


Figura 9. 22 Velocidad estimada de la Pelota con Constante Inercia 1,0

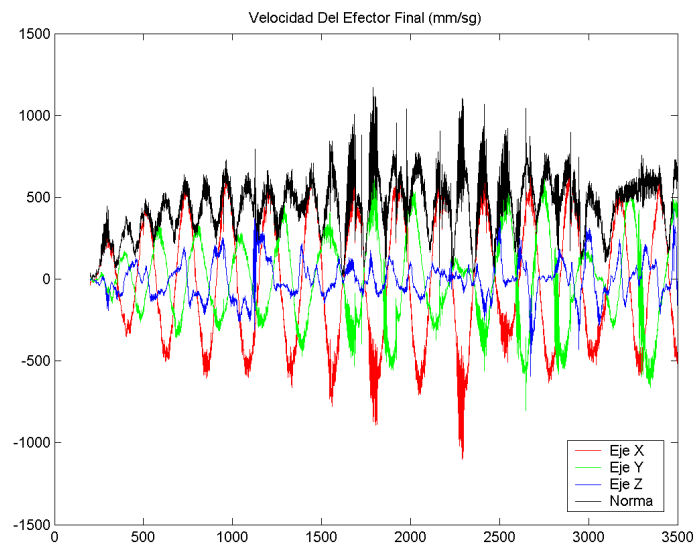


Figura 9. 23 Velocidad del Efecto final con Constante Inercia 1,0

Para una Constante de Inercia igual a 0,5 se detallan la siguientes figuras, donde de la información de cada eje se representa en color, y el módulo en negro:

- En la **Figura 9. 24** se representa la posición del efector final, expresada en milímetros, para cada muestra.
- En la **Figura 9. 25** se representa el error en la posición relativa de la pelota respecto al efector, expresada en milímetros, para cada muestra.
- En la **Figura 9. 26** se representa la velocidad estimada de la pelota, expresada en milímetros por segundo, para cada muestra.
- En la **Figura 9. 27** se representa la velocidad del efector final, expresada en milímetros por segundo, para cada muestra.

El máximo error detectado es de 16,48 mm, y la máxima velocidad de la pelota es de 874,77 mm/s.

