

DIVULGACION

**Modelo Matemático, Simulación y Control del Robot Terapéutico
REHAROB de la Empresa ABB**Juan Carlos Ordoñez¹¹ Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

Recibido: 30 de Mayo de 2010; Revisado: 25 de Junio de 2010; Aceptado: 8 de Julio de 2010

Resumen— El presente artículo muestra un robot serie de seis grados de libertad cuyo propósito original es para aplicaciones industriales, pero aprovechando las características de este mecanismo, fue convertido en un robot terapéutico. Al que se le realiza un modelado matemático mediante el software SYMORO+ a partir de los parámetros geométricos del mecanismo. Con este modelo matemático se realiza una simulación del error articular en MATLAB – Simulink y una simulación del trazado de una trayectoria en la herramienta Virtual Reality de MATLAB.

Palabras clave: *Parametros geométricos, control PID, control CTC, error articular y simulación en 3D)*

Abstract: This article shows a robot series of six degrees of freedom whose original purpose is for industrial applications, but using the features of this mechanism was converted into a therapeutic robot. When that is done by mathematical modeling software SYMORO+ from the geometrical parameters of the mechanism. With this mathematical model a simulation of the joint error in MATLAB - Simulink simulation and tracing a path in Virtual Reality tool for MATLAB.

Keywords: *geometric parameters, PID control, CTC control, join error and 3D simulation.*

I. INTRODUCCIÓN

El proyecto REHAROB fue el primero en el mundo que buscaba utilizar robots industriales estándar, fabricados en serie, para la fisioterapia de pacientes apopléticos con hemiparesia espástica [1]. Este proyecto, fue impulsado por la empresa ABB cuyo propósito era sacar el mejor provecho de los robots industriales y sacar ventaja de su precisión, potencia y obediencia [2], además de poder ejecutar muchas de las tareas repetitivas que

normalmente un humano no tendría la capacidad de ejecutarlas con la misma eficacia y precisión.

El REHAROB es un mecanismo robótico de seis grados de libertad con cinco articulaciones rotoides y una prismática en la cual va sujetado el soporte en donde se coloca el brazo del paciente. Con esta configuración, el robot tiene una gran movilidad y es capaz de realizar cualquier cantidad de trayectorias que contribuirían enormemente en la recuperación del paciente.

Se aborda el REHAROB como caso de estudio. Pero en general, este procedimiento podría ser aplicable a cualquier robot industrial que cumpla ciertas características como: amplia movilidad, tamaño apropiado y sistema de control reprogramable. Además existen varios diseños de robots con fines industriales o semiindustriales que se podrían adaptar a sistemas terapéuticos, entre ellos podríamos mencionar [3] [4] [5] [6].

Con este planteamiento y con el fin de poder aplicar este procedimiento a otros mecanismos con las mismas características, es que se realiza el modelo matemático, control y simulación de una trayectoria reprogramada para el robot REHAROB de la empresa ABB.

II. TEORÍA

A Estructura mecánica de un robot.

Mecánicamente, un robot está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento entre cada dos eslabones consecutivos. La constitución física de la mayor parte de los robots industriales guarda cierta similitud con la

anatomía del brazo humano. Por lo que en ocasiones, para hacer referencia a los distintos elementos, que componen el robot, se usan términos como cuerpo, brazo, codo y muñeca [7] [8].

El movimiento de cada articulación, puede ser de desplazamiento o de giro u una combinación de ambos. En la práctica solo se emplean la de rotación y la prismática. De este modo son posibles los seis tipos de diferentes articulaciones, aunque en la práctica solo se emplean la de rotación y la prismática [8]. Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior, se denomina *grado de libertad (GDL)*. El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de las articulaciones que lo componen [7] [8].

