

Sistema de Control de un Brazo Robótico Basado en un Microcontrolador PIC®

Daniela Arrazola, Daniel Contreras, Luis Flores, Ulises Flores, Diego Orebzo

Resumen—En el siguiente escrito se presenta la metodología utilizada para el diseño y construcción de un brazo robótico de 4 grados de libertad con un sistema de control basado en un microcontrolador PIC. Se lleva a cabo el análisis matemático del mecanismo para caracterizar la cinemática directa del sistema.

Palabras Clave—brazo robótico, 4 grados de libertad, microcontrolador, análisis

I. INTRODUCCIÓN

Si bien el estudio de la robótica ha sido popular durante varias décadas, la rápida expansión reciente de los sistemas robóticos en los mercados comerciales puede atribuirse en parte al hecho de que los sensores y actuadores se han vuelto cada vez más rentables, modulares y portátiles. Esta tendencia ha provocado la aparición del campo de la mecatrónica, que ha jugado un papel clave en la difusión de las tecnologías robóticas. La mecatrónica es un campo de estudio multidisciplinario que integra aspectos de mecanismos, electrónica, hardware/software de computadora, teoría de sistemas y tecnologías de la información en una metodología de diseño práctica unificada. Una característica clave de los sistemas mecatrónicos es que a menudo cuentan con inteligencia incorporada que se aplica a la tarea para la que fueron diseñados.

Aunque la gama de sistemas mecatrónicos es amplia, hay características comunes a la mayoría, si no a todos, de estos sistemas. Los sistemas informáticos conectan el sistema mecatrónico a fuentes de inteligencia, ya sean entradas/salidas del usuario para incluir humanos en la operación y/o algoritmos para interpretar los datos de los sensores y tomar decisiones para los sistemas mecatrónicos. El sistema eléctrico condiciona las señales que pasan entre la computadora y los sistemas mecánicos, además de regular la energía eléctrica proporcionada al sistema mecatrónico. Los sistemas mecánicos consisten en los sistemas físicos que interactúan con su entorno. Los comandos de los sistemas informáticos digitales a los sistemas eléctricos analógicos pasan a través de un convertidor de digital a analógico y estos comandos se implementan en los actuadores que conectan los sistemas eléctricos y mecánicos. Los sensores integrados en los sistemas mecánicos generan señales que pasan a los sistemas eléctricos, y estas señales (después del acondicionamiento) se comunican a los sistemas informáticos a través de un convertidor de analógico a digital.

Un sistema robótico es posible a través de la síntesis de teorías y técnicas de muchos campos, quizás más notablemente ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica y tecnología de la información. El campo de la mecatrónica facilita y permite

el desarrollo de sistemas robóticos complejos a partir de subsistemas estándar y ha acelerado la maduración del campo de la robótica en los últimos años.

II. MARCO TEÓRICO

A. Conceptos Básicos Acerca de los Robots

1) *¿Qué es un Robot?*: El robot se define, de manera formal en la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), como un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, a través de movimientos variables programados, para el desempeño de tareas diversas (Fig. 1). Existen otras definiciones dadas por otras asociaciones, como por ejemplo, el Robotics Institute of America (RIA), la Japan Industrial Robot Association (JIRA), la British Robot Association (BRA) y otras. Todas ellas coinciden en dos puntos: la capacidad de reprogramación y la multifuncionalidad de los robots. En términos generales, los robots son clasificados como industriales, no industriales o para usos especiales.

En general, los robots están diseñados y destinados a ser controlados por una computadora o dispositivo similar. Los movimientos del robot se controlan a través de un controlador bajo la supervisión de la computadora, que está ejecutando algún tipo de programa. Por lo tanto, si se cambia el programa, las acciones del robot cambiarán en consecuencia. La intención es tener un dispositivo que pueda realizar muchas tareas diferentes; en consecuencia, es muy flexible en lo que puede hacer sin tener que ser rediseñado. Por lo tanto, el robot está diseñado para poder realizar muchas tareas basadas en los programas en ejecución simplemente cambiando el programa.

2) *El uso de los Robots*: Los robots de cualquier tipo, industrial o no industrial, no son tan rápidos ni tan eficientes como las máquinas automatizadas de uso especial. Sin embargo, estos robots pueden fácilmente reentrenarse o reprogramarse para realizar un sinnúmero de tareas, mientras que una máquina automatizada de uso o propósito especial, incluso una máquina CNC, sólo puede realizar una serie de labores muy limitada. Es el grado de reprogramabilidad lo que distingue un robot de una máquina-herramienta de CNC. Sin embargo, no hay ninguna línea de demarcación internacionalmente reconocida. Queda la pregunta, pues, sobre cuándo debe considerarse que un determinado trabajo ha de ser ejecutado por una persona, un robot o una máquina especial. La respuesta a esta pregunta no es sencilla. Algunas normas generales pueden servir para proponer factores significativos que deben tenerse presentes.

