

Diseño del control de un robot de dos grados de libertad para aplicaciones de seguimiento de objetos.

Por

José Rafael Mendoza Vázquez.

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en la especialidad de Electrónica en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

Supervisada por:

Dr. Leopoldo Altamirano Robles

M.C. Jorge Pedraza Chávez.

Tonantzintla, Pue. 2003

Resumen.

Dentro de este proyecto se diseñó el control para un dispositivo orientador de un sistema de visión artificial. El sistema tiene dos grados de libertad. Las aplicaciones de este dispositivo se encuentran en: sistemas de vigilancia, como director de movimiento y para el seguimiento de objetos en movimiento.

El movimiento del dispositivo se basa en la detección del desplazamiento de un objeto (blanco) dentro de una secuencia de imágenes. Para ello, se emplean principios de análisis de imágenes y predictores (Filtro Kalman). El procesamiento de la información (imágenes y señal de retroalimentación) tiene el objetivo de obtener una respuesta inmediata. Como información de entrada se tiene a las imágenes que ayudan para el seguimiento del objeto y como salida datos de posición y velocidad para el control del manipulador.

En el trabajo se describen las características principales del sistema a controlar y sus restricciones. Además se analiza la parte de visión artificial para el seguimiento de un objeto en movimiento. Se analiza la estructura mecánica desde el punto de vista cinemático y dinámico del sistema para obtener un modelo de la planta y reproducirlo en un ambiente de simulación como es MatLab y Dymola. Las técnicas para este caso comprenden la obtención de ecuaciones en la representación de Denavit_Hartenberg y de Lagrange-Euler. Finalmente, se aplican tres diferentes estrategias de control: PID, compensador de adelanto y LQR. Como señal de

retroalimentación para el control de la planta se toma la información de posición y velocidad del dispositivo.

Abstract

The aim of this project is to design the control algorithm of a device with the aim of guide a vision system with two degrees of freedom based on images analysis principles and predictors (Filter Kalman). This system can be use in surveillance systems, in fire director systems and as a tracker for moving objects. The processing of the information must be in real time where the input images will help us to track the object. As output of the processing, the speed and position information to be used for the robot control.

In the work the basic characteristics of the system to be controlled and their restrictions are described. Also computer vision tasks are analyzed for the tracking of a moving object and their relation with the mechanical system. Further more the mechanical structure of the system is analyzed from the kinematics and dynamic point of view in order to obtain a model of the plant and reproduce it in a simulation environment. The equations of the model are obtained using Denavit-Hartenberg representation and the Lagrange-Euler methodology. Finally, three different control strategies are applied: PID, lead compensator and LQR; as feedback signal for the control of the plant, information of position and speed for the manipulator is used.

Agradecimientos.

Deseo expresar un profundo agradecimiento a mis asesores Dr. Leopoldo Altamirano Robles y M.C. Jorge Pedraza Chávez, por su apoyo y confianza para la elaboración de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo y soporte económico para la realización de este trabajo.

Al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), por brindarme la oportunidad de adquirir conocimientos de alto nivel.

A mis sinodales Dr. Arturo Sarmiento Reyes, Dr. Esteban Tlelo Cuautle y Dr. Apolo Zeus Escudero Uribe, por sus valiosas aportaciones para la elaboración de este trabajo.

A mis compañeros por su amistad brindada durante el tiempo de estudio de la maestría en ciencias en Electrónica.

Gracias.

Dedicatorias.

A mis padres, Raymundo Mendoza López y Maria Antonia Vázquez Chávez, que con su ejemplo me enseñaron que el conocimiento es importante para la vida de todo ser humano. Por su paciencia para esperar este momento y su apoyo durante toda mi vida.

Lo dedico a mi esposa, Irma Delia Rojas Cuevas, por que a lo largo de estos años que hemos compartido juntos, me ha dado su amor y confianza. Me mostró que la vida tiene muchas facetas y que todas son hermosas. Que si somos capaces de soñar y creer que no existe imposible, sólo hay metas que lograr.

A mi hijo Carlos Rafael Mendoza Rojas, que día a día me muestra que la vida es hermosa, con su sonrisa y alegría me motiva a ser mejor cada día.

A mis hermanos. Sergio, Maribel y Raymundo que siempre han sido mis amigos y con quien he compartido maravillosos momentos.

Finalmente lo dedico a todas las personas que buscan el éxito en su vida y que jamás se dan por vencidas. Por que siempre tomen en cuenta las palabras de Juan Antonio Razo:

“Con animo y entusiasmo nada te podrá detener.
No veas, no escuches, no hables de lo negativo.
Ve mas lejos que los demás y veras más.
Sonríe a la adversidad y cambiaras tu destino
¡Nunca te des por vencido!”

Índice.

Página.

<i>Resumen.</i>	<i>I</i>
<i>Abstract</i>	<i>III</i>
<i>Agradecimientos.</i>	<i>V</i>
<i>Dedicatorias.</i>	<i>VII</i>
<i>Índice.</i>	<i>IX</i>
<i>Prefacio.</i>	<i>XV</i>
<i>Capítulo 1. Introducción.</i>	<i>1</i>
1.1. Componentes de un robot	2
1.2. Planteamiento del problema	5
1.2.1. Descripción general del sistema.....	7
1.2.1.1 Sistema.....	8
1.3 Objetivos.	11
1.3.1. Objetivo General.....	11
1.3.2. Objetivos específicos.....	11
1.4. Contenido de la tesis.	11

Capítulo 2. Seguimiento de objetos en	15
una imagen	15
2.1. Visión artificial	15
2.2. Sistema de visión artificial	16
2.3. Imagen	17
2.3.1 Características de una imagen.....	18
2.4. Análisis de una imagen	22
2.4.1. Captación de la imagen.....	23
2.4.2. Procesado preliminar.....	23
2.4.3. Separación de regiones.....	24
2.4.4. Nomenclatura de las regiones.....	24
2.4.5. Identificación.....	25
2.4.6. Conclusión cualitativa y cuantitativa.....	26
2.5. Movimiento en una imagen	26
2.5.1. Cinemática del Movimiento.....	27
2.5.2. Seguimiento de un objeto en movimiento en una imagen.....	28
2.5.3. Modelo del objeto en movimiento.....	29
2.5.4. Estimación del movimiento del blanco.....	29
2.5.4.1. Filtro Kalman.....	29
2.5.4.2. Modelo del sistema.....	31
2.5.5. Detector de movimiento empleando correlación.....	35
2.6. Acciones de movimiento	38

Capítulo 3. Modelado Cinemático.	41
3.1. Modelado Cinemático.	41
3.1.1. Descripción de la posición	41
3.1.2. Rotación en el sistema cartesiano	43
3.2. Transformaciones homogéneas.	46
3.3. Componentes y estructura.	47
3.4. Representación de Denavit Hartenberg.	48
3.5. Representación de Denavit Hartenberg para el sistema.	50
Capítulo 4. Modelado dinámico.	59
4.1. Ecuaciones de Lagrange.	59
4.2. Ecuaciones de movimiento.	61
4.2.1. Energía cinética.....	62
4.2.1.1. Jacobiano.....	63
4.2.1.2. Tensor de inercia.....	65
4.2.2. Energía Potencial	66
4.2.3. Procedimiento para calcular las ecuaciones de movimiento de un robot manipulador del tipo cadena cinemática abierta	67
4.3. Modelado del sistema.	68
4.3.1. Modelo dinámico del sistema de dos grados de libertad de articulación independiente.	69
4.3.1.1. Obtención de las ecuaciones.	70
4.3.1.2. Modelo del motor eléctrico.	72
4.3.2. Modelo del sistema de dos y cuatro grados de libertad por transformaciones homogéneas.	75
4.3.2.1. Modelo de del sistema de dos grados de libertad.....	76

4.3.2.2. Extensión del modelo de dos grados de libertad a cuatro grados de libertad.	79
---	----

Capítulo 5. Control de movimiento del sistema. 83

5.1. El problema del control.	84
5.2. Control clásico PID.	87
5.2.1. Respuesta a una entrada tipo pulso cuadrado (retroalimentación por posición).....	88
5.2.2. Respuesta a una ruta establecida (retroalimentación por posición).	89
5.2.3. Respuesta a una entrada tipo pulso (retroalimentación por velocidad)....	90
5.2.4. Análisis del controlador PID.	91
5.3. Controlador de compensador de adelanto.....	92
5.3.1. Respuesta a una entrada tipo pulso (retroalimentación por posición).....	93
5.3.2. Respuesta a una entrada de referencia(retroalimentación por posición)...	94
5.3.3. Respuesta a una entrada tipo pulso (retroalimentación por velocidad)....	95
5.3.4. Análisis del control empleando compensador de adelanto.	96
5.4. Regulador cuadrático.	97
5.4.1. Respuesta a una entrada tipo pulso (retroalimentación por posición).....	98
5.4.2. Respuesta a una entrada de referencia(posición).	99
5.4.3. Respuesta a una entrada de referencia(retroalimentación por velocidad).	100
5.4.4. Análisis del control empleando regulador cuadrático.	101
5.5. Análisis comparativo del control de la planta.	101
5.5. Algoritmo de control.	102

<i>Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro.</i>	105
6.1. Conclusiones.	105
6.1. Trabajo futuro.....	107
<i>Apéndice A. D(q).</i>	109
<i>Apéndice B. C(q)</i>	111
<i>Apéndice C.</i>	115
<i>Apéndice D.</i>	119
<i>Lista de figuras.</i>	127
<i>Lista de tablas.</i>	131
<i>Referencia bibliográfica.</i>	133
<i>Referencia bibliográfica complementaria.</i>	135

Prefacio.

Las máquinas conocidas como robots, son importantes en la vida del hombre; tienen la finalidad de ayudar en diferentes actividades como: trabajos repetitivos, manejo de materiales peligrosos y actividades que superan las capacidades naturales del ser humano. A fin de dar una solución a estas actividades, el ser humano diseña y construye dispositivos para estas tareas, además busca mejorar su desempeño con la aplicación de tecnología de vanguardia (visión artificial y respuesta inmediata).

Un ejemplo de estos sistemas es el sistema orientador para seguimiento de objetos en movimiento. Este sistema tiene dos partes principales: visión y movimiento. Por una parte la visión da la información del desplazamiento del objeto y sirve además como sensor del mundo exterior. Respecto a la parte de movimiento, la acción motora debe ser capaz de interpretar las órdenes enviadas por la parte de visión para seguir el movimiento del objeto. El sistema debe ser capaz de seguir el movimiento del objeto a fin de no perderlo dentro de la imagen que proporciona la cámara de video. Por esto, se busca que las actividades de control se desarrollen suficientemente rápido, es decir, con respuesta inmediata. Así también se busca que la respuesta que proporcione el control se ajuste a las contingencias del medio, como son las perturbaciones. Actualmente, con los avances en procesamiento de la información, equipo de computo, electrónica y tecnología de visión por computadora, esta actividad es posible. Una forma de lograr una alta precisión en estos sistemas, es diseñando sistemas electromecánicos que se conocen como servocontroles visuales.

En estos sistemas se utiliza: una cámara de video, un sistema motor que generalmente es eléctrico y equipo de computo empleado para el procesamiento de la información. Para su diseño se aplican disciplinas como

son: análisis de imágenes, cinemática, dinámica, teoría de control y cómputo en tiempo real.

Actualmente, la mayoría de los dispositivos, no cuentan con visión artificial, lo que limita su capacidad de interactuar con el medio que los rodea, además, su respuesta no es de forma inmediata, esto debido a que el procesamiento de la información para ejecutar los movimientos emplea un tiempo considerable entre el estímulo y la respuesta, lo que no se considera como tiempo real.

Para este trabajo, se desarrolló un sistema de control para un dispositivo orientador que tiene un sistema de visión artificial teniendo en cuenta que la respuesta debe ser en forma inmediata. Este trabajo surge con la necesidad de contar con tecnología propia en México y reducir la dependencia con el extranjero.

Entre las aplicaciones de este tipo de dispositivo, se pueden mencionar: como director de tiro para sistemas de armamento, como sistema de vigilancia, y como seguidor de objetos en movimiento.

Capítulo 1. Introducción.

En el proceso de recibir y utilizar información, una máquina requiere de sensores a fin de recibir la información del medio que la rodea; con ello es posible realizar los ajustes necesarios conforme a su tarea programada. Con la información adecuada, la máquina tiene la capacidad de responder de forma inmediata sobre el objetivo de su análisis. Así, se diseñan máquinas, cuyo comportamiento esta regulado por la información del mundo exterior. Para ilustrar esto, se tiene la figura 1.1., donde se muestra el caso de un sistema de seguimiento de objetos en movimiento.

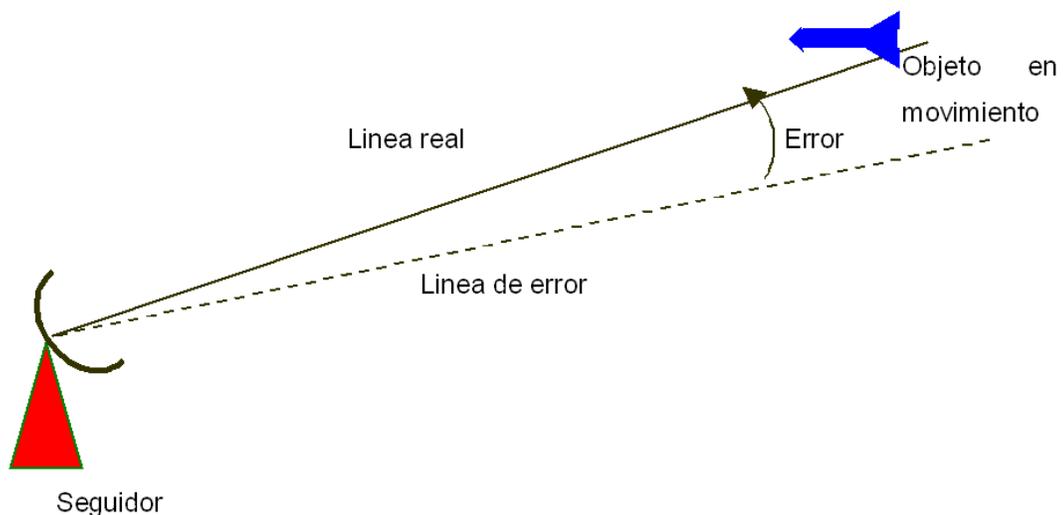


Fig. 1. 1. Sistema seguidor de objetos en movimiento.

En este sistema, las etapas entre la recepción de un mensaje mediante los sensores y la ejecución de una tarea pueden ser muy simples, como en el caso de la apertura de una puerta.

Por otra parte las acciones pueden ser complejas. Una acción compleja es aquella en que los datos introducidos, que llamaremos entrada, implican un gran número de combinaciones para obtener un efecto, que llamaremos salida sobre el mundo exterior. Esta última es la combinación de los datos recibidos en ese momento y de los hechos registrados en el pasado, que llamaremos memoria y que guarda el dispositivo.

En la búsqueda de las soluciones a los problemas que comprenden la visión humana en su percepción y tratamiento de la información, se parte de criterios generales. Debido a las características propias del sistema a desarrollar, las actividades que se llevan a cabo con los sistemas de visión se ven comprendidas en lo que se conoce como Inteligencia artificial, ya que cumplen con las características de: percepción, cognición y acción.

1.1. Componentes de un robot.

El ser humano, por siglos ha diseñado y construido máquinas especializadas. Éstas tienen la finalidad de realizar actividades similares a las que efectúan varias partes del cuerpo humano. Su aplicación se ubica en: actividades repetitivas, actividades que requieren gran esfuerzo, o actividades de elevada precisión. A este tipo de máquinas generalmente se les conoce como robots¹. Cuando se habla de robots, en muchas ocasiones se imagina a máquinas de apariencia humana que pueden tener sentimientos y sensaciones del mundo que los rodea y que pueden interactuar de manera dinámica [OA2001]. En la realidad encontramos que

¹ Un robot es una máquina para propósitos generales, en caso contrario la máquina adquiere el nombre del propósito específico.

son de varias formas, tienen diferentes usos y configuraciones, dependiendo de su aplicación.

En la figura 1.2. se muestra el esquema de un robot. En esta se identifican como partes componentes: sistema mecánico, actuadores, fuente de alimentación, sensores internos y externos, herramienta final, además de la computadora que generalmente aloja el sistema de control.

Dentro del sistema mecánico se encuentra: el brazo, que es el elemento mecánico que ubica en el espacio al elemento terminal. Los elementos rígidos del brazo (eslabones) están relacionados entre sí mediante articulaciones, las cuales pueden ser giratorias (revolutas) o deslizantes (traslacionales).

El grado de libertad de un dispositivo depende del número de parámetros independientes que fijan la situación de la herramienta final. El número de grados de libertad suele coincidir con el número de eslabones de la cadena cinemática. Típicamente cada unión posee seis parámetros independientes, tres para posicionamiento y tres para orientación. En este caso el sistema tiene dos uniones, cada una de las uniones se encuentran limitada en cinco parámetros y solo permiten el parámetro de rotación, para lograr una configuración esférica.

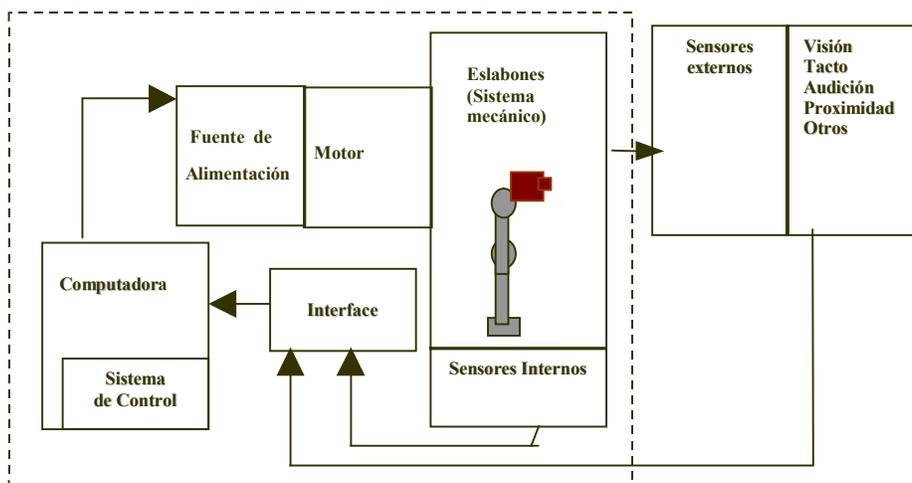


Fig. 1. 2. Robot y su interacción con el entorno

El controlador, es el dispositivo que se encarga de regular el movimiento de los elementos del sistema, y de todo tipo de acciones, cálculos, procesos de información, y mantiene registro de los sensores de posición o velocidad del sistema.

El sistema de control puede ser de varios tipos. Esto involucra diferentes parámetros de control tales como posición, velocidad, fuerza, etc. Como variables controladas del sistema se tiene a su posición y velocidad. De acuerdo a la variable de control se utilizan diferentes algoritmos de control como son control clásico, control predictivo, control robusto, etc. El controlador de posición busca ubicar al elemento terminal, llevándolo a una posición final deseada. Esta puede ser, siguiendo una trayectoria o posionándose punto a punto. El controlador por velocidad busca controlar la velocidad de desplazamiento del sistema (este, también tiene capacidad de determinar la posición: por ejemplo integrando las variables de velocidad).

El control, además de lo indicado, también considera la variación de las características del sistema como es fricción, amortiguamiento viscoso, etc., al variar su inclinación respecto a su posición inicial. En todos los casos anteriores se debe considerar el control en lazo abierto (no retroalimentado) o lazo cerrado (retroalimentado) ya sea por la variable de posición o velocidad. En el primer caso la señal de control se obtiene directamente de la entrada de mando, sin verificar si el resultado final se ha reproducido con exactitud o se ha cometido un error al ejecutarse. En el caso de retroalimentación, se utiliza un sensor para medir su salida (posición o velocidad), ésta información se retroalimenta y compara con la señal de mando, la diferencia (también conocida como error), es la señal para controlar el dispositivo, con ello se garantiza lograr la señal de mando deseada.

Los elementos actuadores se encargan de mover las articulaciones o eslabones, a través de cables, poleas, cadenas, engranajes, etc. La

clasificación de los actuadores se realiza de acuerdo al tipo de energía que utilizan: neumáticos, emplean el aire comprimido como fuente de energía y se utilizan para controlar movimientos rápidos pero de no mucha precisión; hidráulicos, se utilizan cuando se requiere una gran capacidad de carga, junto con una precisa regulación de velocidad; y eléctricos, son los que más se utilizan, por su control fácil y preciso, también por las ventajas del funcionamiento mediante energía eléctrica.

El elemento terminal del sistema (herramienta final), es una herramienta acoplada según sea la necesidad, ésta será la encargada de concretar la tarea. Por lo general deberá soportar una elevada capacidad de carga, y al mismo tiempo convendrá que sea de reducido peso y tamaño.

Los robots de última generación pueden interactuar con el medio de una manera más inteligente, es decir relacionarse eficazmente con el entorno y tomar decisiones para una respuesta inmediata, adaptando el plan de acción a las circunstancias de cada momento, todo esto gracias a los diferentes sensores que les brindan información de posición, velocidad, aceleración, fuerza, dimensiones de objetos, temperatura, etc. De esta manera, con la información actualizada permanentemente, los robots tienen capacidad de responder en forma inmediata.

1.2. Planteamiento del problema.

En los sistemas actuales para vigilancia y/o seguimiento de objetos en movimiento, se incorpora una cámara de video como sensor al exterior. En estos sistemas se busca incorporar el control electrónico automático para tener una respuesta inmediata al movimiento del blanco y lograr mantenerlo al centro de la imagen. En este tipo de sistemas se presentan situaciones como oscilaciones, sobretiro y vibraciones en el movimiento de sus eslabones. Por ello se busca que el sistema tenga una respuesta controlada, eliminando éstos problemas a fin de lograr un alto desempeño.

Dentro de los servo controles visuales, el proceso de recibir y utilizar información, consiste en ajustarse a las contingencias de nuestro medio para desempeñarse de manera efectiva dentro de él. Para un desempeño efectivo del sistema, se requiere realizar cálculos y análisis de sus entradas.

Una característica de los sistemas actuales es que deben trabajar como sistemas de respuesta inmediata (o de tiempo real), estos se pueden definir de la siguiente forma: los sistemas en tiempo real son sistemas donde el tiempo en que se produce su salida es poco significativa. Ésto es debido a que generalmente la entrada corresponde a algún instante del mundo físico y la salida tiene relación con ese mismo instante. El retraso transcurrido entre la entrada y la salida debe ser lo suficientemente pequeño para considerarse una respuesta inmediata útil.

Dentro de cualquier sistema de respuesta inmediata se distinguen dos aspectos importantes que son el espacio y el tiempo. En el aspecto espacio tenemos que los sistemas tienen contacto con el mundo físico a través de los “sensores” por ejemplo de posición, los cuales pueden ser de muy variadas características. En relación con el tiempo tenemos como limitante que la ejecución de la tarea debe ser de forma inmediata al estímulo de entrada.

Debido a lo anterior tenemos que un sistema de respuesta inmediata tiene los siguientes elementos: sistema de control, sensor, actuador, interacción y comportamiento con el mundo físico. En estos sistemas, la percepción visual es de alto interés para emular la actividad del ojo humano en combinación con el procesamiento del cerebro.

Como problema a resolver se busca lograr el control de un dispositivo orientador de un sistema de visión artificial en configuración cámara en mano (en la configuración cámara en mano, la cámara es parte del dispositivo y se ubica conforme al movimiento de los eslabones), con una respuesta rápida, precisa, que no tenga oscilaciones, y sin sobretiro. El problema principal consiste en controlar el dispositivo a fin de mantener a un objeto en

movimiento (blanco) dentro de la secuencia de imágenes que proporciona la cámara de video y realizar los ajustes necesarios.

1.2.1. Descripción general del sistema.

Debido a que en la actualidad existen importantes avances en equipo de cómputo y tecnología de procesamiento de imágenes por computadora, es posible realizar diversas actividades en tiempo real (por ejemplo seguimiento de objetos). Un ejemplo de sistema en tiempo real es un servo control visual. Dentro de un servo control visual se reúnen varias disciplinas como son: análisis de imágenes, cinemática, dinámica, teoría de control y cómputo en tiempo real.

Un servo control visual es un sistema que emplea la información visual de una secuencia de imágenes para obtener la información de retroalimentación necesaria a fin de controlar el movimiento de un mecanismo y encontrar su comportamiento adecuado en el espacio visual.

El sistema de visión artificial esta compuesto por una cámara de video en configuración cámara en mano y tarjeta de captura de imagen la cual provee información para ser procesada y obtener la posición de un objeto a fin de verificar las diferencias entre la posición anterior y la actual.

En un sistema de servo control visual como se muestra en la figura 1.3. se tienen los siguientes componentes: planta (robot), cámara de video (sensor en configuración cámara en mano), equipo de procesamiento (computadora), algoritmos de control, electrónica de potencia, controlador y fuente de alimentación.

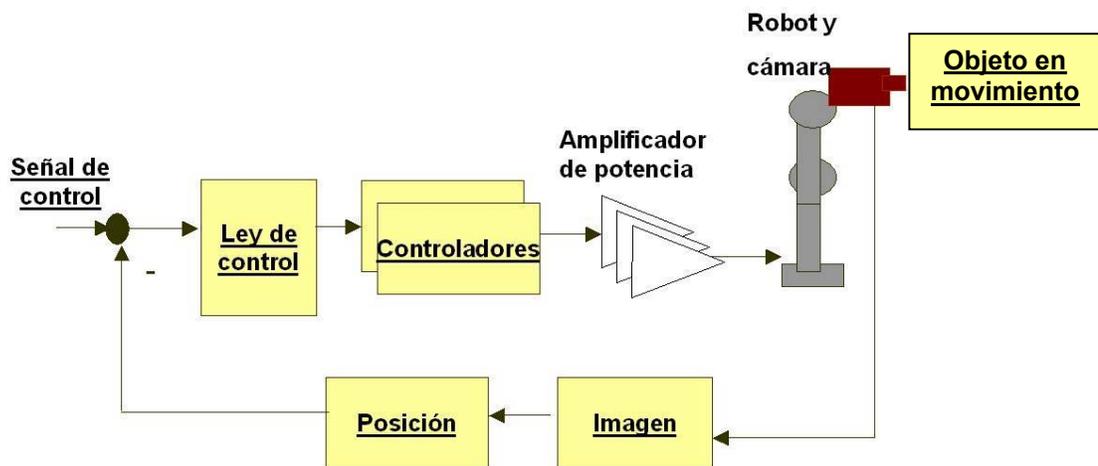


Fig. 1. 3. Elementos de un servo control visual.

1.2.1.1 Sistema.

El sistema a controlar está compuesto por un sistema de dos grados de libertad en configuración esférica [OA2001]. Su principal característica es que tiene dos movimientos, un movimiento en rotación (ronza) y un segundo en elevación, y se usa preferentemente para sistemas de seguimiento de objetos. Generalmente se monta en él una cámara de video para el seguimiento de objetos.

El sistema tiene dos uniones o ejes sobre los cuales puede rotar. Éstas uniones se denominan *pan* y *tilt*. En el sistema, el movimiento en *pan* es del tipo rotación (ronza). Para el caso del movimiento en *tilt* el movimiento es del tipo elevación.

El movimiento en ronza puede rotar 360 grados, pero el movimiento de elevación esta restringido a una elevación de hasta 115 grados. Por medio de sensores de posición digitales se mide la posición equivalente en ambos eslabones. En este trabajo se propone la estimación de la posición del objeto en movimiento empleando un Filtro Kalman, además se busca la orientación de la cámara acorde al movimiento del objeto.

En relación con el control del sistema, se pueden encontrar dos aplicaciones principales: a) búsqueda, b) seguimiento de objetos en movimiento. En búsqueda, se trata de ubicar al dispositivo de tal forma que siga un determinado número de puntos con respecto a una referencia global o local. Con relación al seguimiento, el dispositivo debe seguir y mantener un blanco dentro de su campo de visión.

El esquema robótico visual del sistema, se muestra a continuación en la Figura 1.4. En este esquema se detectan varias partes entre las cuales se distinguen: predictor, con el cual se establecerá la trayectoria de los movimientos y la posición del objeto a seguir; controlador (que puede ser una computadora), sistema mecánico (eslabones), fuente de alimentación, y la videocámara. La videocámara es el sensor que proporciona la información para el control del sistema. Con estos datos se establecen comandos de acción, o control del sistema a fin de seguir al objeto. Con esta información es posible ajustarse a las contingencias de nuestro medio.

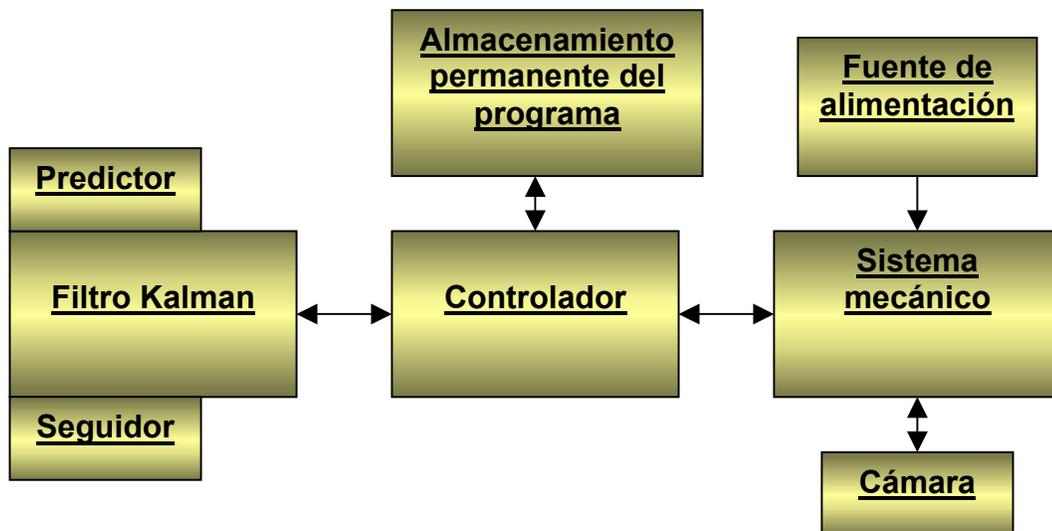


Fig. 1. 4. Elementos de un sistema robótico-visual.

El sistema tiene las siguientes características: fuente de potencia eléctrica, arquitectura poliarticulada, procesamiento de la información empleando computadora, sistema de visión artificial, ver Figura 1.5.



Fig. 1. 5. Dispositivo manipulador

En este trabajo, se busca solucionar el control para orientar una cámara de video y el seguimiento de objetos. Una característica que debe tener este sistema es que debe trabajar como sistema de respuesta inmediata. Las diferentes situaciones que se presentan para el control de los servo controles visuales requieren la búsqueda de soluciones específicas como lograr un posición determinada. En esta búsqueda y por las características propias del sistema, se requiere de su análisis y modelado.