B. Control de robots.

El control de robots consiste en estudiar el modo de lograr, que un manipulador realice de manera automática una determinada tarea deseada, para lo cual se diseñan controladores que típicamente corresponden a ecuaciones o algoritmos, los cuales forman parte del sistema de control de un robot, constituido a su vez físicamente, por un elemento de computo, una unidad de adquisición de datos, actuadores (típicamente motores eléctricos), el manipulador propiamente dicho y cierta electrónica externa [9].

De acuerdo a la literatura relacionada con esta temática, el controlador más simple para los robots industriales es el Proporcional, Integral, Derivativo (PID). Si bien este tipo de controladores son ampliamente usados en manipuladores industriales, su desempeño no es el mejor, pues depende de las tareas específicas que requieran llevarse a cabo con el brazo robótico y es afectado además por la dinámica altamente no-lineal y el fuerte acoplamiento entre las articulaciones del robot controlado. Para mejorar lo anterior, se ha optado en los últimos años por diseñar controladores basados en el modelo del sistema, lo cual requiere del conocimiento del modelo dinámico, incluyendo el valor de los parámetros físicos involucrados [9].

El problema de controlar un manipulador, consiste en determinar las señales aplicadas a los actuadores de cada articulación (cálculo de pares), de modo que se garantice la ejecución de las consignas asignadas, mientras se satisfacen requerimientos de respuesta transitoria, optimización y estabilidad. Dichas consignas pueden

definirse tanto en el espacio cartesiano, y consisten en las trayectorias o caminos generados, que el manipulador debe seguir para cumplir una tarea específica [7] [9].

C. Modelado geométrico y dinámico

El conocimiento de los modelos matemáticos de un sistema robótico, es un aspecto muy importante respecto a las determinaciones que se deben tomar para asegurar su adecuado funcionamiento, pues dichos modelos están estructurados con información individual de cada cuerpo del robot e información correspondiente al modo en que cada uno de ellos interactúa (efectos de la reacción de una determinada articulación ante el movimiento de las demás). La organización de estos datos, buscando desarrollar modelos que logren aproximarse al comportamiento real del robot, representa un hecho primordial, pues de este modo se podría analizar y evaluar los movimientos y las fuerzas necesarias que el robot requiere para alcanzar un desempeño específico, evitando caer en excesos de voltaje, par, vibraciones y choques (debido a límites dados por la configuración del robot y por el espacio de trabajo) propios de una experimentación en lazo abierto sin fundamento o de una ley de control inadecuada [9].

III. MÉTODO PROPUESTO

El procedimiento que se siguió en el modelado matemático, simulación, control del trazado de una trayectoria fue en primera instancia, generar la tabla de parámetros geométricos con el fin de: a partir de esta, encontrar el modelo geométrico directo (MGD), modelo dinámico directo (MDD) y modelo dinámico inverso (MDI) mediante el software SYMORO+ [10].

Para la realización de la tabla de parámetros geométricos, es necesario tener primero el esquema de la geometría del robot. A partir de allí se crea la tabla se creo mediante los métodos Khalil y Dombre [7].

La tabla de parámetros geométricos es introducida en SYMORO+, para que este genere el geométrico directo (MGD), modelo dinámico directo (MDD) y modelo dinámico inverso (MDI).

Este software da la alternativa de generar las ecuaciones de los modelos anteriormente mencionados con estructuras y nomenclaturas diferentes según el software de aplicación en las que se van a introducir dichos

modelos. Entre otras opciones esta MATLAB. Entonces se generan los modelos para que puedan ser ejecutados mediante dicho software.

Ya disponiendo de estos modelos y en especial los MDD y MDI y disponiendo de un código también en MATLAB que genere una trayectoria articular es preciso proceder a simular el sistema y sintonizar el controlador para obtener una respuesta con un mínimo error articular.

Los modelos de bloques en MATLAB - Simulink resultan similares al de la figura 1, para un control CTC y figura 2, para un control PID.