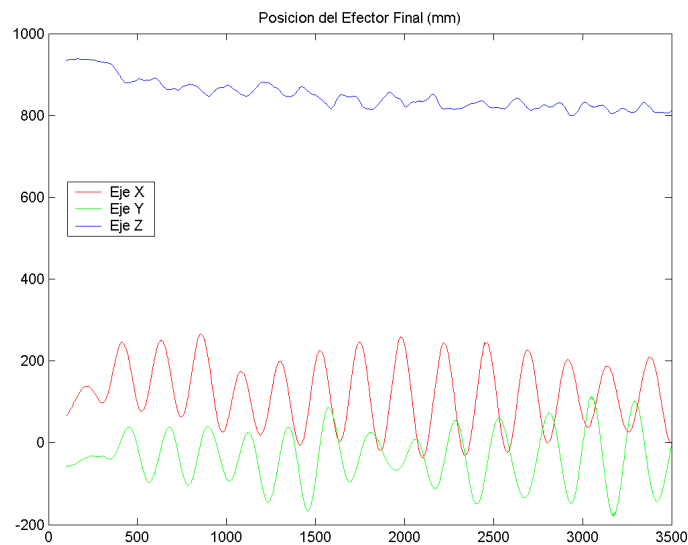


Figura 9. 24 Posición del Efector Final con Constante Inercia 0,5

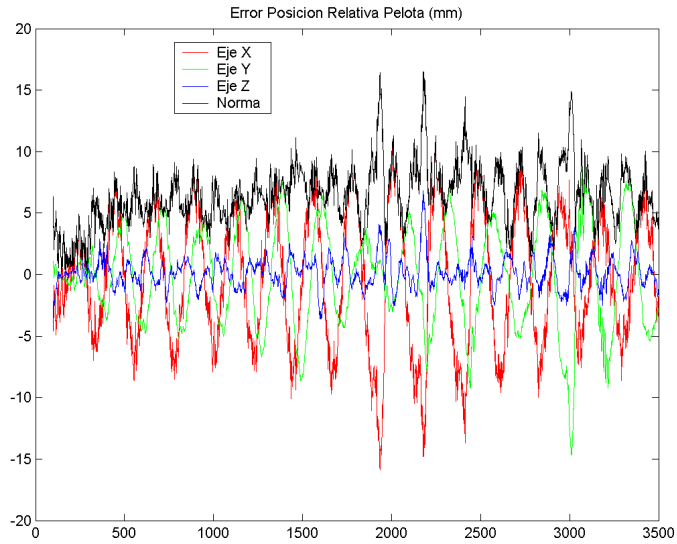


Figura 9. 25 Error Posición Relativa de la Pelota con Constante Inercia 0,5

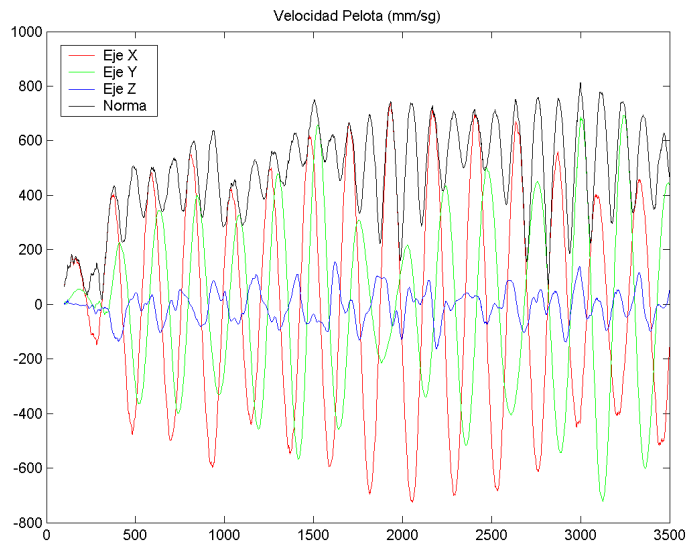


Figura 9. 26 Velocidad estimada de la Pelota con Constante Inercia 0,5

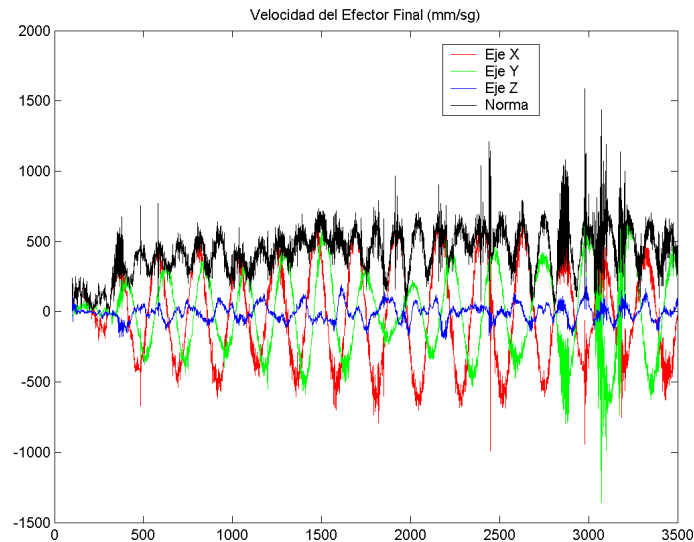


Figura 9. 27 Velocidad del Efector final con Constante Inercia 0,5

9.5.3 INFLUENCIA DE LA CONSTANTE ERROR

La tercera prueba presentada compara la influencia de la Constante de Error en el algoritmo predictivo. Esta constante determina si el sistema va a mantener el valor suministrado por el sistema de visión, o por el contrario va a priorizar el valor calculado por el filtro de Kalman. Valores muy altos de la constante ocasionará una variación más lenta de la velocidad deseada para el robot, algo que influye positivamente en el movimiento del robot, pero un aumento apreciable del error de seguimiento. Valores muy bajos de la constante ocasionará una variación más rápida de la velocidad deseada para el robot, algo negativo para el movimiento del robot, pero obligará al sistema a un error de seguimiento menor. En las pruebas realizadas se ha detectado la imposibilidad de trabajar con valores menores de 0,5 debido a la aparición de oscilaciones. Valores superiores a 1,0 ocasionan un peor comportamiento en las características generadas para la evaluación. Se considera como valor más adecuado el de 1,0.

En la Tabla 9. 3 se representan la media de los resultados obtenidos con valores de 1,0 y 2,0; se corresponden con los valores expresados en la Tabla 9. 1 y en la Tabla 9. 2. La Constante de Inercia se ha fijado con valor 0,5.

Tabla 9. 3

Resultados al variar la Constante de Error

Constante Error	Relación Seguimiento	Error V<200	Error 200<V V<400	Error 400<V V<600	Error 600<V V<800	Error V>800
2,0	20,86	4,21	8,19	9,50	11,38	-
1,0	13,33	3,34	6,45	6,43	7,27	13,32

9.6 CONCLUSIONES

En el presente capítulo se ha descrito un algoritmo novedoso de seguimiento mediante control visual, de un objeto que se mueve a alta velocidad. Se trata de la primera experiencia conocida de seguimiento visual con un robot paralelo, y los resultados obtenidos muestran las altas prestaciones tanto del sistema RoboTenis como del algoritmo de control visual.

El sistema se basa en la predicción de la futura posición de la pelota, a fin de dotar al robot del movimiento adecuado para que cumpla la función objetivo en el menor número de muestras posibles. Se han tenido en cuenta diversas características funcionales, como son los retrasos existentes en el sistema, la saturaciones en la velocidad, así como las limitaciones en la aceleración del sistema. Los resultados avalan al algoritmo propuesto, y la metodología empleada ha permitido el ajuste de los parámetros involucrados en el control.

CAPÍTULO 10

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Esta tesis ha presentado el diseño y construcción de una novedosa plataforma robótica abierta, formada por un robot paralelo, un sistema de visión y un hardware de control. Este sistema fue construido con el propósito de desarrollar una herramienta de investigación en el campo del control visual de robots paralelos, en la ejecución de tareas con altos requisitos temporales.

Para demostrar la versatilidad del prototipo construido, se ha implementado una arquitectura de control visual que permite el seguimiento de objetos a alta velocidad. Los resultados son satisfactorios, y demuestran la capacidad del sistema en aplicaciones con alto grado de incertidumbre del entorno.

Se estudia el problema cinemático del robot diseñado. Se presentan los modelos cinemáticos directo e inverso y se obtiene la matriz jacobiana del robot. Se desarrollan un conjunto de herramientas computacionales (MATLAB y Lenguaje C) que permiten solucionar el problema cinemático inverso y directo

del robot paralelo. Se realiza el análisis de posición, velocidad y aceleración de robots paralelos de tres grados de libertad verificando los resultados con otro software comercial (ADAMS).

El diseño se ha optimizado desde el punto de vista cinemático y dinámico. La optimización cinemática define las dimensiones de la estructura mecánica del manipulador y emplea un índice de optimización global basado en el número de condición de la matriz jacobiana. Usando un modelo de simulación en ADAMS, se obtiene la velocidad máxima del efector final y el máximo par de los motores para un conjunto de trayectorias típicas de la pelota en tenis de mesa.

Se derivan las ecuaciones de movimiento para el sistema robótico. El modelo dinámico emplea la formulación de Lagrange escrita en términos de un conjunto de coordenadas generalizadas. Para un conjunto de trayectorias del efector final, se valida el modelo dinámico obtenido para el Sistema RoboTenis empleando el modelo de simulación en ADAMS. Los resultados de estas simulaciones permiten analizar la influencia de las inercias de los antebrazos en la validez del modelo dinámico para el robot paralelo.

Se implementa el control articular del Sistema RoboTenis. Se describe la arquitectura de control del sistema y los procedimientos de implantación de control de posición y de movimiento del robot paralelo. Diferentes trayectorias han sido programadas y ejecutadas sobre el prototipo. Los resultados experimentales muestran que el Sistema RoboTenis es capaz de alcanzar velocidades superiores a 2.5 m/s.

Se presenta un método on-line para la generación de trayectorias suaves, aplicado al prototipo. El algoritmo es sencillo computacionalmente e incluye: *i)* capacidad para producir movimientos rectilíneos con un jerk limitado entre puntos intermedios con distintas velocidades, *ii)* movimiento articular coordinado, y *iii)* planificación en tiempo real de trayectorias para n puntos intermedios del camino, teniendo en cuenta las posiciones y velocidades deseadas en estos puntos.