1.3 Objetivos.

Para este trabajo los objetivos a desarrollar son:

1.3.1. Objetivo General.

Diseñar el control para un sistema de dos grados de libertad que orientará una cámara de video.

1.3.2. Objetivos específicos.

Como parte de este trabajo se plantean los siguientes puntos a desarrollar:

1. Diseñar un sistema para el seguimiento de objetos que permita determinar la trayectoria empleando análisis de imágenes.
2. Emplear el Filtro Kalman para estimar el movimiento del blanco en movimiento.
3. Obtener el modelo de la planta empleando la representación de Denavit-Hartenberg y el Lagrangiano.
4. Simular el modelo de la planta, diseñar y analizar el control.
5. Diseñar un sistema de seguimiento de objetos utilizando control PID, compensador de adelanto y regulador cuadrático.
6. Emplear dos sistemas de aproximación, el primero basado en posición y el segundo empleando velocidad.
7. Comparar los tipos de control para identificar el tipo de control más adecuado.
8. Realizar la propuesta del algoritmo de control para el dispositivo.

1.4. Contenido de la tesis.

Dentro de este trabajo se diseñó un control para un dispositivo orientador que responde adecuadamente a las señales de entrada y características propias del sistema.

Además se realizó el modelado de la planta. Para el modelado del dispositivo y obtención del control, se utilizó Maple, MatLab y Dynamic Modeling Laboratory (Dymola), con las características de operación del sistema lo más cercano a la realidad. Para ello se pueden emplear varias técnicas. Las técnicas para este caso comprenden la obtención de ecuaciones de la planta en la representación de Denavit_Hartenberg y el Lagrangiano.

La tesis está dividida en cinco partes:

Capítulo I: Se plantea la información sobre el sistema a controlar y sus principales partes, así como el problema a resolver.

Capítulo II: Se analiza la parte de procesamiento de imágenes para el seguimiento de un objeto en movimiento y la transformación de posición del blanco del sistema de coordenadas al sistema mecánico.

Capítulo III: Se analiza la estructura mecánica desde el punto de vista cinemático para identificar un modelo así como su representación gráfica simplificada y en 3D. En esta no se incluyen los efectos mecánicos y de gravedad. Esta representación proporciona la posición y orientación del sistema. Con ello es posible visualizar los movimientos que se pueden desarrollar.

Capítulo IV: Se obtienen dos modelos dinámicos del sistema: como modelo de articulación desacoplada y como conjunto total. Empleando para esto, la Metodología del Lagrangiano, definiendo ventajas y desventajas de los modelos para tomar como base de simulación uno de ellos. En este caso

se incluyen los efectos de fricción, viscosidad, y otros parámetros que afectan al sistema.

Dentro del modelado es posible modificar los parámetros de operación y analizar como responde el sistema. De esta forma tenemos una representación del sistema para realizar pruebas y verificar su operación. También apoya la comprensión del manipulador y las restricciones de operación en la realidad. El modelado nos permite conocer sus características de operación y sus respuestas ante una entrada, y nos da la capacidad de tomar decisiones respecto al tipo de control a emplear sin interactuar directamente con la planta. Con ello se conocerá su desempeño y además se podrán verificar diferentes tipos de control para la planta.

Capitulo V: Se trata sobre el problema de control de movimiento, tomando para ello tres diferentes estrategias de control (PID, compensador de adelanto, LQR) y dos tipos de retroalimentación (por posición y por velocidad). También se presentan los resultados de las simulaciones con Dymola.

Capitulo VI: Se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

Capitulo 2. Seguimiento de objetos en una imagen.

2.1. Visión artificial.

Cuando se habla de la acción del ser humano de “ver su entorno e interpretarlo”, resulta una actividad sencilla y simple. En cambio para las máquinas representa acciones complejas en las cuales deben existir los elementos adecuados para percibir el medio, compararlo con información preestablecida y realizar acciones según las indicaciones programadas. Para lo anterior se requiere gran cantidad de procesos, los cuales deben ser implementados adecuadamente con la finalidad de lograr el objetivo establecido.

El hombre dentro de su mundo es capaz de percibir mediante todos sus sentidos; el cerebelo y el sistema nervioso coordinan los informes que reciben, hasta que, después de almacenarlos, relacionarlos y seleccionarlos, resurgen otra vez mediante órganos de ejecución, generalmente los músculos y articulaciones. Estos a su vez actúan sobre el mundo exterior y reaccionan sobre el sistema nervioso central; la información que estos proporcionan cambia con la acumulación de vivencias pasadas influyendo sobre las acciones futuras. Damos el nombre de información al contenido de

lo que es el objeto de intercambio con el mundo externo, mientras nos ajustamos a él y hacemos que se acomode a nosotros.

Dada la capacidad de las computadoras para el procesamiento de datos a altas velocidades, Éstas permiten manejar gran cantidad de información empleando procedimientos automáticos, ello beneficia directamente el procesamiento de información en forma visual, lo que se conoce como visión artificial [PG2001].

En este caso la visión artificial se maneja como la transferencia a las máquinas de la capacidad de percibir el medio ambiente que los rodea, en este caso se trata de que “vean” solo lo necesario, es decir, percibirlo, analizarlo y procesar la información.

La visión artificial lleva asociada una enorme cantidad de conceptos relacionados con hardware, software y también con desarrollos teóricos.

2.2. Sistema de visión artificial.

Un sistema de visión artificial, como se puede ver en la figura 2.1, esta compuesto por los siguientes elementos de hardware:

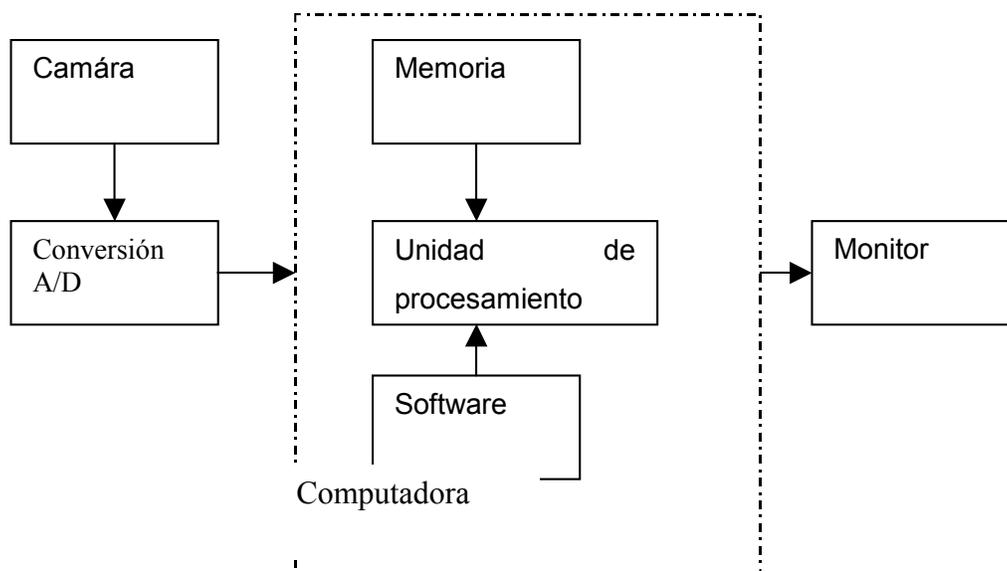


Fig. 2. 1.Sistema de visión artificial típico.

Cada una de las partes tiene una función en específico:

Sensor óptico, el cual generalmente es una cámara de video (de aquí en adelante también indicada como cámara). La captura de imágenes se realiza primero con la interacción de un dispositivo (cámara) que capta la imagen con el exterior o realidad, la cámara es un dispositivo capaz de capturar una imagen de la realidad que nos rodea con la finalidad de procesarla, analizarla e interpretar sus componentes.

Tarjeta de conversión analógica digital. Es una tarjeta que adquiere la información que le envía la cámara, el software de captura de imagen establece los detalles y características de la imagen. Cuando se desea usar video existen múltiples opciones de sistemas y cambios entre ellos.

Computadora: Como resultado de la digitalización de la imagen, se obtiene información que debe ser almacenada en la memoria de la computadora para su posterior procesamiento. El procesamiento se lleva a cabo empleando software adecuado. Para ello se emplean algoritmos que proporcionan la información requerida a partir de la imagen.

Monitor de video. Este dispositivo permite desplegar o mostrar las imágenes o escenas como resultado del procesamiento de las imágenes.

2.3. Imagen.

La visión humana percibe y comprende el mundo que lo rodea con facilidad. En cambio una computadora intenta duplicar el efecto empleando la electrónica, todo ello para dar a una computadora la habilidad de “ver” y “distinguir” lo que ve, por lo que no es una tarea fácil.

Una imagen es la representación de la realidad de tres dimensiones (3D) en dos dimensiones (2D), esta puede ser por ejemplo, una foto, o imagen digital como la que se muestra en la figura 2.2. La intensidad de la imagen en 2D es el resultado de la perspectiva de la proyección (profundidades).

Ésta tiene puntos discretos que se encuentran asociados con los niveles de gris o brillo. Por naturaleza son estadísticas y representan procesos estocásticos, ya que varían sus propiedades de imagen a imagen por ende no existen dos imágenes idénticas.



Fig. 2. 2.Imagen digitalizada. Tomada de MatLab Toolbox Image Processing.

2.3.1 Características de una imagen.

La realidad que nos rodea existe en tres dimensiones y el sistema de visión tiene a la computadora como herramienta para el procesamiento de imágenes y a la cámara de video como sensor quien proporciona las imágenes en dos dimensiones. Debido a que las imágenes están en dos dimensiones se pierden detalles importantes, los cuales pueden ser subsanados empleando algoritmos adecuados que pueden obtener las características cualitativas y cuantitativas de las imágenes.

Las características de una imagen se pueden resumir en:

- Nivel de brillo. Es la variación en el nivel de gris que sufre un *pixel* no debida a la aportación de luz de la escena. Puede estar correlacionado y no correlacionado.

- **Contraste.** Es la variación o diferencia que existe entre los niveles de gris entre diferentes partes de la imagen.
- **Nitidez.** Es la respuesta en nivel de gris de la imagen ante cambios bruscos en la iluminación de la escena captada.
- **Color.** Dependiendo del tipo de sensor empleado, la imagen digitalizada será en color (tres canales) o solo gris (un canal).

De la misma manera, una imagen digital esta compuesta por *píxeles*, éstos representan la parte básica y se representan por medio de pequeños recuadros (como una matriz de información), cada uno adquiere las tonalidades y luminosidad de las propiedades que lo componen. Es decir en una pequeña región ampliada para ver sus píxeles en una secuencia de imágenes, permite ver los cambios por el movimiento que existe en una secuencia de imágenes. Cada grupo de píxeles representa una zona o región, la cual esta referida por medio de sus coordenadas dentro de la imagen. Con este principio, es posible definir donde existe movimiento en la secuencia de imagen por medio de la verificación del cambio en la luminosidad, colores y estructura del píxel de una imagen a otra.

Generalmente existen dos niveles en las imágenes, bajo nivel de imagen procesado y la búsqueda de un alto nivel de entendimiento de la imagen. El alto nivel de procesamiento busca imitar a la visión humana y su interpretación, además de su contenido semántico. Para ello se extrae información en reiteradas ocasiones y con ella se clarifica el conocimiento que se desea obtener. La meta principal en un sistema de visión es resolver problemas complejos y obtener resultados similares a los obtenidos por sistemas biológicos.

El muestreo es el arreglo de dos coordenadas en el plano. Significa que existe un arreglo bidimensional en el cual existe una matriz de $M \times N$, la cual relaciona los datos de la imagen. La discretización de una imagen es el producto de una función de muestreo y una representación continua. En esta representación el píxel es la parte elemental de una imagen. Un conjunto de píxeles definen una región en la cual existen los contornos y la región que rodea los contornos. Mientras más grande sea el muestreo, más se aproxima a la realidad que ve el ojo humano y más detalles se obtienen de ella. Un ejemplo de esto lo podemos apreciar en la figura 2.4, donde encontramos una imagen de 640 X480 donde se pueden apreciar mejor las formas y los detalles de la imagen en contra de la imagen que tiene 320X240 píxeles.



a) Imagen digitalizada con 640X480 píxeles



b) Imagen digitalizada con 320X240 píxeles

Fig. 2.3. Se muestran dos imágenes digitales de la misma escena con diferente muestreo a) 640X480, b) 320X240.

Los parámetros que afectan la calidad de una imagen dentro de un sistema son:

- Resolución. Es la medición de calidad con que reproduce el sistema los detalles del objeto.
- Contraste. Es la diferencia que existe en niveles de gris entre los objetos componentes de una imagen y su fondo.
- Profundidad del campo. Es la diferencia entre las distancias lejanas y cercanas en un objeto en un espacio que pueda ser percibido.
- Distorsión. Es un error óptico comúnmente conocido como aberración que causa diferencias en la magnificación de diferentes puntos de la imagen y su profundidad.

- Errores de perspectiva. Es un error convencional de los lentes que causa cambios en las magnificación, es decir los objetos parecen mas largos o mas cercanos

2.4. Análisis de una imagen.

El sistema de visión por computadora tiene que trabajar con los objetos en movimiento o cambio de iluminación, esto como resultado de estar inmersos en un ambiente que cambia constantemente. Todo lo que nos rodea y está en la vista, forma la escena dinámica. La entrada al análisis de escena dinámica es la secuencia de imágenes tomada del exterior. La cámara de video que se usa para obtener esta secuencia también puede estar en movimiento. Cada imagen representa la escena en un instante particular del tiempo. Los cambios en la escena pueden proceder del movimiento de la cámara, de los objetos en movimiento, cambios en iluminaciones, o cambios en la estructura, tamaño, forma de objeto, etc.

El sistema tiene que detectar los cambios, determinar las características del observador y los objetos en movimiento, caracterizar los mismos usando la abstracción de nivel alto, explorar la estructura de objetos y reconocerlos. Éstas imágenes contienen la información importante del ambiente, del mundo físico incluyendo la profundidad, orientación de superficie, estructura y movimiento de objetos en espacio. En el contexto del análisis de la escena dinámica, los esquemas del entendimiento de la visión tienen que relacionarse con sus propias herramientas para la segmentación espacio-temporal y el análisis de movimiento.

Para el análisis de imágenes se propone el procedimiento que se muestra en la figura 2.4.



Fig. 2. 4. Procedimiento para el análisis de una imagen.

A continuación se explican éstas partes dentro del análisis de imágenes:

2.4.1. Captación de la imagen

Es el proceso a través del cual se obtiene una imagen visual. El primer paso en el proceso es adquirir la imagen digital. Para ello necesitamos sensores y la capacidad para digitalizar la señal producida por el sensor. El sensor puede ser una cámara de video, a color o monocromática que produce una imagen completa del dominio del problema por ejemplo cada 1/30 segundos, enseguida una tarjeta adquiere la información que le envía la cámara, a continuación el software de captura de imagen establece los detalles y características de la imagen.

2.4.2. Procesado preliminar.

Una vez que la imagen digitalizada ha sido obtenida el siguiente paso consiste en el preprocesamiento de dicha imagen. La mejora de imágenes recibe el nombre de técnicas de preprocesamiento. Incluye técnicas tales como la reducción de ruido y realce de detalles. El objetivo del preprocesamiento es mejorar la imagen de forma que el objetivo final tenga mayores posibilidades de éxito.

2.4.3. Separación de regiones.

La separación de regiones o segmentación, es el proceso que divide una imagen en áreas (objetos) que sean de nuestro interés. Definida en un sentido amplio, su objetivo es dividir la imagen en las partes que la constituyen o los objetos que la forman. En general la segmentación automática, es uno de los problemas más difíciles en el procesamiento de la imagen. Por una parte, una buena segmentación facilitará mucho la solución del problema, por otra parte la segmentación errónea conduce al fallo. En este caso el objetivo de la segmentación es extraer las características necesarias para seguir a un objeto en movimiento y separarlo de las otras partes de la imagen. El concepto de segmentación se puede definir como: una segmentación completa de una imagen R es un conjunto finito de regiones R_1, \dots, R_s tales que todas las regiones son componentes de la imagen.

El proceso de segmentación se encarga de evaluar si cada píxel de la imagen pertenece o no al objeto de interés. Esta técnica de procesamiento de imágenes genera una imagen binaria, donde los píxeles que pertenecen al objeto se representa con un “uno” (1), mientras que los que no pertenecen al mismo se representan con un “cero”(0). Este tipo de segmentación está basado en el análisis de alguna característica de la imagen, tal como los niveles de gris o la textura.

2.4.4. Nomenclatura de las regiones.

Es el proceso mediante el cual se obtienen características convenientes para diferenciar un tipo de objeto de otro, por ejemplo: tamaño y forma. La salida del proceso de segmentación es una imagen de datos que o bien contienen la frontera de la región o los puntos de ella. Se necesita ahora convertir estos datos a una forma que sea apropiada para el ordenador. La primera decisión es definir si se usa la representación por frontera o por región completa. La representación por frontera es apropiada

cuando el objetivo se centra en las características de la forma externa como esquinas o concavidades y convexidades y la representación por región. Una región, en una imagen, es un grupo de píxeles conectados que tienen propiedades similares. Es obvio que las regiones son importantes para la interpretación de las imágenes pues corresponden a objetos en la escena o imagen analizada. Una imagen puede contener varios objetos y además cada objeto puede contener varias regiones las cuales corresponden a partes del mismo y a su vez del todo.

La elección de una representación es sólo una parte de la transformación de los datos de entrada. Necesitamos especificar un método que extraiga los datos de interés. La descripción, que recibe también el nombre de selección de rasgos se dedica a extraer rasgos que producen alguna información cuantitativa de interés o rasgos que son básicos para diferenciar una clase de objetos de otra. Para que una imagen pueda ser interpretada correctamente, tiene que ser dividida en regiones que correspondan a objetos o partes de ellos. Sin embargo, debido a los errores de segmentación, la correspondencia entre regiones y objetos no será perfecta y deberemos utilizar conocimiento específico en etapas posteriores de la interpretación de las imágenes.

2.4.5. Identificación.

Es el proceso que identifica a los objetos de una escena. Por ejemplo: diferentes tipos de piezas en un tablero de juego. El primer paso en el análisis para entender una imagen es seccionar la imagen de forma que las regiones que representan diferentes objetos, son marcadas explícitamente. Éstas particiones pueden ser obtenidas a partir de las características de los niveles de gris en la imagen, o utilizando alguna otra característica. Así pues, podría decirse que los valores de gris en las posiciones de la imagen son las observaciones y que los otros atributos, como la pertenencia a regiones, deben obtenerse a partir de los niveles de gris. Existen dos aproximaciones

para particionar una imagen en regiones: segmentación basada en regiones y estimación de la frontera utilizando detectores de bordes.

2.4.6. Conclusión cualitativa y cuantitativa.

En esta etapa, se definen los resultados finales, para ello se emplean los valores de la identificación con un conjunto de valores preestablecidos dentro del procedimiento. Esta etapa permite definir si se ha cumplido con el objetivo del procesamiento de imágenes, que generalmente es buscar en la imagen un objeto en especial. Si los resultados del procesamiento de imágenes son adecuados al objetivo planteado se tiene éxito, que para este caso de seguimiento de objetos empleando correlación proporciona un valor de 1 en caso de máxima correlación y cero en caso contrario.

2.5. Movimiento en una imagen.

Dentro del procesamiento digital de imágenes, se desarrollan las bases teóricas y algorítmicas mediante las cuales se extrae información del mundo real, de manera automática a partir de una imagen observada, de un conjunto de imágenes o de una secuencia.

Tal información pudiera relacionarse con el reconocimiento de objetos genéricos, descripciones tridimensionales del mismo, posición y orientación del objeto o la medición de cualquier propiedad espacial, tal como la distancia entre dos puntos bien definidos o la sección transversal del objeto.

En el análisis de imágenes dinámicas el principal aspecto es el estudio de secuencias de imágenes, cómo las mismas son adquiridas, y cómo son almacenadas. El trabajo se centró en revisar algunas técnicas que permitan cuantificar el movimiento, tomando como punto de partida las técnicas básicas, como cambios en los niveles de gris.

Cuando se habla de movimiento, la primera idea es asociarlo con cambios. En imágenes a niveles de gris estos cambios inicialmente se manifiestan como variaciones de las intensidades de una imagen a la

siguiente. El movimiento se manifiesta como cambios temporales en los valores de gris, pero no se puede afirmar que todo cambio temporal en los niveles de gris, se encuentra asociado a movimiento. Debido a que es posible encontrar variaciones en los niveles de gris, simplemente con cambiar el nivel de iluminación de la escena en estudio. El problema ahora se debe centrar en cómo distinguir los cambios en los valores de gris causados directamente por el movimiento, de aquellos cambios que resultan de la variación del nivel de iluminación.

La estimación del movimiento se encuentra estrechamente relacionada con los cambios temporales y espaciales de los valores de gris. Ambas cantidades pueden ser encontradas con ayuda de operadores locales, los cuales permiten calcular las derivadas espaciales y temporales. El problema que introduce el uso de operadores, es que los mismos solamente analizan un pequeño sector de la imagen.

Para resolver estos problemas u otros que podrían presentar la estimación de movimiento se desarrollan las diferentes técnicas y métodos que se basan principalmente en gradiente y correlación. Aunque estos dos campos son muy usados; también existen otras técnicas basadas en redes neuronales artificiales y en la obtención de fases utilizando filtros.

En este caso se utiliza el algoritmo de correlación que propone [BS99] y se muestra en la figura 2.7.

2.5.1. Cinemática del Movimiento

La cinemática se refiere a la descripción de la trayectoria del movimiento de los objetos. En imagenología discreta no es posible medir la velocidad de un objeto, solo se puede estimar aplicando algunas técnicas específicas como el uso del jacobiano en concordancia con la imagen, otra forma es obtener el intervalo de tiempo entre imágenes consecutivas, una aproximación de la velocidad esta dada por la división del desplazamiento

entre el intervalo de tiempo; lo factible es obtener el desplazamiento entre imágenes consecutivas. De allí la velocidad y el desplazamiento solamente difieren por un factor constante, por lo tanto ambas cantidades describen el movimiento en imagenología.

2.5.2. Seguimiento de un objeto en movimiento en una imagen.

Un sistema típico de detección de movimiento consiste en un detector y un seguidor o rastreador (ver figura 2.5.). Para efectuar el proceso se envían imágenes que al ser procesadas permiten ubicar el objeto en movimiento. Como ejemplo tenemos: correlación, redes neuronales y flujo óptico. En este trabajo se emplea correlación para el seguimiento de un objeto en movimiento.



Fig. 2. 5. Sistema típico de seguimiento.

Para el caso del sistema mostrado, la detección y seguimiento se llevó a cabo empleando correlación. Además se utilizó un estimador de estados conocido como filtro Kalman a fin de predecir la posición del blanco en movimiento.

2.5.3. Modelo del objeto en movimiento.

El modelo dinámico del objeto en movimiento se puede representar por:

$$X_t = X_{t-1} + V_{t-1} * t$$

Donde $X_t = (x_t, y_t)'$ es la posición del blanco y $V_t = (u_t, v_t)'$ es la velocidad que puede ser considerada constante y es resultado de la suma de las velocidades del movimiento del manipulador (u_t) y del blanco (v_t). Para este modelo se empleó un filtro Kalman, con el fin de predecir la ubicación posterior en el movimiento del blanco y realizar la búsqueda de manera efectiva en la imagen posterior analizada.

2.5.4. Estimación del movimiento del blanco.

El empleo de un filtro Kalman se debe a que es un estimador de estados, esto se logra empleando el modelo matemático, conociendo su estructura y parámetros previamente establecidos a partir de algunas mediciones. Con esto se busca determinar las constantes o variables de un sistema en su desarrollo, todo ello de forma óptima con respecto a un índice estadístico. Para ello se emplean las mediciones efectuadas al sistema durante el proceso, es decir las imágenes tomadas se analizaron para el seguimiento del objeto.

2.5.4.1. Filtro Kalman.

El filtro de Kalman [GM2001], también conocido como Kalman-Bucy, es desarrollado dentro de la teoría de control moderno. Está adaptado a la utilización de computadora. Debido a que es un estimador recurrente fácil de programar. Además, el filtro puede generalizarse a estimar señales estadísticas que varían con el tiempo.

El modelo matemático para el filtro Kalman puede resumirse como

$$x(t+T) = \phi(T)x(t) + w(t) \quad \text{Ecuación de estado}$$

$$y(t) = Hx(t) + v(t) \quad \text{Ecuación de medición}$$

$$Q(T) = E[w(t)w(t)^T] \quad \text{Ruido del sistema correlacionado}$$

$$R(T) = E[v(t)v(t)^T] \quad \text{Ruido de la medición correlacionado}$$

Donde:

$x(t)$	variable de interés del sistema
$x(t+T)$	variable del sistema en el tiempo $t+T$
$\phi(T)$	Matriz de transición del sistema
$w(t)$	Ruido del modelo del sistema
$y(t)$	Medición del sistema
$Hx(t)$	Matriz de medición
$v(t)$	Ruido de la medición

El procesamiento del filtro Kalman tiene como objetivo la estimación del vector de estado $x(t_k)$ en el tiempo $t=t_k$ basada en la medición de $y(t)$ para los diferentes tiempos a medir. Con cada nuevo valor se estima la nueva información de un valor futuro. Dentro de este proceso se tiene un conjunto de ecuaciones para realizar los cálculos necesarios:

$$z_k = y_k - H_k \tilde{x}_k \quad \text{Innovación}$$

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k - K_k z_k \quad \text{Estimación}$$

$$\tilde{x}_{k+1} = \phi_k \hat{x}_k \quad \text{Predicción}$$

$$K_k = \tilde{P}_k H_k [H_k \tilde{P}_k H_k^T + R_k]^{-1} \quad \text{Ganancia de Kalman}$$

$$\hat{P}_k = [1 - K_k H_k] \tilde{P}_k \quad \text{Estimación de la covarianza}$$

$$\tilde{P}_{k+1} = \phi_k \hat{P}_k \phi_k^T + Q_k \quad \text{Predicción de la covarianza}$$

Donde

z_k Innovación del sistema

y_k Medición del sistema

H_k Matriz de medición del sistema

\tilde{x}_k Predicción del estado del sistema

\hat{x}_k Estimación del estado del sistema

ϕ_k Matriz de transición del sistema

K_k Ganancia de Kalman

\tilde{P}_k Predicción de la covarianza

\hat{P}_k Estimación de la covarianza

Q_k Matriz de ruido del sistema

Una aplicación común del filtro Kalman es el seguimiento de objetos en el espacio. Las mediciones son hechas en el espacio cartesiano, los errores se consideran independientes y normalmente distribuidos y el comportamiento del blanco se conoce previamente. Con este tipo de filtro debe establecerse el modelo del sistema para estimar su posición y velocidad.

2.5.4.2. Modelo del sistema.

El filtro Kalman para el seguimiento de un blanco, se modeló de una forma simple como el modelo de traslación constante, para esto se

selecciona un punto del blanco que está en movimiento, y se toma en cuenta que todo el objeto está en movimiento aún cuando solo una parte se está monitoreando. En el modelo deben incluirse los componentes de ruido del sistema y de la medición.

El modelo del movimiento del blanco [WP2001] se denota como:

$$x(t+T) = \phi(T)x(t) + w(t)$$

$$\begin{bmatrix} x_1(t+T) \\ x_2(t+T) \\ \dot{x}_1(t+T) \\ \dot{x}_2(t+T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1(t) \\ w_2(t) \\ \dot{w}_1(t) \\ \dot{w}_2(t) \end{bmatrix}$$

Donde $x(t+T)$ es el vector de estado con la consideración de velocidad en el tiempo $t+T$, $\phi(T)$ es la matriz de transición de estado para el intervalo T y $w(t)$ es la componente de ruido aditivo que se asume normalmente distribuido. Entrando en detalles, se consideró que el movimiento del blanco es en el plano coordenado (x_1, x_2) .

Para la medición del sistema de la posición se tiene como vector de medición del blanco a:

$$y(t) = Hx(t) + v(t)t$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1(t)t \\ v_2(t)t \end{bmatrix}$$

En esta expresión H es la matriz de medición y v(t) es la matriz de ruido de la medición, asumida que es independiente del ruido del sistema y normalmente distribuida.

Para este sistema se utilizan las matrices de ruido siguientes, que por medio de experimentación obtuvo [YM2001]:

Matriz de covarianza del sistema

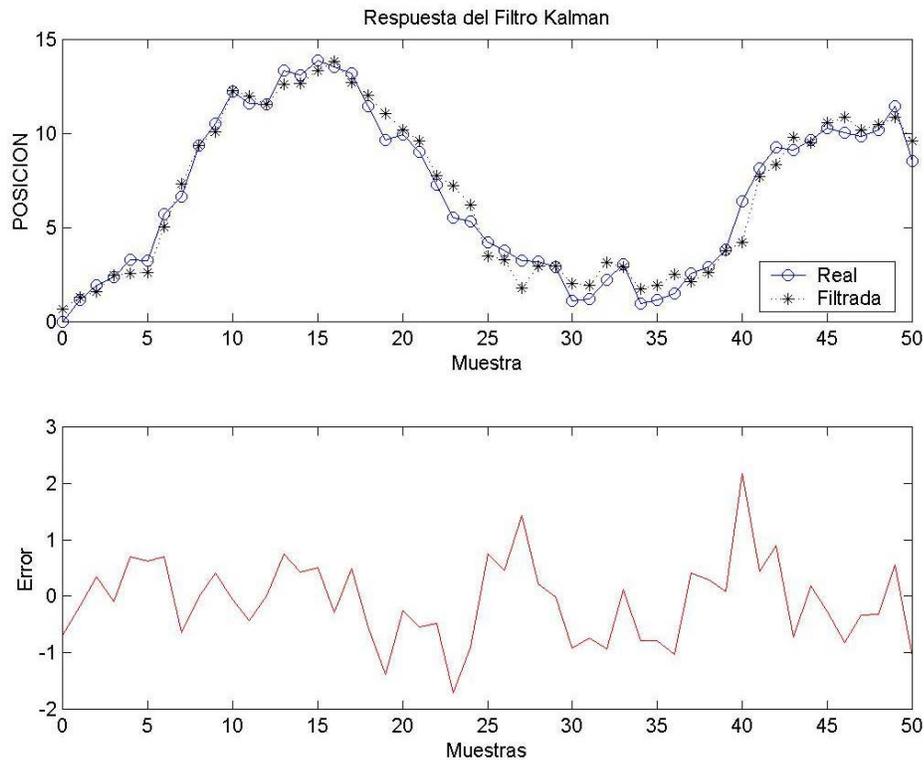
$$Q = \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 1/4 & 0 & 1/2 \\ 1/2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz de covarianza del ruido de la medición

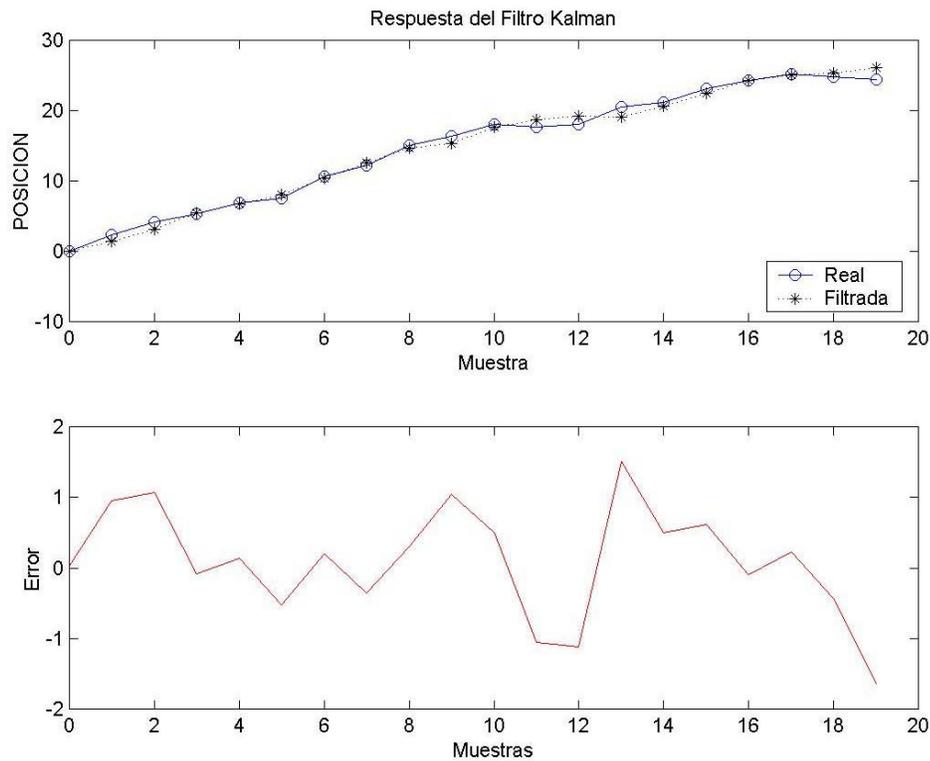
$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El filtro Kalman con sus ecuaciones permite estimar las posiciones del objeto en movimiento. Esto se logra en un ciclo repetitivo conforme al siguiente procedimiento: se toma la medición actual del sistema con este valor se modifica dentro de las ecuaciones de medición del sistema, con este valor y tomando en cuenta la ecuación de estado y de medición, se procede a realizar innovación, estimación, predicción, ganancia de kalman, estimación de covarianza y predicción de la covarianza. Este proceso se repite con cada dato, lo interesante en el procedimiento es que con cada dato se actualizan los valores involucrados de las diferentes matrices, y como se basa en el procedimiento de mínimos cuadrados, va mejorando su proceso y obteniendo mejores resultados.

