

The Anáhuac Journal

The Academic Journal
of the Universidad
Anáhuac-México Sur

Volume 8
Number 2
Second Semester
2008



OXFORD
UNIVERSITY PRESS

Edited by
José C. González Núñez

Universidad Anáhuac-México Sur

Rector: Dr. Javier Vargas Díez Barroso

Vicerrector académico: Dr. Carlos Barber Kuri

Vicerrector de Formación Integral: L. C. Jaime Bordons Closa

Vicerrector de Finanzas: Mtro. Rodrigo Badiola Monsalve

The Anáhuac Journal

Editorial Council/Consejo Editorial

Editor: José C. González Núñez

Centro de Investigaciones en Educación y Negocios Internacionales (CIENI),

Universidad Anáhuac-México Sur,

www.uas.mx

Dr. Carlos Miguel Barber Kuri, Vicerrector Académico, Universidad Anáhuac-México Sur

Mtro. Alfonso de Lara, Director, Riesgo, Scotiabank Inverlat

J. F. Fiz Pérez, Profesor estable de psicología del desarrollo y bioética, de la Universidad Europea de Roma, y consultor internacional

Dr. Rafael Guillermo Ricardo Bray, Profesor asociado, Universidad de la Sabana, Colombia

Mtra. Irene Limón, Coordinadora, Escuela de Administración Internacional, Universidad Anáhuac-México Sur

Prof. Keith Maunders, Universidad de Hull, Reino Unido

Dr. Charles Mayer, Head of Marketing, Central European University, Budapest, Hungría

Dr. José Sámano Castillo, Universidad Nacional Autónoma de México

Mtro. Carlos Morales Troncoso, Consultor, Comercio Exterior y Director, MBA Internacional, Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Ward Roofthoof, Profesor y Consultor, Universidad de Amberes, Bélgica

Dr. Paul Roosens, Coordinador Académico, MBA, Universidad de Amberes, Bélgica

Dra. María del Rocío de la Torre Aguilar, Escuela de Economía y Negocios, Universidad Anáhuac-México Sur

Coordinadora del fondo editorial: **María de Lourdes Rojas Cataño**

Derechos reservados © 2008

respecto a esta edición

por Universidad Anáhuac-México Sur

ISSN 1405-8448

Print: 5000 copias

Tiraje: 5000 ejemplares

Desarrollo de un robot paralelo para manufactura ágil

Mauricio C. Méndez Canseco, Xavier Atonatiuh Meneses Jiménez, Carlos A. Cado Robledo y J. Emilio Vargas Soto

Resumen

Este trabajo muestra el desarrollo de un robot paralelo diseñado para realizar tareas de manipulación ágil en sistemas industriales de producción. Se muestra la metodología empleada como base del desarrollo del proyecto; asimismo, se explica la forma en que se analiza la configuración mecánica y cómo se implementa la interfaz computacional para programar una secuencia de movimientos punto a punto. El álgebra de cuaterniones se utilizó para obtener vectores dinámicos, [1], [2] y [3], con el propósito de simular el comportamiento del robot paralelo y obtener sus ecuaciones cinemáticas. Los vectores dinámicos se definen con las mismas características de movimiento que los eslabones que conforman al robot, por lo que representan una herramienta muy útil para obtener las ecuaciones cinemáticas de cadenas cerradas o abiertas.

Palabras clave: Robot paralelo, robótica, diseño y control.

Clasificación JEL: Y90 y Z19.

1. Introducción

Un robot de cinemática paralela, también llamado *robot de cadena cerrada* o *manipulador paralelo*, consta básicamente de una plataforma móvil unida a una base fija por medio de varios brazos.

Típicamente, cada brazo está controlado por un actuador. En general estos robots paralelos pueden manipular una carga mayor que los robots de cadena abierta, ya que comparten la carga entre varios brazos paralelos.

Gough (1975) y Stewart (1965) introdujeron hace ya algunas décadas los robots paralelos, Clavel (1989) propuso el robot Delta, el cual se utiliza en aplicaciones de alta velocidad en la industria.

El robot paralelo tipo Delta (fig. 1) es simétrico, espacial y compuesto por tres eslabonamientos idénticos que conectan la base fija con el triángulo equilátero del efector final (actuador) ubicado en uno de los bordes del mismo triángulo; cuenta con tres grados de libertad, aumentando un grado de libertad si el actuador lo posee, lo cual dependerá de la tarea a realizar.

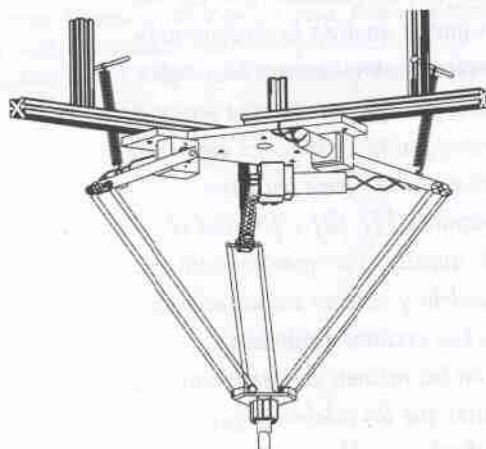


Figura 1. Manipulador paralelo tipo Delta "Hércules".

Al robot construido y mostrado en la figura 1 se le nombró "Hércules". Las dimensiones de los eslabones se determinaron realizando un análisis con base en el modelado del robot, para lo cual se utilizaron cuaterniones.

Las piezas de las cadenas cinemáticas se fabricaron en aluminio y la plataforma móvil en Nalymid. Se diseñó una interfaz computacional para poder manipular y controlar al robot desde una PC.

Este programa se realizó en el lenguaje C# e interactúa con la tarjeta de control de los tres servomotores utilizados.