El sistema de visión está ubicado en el extremo del robot y formado por una sola cámara. La adquisición se efectúa cada 8.33 ms y emplea el sistema de

doble buffering. Las características usadas son el centro de gravedad y el diámetro de la pelota. Dado el reducido tiempo de adquisición, se emplea el filtro de Kalman para filtrar las señales de posición y velocidad y conseguir una estimación mucho más fiable. Estos parámetros permiten predecir la posición y velocidad de la pelota, de forma que el robot pueda anticipar su movimiento.

Finalmente, se presenta el control visual del Sistema RoboTenis. La arquitectura de control visual propuesta, permite el seguimiento tridimensional de una pelota en movimiento a alta velocidad. Los resultados experimentales obtenidos muestran la versatilidad del sistema en la implementación de estrategias de control visual con altos requisitos temporales.

El Sistema RoboTenis es un proyecto en constante desarrollo. Dentro de los trabajos futuros y que están fuera de los objetivos planteados inicialmente para el desarrollo de esta tesis, se proponen:

- Calibrar de una manera exhaustiva el Sistema RoboTenis,
- Desarrollar nuevos algoritmos de control visual que permitan la realización de nuevas tareas: golpear la pelota, seguimiento y golpeo de la pelota, etc.....
- Desarrollar nuevas estrategias de control, que permitan al robot ser aplicado en tareas de teleoperación,
- Desarrollar nuevos algoritmos de control que permitan emplear fusión sensorial, para el uso de más cámaras,
- Desarrollar algoritmos de procesamiento de imágenes más robustos.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, L., Rodrigo, J.J., Mendez, J.A., Marichal, G.N. and Sigut, M. (2003). "Ping-Pong Player Prototype," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 10, Issue 4, pp. 44-52.
- Ángel, L., Sebastián, J.M., Saltaren, R., and Aracil, R. (2004). "RoboTennis: Parallel robot with Visual Control," *WAC 2004*, Seville-Spain.
- Ángel, L., Sebastián, J.M., Saltaren, R., Aracil, R., Gutierrez, R. (2005a). "RoboTennis: Design, Dynamic Modeling and Preliminary Control", In *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'05)*, Monterrey, California, USA, July 2005.
- Ángel, L., Sebastián, J.M., Saltaren, R., Aracil, R., Sanpedro, J. (2005b). "RoboTennis: Optimal Design of a Parallel Robot with High Performance", In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'05)*, Edmonton, Canada, August 2005.
- Ángel, L., Sebastián, J.M., Saltaren, R., Aracil, R. (2005c). "RoboTennis System. Part II: Dynamics and Control", *44th IEEE Conference on Deci-*

sion and Control and European Control Conference (CDC-ECC'05), Seville, Spain, December 2005.

- Agrawal, S.K. (1991). "A Study of In-Parallel Manipulator Systems", Doctoral Dissertation., Stanford University,
- Almonacid, M., Saltarén, R., Aracil, R., Reinoso, O. (2001). "Motion planning of a climbing parallel robot", *IEEE Transactions on Robotics & Automation*.
- Aloimonos, J. and Tsakiris, D.P. (1991). On the mathematics of visual tracking. *Image and Vision Computing*, vol 9, pp 235-251.
- Anderson, R.L. (1987). "A Robot Ping-Pong Player. Experiments in Real time Control," *Cambridge, MA: MIT Press*.
- Aracil, R., Saltarén, R.J, Azorín, JM, Almonacid, M., Sabater, JM. (2000b). "Climbing Parallel Robots Morphologies", *6th International IFAC Symposium on ROBOT CONTROL - SYROCO 2000*. Vienna, Austria.
- Aracil, R. Saltarén, R., Sabater, J.M. (1999). "TREPA, Parallel Climbing Robot for Maintenance of Palm Trees and Large Structures", *Proc. 2nd International Workshop & Conference on CLIMBING & WALKING ROBOTS (CLAWAR)*, pp. 453-461.
- Arai, T. (1990). "Development of a parallel link manipulator". In *ICAR*, pages 839-844, Pise, 19-22.
- Arai, T., Stoughton, R., and Jaya, Y.M. (1991). Micro hand module using parallel link mechanism. In *Japan/USA Symp. on Flexible Automation*, pages 163-168, San Francisco, 13-15.
- Baeten, J., Bruyninckx, H., De Shutter, J. (1999). Combinig eye-in-hand visual servoing and force control in robotic tasks using task frame. *Proc. IEEE Int. Conf. On Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pp.141-146, 1999.
- Bachiller, M. (1999). Estrategias de control para el seguimiento de objetos con movimiento tridimensional. Aplicación a un sistema robotico con percepcion visual. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Educación a Distancia.

- Barrientos, A., Peñín, L.F., Balaguer, C., Aracil, R. (2000). *Fundamentos de Robótica*. Mc-Graw Hill, España.
- Baumgarte, J., (1972). “Stabilization of Constrains and Integrals of Motion”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 1 pp. 1-16.
- Bhattacharya, S., Hatwal, H. and Ghosh, A. (1995). “On the Optimum Design of Stewart Platform Type Parallel Manipulators,” *Robótica*, vol. 13, pp. 133-140.
- Bhattacharya, S., Hatwal, H., and Ghosh, A. (1998). “Comparison of an exact and an approximate method of singularity avoidance in platform type parallel manipulators”. *Mechanism and Machine Theory*, 33(7):965-974.
- Basaravaj, U. and Duffy, J. (1993).”End-effector motion capabilities of serial manipulators,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 12, No. 2, pp.132–145.
- Bonev, I.A., Ryu, J. (1999). “A simple new closed-form solution of the direct kinematics using three linear extra sensors. In *IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 526-530, Atlanta, 19-23.
- Bobrow, J. E., Dubowsky, S. and Gibson J. S. (1985). Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths. *Int. J. Robot. Res.*, vol. 4, pp. 3–17.
- Cao, B., Dodds, G. I. and Irwin, G. W. (1994). Time-optimal and smooth constrained path planning for robot manipulators. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1853–1858.
- Cadenat, V., Swain, R., Soueres, O., Devy, M. A. (1999) Controller to perform a visually guide tracking task in a cluttered enviroment. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Systems*, pp. 775-780
- Carricato, M. and Parenti-Castelli, V. (2002). “Singularity-free fully-isotropic traslational parallel mechanisms,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 21, No. 2, pp. 161–174.
- Castano, A. and Hutchinson, S.A. (1994). Visual compliance: Task-directed visual servo control. *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol 10, pp 334-342.