Una vez sintonizado el controlador y después de obtener una respuesta aceptable. El siguiente paso a seguir es la simulación en la herramienta de MATLAB: *Virtual Reality*. Para ello es necesario primero realizar el esquema en 3D sobre dicho toolbox, luego agregar los bloques restantes al diagrama en Simulink (como lo muestra la figura 3) para que la simulación en 3D se pueda realizar y finalmente modificar la trayectoria hasta que esta sea la deseada y pueda ser así percibida en *Virtual Reality*. Y con esto se da por terminado el trabajo de simulación y control del robot.

IV. RESULTADOS

A. Tabla de parámetros geométricos

La tabla de parámetros geométricos indicada en la tabla 1. Fue encontrada de acuerdo con esquema de la geometría del robot mostrada en la figura 4, y mediante los métodos de Denavit-Hartenberg (1955) / Khalil-Kleinfinger (1986), cuyos símbolos se indica a continuación.

- σ_j : Igual a cero si la articulación es rotoide e igual a 1 si la articulación es prismática.
- α_j : Angulo entre los ejes z_j y z_{j-1} correspondientes a una rotación alrededor de x_{j-1} .
- d_j : Distancia entre z_j y z_{j-1} a lo largo de x_{j-1} .
- θ_j : Angulo entre los ejes x_j y x_{j-1} correspondientes a una rotación alrededor de z_j .
- r_j : Distancia entre x_j y x_{j-1} a lo largo de z_j .

Inscripción en universidades locales, 2005

TABLA I
TABLA DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

j	σ_j	α_j	d_j	θ_j	r_j
1	0	0	0	θ_1	0
2	0	90°	0	θ_2	0
3	0	0	D_3	θ_3	0
4	0	0	D_4	θ_4	0
5	0	0	D_5	θ_5	0
6	1	0	0	0	R_6

B. Parámetros de base del robot.

El juego mínimo de parámetros inerciales, compuestos por un conjunto de tensores de inercia y el primer momento de inercia del robot, es llamado parámetros de base. Y son los que permiten simplificar el cálculo del modelo dinámico.

Estas tablas junto con las ecuaciones de los modelos dinámicos directo e inverso, fueron encontradas con la ayuda de SYMORO+.

TABLA II
TENSORES DE INERCIA DEL ROBOT REHAROB

j	XX	XY	XZ	YY	YZ	ZZ
1	0	0	0	0	0	ZZ_1R
2	XX_2R	XY_2	XZ_2R	0	YZ_2	ZZ_2R
3	XX_3R	XY_3	XZ_3R	0	YZ_3	ZZ_3R
4	XX_4R	XY_4	XZ_4R	0	YZ_4	ZZ_4R
5	XX_5R	XY_5R	XZ_5R	0	YZ_5R	ZZ_5R
6	0	0	0	0	0	0

TABLA III
PRIMER MOMENTO DE INERCIA ROBOT REHAROB

j	MX	MY	MZ	M
1	0	0	0	0
2	MX_2R	MY_2	0	0
3	MX_3R	MY_3	0	0
4	MX_4R	MY_4	0	0
5	MX_5	MY_5	0	0
6	MX_6	MY_6	MZ_6	M_6

C. Error articular obtenido.

Como parte del trabajo realizado, se hizo la simulación del robot con un controlador PID (figura 5) y un CTC

(figura 6). Estas graficas muestran el error de cada una de las seis trayectorias articulares trazadas por el sistema.

D. Simulación del sistema en 3D.

Finalmente, se hizo una simulación del robot en 3D mediante el toolbox de MATLAB *Virtual Reality*, con el objetivo de mirar la trayectoria en el espacio que este estaba trazando.

En la figura 7, se muestran cuatro esquemas del robot en movimiento trazando una trayectoria programada.

Los resultados obtenidos en general, fueron satisfactorios.

En cuanto a la simulación del robot con cada uno de los controladores anteriormente mencionados se obtuvo una mejor respuesta con el PID en cuanto al error, pues este fue de alrededor de 4.3×10^{-4} m. mientras que con el CTC se obtuvo un error de 2.8×10^{-4} m. casi 10 veces mas que con el PID. Aunque con este último las oscilaciones son mucho menores que con el PID, esto podría resultar determinante a la hora de la realización de la terapia con el paciente.