En la figura 2.6. se muestran los resultados de la estimación del movimiento de un objeto seleccionado en la imagen (a) ruta asignada al azar y b) desplazamiento secuencial). Esta información se puede emplear para el control de movimiento del dispositivo orientador. También se debe tomar en cuenta para un mejor control, otro tipo de sensores como son *gyroscopio*, que permite compensar al sistema en su movimiento y seguimiento del objeto. Si no se toma este tipo de información, puede ajustarse empleando la información directamente de las imágenes que se están procesando.



a) Desplazamiento tipo senoidal



a) Desplazamiento secuencial

Fig. 2. 6. Aplicación del filtro Kalman a las coordenadas cartesianas de un objeto en movimiento para predecir su desplazamiento.

2.5.5. Detector de movimiento empleando correlación.

El método de correlación se basa en encontrar las características de similitud de una imagen en un tiempo t con respecto a la misma imagen en el tiempo $t + \Delta t$. Para ello se escoge una vecindad de la primera imagen, para luego realizar comparaciones sobre vecindades de igual tamaño de la segunda imagen, el propósito es buscar los valores de grises más similares en las vecindades que se tengan. El método establece que la similitud óptima se encuentra para dos regiones que tengan valores muy parecidos

dentro de un rango de consideración y que difieren por un valor constante que involucra las diferencias por la iluminación de la imagen.

Si consideramos a dos imágenes f_1 y f_2 , teniendo en cuenta a las características de los puntos de interés a ser comparadas y que tienen una disparidad de dx , dy , entonces la medición de similitud entre las dos regiones relativas a sus características está dado por el coeficiente de correlación $r(dx, dy)$ y se define como [JR95]:

$$r(d_x, d_y) = \frac{\sum_{(x,y) \in S} [f_1(x, y) - \bar{f}_1][f_2(x + d_x, y + d_y) - \bar{f}_2]}{\left\{ \sum_{(x,y) \in S} [f_1(x, y) - \bar{f}_1]^2 [f_2(x + d_x, y + d_y) - \bar{f}_2]^2 \right\}^{1/2}}$$

Este coeficiente es igual a cero si las características son ortogonales, o diferentes, mientras que se acerca a un valor unitario (máximo) para características similares.

El algoritmo de seguimiento de objetos en movimiento es el siguiente:

1. Establecer una imagen de entrada en t que contenga el objeto a seguir.
2. Establecer el patrón de búsqueda por medio de la selección de parte del objeto a seguir y ubicar las coordenadas cartesianas de inicio.
3. Lectura de la siguiente imagen en $t + \Delta t$
4. Delimitar un área a partir de las coordenadas anteriores para la búsqueda del objeto en movimiento
5. Realizar la búsqueda del objeto en movimiento aplicando correlación y ubicando las nuevas coordenadas.
6. Actualizar el patrón de búsqueda conforme al factor de actualización
7. Repetir los pasos 3 a 6 mientras este el objeto en la imagen.

Con este procedimiento la cámara se emplea como sensor a fin de seguir al objeto en movimiento.

En la figura 2.7. se muestra este algoritmo, es importante hacer notar que el resultado final se emplea para el movimiento de la cámara con configuración de cámara en mano.

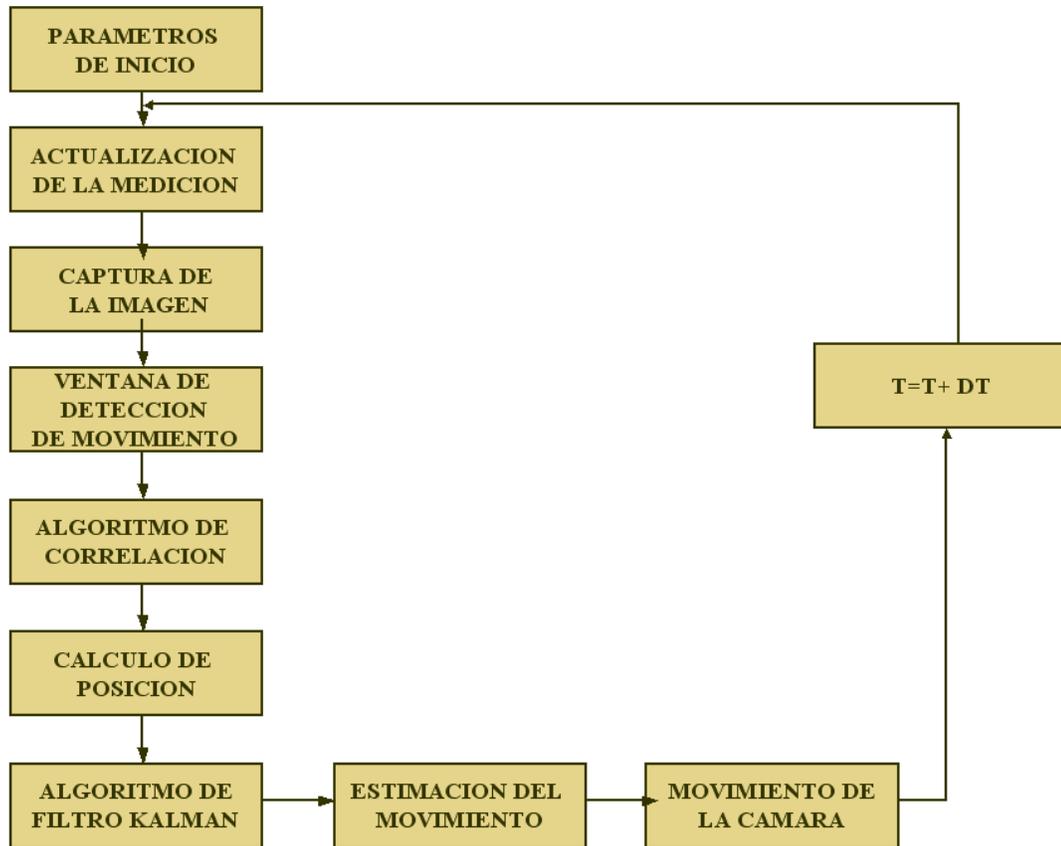


Fig. 2. 7. Búsqueda del objeto en movimiento empleando correlación.

En la figura 2.8. se muestra el patrón de referencia seleccionado a partir del objeto en movimiento, que comprende un área del objeto en movimiento, de preferencia una esquina; así como la ventana de acotamiento para la reducción del área de búsqueda del objeto, cual adquiere un tamaño de 5x5 con respecto al centro del patrón de referencia, esta generalmente comprende una área 5 veces el área del patrón de búsqueda, siempre dentro

de los límites de la imagen. Los datos de esta búsqueda se almacenan como datos de coordenadas cartesianas para ser empleados como información de entrada al control del manipulador.

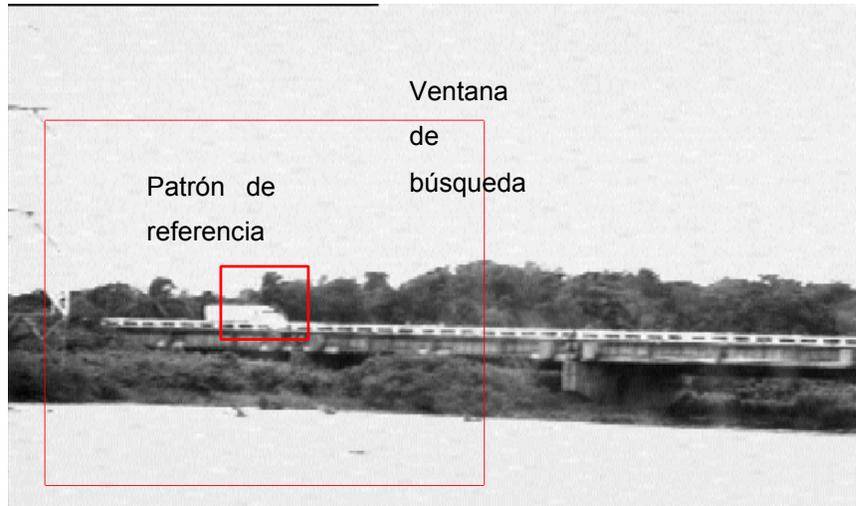


Fig. 2. 8. Búsqueda del objeto en movimiento empleando correlación.

2.6. Acciones de movimiento.

Las acciones de movimiento del manipulador deben incorporar el control por medio de información visual. Este se puede llevar a cabo por medio de lazo de control con información de posición o velocidad del dispositivo manipulador.

Algunos de los trabajos en esta área los han elaborado Hashimoto y Kimura en 1993 [HK96]; con ellos se toma en cuenta la dinámica no lineal de los dispositivos manipuladores. Otros autores como Greg Hager [HG2001], Martín Jagersand [JM94], han trabajado con servocontrol visual para efectuar actividades de colocación de piezas.

Tomando en cuenta la figura 2.9, para el seguimiento del blanco [OP2001], se tienen dos movimientos, uno sobre el eje y y otro en el eje x . Con un movimiento de traslación en paralelo al movimiento del blanco, la distancia z^* sería constante al objeto, pero en la realidad el movimiento de la cámara involucra varios aspectos. Uno de estos aspectos es la rotación que

efectúa al buscar al blanco. La distancia que existe del centro de la cámara hacia al blanco debería ser constante, esto no es del todo real, por que la cámara realiza un movimiento rotacional. En caso de que el movimiento del objeto sea rectilíneo uniforme, entonces el movimiento del objeto será proporcional al inverso de la tangente.

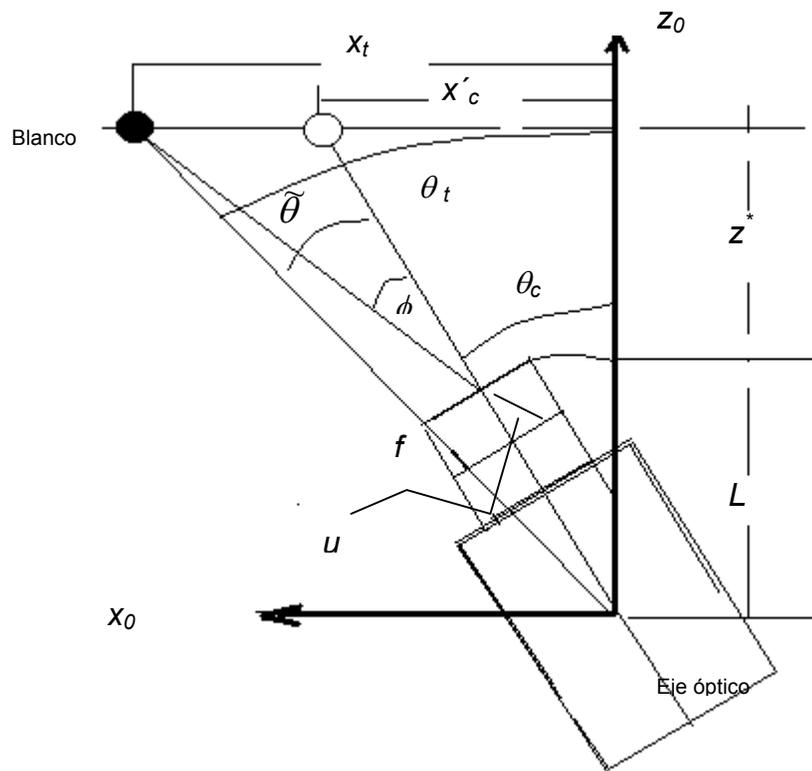


Fig. 2. 9. Modelo para el seguimiento en coordenadas cartesianas.

Con la medición en coordenadas cartesianas de la posición del blanco, se obtienen datos para ubicar al blanco. Para calcular el movimiento se emplean las siguientes formulas:

$$\tilde{\theta} = \theta_t - \theta_c \approx \frac{x_t}{z^* + L} - \frac{x'_c}{z^* + L}$$

En donde

x'_c distancia del centro del eje z_0 al blanco en su posición original

x_t distancia del centro del eje z_0 a la nueva posición del blanco

z^* distancia inicial del lente al blanco respecto al eje x_0

$\tilde{\theta}$ es el ángulo de desplazamiento respecto el eje óptico de la cámara.

L distancia del eje x_0 al extremo de la cámara de video

θ ángulo que describe el blanco respecto al centro del lente cuando se mueve.

f es la longitud focal del lente en píxeles

u es la coordenada horizontal del blanco en el plano de la imagen

De acuerdo al modelo de la cámara

El ángulo de desplazamiento del blanco respecto a la cámara de video, se representa por la siguiente formula:

$$\theta = \frac{x_t - x_c}{z^*} \equiv \frac{u}{f}$$

Recombinando Éstas dos expresiones tenemos:

$$u = \frac{f}{z^*} (x_t - x_c) = \frac{f}{z^*} (z^* + L) \tilde{\theta}$$

El término $\frac{1}{z^*} (z^* + L)$ representa el factor de ajuste dependiente de la distancia de la cámara al blanco debida a la perspectiva. En la figura 2.9. se muestra el desplazamiento de un objeto en movimiento (blanco) sobre el eje x ; para el caso de la coordenada en y , los resultados son similares, esto debido a que se toman como grados de libertad separados. Con éstas ecuaciones es posible realizar los cálculos de transformación de coordenadas de la imagen hacia desplazamiento de los eslabones del dispositivo. En este caso se establece una relación de transformación en la cual se multiplica el valor de posición por un factor de escala relativo al espacio de trabajo del dispositivo orientador.

Capítulo 3. Modelado Cinemático.

3.1. Modelado Cinemático.

El modelado cinemático consiste en determinar la dirección de la cámara de video (herramienta al final del sistema) a partir de las variables de cada unión. Una parte importante de esta sección es el uso de la representación de Denavit-Hartenberg.

3.1.1. Descripción de la posición

Uno de los objetivos de este trabajo es conocer la posición de la herramienta al final del sistema. Para describir su posición y orientación, se deben conocer sus partes componentes (uniones) y describirlos. Para ello hay que emplear un sistema de referencia fijado al objeto(tipo derecho) con tres vectores en posición ortogonal. Este sistema se puede asignar arbitrariamente. Sin embargo, por conveniencia, el origen de este sistema se elige generalmente para estar en su centro geométrico, o en su centro de gravedad o en una de las esquinas de los cuerpos.

En la figura 3.1. la esquina de un cubo se define como el origen. La orientación de los vectores de la unidad está en paralelo a los bordes vecinos del cuerpo.

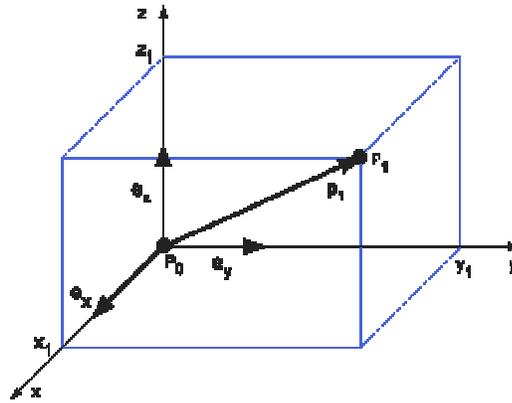


Fig. 3. 1. Sistema cartesiano basado en la mano derecha

La expresión matemática para describir la posición de un cuerpo con respecto a su localización en su propia base (referencia) se define por un vector de posición de tamaño 3x1 como se muestra a continuación.

$$p = \begin{pmatrix} px \\ py \\ pz \end{pmatrix} = p_x e_x + p_y e_y + p_z e_z$$

donde p_i representa la posición sobre el eje i ; por ejemplo la posición del origen del cubo es la siguiente

$$p_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

mientras que la posición del punto p1 puede tener los siguientes valores

$$p_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Con ello tenemos que los valores del vector de posición dependen de la ubicación (la posición y la orientación) respecto a la referencia asignada.

En términos generales, la posición de un elemento con respecto a un sistema de referencia es:

$${}^K p = \begin{pmatrix} px \\ py \\ pz \end{pmatrix} = {}^K p_x \mathbf{e}_x + {}^K p_y \mathbf{e}_y + {}^K p_z \mathbf{e}_z$$

En donde K representa el sistema de referencia del cuerpo.

3.1.2. Rotación en el sistema cartesiano

Para describir la rotación de una unión en un sistema móvil B con respecto a una referencia en un sistema fijo K. Tenemos que el sistema de referencia K de un cuerpo, esta relacionada al sistema móvil B, y esta dada por la matriz unitaria siguiente

$$\mathbf{R} = {}^B \mathbf{R}_K = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Cualquier rotación de este cuerpo alrededor de los ejes del sistema de referencia con un ángulo de rotación α (respecto al eje x), β (respecto al eje y) θ (respecto al eje z) lleva a las siguientes matrices de rotación:

la rotación alrededor del eje x es:

$$\mathbf{R}(x, \theta) = {}^B \mathbf{R}_K = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Sen}\alpha & -\text{Sen}\alpha \\ 0 & \text{Sen}\alpha & \text{Cos}\alpha \end{pmatrix}$$

la rotación alrededor del eje y es:

$$R(y, \beta) = {}^B R_K = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}$$

la rotación alrededor del eje z es:

$$R(z, \gamma) = {}^B R_K = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Como ejemplos se presentan en la figura 3.2. algunas rotaciones de cuerpos rígidos

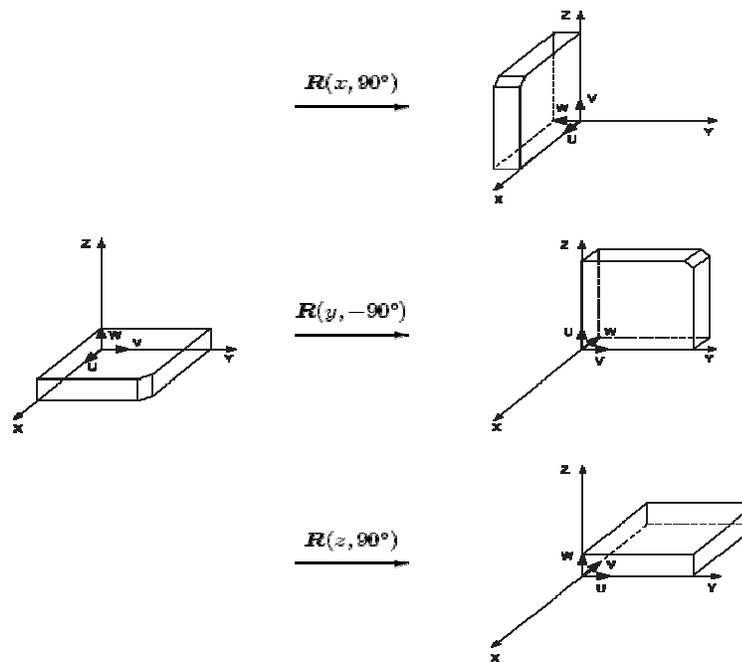


Fig. 3. 2. Ejemplos de rotaciones.

Una propiedad importante de las matrices de la rotación es que pueden multiplicarse entre ellas obteniendo como resultado una serie de

transformaciones del tipo rotación alrededor de los ejes del marco de referencia. Por ejemplo, para obtener una rotación alrededor del eje z seguida de una rotación respecto al eje x la operación es la siguiente:

$$R_z(z, \theta) = R(z, \gamma) R(x, \alpha) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\operatorname{sen} \gamma & 0 \\ \operatorname{sen} \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \operatorname{Sen} \alpha & -\operatorname{Sen} \alpha \\ 0 & \operatorname{Sen} \alpha & \operatorname{Cos} \alpha \end{pmatrix}$$

O en su caso una transformación en sentido inverso al indicado, primero sobre el eje x y posteriormente sobre el eje z

$$R(z, \theta) = R(x, \alpha) R(z, \gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \operatorname{Sen} \alpha & -\operatorname{Sen} \alpha \\ 0 & \operatorname{Sen} \alpha & \operatorname{Cos} \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\operatorname{sen} \gamma & 0 \\ \operatorname{sen} \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La figura 3.3. es un ejemplo de rotaciones con ángulos de 30 y 90 grados, el primer ejemplo muestra una rotación sobre eje z de 90 grados seguida de una rotación sobre el eje x de 30 grados; en el segundo caso primero se efectúa la rotación sobre el eje x con 30 grados y enseguida la rotación sobre el eje z de 90 grados. Es importante notar que las rotaciones no son conmutables. Como puede verse en [OA2001]

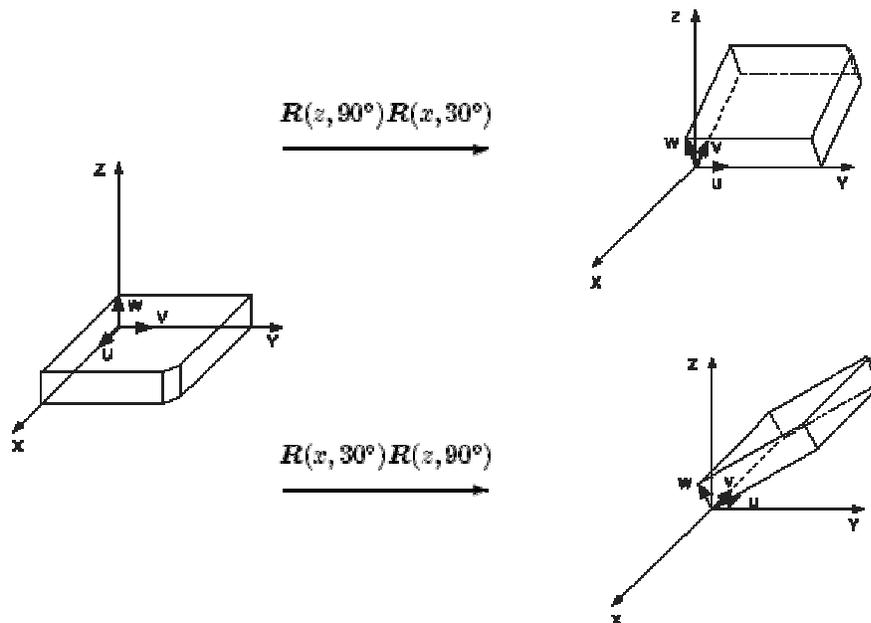


Fig. 3. 3. Rotaciones de sistemas.

3.2. Transformaciones homogéneas.

El estado de un cuerpo rígido, que para este caso es cada liga o eslabón o articulación del robot, es descrito por su posición y orientación relativo a un sistema de referencia. Considerando a un sistema de referencia 0_0 con coordenadas $x_0y_0z_0$ para la unión 0, y un segundo sistema 0_1 con coordenadas $x_1y_1z_1$, para la unión 1 (azimut). En estos sistemas tenemos a los vectores P^0 y P^1 que tienen las coordenadas del punto P con respecto al sistema 0 y 1 respectivamente. La relación entre estos se expresa como

$$P^0 = d_0^1 + R_0^1 p^1$$

Donde d_0^1 es el vector de desplazamiento del punto de origen cero al origen 1; R_0^1 es la matriz de rotación. Este resultado es logrado por la adición sencilla de vectores y rotación del sistema de referencia. Dicho procedimiento se puede extender fácilmente para describir las relaciones más complejas entre ejes.

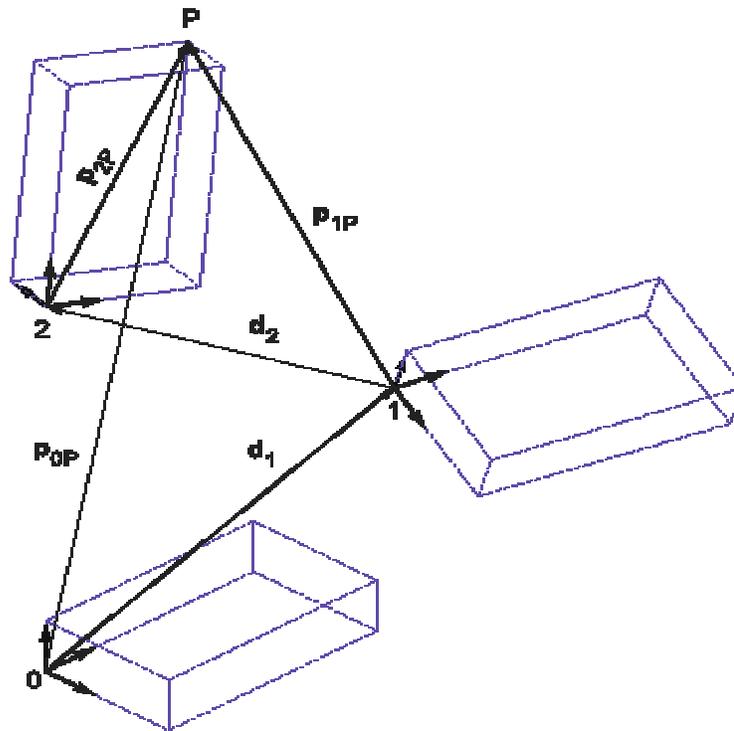


Fig. 3. 4. Transformaciones homogéneas.

Este tipo de transformación se le conoce como movimiento rígido si la matriz de rotación es ortogonal. Si se combinan mas movimientos se tendría mayor numero de transformaciones. En este tipo de transformaciones se involucran tanto desplazamientos como rotaciones con respecto al sistema de referencia. Para representar a este tipo de transformaciones se utiliza una matriz que contiene los movimientos de cada unión, a este tipo de matriz se le llama matriz de transformación homogénea A. La expresión $X_1 = AX_0$, permite obtener la posición y orientación de un cuerpo ubicado en 0 con respecto a 1, a ésta se le denomina transformación homogénea, a continuación se muestra su forma mas general:

$$A = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & d_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & s_{1 \times 3} \end{bmatrix}$$

Donde $R_{3 \times 3}$ representa la rotación del cuerpo rígido, $d_{3 \times 1}$ el desplazamiento o traslación, $f_{1 \times 3}$ la perspectiva, que generalmente tiene un valor cero y $s_{1 \times 3}$ el factor de escala que tiene un valor unitario.

Para realizar la transformación de 2 uniones, el procedimiento es simple y solo deben multiplicarse las transformaciones individuales de cada unión para obtener el total, como se indica en la ecuación siguiente:

$$T = \prod_{i=1}^n A_i$$

Este formato permite obtener la posición y orientación de un manipulador al cual se le conoce como cadena cinemática.

3.3. Componentes y estructura.

Un dispositivo manipulador esta compuesto de una unión conectado por medio de eslabones en lo que se conoce como cadena cinemática. Cada unión puede ser considerada como una unión de revolución o como una

unión prismática y tiene un solo grado de libertad. El análisis cinemático directo permite obtener el efecto acumulativo de las variables de unión. Para ello se emplean las transformaciones homogéneas de cada unión a fin de tener la posición y orientación del manipulador. Para el caso del sistema descrito en el capítulo 1, consiste en dos uniones de revolución controladas por dos motores DC. Por la configuración del sistema, puede ser extendido a dos grados de libertad más, considerando un sistema similar montado sobre el primero. logrando tener una doble configuración esférica.

3.4. Representación de Denavit Hartenberg.

Con este tipo de representación se obtiene la representación sistemática de la relación cinemática de dos eslabones sucesivos en una cadena de cuerpos en el espacio [SM89]. La figura 3.5 muestra como tres eslabones se relacionan utilizando un número mínimo de parámetros:

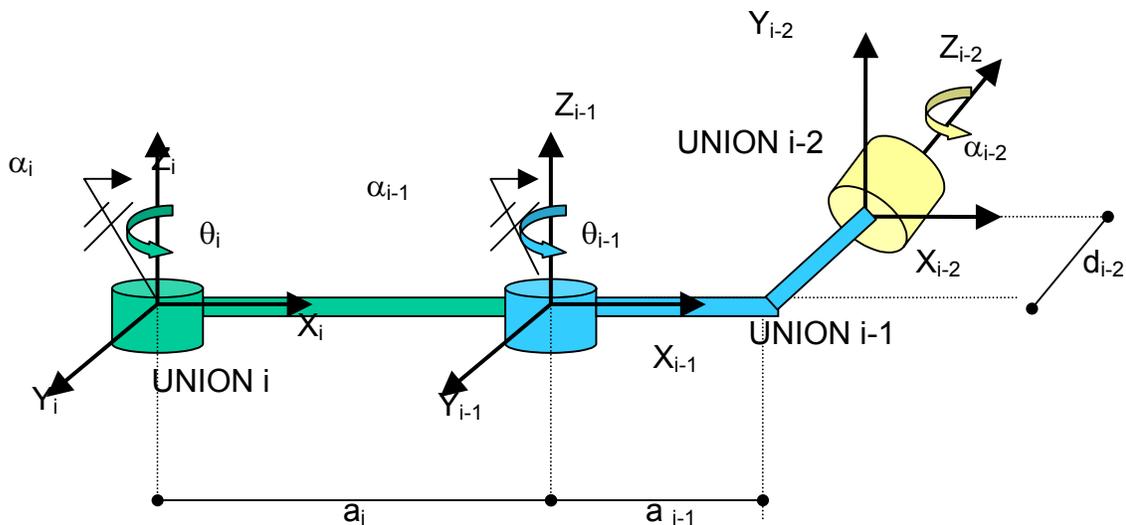


Fig. 3. 5. Representación de Denavit-Hartenberg.