- Cauchy, A. (1813). Deuxième mémoire sur les polygones et les polyèdres. *Journal de l'Ecole Polytechnique*, pages 87-98.
- Chand, S. and Doty, K. (1985). Online polynomial trajectories for robot manipulators. *Int. J. Robot. Res.*, vol. 4, pp. 38–48.
- Chaumette, F., Rives, P. and Espiau, B. (1989). Positioning of a robot with respect to an object, tracking it and estimating its velocity by visual servoing. In V. Hayward and O. Khatib, editors. *Experimental Robotics 1*, pp. 412-428. Springer Verlag.
- Chaumette, F., Rives, P and Espiau, B. (1991). Positioning of a robot with respect to an object, tracking it and estimating its velocity by visual servoing. *Proc. IEEE IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2248-2253.
- Chaumette, F. (1998). Potential problems of stability and convergence in image-based and positionbased visual servoing, in: *The Confluence of Vision and Control*, D. J. Kriegman, G. D. Hager and A. S. Morse (Eds), pp. 66–78. Springer.
- Chen, Y. and Desrochers, A. A. (1989). Structure of minimum-time control law for robotic manipulators with constrained paths. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 971–976.
- Chen, W. J., Zhao, M. Y., Zhou, J. P., and Qin, Y. F. (2002). A 2T-2R, 4-DoF Parallel Manipulator. In *CD-ROM Proceedings*, ASME DETC/CIE, Montreal, Canada, DETC2002/MECH-34303.
- Chieaverini, S., Sciavicco, L. and Siciliano, B. (1991). Control of robotic systems through singularities. *Proc. Int. Workshop on Nonlinear and Adaptive Control: Issues in Robotics* C.C de Wit, Ed. Berlin: Springer-Verlag.
- Clavel, R. (1988). “DELTA: a fast robot with parallel geometry,” *18th International Symposium on Industrial Robot*, pp. 91-100. Sydney, Australia.
- Codourey A. and Burdet, E. (1997). A Body-Oriented Method for Finding a Linear Form of the Dynamic Equation of Fully Parallel Robot. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, pp. 1612-1618.

- Codourey, A. (1995). Dynamic Modeling and Mass Matrix Evaluation of the Delta Parallel Robot for Axis Decoupling Control”, *IEEE International Conference of Robotics and Automation*.
- Codourey, A. (1991a). Contribution a la commande des robots rapides et précis. Application au robot delta a entrainement direct. These EPFL 922, Lausanne.
- Company, O., and Pierrot, F. (1999). A New 3T-1R Parallel Robot. *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, Tokyo, Japan, pp. 557–562.
- Constantinescu, D. and Croft, E. A. (2000). Smooth and time-optimal trajectory planning for industrial manipulators along specified paths. *J. Robot. Syst.*, vol. 17, pp. 233–249.
- Corke, P.I and Paul, R. (1989). Video-rate visual servoing for robots. In V. Hayward and O. Khatib, editors, *Experimental Robotics 1*, pp. 429-451. Springer Verlag.
- Corke, P.I. (1991). Real time image feature analysis for robot visual servoing. In Proc. DICTA-91, Melbourne.
- Corke, P.I. and Good, M.C. (1992). Dynamics effects in high-performance visual servoing. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1838-1843.
- Corke, P. (1993). Visual control of robot manipulators. A review *Visual Servoing*, Hashimoto, Ed. Singapore: World Scientific. pp 1-31.
- Corke, P.I. (1994). *High-Performance Visual Closed-Loop Robot Control*. Ph.D. Dissertation, University of Melbourne, Dept. Mechanical and Manufacturing Engineering.
- Craig, J. J. (1989) *Introduction to Robotics*. New York: Addison-Wesley.
- Dahl, O. (1994). Path-constrained robot control with limited torques - Experimental evaluation. *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 10, pp. 658–669.
- Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T.S. (2000). The Stewart platform manipulator: a review. *Mechanism and Machine Theory* Vol 35, pp 15-40, 2000.
- Dasgupta, B., and Mruthyunjaya, T.S. (1994). A canonical formulation of the direct position kinematics for a general 6-6 Stewart platform. *Mechanism and Machine Theory*, 29(6):819-827.

- Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T.S. (1998a). “Singularity-free planning for the Stewart platform manipulator”, *Mech. Mach. Theory* Vol 33, N° 6, pp 711-725.
- Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T.S. (1998b). Closed-Form Dynamic equations of the general Stewart platform through the Newton-Euler approach. *Mech. Mach. Theory* Vol 33, N° 7, pp 993-1012.
- DeMenthon, D. and Davis, L.S. (1992). Exact and approximate solutions of the perspective three point problem. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell*, n°11, pp 1100-1105.
- Deriche, R. and Faugeras, O. (1990). Tracking line segments", en *Proceedings of the 1st ECCV*, pp 259-268. Springer Verlag.
- Do W. and Yang, D. (1988). Inverse Dynamic Analysis and Simulation of a Platform Type of Robot,” *Journal of Robotics Systems*, vol. 5, No. 3, pp. 209-227.
- Douady, D. (1991). Contribution à la modélisation des robots parallèles: conception d'un nouveau robot à 3 liaisons et six degrés de liberté. *Thèse de doctorat, Université Paris VI*, Paris.
- Dupont, P. E., Dunlap, E. P. (1995). “Friction modelling and PD Compensation at very low velocities”, *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 117 N° 1, pp. 8-14.
- Espiau, B., Chaumette F. and Rives, P. (1992). A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Trans. Robot. Automat.* vol 8, pp 313-326.
- Fassler, H., Vasteras, H.A., and Zurich, J.W. (1990). “A Robot Ping-Pong Player: Optimized mechanics, high performance 3D vision, and intelligent sensor control.
- Fattah, A. and Ghasemi, A. M. (2002). “Isotropic Design of Spatial Parallel Manipulators,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 21, No. 9, pp. 811-824.,” *Robotersysteme*. Berlin: Spring-Verlag, pp. 161-170.
- Feddema, J. and Mitchell, O. (1989). Vision-guided servoing with feature-based trajectory generation. *IEEE Trans. Robot. Automat.* vol 5, pp 691-700.

