Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 47 pp. 91-102. Marzo, 2009

Estudio del uso de robots industriales como asistentes en operaciones de laparoscopia

Study of industrial robots as assistants in laparoscopic surgeries

*Bernardo Efraín Garcés, Oscar Gabriel Mora, Oscar Andrés Vivas**

Grupo de Automática Industrial, Calle 5 N.º 4 – 70, FIET, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

(Recibido el 7 de abril de 2008. Aceptado el 6 de noviembre de 2008)

Resumen

Este artículo presenta un estudio sobre el uso de los robots industriales como asistentes en operaciones de laparoscopia. Se presenta un resumen sobre la laparoscopia como método quirúrgico así como de esta intervención asistida por robots. Se aborda de manera particular el problema del paso por el orificio abdominal (trocar) por donde se introducen los instrumentos quirúrgicos. Este problema es resuelto a través de un algoritmo de optimización que entrega las trayectorias que deben seguir las articulaciones del codo y la muñeca de un robot antropomórfico. Se estudian dos robots industriales (Puma de Unimation y PA10 de Mitsubishi) y se evalúan en simulación sus respectivos desempeños como posibles asistentes en operaciones de este tipo.

----- *Palabras clave*: robótica médica, robots quirúrgicos, operaciones de laparoscopia.

Abstract

This article presents a study about the use of industrial robots as assistants in laparoscopic surgeries. An analysis of laparoscopic surgical method and this procedure assisted by robots is presented. The problem of passing through the hole abdominal where surgical instruments are inserted is enligthed. This problem is solved through an optimization algorithm that yields the trajectories to be followed by elbow and wrist joint of an anthropomorphic robot. Two industrial robots (Puma of Unimation and PA10 of Mitsubishi) are studied and their respective simulated performances as potential assistants in such surgeries are discussed.

----- *Keywords:* medical robots, surgical robots, laparoscopic surgeries.

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 2 + 820 98 00 ext. 2122, correo electrónico: avivas@unicauca.edu.co (O. Vivas)

Introducción

Aunque desde principios del siglo XX se empezaron a realizar experimentos con animales utilizando técnicas de cirugía mini-invasiva, no fue sino hasta los años 90 que estos procedimientos hicieron su entrada formal a los quirófanos del mundo. Desde que Mouret realizó su primera colesistectomía laparoscópica (extracción de la vesícula) en 1987 [1], y los reportes comparativos sobre varias de estas cirugías escritos por Spaw, Reddick y Olsen en 1991 [2], el interés en esta área no ha cesado de crecer y se ha extendido a una gran cantidad de procedimientos quirúrgicos (apendicetomía, ligadura de trompas, histerectomía, bypass gástrico, etc. [3, 4]). La laparoscopia básicamente consiste en introducir en la cavidad pélvica-abdominal una mini cámara y una fuente de luz fría con el fin de observar en un monitor los órganos internos. Puede ser utilizada como técnica diagnóstica, en cuyo caso solo se introduce la cámara, o como técnica quirúrgica, donde por medio de dos incisiones adicionales se introducen los instrumentos quirúrgicos necesarios para realizar diversas operaciones. En ambos casos se inyecta un gas inerte en el abdomen con el fin de insuflarlo y crear un espacio adecuado para efectuar la intervención [5]. La introducción tanto de la cámara como de los instrumentos se hace a través de un dispositivo llamado trocar. Este procedimiento se traduce en menores traumas para el paciente y consecuentemente en una recuperación más rápida, así como en menores costos para el sistema de seguridad social.

Sin embargo la laparoscopia trajo nuevos retos y dificultades para el cirujano dada la pobre realimentación en las sensaciones al tocar los órganos internos, la pérdida de la visión en tres dimensiones, la pérdida de la articulación de la muñeca y la pobre ergonomía de los instrumentos utilizados [6]. Se puede resumir diciendo que el paciente ha ganado mucho a expensas del mayor trabajo del cirujano. Surgió entonces la idea de utilizar robots de asistencia para eliminar estos nuevos impedimentos, añadiéndole además la mejora del trabajo a escala a realizar y el filtrado del temblor del operador humano. Inclusive algunos autores han sugerido que en la historia de la evolución quirúrgica, la laparoscopia no es más que una transición tecnológica que llevaría desde los procedimientos manuales hacia la cirugía completamente robotizada [7, 8]. Entre los robots quirúrgicos de mayor éxito científico y comercial se encuentran el robot Zeus [9] y el robot Da Vinci [10]. En estos dos robot el cirujano está cómodamente sentado frente a una consola, observando en una pantalla una imagen tridimensional del paciente, y manejando dos instrumentos maestros hápticos (que proveen sensación de retorno), los cuales mueven sendos instrumentos quirúrgicos esclavos ubicados al interior del paciente. Pero este tipo de robots son extremadamente costosos, al punto que de las más de 400 unidades del Da Vinci instaladas en el mundo, solamente se encuentran dos en Latinoamérica [11]. Su precio de casi 1.5 millones de dólares explica esta situación [12]. Otro camino que han seguido diversos grupos de investigación en el mundo ha sido la adaptación de robots de uso industrial a diferentes tareas en el quirófano [13, 14]. Dichos robots son mucho más baratos y su funcionamiento ampliamente conocido. El presente artículo es fruto del trabajo que está llevando a cabo el Grupo de Investigación en Automática Industrial de la Universidad del Cauca con el fin de dar a conocer este tipo de tecnologías en el país y adaptarlas a las condiciones y necesidades particulares que nuestro medio impone.