2. Metodología

Como un conocimiento esencial en la tarea de desarrollar un sistema robótico, es imprescindible una metodología que muestre claridad y lógica en relación con las principales actividades a realizar para lograr el desarrollo de estas máquinas. En el caso del robot que se describe en este trabajo se utilizó una metodología ideada para proyectos industriales de tipo mecatrónico, la cual ha mostrado su eficacia en diversos proyectos industriales y académicos [4], [5] y [6]. En la figura 2 se muestra el mapa conceptual de la metodología utilizada. Es importante mencionar que la definición de las características que por diseño se requieren en el robot es una tarea previa a la aplicación de dicho método.

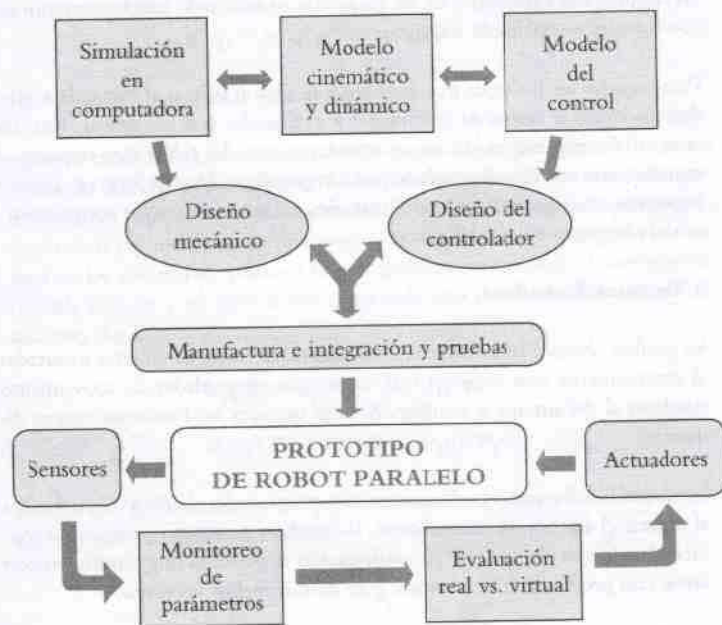


Figura. 2. Mapa conceptual de la metodología.

El método se inicia con la descripción de los modelos cinemáticos y dinámicos del diseño preliminar del mecanismo que constituye al robot. Dichos modelos matemáticos se simulan por computadora a fin de evaluar su confiabilidad y lograr la confianza en su aplicación. Asimismo, el modelo del sistema de control se obtiene a partir del comportamiento dinámico del sistema mecánico del robot.

El siguiente paso de esta metodología consiste en construir, revisar y definir los planos que darán lugar a la manufactura del robot. Con la aprobación de los planos de manufactura se procede a realizar las piezas, o bien,

a comprar los elementos que permitirán la construcción del robot. Por lo general, el desarrollo de esta etapa toma 30% del tiempo total del proyecto. Evidentemente, cada proyecto presenta complicaciones diversas y tiempos diferentes.

Una vez efectuada la manufactura y compra de componentes, se procede tanto a su ensamble y prueba como a la implementación del sistema de control. En esta etapa por lo general se hacen modificaciones al diseño original, así como cambios en materiales y/o componentes. En estos casos se recomienda actualizar los modelos matemáticos y los planos de manufactura. Cuando el robot muestra capacidades de movimiento, se efectúan ajustes tanto de tipo mecánico como del sistema de control. En esta etapa se prueba el prototipo en condiciones extremas a fin de garantizar su adecuado funcionamiento en condiciones normales de trabajo.

Para mejorar los modelos matemáticos que dieron origen al robot, la metodología muestra etapas de monitoreo y evaluación real vs. virtual. Esto no es sino la comparación del comportamiento real del robot con respecto al comportamiento virtual simulado por computadora. De esta forma es posible lograr mejoras significativas en los modelos, así como un mayor conocimiento del comportamiento del robot.

3. Vectores dinámicos

Es posible obtener las ecuaciones cinemáticas de cadenas abiertas y cerradas al representarlás con vectores que contengan propiedades de movimiento similares al del sistema a estudiar. A estos vectores los llamamos *vectores dinámicos*.

La obtención de vectores dinámicos con propiedades de rotación se facilita al utilizar el álgebra de cuaterniones, lo que hace necesario conocer las propiedades de esta álgebra [1]. A continuación se presenta una transformación lineal con propiedades de rotación para definir dichos vectores.

3.1 Rotación con álgebra de cuaterniones Q

Existe una transformación lineal $\rho(\mathbf{p}, \cdot): Q \rightarrow Q$, donde $\mathbf{p} \in Q$ está fijo, y preserva el producto interno, la norma y el ángulo:

$$\rho(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \mathbf{p}^* \mathbf{q} \mathbf{p}^{-1} = \frac{1}{\|\mathbf{p}\|^2} \cdot (\mathbf{p}^* \mathbf{q} \mathbf{p}) \rightarrow \forall \mathbf{q} \in Q \quad (1)$$

donde:

- $*$: $Q \times Q \rightarrow Q$ es la operación multiplicativa de los cuaterniones.
- $\|\cdot\|: Q \rightarrow \mathbb{R}^+$ es la norma en espacio vectorial Q .
- \cdot es la multiplicación escalar.
- $\bar{\mathbf{p}} \in Q$ es el conjugado de \mathbf{p} .

La cual es una rotación en el espacio vectorial de los cuaterniones, según se muestra en [1].

