

CONSTRUCCIÓN DEL CONTROL CINEMÁTICO DE UN ROBOT ANTROPOMORFO. COMPARACIÓN DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE CONTROL

José A. Cuello ^{*1}, O. Daniel Morán ², Germán F. Künning ³

^{*1,2,3} *Facultad de Ingeniería y Ciencias Económico – Sociales -Universidad Nacional de San Luis. Villa Mercedes (San Luis) – Argentina. Ruta 148 Extremo Norte S/N.*
jcuello@fices.unsl.edu.ar

RESUMEN

En el Laboratorio de Mecatrónica de la FICES se construyó y puso en funcionamiento un robot antropomorfo "CXN-I" de 4 grados de libertad para actividades de investigación y enseñanza. Para la obtención de las ecuaciones utilizadas en el control cinemático, se implementó para cada desplazamiento angular de las articulaciones, una curva de control denominada "interpolación de segmento lineal con transiciones parabólicas".

Se construyeron dos controles uno basado en PC más placa de adquisición y control de datos y otro basado en microcontroladores. En este trabajo se describen las ecuaciones de control de ambos sistemas, pero se hace énfasis en la implementación del control basado en microcontroladores. Posteriormente se realizan comparaciones entre ambos sistemas de control analizándose las ventajas y desventajas de los mismos.

Palabras Claves: Robot, Cinemática, Manipulador, Control

1. INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto de investigación de Ciencia y Técnica: "DESARROLLO Y APLICACIÓN EFICIENTE DE SISTEMAS MECATRONICOS", que se desarrolla en el laboratorio de mecatrónica "LABME" de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Económicas Sociales de la Universidad Nacional de San Luís, se construyó un robot antropomorfo semi-industrial, de cuatro grados de libertad, con una pinza para aplicaciones didácticas y experimentales "CXN-I" (Figura 1). El proyecto se sigue desarrollando y prevé seguir avanzando en la construcción de otro robot accionado mediante servomotores de corriente alterna. Actualmente los robots industriales implementan sistemas de control que permiten el control de la trayectoria del extremo. Normalmente en los robots antropomorfos los controles posibles pueden ser: control punto a punto, control punto a punto de movimientos coordinados y control de trayectoria; dependiendo la elección del mismo de las diferentes prestaciones que se necesitan del robot. En este caso, se adopta el control punto a punto de movimientos coordinados ya que por medio del mismo se logra una movimiento más suave que con el control punto a punto. Sin embargo también se ha experimentado en este robot con control de trayectoria. Dentro de los objetivos del presente trabajo se propone comunicar la experiencia obtenida al ensayar dos tipos diferentes de controladores construidos: uno basado en Microcontroladores y otro basada en PC + Placa DAQ.



Figura 1. Robot didáctico CXN-I. Manipulador.

Para el desarrollo de los controladores se utilizaron las ecuaciones basadas en una interpolación de segmento lineal con transiciones parabólicas, para cada desplazamiento angular de las articulaciones [1,2].

La primera propuesta se basa en implementar las ecuaciones de control, tomando como parámetros la aceleración articular (angular) constante. La segunda propuesta se basa en implementar el tiempo de incursión proporcional al desplazamiento angular y el tiempo de aceleración proporcional al tiempo de incursión; de manera que se obtienen aceleraciones variables y tiempos de incursión variables.

En el desarrollo del mismo se destacan cuatro sub secciones: Comenzando con un resumen de las ecuaciones implementadas para la primera propuesta; seguida de un resumen de las ecuaciones implementadas para la segunda propuesta; posteriormente se describen las dos sistemas de control construidos que provienen de las propuestas de control y hardware distintos; al final se presenta una tabla de comparación entre las dos propuestas en la que se destacan las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

2. DESARROLLO

2.1. Primera Propuesta de Control: Aceleración constante y tiempo de incursión proporcional al desplazamiento.

Inicialmente se tiene como dato los puntos de destino en los que se debe posicionar el Robot CXN-I:

Puntos de destino: $(x, y, z)_1, (x, y, z)_2, \dots, (x, y, z)_n$

Estos puntos deben ser alcanzados en determinados intervalos de tiempo:

Tiempos: t_1, t_2, \dots, t_n .

Esta tarea de alcanzar un punto en un determinado tiempo va a implicar que cada motor de cada articulación deba desarrollar una determinada velocidad y en consecuencia una determinada aceleración. Cada articulación se moverá de una posición θ_i inicial a una posición θ_f final.

La forma en que el robot realiza este movimiento articular es determinante para lograr movimientos suaves y precisos. Hay que lograr una curva de velocidad en función del tiempo que asegure movimientos suaves del CXN-I.