Este trabajo evalúa entonces el desempeño de dos robots industriales, el Puma ideado por la empresa Unimation y fabricado por varias compañías mundiales, y el PA10 de Mitsubishi Industries. Este desempeño se analiza desde el punto de vista cinemático, tratándose particularmente el problema del paso por el trocar, de manera que el robot al moverse y seguir las consignas quirúrgicas necesarias mantenga constante la posición de un punto de su antebrazo, precisamente aquél del paso por el orificio abdominal. El estudio se lleva a cabo en simulación para en una etapa posterior construir un robot con las características del robot industrial más adecuado, con el fin de realizar pruebas reales en un ambiente en tres dimensiones.

Descripción del paso por el trocar

Un aspecto importante al realizar el modelado de un robot para cualquier tipo de cirugía laparoscópica es el paso del brazo robótico por el trocar. El trocar es un instrumento cilíndrico que sirve para guiar al instrumento quirúrgico al interior del abdomen con el fin de limitar el movimiento de la herramienta y proteger al paciente (figura 1). El diámetro del trocar oscila entre 5 y 31 mm y su altura también varía dependiendo del procedimiento que se realice.

Para efectos de simulación se considerará como prioridad la entrada por el borde superior del trocar, representado por un círculo en un plano bidimensional, el cual restringe los movimientos del instrumento. Este paso por el trocar representa la mayor dificultad al momento de modelar el robot ya que representa un punto fijo en el sistema robot mientras todas sus articulaciones pueden estar en movimiento realizando una tarea determinada. En la figura 1 se observa con mayor claridad este problema. Las líneas continuas y punteadas representan el cambio de posición del robot al ejecutar una trayectoria determinada. Como se ve, el problema de la restricción se reduce al círculo que se encuentra en un plano bidimensional teniendo en cuenta que gracias a la flexibilidad del tejido adiposo que recubre el abdomen, el cuerpo del trocar puede moverse un poco con el robot cuando esto sea necesario.

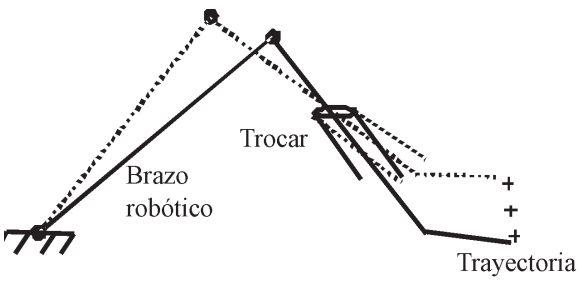

Figura 1 Paso por el trocar

Expresión matemática de la restricción

Para facilitar el análisis matemático se representa al trocar como un punto, como lo ilustra la figura 2. Este paso obligado (P_{tr}), se encuentra entre los movimientos del codo (P_c) y la muñeca (P_m).

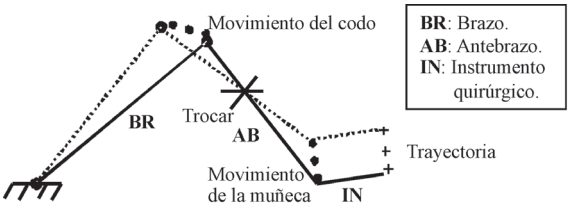

Figura 2 Expresión del trocar como un punto en el antebrazo del robot

La condición que garantiza la alineación de los tres puntos es que el producto vectorial $\overrightarrow{P_m P_{tr}} \wedge \overrightarrow{P_m P_c}$, sea igual a cero [15]. Es decir, sean (x_c, y_c, z_c) las coordenadas del codo P_c, (x_m, y_m, z_m) las de la muñeca P_m, (x_{tr}, y_{tr}, z_{tr}) las del trocar P_{tr}, y (x_d, y_d, z_d) las de la consigna deseada P_d, se obtiene por la ecuación :

$$\begin{aligned}(y_{tr}-y_m)(z_c-z_m)-(z_{tr}-z_m)(y_c-y_m)&=0\\(z_{tr}-z_m)(x_c-x_m)-(x_{tr}-x_m)(z_c-z_m)&=0\\(x_{tr}-x_m)(y_c-y_m)-(y_{tr}-y_m)(x_c-x_m)&=0\end{aligned} \quad (1)$$

Aparte de la ecuación anterior la cual garantiza la alineación del codo, la muñeca y el trocar, deben definirse como condiciones del problema otras distancias del sistema, las cuales representan las longitudes de los eslabones que conforman el robot. Las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) muestran estas distancias.