Los componentes de $\mathbf{p} \in \mathbb{Q}$ se relacionan con los parámetros físicos de la rotación mediante las siguientes expresiones:

$$p_0 = \cos \frac{\theta}{2}, \quad \mathbf{p}_v = \sin \frac{\theta}{2} \mathbf{w}_v$$

θ es el ángulo de rotación

$\mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3)$ es el eje de rotación

Si $\mathbf{p} \in \mathbb{Q}$ es un cuaternión unitario, entonces la rotación $\rho(\mathbf{p}, \cdot): \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{Q}$ se simplifica a la siguiente forma:

$$\rho(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \mathbf{p} * \mathbf{q} * \mathbf{p}^{-1} = \mathbf{p} * \mathbf{q} * \bar{\mathbf{p}} \quad \forall \mathbf{q} \in \mathbb{Q} \quad (2)$$

3.2 Metodología para calcular vectores dinámicos

Antes de mostrar las ecuaciones cinemáticas para n cuerpos, ejemplificaremos el caso de dos cuerpos acoplados. Todos los desarrollos de los resultados que se muestran aquí se encuentran con detalle en [2]. El modelado consiste en determinar por medio de los eslabones el vector de posición \mathbf{L}_{T_2} del extremo final de los cuerpos acoplados a la base global, considerando el movimiento de cada eslabón y los efectos que tiene cada uno de ellos en los cuerpos siguientes (fig. 3):

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{T_2}(t) = & T_v[\mathbf{P}_1(t) * T_v^{-1}[\mathbf{I}_1] * \bar{\mathbf{P}}_1(t) + \\ & \mathbf{P}_2(t) * \mathbf{P}_1(t) * T_v^{-1}[\mathbf{I}_2] * \bar{\mathbf{P}}_2(t) * \mathbf{P}_1(t)] \end{aligned} \quad (3)$$

Siendo \mathbf{I}_1 y \mathbf{I}_2 los vectores que representan a los dos cuerpos en la posición en la que se determinó el modelo.

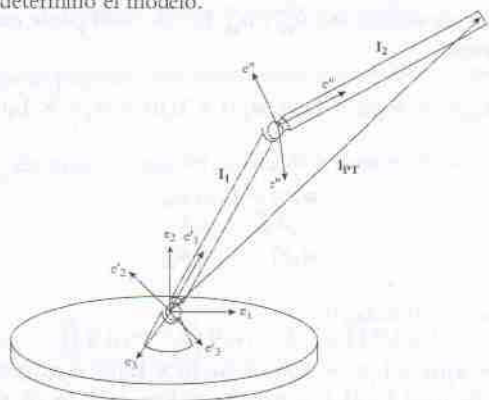


Figura 3. Sistemas de referencia.

Donde el cuaternión $\mathbf{P}_1(t)$ es la rotación del primer cuerpo y está constituido por:

$$\mathbf{P}_1(t) = (P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}) \quad \text{y}$$

$$P_{10} = \cos \frac{\mathbf{f}_1(t)}{2}, \quad \mathbf{P}_{v0}(t) = \sin \frac{\mathbf{f}_1(t)}{2} \mathbf{u}_{r1v}$$

El eje de rotación \mathbf{u}_{r1} está definido respecto a la base global.

El cuaternión $\mathbf{P}_2(t)$ es la rotación del segundo cuerpo formado por:

$$\mathbf{P}_2(t) = (P_{20}, P_{21}, P_{22}, P_{23}) \quad \text{y}$$

$$P_{20}(t) = \cos \frac{\mathbf{f}_2(t)}{2}, \quad \mathbf{Q}_{v0}(t) = \sin \frac{\mathbf{f}_2(t)}{2} \mathbf{u}_{r2v}$$

El vector \mathbf{u}_{r2} es el eje de rotación del segundo cuerpo definido en el sistema global y es afectado por la rotación $\mathbf{P}_1(t)$.

$$\mathbf{u}_{r2} = \mathbf{T}_v [\rho(\mathbf{P}_1(t), \mathbf{T}_v^{-1}[\mathbf{u}_2])] \quad (4)$$

Obtenemos la velocidad al derivar la ecuación de posición y simplificar, utilizando las propiedades mencionadas, hasta obtener:

$$\dot{\mathbf{L}}_{T2}(t) = \dot{f}_1(t) \mathbf{u}_{r1} \times \mathbf{L}_1(t) + \dot{f}_2(t) \mathbf{u}_{r2} \times \mathbf{L}_2(t) + f_1(t) \mathbf{u}_{r1} \times \mathbf{L}_2(t) \quad (5)$$

donde $\mathbf{u}_{r1} = \mathbf{u}_1$.

Los términos \mathbf{u}_1 y \mathbf{u}_2 son los ejes de rotación definidos respecto de la base global antes de que se efectúe cualquier movimiento. Cuando el acoplamiento se mueve los ejes de rotación son afectados por el movimiento y esto se indica con los cuaterniones que definen dicho movimiento; así, los ejes definidos en cada instante son \mathbf{u}_{r1} y \mathbf{u}_{r2} . La velocidad puede escribirse de la siguiente forma:

$$\dot{\mathbf{L}}_{T2}(t) = \mathbf{w}_1(t) \times \mathbf{L}_1 + \mathbf{w}_2(t) \times \mathbf{L}_2(t) + \mathbf{w}_1(t) \times \mathbf{L}_2(t) \quad (6)$$

donde:

$$\mathbf{w}_1(t) = \dot{f}_1(t) \mathbf{u}_{r1}$$

$$\mathbf{w}_2(t) = \dot{f}_2(t) \mathbf{u}_{r2}$$

Y la aceleración está dada por:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{L}}_{T2}(t) = & \alpha_1(t) \times \mathbf{L}_1(t) + \mathbf{w}_1(t) \times [\mathbf{w}_1(t) \times \mathbf{L}_1(t)] + \alpha_2(t) \times \mathbf{L}_2(t) + \\ & \mathbf{w}_2(t) \times [\mathbf{w}_2(t) \times \mathbf{L}_2(t)] + \alpha_1(t) \times \mathbf{L}_2(t) + \mathbf{w}_1(t) \times [\mathbf{w}_1(t) \times \mathbf{L}_2(t)] + \\ & 2 \mathbf{w}_1(t) \times [\mathbf{w}_2(t) \times \mathbf{L}_2(t)] \end{aligned} \quad (7)$$

donde:

- $\mathbf{w}_1(t) = \dot{f}_1(t) \mathbf{u}_{r1}$ es la velocidad angular en $\mathbf{L}_1(t)$.
- $\alpha_1(t) = \ddot{f}_1(t) \mathbf{u}_{r1}$ es la aceleración angular en $\mathbf{L}_1(t)$.
- $\mathbf{w}_2(t) = \dot{f}_2(t) \mathbf{u}_{r2}$ es la velocidad angular en $\mathbf{L}_2(t)$.
- $\alpha_2(t) = \ddot{f}_2(t) \mathbf{u}_{r2}$ es la aceleración angular en $\mathbf{L}_2(t)$.