De acuerdo a la figura anterior los parámetros que se emplean son:

a_i Distancia entre los orígenes de los sistemas de referencia

d_i Distancia entre el origen del eslabón anterior en el sentido del eje y

α_i Ángulo entre el eje z_{i-1} y el eje z_i medido en sentido antihorario alrededor del eje x_i

θ_i Ángulo entre el eje x_{i-1} y el eje x_i medido en sentido antihorario alrededor del eje z_{i-1} .

Los parámetros a_i , α_i son constantes, y solo uno de ellos puede variar. Los parámetros antes indicados se emplean para la representación de Denavit-Hartenberg (DH). El tipo de unión puede ser del tipo articulación o prismática que respectivamente se indica con θ_i y d_i respectivamente.

Para la representación de Denavit-Hartenberg, en forma matricial el procedimiento se puede resumir a acuerdo al algoritmo propuesto por Spong y Vidyasagar[1].

1. Ubicar y etiquetar los ejes de las uniones de $z_0 \dots, z_{n-1}$.
2. Establecer el sistema de referencia base. Colocar el origen en el eje z_0 . Los ejes x_0 y y_0 se eligen convenientemente para formar un sistema de referencia tipo mano derecha.
Para $i=1, \dots, n-1$ efectuar los pasos 3 a 5.
3. Localizar el origen o_i donde la normal común a z_i y z_{i-1} tiene su punto de intersección con z_i . Si z_i cruza a z_{i-1} , ubicar o_i en esta intersección. Si z_i y z_{i-1} son paralelo, localizar o_i en esta unión.
4. Establecer x_i a lo largo de la normal entre z_{i-1} y z_i hasta o_i , o en la dirección normal al plano z_{i-1} - z_i y la intersección z_i .
5. Establecer y_i para complementar el sistema de referencia tipo mano derecha.
6. Establecer el sistema de referencia del efector final $o_n x_n y_n z_n$. Suponiendo que la n -ésima unión es de revolución, asignar $k_n = a$ a lo largo de la dirección z_i . Establecer el origen o_n convenientemente a lo largo de z_n , preferir el centro de la herramienta al final del brazo.

7. Crear una tabla conforme a los parámetros de unión $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$.
8. Formar las matrices de transformación homogénea A_i , sustituyendo los parámetros antes indicados.
9. Formar $T_n^0 = A_1 \dots A_n$. Éste será el resultado de la posición y orientación de la herramienta expresada en coordenadas cartesianas.

La representación de Denavit-Hartenberg comúnmente usada en aplicaciones de robots se debe al producto de cuatro transformaciones básicas, como se muestra a continuación:

$$A_i = Rot_{z, \theta_i} Tras_{z, d_i} Tras_{x, a_i} Rot_{x, \alpha_i}$$

A continuación se muestra el producto de éstas matrices:

$$= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} c_{\alpha_i} & s_{\theta_i} s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i} s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.5. Representación de Denavit Hartenberg para el sistema.

La estructura del sistema parece simple, pero debe tomarse en cuenta el desfase de los diferentes elementos, así como el tipo de movimiento que efectúan, considerar un sistema de referencia adecuado y elegir correctamente los parámetros y su ubicación. Para simplificar su obtención se supone que los ejes de movimiento son perpendiculares.

Para el modelo del sistema se propone lo siguiente
 Modelo 1, Configuración tipo esférica.

Eslabón	α_i [rad]	a_i [m]	θ_i [rad]	d_i [m]	R/P
1	$\pi/2$	0	θ_1	d1	R
2	$-\pi/2$	0	θ_2	d2	R

Tabla 3. 1. Parámetros DH para el modelo 1.

La configuración y sistema de referencia empleado para determinar los parámetros DH, se muestra a continuación,

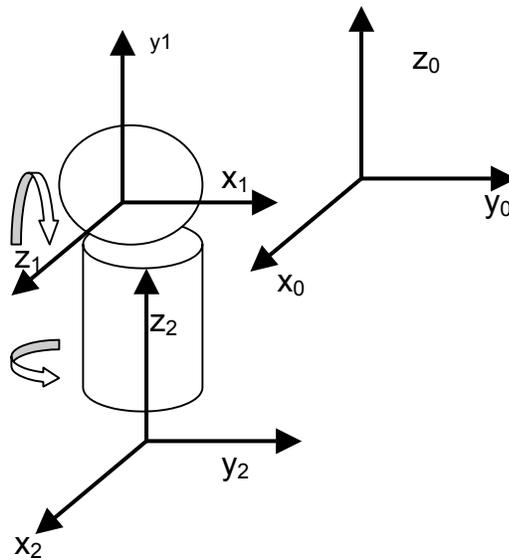


Fig. 3. 6. Representación de Denavit-Hartenberg para el Modelo esférico.

Modelo 2, Doble configuración tipo esférica.

En esta aproximación el modelo es un sistema esférico montado sobre otro modelo esférico,

Unión /enlace	α_i [rad]	a_i [m]	θ_i [rad]	d_i [m]	R/P
1	$\pi/2$	0	θ_1	d1	R
2	$-\pi/2$	0	θ_2	d2	R
3	$\pi/2$	0	θ_3	d3	R
4	$-\pi/2$	0	θ_4	d4	R

Tabla 3. 2. Parámetros DH para el modelo 2.

Para el modelo 1 se obtienen las matrices de transformación homogénea a partir de los parámetros DH, las cuales se muestran a continuación:

$$A1 := \begin{bmatrix} \cos(t1) & 0 & -\sin(t1) & 0 \\ \sin(t1) & 0 & \cos(t1) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A2 := \begin{bmatrix} \cos(t2) & 0 & \sin(t2) & 0 \\ \sin(t2) & 0 & -\cos(t2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz de transformación total para el modelo 1 tomando como base las matrices homogenas anteriores, es la siguiente

$$T_{0_2} := \begin{bmatrix} \cos(t1) \cos(t2) & -\sin(t1) & \cos(t1) \sin(t2) & -\sin(t1) d2 \\ \sin(t1) \cos(t2) & \cos(t1) & \sin(t1) \sin(t2) & \cos(t1) d2 \\ -\sin(t2) & 0 & \cos(t2) & d1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde t1 y t2 representan los ángulos de las uniones, d1 y d2 las distancias entre las uniones. Para el caso del modelo 2 de doble gimbal se tienen las matrices de transformación homogénea de las cuatro uniones:

$$A_{10} := \begin{bmatrix} \cos(t1) & 0 & -\sin(t1) & 0 \\ \sin(t1) & 0 & \cos(t1) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{21} := \begin{bmatrix} \cos(t2) & 0 & \sin(t2) & 0 \\ \sin(t2) & 0 & -\cos(t2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{32} := \begin{bmatrix} 1 & 0 & -t3 & 0 \\ t3 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{43} := \begin{bmatrix} 1 & 0 & t4 & 0 \\ t4 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz de transformación total para el modelo 2 tomando como base las matrices homogenas anteriores, es la siguiente (T40 indica la transformación desde la articulación 0 hasta la 4)

$$T_{40} = \begin{bmatrix} \cos(t1) \cos(t2) - \sin(t1) t3 - \cos(t1) \sin(t2) t4 & -\cos(t1) \cos(t2) t3 - \sin(t1) & (\cos(t1) \cos(t2) - \sin(t1) t3) t4 + \cos(t1) \sin(t2) & 0 \\ \sin(t1) \cos(t2) + \cos(t1) t3 - \sin(t1) \sin(t2) t4 & -\sin(t1) \cos(t2) t3 + \cos(t1) & (\sin(t1) \cos(t2) + \cos(t1) t3) t4 + \sin(t1) \sin(t2) & 0 \\ -\sin(t2) - \cos(t2) t4 & \sin(t2) t3 & -\sin(t2) t4 + \cos(t2) & dl \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A continuación se muestra la simulación (HEMERO Robotics Toolbox for MatLAB) conforme a la representación de Denavit-Hartenberg del sistema manipulador, así como sus movimientos.

Con las matrices del modelo 1 se puede verificar su representación grafica en 2D y 3D en forma simplificada, las figuras 3.6 y 3.7 muestran la representación del sistema.

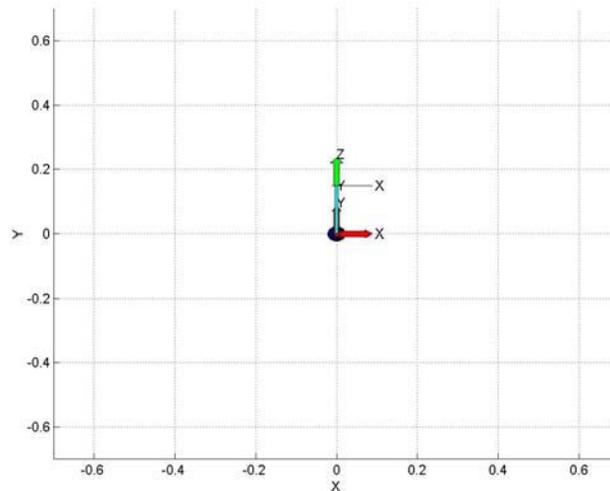


Fig. 3. 7. Modelo del sistema de dos grados de libertad en dos dimensiones.

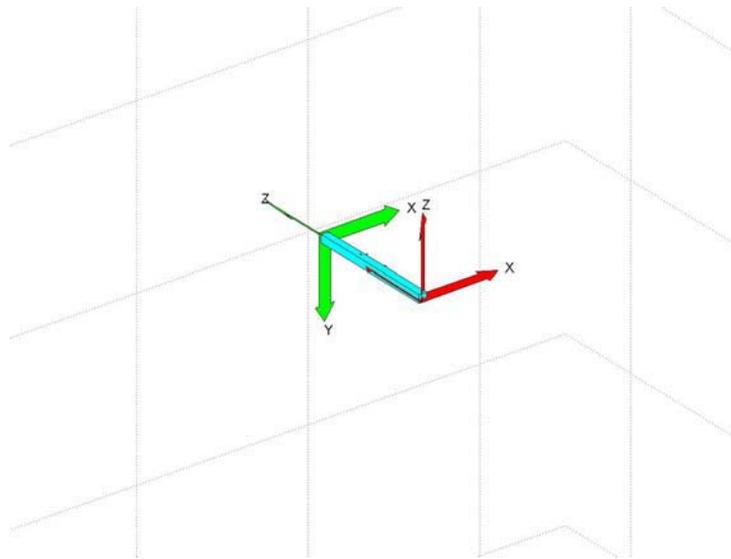


Fig. 3. 8. Modelo del sistema manipulador en 3 dimensiones

Para verificar los movimientos que desarrolla el manipulador, se asignan datos numéricos a la matriz de transformación homogénea total. Los resultados se muestran en las figuras 3.8 y 3.9:

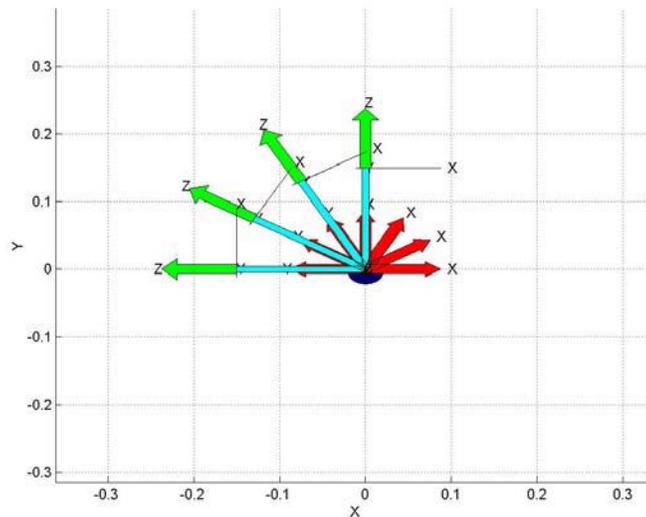


Fig. 3. 9. Rotación del eje 1 del sistema manipulador (planta).

Para el eje 2 se realiza un procedimiento similar, obteniéndose los resultados que se muestran en la figura siguiente.

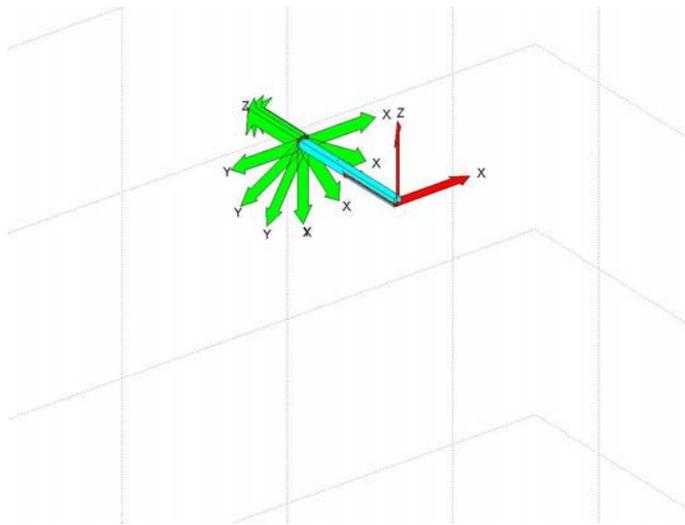


Fig. 3. 10. Rotación del eje 2 del sistema manipulador (planta).

Una combinación los movimientos del modelo 1 en tres dimensiones, se muestra en la figura 3.10.

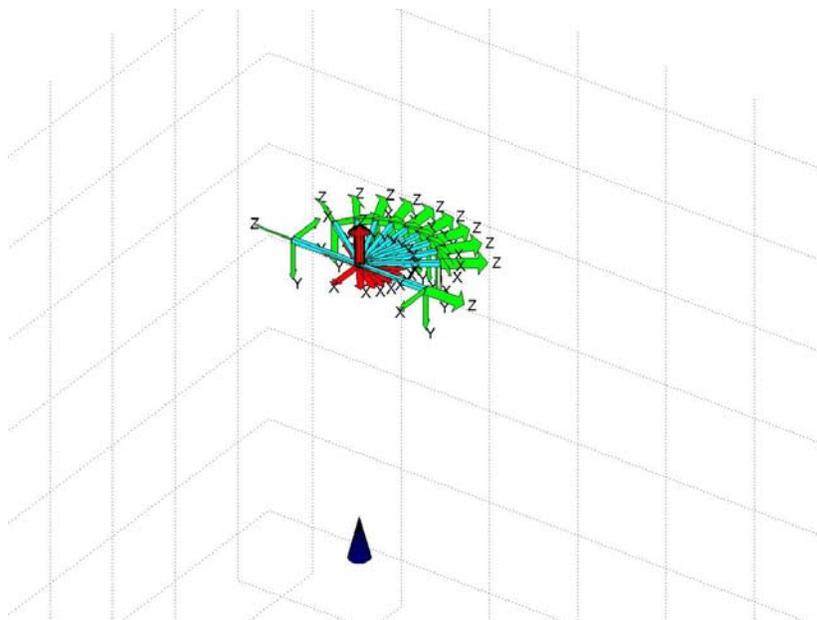


Fig. 3. 11. Movimiento de los dos ejes del sistema manipulador (planta).

También se simuló en un ambiente tridimensional (Roboworks), los movimientos del modelo cinemático, empleando la representación de Denavit-Hartenberg. En la figura 3.11 se muestra al manipulador en una posición de inicio para ambos ejes, posteriormente se envía como parámetros, la información de las nuevas posiciones angulares que debe seguir el dispositivo, estos datos se obtienen a partir de la matriz de transformación homogénea del dispositivo, como resultado de los cálculos realizados dentro del ambiente MatLab con la librería Hemero a fin de describir una trayectoria senoidal, para ambas articulaciones. La posición inicial es en la articulación 1 posición 0 grados y la segunda articulación posición 90 grados. Con estos datos se obtiene una nueva posición final (160° , 135°), la que se muestra en la figura 3.12.



Fig. 3. 12. Simulación del movimiento de los dos ejes del sistema manipulador (planta). Posición inicial .



Fig. 3. 13. Simulación del movimiento de los dos ejes del sistema manipulador (planta). Posición final.

Con el fin de conocer las propiedades de movimiento del sistema, es importante conocer su cinemática. En este tipo de modelado no se consideran efectos tales como: fricción, amortiguamiento, etc. Los efectos físico se incluirán dentro del modelo dinámico en el capítulo siguiente. Para la obtención del modelo dinámico, descrito en el capítulo 4, se emplearon los resultados del presente capítulo.

Capítulo 4. Modelado dinámico.

El modelo dinámico del dispositivo, se empleó para simular el movimiento, analizar la estructura y diseñar el tipo de control a emplear en el sistema, todo esto considerando las restricciones del dispositivo físico. Las pruebas que se pueden realizar al dispositivo, están encaminadas a conocer el desempeño del sistema, sus restricciones y el control logrado.

4.1. Ecuaciones de Lagrange.

Las ecuaciones de Lagrange son un conjunto de ecuaciones diferenciales. Éstas describen el comportamiento del sistema durante el movimiento de sus partes componentes desde el punto de vista mecánico. Se emplean como herramienta para el análisis dinámico de sistemas mecánicos. En el procedimiento para su obtención se eligen un conjunto de coordenadas generalizadas (variables de interés), éstas describen la posición de cada unión. Esta metodología analiza al sistema mecánico como un todo y lo ve desde el punto de vista energético. Para su formulación es necesario calcular la energía cinética y la energía potencial del sistema. Con las ecuaciones correspondientes a la energía cinética y potencial se procede a obtener las ecuaciones de movimiento. A continuación se expone el procedimiento de obtención de las ecuaciones de Lagrange.

El Lagrangiano es la diferencia entre la energía potencial y la energía cinética [SD67]:

$$L=K(q)-V(q)$$

Donde

L representa el lagrangiano

K energía potencial

V es la energía cinética.

El Lagrangiano también se puede expresar como:

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j - V(q)$$

Donde

$d_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j$ representa la energía potencia

$V(q)$ representa la energía cinética

A partir de la expresión anterior se pueden obtener las ecuaciones de Lagrange para un sistema manipulador, las cuales se expresan de la siguiente forma:

$$\sum_j d_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_{ijk}(q) \dot{q}_k \dot{q}_j + g_i(q) = \tau_i \quad i= 1,2\dots n$$

Donde el término c_{ijk} se denomina como símbolos de Christoffel, que se definen por la expresión $c_{ijk} = \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{jk}}{\partial q_i}$ y g_i se define como

$g_i(q) = \frac{\partial V}{\partial q_i}$, este último debido a los efectos de la gravedad. τ_i Representa

los pares aplicados el sistema.

En esta ecuación se distinguen varios términos, términos que involucran la segunda derivada de las coordenadas generalizadas, términos

que involucran al producto del tipo $\dot{q}_{k=j}^2$ que son llamados centrífugos, (donde k=j) y términos que involucran al producto $\dot{q}_k \dot{q}_j$ (donde k es diferente de j) llamados términos de coriolis y términos que involucran a q pero no a sus derivadas.

También una forma común de expresar la ecuación de Lagrange es:

$$D(\dot{q})\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau$$

4.2. Ecuaciones de movimiento.

La ecuación de movimiento en su forma más general para un sistema mecánico rígido se puede expresar como:

$$D(\dot{q})\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F_v \dot{q} + F \operatorname{sgn}(\dot{q}) + g(q) = \tau_a$$

Donde:

$D(q)$ representa el momento de inercia de la unión i

El termino $C(q, \dot{q})\dot{q}$ representa los efectos de coriolis y centrifugos en la unión i causado por la velocidad de las uniones anterior y posterior.

El termino $g(q)$ representa el momento generado en la unión i causado por la gravedad.

Los coeficientes F_v representa los efectos de los coeficientes de fricción.

El termino τ_a es el par de actuación del motor en la unión.

4.2.1. Energía cinética

La energía cinética de un sistema es la suma de las energías cinéticas de los eslabones. Las energías comprendidas en este tipo, son la parte debida a la traslación y la parte rotacional de la energía cinética. La energía cinética del eslabón i es

$$K_i = \frac{1}{2} m_i \mathbf{v}_{ci}^T \mathbf{v}_{ci} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_{ci}^T \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_{ci}$$

Donde

\mathbf{v}_{ci} velocidad del centro de masa del eslabón i

$\boldsymbol{\omega}_i$ velocidad angular del eslabón i

I tensor de inercia del eslabón i calculado respecto al centro de masa

m_i masa del eslabón i

Dentro de la expresión de la energía cinética el término $\frac{1}{2} m_i \mathbf{v}_{ci}^T \mathbf{v}_{ci}$ representa la parte debida a la traslación del eslabón; $\frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_{ci}^T \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_{ci}$ representa la parte correspondiente a la energía cinética debida a la rotación del eslabón.

Para calcular la energía cinética del sistema es necesario obtener las velocidades de los centros de masa, los tensores de inercia y las velocidades lineales y angulares de todos los eslabones. Para el caso de las velocidades se requiere calcular el Jacobiano del sistema como paso previo.

4.2.1.1. Jacobiano.

El objetivo principal del jacobiano es encontrar la relación entre los desplazamientos del extremo del manipulador y los desplazamientos de las uniones. Tomando en cuenta que el vector de velocidades \dot{P} del extremo del sistema incluye la velocidad lineal v_e y angular ω_e del sistema de referencia tenemos:

$$\dot{P} = \begin{bmatrix} v_e \\ \omega_e \end{bmatrix}$$

Expresando la velocidad lineal v_e y angular ω_e del efector final como función de los jacobianos respectivos, tenemos las siguientes expresiones:

$$v_e = J_v(q)\dot{q} \quad \text{y} \quad \omega = J_\omega(q)\dot{q}$$

Donde J_v es el Jacobiano de velocidad lineal y J_ω es el Jacobiano de velocidad angular. Éstas expresiones se pueden reunir en la siguiente expresión:

$$\dot{p} = J(q)\dot{q}$$

o también como

$$\dot{p} = \begin{pmatrix} J_{v1} & J_{v2} & \Lambda & J_{vn} \\ J_{\omega1} & J_{\omega2} & \Lambda & J_{\omega n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \mathbf{M} \\ \dot{q}_n \end{pmatrix}$$

Donde $J(q)$ es el Jacobiano geométrico definido como

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix}$$

$$v_e = \dot{x} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial x}{\partial q_i} \dot{q}_i = \begin{pmatrix} J_{v1} & | & J_{v2} & | & \dots & | & J_{vn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{pmatrix}$$

Mientras que para el caso de la velocidad angular del sistema, la expresión de la velocidad angular es la siguiente:

$$\omega = \begin{pmatrix} J_{\omega 1} & | & J_{\omega 2} & | & \dots & | & J_{\omega n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{pmatrix}$$

Para calcular los jacobianos de velocidad lineal y angular se emplea la siguiente relación que es aplicable a un manipulador de n uniones

$$\frac{\partial p}{\partial q_i} = \begin{pmatrix} J_{vi} \\ J_{\omega i} \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} b_{i-1} & x_{ri-1,n} \\ b_{i-1} \end{pmatrix} & \text{Si la unión es revoluta} \\ \begin{pmatrix} b_{i-1} \\ 0 \end{pmatrix} & \text{Si la unión es prismática} \end{cases}$$

En la expresión anterior, los vectores b_{i-1} y $x_{ri-1,n}$ se calculan a partir de las transformaciones homogéneas, tomando en cuenta que para cada vector se debe considerar al sistema de referencia que se está analizando, es decir desde la unión i-1 hasta el sistema de referencia base.

$$T_{i-1,0} = A_{1,0}(q_1) A_{2,1}(q_2) \dots A_{i-1,i-2}(q_{i-1})$$

Para obtener los vectores mencionados, basta tomar como referencia a la transformación homogénea correspondiente a la unión i, bajo el siguiente formato:

$$T_{i-1,0} = \left(\begin{array}{ccc|c} n_{i-1} & t_{i-1} & b_{i-1} & x_{i-1} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

Donde

n_{i-1} } Son las matrices columna con las coordenadas de los vectores
 t_{i-1} } unitarios del sistema de coordenadas fijo al ultimo eslabón
 b_{i-1} } referenciado con respecto al primer eslabón del sistema
 x_{i-1} } coordenadas del origen del sistema de coordenadas fijo al
 último cuerpo, respecto al sistema de referencia del primer eslabón.

Con esta expresión adicionalmente se puede obtener el vector r que se emplea en los cálculos de la energía potencial tomando en cuenta que dicho vector es la diferencia de los valores de X_i entre dos uniones consecutivas, como se muestra a continuación:

$$r_{i-1,n} = x_n - x_{i-1}$$

Un método alternativo involucra obtener J_v diferenciando con respecto a las variables generalizadas la expresión del vector de posición del origen del sistema de referencia fijo al extremo del robot X_n . Es decir tomando la matriz de transformación total en el extremo o efector final del manipulador.

4.2.1.2. Tensor de inercia.

El tensor de inercia es una matriz que representa los momentos y productos de la inercia de un sistema mecánico en cada punto del espacio. El tensor de inercia referido a un sistema referencia fijo en el espacio esta dado por:

$$I = R_{0,i} \begin{bmatrix} I_i & 0 & 0 \\ 0 & I_i & 0 \\ 0 & 0 & I_i \end{bmatrix} R_{i,o}$$

Donde $R_{0,i}$ y $R_{i,o}$ representan a las matrices de rotación de la unión i con respecto al sistema de referencia y su inversa.

Con las expresiones del Jacobiano de velocidad lineal, angular y tensor de inercia I , la energía cinética se puede expresar como:

$$K_i = \left[\frac{1}{2} m_i J_{vi}(q)^T J_{vi}(q) + \frac{1}{2} J_{\omega i}(q)^T R_i^T I_i R_i^T(q)^T J_{\omega i}(q) \right] \dot{q}$$

o expresada en forma más sencilla como $K_i = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q}$

Donde $D(q)$ se denomina como matriz de inercia y es simétrica definida positiva[SB93]. Esto es que debe tener una diagonal principal y sus elementos superior e inferior deben ser simétricos.

4.2.2. Energía Potencial

La energía potencial de un robot es resultado de las sumas de la energía potencial de cada uno de los eslabones. Para calcular la energía potencial de un eslabón, suponemos que toda la masa del mismo esta concentrada en el centro de masa y entonces, la energía potencial del eslabón i es:

$$V = m_i g^T r_{0,ci}$$

Donde m_i es la masa del eslabón i , g^T es el vector de aceleración de la gravedad y r_{ci} las coordenadas del vector de posición del centro de masa de cada eslabón.

Para todo el manipulador tenemos la siguiente expresión

$$V = \sum_{i=1}^n m_i g^T r_{o,ci}$$

Con la energía potencial y cinética se obtienen las ecuaciones de Lagrange. A continuación se expone el procedimiento para calcular las ecuaciones de Lagrange tomando como base el modelo cinemático con la representación de Denavit-Hartenberg.

4.2.3. Procedimiento para calcular las ecuaciones de movimiento de un robot manipulador del tipo cadena cinemática abierta

Este procedimiento resume los puntos anteriores y toma en cuenta el modelado cinemático del sistema como base para la obtención de las ecuaciones dinámicas de un sistema mecánico[SM89]

Parte 1

Calculo de $D(q)$

A.1. Resolver el problema cinemático y calcular las matrices rotacionales R

A.2. Calcular las matrices jacobianas para velocidad lineal y angular.

Parte 2 Calcular $C(q, \dot{q})$

B.1 Calcular los símbolos de Christoffel

B.2 Encontrar $C(q, \dot{q})$ calculando los elementos de acuerdo a

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n c_{ijk}(q) \dot{q}_k$$

Parte 3.

Calcular $g(q)$

C.1 Calcular $V(q)$ de acuerdo a $V = m_i g^T r_{ci}$. Para ello se necesita conocer el centro de masa de cada unión

C.2. Derivar V de acuerdo a $g_i(q) = \frac{\partial V}{\partial q_i}$

C.3. Dado $g(q) = [g_1, \dots, g_n]^T$

Parte 4.

D.1. Escribir las ecuaciones de movimiento

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau$$

4.3. Modelado del sistema.

Para el modelado se emplea la metodología del Lagrangiano. También conocido como método de Euler-Lagrange. Las ecuaciones de Euler-Lagrange, es un procedimiento para obtener las ecuaciones que describen el movimiento dinámico del sistema. Con este procedimiento tenemos un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias con respecto de las coordenadas generalizadas del sistema. La forma general de la ecuación de Euler-Lagrange esta dada como

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_i} + \frac{\partial D(\dot{q})}{\partial \dot{q}_i} = F_i$$

donde

$L(q, \dot{q})$ es el lagrangiano definido como la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial del sistema. Por lo que $L(q, \dot{q}) = K - V$ y $D(\dot{q})$ es la función de disipación de Raleigh para las fuerzas de amortiguamiento viscoso, F_i comprende las fuerzas aplicadas al sistema y q son las coordenadas del sistema.

4.3.1. Modelo dinámico del sistema de dos grados de libertad de articulación independiente.

El sistema de articulación independiente considera a cada unión como si fueran eslabones únicos, en este caso es debido a la presencia de sistemas de encadenamiento en cada eslabón. En esta configuración el diseño del control permite ver a la carga como un disturbio. El sistema se muestra en la figura 4.1. y esta constituido por los siguientes elementos: motor, acoplamiento de reducción y carga. Para la obtención del modelo se obtienen las ecuaciones para la energía cinética y la energía potencial empleando el procedimiento del Lagrangiano con las ecuaciones de Euler-Lagrange a fin de deducir las ecuaciones que gobiernan al sistema.

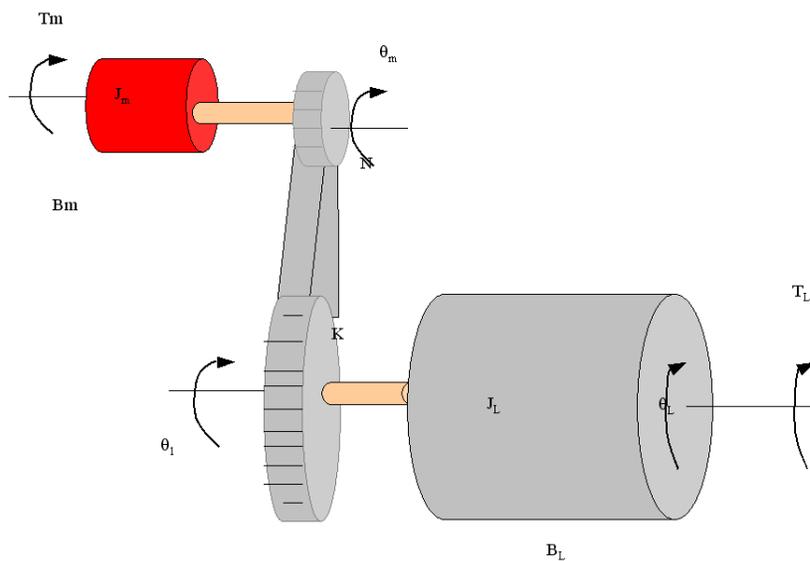


Fig. 4. 1. Sistema motor-enlace-carga (articulación independiente).

