

## DISEÑO DE UN SISTEMA ROBÓTICO CARTESIANO PARA APLICACIONES INDUSTRIALES

Jorge Rojas V.<sup>1</sup> Ingeborg Mahla<sup>2</sup> A. Gerardo Muñoz C.<sup>1</sup> Daniel Castro A.<sup>2</sup>

Recibido el 02 de diciembre de 2003, aceptado el 30 de diciembre de 2003

### RESUMEN

El presente artículo describe los principales aspectos de la formulación del modelo y del diseño de los sistemas de control y accionamiento, involucrados en el desarrollo del prototipo de un robot industrial estándar denominado Sistema Robótico Cartesiano (SRC).

Palabras claves: Robótico, Robótico Industrial, Control del Movimiento, Control de Robot

### ABSTRACT

This paper describes the main aspects of the model formulation and the design of control and electronic systems, that are involved in the development of a standard industrial robot, named Cartesian Robotic System (CRS).

Keywords: Robotics, Industrial Robotics, Cartesian Robotic System, Motion Control, Robot Control

### INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca en un proyecto de innovación tecnológica ejecutado por la empresa Robotec S.A. con aporte financiero del Fondo Nacional de Desarrollo Tecnológico y Productivo FONTEC y la asesoría de la Universidad de Santiago de Chile a través de la Sociedad de Desarrollo Tecnológico.

Robotec S.A. es una empresa dedicada al diseño, integración, fabricación y puesta en marcha de sistemas de automatización flexible para la industria manufacturera, que emplea tecnologías de punta en las áreas de ingeniería mecánica, electrónica y software.

Esta empresa, aprovechando su *know how* y conocimiento del mercado, ha identificado una gama de aplicaciones industriales que tiene como base la implementación de un manipulador cartesiano. Sin embargo, transformarse en un proveedor competitivo en una economía global implica, entre otras cosas, contar con un producto estándar. En virtud de lo anterior, la empresa decidió desarrollar el prototipo de un producto estándar denominado Sistema Robótico Cartesiano, en adelante SRC. De esta forma se evita que los costos de desarrollo se traspasen a un solo cliente, y por otro lado, es posible aprovechar las economías de escala en las

etapas de fabricación y adquisición de componentes comerciales (Robotec, 2001).

### DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

El prototipo del SRC es un robot cartesiano de aplicación industrial, que está diseñado para cumplir funciones de manipulación, carga y descarga de objetos. Posteriormente, durante el escalamiento productivo del proyecto, el SRC será adaptado para abarcar otras aplicaciones industriales tales como pintura, soldadura e inspección (Robotec, 2001).

La Fig. 1 presenta una vista general del SRC.1. El prototipo está compuesto por los siguientes módulos o subsistemas: estructura mecánica, actuadores, elementos de transmisión, unidad de control de movimiento y efector.

#### *Estructura Mecánica*

Mecánicamente, el robot está formado por una estructura modular tipo *gantry*, cuya cadena cinemática posee 3 grados de libertad lineales asociados a los ejes X, Y y Z respectivamente. Además, posee un cuarto eje de rotación acoplado a la muñeca del efector. El

<sup>1</sup> ROBOTEC S.A., Av. Doctor Johow 891, Fax 2390263, Santiago-Chile, [robotec@robotec.cl](mailto:robotec@robotec.cl), [unoz@robotec.cl](mailto:unoz@robotec.cl).

<sup>2</sup> Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Av. Ecuador 3519, Casilla 10233, Santiago-Chile, [imahla@lauca.usach.cl](mailto:imahla@lauca.usach.cl), [daniel.castro@usach.cl](mailto:daniel.castro@usach.cl)

volumen de trabajo del SRC, definido por el rango de variación de las coordenadas articulares, es de 2.50 x 1.50 x 1.80 [m].