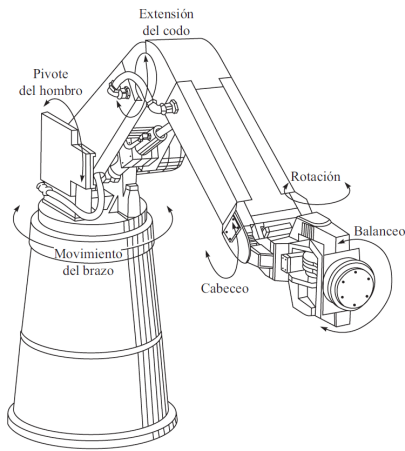


Fig. 1. Diagrama de un brazo robótico.

Las reglas generales para la decisión sobre el uso de un robot son:

- La primera regla por considerar se refiere a lo que se conoce como Las cuatro D de la robótica (*Four Ds of Robotics*), es decir, si la tarea es sucia (*Dirty*), aburrida (*Dull*), peligrosa (*Dangerous*) o difícil (*Difficult*). De tener una de estas características, un ser humano probablemente no será capaz de ejecutar la tarea en forma eficiente. Por lo tanto, es un trabajo apropiado para que se le automatice o para que lo realice un robot.
- La segunda regla es que un robot no debe dejar a un ser humano sin trabajo o desempleado. La robótica y la automatización deben servir para hacer nuestra vida más placentera, no más desagradable.
- La tercera regla implica cuestionarse si es posible o no encontrar personas dispuestas a realizar el trabajo. De no ser así, dicho trabajo es candidato para la automatización o la robótica. Ciertamente, esto debería ser un motivo primordial para el crecimiento de la automatización y de la robótica.
- La cuarta regla general es que el uso de robots o de automatización debe tener beneficios económicos a corto y largo plazos.

Así, como punto de partida general, consideraremos lo siguiente: una tarea que tiene que realizarse una sola vez o unas cuantas veces y que no es peligrosa es mejor que la efectúe un ser humano. Después de todo, él es la más flexible de todas las máquinas. En cambio, será mejor que una tarea que tenga que ser hecha cientos o cientos de miles de veces sea ejecutada por una máquina automatizada flexible, como un robot industrial. Y una tarea que debe realizarse un millón de veces o más, probablemente sea mejor que se efectúe mediante la construcción de una máquina altamente automatizada de uso especial.

3) *Robots Seriales y Subsistemas*: Normalmente, un robot industrial es serial por naturaleza, tal como se muestra en las Fig. 1, por lo que a éstos se les conoce como robots seriales. Cualquier robot, serial o de otro tipo, consiste en

varios subsistemas. Un sistema robótico consiste por lo general en tres subsistemas: subsistema de movimiento, subsistema de reconocimiento y subsistema de control. Sus funciones se describen a continuación:

- Subsistema de movimiento: el subsistema de movimiento es la estructura física del robot que realiza un movimiento deseado parecido al de los brazos humanos, tal como se ilustra en la Fig. 1.
- Subsistema de reconocimiento: el subsistema de reconocimiento utiliza diferentes sensores para recabar información sobre el propio robot, sobre cualquier objeto que va a ser manipulado y sobre el ambiente de trabajo. Basándose en los datos de los sensores, este subsistema reconoce el estado del robot, el de los objetos y el del ambiente de trabajo.
- Subsistema de control: el subsistema de control regula el movimiento del robot con el fin de lograr una determinada tarea, usando la información proporcionada por el subsistema de reconocimiento.

4) *Subsistema de movimiento*: Los elementos del subsistema de movimiento son los siguientes:

- Manipulador: se trata de la estructura física, la parte que se está moviendo. Ésta incluye eslabones (también llamados “cuerpos”) y articulaciones (que también se denominan “pares cinemáticos”), normalmente conectadas en serie, como es el caso del robot que se muestra en la Fig. 1.
- Efector final: esta es la parte instalada en el extremo del manipulador. Es equivalente a la mano humana. Un efector final podría ser una mano mecánica que manipula un objeto o que lo sostiene antes de que sea movido por el brazo del robot.
- Actuador: Los actuadores de un robot proporcionan el movimiento para el manipulador y para el efector final. Se clasifican como neumáticos, hidráulicos o eléctricos, según su principio de operación, lo cual se explica más adelante.
- Transmisión: como lo sugiere el término, estos elementos transmiten el movimiento de motores y de actuadores a los eslabones del manipulador. En el caso de motores eléctricos, estos elementos, junto con el motor eléctrico, forman un actuador.