Donde

T_m	Par aplicado por el motor
T_L	Par de la carga
J_m	Inercia del motor

J_L	Inercia de la carga
θ_L	Posición de la carga (radianes)
θ_m	Posición del motor (radianes)
K	Constante de rigidez de la caja de reducción
N	relación de encadenamiento (también llamado r)

4.3.1.1. Obtención de las ecuaciones.

El procedimiento de obtención de las ecuaciones de Lagrange para el sistema de articulación desacoplada, se muestra a continuación.

La relación de engranes entre las partes componentes es:

$$S_A = S_b$$

$$r_L \theta_L = r_m \theta_m$$

$$\theta_m = \frac{r_L}{r_m} \theta_L$$

Donde

r_L relación de engranes de la carga

r_m relación de engranes del motor

la relación entre los dos radios del motor y de la carga se denomina N

$$N = \frac{r_A}{r_b} \quad \text{Por lo cual}$$

$$\theta_m = N_1 \theta_L \quad \text{y} \quad \theta_L = \frac{1}{N_1} \theta_m$$

Respecto a los pares (T_L de la carga y T_m del motor) con la relación de conservación de desplazamientos angulares y aplicando la conservación del trabajo se tiene lo siguiente:

$$T_L \theta_L = T_m \theta_m$$

Donde

T_L θ_L son corresponden a la carga y los otros corresponden al motor

$$T_L = \frac{\theta_m}{\theta_L} T_m$$

la relación entre los dos ángulos de los engranes del motor y de la carga se denomina N

$$N = \frac{\theta_m}{\theta_L} \quad \text{Por ello}$$

$$T_L = N T_m \quad \text{y} \quad T_m = \frac{1}{N} T_L$$

Con éstas ecuaciones se muestra la expresión de la amplificación del torque y que esta depende únicamente del radio de los engranes.

Por inspección las ecuaciones de la parte mecánica, tienen la siguiente forma [LF1993]:

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + B(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_L) + K(\theta_m - \theta_L) = T_m$$

$$J_L \ddot{\theta}_L - B_L \dot{\theta}_L + B(\dot{\theta}_L - \dot{\theta}_m) - K(\theta_m - \theta_L) = 0$$

Como actuador se considera a un motor DC para obtener el par que se va aplicar al sistema.

4.3.1.2. Modelo del motor eléctrico.

El modelo del motor eléctrico figura 4.2. permite calcular las expresiones para obtener el par necesario involucrado en el movimiento del manipulador, este considera las características eléctricas y mecánicas.

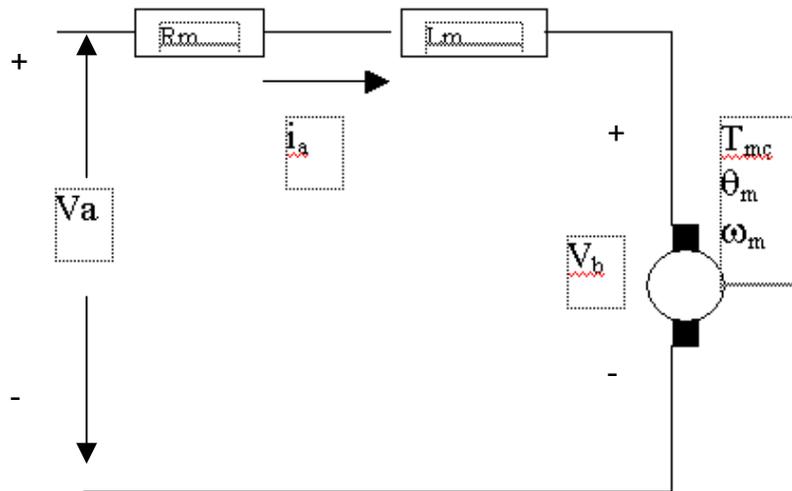


Fig. 4. 2. Modelo de un motor de C.D.

Donde

R_m resistencia del motor

L_m Inductancia del motor

V_a Voltaje aplicado al motor

V_b voltaje electromotriz (emf)

i_a intensidad de corriente del motor

θ_m Posición del motor en radianes

Para este tipo de dispositivo el par del motor T_m es directamente proporcional al producto del flujo magnético ϕ_m y la corriente de armadura i_a como se expresa a continuación:

$$T_m = K_m(t)\phi i_a(t)$$

donde K_m es una constante de proporcionalidad y el flujo magnético ϕ_m es constante y tomando cuenta que $f_{em} = K \phi \omega$ se tiene a V_b como:

$$V_b(t) = K_m \phi \omega_m(t)$$

Y debido a que el flujo magnético es constante

$$\text{Se tiene } V_b(t) = K_v \omega_m(t)$$

$$\text{Donde } K_v = K_m \phi$$

Por lo cual las ecuaciones del modelo del motor DC son[SM89]:

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + V_b(t)$$

$$T_m(t) = K_T i_a(t)$$

$$V_b(t) = K_v \frac{d\theta_m(t)}{dt} = K_v \omega(t)$$

$$J_m \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} = T_m(t) - T_L - B_m \frac{d\theta_m(t)}{dt}$$

en donde T_L es la carga aplicada al motor.

Para el completar el modelo eléctrico del motor se toma en cuenta la ecuación:

$$V_a(t) - K_v \dot{\theta}_m = R_a i_a(t) + L_a \dot{i}_a$$

Finalmente las ecuaciones completas del sistema de articulación independiente, son

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + B(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_L) + K(\theta_m - \theta_L) = T_m = K_M i$$

$$J_1 \ddot{\theta}_1 - B_L \dot{\theta}_m + B(\dot{\theta}_L - \dot{\theta}_m) - K(\theta_m - \theta_L) = 0$$

$$V_a(t) - K_v \dot{\theta}_m = R_a i_a(t) + L_a \dot{i}_a$$

El vector de estados que se toma, es el siguiente:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \\ \theta_m \\ \dot{\theta}_m \\ \theta_L \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix}$$

El modelo en espacio de estados para el sistema, se puede representar como

$$\dot{X} = AX + Bu$$

$$y = CX$$

Donde

\dot{X} derivadas del vector de estado

X vector de estados del sistema

u vector de entrada del sistema

A matriz del sistema

B matriz de entrada del sistema

C matriz de salida del sistema

El modelo en espacio de estados queda representado como:

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} \frac{-R}{L} & 0 & \frac{-k_m}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_m}{J_m} & \frac{-k}{J_m} & \frac{-(b + b_M)}{J_m} & \frac{k}{J_m} & \frac{b}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{k}{J_L} & \frac{b}{J_L} & \frac{-k}{J_L} & \frac{-b}{J_L} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u$$

Y como salida

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x$$

El modelo en espacio de estados con sus valores numéricos se muestra en el apéndice C.

Los datos para el modelo del sistema se obtienen de simulaciones dentro de ambiente CAD (Mechanical Desktop) y del fabricante del motor marca Baldor, modelo para movimiento en azimut BSM80N375AA y para el movimiento en elevación BSM80N250AA. Con estos datos el modelo del sistema de articulación independiente se muestra en el apéndice C para el caso de retroalimentación por velocidad.

Para la obtención de este modelo se sustituyeron los datos técnicos del motor y la carga. Se realizó la construcción del modelo en simulink, y en MalLab, en ambos casos se comprobaron y simplificaron en Matlab, teniendo resultados congruentes con la construcción del modelo completo en Dymola.

Además de este modelo de articulación independiente, se obtendrá por el método de transformaciones homogéneas el modelo de dos grados de libertad y su extensión a cuatro grados de libertad.

4.3.2. Modelo del sistema de dos y cuatro grados de libertad por transformaciones homogéneas.

En las secciones anteriores se definió el procedimiento de la obtención de las ecuaciones de movimiento de un robot manipulador del tipo cadena cinemática, este procedimiento toma en consideración el modelo cinemático expuesto en el capítulo 3. Ahora se procederá a su aplicación para la obtención de las ecuaciones del sistema manipulador.

Tomando en cuenta que la estructura es rígida, se puede seguir los pasos indicados en la sección 4.3.1. Para este modelo se considera que el centro de masa de cada eslabón del sistema esta cerca del centro de masa de cada unión. Para todas las uniones existe asimetría (la asimetría se define cuando el centro de masa no se encuentra en el centro geométrico del eslabón) lo cual se indica en la matriz del sistema que va a ser no diagonal.

4.3.2.1. Modelo de del sistema de dos grados de libertad.

Las matrices de rotación se obtuvieron en la sección 3.5. y serán empleadas para obtener el modelo del sistema. Las matrices de inercia en su forma general son:

$$I1 := \begin{bmatrix} I111 & I112 & I213 \\ I121 & I122 & I123 \\ I131 & I132 & I133 \end{bmatrix}$$

$$I2 := \begin{bmatrix} I211 & I212 & I213 \\ I221 & I222 & I223 \\ I231 & I232 & I233 \end{bmatrix}$$

Donde $I1$ corresponde al eslabón 1 (movimiento de revolución) e $I2$ corresponde al eslabón 2 (movimiento de elevación). Cada componente de la matriz representa el valor de inercia en tres dimensiones que adquiere el eslabón del sistema.

Se procede a realizar el calculo de $D(q)$ de acuerdo a la ecuación:

$$D(q) = \sum_{i=1}^n \left[m_i J_{vi}(q)^T J_{vi}(q) + J_{oi}(q)^T R_i^T(q) I_i R_i^T(q) J_{oi}(q) \right]$$

Para la obtención de los Jacobianos se empleó el procedimiento indicado en 4.2.1.1. El cual toma como base el modelo 1 de un solo sistema esférico.

Los Jacobianos de velocidad lineal para este sistema tienen un valor cero, por lo que el primer término de la expresión anterior es cero para todos los elementos.

$$J_{v1} := \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{v2} := J_{v1}$$

En el caso de los jacobianos de velocidad angular son:

$$J_{w1} := \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{w2} := \begin{bmatrix} 0 & -\sin(t1) \\ 0 & \cos(t1) \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Con base en los componentes anteriores se calcula D(q), cuyos elementos son:

$$d11 := m1 I122 + m2 I211 - m2 I211 \cos(t2)^2 - m2 \sin(t2) \cos(t2) I231 - m2 \cos(t2) \sin(t2) I213 + m2 \cos(t2)^2 I233$$

$$d12 := -m2 (\sin(t2) I212 - \cos(t2) I232)$$

$$d21 := m2 (-I221 \sin(t2) + I223 \cos(t2))$$

$$d22 := m2 I222$$

$$D12 := -m2 (\sin(t2) I212 - \cos(t2) I232) - m2 (-I221 \sin(t2) + I223 \cos(t2))$$

La matriz D(q) se expresa como

$$[m1 I122 + m2 I211 - m2 I211 \cos(t2)^2 - m2 \sin(t2) \cos(t2) I231 - m2 \cos(t2) \sin(t2) I213 + m2 \cos(t2)^2 I233, -m2 (\sin(t2) I212 - \cos(t2) I232)]$$

$$[m2 (-I221 \sin(t2) + I223 \cos(t2)), m2 I222]$$

Paso 2. Calculo de $C(q, \dot{q})$

Para este calculo se debe calcular primero los símbolos de Christoffel, a partir de estos se obtiene la matriz C.

$$C_{dof2_{1,1}} = -\frac{1}{2}m_2(-2I_{211}\cos(t_2)\sin(t_2) + 2\cos(t_2)^2I_{231} - I_{231} - I_{213} + 2\cos(t_2)^2I_{213} + 2\cos(t_2)I_{233}\sin(t_2))T_2$$

$$C_{dof2_{1,2}} = -\frac{1}{2}m_2(-2I_{211}\cos(t_2)\sin(t_2) + 2\cos(t_2)^2I_{231} - I_{231} - I_{213} + 2\cos(t_2)^2I_{213} + 2\cos(t_2)I_{233}\sin(t_2))T_1 - m_2(\cos(t_2)I_{212} + \sin(t_2)I_{232})T_2$$

$$C_{dof2_{2,1}} = \frac{1}{2}m_2(-2I_{211}\cos(t_2)\sin(t_2) + 2\cos(t_2)^2I_{231} - I_{231} - I_{213} + 2\cos(t_2)^2I_{213} + 2\cos(t_2)I_{233}\sin(t_2))T_1$$

$$C_{dof2_{2,2}} = -\frac{1}{2}m_2(I_{221}\cos(t_2) + I_{223}\sin(t_2) - \cos(t_2)I_{212} - \sin(t_2)I_{232})T_1$$

Donde $C_{dof2_{i,j}}$ representa cada posición de la matriz C.

Paso 3. Calculo de $g(q)$

En este caso la gravedad no afecta la dinámica del sistema debido a que por su posición del centro de masa no se desplaza. Por ello $g(q)=0$.

Paso 4. Ecuaciones de movimiento.

En resumen se tiene como ecuaciones del sistema a la siguiente expresión

$$D_{ij}(q)\ddot{q} + C_{ij}(q, \dot{q})\dot{q} + F_v\dot{q} + F\operatorname{sgn}(\dot{q}) = \tau_i$$

que representa en forma general a las ecuaciones del sistema y sus pares aplicados.

Paso 5. Fricción

La fricción viscosa se representa por una matriz diagonal

$$F_v = \begin{bmatrix} f_{v1} & 0 \\ 0 & f_{v2} \end{bmatrix}$$

Los valores a considerar en el modelo 1 del sistema respecto al tensor de inercia, y fricciones, son obtenidos a partir de la simulación del sistema mecánico dentro del ambiente CAD (Mechanical Desktop).

4.3.2.2. Extensión del modelo de dos grados de libertad a cuatro grados de libertad.

En este caso el procedimiento es similar al de dos grados de libertad. Se procede a realizar el calculo de $D(q)$ de acuerdo a la ecuación:

$$D(q) = \sum_{i=1}^n \left[m_i J_{vi}(q)^T J_{vi}(q) + J_{\omega i}(q)^T R_i^T I_i R_i^T(q)^T J_{\omega i}(q) \right]$$

Los jacobianos de velocidad para este sistema tienen un valor de cero, por lo que el primer término de la expresión anterior es cero para todos los elementos.

En el caso de los jacobianos de velocidad angular tenemos:

$$\begin{aligned}
J_{w1} &:= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
J_{w2} &:= \begin{bmatrix} 0 & -\sin(t1) & 0 & 0 \\ 0 & \cos(t1) & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
J_{w3} &:= \begin{bmatrix} 0 & -\sin(t1) & \cos(t1) \sin(t2) & 0 \\ 0 & \cos(t1) & \sin(t1) \sin(t2) & 0 \\ 1 & 0 & \cos(t2) & 0 \end{bmatrix} \\
J_{w4} &:= \begin{bmatrix} 0 & -\sin(t1) & \cos(t1) \sin(t2) & -\cos(t1) \cos(t2) t3 - \sin(t1) \\ 0 & \cos(t1) & \sin(t1) \sin(t2) & -\sin(t1) \cos(t2) t3 + \cos(t1) \\ 1 & 0 & \cos(t2) & \sin(t2) t3 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Con base en los componentes anteriores se calcula $D(q)$, cuyos elementos se muestran en el apéndice A:

Paso 2. Calculo de $C(q, \dot{q})$

Para este calculo se debe calcular primero los símbolos de Christoffel, a partir de estos se obtiene la matriz C, que se muestran en el Apéndice B.

Los pasos 3 y 4 son similares al modelo de dos grados de libertad.

Paso 5. Fricción

La fricción viscosa se representa por una matriz diagonal

$$F_v = \begin{bmatrix} f_{v1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{v2} & & 0 \\ 0 & 0 & f_{v3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_{v4} \end{bmatrix}$$

Como actuador del sistema se utilizó un motor DC para cada eslabón, su modelo además de sus ecuaciones, está considerado en la sección 4.4.1.2. y el apéndice C.

El modelo dinámico se utilizó en el capítulo siguiente. En una primera parte será empleado para la simulación del sistema; de la misma manera el disponer de un modelo basado en ecuaciones matemáticas permite buscar los parámetros del controlador a emplear y verificar el desempeño con los dos lazos de control; por posición y velocidad. Es importante recalcar que en este modelo se incluyen los efectos físicos del sistema.

Capitulo 5. Control de movimiento del sistema.

Dentro de la sociedad los sistemas de control constituyen una parte muy importante. Las aplicaciones del control se encuentran en todas partes del ámbito de la vida del ser humano. Desde los cohetes, hasta la videograbadora, ensamble de piezas, control de robots, etc. Éstos son solo unos ejemplos de sistemas controlados. El control no es privativo de las máquinas, dentro de los seres vivos numeroso sistemas tienen sus propios dispositivos de control. Todos ellos encaminados a un objetivo: lograr una respuesta deseada debido a un estímulo.

Un sistema de control esta formado por subsistemas. Interactúan entre ellos con la finalidad de controlar los procesos. La implementación de un sistema de control se debe a cuatro razones básicas[NN2002]:

- Amplificación de potencia
- Control remoto
- Comodidad de forma de entrada
- Compensación por perturbaciones

5.1. El problema del control.

Dentro de la teoría de control, un sistema o proceso esta formado por un conjunto de elementos interrelacionados. Los elementos darán una respuesta a una señal de entrada. Esta respuesta puede ser acorde a la señal de entrada o totalmente diferente. Por ello existe la necesidad de controlar el proceso conforme a los parámetros que se establezcan. Cada sistema tiene características especiales que lo hacen diferente a otros. Por consecuencia el control aplicado tiene que ser adecuado al sistema.

El objetivo del control del sistema consiste en que a una señal de entrada o referencia, la respuesta del sistema siga la trayectoria indicada. Esto debe ser tan cercano como sea posible y en el menor tiempo posible. Esta actividad no es sencilla debido a que el sistema analizado es del tipo no lineal como lo muestran las ecuaciones del sistema (planta) obtenido en el capítulo anterior, por transformaciones homogéneas.

La figura 5.1. muestra el diagrama de un sistema de control en lazo cerrado. En este se muestran las partes principales: entradas o referencias, salidas o variables controladas y el sistema de control. Este ultimo involucra el controlador, actuadores, transductores, detector de error.

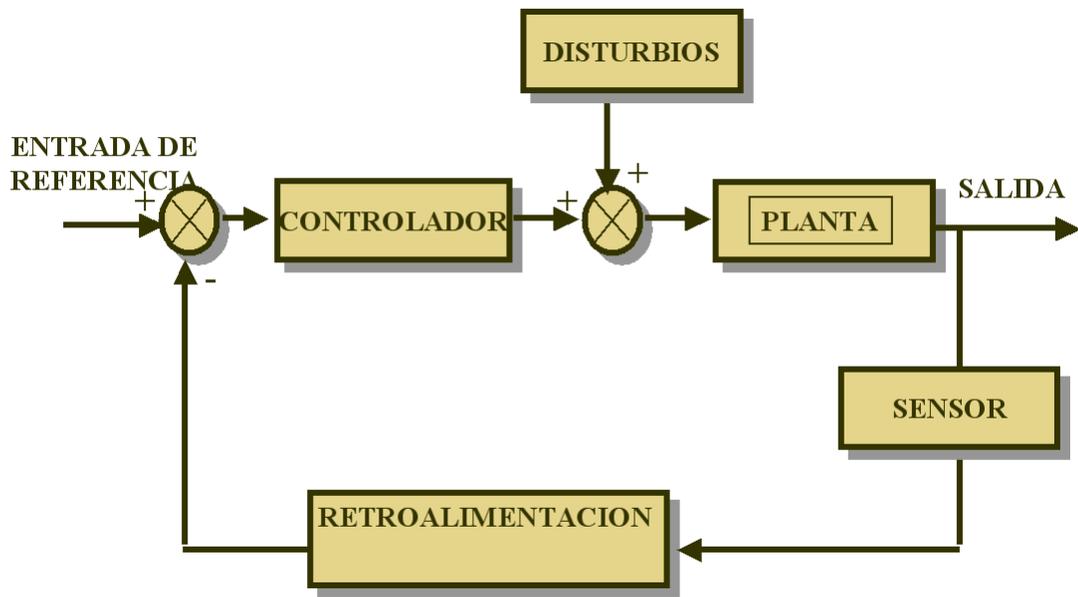


Fig. 5. 1. Diagrama de un sistema de control.

El sistema de control está configurado para operar en lazo cerrado, es decir la señal de salida tendrá efecto sobre la acción de control. A esta acción de control se le denomina retroalimentación. El uso del control retroalimentado se debe a lo siguiente: 1) incrementa la exactitud, 2) reduce la sensibilidad a los disturbios, 3) incrementa el ancho de banda. Para este caso se ensayó con dos tipos de retroalimentación. La primera será empleando retroalimentación por posición del dispositivo manipulador y la segunda empleando retroalimentación por velocidad. El controlador es el encargado de procesar la información de la señal de error y generar una señal encargada de disminuir el valor de esta señal.

Las señales de referencia se toman de la información procesada por medio del análisis de las imágenes. La información de entrada serán las coordenadas cartesianas del objeto en movimiento dentro de la imagen. Debido a la configuración del sistema, cada eslabón se puede analizar en forma independiente.

Las simulaciones del sistema para los tres tipos de controladores (PID, compensador, LQR), se realizaron en Dynamic modeling Laboratory (Dymola), dentro de este ambiente se construyó la planta tomando como base el modelo que incorpora el modelo cinemático y dinámico; dentro de este se incorporan los datos del sistema mecánico, del actuador y de los parámetros del controlador que se este verificando. Para el diseño del controlador y sus parámetros se utilizó MatLab y sus diferentes herramientas de análisis de control.

Las condiciones de prueba para la planta tienen los siguientes consideraciones: tiempo de prueba 10 segundos, valores a considerar como referencia en unidades de radianes para posición y de radianes por segundo en el caso de velocidad; el tipo de señales de entrada al control de la planta considerados son pulso cuadrado con una frecuencia de 0.4 Hz y valores de 1.57 radianes (90 grados por segundo), para la ruta a seguir se propone una ruta de un objeto en movimiento, en el caso de retroalimentación por posición; en el caso de retroalimentación por velocidad como señal de entrada se toma a un pulso cuadrado de 0.4 Hz. durante 10 segundos de prueba. El error máximo buscado es del 5 %. El error que se obtiene es resultado de la diferencia aritmética entre la señal de referencia y el resultado del control.

Para el análisis del control se emplea el modelo de articulación independiente, obteniendo una primera aproximación a los valores requeridos del control, con estos valores se procedió a verificar el comportamiento de la planta construida en el ambiente de Dymola y a realizar los ajustes necesarios a fin de optimizar el control de la planta.

La planta objeto de análisis tiene dos eslabones, en cada eslabón se encuentra un motor para realizar movimiento en azimut (unión 1, azimut o ronza) y un segundo motor para realizar movimiento en elevación (unión 2 o elevación).

En las siguientes secciones se muestran los resultados de las simulaciones, que son resultado de las pruebas de tres tipos de controladores: PID, compensación en adelante, regulador cuadrático. Para los tres tipos las simulaciones realizadas involucran la retroalimentación de la posición y velocidad como variable de control del sistema.

5.2. Control clásico PID.

La acción de control PID o proporcional-integral-derivativo genera una señal resultado de la acción proporcional, acción integral y la derivativa conjuntamente. Su función de transferencia es:

$$Gc(s) = K_1s + \frac{K_2}{s} + K_3s = \frac{K_1s^2 + K_2 + K_3s^2}{s}$$

En este caso se utilizó la configuración en paralelo, lo que se muestra en el siguiente diagrama a bloques :

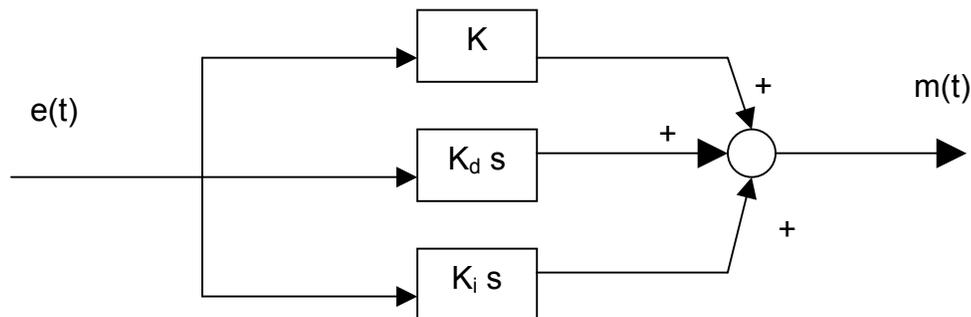


Fig. 5. 2. Esquema de un controlador PID.

Este controlador tiene dos ceros mas un polo en el origen. Para plantas tipo cero, permite eliminar el error en estado estacionario, logrando una buena estabilidad relativa del sistema de control. Para diseñar un control PID se procede de la siguiente manera: primero se obtiene el control

proporcional derivativo para tener las condiciones de respuesta transitoria adecuadas, y segundo se añade el control proporcional integral para que su incorporación no afecte la respuesta transitoria del sistema, pero si elimine el error estacionario. Otro método que se puede utilizar es el de Zieger-Nichols.

En la gráficas siguientes se muestra la respuesta del sistema denominado modelo 1 o de dos grados de libertad.

En las gráficas de la 5.3. a la 5.8. se utiliza retroalimentación por posición; para las graficas 5.3 a 5.5, como entrada se emplea una señal tipo pulso, mientras que para las graficas 5.6 a la 5.8, como señal de entrada, se utiliza una ruta que debe seguir la unión en cuestión; las graficas 5.9. a la 5.11 comprende retroalimentación por velocidad; en este caso, es importante notar que para lograr el desplazamiento de la unión, debe aplicarse por un tiempo determinado un valor de velocidad, el cual es proporcional al movimiento deseado; en el caso de buscar el no desplazamiento, la velocidad debe tener un valor cero.

5.2.1. Respuesta a una entrada tipo pulso cuadrado (retroalimentación por posición).

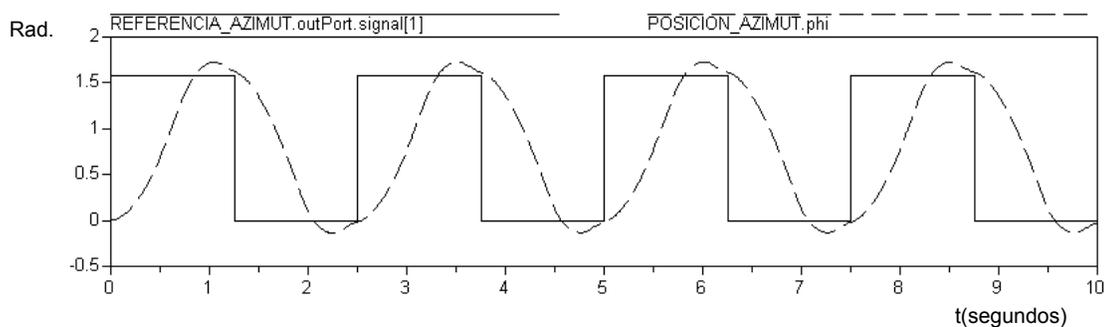


Fig. 5. 3. Posición de la unión 1 (azimut), control PID.

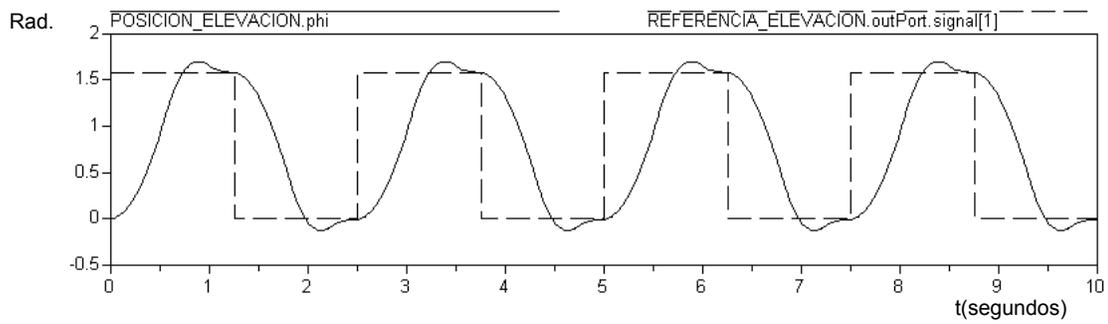


Fig. 5. 4. Posición de la unión 2 (elevación), control PID.

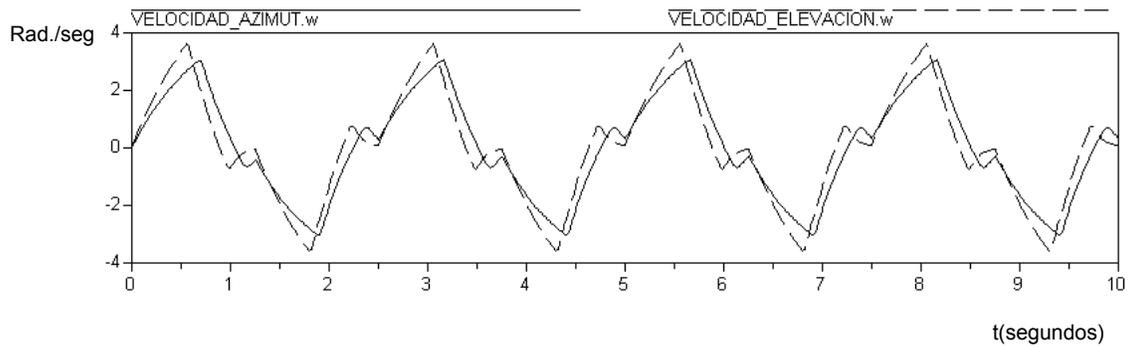


Fig. 5. 5. Velocidades de las dos uniones(azimut y elevación), control PID .

5.2.2. Respuesta a una ruta establecida (retroalimentación por posición).

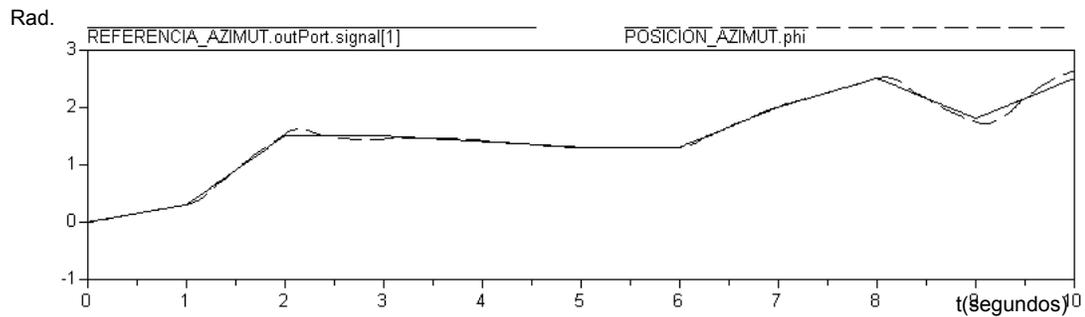


Fig. 5. 6. Posición la unión 1 (azimut), control PID.