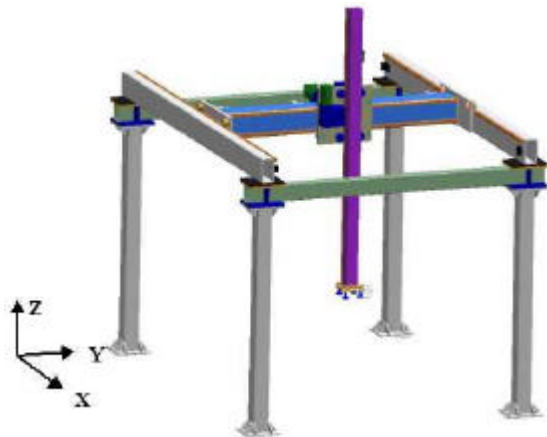


Fig. 1.- Vista general del prototipo del SRC

### Actuadores y Elementos de Transmisión

Los actuadores tienen por misión generar el movimiento de los eslabones móviles del robot, según las órdenes dadas por la unidad de control (Barrientos *et al.*, 1997). Los actuadores del SRC son servomotores, cuyas características constructivas permiten obtener una elevada respuesta dinámica, gran precisión en el posicionamiento y una mínima relación peso/potencia.

Los elementos de transmisión permiten, por una parte, guiar el movimiento de los eslabones móviles, y por otra, transmitir el movimiento desde los actuadores a las articulaciones, adaptando la fuerza y la velocidad a los valores requeridos por el movimiento (Barrientos *et al.*, 1997). Los elementos de transmisión son: reductores sinfín corona, cremalleras y piñones de dientes rectos, guías de sección prismática y elementos rodantes tipo *roller cam*.

Tanto los actuadores como los elementos de transmisión han sido seleccionados de modo tal que el prototipo SRC sea suficientemente robusto para desempeñarse en un ambiente industrial, con elevada confiabilidad, disponibilidad y seguridad (Proyecto Fontec, 2002a). Estos elementos fueron dimensionados para manipular una carga de 50 [Kg] a una velocidad máxima de 1.5 [m/s], con una aceleración máxima de 3.5 [m/s<sup>2</sup>].

### Unidad de Control

El prototipo del SRC utiliza un control multi-eje en lazo cerrado, con señales de retroalimentación de velocidad y posición, para controlar el movimiento de los eslabones.

La unidad de control de movimiento del SRC está integrada por el controlador, los accionamientos o *drivers*, los sensores y la interfaz hombre-máquina (Proyecto Fontec, 2002a).

El controlador realiza los cálculos y genera las órdenes de movimiento, según la aplicación programada. Por otro lado, los accionamientos operan como interfaz entre el controlador y los actuadores. El prototipo del SRC posee sensores de posición angular y sensores on-off, ambos de tipo interno, los que están relacionados con la fiabilidad de la operación, permitiendo a la unidad de control conocer el estado del sistema, monitorear y controlar el movimiento, corregir las desviaciones o detener el funcionamiento si detecta alguna anomalía.

Finalmente, la interfaz hombre máquina (HMI, *Human Machine Interface*) permite al usuario reprogramar el sistema, ingresar instrucciones, cambiar parámetros, u obtener información sobre errores de funcionamiento.

### Efector

El efector permite al robot manipular objetos, siendo el último eslabón de la cadena cinemática. El efector como tal, no pertenece al producto estándar, pues debe ser desarrollado para cada aplicación en particular. Sin embargo, en esta primera etapa del proyecto, el prototipo del SRC posee un efector del tipo garra neumática.

## MODELO CINEMÁTICO-DINÁMICO

El modelo físico de un sistema robótico debe considerar los componentes estructurales, los elementos de transmisión y los dispositivos de accionamiento y control. Sin embargo, considerando el alcance de este documento, se presenta solamente un modelo simplificado para los accionamientos y los elementos de transmisión de movimiento del prototipo del SRC.

Por otra parte, el control de movimiento de un mecanismo se puede realizar según dos modalidades: velocidad-posición, o bien, fuerza-posición. En virtud de las aplicaciones a las que está orientado el SRC, el control en modo velocidad-posición es más adecuado. Este modo de control requiere el modelo cinemático del sistema, y se utiliza cuando interesa un posicionamiento efectivo y control sobre la velocidad de movimiento del mecanismo. Respecto al problema dinámico, éste puede ser interpretado como una caja negra donde sólo intervienen las señales de entrada según sea el comportamiento de las señales de salida; indudablemente es necesario que en todo instante la potencia disponible del sistema sea suficiente para

realizar el movimiento ordenado por la unidad de control.