Todo expresado respecto de la base global.

3.3 Cinemática de n cuerpos rígidos

En la figura 4 se muestra el algoritmo desarrollado en [2] para calcular las ecuaciones cinemáticas de n cuerpos rígidos.

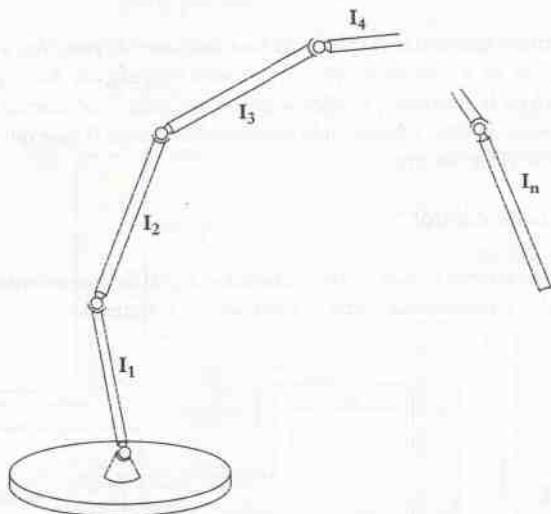


Figura 4. Sistema de n cuerpos acoplados.

Las ecuaciones de posición, velocidad y aceleración para n cuerpos acoplados son:

Posición \mathbf{L}_{Tn} del extremo final del sistema de n cuerpos rígidos:

$$\mathbf{L}_{Tn} = \sum_{m=1}^n \mathbf{L}_m \quad (8)$$

donde:

$$\mathbf{L}_m = \prod_{i=1}^m \mathbf{P}_i(t) * \mathbf{I}_m * \overline{\prod_{i=1}^m \mathbf{P}_i(t)} = \mathbf{T}_v [\rho(\prod_{i=1}^m \mathbf{P}_i(t), \mathbf{I}_m)] \quad y$$

$$\prod_{i=1}^m \mathbf{P}_i(t) = \mathbf{P}_m(t) * \mathbf{P}_{m-1}(t) * \dots * \mathbf{P}_1(t)$$

Velocidad:

$$\mathbf{V}_{T_n} = \sum_{m=1}^n \dot{\mathbf{L}}_m = \sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^m \mathbf{w}_i \times \mathbf{L}_m \quad (9)$$

donde: $\mathbf{w}_m = \dot{\theta}_m(t) \mathbf{T}_v [\rho(\prod_{i=1}^{m-1} \mathbf{P}_i(t), \mathbf{u}_m)]$ y \mathbf{u}_m es el eje de rotación del elemento \mathbf{L}_m .

Aceleración:

$$\mathbf{a}_{T_n} = \sum_{m=1}^n \ddot{\mathbf{L}}_m = \sum_{m=1}^n [\sum_{i=1}^m (\alpha_i \times \mathbf{L}_m + \mathbf{w}_i \times \mathbf{w}_i \times \mathbf{L}_m) + 2 \sum_{i=1}^m \sum_{k=i+1}^m (\mathbf{w}_k \times \mathbf{w}_i \times \mathbf{L}_m)] \quad (10)$$

donde:

$$\alpha_m = \ddot{\theta}_m(t) \mathbf{T}_v [\rho(\prod_{i=1}^{m-1} \mathbf{P}_i(t), \mathbf{u}_m)]$$

Este algoritmo sistematiza el cálculo de las ecuaciones de posición, velocidad y aceleración de n cuerpos acoplados de forma simplificada. Esta operación es muy útil en la cinemática cuando tenemos que enlazar un sistema de referencia a partir de otro, relacionando mediante rotaciones la base que forma a cada uno de estos sistemas.

4. Sistema de control

El sistema de control se basa en un controlador digital de movimiento (DMC), amplificador y servomotor como el mostrado en la figura 5.

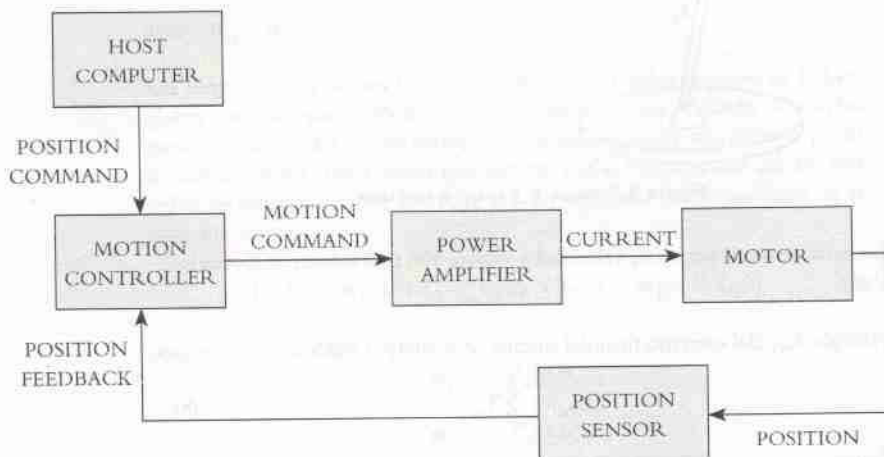


Figura 5. Servosistema.

El robot paralelo tipo Delta requiere tres servomotores para efectuar un movimiento y posicionarse en el espacio. El sistema utilizado se muestra en la figura 6.

El DMC tiene un extenso conjunto de instrucciones para programar diversos tipos de movimientos y aplicaciones. Las instrucciones se representan mediante comandos en inglés formados por dos letras ASCII. Por ejemplo, para iniciar el movimiento del eje X y Y se escribe BG XY.