Se aplican diferentes estrategias para conformar una curva suave que determina la velocidad en función del tiempo, con la que los motores se desplazan desde una posición θ_i hasta la posición θ_f . Entre varias estrategias se elige la curva de interpolación de segmento lineal con transiciones parabólicas.

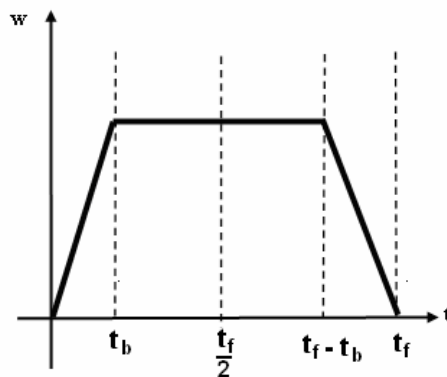


Figura 2. Velocidad articular.

La estrategia seguida para controlar la velocidad del eje del motor que mueve la articulación, es hacer que el motor arranque con velocidad inicial cero, vaya aumentando en forma lineal su velocidad hasta que en el tiempo t_b alcanza la velocidad de régimen, permanezca a velocidad constante hasta el tiempo $t_f - t_b$, y luego disminuya linealmente su velocidad hasta detenerse con velocidad cero en el tiempo t_f . Esta forma de controlar la velocidad del eje se puede deducir de la gráfica velocidad-tiempo (Figura 2). La interpretación geométrica de la curva permite observar que el motor se pone en marcha suavemente, con un movimiento acelerado hasta t_b , luego funciona con aceleración cero entre t_b y $t_f - t_b$ hasta detenerse suavemente en t_f .

La curva de la posición θ respecto del tiempo que se genera a partir de este perfil de velocidad es la que le da el nombre de "interpolación de segmento lineal con transiciones parabólicas" (Figura 3). Se puede observar las transiciones parabólicas al inicio y al final de la curva y el segmento lineal en la parte central de la gráfica. Esta curva sería la integral de la curva de velocidad.

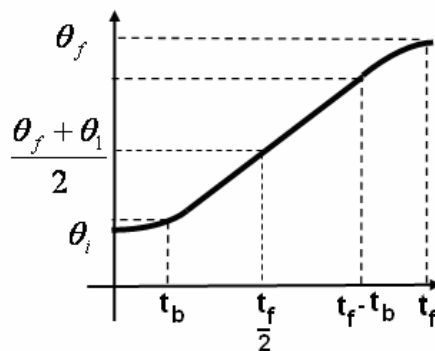


Figura 3. Posición Articular.

De la curva de la aceleración en función del tiempo, se puede observar; al inicio y al final los tramos de movimiento con aceleración positiva y aceleración negativa y en la parte central el movimiento con aceleración cero (Figura 4).

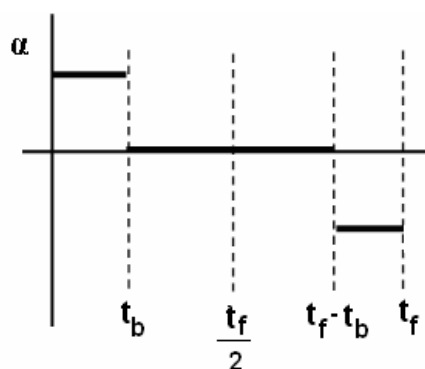


Figura 4. Aceleración Articular.

Para obtener las ecuaciones de control se tiene en cuenta la curva de Posición Articular (Figura 3).

Se parte del siguiente planteo:

Condiciones Generales:

t_f : tiempo final del recorrido, θ_f : posición articular final, θ_i : posición articular inicial.

- La curva es simétrica respecto a $t_f / 2$
- La velocidad del segmento lineal tiene el mismo signo que $\theta_f - \theta_i$. Es decir la misma orientación que la diferencia entre la posición final y la inicial.
- La velocidad inicial es igual a la velocidad final y ambas son cero:

$$\frac{dq_i}{dt} = \frac{dq_f}{dt} = 0 \quad (1)$$

Datos:

- Aceleración: a_{\max}

- Tiempo de punto a punto: t_f

Entonces teniendo en cuenta las condiciones generales y los datos se puede deducir:

-Para los tramos de transiciones parabólicas:

$$0 \leq t \leq t_b \quad \text{y} \quad t_b - t_f \leq t \leq t_f$$

$$q(t) = q_i + \frac{a}{2} t^2 \quad (2)$$

$$w(t) = at \quad (3)$$

-Para el tramo central, de segmento lineal:

$$t_b < t < t_f - t_b$$

$$q(t) = \frac{(q_f + q_i)}{2} + w(t_f - t_b) \quad (4)$$

$$w(t) = at_b \quad (5)$$

Si se considera el tiempo t_b , en ese instante el θ de la ecuación (2) es igual al θ de la ecuación (4), entonces fácilmente se puede despejar:

$$t_b = \frac{t_f \pm \sqrt{t_f^2 - 4 \frac{\phi}{\alpha}}}{2} \quad 0 < t_b \leq \frac{t_f}{2} \quad (6)$$

De la ecuación anterior se puede obtener el tiempo t_b que es fundamental para desarrollar la curva ya que es el tiempo en el cual se produce la transición del movimiento parabólico a lineal.

2.2. Segunda Propuesta de Control: Aceleración variable y tiempo de incursión proporcional al desplazamiento.

La segunda propuesta parte del requerimiento, de que la cintura del robot CXN-I gire una determinada variación articular en un tiempo previamente establecido. Esta relación "K" debe ser constante, por lo que debe permanecer para las demás incursiones solicitadas por el operador. Los parámetros para establecer una estrategia de control de segmento lineal con transiciones parabólicas son: α , w , t_f , t_b y q de manera que no es suficiente la condición impuesta para resolver el sistema de ecuaciones; por lo que se impone como condición que $t_b = \frac{1}{3}t_f$, así el tiempo de las transiciones como el del segmento lineal serán los mismos e igual a $t/3$. Esto simplifica las ecuaciones.

Datos:

La curva debe ser simétrica respecto a $t_f/2$.

La velocidad del segmento lineal debe tener el mismo signo que $\phi_f - \phi_i$.

Condiciones iniciales:

$$t_b = \frac{1}{3}t_f, \quad (7)$$

$$K = \frac{q}{t} = \text{cte.} \quad (8)$$

Ecuaciones:

La cantidad de desplazamiento angular para el primer y tercer tramo

$$q_1 = q_3 = \frac{1}{2}\alpha\frac{t}{9}^2 \quad (9)$$

Para el tramo central es

$$w = \alpha\left(\frac{t}{3}\right) \quad (10)$$

$$q_2 = +w\left(\frac{t}{3}\right) = +\alpha\left(\frac{t}{3}\right)\left(\frac{t}{3}\right) \quad (11)$$

Reemplazando en la Ecuación (8) se obtiene la aceleración para cada incursión:

$$\frac{1}{2}a\left(\frac{t}{3}\right)^2 + a\left(\frac{t}{3}\right)\left(\frac{t}{3}\right) + \frac{1}{2}a\left(\frac{t}{3}\right)^2 = q \quad (12)$$

$$a = \frac{9q}{2t^2} \quad (13)$$

Relacionando K de la ecuación (8) se puede expresar la aceleración como:

$$\alpha = \frac{9}{2t} K \quad (14)$$

La velocidad angular se determina al reemplazar en la Ecuación (11) la Ecuación (14)

$$w = \frac{9}{2t} K \left(\frac{t}{3} \right) = \frac{3}{2} K \quad (15)$$

La velocidad es siempre la misma, pero la aceleración varía en forma inversamente proporcional al tiempo de cada incursión.

2.3. Implementación del control en el CXN-I.

2.3.1 Implementación de la Primera Propuesta de Control.

La primera propuesta se implementó con un sistema constituido físicamente por una PC, una placa DAQ, drivers y motores paso a paso. Cuando el operador ingresa la tarea del robot, la PC calcula y almacena en memoria los datos necesarios y transmite los mismos a la placa DAQ para que la misma entregue los pulsos de control al conjunto Driver – Motor. La placa DAQ cuenta con tres TIMERS y cuatro puertos digitales de 24 E/S cada uno. Un TIMER por cada motor es usado como generador de pulsos, los cuales se aplican al driver de cada motor. La cantidad de pulso determina la posición y la frecuencia de los mismos la velocidad angular del motor. Los puertos envían las acciones de control correspondientes a la dirección de giro y habilitación de los motores. El control es de tipo lazo abierto desde la placa hacia el conjunto driver-motor y lazo cerrado entre placa DAQ y la PC (Figura 5). El desarrollo de este sistema de control incluye un software en lenguaje C++ [4] y fue publicado [5].