- Feddema, J.T., Lee, C.S.G. and Mitchell, O.R. (1991). Weighted selection of image feature for resolved rate visual feedback control. *IEEE Trans. Robot. Automat.* vol 7, pp 31-37.
- Fichter, E.F. (1986). A Stewart platform based manipulator: general theory and practical construction. *Int. J. of Robotics Research*, 5(2):157-181.
- Flandin, G., Chaumette, F. and Marchand, E. (2000) Eye-in-hand/eye-to-hand cooperation for visual servoing. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Volume 3, pages 2741-2746, San Francisco.
- Ganapathy, S. (1989). Decomposition of transformation matrices for robot vision. *Pattern Recog. Lett.*, pp 401-412.
- García, N. (2004). Técnicas avanzadas para el control visual de robots basadas en características de la imagen. Aplicación a la solución de posibles singularidades. Tesis doctoral, Universidad de Elche.
- García, N., Malis, E., Aracil, R., Perez-Vidal, C. (2005). Continuous Visual Servoing Despite the Changes of Visibility in Image Features. *IEEE Trans. Robot. And Automat.*, vol 21, pp: 1214-1220.
- Geering, H. P., Guzzella, L., Hepner, S. A. R., and Onder, C. H. (1986). Time-optimal motions of robots in assembly tasks. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-31, pp. 512–518.
- Geng, Z. and Haynes, L.S. (1992). “On the dynamic model and kinematic analysis of a class of Stewart platforms”. *Robotics and Autonomous Systems*, 9:237-254.
- Geschke, C. (1981). A robot task using visual tracking. *Robotics Today*, pp. 39-43.
- Gosselin, C. and Angeles, J. (1988). “The Optimum Kinematic Design of a Planar Three-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator,” *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, vol. 110, pp. 35-41.
- Gosselin, C. and Angeles, J. (1989). “The optimum kinematic design of a spherical three-degree-of-freedom parallel manipulator,” *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, vol. 111, No. 2, pp. 202–207.

- Gosselin, C., and Angeles, J. (1990). "Singularity analysis of closed-loop kinematic chains". *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 6(3):281-290.
- Gosselin, C. (1990). "Determination of the Workspace of 6-DOF Parallel Manipulators," *ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 112, pp.167-176, 1990.
- Gosselin, C. and Angeles, J. (1991). "A global Performance Index for the kinematic Optimization of robotic Manipulators," *ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 113, pp. 220-226.
- Gosselin, C. (1996). "Parallel Computational Algorithms for the kinematics and Dynamics of Parallel Manipulators", *ASME J. Dyn. Syst., Meas. Contr.*, vol 118-1, pp. 22-28.
- Gough, V.E., Whitehall, S.G. (1962). Proc. 9th Int Tech. Congr. FISITA, Instn. Mech 177.
- Grace, K.W. (1993) "A six degrees of freedom micromanipulator for ophthalmic surgery". *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 630-635.
- Guglielmetti, P. and Longchamp, R. (1994). "A Closed form Inverse Dynamics Model of the Delta Parallel Robot", *Journal of Robotics Systems*, vol. 6, pp 703-720, 1994.
- Gutiérrez, D., Ángel L., Pari, L. and Sebastián, J.M. (2005). Estimación de la posición y de la velocidad de un objeto móvil. Aplicación al Sistema RoboTennis.
- Hager, G.D., Grunwald, G. and Hirzinger, G. (1994). Feature-based visual servoing and its application to telerobotics. *Proc. IEEE/RSJ int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp 164-171.
- Hamlin, G.J. and Sanderson, A.C. (1998). "TETROBOT: A modular approach to reconfigurable parallel Robotics", Kluwer Academic Publisher.
- Harris D.M.J. (1995). Parallel-linkage robot coordinate transformation through screw theory. *9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, pp1565-1568.

- Haralick, R.M., Lee, C., Ottenberg, K. and Nolle, M. (1991). Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem. *Proc. IEEE Conf. Computer Vision Pattern Recognition*, pp 592-598.
- Hartley, J. (1987). "Toshiba progress towards sensory control in real time," *Indust. Robot*, vol. 14, No. 1, pp. 50-52.
- Hashimoto, K., Kimoto, T., Ebine, T. and Kimura, H. (1991). Manipulator control with image-based visual servo. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1991, pp 2267-2272.
- Hatip, O.E. and Ozgoren M.K. (1995). Utilization of a Stewart platform mechanism as a stabilizer. *9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, pages 1393-1396.
- Haug, E. J. (1989). *Computer Aided Kinematics and Dynamics Of Mechanical Systems*, Allyn and Bacon, USA.
- Hesselbach, J., Plitea, N., Frindt, M., and Kusiek, A. (1998). A New Parallel Mechanism to Use for Cutting Convex Glass Panels. In *Advances in Robot Kinematics*, J. Lenarcic and M. L. Husty, eds., Kluwer Academic, London, pp. 165–174.
- Hill, J. and Park, W.T. (1979). Real time control of a robot with a mobile camera. *Proc. 9th ISIR*. Washington D.C, pp 233-246.
- Horaud, R., Canio, B. and Leboulloux, O. (1989). An analytic solution for the perspective 4-point problem. *Comput. Vision Graphics, Image Process*, n°1, pp 33-44.
- Huang, Z., and Li, Q. C. (2002). Some Novel Lower-Mobility Parallel Mechanisms. ASME DETC/CIE, Montreal, Canada, DETC2002/MECH-34299.
- Hunt, K. (1978). *Kinematic Geometry of Mechanisms*, Oxford University Press, New York.
- Hunt, K. H. (1983). Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms. *ASME Transactions, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design* 105(4): 705–712.
- Hutchinson, S., Hager, G.D., Corke, P.I. (1996). A tutorial on visual servo control. *IEEE Trans. Robot. Automat.* vol 12, n°5, pp 651-670.