La programación básica en un DMC se puede ver en el ejemplo siguiente:

#A	etiqueta
PR 4000	distancia relativa a recorrer
SP 20000	velocidad
AC 200000	aceleración
DC 200000	desaceleración
BGX	iniciar movimiento
EN	fin de programa

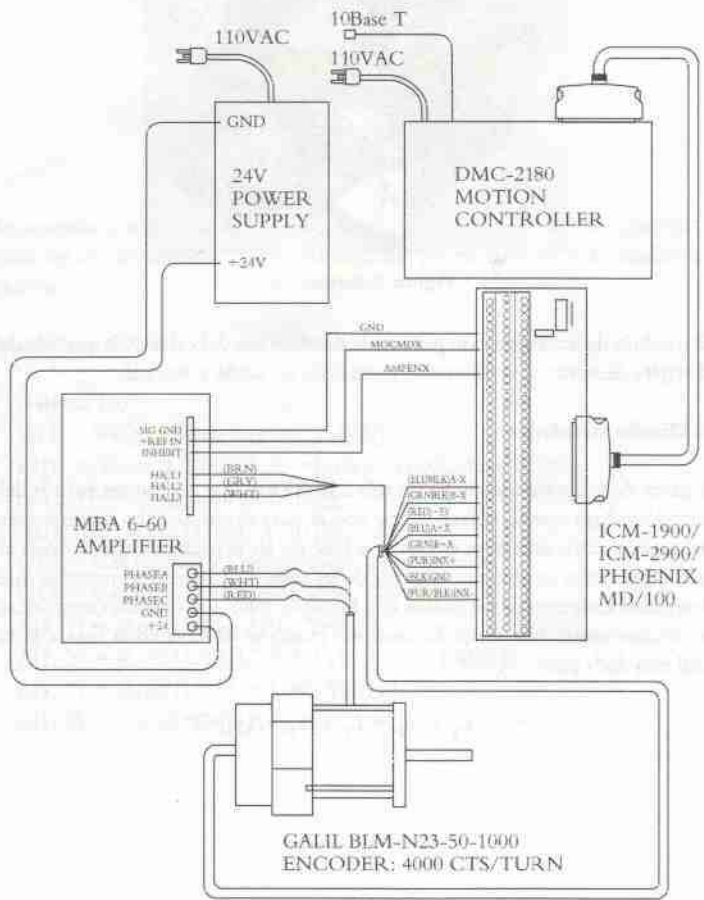


Figura 6. Sistema de control.

El DMC utiliza una microcomputadora de 32 bits y diversos recursos para manejar aplicaciones complejas. Tiene sintonización avanzada PID, memoria no volátil multitarea para ejecutar las aplicaciones, entradas y salidas analógicas y digitales para implementar sensores externos. Maneja varios modos de movimiento: posicionamiento punto a punto, control de velocidad, interpolación lineal y circular, contorno y ECAM. La velocidad de comunicación con los encoders es de hasta 22 MHz.

Los servomotores (fig. 7) utilizados tienen las siguientes características: alta relación torque-inercia, ideal para movimiento punto a punto que requiere elevada aceleración. Torque continuo de 55 oz-in. Resolución del encoder de 1000 líneas.



Figura 7. Servomotor.

El módulo de interconexión permite la distribución del cable SCST que sale de la tarjeta de control en diferentes terminales de salida y entrada.

5. Diseño mecánico

A partir de la configuración de un robot Delta hay que realizar un análisis del área de trabajo que se quiere cubrir con él para determinar las dimensiones del mismo. Este análisis se realiza con base en las ecuaciones que definen al robot, las cuales se obtienen a partir de las cadenas cinemáticas cerradas que determina cada uno de los brazos que lo conforman. Las cadenas cinemáticas se definen como una suma de vectores, como se observa en la figura 8, la cual está dada por:

$$\mathbf{v}_1 + \mathbf{L}_1 + \mathbf{v}_2 + \mathbf{L}_2 + \mathbf{v}_3 + \mathbf{v}_4 = \mathbf{P}$$

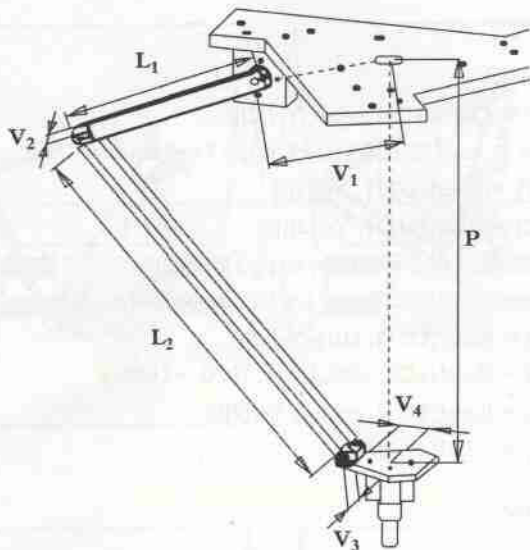


Figura 8. Cadena cinemática.

De acuerdo con la suma de vectores que se define en cada brazo, con cuaterniones en un ambiente de Mathematica® [2], se calcula de la siguiente manera:

Primer brazo:

(*Brazo 1*)

$$U11 = \text{VeQu}[(\text{teta1}) * \text{Degree}, \text{Ye}[[1]]]$$

$$L1[1] = \text{Rota}[\{U11\}, \{0, 0, -L01\}] // \text{TrigReduce} // \text{Chop};$$

$$\text{eje}[1, 1] = \text{Rota}[\{U11\}, \text{Xe}[[1]]];$$

$$\text{eje}[1, 2] = \text{Rota}[\{U11\}, \text{Ye}[[1]]];$$

$$U12 = \text{VeQu}[\text{teta2} * \text{Degree}, \text{eje}[1, 1]] // \text{Simplify};$$

$$U13 = \text{VeQu}[\text{teta3} * \text{Degree}, \text{eje}[1, 2]] // \text{Simplify};$$

$$A[1, 1] = \text{Rota}[\{U11\}, L01b \text{Ye}[[1]]];$$

$$A[1, 2] = \text{Rota}[\{U13, U12, U11\}, \{0, 0, -L02b\}];$$

$$A[1, 3] = \text{Rota}[\{U11\}, -L04b \text{Ye}[[1]]];$$

$$A[1, 4] = -L05b \text{Xe}[[1]];$$

Segundo brazo:

(*Brazo 2*)

$$U21 = \text{VecQu}[\text{alfa1} * \text{Degree}, \text{Ye}[[2]]]$$

$$L1[2] = \text{Rota}[\{U21\}, \{0, 0, -L01\}] // \text{TrigReduce} // \text{Chop};$$

$$\text{eje}[2, 1] = \text{Rota}[\{U21\}, \text{Xe}[[2]]];$$

$$\text{eje}[2, 2] = \text{Rota}[\{U21\}, \text{Ye}[[2]]];$$

$$U22 = \text{VecQu}[\text{alfa2} * \text{Degree}, \text{eje}[2, 1]] // \text{Simplify};$$

$$U23 = \text{VecQu}[\text{alfa3} * \text{Degree}, \text{eje}[2, 2]] // \text{Simplify};$$

$$A[2, 1] = \text{Rota}[\{U21\}, L01b \text{Ye}[[2]]];$$

$$A[2, 2] = \text{Rota}[\{U23, U22, U21\}, \{0, 0, -L02b\}];$$

$$A[2, 3] = \text{Rota}[\{U21\}, -L04b \text{Ye}[[2]]];$$

$$A[2, 4] = -L05b \text{Xe}[[2]];$$

Tercer brazo:

$$U31 = \text{VecQu}[(\text{gamma1}) * \text{Degree}, \text{Ye}[[3]]]$$

$$L1[3] = \text{Rota}[\{U31\}, \{0, 0, -L01\}] // \text{TrigReduce} // \text{Chop};$$

$$\text{eje}[3, 1] = \text{Rota}[\{U31\}, \text{Xe}[[3]]];$$

$$\text{eje}[3, 2] = \text{Rota}[\{U31\}, \text{Ye}[[3]]];$$

$$U32 = \text{VecQu}[\text{gamma2} * \text{Degree}, \text{eje}[3, 1]] // \text{Simplify};$$

$$U33 = \text{VecQu}[\text{gamma3} * \text{Degree}, \text{eje}[3, 2]] // \text{Simplify};$$

$$A[3, 1] = \text{Rota}[\{U31\}, L01b \text{Ye}[[3]]];$$

$$A[3, 2] = \text{Rota}[\{U33, U32, U31\}, \{0, 0, -L02b\}];$$

$$A[3, 3] = \text{Rota}[\{U31\}, -L04b \text{Ye}[[3]]];$$

$$A[3, 4] = -L05b \text{Xe}[[3]];$$

Y la suma de vectores que define a cada cadena cerrada es:

$$C1e = \text{base} + \text{Dejemot}[[1]] + L1[1] + A[1, 1] + A[1, 2] + A[1, 3] + A[1, 4];$$

$$C2e = \text{base} + \text{Dejemot}[[2]] + L1[2] + A[2, 1] - A[2, 2] + A[2, 3] + A[2, 4];$$

$$C3e = \text{base} + \text{Dejemot}[[3]] + L1[3] + A[3, 1] + A[3, 2] + A[3, 3] + A[3, 4];$$

Con esto es posible aplicar cinemática inversa para conocer la configuración total del robot de acuerdo con la posición a alcanzar. Mediante el modelo obtenido y los comandos gráficos definidos en [1] es posible lograr diversas configuraciones del robot como se muestra en la figura 9.

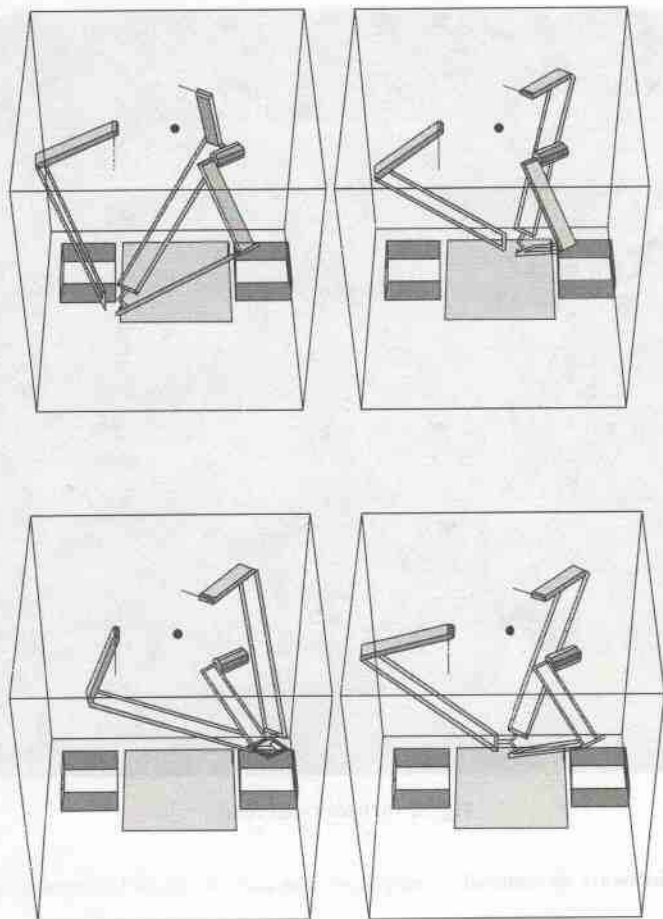


Figura 9. Simulación del robot.

Las ecuaciones nos permitieron definir las longitudes de las piezas, con las cuales se obtuvieron los planos de las piezas a maquinar para construir el robot tipo Delta.

En la figura 10 se puede observar las piezas del robot ensambladas y montadas en una estructura de aluminio.