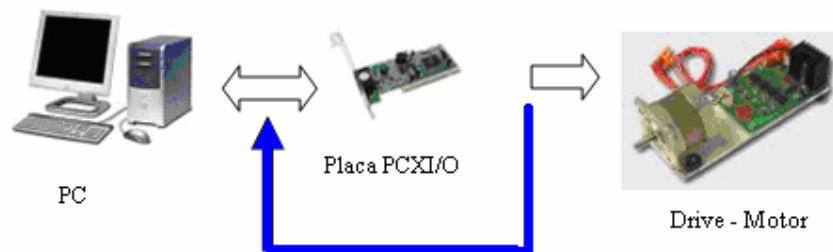


Figura 5. Esquema del control implementado.

2.3.2 Implementación de la Segunda Propuesta de Control

La simplicidad de las ecuaciones de control en la segunda propuesta permite ser implementada con Microcontroladores de baja gama.

El control con Microcontroladores prescinde del uso de la PC en los cálculos necesarios, restringiendo su aplicación para la programación de la rutina de movimientos o como una opción de interfase entre hombre y máquina ("HMI"). La placa de control se comunica con la

PC utilizando el puerto serie (Puerto COM) según el estándar RS232; de esta manera queda físicamente construido por una PC como interfase HMI, una placa de control con Microcontroladores, el conjunto drive-motores (Figura 6).

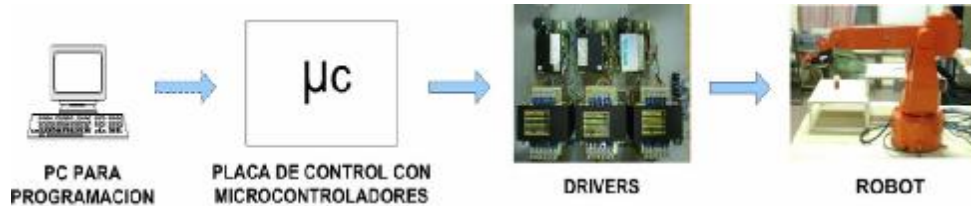


Figura 6 Robot controlado por una placa de control utilizando microcontroladores.

El diseño y desarrollo del hardware muestran las diferentes etapas y se esquematizan los vínculos entre cada una de ellas. Las flechas negras representan las señales de control de los drivers y las naranjas, las de potencia hacia los motores. Finalmente, las flechas verdes representan el flujo de información proveniente de la PC y el correspondiente entre los dispositivos internos del desarrollo. Se puede observar que no hay ninguna realimentación ya que el control es de lazo abierto, permitido por la característica de los motores (Figura 7a).

La computadora envía los datos necesarios por la placa a través del puerto serie. Estos datos son recibidos por la placa de comunicación, la cual distribuye la información a las placas de control. Estas últimas se encargan de comandar los drive de cada grado de libertad. Para todas se utilizaron Microcontroladores PIC16F84 [3]. Todas las placas están en red, siendo la de comunicación la que actúa como "Maestro", mientras que el resto lo hacen como "Esclavos" (Figura 7.b).

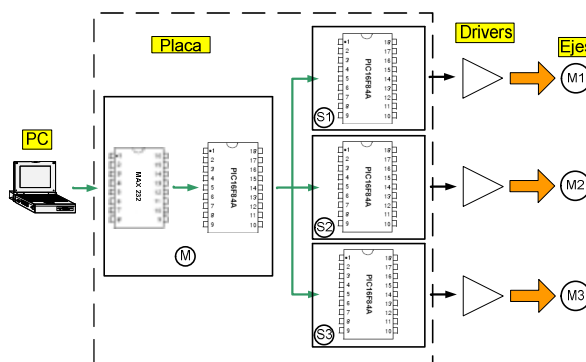


Figura 7.a. Esquema simplificado de la estructura de hardware.

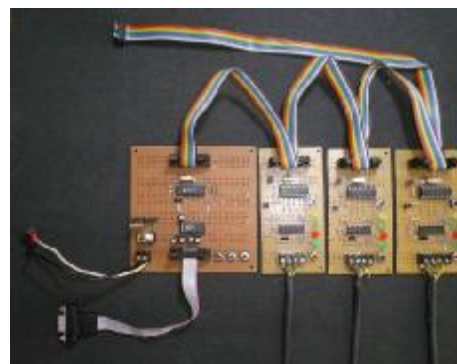


Figura 7.b. Conjunto de placas: una de comunicación y tres placas de control.

La elección de utilizar un PIC por eje facilita la tarea de programación, simplifica el proyecto y lo hace flexible; ya que para agregar nuevos grados de libertad, bastaría con duplicar el hardware involucrado en un grado de libertad. Además, la necesidad de un solo temporizador

por microcontrolador, hace factible el uso de PIC's de baja gama como el PIC16F84A, el cual es simple de programar, fácil de conseguir y de muy bajo costo.