- El brazo *BR* (distancia del origen al codo (x_c, y_c, z_c)):

$$\sqrt{(x_c)^2+(y_c)^2+(z_c)^2}=BR \quad (2)$$

- El antebrazo *AB* (distancia del codo (x_c, y_c, z_c)): a la muñeca (x_m, y_m, z_m)):

$$\sqrt{(x_m-x_c)^2+(y_m-y_c)^2+(z_m-z_c)^2}=AB \quad (3)$$

- La distancia *AB* del codo (x_c, y_c, z_c) al trocar (x_{tr}, y_{tr}, z_{tr}), más la del trocar a la muñeca (x_m, y_m, z_m)):

$$\sqrt{(x_c - x_{tr})^2 + (y_c - y_{tr})^2 + (z_c - z_{tr})^2} + \sqrt{(x_{tr} - x_m)^2 + (y_{tr} - y_m)^2 + (z_{tr} - z_m)^2} = AB \quad (4)$$

- El instrumento quirúrgico *IN*, que va desde la muñeca (x_m, y_m, z_m) hasta el órgano terminal (x_d, y_d, z_d):

$$\sqrt{(x_d - x_m)^2 + (y_d - y_m)^2 + (z_d - z_m)^2} = IN \quad (5)$$

De esta forma se tiene un sistema de 7 ecuaciones, con seis incógnitas (las coordenadas del codo y de la muñeca, las cuales aseguren el paso por el trocar), el cual se muestra en la ecuación .

$$\begin{aligned}
&(y_{tr} - y_m)(z_c - z_m) - (z_{tr} - z_m)(y_c - y_m) = 0 \\
&(z_{tr} - z_m)(x_c - x_m) - (x_{tr} - x_m)(z_c - z_m) = 0 \\
&(x_{tr} - x_m)(y_c - y_m) - (y_{tr} - y_m)(x_c - x_m) = 0 \\
&\sqrt{(x_c)^2 + (y_c)^2 + (z_c)^2} = BR \\
&\sqrt{(x_m - x_c)^2 + (y_m - y_c)^2 + (z_m - z_c)^2} = AB \\
&\sqrt{(x_c - x_{tr})^2 + (y_c - y_{tr})^2 + (z_c - z_{tr})^2} + \sqrt{(x_{tr} - x_m)^2 + (y_{tr} - y_m)^2 + (z_{tr} - z_m)^2} = AB \\
&\sqrt{(x_d - x_m)^2 + (y_d - y_m)^2 + (z_d - z_m)^2} = IN
\end{aligned} \quad (6)$$

Para resolver este sistema se utiliza el algoritmo iterativo de optimización de Levenberg-Mardquart [15, 16]. El algoritmo construido tiene como entradas las posiciones conocidas (trayectoria quirúrgica deseada, coordenadas del trocar), y entrega las posiciones del codo y de la muñeca que cumplen las condiciones anteriores. Se supone que la trayectoria quirúrgica deseada es un círculo de 8 cms de diámetro, espacio adecuado para una intervención estándar en laparoscopia. Con los datos arrojados por el algoritmo de optimización se obtiene el comportamiento deseado del robot al paso por el trocar como se muestra en la figura 3. Nótese que el antebrazo respeta cabalmente el paso por el orificio abdominal con el fin de realizar la trayectoria deseada.

Una vez establecidas las trayectorias que debe seguir un robot antropomórfico asistente en operaciones de laparoscopia, se estudiará a continuación la capacidad de dos tipos de robots industriales para seguir dichas trayectorias.

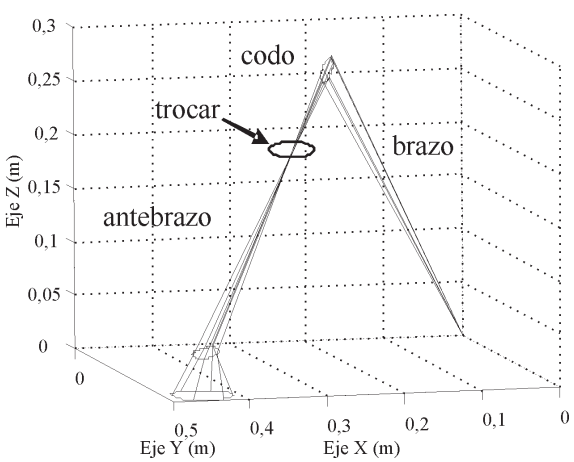

Figura 3 Trayectorias de codo y muñeca para respetar el paso por el trocar

Robot Puma

El robot Puma (*Programmable Universal Machine for Assembly*) es un robot industrial que creó la compañía Unimation en 1978 para tareas de montaje, convirtiéndose desde entonces en uno de los robots más populares dentro de la industria (figura 4) [17]. El robot antropomórfico Puma está conformado por seis articulaciones rotoides que mueven un brazo (*BR=D3*), un antebrazo (*AB=RL4*) y un instrumento quirúrgico llamado (*IN=RL7*).