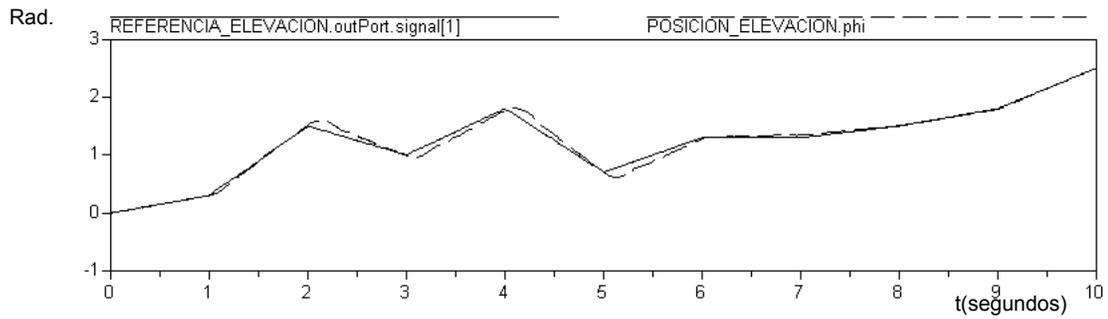


Fig. 5. 7. Posición de la unión 2 (elevación), control PID.

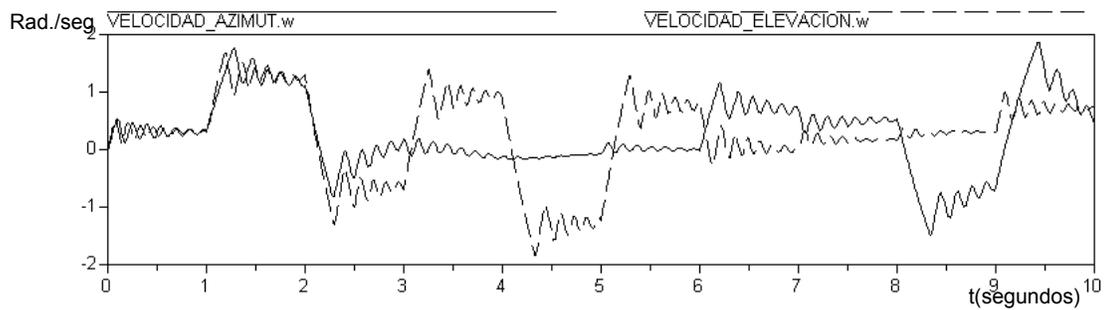


Fig. 5. 8. Velocidades de las dos uniones, control PID .

5.2.3. Respuesta a una entrada tipo pulso (retroalimentación por velocidad).

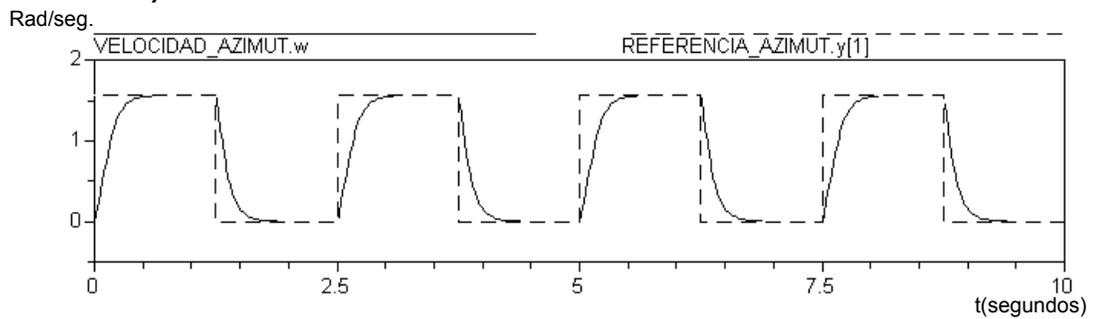


Fig. 5. 9. Velocidad de la unión 1 (azimut), control PID.

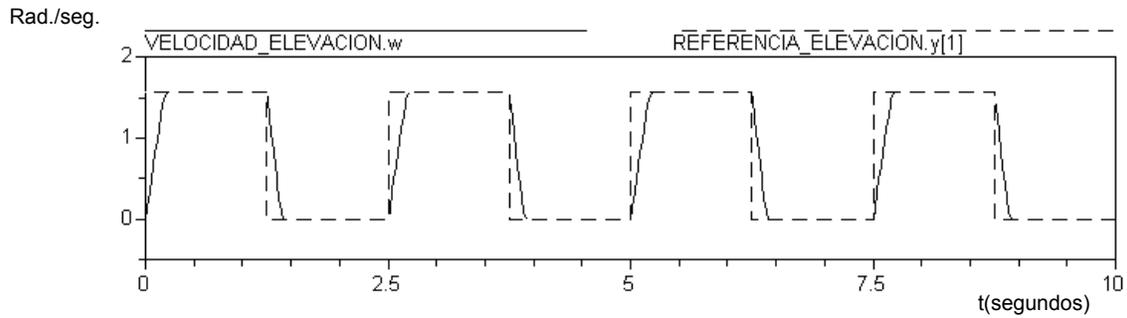


Fig. 5. 10. Velocidad de la unión 2 (elevación), control PID.

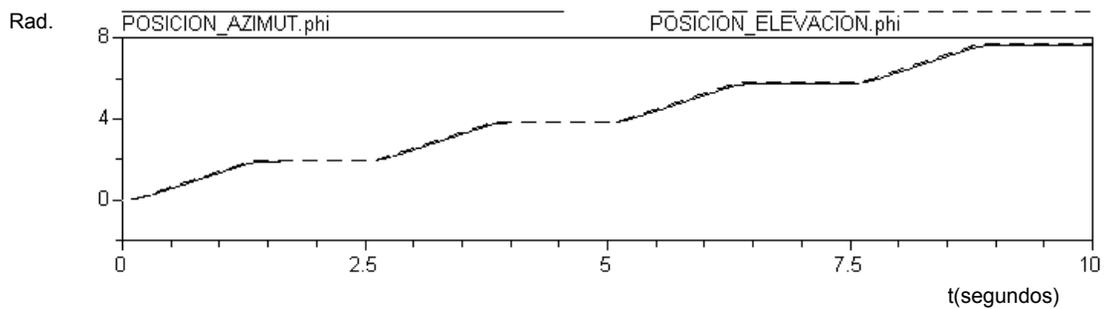


Fig. 5. 11. Posición de las dos uniones.

5.2.4. Análisis del controlador PID.

Los resultados para el control empleando PID son los siguientes:

En las gráficas 5.3 y 5.4 se muestra la respuesta de las dos uniones para una entrada tipo pulso con retroalimentación de posición del sistema; en este caso el controlador PID (con constantes de tiempo de integración para movimiento en azimuth $T_i=0.1$, de derivación $T_d=0.8$ y $K=250$, para movimiento en elevación $T_i=0.4$, de derivación $T_d=0.85$ y $K=1250$) logra un control de la planta pero no es capaz de realizar los ajustes necesarios para que la salida sea la indicada, el controlador logra dentro de un cierto rango buscar la salida deseada, pero la respuesta no es la solicitada, existiendo un error de hasta un 20%; además existen sobretiro del sistema. Se puede apreciar como los movimientos de las uniones tienen influencia entre ellas, debido a las partes mecánicas y por la inercia del movimiento. También en el aspecto de velocidad se identifica como la velocidad va oscilando y no tiene

estabilidad para el movimiento constante, debido al paro y arranque de cada unión, esto se muestra en la Figura 5.8.

En el caso del seguimiento de una ruta que se muestra en las figuras 5.6., 5.7. y 5.8. El seguimiento de la señal de referencia es posible solo en el caso de existir cambios pequeños de la ruta en aproximadamente 0.4 segundos, lo cual nos lleva a que este controlador podría seguir un perfil de ruta tipo senoidal con mayor facilidad. En el caso de cambios rápidos no tiene capacidad de respuesta.

Las graficas 5.9., 5.10. y 5.11., muestran la simulación con retroalimentación por velocidad de la planta y el controlador PID (con constantes de tiempo de integración para movimiento en azimut $T_i=150$, de derivación $T_d=0.09$ y $K = 10000$, para movimiento en elevación $T_i=1200$, de derivación $T_d=0.01$ y $K = 10000$). En este caso el controlador es capaz de seguir a la señal de entrada con un alto grado de exactitud. Lo interesante de esta salida es que a cualquier velocidad, la posición que va logrando el sistema es secuencial, sin tener sobretiro y manteniendo el control de la planta. Como resultado del PID con retroalimentación por velocidad, se obtiene un control sin sobretiro y con un error menor al 5%.

5.3. Controlador de compensador de adelanto

El compensador en adelanto tiene la característica de introducir un polo y un cero en el sistema a compensar [GS99]. La separación del polo y el cero depende del parámetro de diseño α . La función del compensador de adelanto es:

$$D(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = \alpha \frac{1 + Ts}{1 + \alpha Ts} = \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}}$$

donde α es menor a la unidad.

En este tipo de controlador el polo está situado a una frecuencia mayor que el cero, distanciados por un valor de α . El compensador de adelanto se empleó para mejorar el margen de fase del sistema que se desea compensar.

Las gráficas 5.12. a la 5.17. corresponden a retroalimentación por posición; para las gráficas 5.12 a 5.14, como entrada se emplea una señal tipo pulso cuadrado, mientras que para las gráficas 5.15 a la 5.17, como señal de entrada se utiliza una ruta que debe seguir la unión en cuestión; las gráficas 5.18. a la 5.20 comprende retroalimentación por velocidad; en este caso, es importante notar que para lograr el desplazamiento de la unión, debe aplicarse por un tiempo determinado un valor de velocidad, el cual es proporcional al movimiento deseado; en el caso de buscar el no desplazamiento, la velocidad debe tener un valor cero. En el caso de buscar desplazamiento en sentido negativo, debe aplicarse un valor de velocidad valor negativo.

5.3.1. Respuesta a una entrada tipo pulso (retroalimentación por posición).

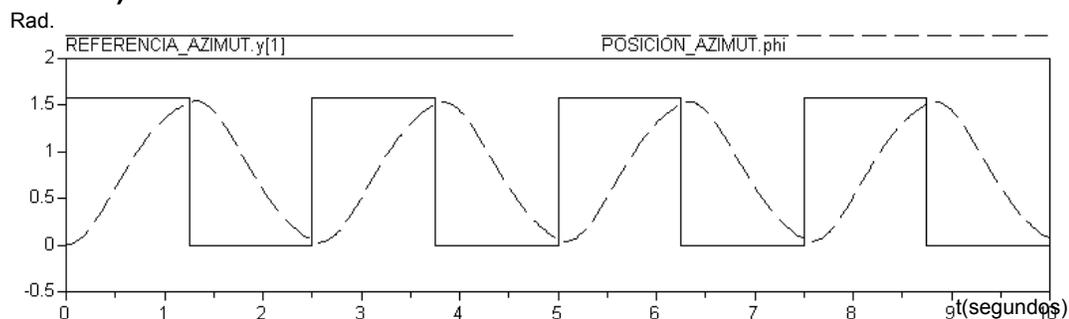


Fig. 5. 12. Posición de la unión 1 (azimut), control por compensador.

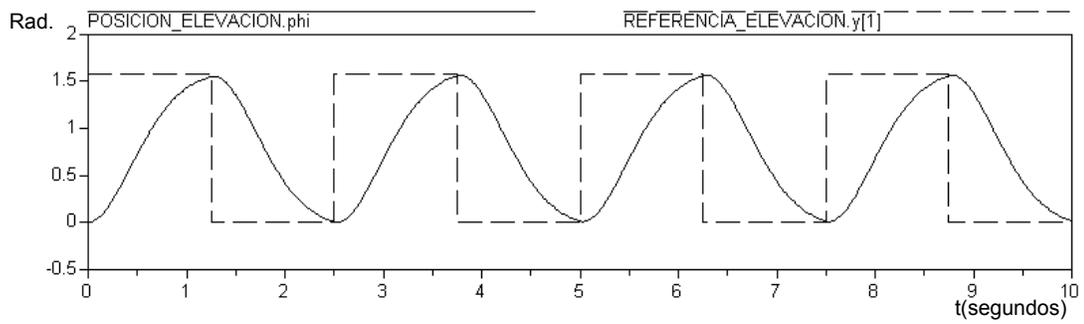


Fig. 5. 13. Posición de la unión 2 (elevación), control por compensador.

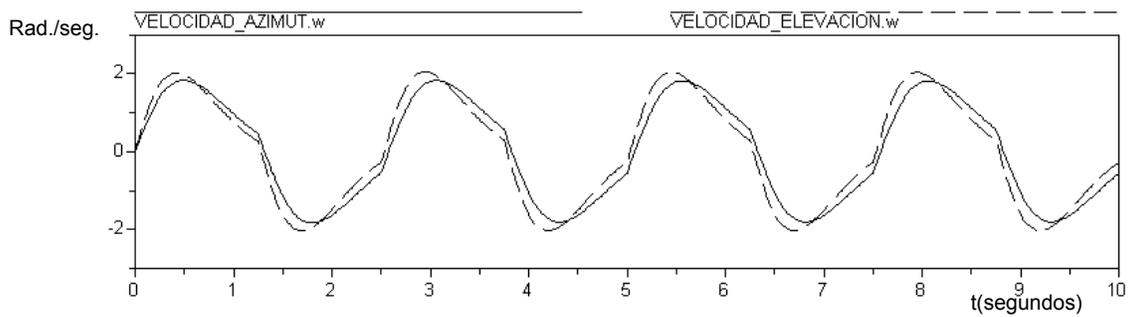


Fig. 5. 14. Velocidades de las dos uniones.

5.3.2. Respuesta a una entrada de referencia(retroalimentación por posición).

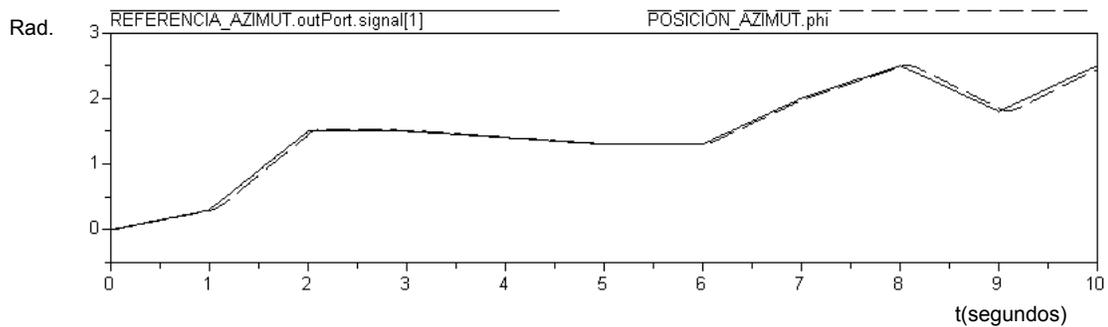


Fig. 5. 15. Posición de la unión 1 (azimut), control por compensador.

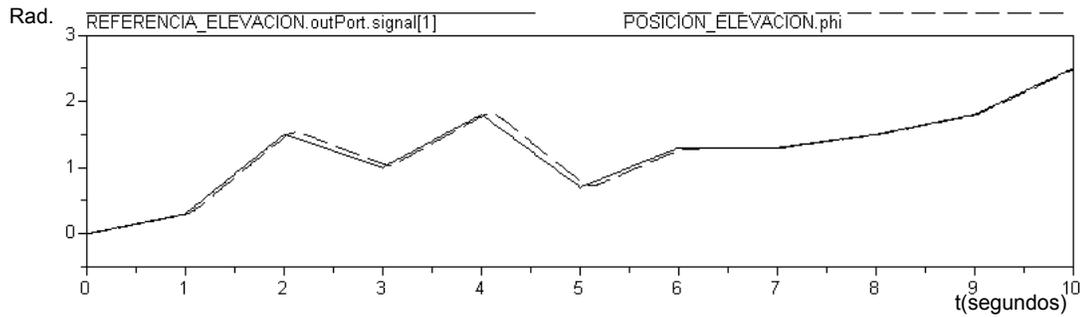


Fig. 5. 16. Posición de la unión 2 (elevación), control por compensador.

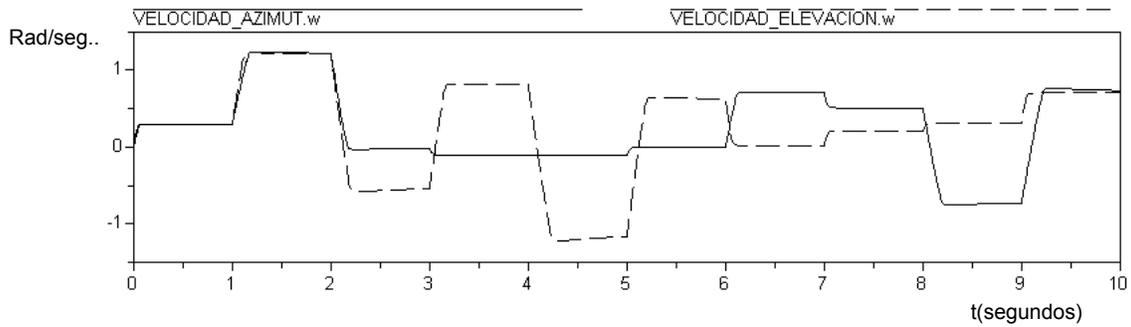


Fig. 5. 17. Velocidad de las dos uniones.

5.3.3. Respuesta a una entrada tipo pulso (retroalimentación por velocidad).

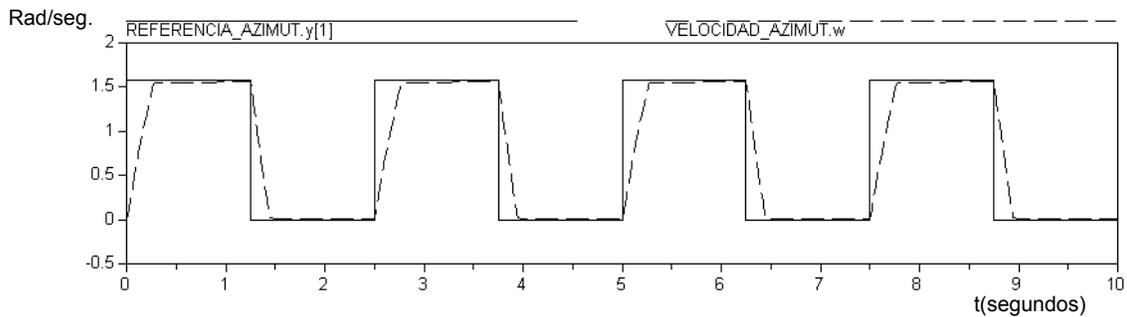


Fig. 5. 18. . Velocidad en la unión 1 (azimut), control por compensador.

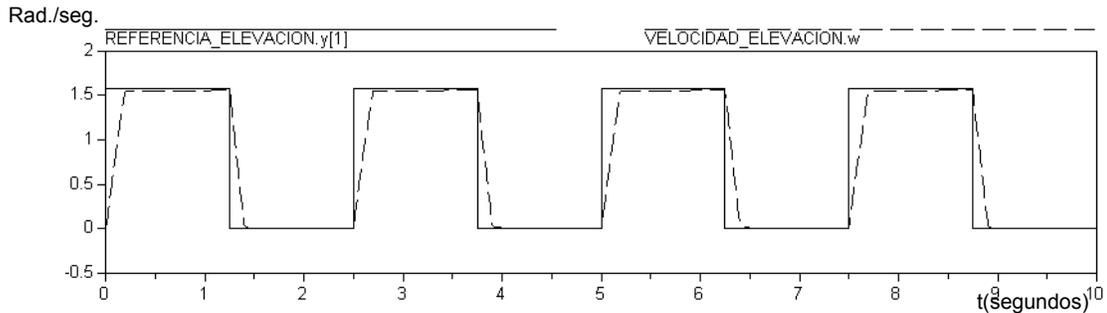


Fig. 5.19. Velocidad en la unión 2 (elevación), control por compensador.

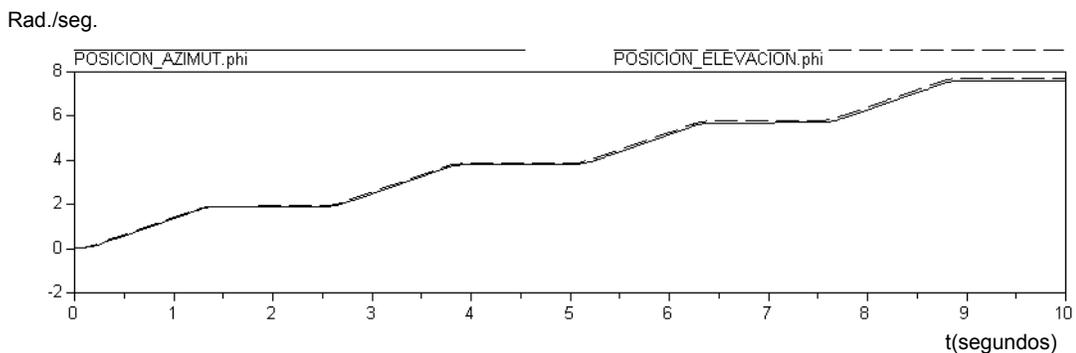


Fig. 5.20. Posiciones de las dos uniones.

5.3.4. Análisis del control empleando compensador de adelanto.

Los resultados para el controlador de compensación de adelanto son los siguientes:

En las gráficas 5.12. y 5.13. el controlador es capaz de realizar los ajustes para que la señal de salida siga a la de referencia, el error que existe es menor a un 5%; no existen oscilaciones en el sistema o sobretiro.

En el caso del seguimiento de una ruta mostrado en las figuras 5.15., 5.16. y 5.17. el control tiene la capacidad de seguir la ruta indicada con un error menor al 5%. Para los cambios de la planta, el control es capaz de seguir la señal de entrada, el sistema adquiere una velocidad de 1.4 radianes/seg. para lograr las posiciones deseadas.

Para las graficas 5.18., 5.19. y 5.20., el controlador tiene como retroalimentación señal de velocidad, el desempeño logrado, es similar al

control anterior. Además se tiene un control sobre la velocidad y permite tener la posición de la planta en forma secuencial, como se muestra en la figura 5.20. En este caso tanto el control tanto para retroalimentación por velocidad como por posición, es capaz de seguir a la entrada y tener control sobre la planta.

5.4. Regulador cuadrático.

Considerando el siguiente sistema lineal en la forma de espacio de estados:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Nv_1 \\ z &= Mx \\ y &= Cx + v_2 \end{aligned}$$

Donde v_1 y v_2 son ruido blanco. Se toma como suposición que la referencia es $r=0$. Para el control cuadrático lineal se calcula como señal de retroalimentación lineal a $u(t) = F_y y(t)$, de tal forma que minimicé la condición:

$$J_{\min} = \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt$$

Donde el error es $e=r-z$. Para este caso, la ley de control debe tomar en cuenta que el regulador cuadrático esta dado como $u(t) = -Kx(t)$ y $K = R^{-1} B^T P$. Donde P que es una matriz semidefinida positiva, y es la solución a la ecuación de Ricati [SB93].

$$A^T P + PA - PBR^{-1} B^T P + Q = 0$$

Para encontrar la solución a la ecuación de Riccati, se deben probar diferentes valores de R y Q, hasta encontrar los datos que permitan establecer el control deseado [SB93]. Las gráficas 5.21. a la 5.26. corresponden a retroalimentación por posición y las graficas 5.27 a la 5.29. comprende retroalimentación por velocidad.

5.4.1. Respuesta a una entrada tipo pulso (retroalimentación por posición).

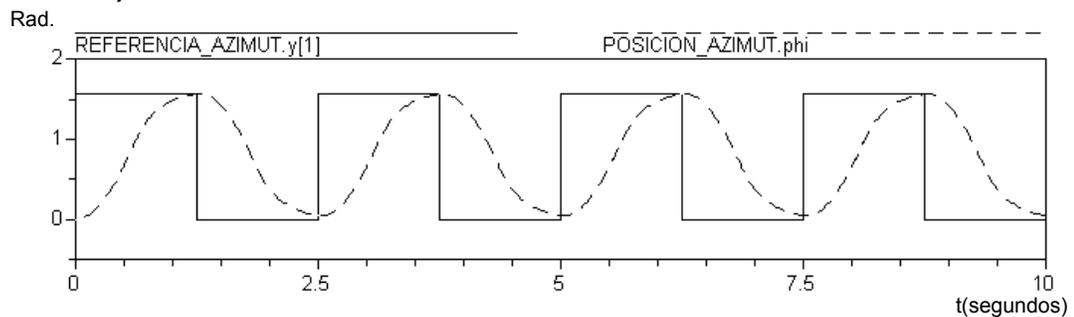


Fig. 5. 21. Posición de la unión 1 (azimut), control por regulador.

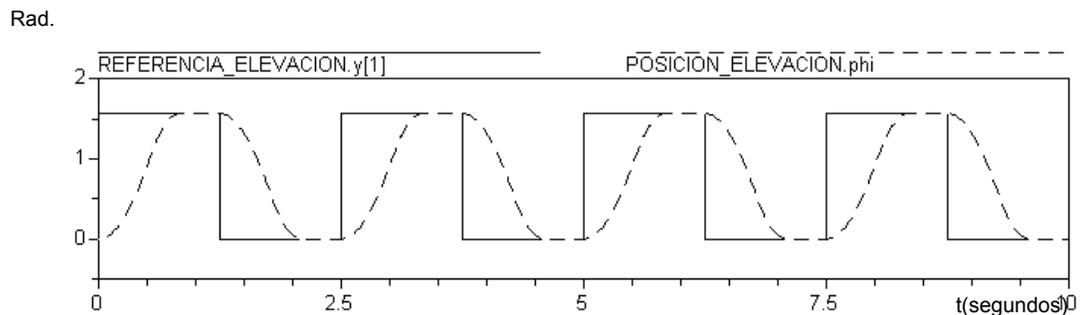


Fig. 5. 22. Posición de la unión 2 (elevación), control por regulador.

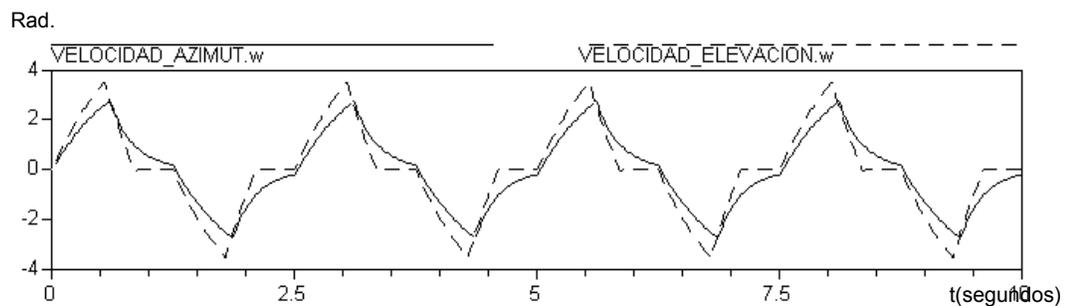


Fig. 5. 23. Velocidades de las dos uniones.

5.4.2. Respuesta a una entrada de referencia(retroalimentación por posición).

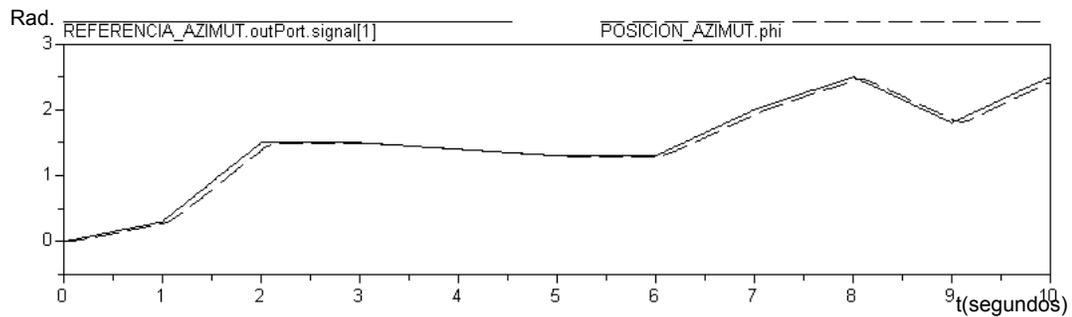


Fig. 5. 24. . Posición de la unión 1 (azimut), control por regulador.

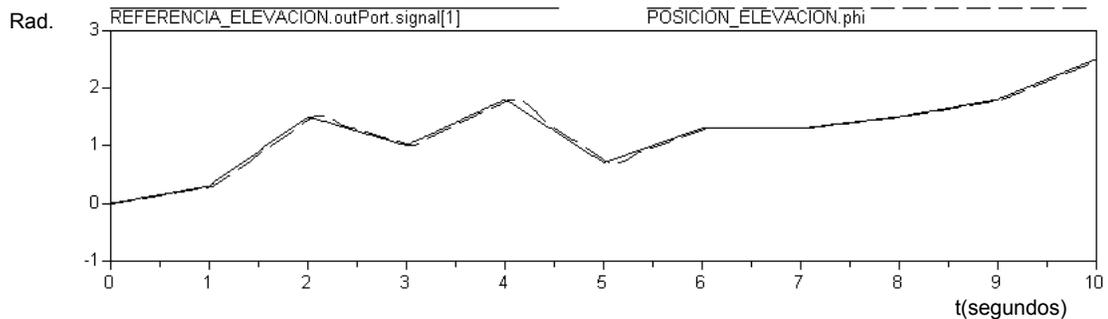


Fig. 5. 25. Posición de la unión 2 (elevación), control por regulador.

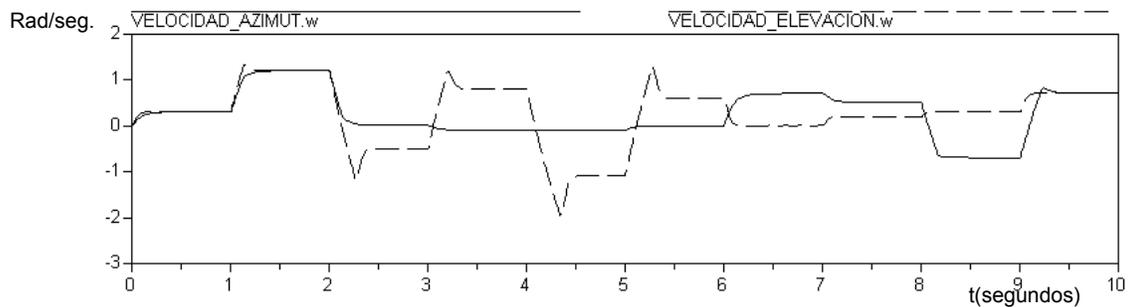


Fig. 5. 26. Velocidades de las dos uniones.