5) *Subsistema de reconocimiento*: El elemento más importante en el subsistema de reconocimiento es el sensor, el cual puede compararse con nuestros ojos o nuestra nariz. La inclusión de sensores en un robot cambia su naturaleza de estúpida a inteligente. A fin de procesar la señal detectada, en su mayoría analógica, por medio de un controlador digital, se requiere un convertidor analógico digital. De esta manera, un subsistema de reconocimiento consiste normalmente en los siguientes dos elementos:

6) *Subsistema de Control: Controlador digital*: El controlador digital es un dispositivo electrónico especial que tiene un CPU, memoria y, a veces, un disco duro para almacenar los datos programados. En sistemas de robótica, estos

componentes se mantienen dentro de una caja sellada que se denomina controlador. Se usa para controlar los movimientos del manipulador y del efector final. Un controlador de robot es como un supervisor en una fábrica. Puesto que una computadora tiene las mismas características que un controlador digital, también se utiliza como un controlador de robot. Un controlador procesa los comandos programados por el usuario y transmite señales apropiadas a los actuadores a través de los convertidores analógicos digitales.

Los microcontroladores a partir de su interfaz (Tabla I), permiten llevar a cabo las implementaciones de un sistema de control digital para el funcionamiento del robot.

7) *Actuadores*: Los actuadores son los “músculos” de los manipuladores. El controlador envía señales a los actuadores, que a su vez mueven las articulaciones y los enlaces del robot. Los tipos comunes son servomotores, motores paso a paso, actuadores neumáticos y actuadores hidráulicos. Se utilizan otros actuadores novedosos en situaciones específicas. Los actuadores están bajo el control del controlador. Su clasificación es la siguiente:

- Actuadores neumáticos: Estos actuadores utilizan energía hidráulica proporcionada por un compresor y la transforman en energía mecánica por medio de pistones o turbinas.
- Actuadores hidráulicos: Estos actuadores emplean la energía neumática almacenada por un compresor que la transforma en energía mecánica mediante pistones o turbinas.
- Actuadores eléctricos: La fuente principal de energía de entrada es la energía eléctrica que fluye desde el sistema de distribución eléctrico.

8) *Grados de Libertad del Robot*: Para ubicar un punto en el espacio, es necesario especificar tres coordenadas (como las coordenadas x , y y z a lo largo de los tres ejes cartesianos). Tres coordenadas son necesarias y adecuadas para definir completamente la ubicación del punto. Aunque se pueden utilizar diferentes sistemas de coordenadas para expresar esta información, siempre son necesarias. No es posible trabajar ni con dos ni cuatro coordenadas; dos es inadecuado para ubicar un punto en el espacio, y cuatro es ilógico porque simplemente hay demasiada información. Por ejemplo, un dispositivo como una grúa puede moverse a cualquier lugar dentro de su espacio de trabajo.

Para ubicar un cuerpo rígido (un objeto tridimensional en lugar de un punto) en el espacio, primero necesitamos especificar la ubicación de un punto seleccionado en él y, por lo tanto, necesitamos tres elementos de información. Además, necesitamos especificar la orientación del objeto para especificarlo completamente en el espacio. Esto significa que se necesitan seis piezas de información para especificar completamente la ubicación y orientación de un cuerpo rígido. Del mismo modo, debe haber 6 grados de libertad (*DOF* por sus siglas en inglés) disponibles para colocar completamente el objeto en el espacio y también orientarlo como se desee.

Por esta razón, los robots deben tener 6 *DOF* para poder colocar y orientar libremente objetos dentro de su espacio de

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL MICROCONTROLADOR PARA EL CONTROL DE LOS ACTUADORES (MOTORES) DE UN ROBOT.