Modelo geométrico directo (MGD) del robot Puma

El modelo geométrico directo (MGD) del robot Puma expresa la posición y orientación del órgano terminal con base en los valores conocidos de las variables articulares. Este modelo se halla multiplicando las matrices de transformación (${}^{i}T_{j}$) que expresan cada articulación. Para el presente estudio se tienen siete matrices de transformación (seis grados de libertad que posee el robot Puma más el instrumento quirúrgico). El MDG estará entonces definido por la siguiente multiplicación:

$$ {}^{0}T_{7} = {}^{0}T_{1}\,{}^{1}T_{2}\,{}^{2}T_{3}\,{}^{3}T_{4}\,{}^{4}T_{5}\,{}^{5}T_{6}\,{}^{6}T_{7} \qquad (7) $$

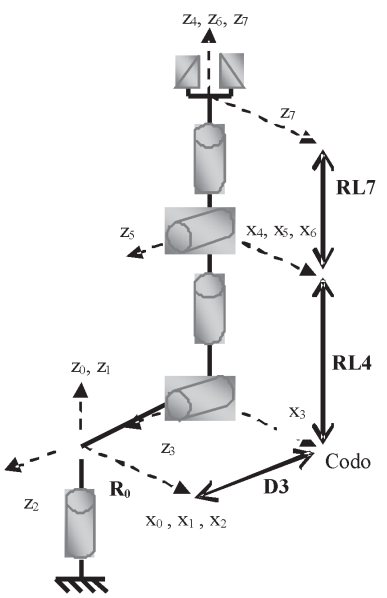

Figura 4 Robot Puma, articulaciones y ejes

Cada una de las matrices de la ecuación representa las matrices de transformación entre sistemas de coordenadas. Estas matrices han sido halladas utilizando la representación de parámetros geométricos de Khalil-Kleinfinger [17]. Una descripción detallada de estas matrices puede verse en [18].

Modelo geométrico inverso (MGI) del robot Puma

El modelo geométrico inverso define las posiciones articulares necesarias para poder realizar una trayectoria definida en el espacio cartesiano. Para que el robot Puma pueda realizar la trayectoria quirúrgica deseada siguiendo las posiciones de codo y muñeca obtenidas en el proceso de optimización con el fin de respetar el paso por el trocar, es necesario definir el modelo geométrico inverso de tal manera que los ángulos de las articulaciones dependan de las posiciones optimizadas del codo y la muñeca. A continuación se muestra el cálculo de cada uno de estos ángulos.

a) Cálculo de q_1 y q_2:

Considerando como marco de referencia el sistema de coordenadas situado sobre el hombro del robot (R_0), la posición del codo depende solamente de q_1, q_2 y de la longitud del brazo *D3*, como se muestra en la figura 5.

El valor de estos ángulos será entonces:

$$ q_1 = \arctan\left(\frac{{}^{0}y_c}{{}^{0}x_c}\right); q_2 = \pm\arccos\left(\frac{{}^{0}z_c}{D3}\right) \qquad (8) $$

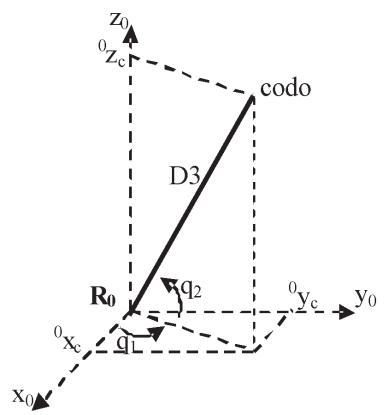

Figura 5 Articulaciones q_1 *y* q_2 para el robot Puma

b) Cálculo de q_3:

El ángulo q_3 es calculado considerando la posición de la muñeca P_m expresada en el sistema de coordenadas R_2 (codo). Esto se obtiene gracias a la siguiente expresión:

$$^{2}P_m = {}^{2}T_0\, {}^{0}P_m \tag{9}$$

donde $^{2}T_0$ es la transpuesta de la matriz de transformación de la segunda articulación y $^{0}P_m$ representa las posiciones de la muñeca halladas por el algoritmo de optimización y expresadas en el sistema R_0. Estas posiciones calculadas se pueden escribir como:
$^{0}P_m = [P_{mx}\ P_{my}\ P_{mz}]^T$. Dado $^{2}T_0$ (ecuación) igual a (donde $C2 = \cos(q_2)$; SI = sin (q_1); …):

$$^{2}T_0 = \begin{bmatrix} C2C1 & C2S1 & S2 & 0 \\ -S2C1 & -S2S1 & C2 & 0 \\ S1 & -C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

Se obtiene la ecuación :

$$^{2}P_m = \begin{bmatrix} C2C1P_{mx} + C2S1P_{my} + S2P_{mz} \\ -S2C1P_{mx} - S2S1P_{my} + C2P_{mz} \\ S1P_{mx} - C1P_{my} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