En cuanto a la simulación en 3D con Virtual Reality, los resultados no fueron los mejores debido a la dificultad en el diseño de la trayectoria. Pero como ejercicio académico y con el ánimo de hacer pruebas y corroborar el funcionamiento del robot simulado el experimento se podría calificar como aceptable.

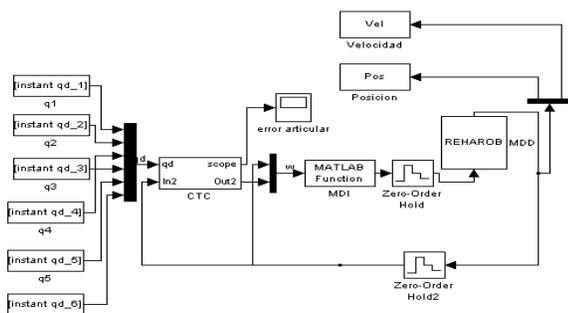


Fig. 1. Modelo de bloques en Simulink para un control CTC.

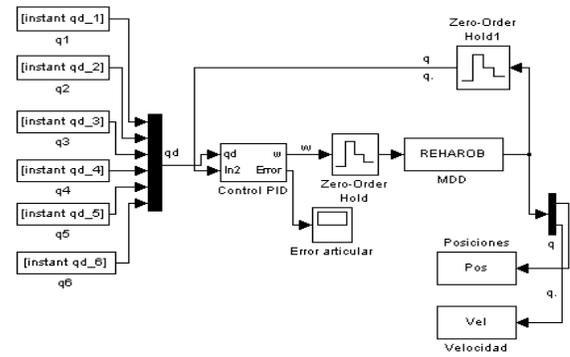


Fig. 2. Modelo de bloques en Simulink para un control PID.

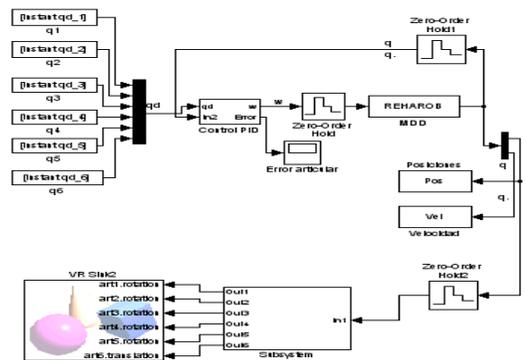


Fig. 3. Diagrama de bloques en Simulink para la simulación del robot en 3D.

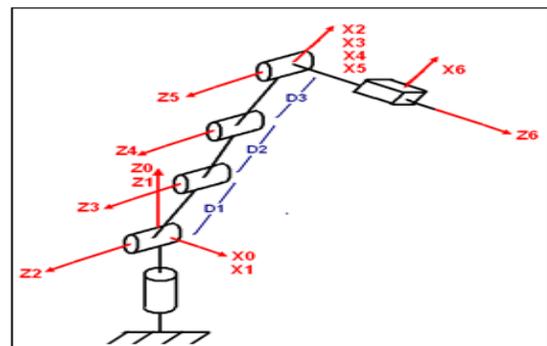


Fig. 4. Geometría del robot REHAROB.

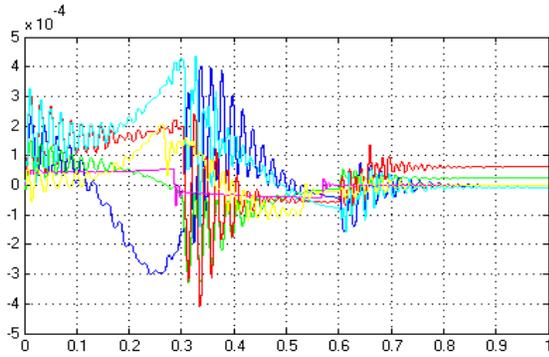


Fig. 5. Error articular de la trayectoria del robot utilizando un controlador PID.