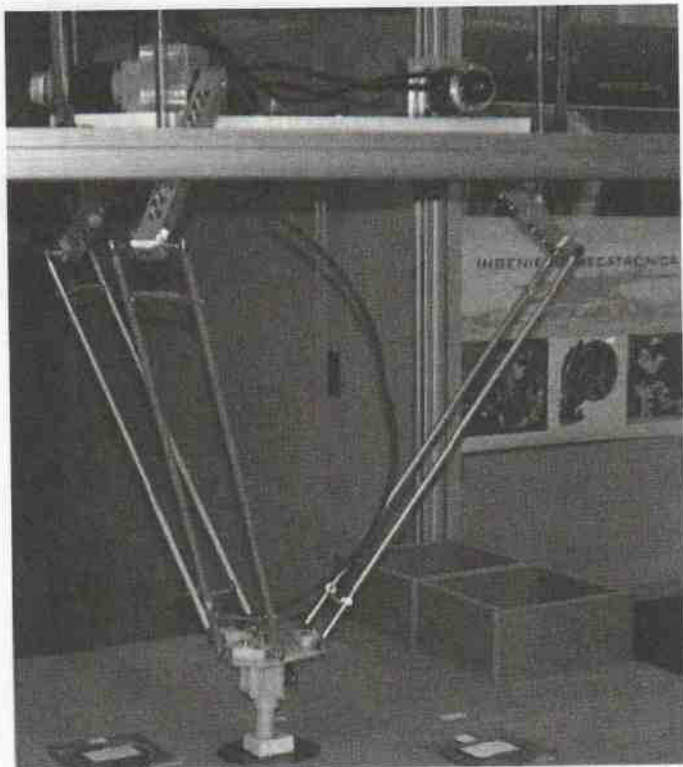


Figura 10. Robot ensamblado.

6. Software de control

La interfaz computacional para comunicarse con el robot y enviarle las instrucciones de la tarea a efectuar tiene las funciones siguientes:

- Manejo manual del robot por medio de scrolls para cada motor.
- Manejo de servomotores en forma combinada.
- Grabado de las posiciones deseadas.
- Ejecución de una secuencia de posiciones con movimiento punto a punto.
- Muestreo de las posiciones grabadas para la secuencia de movimientos.

La interfaz (fig. 11) se desarrolló en lenguaje C# de .net y se implementó la cinemática inversa para obtener los ángulos necesarios que se requieren en cada servomotor para que el robot manipule los objetos requeridos.

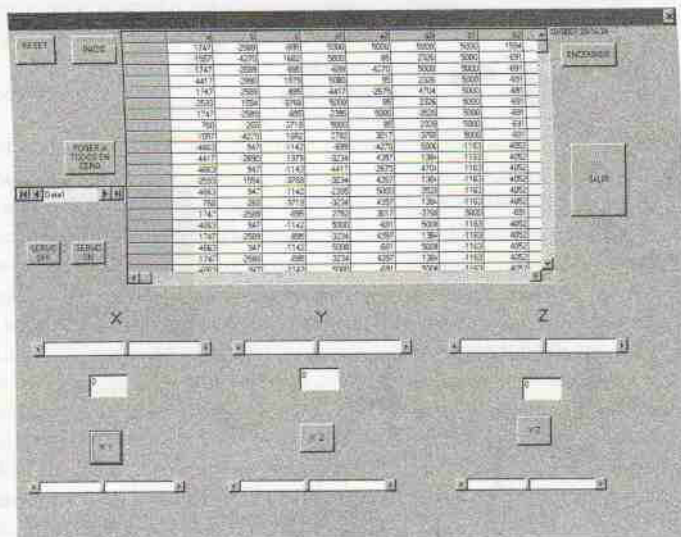


Figura 11. Interfaz computacional.

La implementación en la interfaz computacional se aplicó en forma diferente a la mencionada antes para optimizar los cálculos, al no implantar un método numérico. Para lograrlo, de cada cadena cinemática planteada se calculó la norma del eslabón L_2 , la cual es conocida, y así también se anula la información del ángulo de dicho eslabón, esto es:

$$|L_2| = |P - v_3 - v_4 - v_1 - L_1 - v_2|$$

y se despeja el ángulo de cada eslabón L_1 para obtener $\theta(\mathbf{P})$.

7. Trabajo futuro

Como parte del trabajo por realizar, se pretende dotar al robot de un sistema de visión computacional inteligente, que permita un reconocimiento de objetos a fin de poder evaluar características y formas. Con ello se pretende lograr una adaptación dinámica del robot para que pueda efectuar tareas complejas de manipulación que se requieren en actividades de manufactura ágil de tipo industrial.

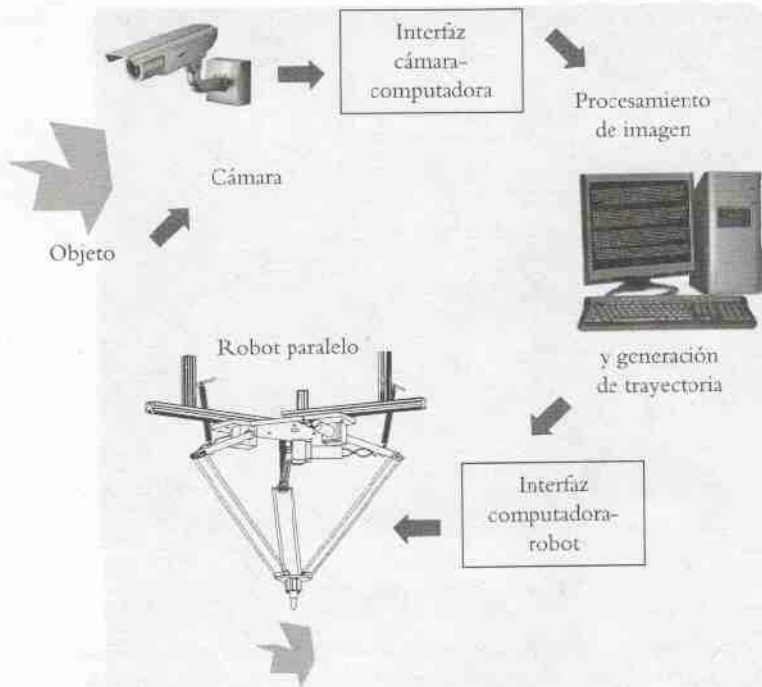


Figura 12. Esquema del sistema de visión computacional.