La figura 6 muestra el sistema R_2 junto con la muñeca. De dicha figura se deduce que:

$$^{2}x_m = D3 + RL4\cos(\alpha) \tag{12}$$

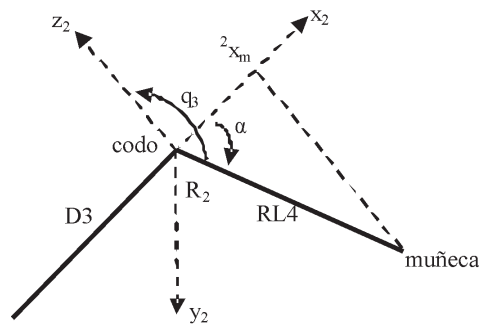

Figura 6 Articulación q_3 para el robot Puma

Despejando α de la ecuación se obtiene la ecuación (13):

$$\alpha = \pm \arccos\left(\frac{^{2}x_m - D3}{RL4}\right) \tag{13}$$

Por lo tanto el ángulo q_3 está dado por la ecuación (14):

$$q_3 = -\frac{\pi}{2} - \alpha \tag{14}$$

Donde el valor $^{2}x_m$ se obtiene de la primera fila de la ecuación (11).

c) Cálculo de q_4 y q_5:

Al igual que en el caso anterior, el sistema de referencia ya no es R_0 sino R_3. La ecuación expresa la trayectoria deseada en R_3.

$$^{3}P_d = {}^{3}T_0\, {}^{0}P_d \tag{15}$$

Donde los componentes de la trayectoria deseada se pueden escribir como: $^{0}P_d = \begin{bmatrix} P_{dx} & P_{dy} & P_{dz} \end{bmatrix}^T$. Dado que $^{3}T_0$ es igual a lo mostrado en la ecuación [18]:

$$^{3}T_0 = \begin{bmatrix} C3C2C1 - S3S2C1 & C3C2S1 - S3S2S1 & C3S2 + S3C2 & -D3C3 \\ -S3C2C1 - C3S2C1 & -S3C2S1 - C3S2S1 & -S3S2 + C3C2 & D3S3 \\ S1 & -C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{16}$$

Se obtiene:

$$
{}^{3}P_d = \begin{bmatrix} (C3C2 - C3S2)C1P_{dx} + (C3C2 - S3S2)S1P_{dy} + (C3S2 + S3C2)P_{dz} - D3C3 \\ -(S3C2 + C3S2)C1P_{dx} - (S3C2 + C3S2)S1P_{dy} + (-S3S2 + C3C2)P_{dz} + D3S3 \\ S1P_{dx} - C1P_{dy} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)
$$

La siguiente figura muestra el sistema R_3 junto con el instrumento quirúrgico *RL7*:

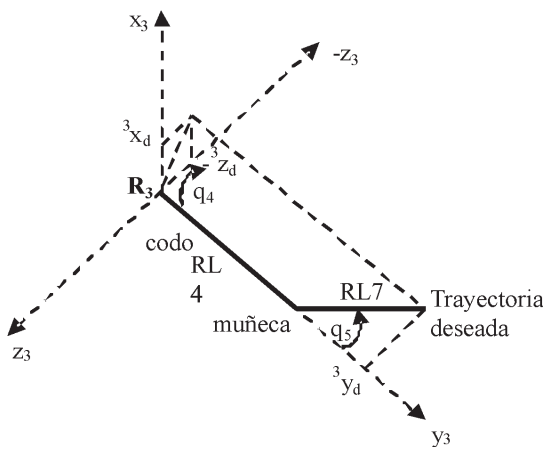

Figura 7 Articulaciones q_4 y q_5 para el robot Puma

De la figura 7 se obtienen entonces los valores de q_4 y q_5 (ecuación (18)):

$$
q_4 = \arctan\left(\frac{{}^{3}x_d}{-{}^{3}z_d}\right); q_5 = \pm \arccos\left(\frac{{}^{3}y_d - RL4}{RL7}\right) \quad (18)
$$

Donde ${}^{3}x_d$, ${}^{3}y_d$, ${}^{3}z_d$ son las posiciones en *x*, *y*, *z* de la ecuación (17).

Robot PA10

El robot PA10 es un robot de siete grados de libertad con siete articulaciones rotoides y muñeca de ejes concurrentes, fabricado por Mitsubishi [19] y muy popular en la automatización de procesos (Figura 8).El modelo geométrico directo del robot PA10 al igual que en el caso del Puma, lo describe la ecuación , donde cada matriz puede verse en detalle en [18]:

$$
{}^{0}T_7 = {}^{0}T_1\,{}^{1}T_2\,{}^{2}T_3\,{}^{3}T_4\,{}^{4}T_5\,{}^{5}T_6\,{}^{6}T_7 \quad (19)
$$

De la misma forma que se hizo para el robot Puma, deben encontrarse las ecuaciones que determinen el posicionamiento de cada una de las articulaciones del robot PA10 para el modelo geométrico inverso MGI.

a) Cálculo de q_1 y q_2:

Dado que las dos primeras articulaciones del robot PA10 tiene la misma configuración que el Puma, los valores de estos dos ángulos son los mismos expresados en la ecuación .