El modelo cinemático dinámico tiene por objetivo dimensionar los equipos eléctricos y los componentes mecánicos, según los requerimientos definidos para el prototipo del SRC. La Fig. 2 presenta un esquema conceptual para el dimensionamiento de los equipos.



Fig. 2.-Esquema conceptual del modelo del SRC

Los requerimientos definidos para el prototipo del SRC están determinados por el ciclo de trabajo en cada eje del robot. El ciclo de trabajo (gráfica de velocidad lineal versus tiempo) para el eje X del prototipo SRC se presenta en la Fig. 3.

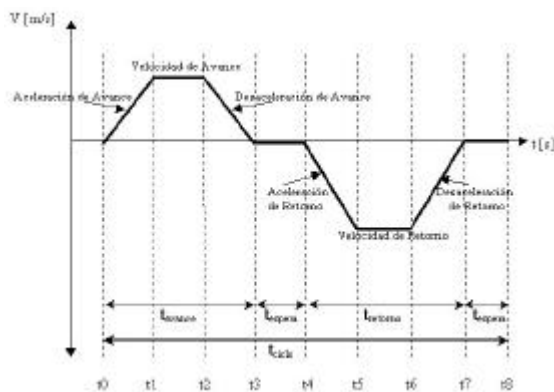


Fig. 3.- Ciclo de trabajo del eje X del SRC

**Definición de Parámetros**

Los parámetros son aquellas propiedades de los componentes cuyo valor permanece constante durante el análisis de una configuración determinada. Entre otros, los parámetros del modelo son:

- $L_K$  : carrera útil, eje k [mm].
- $m_K$  : masa total, eje k [Kg].
- $N_{mk}$  : velocidad máxima del motor, eje k [RPM].
- $i_K$  : factor de reducción de transmisión, eje k.
- $D_K$  : diámetro primitivo del piñón de transmisión, eje k.
- $\mu_K$  : coeficiente de roce componentes móviles, eje k.
- $\eta_{mk}$  : eficiencia mecánica del motor, eje k.

$\eta_{rk}$  : eficiencia mecánica del reductor, eje k .

**Definición de Variables**

Las variables de entrada son aquellas que están definidas por el ciclo de trabajo especificado. Las principales variables de entrada son:

- $t_{ik}$  : tiempo de aceleración, eje k [s],
- $t_{dk}$  : tiempo de desaceleración, eje k [s],
- $t_{v_{ik}}$  : tiempo con vel. máxima constante, eje k [s],
- $t_{e_{ik}}$  : tiempo de espera, eje k [s],
- $t_{c_k}$  : tiempo de ciclo, eje k [s],
- $f_k$  : ciclos por minuto, eje k [ $\text{min}^{-1}$ ],

donde

$$t_{c_k} = \frac{1}{f_k} \quad (1)$$

y los subíndices representan:

- i : avance, retorno.
- k : ejes x, y, z.

Por otro lado, las variables de salida son aquellas que dependen de los parámetros y de las variables de entrada del modelo. A partir de las variables de salida es posible dimensionar los equipos eléctricos y los componentes mecánicos del SRC.

**Dimensionamiento de los Actuadores**

Los servomotores del prototipo SRC están dimensionados a partir de las variables torque efectivo, velocidad promedio de rotación y potencia. Se presenta el desarrollo de los cálculos para el eje X, basado en el diagrama de cuerpo libre de la Fig. 4, cuyas variables y parámetros se indican a continuación.