Mediante una cámara digital se pretende capturar la forma del objeto y conocer sus características de movimiento, principalmente trayectoria y velocidad. Se utilizarán algoritmos de predicción para generar el movimiento requerido por el robot manipulador, de manera que éste tome el objeto en movimiento y lo lleve a una posición específica. Al momento de escribir este artículo se trabaja en la detección de imagen y la interfaz cámara-computadora.

8. Conclusiones

Se ha logrado construir y controlar un robot paralelo tipo Delta de tres grados de libertad con los recursos tecnológicos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Anáhuac-México Sur. El video de este robot se puede ver en www.mendez.mecatronica.cc

En el diseño mecánico se aplicó el concepto de vectores dinámicos definidos con el álgebra de cuaterniones para que, con base en la cinemática inversa, se calcularan las longitudes de los eslabones. La interfaz computacional satisfizo los requerimientos de comunicación con el DMC para el control de los servomotores por medio de una PC. El desempeño general del robot "Hércules" cumplió con las expectativas planteadas al inicio del proyecto. Los objetivos de mediano plazo son incorporarle un sistema de visión para

que pueda manipular los objetos de manera automática e implementar otros tipos de control de movimiento.

Los autores

Mauricio Méndez Canseco obtuvo el título en Ingeniería Industrial Mecánica en el Instituto Tecnológico de Oaxaca; la maestría en Ingeniería Mecánica en la UNAM y el doctorado en Ingeniería en la Universidad Anáhuac-México Sur. Especialista en modelación y simulación computacional utilizando cuaterniones, cuenta con los diplomados de "Combustión interna" y "Automatización". Recibió mención honorífica por su tesis de maestría y la medalla Gabino Barreda otorgada por la UNAM a los mejores alumnos de posgrado. Concibió y dirigió el diseño, construcción y programación del robot paralelo durante 2007 y la mitad de 2008; en la segunda parte el proyecto se asigna a posgrado para utilizarse en investigación doctoral. Ha realizado diversas publicaciones en congresos nacionales e internacionales arbitrados. Coordina la carrera de Mecatrónica. Su correo es: mauricio.mendez@anahuac.mx y algunos de los proyectos dirigidos por él se pueden ver en mendez.mecatronica.cc

Xavier Atonatiuh Meneses Jiménez, egresado de la carrera de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Anáhuac-México Sur, participó activamente en la construcción y puesta en marcha del robot durante 2007 y la mitad de 2008. Su presencia en el proyecto fue fundamental, ya que en esta primera etapa participaron alumnos de nivel licenciatura.

Carlos Alberto Cado Robledo es egresado de la carrera de Ingeniería Mecánica y maestro en el área de Administración por la Universidad del Valle de México. Cuenta con un diplomado sobre Programadores Lógicos Controlables. Actualmente estudia el doctorado en Ingeniería en la Universidad Anáhuac-México Sur. Su correo es: carlosrobledo55@hotmail.com

José Emilio Vargas Soto es director de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Anáhuac-México Sur. Ingeniero mecánico electricista con mención honorífica por la UNAM, maestro en Ingeniería por la Universidad Politécnica de Madrid, doctor en Informática y Automática por la Universidad Complutense de Madrid, con posdoctorado por la Universidad de Telecomunicaciones de Tokio. Especialista en "Diseño mecánico de robots industriales" por The Mechanical Engineering Lab, de Tsukuba Science City, y en "Computadores en la industria" por el Instituto de Automática Industrial de España, cuenta con 20 años de experiencia profesional. Ha participado en proyectos de instrumentación y robótica en México, Europa y Japón. Ha realizado más de 100 publicaciones en revistas y congresos. Investigador nacional del Conacyt, director general fundador del Centro de Articulación Productiva en Mecatrónica, presidente fundador de la Asociación Mexicana de Mecatrónica, miembro fundador de la Asociación Mexicana de Robótica y miembro del IEEE Robotics and Automation. Cuenta con cinco patentes

nacionales. Premio a la Excelencia en Investigación Anáhuac 2008. Ganador del Best Paper Award en The Teaching and Learning Conference por The Clute Institute en Salzburg, Austria, 2008. Su correo es: emilio.vargas@anahuac.mx

Referencias

- [1] Méndez, M., "Dinámica de cuerpos rígidos con Cuaterniones: una aplicación a los mecanismos", tesis de doctorado en Ingeniería, Universidad Anáhuac del Sur, 2000.
- [2] Méndez, M., "Simplificación del modelado cinemático de n cuerpos rígidos con Cuaterniones", Tercer Congreso Mexicano de Robótica, 2001.
- [3] Méndez, M., "Dinámica de un sistema 2 GL con Cuaterniones", Congreso Nacional de Control Automático, 2003.
- [4] Meneses, Atonatiuh, Mauricio Méndez y Eduardo Cortés, "Diseño y control de un robot paralelo", 6º Congreso Nacional de Mecatrónica, 2007.
- [5] Vargas, E., G. Reynoso, L. Villarreal y R. Mier, "Diseño de un robot industrial para aplicaciones de limpieza en subestaciones eléctricas", *Memorias del 3er. Congreso Mexicano de Robótica*, Asociación Mexicana de Robótica, Querétaro, septiembre de 2001.
- [6] Gorrostieta, E. y E. Vargas, "Free Locomotion for Six Legged Robot", *III WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation*, ISFRA 2004, ISBN 960-8052-95-5, Salzburgo, Austria, 13-15 de febrero de 2004.
- [7] Vargas, E. y W. Rodríguez, "Mechatronics Design of an Automatic Machine To Manipulate Sheet of Cardboard", *Proceedings of The International Congress on Mechatronics and Robotics MECH@ROB 2004*, IEEE Industrial Electronics Society, European Center for Mechatronics, ISBN 3-938153-30-X, Aachen. Alemania, 13-15 de septiembre de 2004.
- [8] G Motion Control, "DMC-2x00 Manual", 2005.