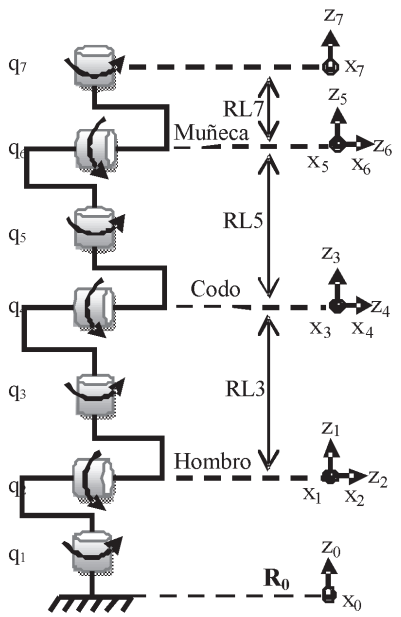

Figura 8 Robot PA10, articulaciones y ejes

b) Cálculo de q_3 y q_4:

Para el cálculo de q_3 y q_4 el marco de referencia ya no es R_0 sino R_2, debido al movimiento que inducen q_1 y q_2. Por lo tanto se debe multiplicar el vector de posiciones de la muñeca por la matriz ${}^2T_0$ del PA10 como lo mostró la ecuación (9). Para este caso la matriz ${}^2T_0$ toma el valor mostrado en la ecuación (20).

$$ {}^2T_0 = \begin{bmatrix} C2C1 & C2S1 & -S2 & 0 \\ -S2C1 & -S2S1 & -C2 & 0 \\ -S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20) $$

Luego ${}^2P_m$ es igual a:

$$ {}^2P_m = \begin{bmatrix} C2C1P_{mx} + C2S1P_{my} - S2P_{mz} \\ -S2C1P_{mx} - S2S1P_{my} - C2P_{mz} \\ -S1P_{mx} + C1P_{my} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21) $$

La figura 9 muestra el sistema R_2 para el robot PA10. De esta figura se obtienen los ángulos para q_3 y q_4 (ecuación (22)).

$$ q_3 = \pm \arctan\left(\frac{{}^2z_m}{{}^2x_m}\right); q_4 = \pm \arccos\left(\frac{-{}^2y_m - RL3}{RL5}\right) \quad (22) $$

donde ${}^2x_m$, ${}^2y_m$, ${}^2z_m$ hacen referencia a las filas x, y, z de la ecuación (21).

c) Cálculo de q_5 y q_6:

Al igual que en el caso anterior el sistema de referencia vuelve a cambiar, ahora es R_4. Realizando un proceso similar se obtiene la ecuación (23).

$$ {}^4P_d = {}^4T_0\, {}^0P_d \quad (23) $$

El vector ${}^4P_d$ permite entonces obtener los valores puntuales de ${}^4x_d$, ${}^4y_d$ y ${}^4z_d$ (ver detalles en [18]). La figura 10 muestra el sistema R_4 para el robot PA10, de donde se obtienen los ángulos q_5 y q_6 (ecuaciones (24) y (25) respectivamente).

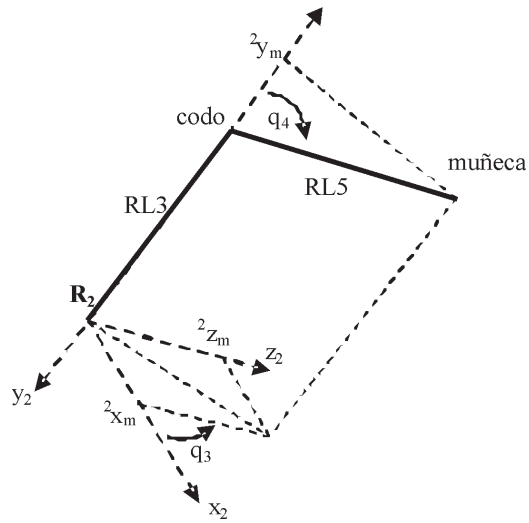

Figura 9 Articulaciones q_3 y q_4 para el robot PA10

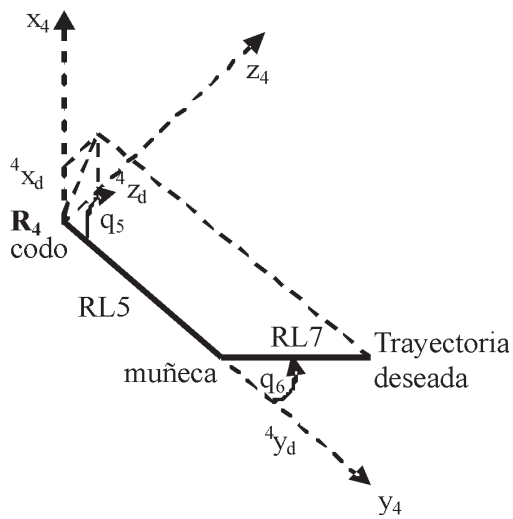

Figura 10 Articulaciones q_5 y q_6 para el robot PA10

$$ q_5 = \pm \arctan\left(\frac{{}^4z_d}{{}^4x_d}\right); \; q_6 = \pm \arccos\left(\frac{P_{dx} - M2}{M1}\right) \quad (24) $$