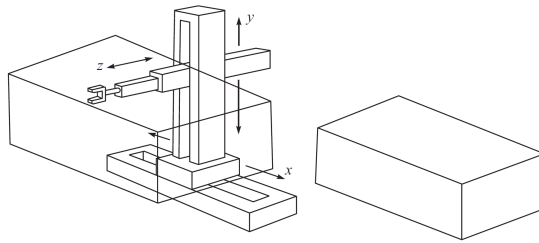
I/O básico	Para generar señales de control de paso completo o medio paso, comunicaciones digitales/pulsos de entrada para velocidad y retroalimentación desde interruptores de referencia y seguridad.
Módulo Capture Compare PWM	Para micropasos (o medio paso).
Comparadores	Detección y protección de sobrecorriente.

trabajo. Se puede solicitar a un robot que tiene 6 *DOF* que coloque objetos en cualquier ubicación y orientación deseadas. Si un robot tiene menos *DOF*, no podemos especificar arbitrariamente ninguna ubicación y orientación para el robot; sólo puede ir a lugares y orientaciones que permitan el menor número de juntas. Por ejemplo, para el caso de un robot con 3 *DOF*, donde solo puede moverse a lo largo de los ejes x , y y z , no se puede especificar ninguna orientación; todo lo que el robot puede hacer es tomar una pieza y moverla en el espacio paralelo a los ejes de referencia. La orientación siempre permanece igual.

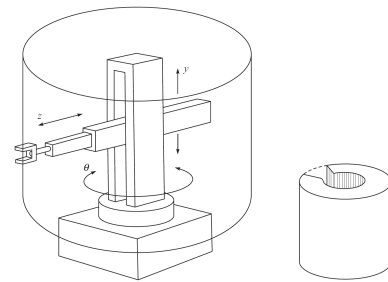
9) *Articulaciones del Robot*: Los robots pueden tener diferentes tipos de articulaciones o juntas, como lineales, rotacionales, deslizantes y esféricas. Las juntas esféricas son comunes en muchos sistemas, pero poseen múltiples grados de libertad y, por lo tanto, son difíciles de controlar. En consecuencia, no son comunes en robótica excepto en investigación. La mayoría de los robots tienen una articulación lineal o rotacional. Las articulaciones prismáticas son lineales; no hay rotación involucrada. Son cilindros hidráulicos o neumáticos o actuadores eléctricos lineales. Estas uniones se utilizan en robots cartesianos, cilíndricos o esféricos. Aunque las juntas rotacionales hidráulicas y neumáticas son comunes, la mayoría de las juntas rotacionales son eléctricas, impulsadas por motores paso a paso o, más comúnmente, por servomotores.

10) *Coordenadas del Robot*: Las configuraciones del robot generalmente siguen los marcos de coordenadas comunes con los que se definen, como se muestra en la Fig. 2. Las articulaciones prismáticas se indican con P, las articulaciones de revolución se indican con R y las articulaciones esféricas se indican con S. Las configuraciones del robot se especifican mediante una sucesión de designaciones P, R y/o S. Por ejemplo, 3P3R especifica un robot con tres articulaciones prismáticas y tres articulaciones giratorias. Las siguientes configuraciones son comunes para posicionar el efector final del robot:

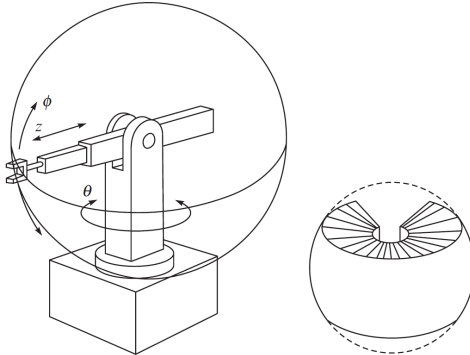
- Cartesiano/rectangular (3P): estos robots utilizan tres juntas prismáticas para colocar el efector final, normalmente seguidas de articulaciones de revolución adicionales que orientan el efector final.
- Cilíndrico (PRP): los robots de coordenadas cilíndricas tienen dos juntas prismáticas y una junta giratoria para posicionar la pieza, además de juntas giratorias para la



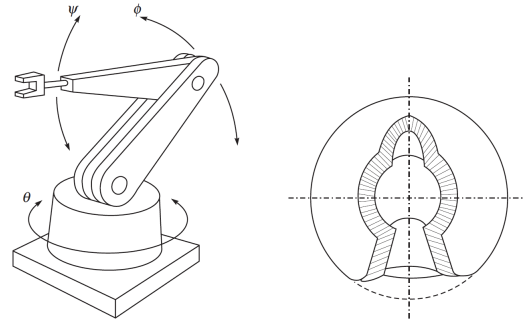
(a) Un brazo de robot cartesiano y su espacio de trabajo