- Husty, M.L. (1996). An algorithm for solving the direct kinematic of Stewart-Gough-type platforms. *Mechanism and Machine Theory*, 31(4), pp 365-380.
- Innocenti, C. and Parenti-Castelli, V. (1993). Echelon form solution of direct kinematics for the general fully-parallel spherical wrist. *Mechanism and Machine Theory*, 28(4):553-561.
- Jeon, J. W. and Ha, Y. Y. (2000). A generalized approach for the acceleration and deceleration of industrial robots and CNC machine tools. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, pp. 133–139.
- Jeon, J. W. (1985). An efficient acceleration for fast motion of industrial robots. *Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, vol. 2, pp. 1336–1341.
- Kahn, M. E. and Roth, B. (1971). The near-minimum-time control of open-loop articulated kinematic chains. *J. Dyn. Syst., Meas., Contr.*, vol. 93, pp. 164–172.
- Karouia, M., and Hervé, J. M. (2000). A Three-DoF Tripod For Generating Spherical Rotation. In *Advances in Robot Kinematics*, J. Lenarcic and M. M. Stanisic, eds., Kluwer Academic, London, pp. 395–4020.
- Khadraoui, D. and Motyl, G. (1996). Visual servoing in robotics scheme using a camera/laser stripe sensor. *IEEE Trans. Robot. Automat.* vol 12, n°5, pp 743-750.
- Kragic, D. (2001) *Visual Servoing for Manipulation: Robustness and Integration Issues*. Doctoral dissertation, Stockholm.
- Kumar, R. (1994). Robust methods for estimating pose a sensitivity analysis. *CVGIP: Image Understanding*, n° 3, pp 313-342.
- Kieffer, J., Cahill, A. J. and James, M. R. (1997). Robust and accurate time-optimal path-tracking control for robot manipulators. *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 13, pp. 880–890.
- Ku, D.M. (1999). “Direct displacement analysis of a Stewart platform mechanism”. *Mechanism and Machine Theory*, 34(3):453-465.
- Kyriakopoulos, K. J. and Saridis, G. N. (1988). Minimum jerk path generation. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 364–369.

- Lazard, D. (1992). Stewart platform and Gröbner basis. In ARK, pp 136-142.
- Lazard, D. and Merlet, J. P. (1994). Stewart platform has 12 configurations. *IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, pp 2160-2165, San Diego.
- Lee, J.D. and Geng, Z. (1993). Modeling and control of a flexible Stewart platform. *IFAC 12th Triennial World Congress*, pp 441-444, Sydney.
- Lee, M. K., and Park, K.W. (1999). Kinematics and Dynamics Analysis of a Double Parallel Manipulator for Enlarging Workspace and Avoiding Singularities. *IEEE Transaction on Robotics and Automation* 15(6):1024–1034.
- Lei, M. and Ghosh, B.K. (1992). Visually-guided robotic motion tracking. *Proc. Thirtieth Annu. Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing*, pp 712-721.
- Lenarcic, J., Stanasic, M. M., and Parenti-Castelli V. (2000). A 4-DoF Parallel Mechanism Simulating the Movement of the Human Sternum-Clavicle-Scapula Complex. In *Advances in Robot Kinematics*, J. Lenarcic and M. M. Stanasic, eds., Kluwer Academic, London, pp. 325–332.
- Lloyd, J. and Hayward, V. (1993). Trajectory generation for sensor-driven and time-varying tasks. *Int. J. Robot. Res.*, vol. 12, pp. 380–393.
- Lin, Y. J. and Song, S. M. (1990). A comparative study of Inverse Dynamics of Manipulators with Closed-Chain Geometry. *Journal of Robotics Systems*, vol. 7, pp 507-534.
- Liu, Y., Huang, T.S. and Faugeras, O.D. (1990). Determination of camera location from 2-d to 3-d line and point correspondences. *IEEE Trans. Pat. Anal. Machine Intell.*, n°1, pp 28-37.
- Liu, M.J. Li, C.X., and Li, C.N. (2000). “Dynamics Analysis of the Gough-Stewart Platform Manipulator” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 16, N° 1.
- Liu, K., Lebret, G., Lowe J.A., and Lewis F.L. (1992). Control of a Stewart platform based robotic milling cell. *ASME Winter Annual Meeting, Symp. on Manufacturing and Control issues in a robotics assembly Workcell*, Angheim.

- Liu, K., Lewis, F., Lebret, G., Taylor, D. (1993). “The singularities and dynamics of a Stewart platform manipulator”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. vol.8, no.3, pp.287-308.
- Lu, L. and Ahuja, T. N.(2000). “Identification and control of a Pneumatic Actuator for use with the hexapod Robot”. Proc ICARCV 2000, Singapore.
- Ma, O. and Angeles, J. (1991). “Architecture singularities of platform manipulator”. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp 1542-1547, Sacramento.
- Malis, E., Chaumette, F. and Boudet, S. (1998). 2-1/2-D visual servoing, *IEEE Trans. Robotics and Automation* **15** (2), 238–250.
- Masory, O. and Wang, J. (1995). “Workspace evaluation of Stewart platforms”. *Advanced robotics*, 9(4), pp 443-461.
- McCallion, H., and Truong, D.T. (1979). “The analysis of a six degrees of freedom work station for mechanized assembly”. *Proc. 5th World Congress on Theory of Machines and Mechanisms*, pp 611-616, Montréal.
- Macfarlane, S. and Croft, E. (2003). Jerk bounded manipulator trajectory planning: Design for real-time applications. *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 19, pp. 42–51.
- Malis, E., Chaumette, F. and Boudet, S. (1998).2-1/2-D visual servoing, *IEEE Trans. Robotics and Automation* **15** (2), 238–250.
- Merlet, J-P. (1989). An algorithm for the forward kinematics of general 6 d.o.f. parallel manipulators. Research Report 1331, INRIA.
- Merlet, J. P. (1992). Direct kinematics and assembly modes of parallel manipulators. *International Journal of Robotics Research*, 11(2), 150-162.
- Merlet, J-P. (1993). Orientation workspace of a parallel manipulator with a fixed point. In *ICAR*, pages 141-146, Tokyo.
- Merlet, J-P. (1994). “Trajectory verification in the workspace of parallel manipulators”. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2166-2171, San Diego.