Con:

$$ M1 = K2 - (K1K5/K4) $$

$$ M2 = K3 + \left(\frac{K1(P_{dz} - K6)}{K4}\right) $$

$$
\begin{aligned}
K1 &= -C1C2C3C4C5RL7 + C1C2S3S5RL7 + C1S2S4C5RL7 + S1C3S5RL7 \\
K2 &= -C1C2C3S4RL7 - C1S2C4RL7 + S1S3S4RL7 \\
K3 &= C1C2C3S4RL5 + C1S2C4RL5 + C1S2RL3 - S1S3S4RL5 \\
K4 &= S2C3C4C5RL7 - S2S3S5RL7 + C2S4C5RL7 \\
K5 &= S2C3S4RL7 - C2C4RL7 \\
K6 &= C2C4RL5 + C2RL3 - S2C3S4RL5
\end{aligned}
\tag{25}
$$

Resultados

Del proceso de optimización se obtuvieron las posiciones del codo y la muñeca que garantizan el paso por el trocar. Así mismo los modelos geométricos inversos de cada robot se han modificado con el fin de asegurar dicho paso por el trocar, además de cumplir cabalmente con la ejecución de la trayectoria quirúrgica deseada.

La figura 11 muestra el proceso de comprobación del desempeño de cada robot para operaciones de laparoscopia, donde la consigna deseada (en este caso un círculo de 8 cms de diámetro), se ingresa al MGI del cual se obtienen los valores de movimiento para cada articulación, los cuales permiten verificar a través del MGD si el órgano terminal del robot es capaz o no de realizar la consigna deseada.

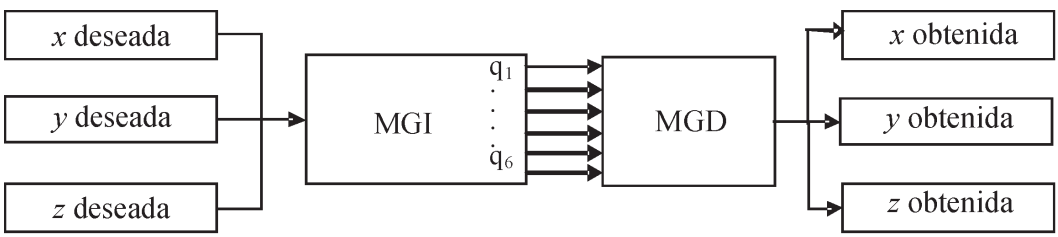

Figura 11 Esquema de prueba MGI – MGD

Al realizar el anterior procedimiento para cada robot y manejando las mismas longitudes para el brazo, el antebrazo y el instrumento quirúrgico en los dos robots (*D3 = RL3*; *RL4 = RL5*; *RL7 = RL7*), se obtienen los resultados que se explican a continuación.

En [18] puede verse que la trayectoria del codo optimizada es similar a la obtenida en el codo de los dos robots de estudio, es decir, la configuración física de los dos robots no tiene inconveniente en seguir las posiciones del codo impuestas por el proceso de optimización. Sin embargo no puede decirse lo mismo para la muñeca (figura 12). Se observa un mayor error de seguimiento en la trayectoria de muñeca realizada por el robot Puma con respecto a aquella generada por el proceso de optimización. Esto se debe a que la configuración cinemática del robot no le permite seguir con holgura este tipo de trayectoria. Por el contrario el robot PA10 sigue con menores errores la trayectoria optimizada.

La figuras 13 por su parte muestra el comportamiento global de los dos robots al realizar la consigna deseada. Puede verse con mayor claridad el respeto del paso por el trocar que efectúa el robot PA10, realizando un movimiento cruzado, mientras que el Puma pasa de manera directa por el trocar. Finalmente los errores de seguimiento en la trayectoria quirúrgica realizada evidencian las diferencias que presentan los dos robots: mientras este error es bastante grande para el robot Puma, la trayectoria realizada por el robot PA10 está bastante cerca de la trayectoria deseada (figura 14).