5.4.3. Respuesta a una entrada de referencia (retroalimentación por velocidad).

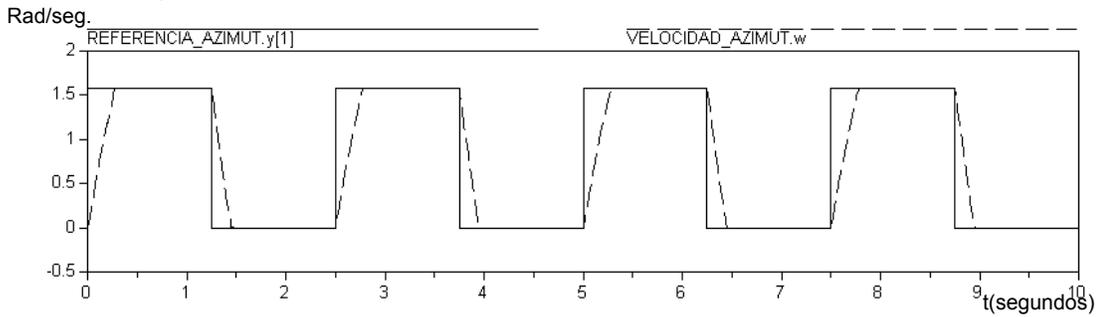


Fig. 5. 27. Velocidad y posición de la unión 1 (azimut), control por regulador.

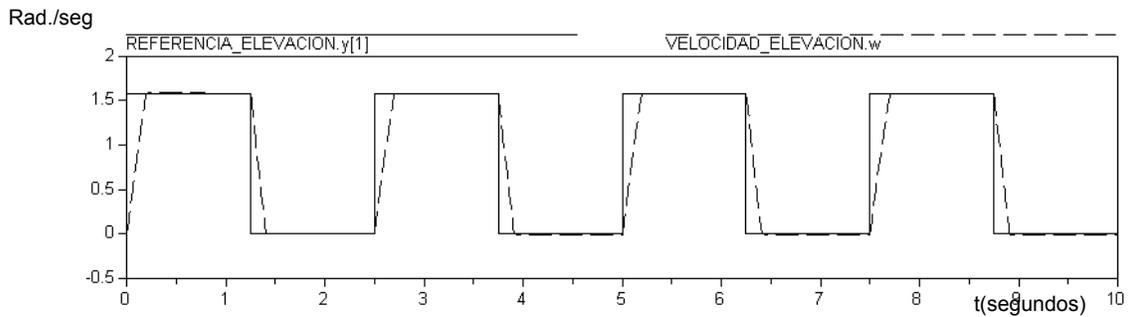


Fig. 5. 28. Velocidad y posición de la unión 2 (elevación), control por regulador.

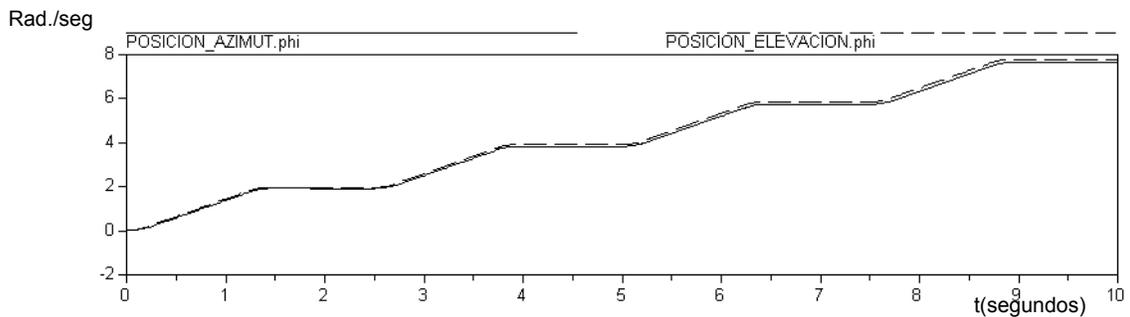


Fig. 5. 29. Posición de las dos uniones, control por regulador.

5.4.4. Análisis del control empleando regulador cuadrático.

El regulador cuadrático lineal [SB93] tiene un desempeño similar al compensador de adelanto. En las gráficas 5.21 y 5.22 se muestra la respuesta con retroalimentación por posición de las uniones para una entrada tipo pulso. El controlador es capaz de seguir a la señal con un error menor al 5%. Para esta simulación se graficó la respuesta de la posición y se muestra el desplazamiento lineal de la posición del sistema. En el caso del seguimiento de una ruta que se muestra en las figuras 5.24., 5.25. y 5.26., el seguimiento de la señal tiene un error menor al 5%.

Las graficas 5.27., 5.28. y 5.29., muestran la simulación con retroalimentación por velocidad de la planta. En este caso el controlador es capaz de seguir a la señal de entrada con un error menor al 5%. Este tipo de controlador permite lograr una un posicionamiento secuencial de las uniones de los eslabones y tener el control sobre la planta.

5.5. Análisis comparativo del control de la planta.

En las secciones anteriores se simularon tres tipos de control. Para los casos analizados, se muestra en la tabla 5.1., un resumen de los resultados.

Controlador	Retroalimentación	
	Posición	Velocidad
PID	Respuesta inadecuada; 20% de error y sobretiro	Respuesta adecuada. Menos del 5% de error
Compensador	Respuesta adecuada. Menos del 5% de error	Respuesta adecuada. Menos del 5% de error
Regulador cuadrático L.	Respuesta adecuada. Menos del 5% de error	Respuesta adecuada. Menos del 5% de error

Tabla 5. 1. Comparativa de controladores.

Como se muestra en la tabla anterior, el controlador tipo PID con retroalimentación por posición tiene control sobre la planta, pero en cuestión de velocidad tiene cambios bruscos. Para el caso de control de velocidad con PID se logra el control de la planta, pero involucraría realizar cálculos para conocer la posición de la planta. En el caso del control empleando compensador en adelanto y regulador cuadrático, considerando tanto retroalimentación por posición como por velocidad, se logra el control de la planta con error menor al 5%. El margen de fase para el control empleando PID y retroalimentación por velocidad es bajo (5 grados), en cambio para el control empleando compensador de adelanto y regulador cuadrático es superior a 50 grados, lo que previene respuestas oscilatorias y una buena robustez. Una buena robustez en un sistema se logra cuando el margen de fase es superior a 45 grados. También se tiene que para el caso de control con PID la ganancia en lazo abierto es baja, mientras que para el control con compensador ó regulador cuadrático es mayor, con ello se tiene un mejor rechazo a perturbaciones.

5.5. Algoritmo de control.

En la figura 5.30 se muestra la propuesta del sistema de control. Se identifica una sección donde recibe información de posibles movimientos del sistema como inclinación, esto para compensaciones o referencias de movimientos. La trayectoria proviene del sistema que analiza las imágenes, para proporcionar información de la ruta, posición o velocidad a seguir y así mantener al objeto al centro de la imagen. El algoritmo de control involucra establecer una ley de control que contemple los puntos ya referidos. La información del controlador se envía al amplificador y motor para realizar el movimiento respectivo

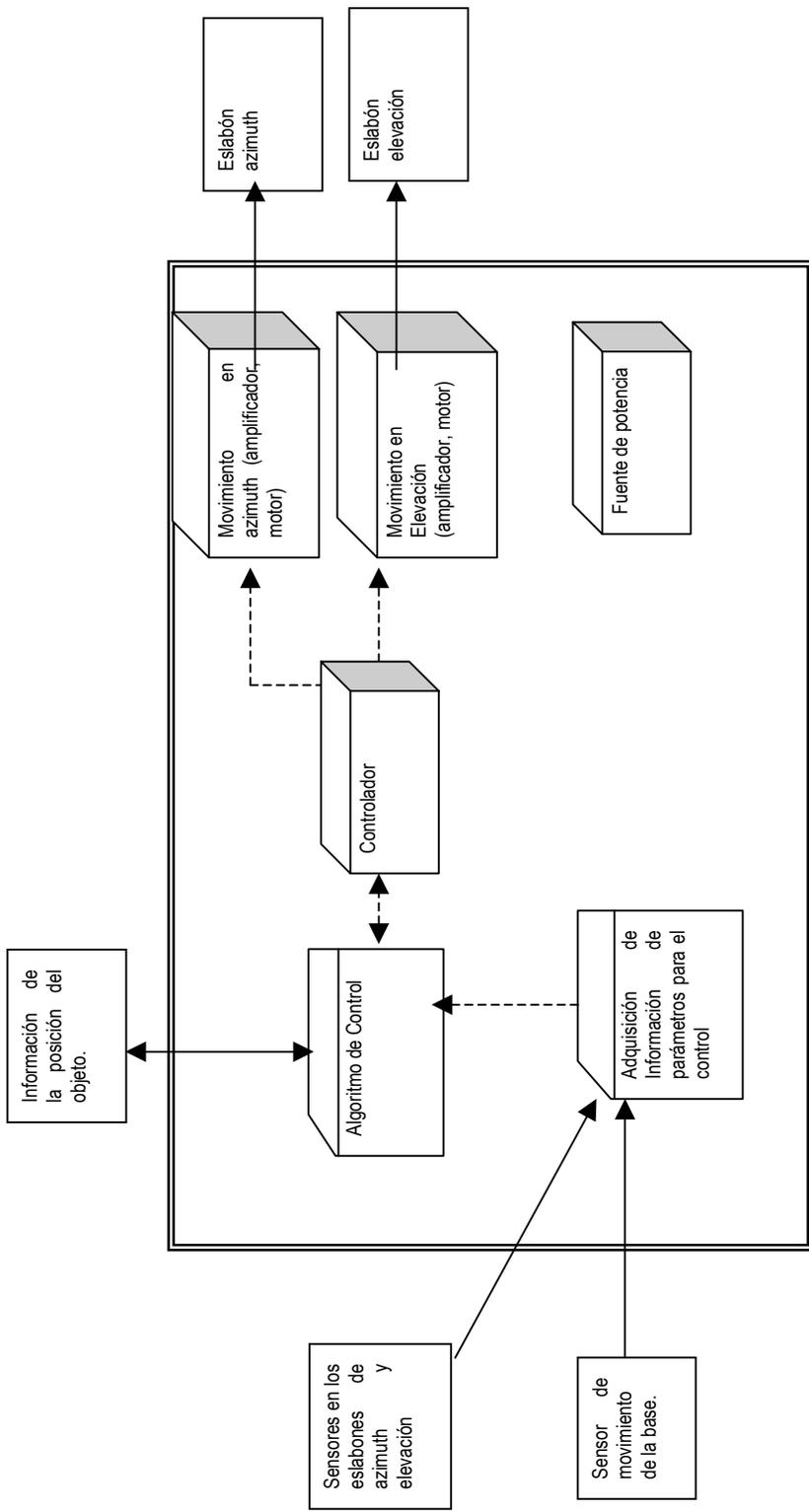


Fig. 5.30. Arquitectura del sistema de control.

Para lograr el control del sistema, se consideran dos casos de señal de retroalimentación: por posición y por velocidad. Al utilizar retroalimentación por posición, el control se logra empleando compensador de adelanto o regulador cuadrático, en el caso de utilizar como retroalimentación a la velocidad, el control se obtiene con PID, compensador de adelanto o regulador cuadrático. Como información de control para ambos casos, se emplea la posición del objeto en movimiento en las imágenes, esto se logra empleando correlación con el análisis de imágenes, que toma en consideración dos dimensiones (x,y). El uso de un filtro Kalman estima la posición del objeto en movimiento a fin de tener un mejor seguimiento del objeto. El movimiento de las uniones depende del Filtro Kalman por la estimación de los valores de movimiento que se van a emplear como señal de referencia del sistema. En las gráficas 5.6. a 5.8., 5.15 a 5.17 y 5.24 a 5.26 se muestra una ruta que debe seguir el sistema, en este caso se introdujeron perturbaciones al sistema para verificar su comportamiento y para compensar los movimientos externos. También se efectuaron pruebas con otro tipo de motores de la marca Maxon, las pruebas arrojaron como resultado que no cumplieron con el requerimiento de 90 grados por segundo y solo lograban 30 grados por segundo.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro.

6.1. Conclusiones.

El algoritmo para el seguimiento de objetos propuesto, permite estimar los movimientos del objeto a seguir. Con ello se obtienen los datos anticipados para un buscar un seguimiento de objetos y orientar al sistema con respuesta inmediata. Este tipo de estimación la realiza un filtro Kalman, quien es encargado de verificar el movimiento del objeto en la imagen y auxiliar en su seguimiento. Con esto se busca mantener al objeto al centro de la imagen.

Uno de los principales problemas dentro del control de movimiento, es la planeación de la trayectoria y el control de movimiento, por ello debe verificarse que el movimiento determinado por el análisis de imágenes, sea lo más fiel a la ruta que sigue el objeto en movimiento.

El modelo cinemático representa a la planta sin considerar las disturbios debidos a fricciones, gravedad, inercia y peso, se verificó su desempeño con los parámetros Denavit Hartenberg (distancias y ángulos) y

su simulación permitió verificar el movimiento de los dos ejes del sistema. Para ello se simuló el sistema simplificado y el 3D. Se tomó como base la representación de Denavit Hartenberg tanto estandar como modificada. Los resultados del movimiento son los mismos.

El modelo dinámico obtenido permite incorporar los efectos reales del sistema para que se aproxime al dispositivo real. Se simuló el modelo de articulación desacoplada en ambiente MatLab y en Dymola, para este último se construyó el sistema completo de dos ejes. Ambos sistemas muestran respuestas similares. Cabe mencionar que en colaboración con el Centro de Estudios Navales, se implementó en un simulador prototipo el control PID con retroalimentación de velocidad, logrando el control del sistema a un 20% de la velocidad planteada.

Se determinó que para el control del sistema se puede utilizar retroalimentación por posición y por velocidad. Para el caso de retroalimentación por posición el controlador de adelanto de fase y regulador cuadrático son adecuados, el control por PID no se recomienda debido a que tiene un error de hasta 20%. Lo cual queda fuera del límite establecido. En el caso de retroalimentación por velocidad los tres tipos de control se pueden utilizar.

Se verificó con diferentes tipos de señales de entrada para determinar si el control del sistema lograba responder a la señal de referencia. Se obtuvo una respuesta con error menor al 5%. Esto se muestra en las gráficas de las simulaciones del capítulo 5. Dentro de las simulaciones, debe observarse que la velocidad del sistema se relaciona con la rapidez de respuesta que se le exige al sistema. De manera recíproca, al reducir la rapidez en el tiempo de respuesta del sistema, la velocidad del manipulador

decrecerá proporcionalmente. Esto puede ser corroborado con simulaciones en las que no se pida una velocidad de 90 grados por segundo.

6.1. Trabajo futuro.

Como trabajo futuro de esta investigación se propone lo siguiente: desarrollar y probar un planeador de trayectorias a fin de reducir el error en el seguimiento. También queda el diseñar el control de un segundo sistema montado sobre éste a fin de buscar mayor exactitud del sistema en el seguimiento de objetos. Finalmente, se propone la implementación de este control empleando dispositivos de control digital y/o analógico, como por ejemplo la tarjeta de Control de Motores ADMC401 de Analog Device, y la tarjeta de Control de movimiento TMDSP3P7613 de Texas Instruments.

Apéndice A. D(q).

Los valores a considerar en el modelo 2 de D(q) son

$$\begin{aligned}
 d_{11} &= m_1^2 I_{122} + m_2^2 I_{211} - m_2^2 I_{211} \cos(t_2)^2 - m_2^2 \sin(t_2) \cos(t_2) I_{231} - m_2^2 \cos(t_2) \sin(t_2) I_{213} + m_2^2 \cos(t_2)^2 I_{233} + m_3^2 I_{311} \\
 &\quad - m_3^2 I_{311} \cos(t_2)^2 + m_3^2 I_{322} \cos(t_2)^2 + m_3^2 t_3^2 I_{333} - m_3^2 I_{333} \cos(t_2)^2 t_3^2 + m_4^2 I_{411} - m_4^2 I_{411} \cos(t_2)^2 \\
 &\quad + 2 m_4^2 I_{411} \sin(t_2) \cos(t_2) t_4 + m_4^2 I_{411} \cos(t_2)^2 t_4^2 + m_4^2 I_{422} t_3^2 - m_4^2 I_{422} t_3^2 \cos(t_2)^2 + m_4^2 I_{433} t_4^2 - m_4^2 I_{433} t_4^2 \cos(t_2)^2 \\
 &\quad - 2 m_4^2 I_{433} \sin(t_2) \cos(t_2) t_4 + m_4^2 I_{433} \cos(t_2)^2 \\
 d_{12} &= -m_2^2 \sin(t_2) I_{212} + m_2^2 \cos(t_2) I_{232} - t_3 I_{311} \sin(t_2) m_3^2 + t_3 I_{333} \sin(t_2) m_3^2 - t_3 m_4^2 I_{411} \sin(t_2) - t_3 m_4^2 I_{411} \cos(t_2) t_4 \\
 &\quad + t_3 m_4^2 I_{422} \sin(t_2) - t_3 m_4^2 I_{433} t_4^2 \sin(t_2) + t_3 m_4^2 I_{433} \cos(t_2) t_4 \\
 d_{13} &= m_4^2 I_{433} \cos(t_2) + m_4^2 I_{411} t_4^2 \cos(t_2) - m_4^2 I_{433} \sin(t_2) t_4 + m_4^2 I_{411} \sin(t_2) t_4 + I_{322} \cos(t_2) m_3^2 \\
 d_{14} &= m_4^2 t_3 I_{422} \sin(t_2) (1 + t_3^2) \\
 d_{21} &= -m_2^2 I_{221} \sin(t_2) + m_2^2 I_{223} \cos(t_2) - t_3 I_{311} \sin(t_2) m_3^2 + t_3 I_{333} \sin(t_2) m_3^2 - t_3 m_4^2 I_{411} \sin(t_2) - t_3 m_4^2 I_{411} \cos(t_2) t_4 \\
 &\quad + t_3 m_4^2 I_{422} \sin(t_2) - t_3 m_4^2 I_{433} t_4^2 \sin(t_2) + t_3 m_4^2 I_{433} \cos(t_2) t_4 \\
 d_{22} &= m_2^2 I_{222} + m_3^2 I_{311} t_3^2 + m_3^2 I_{333} + m_4^2 I_{422} + m_4^2 I_{433} t_4^2 t_3^2 + m_4^2 I_{411} t_3^2 \\
 d_{31} &= m_4^2 I_{433} \cos(t_2) + m_4^2 I_{411} t_4^2 \cos(t_2) - m_4^2 I_{433} \sin(t_2) t_4 + m_4^2 I_{411} \sin(t_2) t_4 + I_{322} \cos(t_2) m_3^2 \\
 d_{32} &= -m_4^2 t_3 t_4 (I_{411} - I_{433}) \\
 d_{33} &= m_4^2 I_{411} t_4^2 + m_4^2 I_{433} + m_3^2 I_{322} \\
 d_{34} &= 0 \\
 d_{41} &= m_4^2 t_3 I_{422} \sin(t_2) (1 + t_3^2) \\
 d_{42} &= m_4^2 I_{422} (1 + t_3^2) \\
 d_{43} &= 0 \\
 d_{44} &= m_4^2 I_{422} (t_3^4 + 1 + 2 t_3^2)
 \end{aligned}$$

La matriz D(q) se expresa como

$$\begin{aligned}
& [m_1^2 I_{122} + m_2^2 I_{211} - m_2^2 I_{211} \cos(t_2)^2 - m_2^2 \sin(t_2) \cos(t_2) I_{231} - m_2^2 \cos(t_2) \sin(t_2) I_{213} + m_2^2 \cos(t_2)^2 I_{233} + m_3^2 I_{311} \\
& - m_3^2 I_{311} \cos(t_2)^2 + m_3^2 I_{322} \cos(t_2)^2 + m_3^2 t_3^2 I_{333} - m_3^2 I_{333} \cos(t_2)^2 t_3^2 + m_4^2 I_{411} - m_4^2 I_{411} \cos(t_2)^2 \\
& + 2 m_4^2 I_{411} \sin(t_2) \cos(t_2) t_4 + m_4^2 I_{411} \cos(t_2)^2 t_4^2 + m_4^2 I_{422} t_3^2 - m_4^2 I_{422} t_3^2 \cos(t_2)^2 + m_4^2 I_{433} t_4^2 - m_4^2 I_{433} t_4^2 \cos(t_2)^2 \\
& - 2 m_4^2 I_{433} \sin(t_2) \cos(t_2) t_4 + m_4^2 I_{433} \cos(t_2)^2 t_4^2, -m_2^2 \sin(t_2) I_{212} + m_2^2 \cos(t_2) I_{232} - t_3 I_{311} \sin(t_2) m_3^2 + t_3 I_{333} \sin(t_2) m_3^2 \\
& - t_3 m_4^2 I_{411} \sin(t_2) - t_3 m_4^2 I_{411} \cos(t_2) t_4 + t_3 m_4^2 I_{422} \sin(t_2) - t_3 m_4^2 I_{433} t_4^2 \sin(t_2) + t_3 m_4^2 I_{433} \cos(t_2) t_4, \\
& m_4^2 I_{433} \cos(t_2) + m_4^2 I_{411} t_4^2 \cos(t_2) - m_4^2 I_{433} \sin(t_2) t_4 + m_4^2 I_{411} \sin(t_2) t_4 + I_{322} \cos(t_2) m_3^2, m_4^2 t_3 I_{422} \sin(t_2) (1 + t_3^2)] \\
& [-m_2^2 I_{221} \sin(t_2) + m_2^2 I_{223} \cos(t_2) - t_3 I_{311} \sin(t_2) m_3^2 + t_3 I_{333} \sin(t_2) m_3^2 - t_3 m_4^2 I_{411} \sin(t_2) - t_3 m_4^2 I_{411} \cos(t_2) t_4 \\
& + t_3 m_4^2 I_{422} \sin(t_2) - t_3 m_4^2 I_{433} t_4^2 \sin(t_2) + t_3 m_4^2 I_{433} \cos(t_2) t_4, \\
& m_2^2 I_{222} + m_3^2 I_{311} t_3^2 + m_3^2 I_{333} + m_4^2 I_{422} + m_4^2 I_{433} t_4^2 t_3^2 + m_4^2 I_{411} t_3^2, -m_4^2 t_3 t_4 (I_{411} - I_{433}), m_4^2 I_{422} (1 + t_3^2)] \\
& [m_4^2 I_{433} \cos(t_2) + m_4^2 I_{411} t_4^2 \cos(t_2) - m_4^2 I_{433} \sin(t_2) t_4 + m_4^2 I_{411} \sin(t_2) t_4 + I_{322} \cos(t_2) m_3^2, -m_4^2 t_3 t_4 (I_{411} - I_{433}), \\
& m_4^2 I_{411} t_4^2 + m_4^2 I_{433} + m_3^2 I_{322}, 0] \\
& [m_4^2 t_3 I_{422} \sin(t_2) (1 + t_3^2), m_4^2 I_{422} (1 + t_3^2), 0, m_4^2 I_{422} (t_3^4 + 1 + 2 t_3^2)]
\end{aligned}$$

Apéndice B. C(q)

Los valores a considerar en el modelo 2 de C(q) son

$$\begin{aligned}
 C11 = & \left(m^2 I_{211} \cos(t_2) \sin(t_2) - m^2 \cos(t_2)^2 I_{231} + \frac{m^2 I_{231}}{2} + \frac{m^2 I_{213}}{2} - m^2 \cos(t_2)^2 I_{213} - m^2 \cos(t_2) I_{233} \sin(t_2) \right. \\
 & + m^3 I_{311} \cos(t_2) \sin(t_2) - m^3 I_{322} \cos(t_2) \sin(t_2) + m^3 I_{333} \cos(t_2) t_3^2 \sin(t_2) + m^4 I_{411} \cos(t_2) \sin(t_2) + 2 m^4 I_{411} \cos(t_2)^2 t_4 \\
 & - m^4 I_{411} t_4 - m^4 I_{411} \cos(t_2) t_4^2 \sin(t_2) + m^4 I_{422} t_3^2 \cos(t_2) \sin(t_2) + m^4 I_{433} t_4^2 \cos(t_2) \sin(t_2) - 2 m^4 I_{433} \cos(t_2)^2 t_4 \\
 & \left. + m^4 I_{433} t_4 - m^4 I_{433} \cos(t_2) \sin(t_2) \right) T_2 - t_3 (-m^3 I_{333} + m^3 I_{333} \cos(t_2)^2 - m^4 I_{422} + m^4 I_{422} \cos(t_2)^2) T_3 \\
 & + m^4 (I_{411} \cos(t_2) \sin(t_2) + I_{411} \cos(t_2)^2 t_4 + I_{433} t_4 - I_{433} \cos(t_2)^2 t_4 - I_{433} \cos(t_2) \sin(t_2)) T_4 \\
 C12 = & \left(m^2 I_{211} \cos(t_2) \sin(t_2) - m^2 \cos(t_2)^2 I_{231} + \frac{m^2 I_{231}}{2} + \frac{m^2 I_{213}}{2} - m^2 \cos(t_2)^2 I_{213} - m^2 \cos(t_2) I_{233} \sin(t_2) \right. \\
 & + m^3 I_{311} \cos(t_2) \sin(t_2) - m^3 I_{322} \cos(t_2) \sin(t_2) + m^3 I_{333} \cos(t_2) t_3^2 \sin(t_2) + m^4 I_{411} \cos(t_2) \sin(t_2) + 2 m^4 I_{411} \cos(t_2)^2 t_4 \\
 & - m^4 I_{411} t_4 - m^4 I_{411} \cos(t_2) t_4^2 \sin(t_2) + m^4 I_{422} t_3^2 \cos(t_2) \sin(t_2) + m^4 I_{433} t_4^2 \cos(t_2) \sin(t_2) - 2 m^4 I_{433} \cos(t_2)^2 t_4 \\
 & \left. + m^4 I_{433} t_4 - m^4 I_{433} \cos(t_2) \sin(t_2) \right) T_1 + (-m^2 \cos(t_2) I_{212} - m^2 \sin(t_2) I_{232} - t_3 I_{311} \cos(t_2) m_3^2 + t_3 I_{333} \cos(t_2) m_3^2 \\
 & - t_3 m^4 I_{411} \cos(t_2) + t_3 m^4 I_{411} \sin(t_2) t_4 + t_3 m^4 I_{422} \cos(t_2) - t_3 m^4 I_{433} t_4^2 \cos(t_2) - t_3 m^4 I_{433} \sin(t_2) t_4) T_2 \\
 & - \frac{1}{2} \sin(t_2) (m_3^2 I_{311} - m_3^2 I_{333} + m^4 I_{411} - m^4 I_{422} + m^4 I_{433} t_4^2 + m^4 I_{433} + m^4 I_{411} t_4^2 + m_3^2 I_{322}) T_3 \\
 & + \frac{1}{2} t_3 m^4 (-I_{411} \cos(t_2) - 2 I_{433} \sin(t_2) t_4 + I_{433} \cos(t_2) + I_{422} \cos(t_2) + I_{422} \cos(t_2) t_3^2) T_4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C13 &= -t3 (-m3^2 I333 + m3^2 I333 \cos(t2))^2 - m4^2 I422 + m4^2 I422 \cos(t2)^2 T1 \\
&\quad - \frac{1}{2} \sin(t2) (m3^2 I311 - m3^2 I333 + m4^2 I411 - m4^2 I422 + m4^2 I433 t4^2 + m4^2 I433 + m4^2 I411 t4^2 + m3^2 I322) T2 \\
&\quad + \frac{1}{2} m4^2 (2 I411 \cos(t2) t4 - I433 \sin(t2) + I411 \sin(t2) + I422 \sin(t2) + 3 I422 \sin(t2) t3^2) T4 \\
C14 &= m4^2 (I411 \cos(t2) \sin(t2) + I411 \cos(t2)^2 t4 + I433 t4 - I433 \cos(t2)^2 t4 - I433 \cos(t2) \sin(t2)) T1 \\
&\quad + \frac{1}{2} t3 m4^2 (-I411 \cos(t2) - 2 I433 \sin(t2) t4 + I433 \cos(t2) + I422 \cos(t2) + I422 \cos(t2) t3^2) T2 \\
&\quad + \frac{1}{2} m4^2 (2 I411 \cos(t2) t4 - I433 \sin(t2) + I411 \sin(t2) + I422 \sin(t2) + 3 I422 \sin(t2) t3^2) T3 \\
C21 &= \left(-m2^2 I211 \cos(t2) \sin(t2) + m2^2 \cos(t2)^2 I231 - \frac{m2^2 I231}{2} - \frac{m2^2 I213}{2} + m2^2 \cos(t2)^2 I213 + m2^2 \cos(t2) I233 \sin(t2) \right. \\
&\quad - m3^2 I311 \cos(t2) \sin(t2) + m3^2 I322 \cos(t2) \sin(t2) - m3^2 I333 \cos(t2) t3^2 \sin(t2) - m4^2 I411 \cos(t2) \sin(t2) - 2 m4^2 I411 \cos(t2)^2 t4 \\
&\quad + m4^2 I411 t4 + m4^2 I411 \cos(t2) t4^2 \sin(t2) - m4^2 I422 t3^2 \cos(t2) \sin(t2) - m4^2 I433 t4^2 \cos(t2) \sin(t2) + 2 m4^2 I433 \cos(t2)^2 t4 \\
&\quad \left. - m4^2 I433 t4 + m4^2 I433 \cos(t2) \sin(t2) \right) T1 + \left(-\frac{1}{2} I311 \sin(t2) m3^2 + \frac{1}{2} I333 \sin(t2) m3^2 - \frac{1}{2} m4^2 I411 \sin(t2) - m4^2 I411 \cos(t2) t4 \right. \\
&\quad + \frac{1}{2} m4^2 I422 \sin(t2) - \frac{1}{2} m4^2 I433 t4^2 \sin(t2) + m4^2 I433 \cos(t2) t4 + \frac{1}{2} m4^2 I433 \sin(t2) + \frac{1}{2} m4^2 I411 t4^2 \sin(t2) + \frac{1}{2} I322 \sin(t2) m3^2 \left. \right) T3 \\
&\quad - \frac{1}{2} t3 m4^2 (I411 \cos(t2) + 2 I433 \sin(t2) t4 - I433 \cos(t2) + I422 \cos(t2) + I422 \cos(t2) t3^2) T4 \\
C22 &= -\frac{1}{2} m2^2 T1 I221 \cos(t2) - \frac{1}{2} m2^2 T1 I223 \sin(t2) + \frac{1}{2} m2^2 T1 \cos(t2) I212 + \frac{1}{2} m2^2 T1 \sin(t2) I232 + t3 T3 m3^2 I311 + t3 T3 m4^2 I433 t4^2 \\
&\quad + t3 T3 m4^2 I411 + m4^2 I433 t4 t3^2 T4 \\
C23 &= t3 (-m3^2 I333 + m3^2 I333 \cos(t2))^2 - m4^2 I422 + m4^2 I422 \cos(t2)^2 T1 + \left(-\frac{1}{2} m4^2 I433 \sin(t2) - \frac{1}{2} m4^2 I411 t4^2 \sin(t2) \right. \\
&\quad - m4^2 I433 \cos(t2) t4 + m4^2 I411 \cos(t2) t4 - \frac{1}{2} I322 \sin(t2) m3^2 + \frac{1}{2} I311 \sin(t2) m3^2 - \frac{1}{2} I333 \sin(t2) m3^2 + \frac{1}{2} m4^2 I411 \sin(t2) \\
&\quad \left. - \frac{1}{2} m4^2 I422 \sin(t2) + \frac{1}{2} m4^2 I433 t4^2 \sin(t2) \right) T2 - \frac{1}{2} m4^2 (-2 I411 \cos(t2) t4 + I433 \sin(t2) - I411 \sin(t2) + I422 \sin(t2) + 3 I422 \sin(t2) t3^2) T4 \\
C24 &= -m4^2 (I411 \cos(t2) \sin(t2) + I411 \cos(t2)^2 t4 + I433 t4 - I433 \cos(t2)^2 t4 - I433 \cos(t2) \sin(t2)) T1 \\
&\quad + \frac{1}{2} t3 m4^2 (I411 \cos(t2) + 2 I433 \sin(t2) t4 - I433 \cos(t2) + I422 \cos(t2) + I422 \cos(t2) t3^2) T2 \\
&\quad + \frac{1}{2} m4^2 (-2 I411 \cos(t2) t4 + I433 \sin(t2) - I411 \sin(t2) + I422 \sin(t2) + 3 I422 \sin(t2) t3^2) T3 \\
C31 &= t3 (-m3^2 I333 + m3^2 I333 \cos(t2))^2 - m4^2 I422 + m4^2 I422 \cos(t2)^2 T1 + \left(-\frac{1}{2} m4^2 I433 \sin(t2) - \frac{1}{2} m4^2 I411 t4^2 \sin(t2) \right. \\
&\quad - m4^2 I433 \cos(t2) t4 + m4^2 I411 \cos(t2) t4 - \frac{1}{2} I322 \sin(t2) m3^2 + \frac{1}{2} I311 \sin(t2) m3^2 - \frac{1}{2} I333 \sin(t2) m3^2 + \frac{1}{2} m4^2 I411 \sin(t2) \\
&\quad \left. - \frac{1}{2} m4^2 I422 \sin(t2) + \frac{1}{2} m4^2 I433 t4^2 \sin(t2) \right) T2 - \frac{1}{2} m4^2 (-2 I411 \cos(t2) t4 + I433 \sin(t2) - I411 \sin(t2) + I422 \sin(t2) + 3 I422 \sin(t2) t3^2) T4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C32 = & \left(-\frac{1}{2} m^4 I_{433} \sin(t_2) - \frac{1}{2} m^4 I_{411} t_4^2 \sin(t_2) - m^4 I_{433} \cos(t_2) t_4 + m^4 I_{411} \cos(t_2) t_4 - \frac{1}{2} I_{322} \sin(t_2) m^3 + \frac{1}{2} I_{311} \sin(t_2) m^3 \right. \\
& \left. - \frac{1}{2} I_{333} \sin(t_2) m^3 + \frac{1}{2} m^4 I_{411} \sin(t_2) - \frac{1}{2} m^4 I_{422} \sin(t_2) + \frac{1}{2} m^4 I_{433} t_4^2 \sin(t_2) \right) T1 + (-m^3 I_{311} t_3 - m^4 I_{433} t_4^2 t_3 - m^4 I_{411} t_3) T2 \\
& + \left(-\frac{m^4 I_{411} t_3}{2} + \frac{t_3 m^4 I_{433}}{2} - m^4 I_{422} t_3 \right) T4
\end{aligned}$$