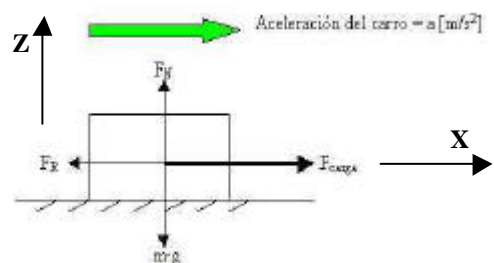


Fig. 4.- Diagrama de cuerpo libre para el eje X

- $m_X$  : masa total del eje X [Kg].
- $a_X$  : aceleración del eje X [ $\text{m/s}^2$ ].
- $\mu_X$  : coeficiente de roce dinámico, eje X.

$g$  : aceleración de gravedad = 9.8 [m/s<sup>2</sup>].

$F_{NX}$ : fuerza normal del eje X [N].

$F_{RX}$ : fuerza de roce del eje X [N].

$F_{CX}$ : fuerza de accionamiento del eje X.

Las ecuaciones de equilibrio de fuerzas son:

$$\sum F_x: F_{CX} - F_{RX} = m_X a_X, \quad (2)$$

$$\sum F_z: F_{NX} - m_X g = 0. \quad (3)$$

Por otro lado:

$$F_{RX} = \mu F_{NX}. \quad (4)$$

Remplazando (4) y (3) en (2), se obtiene la fuerza necesaria para generar una aceleración  $a_X$ :

$$F_{CX} = m_X (a_X + \mu g). \quad (5)$$

La relación entre la fuerza de accionamiento lineal,  $F_{CX}$ , y el torque del piñón de transmisión es:

$$T_{PX} = \frac{1}{2} F_{CX} D_X. \quad (6)$$

Entonces, el torque referido al servomotor es:

$$T_{SMX} = b \left( \frac{T_{PX}}{i_X} \right), \quad (7)$$

donde

$\beta = \eta_{mx} \eta_{tx}$ , si el servomotor está acelerando,

$\beta = (\eta_{mx} \eta_{tx})^{-1}$ , si el servomotor está frenando.

Por otra parte, el torque de inercia del sistema está dado por la relación:

$$T_{iX} = J_X \mathbf{a}_X, \quad (8)$$

donde

$J_X$ : momento de inercia del eje X [Kg m<sup>2</sup>],

$\mathbf{a}_X$ : aceleración angular del servomotor [rad/s<sup>2</sup>].

El torque instantáneo, en cada intervalo de tiempo  $D_j$  del ciclo de trabajo, está dado por:

$$T_j = T_{SMX} + T_{iX}. \quad (9)$$

Luego, el torque peak en el ciclo de trabajo es:

$$T_{PK} = \max_j \{ T_j \}. \quad (10)$$

Entonces las variables potencia, torque efectivo y velocidad promedio de rotación son cuantificables mediante las ecuaciones (11), (12) y (13), respectivamente. La expresión para el torque efectivo del servomotor es:

$$T_{ef} = \sqrt{\frac{\sum_j T_j^2 t_j}{t_{ciclo}}}. \quad (11)$$

La velocidad promedio de rotación del servomotor se calcula como

$$N_p = \frac{\frac{1}{2} \sum_j |N_{mi} + N_{mf}| \Delta t_j}{t_{ciclo}}, \quad (12)$$

donde

$N_{mi}$ : velocidad inicial de rotación en  $D_j$  [RPM],

$N_{mf}$ : velocidad final de rotación en  $D_j$  [RPM].

Finalmente, la potencia del servomotor se obtiene como:

$$P_{SM} = 2p N_p T_{PK}. \quad (13)$$

Los servomotores de los ejes X e Y se dimensionan en forma análoga, es decir, planteando los ciclos de trabajo y sus diagramas de cuerpo libre (Proyecto Fontec, 2002b).

### Dimensionamiento de Elementos Estructurales

Los elementos estructurales del prototipo SRC fueron seleccionados utilizando la siguiente metodología:

- Identificación de las cargas puntuales máximas.
- Selección inicial de dimensiones y materiales.
- Aplicación del método de elementos finitos (FEM), en forma iterativa, para definir las dimensiones de los elementos estructurales y sus respectivos materiales.
- La velocidad máxima requerida para el motor no debe ser mayor que la velocidad nominal del motor seleccionado.
- El torque efectivo y la velocidad promedio de rotación del servomotor, requeridos por el ciclo de trabajo, deben estar por debajo de la curva de operación S1 (Siemens, 2001b).