- Merlet, J.P. (1994). "Designing a Parallel Manipulator for a Specific Workspace," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 16. No.4. pp.545-556.
- Merlet, J-P. and Mouly, N. (1994). Espaces de travail et planification de trajectoire des robots parallèles plans. Research Report 2291, INRIA.
- Merlet, J-P. (1995). "Designing a parallel robot for a specific workspace". Rapport de Recherche 2527, INRIA.
- Merlet, J. P., *Les Robots Parallèles*, Ed. Hermes, 1997a.
- Merlet, J.P. (1997b). "Determination of the presence of singularities in a workspace volume of a parallel manipulator". In *NATO-ASI, Computational methods in mechanisms*, Sts. Konstantin and Elena Resort.
- Merlet, J. P., Perng, M.W., and Daney, D. (2000). Optimal Trajectory Planning of A 5-Axis Machine Tool Based on a 6-Axis Parallel Manipulator. In *Advances in Robot Kinematics*, J. Lenarcic and M. M. Stanisic, eds., Kluwer Academic, London, pp. 315–322.
- Merlet, J. P. (2001). "An improved design algorithm based on interval analysis for spatial parallel manipulator with specified workspace," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, Korea.
- Mezouar, Y. and Chaumette, F. (2000) Path planning in image space for robust visual servoing. *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2759–2764, San Francisco.
- Miller, K. (2004). "Optimal Design and Modeling of Spatial Parallel Manipulators," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, No. 2, pp. 127-140.
- Miller, K. and Clavel, R. (1992). The Lagrange Based Model of Delta-4 Robot Dynamics, *Robotersysteme* 8, pp. 49-54.
- Miller, K. (1995). Experimental Verification of Modeling of Delta Robot Dynamics by Direct Application of Hamilton's Principle. *IEEE International Conference of Robotics and Automation*, pp.532-537.
- Miller, K. (1995). Experimental Verification of Modeling of Delta Robot dynamics by Direct Application of Hamilton's Principle. *IEEE International Conference of Robotics and Automation*.

- Naghdy, F., Wyatt, J. and Tran, S. (1993). “A transputer-based architecture for control of a robot ping-pong player,” *Parallel Computing and Transputers*. New York: IOS Press, pp. 311-317.
- Nair, P. (1994). “On the forward kinematics of parallel manipulators”. *The Int. J. Of Robotics Research*, 13(2):171-188.
- Nakashima, K. (1992). Development of the parallel manipulator. In *IMACS/SICE Int. Symp. on Robotics, Mechatronics, and Manufacturing Systems*, pp 419-424.
- Nenchev, D.N. and Uchiyama, M.(1996). “Singularity-consistent path planning and control of parallel robot motion through instantaneous-self-motion type”. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp 1864-1870.
- Nguyen, C.C., Antrazi, S.S., Zhou, Z-L., Campbell, C.E. (1991). “Experimental Study of Motion Control and Trajectory Planning for a Stewart Platform Robot Manipulator”, *Proc. Int. Conference on Robotics and Automation*.
- Ottaviano, E. and Ceccarelli, M. (2002). “Optimum Design of Parallel Manipulators for Workspace and Singularity Performances,” *WORKSHOP on*
- Oyama, O. and Harada, M. (1991). “Pneumatic cylinder servo-system by using high speed solenoid valves”, *Flucome '91 3 Trienn Int Symp Fluid Control Meas Visualization Flucome 91*, ASME, New York, NY, USA. pp 365-372.
- Papanikolopoulos, N.P., and Khosla, P.K. (1992). Shared and tracked telerobotic visual control. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 878-885.
- Papanikolopoulos, N.P. and Khosla, P.K. (1993a). Adaptive robot visual tracking: Theory and experiments. *IEEE Trans. Automat. Contr.* vol 38, n°3, pp 429-445.
- Papanikolopoulos, N.P., Khosla, P.K. and Kanade, T. (1993b). Visual tracking of a moving target by a camera mounted on a robot: A combination of vision and control. *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol 9, n°1, pp 14-35.

- Parenti-Castelli, V., Di Gregorio, R. and Bubani, F. (1999). "Workspace and Optimal Design of a Pure Translation Parallel Manipulator," *XIV National Congress AIMETA*.
- Park, T. (1986). "A Hybrid Constraint Stabilization-Generalized Coordinate Partitioning Method for Machine Dynamics.," *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 108, No. 2, pp. 211-216.
- Piazzi, A. and Visioli, A. (2000). Global minimum-jerk trajectory planning of robot manipulators. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, pp. 140–149.
- Pierrot, F., Dauchez, P., and Fournier, A. (1991). Towards a fully-parallel 6 d.o.f. robot for high speed applications. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp 1288-1293, Sacramento.
- Pierrot, F., and Company O. (1999). H4: A New Family of 4-dof Parallel Robots. *Proc. IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, Atlanta, Georgia, pp. 508–513.
- Pierrot, F., Marquet, F., Company O., and Gil T. (2001). H4 Parallel Robot: Modeling, Design and Preliminary Experiments. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Seoul, Korea.
- Pierrot, F., Reynaud, C. and Fournier, A. (1990). Delta: A simple and Efficient Parallel Robot, *Robotica*, vol. 6, pp. 105-109.
- Pomares, J. (2004). Control visual 2D indirecto para el seguimiento intemporal de trayectorias y su aplicación a las estrategias de control visual-fuerza en manipuladores. Tesis doctoral, Universidad de Alicante.
- Raster, J. and Perel, D. (1988). "Generation of manipulator workspace boundary geometry using the monte carlo method and interactive computer graphics," *ASME Trends and Developments in Mechanisms, Machines, and Robotics*, pp. 299-305.
- Reboulet, C., and Berthomieu T. (1991). Dynamic model of a six degree of freedom parallel manipulator. *ICAR*, pp 1153-1157.
- Reboulet, C. and Pigeyre R. (1992a.). Hybrid control of a 6 d.o.f. in parallel actuated micro-manipulator mounted on a SCARA robot. *Int. J. of Robotics and Automation*.