Para que el algoritmo de control permita al usuario trabajar dentro de un rango seguro de parámetros permitidos robot CXN-I, se determinan las restricciones necesarias para evitar exigirlo por encima de las limitaciones físicas impuestas.

El actuador de la base del robot CXN-I es un motor paso a paso de 110Ncm. La aceleración máxima es $a_{motor} = 2.860.000 \text{ } \%/seg^2$ y de velocidad $w_{max} = 4800 \text{ } \%/seg$. Tiene acoplado al motor una reducción $N = 30:1$.

Para las experiencias practicas, se asigna a la constante $K = 90 \text{ } \%/seg$. O sea que base del robot debe girar 90° en un segundo. Teniendo en cuenta la reducción acoplada al eje del motor se tiene que la constante $K_{motor} = 2700^\circ/seg$. De la ecuación (15) se determina la velocidad de régimen que debe realizar el motor de la base del robot CNX-I.

$$w_{motor} = \frac{3}{2} K = 4050 \text{ } \%/seg.$$

El tiempo mínimo que se puede implementar el control propuesto sin sobrepasar la aceleración máxima del motor de la base se determina de la ecuación (14).

$$t_{min} = \frac{9}{2a_{motor}} K_m \cong 0,00424 \text{ seg.}$$

De la ecuación (13) se tiene que mínima incursión en el eje del motor es:

$$\frac{2}{9} a_{max} * t_{min}^2 = q_{min} = 11,42^\circ$$

Teniendo en cuenta la relación de reducción $N=30$; esto se traduce a que la base tiene una incursión mínima de $q_{base} = 0.38^\circ$. O se que el algoritmo de control no debe permitir que el operador solicite una incursión inferior a la mínima que puede realizar la base.

2.4. Comparación de las estrategias.

La comparación de las dos estrategias estará detallada en la Tabla 1. La primera columna se refiere al primer control y la segunda columna a la nueva estrategia de control.

Tabla 1 Comparación de las estrategias de control.

Primera Propuesta de Control : Aceleración constante y tiempo de incursión proporcional	Segunda Propuesta de control: Aceleración variable y tiempo de incursión proporcional
Al tener aceleración constante, la velocidad de régimen depende de t_b . Siendo ideal para pequeñas incursiones.	Al tener aceleración y tiempo de incursión variables, se establece que la velocidad final es constante. Siendo ideal para grandes incursiones, aunque la aceleración toma valores peligrosos para pequeñas

	incursiones. El algoritmo debe advertir al operador el límite máximo de aceleración permitida.
Se observa de la ecuación (6) que para obtener el valor del tiempo t_b , se requiere resolver una ecuación de segundo orden.	Todos los parámetros requeridos por el algoritmo de control se obtienen de relaciones proporcionales simples. Esto implica, que son sencillas de implementar en un micro.
La mínima incursión que puede realizar la base del robot depende de la característica del drive que permite $q_{base} = 0.03^\circ$. Determinada en la hoja de datos del fabricante.	La mínima incursión que puede realizar la base del robot es $q_{base} = 0.38^\circ$. Determinada por la ecuaciones de control.
Requiere para su implementación un procesador de cálculos; por lo que se eligió una PC de bajo desempeño con Placa de adquisición y control de datos.	Su implementación se realizó con Microcontroladores baja gama.

3. CONCLUSIONES

El robot CXN-I fue construido para realizar trabajos de investigación desarrollados en el LABME y para aplicaciones didácticas asociadas a la asignatura robótica, donde se pueden aplicar los conocimientos adquiridos a través de actividades que integran la cinemática directa, la inversa y el control cinemático de un robot antropomorfo. En este caso particular se pudo realizar en la práctica la comparación de dos sistemas de control diferentes su evaluación y análisis. Al ser probados se comprobó el correcto y similar funcionamiento de ambos sistemas de control. Como principal ventaja del sistema de ecuaciones implementadas mediante microcontroladores, se puede citar que son de primer orden lo que facilita su aplicación con estos dispositivos.

4. REFERENCIAS

- [1] A. Barrientos, L. Peñin . Fundamentos de Robótica. McGraw-Hill. Madrid 1997.
- [2] Nelly R. Santibáñez V., Control de Movimientos de Robot Manipuladores Prentice Hall. Buenos Aires 2003.
- [3] José Angulo Usategui. Microcontroladores PIC Diseño Práctico y Aplicaciones. Ed. Mc Graw Hill. Año 2001.
- [4] Herbert Schildt. Aplique Turbo C++. Osborne/McGraw-Hill. 2000.
- [5] G, Künning. Desarrollo de un Sistema de Control de los Motores para un Robot. XXº Congreso Argentino de Control Automático. Buenos Aires 2006.