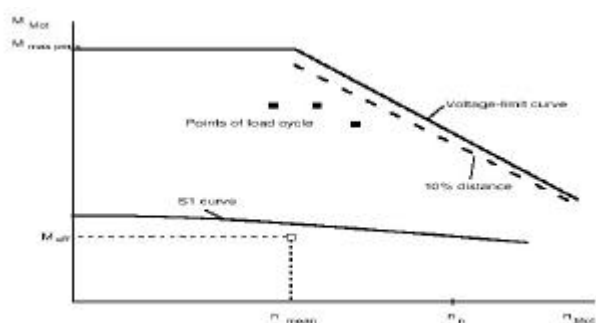


Fig. 5.- Curvas límite de servomotores síncronos. (Siemens,2001b)

### SISTEMA DE CONTROL

En el diseño del sistema de control del prototipo SRC se seleccionó equipos de última generación, que integran funciones de control de posición, control de velocidad, accionamiento y protecciones dentro de un mismo equipo. Entre las alternativas disponibles en el mercado se escogió la familia Simovert Masterdrives Motion Control de Siemens®. Esta alternativa permite, entre otras cosas, un control multi-eje a través de comunicación vía Profibus (Siemens, 2000). Además de las ventajas propias del uso de un bus estándar, estos equipos permiten el empleo de un PLC como equipo de control, eliminando la necesidad de una tarjeta multi-eje que habría elevado significativamente el costo del prototipo, sin mejorar demasiado sus características de desempeño.

La Fig. 5 presenta un esquema mono-articular del sistema de control del prototipo SRC. Sin embargo, el prototipo posee tres lazos de control similares, asociados respectivamente a cada eje cartesiano (Machine Design, 1989). [2].

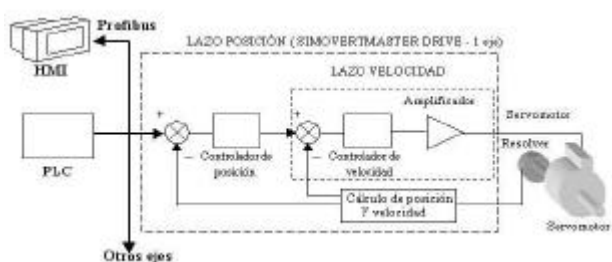


Fig. 6.-Esquema mono-articular de control del SRC

El sistema de control recibe las referencias de posición para cada eje desde un PLC a través de una red de comunicación Profibus, que está conectada a una interfaz hombre-máquina del tipo panel táctil. Por otra

parte, el controlador de movimiento integrado en el accionamiento, en conjunto con el servomotor y el sensor de posición angular (*resolver*), constituyen un lazo cerrado cuyas señales de retroalimentación son la posición y velocidad de cada articulación del SRC. Estas señales de retroalimentación son procesadas directamente por el controlador de movimiento.

Los servomotores sin escobillas poseen las propiedades adecuadas para aplicaciones de alto rendimiento, donde se requieren precisión de posicionamiento, elevada respuesta dinámica y mínima relación peso/potencia. Por otro lado, el sensor de posición angular está acoplado al servomotor en una misma carcasa; lo cual tiene como principal ventaja una construcción robusta y compacta (Siemens, 2001a).

La integración de todos los equipos mencionados a través de una red Profibus, así como el uso de un accionamiento con lazos de control de posición acoplados, permiten que el sistema sea completamente digital, eliminando de esta forma los problemas asociados a los lazos de control análogos.

Finalmente, en el PLC está almacenada la plataforma de usuario, programada en lenguaje de máquina, la que permite programar rutinas en forma totalmente interactiva, requiriéndose solamente definir los parámetros de movimiento.

### SELECCIÓN DE SERVOMOTORES

Para seleccionar los servomotores, se debe analizar su curva de funcionamiento y verificar si satisface las características de torque y velocidad requeridas para el ciclo de trabajo.