- Reinoso, O. (1996). Analisis y generalizacion de algoritmos de vision artificial con precision subpixel. Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Madrid.
- Rolland, L. H. (1999). The Manta and the Kanuk Novel 4-DoF Parallel Mechanisms for Industrial Handling. *Proc. ASME Int. Conf. on Mechanical Engineering*, Nashville.
- Sahar, G. and Hollerbach, J. M. (1986). Planning of minimum-time trajectories for robot arms. *Int. J. Robot. Res.*, vol. 5, pp. 90–100.
- Sanderson, N. (1987). Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.3, No. 9, 1987, pp. 404-417.
- Salisbury, J.K. and Craig, J.J. (1982). “Articulated hands: force control and kinematics,” *International Journal of Robotics Research*. vol. 1, No. 1, pp. 4–17.
- Sefrioui, J. and Gosselin, C. (1992). “Singularity analysis and representation of planar parallel manipulators”. *Robotics and Autonomous Systems*, 10:209-224.
- Shin, K. G. and McKay, N. D. (1985). Minimum-time control of robotic manipulators with geometric path constraints. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-30, pp. 531–541.
- Shirai, Y. and Inoue, H. (1973). Guiding a robot by visual feedback assembling tasks. *Pattern Recognit.*, vol 5, pp 99-108.
- Stamper, R.E., Tsai, L.W., and Walsh, G.C. (1997). “Optimization of a Three Dof Translational Platform for Well-Conditioned Workspace,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, pp. 3250-3255.
- Stewart D. (1965). A platform with 6 degrees of freedom. *Proc. of the Institution of mechanical engineers*, 180 (Part 1, 15): pp 371-386.
- Stoughton, R. S. and Arai, T. (1993). “A Modified Stewart Platform Manipulator with Improved Dexterity,” *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 9, No. 2. pp. 166-173.

- Su, Y.X., Duan, B.Y. (2000) "Application of the Stewart platform in large spherical radio telescopes". *Journal of Robotic Systems* v 17 n 7, pp 375-383.
- Tahmasebi, F. and Tsai, L.W. (1995). "On the Stiffness of a Novel Six Degree-of-Freedom Parallel Manipulator," *Journal of Robotic Systems*, vol. 12, No. 12, pp. 220-226.
- Tanev, T. K. (1998). Forward Displacement Analysis of a Three Legged Four-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator. In *Advances in Robot Kinematics*, J. Lenarcic and M. L. Husty, eds., Kluwer Academic, London, pp. 147–154.
- Tarbouriech, S. (2000). Ph. Soueres. Advanced control strategy for the visual servoing scheme. 6th IFAC Symposium on Robot Control SYROCO '00. pp. 457-462.
- Tendick, F., Voichick, J., Tharp, G. and Stark, L. (1987). A Supervisory tele-robotic control system using model-based vision feedback. *Proc. IEEE Trans. Robotics and Automation*, 3(4), pp. 323-344.
- Tsai, K.Y. and Huang, K.D. (2000). "The Design Considerations of Manipulators," *ASME Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering*, Baltimore, 2000.
- Tsai, L.W. (1996). Kinematics of a Three-DoF Platform Manipulator with Three Extensible Limbs. In *Recent Advances in Robot Kinematics*, J. Lenarcic and V. Parenti-Castelli, eds., Kluwer Academic, London, pp. 401–410.
- Tsai, L.W. (1998). Systematic Enumeration of Parallel Manipulators. In *Parallel Kinematic Machines*, C. R. Boer et al., eds., Springer, Berlin, pp. 33–50.
- Tsai, L. W., Walsh, G. C., and Stamper, R. E. (1996). Kinematics of a Novel Three DoF Translational Platform. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Minneapolis, MN, pp. 3446–3451.
- Tsai, L.W. (2000). "Solving the inverse dynamics of a Stewart-Gough manipulator by the Principle of Virtual Work", *ASME Transaction, Journal of Mechanical Design*, Vol. 122, pp. 3-9.

- Tsai, Lung-Wen. (1999). *Robot Analysis: The mechanic of Serial and Parallel Manipulators*, John Wiley & Sons, Inc.
- Tsai K. and Kohli, D. (1990). Modified Newton-euler Computational Scheme for Dynamic Analysis and Simulation of Parallel Manipulators with Applications to Configuration Based on R-L Actuators, *ASME Design Engineering Tech.*
- Waldron, K.J. and Hunt, K.H. (1991). “Series-parallel dualities in actively coordinated mechanisms”. *The Int. J. of Robotics Research*, 10(2):473-480.
- Wang, J. and Masory, O. (1995). On the accuracy of a Stewart platform-part I: The effect of manufacturing tolerances. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 114-120, Atlanta.
- Wang, L.C.T. and Chen, C.C. (1994). On the dynamic analysis of a general parallel robotic manipulators. *Int. J. of Robotics and Automation*, 9(2):81-87.
- Wang, S. (1998). Kinematics and force analysis of a 6 d.o.f. parallel mechanism with elastic joints. In *ARK*, pp 87-96.
- Wang, J., and Gosselin, C.M. (1988). Kinematic Analysis and Singularity Loci of Spatial Four-Degree-of-Freedom Parallel Manipulators Using a Vector Formulation. *ASME Transactions, Journal of Mechanical Design* 120(4):555–558.
- Wang, J., and Gosselin, C. M. (1997). Kinematic Analysis and Singularity Representation of Spatial Five-Degree-of-Freedom Parallel Mechanisms. *Journal of Robotic Systems* 14(12):851–869.
- Weiss, L.E. (1980). *Dynamic Visual Servo Control of Robots: an Adaptive Image-Based Approach*. PhD thesis, Carnegie-Mellon University.
- Weiss, L. E., Sanderson A. C. and Newman, C. P. (1987). Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback, *IEEE J. Robot. Automat.* **RA-3** (5), 404–417.
- Yang, G., Chen, I-M. and Yeo, S.H. (1999). “Design consideration and kinematic modeling for modular reconfigurable parallel robots”. In *10th World*

- Yoshikawa, T. (1985). "Manipulability of robotic mechanisms," *International Journal of Robotics Research*, vol. 4, No. 2, pp. 3–9. *Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, pages 1079-1084.
- Yoshimi, B. and Allen, P.K. (1994). Active, uncalibrated visual servoing. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. San Diego, pp. 156-161.
- Yuan, J.S-C, Keung, F.H.N. and MacDonald, R.A.. (1988). Telerobotic tracker. EP 0 323 681 A1. European Patent Office.
- Zamanov, V.B and Sotirov, Z.M. (1991). "A contribution to the serial and parallel manipulator duality". In *8th World Congress on the Theory of Machine and Mechanisms*, pp. 517-520, Prague, 26-31.
- Zlatanov, D., and Gosselin, C. M. (2001). A Family of New Parallel Architectures with Four Degrees of Freedom. *Journal of Computational Kinematics*, F. C. Park and C. C. Iurascu, eds., pp. 57–66.