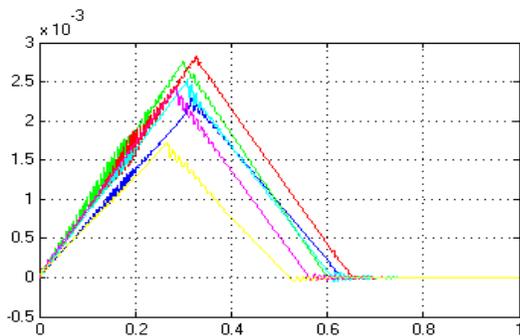


Fig. 6. Error articular de la trayectoria del robot utilizando un controlador CTC.

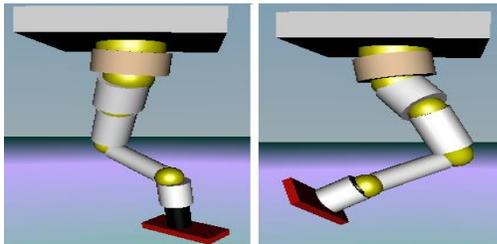


Fig. 7. Esquema del robot en Virtual Reality trazando una trayectoria.

V. CONCLUSIONES

El modelado matemático de mecanismos robóticos es una parte fundamental en el proceso de construcción o reconstrucción de estos.

Si se dispone de un robot industrial con ciertas características previamente concebidas, es posible hacerle algunas modificaciones menores y ponerlo en marcha como un robot terapéutico.

Existe una diversidad de controladores que podrían ser implementados en los robots, cada uno de estos presenta unas ventajas y desventajas a la hora de ponerlos en funcionamiento, es tarea del diseñador seleccionar el más adecuado para su aplicación.

Para un futuro, queda diseñar una trayectoria real de terapia, además se podría generar el modelo geométrico inverso del REHAROB y de esta manera diseñar trayectorias cartesianas que quizá podrían ser muy útiles en el oficio de los fisioterapeutas.

IV -REFERENCIAS

- [1]. Robots para los pacientes. [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot271.nsf/VerityDisplay/A1FF4FBCA2B87BF2C12571DC003B24CF/\\$File/2124%203M644_SPA72dpi.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot271.nsf/VerityDisplay/A1FF4FBCA2B87BF2C12571DC003B24CF/$File/2124%203M644_SPA72dpi.pdf) [consultado en enero de 2009]
- [2]. http://www.lch.es/lchol/acciones/detalleArticulo/Robots_Para_Los_Pacientes1/1003821 [consultado en enero de 2009]
- [3]. Madrid, E., Tafur, J., Robles, S. y Curay J. Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: Modelado cinemático y dinámico. Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica. Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007.
- [4]. Madrid, E., Tafur, J., Robles, S. y Curay J. Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: Control y potencia. Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica. Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007.
- [5]. Madrid, E., Tafur, J., Robles, S. y Curay J. Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: Diseño y selección. Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica. Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007.
- [6]. Robotek Ltda. Mecatrónica y sistemas inteligentes. <http://www.robotekltda.com> [Consultado: Enero de 2009.]
- [7]. Khalil W., Dombre E. Modeling, Identification and control of robots, Hermes Penton Cience, 2002.
- [8]. Barrientos A., Peñin L., Balaguer C., Aracil R. Fundamentos de robótica. Universidad Politécnica de Madrid, Edit. Mc Hill, Madrid, 1997.
- [9]. Costáin A., Torres K. Modelado, Identificación paramétrica y control de un robot de cinco grados de libertad. Universidad del Cauca, Popayán Cauca, 2008. Khalil, W. & Creusot, D. (1997). SYMORO+: a system for the symbolic modelling of robots. *Robotica* 15, 153-161