La Fig. 5 presenta la curva de operación del servomotor, S1, y la curva límite de sobrecarga, en un gráfico de torque versus velocidad. La curva límite sólo puede ser considerada durante un intervalo pequeño de tiempo, que es especificado por el fabricante del servomotor.

Los servomotores fueron seleccionados según los siguientes criterios:

- Todos los puntos torque – velocidad del ciclo de trabajo deben estar por debajo de la curva límite de sobrecarga.

### APLICACIONES

Se diseñó un programa que permite desarrollar dos tipos de aplicaciones y que interactúa con el usuario a través de una interfaz HMI. El primer nivel está orientado a aplicaciones universales, en las que el usuario puede ingresar las trayectorias y acciones deseadas, con un

alto grado de flexibilidad. El segundo nivel está dedicado a aplicaciones de paletización. El programa de paletización es complementado con un programa de simulación desarrollado en Visual Basic. Este último permite visualizar diferentes arreglos geométricos y calcular las posiciones finales del efector con cada uno de los objetos trasladados, en función del tipo de arreglo escogido, el tamaño del pallet y el tamaño de los objetos. Estos puntos son empleados posteriormente para generar las trayectorias de referencia del manipulador.

La Fig. 7 muestra el SRC terminado, ejecutando una rutina de paletización en la IV Feria Internacional del Envase y Embalaje realizada en Santiago de Chile en 2002. En las pruebas, el prototipo cumplió con todas las especificaciones. Su capacidad de carga es de 50 Kg., el ciclo de trabajo es de 7 a 8 cajas por minuto y la precisión del posicionamiento es del orden de las décimas de milímetro, excediendo la precisión requerida para aplicaciones de paletización.

### CONCLUSIONES

Se completó satisfactoriamente todas las etapas de ingeniería, lográndose el diseño de un sistema de bajo costo y similares potencialidades en comparación con sus análogos internacionales.

El modelo cinemático-dinámico ha sido sintetizado en planillas de cálculo dinámicas utilizando el software Excel, con las que se obtuvo la especificación de los equipos eléctricos. Este modelo tendrá vigencia para futuros proyectos que posean un modelo cinemático-dinámico similar, permitiendo el diseño según los requerimientos particulares de cada cliente, aprovechando de esta forma el *know how* adquirido en el actual proyecto.



Fig. 7.-Robot ejecutando una rutina de paletización

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero del Fondo Nacional de Desarrollo Tecnológico y Productivo FONTEC, a través del Proyecto Fontec N° 201-2714, así como la gestión de la Sociedad de Desarrollo Tecnológico y del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Santiago de Chile, a través del proyecto IGE-356. También agradecen ala empresa Siemens la documentación y el soporte técnico proporcionados.

### REFERENCIAS

- [1] Barrientos A., Peñin L.P., Balaguer C.y Aracil R., (1997), *Fundamentos de Robótica*, McGraw Hill.
- [2] Machine Design (1989), *Power and Motion Control*, Junio de 1989, 26-64.
- [3] Proyecto Fontec (2002a), *Alternativas tecnológicas para llevar a cabo el diseño, fabricación e implementación electrónica del prototipo SRC*, Informe Técnico N° 1, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Santiago de Chile, Enero de 2002.
- [4] Proyecto Fontec (2002b), *Modelo para el cálculo de especificaciones de equipos*, Informe Técnico N° 2, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Santiago de Chile, Marzo de 2002.
- [5] Robotec (2001), *Desarrollo e implementación del prototipo de un sistema robótico cartesiano*, Proyecto Fontec N° 201-2714, Abril de 2001.
- [6] Siemens (2000), *Simovort Masterdrives Motion Control*, Catálogo DA 65.11.
- [7] Siemens (2001a), *Servomotors, Low-Voltage Motors for Variable-Speed Drives*, Catálogo DA.65.3.
- [8] Siemens (2001b), *Simovort Masterdrives Motion Control Automation and Drives*, Compendio 2001.