$$C33 = m^4 I_{411} t_4 T4$$

$$\begin{aligned}
C34 = & -\frac{1}{2} m^4 (-2 I_{411} \cos(t_2) t_4 + I_{433} \sin(t_2) - I_{411} \sin(t_2) + I_{422} \sin(t_2) + 3 I_{422} \sin(t_2) t_3^2) T1 \\
& + \left(-\frac{m^4 I_{411} t_3}{2} + \frac{t_3 m^4 I_{433}}{2} - m^4 I_{422} t_3 \right) T2 + m^4 I_{411} t_4 T3 - 2 m^4 I_{422} t_3 (1 + t_3^2) T4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C41 = & -m^4 (I_{411} \cos(t_2) \sin(t_2) + I_{411} \cos(t_2)^2 t_4 + I_{433} t_4 - I_{433} \cos(t_2)^2 t_4 - I_{433} \cos(t_2) \sin(t_2)) T1 \\
& + \frac{1}{2} t_3 m^4 (I_{411} \cos(t_2) + 2 I_{433} \sin(t_2) t_4 - I_{433} \cos(t_2) + I_{422} \cos(t_2) + I_{422} \cos(t_2) t_3^2) T2 \\
& + \frac{1}{2} m^4 (-2 I_{411} \cos(t_2) t_4 + I_{433} \sin(t_2) - I_{411} \sin(t_2) + I_{422} \sin(t_2) + 3 I_{422} \sin(t_2) t_3^2) T3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C42 = & \frac{1}{2} t_3 m^4 (I_{411} \cos(t_2) + 2 I_{433} \sin(t_2) t_4 - I_{433} \cos(t_2) + I_{422} \cos(t_2) + I_{422} \cos(t_2) t_3^2) T1 - m^4 I_{433} t_4 t_3^2 T2 \\
& + \left(m^4 I_{422} t_3 + \frac{m^4 I_{411} t_3}{2} - \frac{t_3 m^4 I_{433}}{2} \right) T3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C43 = & \frac{1}{2} m^4 (-2 I_{411} \cos(t_2) t_4 + I_{433} \sin(t_2) - I_{411} \sin(t_2) + I_{422} \sin(t_2) + 3 I_{422} \sin(t_2) t_3^2) T1 \\
& + \left(m^4 I_{422} t_3 + \frac{m^4 I_{411} t_3}{2} - \frac{t_3 m^4 I_{433}}{2} \right) T2 - m^4 I_{411} t_4 T3 + 2 m^4 I_{422} t_3 (1 + t_3^2) T4
\end{aligned}$$

$$C44 = 2 m^4 I_{422} t_3 (1 + t_3^2) T3$$

Apéndice C.

Modelos de articulación independiente.

DATOS DEL MOTOR A EMPLEAR EN EL ESLABON DE AZIMUTH

$R_m=2.22$

$L_m=0.0093$

$K=0.8$

$r=11$

$J_m=0.240419$

$J_l=3.70182908$

$B_m=0.015$

$B_l=0.004$

$K_v=0.905085$

$K_t=59.79$

DATOS DEL MOTOR A EMPLEAR EN EL ESLABON DE ELEVACION

$R_m=1.81$

$L_m=0.0053$

$K=0.8$

$r=11$

$J_m=0.163873$

$J_l=0.39357266$

$B_m=0.015$

$B_l=0.004$

$K_v=0.632768$

$K_t=38.29$

En estos modelos, el vector de estado se reordena de la siguiente manera:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_L \\ i \\ \dot{\theta}_m \\ \theta_L \\ \theta_m \end{bmatrix}$$

Modelo de articulación independiente con retroalimentación por velocidad para el eslabón con movimiento en azimut.

A =

$$\begin{pmatrix} -0.0011 & 0 & 0 & -2.3772 & 2.3772 \\ 0 & -238.7097 & -97.3210 & 0 & 0 \\ 0 & 248.6908 & -0.0624 & 3.3275 & -3.3275 \\ 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

B =

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 107.5269 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

C =

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Modelo de articulación independiente con retroalimentación por velocidad para el eslabón con movimiento en elevación.

A =

$$\begin{pmatrix} -0.0102 & 0 & 0 & -22.3593 & 22.3593 \\ 0 & -341.5094 & -119.3902 & 0 & 0 \\ 0 & 233.6566 & -0.0915 & 4.8818 & -4.8818 \\ 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

B =

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 188.6792 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

C =

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Apéndice D.

D.1. Historia de los robots.

Dentro de los eventos históricos de los robots se encuentran algunos importantes, por ejemplo: a mediados del siglo XVIII J. de Vaucanson construyó varias muñecas mecánicas de tamaño humano que ejecutaban piezas de música; para 1801 Jaquard invento su telar, que era una máquina programable. Dentro del siglo XX, Mark Spong[SM98] refiere los siguientes eventos de importancia:

1947 el primer teleoperador servo eléctrico es desarrollado

1948 un teleoperador servo eléctrico es desarrollado incorporando retroalimentación de fuerza.

1949 Inicia la investigación en control numérico de máquinas de molienda.

1954 George Devol diseña el primer robot programable

1956 Joseph Engelberger, como estudiante de Columbia University compra los derechos del robot de Devol y funda la compañía Unimation.

1961 El primer Robot Unimate se instala en Trenton, New Jersey, en la planta de General Motors.

1961 Se desarrolla el primer robot que incorpora información de retroalimentación por fuerza

1963- Es desarrollado el primer sistema de visión

1971- El brazo Stanford se desarrolla en Stanford University

1973- Se desarrolla el primer lenguaje de programación WAVE

1974- Cincinnati Milacron presenta el robot T3 robot con control por computadora

1975- Unimation Inc. Registra sus primeras ganancias

1976- Es desarrollado el dispositivo Remote Center Compliance (RCC) para ensamblado en Draper Labs in Boston

1978- Unimation presenta el robot PUMA (Programmable Universal Machine for Assambly)

1979- El diseño del robot SCARA es presentado en Japon

1981- El primer robot de impulsión directa es desarrollado en Carnegie-Mellon University

En fechas recientes, se tiene como referencia que en el año de 1995 [UC2001], existían aproximadamente 700,000 robots en el mundo industrializado, bajo las siguientes categorías: 11.7% para ensamblado, 28.0% para manipulación de materiales, tracción 26.6%, 17.0% aplicaciones, 10.1% procesado y solo el 6.6% se empleaba en aplicaciones avanzadas. Este dato nos da una idea de la importancia del uso de los robots en el mundo. Además, su aplicación se van extendiendo cada vez mas en todas las actividades de la humanidad.

D.2 Robot.

La palabra robot se empleó por primera vez en 1920 en una obra de teatro llamada "R.U.R." o "Los Robots Universales de Rossum" escrita por el dramaturgo checo Karel Capek. La trama era sencilla: el hombre fabrica un robot luego el robot mata al hombre. La palabra checa "Robota" significa servidumbre o trabajador forzado, y cuando se tradujo al ingles se convirtió en el término robot.

De acuerdo a ISO, se define a un robot como: "un manipulador automático reprogramable y multifuncional, que posee ejes capaces de manipular materiales, objetos, herramientas y mecanismos especializados a traves de operaciones programadas para la ejecución de una variedad de tareas". De la misma manera, el Robot Institute of America define el termino como: "un manipulador reprogramable y multifuncional diseñado para trasladar materiales, piezas, herramientas o aparatos a través de una serie

de movimientos programados para llevar a cabo una variedad de tareas”. Es claro que ambas concepciones nos indican la capacidad de estos dispositivos dentro del ámbito de trabajo del ser humano. Por ello, se debe tomar en cuenta que para que un robot sea capaz de realizar las tareas asignadas, es importante su selección acorde a la aplicación, su programación y el empleo de sensores que le brindan información del medio que le rodea y permiten la realización de su tarea de forma eficaz.

D.2.1. Clasificación de los robots.

Dada la existencia de varios tipos de robots, no existe una clasificación general, por lo que en este trabajo se presentan algunas de las principales que existen.

D.2.1.1. Propósito o función.

De acuerdo al propósito, los robots se clasifican en:

- Industriales. Su uso se restringe dentro del ámbito de manufactura de productos de consumo tales como vehículos, empaque, etc., como ejemplo se tiene al robot PUMA.
- Personales / Educativos. Se emplean dentro de escuelas y laboratorios personales como: medios de desarrollo y prueba, así como capacitación de personal.
- Militares. Son dispositivos especializados para una tarea como exploración, destrucción, vigilancia, seguimiento de blancos. Los rangos de operación y la precisión de estos dispositivos debe ser muy elevada.

D.2.1.2. Grado de Inteligencia.

Un robot se puede clasificar por el grado de inteligencia y su capacidad de respuesta e interacción con el medio ambiente, dentro de estos tenemos a:

- Robots controlados por sensores, estos tienen un control en lazo cerrado de movimientos manipulados, y toman decisiones basados en datos obtenidos por sus sensores.
- Robots controlados por visión, son aquellos robots que pueden manipular un objeto al utilizar información visual.
- Robots controlados adaptablemente, éstos pueden automáticamente reprogramar sus acciones sobre la base de los datos obtenidos por los sensores.
- Robots con inteligencia artificial, ellos utilizan las técnicas de inteligencia artificial para hacer sus propias decisiones y resolver problemas.

También la Asociación de Robots Japonesa (JIRA) ha clasificado a los robots dentro de seis clases sobre la base de su nivel de inteligencia:

- Dispositivos de manejo manual, controlados por una persona.
- Robots de secuencia arreglada.
- Robots de secuencia variable, donde un operador puede modificar la secuencia fácilmente.
- Robots regeneradores, donde el operador humano conduce el robot a través de la tarea.
- Robots de control numérico, donde el operador alimenta la programación del movimiento.
- Robots inteligentes, los cuales pueden entender e interactuar con cambios en el medio ambiente.

D.2.1.3. Tipo de controlador.

Con respecto al controlador del robot se pueden agrupar de acuerdo al nivel de control que realizan.

- Nivel de inteligencia artificial, donde el programa aceptará un comando como "levantar el producto" y descomponerlo dentro de una secuencia de comandos de bajo nivel basados en un modelo estratégico de tareas.
- Nivel de modo de control, donde los movimientos del sistema son modelados, para lo que se incluye la interacción dinámica entre los diferentes mecanismos, trayectorias planeadas, y puntos de asignación seleccionados.
- Niveles de servosistemas, donde los actuadores controlan los parámetros de los mecanismos con el uso de una retroalimentación interna de los datos obtenidos por los sensores, y la ruta es modificada sobre la base de los datos que se obtienen de sensores externos. Todas las detecciones de fallas y mecanismos de corrección son implementadas en este nivel.

D.2.1.4. Lenguaje de programación.

La clave para una aplicación efectiva de los robots en una amplia variedad de tareas, es el desarrollo de lenguajes de alto nivel. Existen muchos sistemas de programación de robots, aunque la mayoría del software más avanzado se encuentra en los laboratorios de investigación. Los sistemas de programación de robots caen dentro de tres clases :

- Sistemas guiados, en el cual el usuario conduce el robot a través de los movimientos a ser realizados.
- Sistemas de programación de nivel-robot, en los cuales el usuario escribe un programa de computadora al especificar el movimiento y el sentido.
- Sistemas de programación de nivel-tarea, en el cual el usuario especifica las operaciones por las acciones sobre los objetos que el robot manipula.

D.2.2. Generaciones de robots.

Michael Knasel, director del Centro de Aplicaciones Robóticas de Science Application Inc. en 1984 expuso que “hay cinco generaciones de robots” con las siguientes características:

En la primera generación: El sistema de control usado esta basado en "paradas fijas" mecánicamente. Esta estrategia es conocida como control de lazo abierto o control "bang bang". Podemos considerar como ejemplo esta de esta primera etapa aquellos mecanismos de relojería que permiten mover a las cajas musicales o juguetes de cuerda. Este tipo de control es muy similar al ciclo de control que tienen algunos lavadores de ciclo fijo. Son útiles para las aplicaciones industriales de tomar y colocar pero están limitados a un número pequeño de movimientos.

En la segunda generación se utiliza una estructura de control de ciclo abierto, pero en lugar de emplear interruptores y botones mecánicos, se emplea una secuencia numérica de control de movimientos almacenados en un disco o cinta magnética. El programa de control entra mediante la elección de secuencias de movimiento en una caja de botones o a través de palancas de control con los que se "camina", la secuencia deseada de movimientos. El mayor número de aplicaciones en los que se utilizan los robots de esta generación se encuentra en la industria automotriz, en actividades como: soldadura y pintado con "spray".

La tercera generación utiliza las computadoras para su estrategia de control y tiene algún conocimiento del ambiente local a través del uso de sensores, los cuales miden el ambiente y modifican su estrategia de control, con esta generación se inicia la era de los robots inteligentes y aparecen los lenguajes de programación para escribir los programas de control. La estrategia de control utilizada se denomina de "ciclo cerrado".

En la cuarta generación de robots, ya se les califica de inteligentes con más y mejores extensiones sensoriales, para comprender sus acciones y el

mundo que los rodea. Incorpora un concepto de "modelo del mundo" de su propia conducta y del ambiente en el que operan. Utilizan conocimiento difuso y procesamiento dirigido por expectativas que mejoran el desempeño del sistema de manera que la tarea de los sensores se extiende a la supervisión del ambiente global, registrando los efectos de sus acciones en un modelo del mundo y auxiliar en la determinación de tareas y metas.

La quinta generación, actualmente está en desarrollo esta nueva generación de robots, que pretende que el control emerja de la adecuada organización y distribución de módulos conductuales.

Lista de figuras.

Capítulo 1

<i>Fig. 1. 1. Sistema seguidor de objetos en movimiento.</i>	1
<i>Fig. 1. 2. Robot y su interacción con el entorno</i>	3
<i>Fig. 1. 3. Elementos de un servo control visual.</i>	8
<i>Fig. 1. 4. Elementos de un sistema robótico-visual.</i>	9
<i>Fig. 1. 5. Dispositivo manipulador</i>	10

Capítulo 2

<i>Fig. 2. 1. Sistema de visión artificial típico.</i>	16
<i>Fig. 2. 2. Imagen digitalizada. Tomada de MatLab Toolbox Image Processing</i>	18
<i>Fig. 2.3. Se muestran dos imágenes digitales de la misma escena con diferente muestreo a) 640X480, b) 320X240.</i>	21
<i>Fig. 2. 4. Procedimiento para el análisis de una imagen.</i>	23
<i>Fig. 2. 5. Sistema típico de seguimiento.</i>	28
<i>Fig. 2. 6. Aplicación del filtro Kalman a las coordenadas cartesianas de un objeto en movimiento para predecir su desplazamiento.</i>	35
<i>Fig. 2. 7. Búsqueda del objeto en movimiento empleando correlación.</i>	37
<i>Fig. 2. 8. Búsqueda del objeto en movimiento empleando correlación.</i>	38
<i>Fig. 2. 9. Modelo para el seguimiento en coordenadas cartesianas.</i>	39

Capítulo 3.

<i>Fig. 3. 1. Sistema cartesiano basado en la mano derecha.</i>	42
<i>Fig. 3. 2. Ejemplos de rotaciones.</i>	44
<i>Fig. 3. 3. Rotaciones de sistemas.</i>	45
<i>Fig. 3. 4. Transformaciones homogéneas.</i>	46
<i>Fig. 3. 5. Representación de Denavit-Hartenberg.</i>	48
<i>Fig. 3. 6. Representación de Denavit-Hartenberg para el Modelo esférico.</i>	51
<i>Fig. 3. 7. Modelo del sistema de dos grados de libertad en dos dimensiones.</i>	54
<i>Fig. 3. 8. Modelo del sistema manipulador en 3 dimensiones.</i>	55

<i>Fig. 3. 9. Rotación del eje 1 del sistema manipulador (planta).....</i>	<i>55</i>
<i>Fig. 3. 10. Rotación del eje 2 del sistema manipulador (planta).....</i>	<i>56</i>
<i>Fig. 3. 11. Movimiento de los dos ejes del sistema manipulador (planta).</i>	<i>56</i>
<i>Fig. 3. 12. Simulación del movimiento de los dos ejes del sistema manipulador (planta). Posición inicial</i>	<i>57</i>
<i>Fig. 3. 13. Simulación del movimiento de los dos ejes del sistema manipulador (planta). Posición final.....</i>	<i>58</i>
Capítulo 4.	
<i>Fig. 4. 1. Sistema motor-enlace-carga (articulación independiente).....</i>	<i>69</i>
<i>Fig. 4. 2. Modelo de un motor de C.D.</i>	<i>72</i>
Capítulo 5.	
<i>Fig. 5. 1. Diagrama de un sistema de control.....</i>	<i>85</i>
<i>Fig. 5. 2. Esquema de un controlador PID.....</i>	<i>87</i>
<i>Fig. 5. 3. Posición de la unión 1 (azimut), control PID.....</i>	<i>88</i>
<i>Fig. 5. 4. Posición de la unión 2 (elevación)(elevación), control PID.....</i>	<i>89</i>
<i>Fig. 5. 5. Velocidades de las dos uniones(azimut y elevación), control PID</i>	<i>89</i>
<i>Fig. 5. 6. Posición la unión 1 (azimut), control PID.</i>	<i>89</i>
<i>Fig. 5. 7. Posición de la unión 2 (elevación), control PID.....</i>	<i>90</i>
<i>Fig. 5. 8. Velocidades de las dos uniones, control PID</i>	<i>90</i>
<i>Fig. 5. 9. Velocidad de la unión 1 (azimut), control PID.</i>	<i>90</i>
<i>Fig. 5. 10. Velocidad de la unión 2 (elevación), control PID.....</i>	<i>91</i>
<i>Fig. 5. 11. Posición de las dos uniones.....</i>	<i>91</i>
<i>Fig. 5. 12. Posición de la unión 1 (azimut), control por compensador.</i>	<i>93</i>
<i>Fig. 5. 13. Posición de la unión 2 (elevación), control por compensador.....</i>	<i>94</i>
<i>Fig. 5. 14. Velocidades de las dos uniones.</i>	<i>94</i>
<i>Fig. 5. 15. Posición de la unión 1 (azimut), control por compensador.</i>	<i>94</i>
<i>Fig. 5. 16. Posición de la unión 2 (elevación), control por compensador.....</i>	<i>95</i>
<i>Fig. 5. 17. Velocidad de las dos uniones.</i>	<i>95</i>
<i>Fig. 5. 18. . Velocidad en la unión 1 (azimut), control por compensador.....</i>	<i>95</i>
<i>Fig. 5. 19. Velocidad en la unión 2 (elevación), control por compensador.</i>	<i>96</i>

<i>Fig. 5. 20. Posiciones de las dos uniones.</i>	<i>96</i>
<i>Fig. 5. 21. Posición de la unión 1 (azimut), control por regulador.....</i>	<i>98</i>
<i>Fig. 5. 22. Posición de la unión 2 (elevación), control por regulador.</i>	<i>98</i>
<i>Fig. 5. 23. Velocidades de las dos uniones.</i>	<i>98</i>
<i>Fig. 5. 24. . Posición de la unión 1 (azimut), control por regulador.....</i>	<i>99</i>
<i>Fig. 5. 25. Posición de la unión 2 (elevación), control por regulador.</i>	<i>99</i>
<i>Fig. 5. 26. Velocidades de las dos uniones.</i>	<i>99</i>
<i>Fig. 5. 27. Velocidad y posición de la unión 1 (azimut), control por regulador.</i>	<i>100</i>
<i>Fig. 5. 28. Velocidad y posición de la unión 2 (elevación), control por regulador..</i>	<i>100</i>
<i>Fig. 5. 29. Posición de las dos uniones, control por regulador.....</i>	<i>100</i>
<i>Fig. 5.30. Arquitectura del sistema de control.</i>	<i>104</i>

Lista de tablas.

<i>Tabla 3. 1. Parámetros DH para el modelo 1.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 3. 2. Parámetros DH para el modelo 2.</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 5. 1. Comparativa de controladores.</i>	<i>101</i>

Referencia bibliográfica.

- [CP97] Corke, Peter I. Visual Control of Robots. Ed. John Wiley and Sons. Gran Bretaña. 1997.
- [GM2001] Grewal, Mohinder S. Andrews, August P. Kalman filtering: Theory and practice. Ed. John Wiley and sons. Estados Unidos de Norteamérica. 2001.
- [GS99] Gomariz C., Spartacus, Biel s., Domingo y otros. Teoría de control Diseño electrónico. Ed. Alfaomega. España. 1999.
- [HG2001] Hager, Greg. A brief reading guide to dynamic vision. Department of computer science Yale university. 2001.
- [HK96] Hashimoto, Koichi., Ebine, Takumi, Kimura, Hidenori. Visual servoing with hand eye manipulator. IEEE Transactions on robotics and automation Vol.12, No. 5 october 1996.
- [JM94] Jagersand, Martin., Nelson, Randal. Adaptive differential visual feedback for uncalibrated hand-eye coordination and motion control. Department of computer science, University of Rochester. 1994
- [JR95] Jain, Ramesh. Kasturi, Rangachar. Schunck, Brian G. Machine vision. Ed. Mc Graw Hill. Estados Unidos de Norteamérica. 1995.

- [LF1993] Lewis F., Abdallah C., Dawson D., Control of Robot Manipulators. Macmillan. 1993.
- [NN2002] Nise, Norman S. Sistemas de control para Ingeniería. Ed. CECSA. México 2002
- [OA2001] Ollero B., Anibal. "Robótica, manipuladores y robots móviles". Ed. Alfa Omega Marcombo. España. 2001.
- [OP2001] Oh, Paul. Visual servoing by partitioning degrees of freedom. IEEE Transactions on robotics and automation. Vol. 17 No.1 February 2001
- [PG2001] Pajarez M., Gonzalo., de la cruz G. Jesús. Visión por computador. Ed. Rama. España. 2001.
- [SB93] Sharhiam, Bahram, Hassul, Michael. Control system design using Matlab. Ed. Prentice Hall. Estados Unidos de Norteamérica. 1993
- [SD67] Schultz, Donald G., Melsa James L. State functions and linear control systems. Ed. Mc Graw Hill. Estados Unidos de Norteamérica. 1967.
- [SM89] Spong, Mark W. , Vidyasagar, M. Robot Dynamic and Control. Ed. John Wiley and Sons. Estados Unidos de Norteamérica. 1989.
- [TJ89] Tal, Jacob. Motion control applications. 1989.
- [WP2001] Willett, Peter. Niu Ruixin and Bar-Shalom Yaakov. Integration of bayes detection with target tracking. IEEE Transaction on signal proceesing Vol. 49, No. 1. january 2001.
- [YM2001] Ye, Ming., Shapiro, Linda G. A motion-based bayesian approach to aerial point target detection and tracking. Reporte técnico en línea: <http://isl.ee.washington.edu/ming/0831>

Referencia bibliográfica complementaria.

- [AJ98] Armstrong P. Jenelle y otros. Tracking a moving target with model independent visual servoing: a predictive estimation approach. IEEE Conference on robotics and automation Leuven Belgium 1998.
- [BE97] Brookner, Eli. Tracking and kalman filtering made easy. Ed. John Wiley and sons. Estados Unidos de Norteamérica. 1998.
- [BF2000] Berry, Francois. Martinet, Philippe. Real time visual servoing around a complex object. IEICE Transaction on Inf. and Sys 2000.
- [BJ93] Burl, Jeff. A reduced Order extended Kalman filter for sequential images containing a moving object. IEEE Transaction on image processing. Vol1. No. 3 July 1993.
- [BS99] Blackman, Samuel, Popoli Robert. Design and analysis of modern tracking systems. Ed. Artech House. Estados Unidos de Norteamérica. 1999.
- [CP2001] Corke, Peter I. Robotics Toolbox for MatLab. Australia. 2001.
- [FG2000] Flandin, Gregory., Chaumette, Francois., Marchand, Eric. Eye-in-hand/eye-to-hand cooperation for visual servoing. IEEE International conference on robotics and automation ICRA 2000.

- [GAD94] Gómez-Allende M., Darío. Reconocimiento de formas y visión artificial. Ed. Rama. Estados Unidos. 1994.
- [GR97] Grover B., Robert. Hwang, Patrick Y. C. Introduction to random signals and applied Kalman filtering. Ed. John Wiley and sons. Estados Unidos de Norteamérica. 1997.
- [HH92] Hashimoto Hideki., Kubota, Takashi. Visual control of robotic manipulator based on neural networks. IEEE Transaction on industrial electronics. Vol 39 . No. 9 december 1992.
- [HK98] Han, Kwun and Veloso, Manuela. Physical model based multi-objects tracking and prediction in robosoccer. Computer science Department, Carnegie Mellon University.
- [HS96] Hutchinson, Seth., Hager Greg., Corke Peter. A tutorial on visual servo control. May 14. 1996.
- [KA91] Koivo, A.J. Real-time vision feedback for servoing robotic manipulator with self-tuning controller. IEEE Transaction on systems, man and cybernetics. Vol. 1 1991.
- [KB96] Kuo, Benjamin C. Sistemas de control automatico. Ed. Prentice Hall. México. 1996.
- [KB97] Kuo, Benjamin C. Sistemas de control digital. Ed. CECSA. México. 1997.
- [KR2000] Kelly, Rafael. Carelli, Ricardo. Stable visual servoing of camera in hand Robotic systems. IEEE Transactions on mechatronics. Vol. 5 No. 1. 2000
- [KR98] Klette, Reinhard., Schluns, Karsten, Koschan Andreas. Ed. Springer. Singapore. 1998.
- [KR99] Kelly, Rafael. Reyes, Fernando. A two direct visual control of direct drive planar robots with moving target. Proceedings of International Conference on Robotics and automation Detroit. 1999.

- [LA93] Lewis, F.L., Abdallah, C.T., Dawson, D.M. Control of Robot manipulators. Ed. Macmillan Publishing Company. 1993.
- [LH96] Lee, Ho S. Tomizuka, Masayoshi. Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems. IEEE Transaction on industrial electronics Vol 43 No. 1 February 1996
- [MF98] Malis E., Francois Chaumette. 2 ½ Visual servoing. INRIA No. 3387. 1998
- [OA91] Ollero B., Anibal Control por computador. Ed. Marcombo. España. 1991.
- [OK96] Ogata, Katsihiko. Sistemas de control en tiempo discreto. Ed. Prentice Hall. México. 1996.
- [OT2001] Olsson, Tomas. Vision guided force control in robotics. Department of automatic control, Lund Institute of technology. 2001.
- [SC97] Smith, Chrisopher., Brandt, Scott A., Papanikolopoulos. Eye-in-hand task in uncalibrated environments. IEEE Transactions on robotics and automastion Vol. 13 No. 6 December 1997.
- [SV94] Sundareswaran, Venkataramn., Patrick Bouthemy., Francois Chaumette. Visual servoing using dynamic image paramters. INRIA No. 2336. 1994
- [TK] Toyama, Kentaro. Hager, Gregory. Incremental focus of attention for robust vision-based tracking. Department of computer science Yale university.
- [TM81] Takegaki Morikazu., Arimoto Suguro. A new feedback method for dynamic control of manipulators. Journal of Dynamic systems measurement and control. 1981.
- [UC2001] Urdiales, C., Bandera, A., Sandoval, F. Robótica, historia y tendencias. Departamento de Tecnología electrónica E.T.S.I. Telecomunicación Universidad de Malaga. 2001.

- [VM200] Vincze, Markus, Hager d. Gregory. Robust vision for vision-based control of motion. Ed. IEEE Press. Estados Unidos de Norteamérica. 2000
- [WG2001] Welch, Greg, Bishop Gary. An introduction to the Kalman Filter. Department of computer science. February 8 2001.