(b) Brazo de robot cilíndrico dentro de su volumen de trabajo



(c) Robot esférico con su volumen de trabajo



(d) Un brazo de robot articulado con su espacio de trabajo

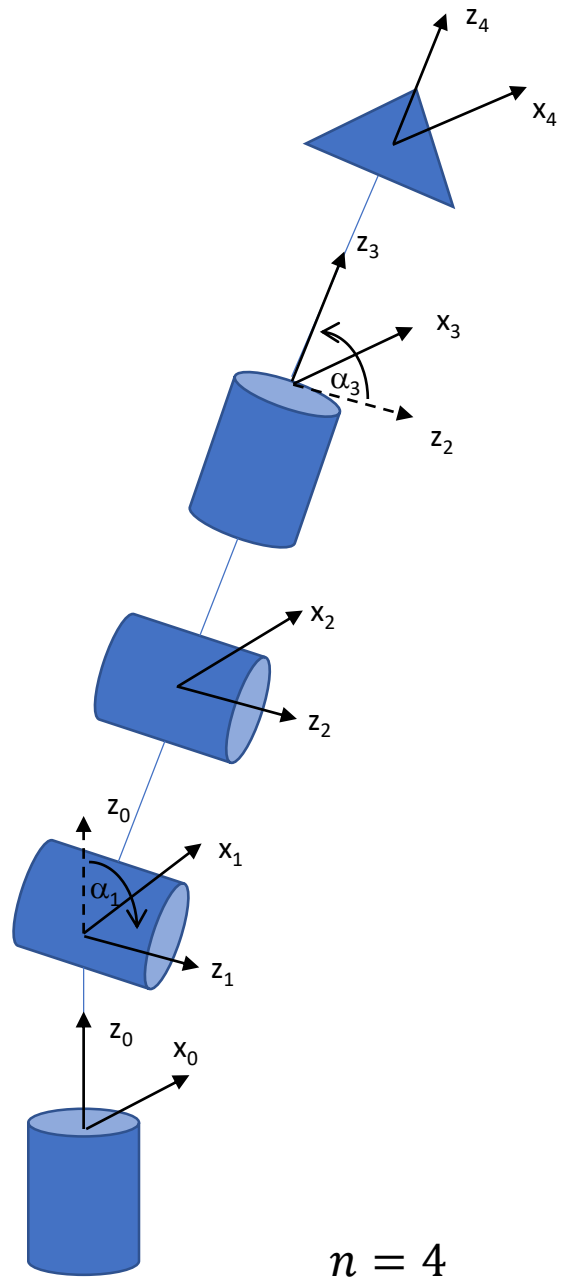
Fig. 2. Espacios de trabajo aproximados típicos para configuraciones de robots comunes.

orientación.

- Esférico (P2R): los robots de coordenadas esféricas siguen un sistema de coordenadas esféricas, el cual tiene una articulación prismática y dos de revolución para posicionar la pieza, además de articulaciones de revolución adicionales para la orientación.
- Articulado/antropomórfico (3R): las juntas de un robot articulado son todas de revolución, similares al brazo de un humano. Son la configuración más común para robots industriales.
- Brazo robótico de ensamblaje de cumplimiento selectivo (SCARA por sus siglas en inglés): los robots SCARA tienen dos (o tres) articulaciones giratorias que son paralelas y permiten que el robot se mueva en un plano horizontal, además de una junta prismática adicional que se mueve verticalmente. Los robots SCARA son muy habituales en las operaciones de montaje.

REFERENCIAS

- [1] Saha, S. K. (2010). *Introducción a la Robótica*. McGraw-Hill.
- [2] Di Jasio, L., Wilmschurst, T., Ibrahim, D., Morton, J., Bates, M. P., Smith, J., Smith, D. W., & Hellebuyck, C. (2008). *PIC Microcontrollers: Know It All*. Elsevier.
- [3] Microchip Technology Inc. (s. f.). *Stepper Motors*. Microchip. <https://www.microchip.com/design-centers/motor-control-and-drive/motor-types/stepper>
- [4] Condit, R. (2004). *Stepping Motors Fundamentals (N.o AN907)*. Microchip Technology Inc.
- [5] Yedamale, P. (2002). *Stepper Motor Microstepping with PIC18C452 (N.o AN822)*. Microchip Technology Inc.



z_{i-1}		x_i	
x_{i-1}	x_i	z_{i-1}	z_i
θ_i	d_i	a_i	α_i
θ_0	d_0	0	$\pi/2$
θ_1	0	a_1	0
θ_2	d_2	0	$-\pi/2$
θ_3	0	0	0