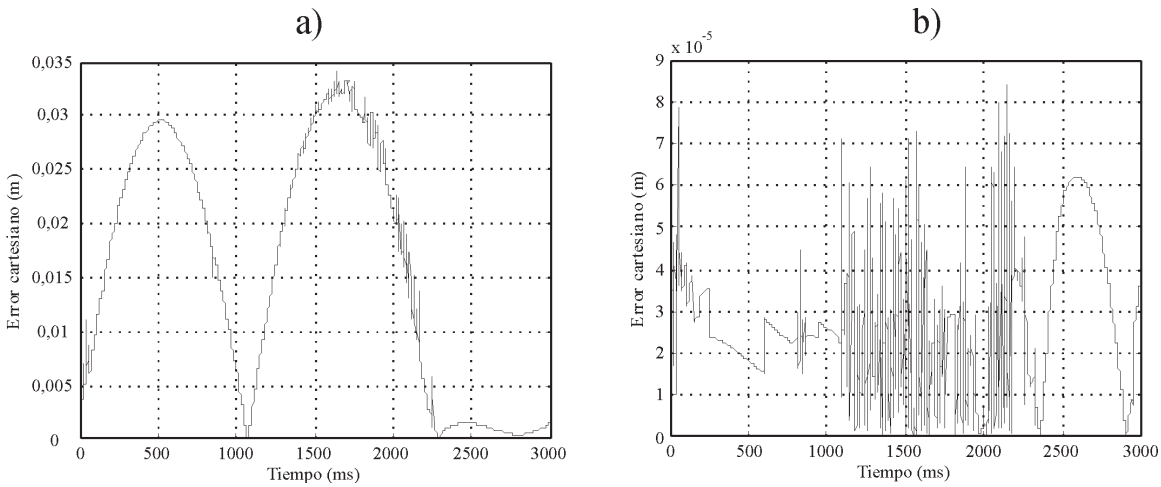

Figura 12 Error de seguimiento cartesiano en la muñeca: a) Robot Puma b) Robot PA10

Un análisis más detallado de la cinemática involucrada permite constatar la presencia de una singularidad en el codo del robot Puma al tratar de realizar los movimientos impuestos por el algoritmo de optimización (Jacobiano nulo [18]). Puede entonces concluirse que el robot Puma no es capaz de cumplir con los requerimientos que impone una asistencia en operaciones de laparoscopia, lo cual sí puede cumplir el robot PA10.

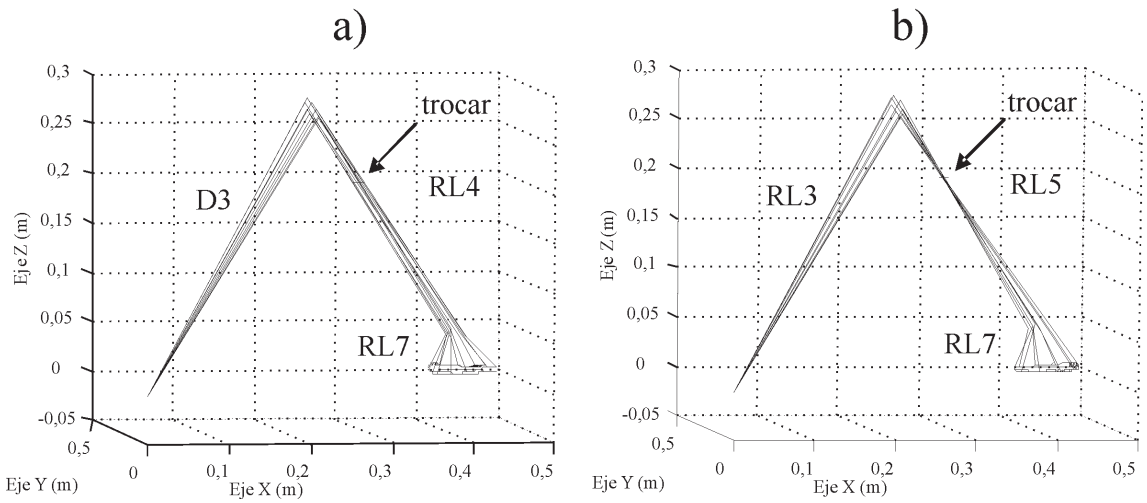

Figura 13 Comportamiento global: a) Robot Puma b) Robot PA10

Conclusiones

En este artículo se ha presentado un estudio del desempeño de robots industriales como asistentes en operaciones de laparoscopia. La característica principal de este tipo de intervenciones es la introducción al interior del abdomen de los instrumentos quirúrgicos necesarios para realizar diversas operaciones (gracias a pequeñas incisiones y a un instrumento llamado trocar), lo cual implica que la configuración cinemática del robot utilizado como asistente debe permitir realizar con exactitud la

consigna deseada manteniendo fija la posición del paso por el orificio practicado. Esta situación entraña una complejidad matemática que restringe el movimiento de las articulaciones del robot con el fin de cumplir con la condición impuesta.

Para hacer más fácil la resolución de este tipo de problemas se utilizan robots con arquitecturas físicas similares a las del ser humano (robots antropomórficos). En este caso en particular se estudiaron dos robots ampliamente conocidos a nivel industrial y de tecnología y costo al alcance de países en vía de desarrollo. Dichos robots son el Puma y el PA10, de seis y siete grados de libertad respectivamente.

Para cumplir la restricción de paso por el trocar se utilizó un algoritmo de optimización de Levenberg-Mardquart, el cual provee los movimientos que deben realizar codo y muñeca de un robot antropomórfico con el fin de que el antebrazo mantenga una posición fija al pasar por el trocar.

Los resultados muestran claramente que gracias a su grado de libertad adicional en el codo el robot PA10 cumple con las condiciones impuestas al problema: realizar una consigna quirúrgica al interior del abdomen del paciente respetando al mismo tiempo el paso por el trocar. Posteriores trabajos analizarán el desempeño dinámico del robot PA10 y sus respectivas restricciones, e implementarán un algoritmo de control que permita realizar el seguimiento de consignas reales en operaciones de laparoscopia.

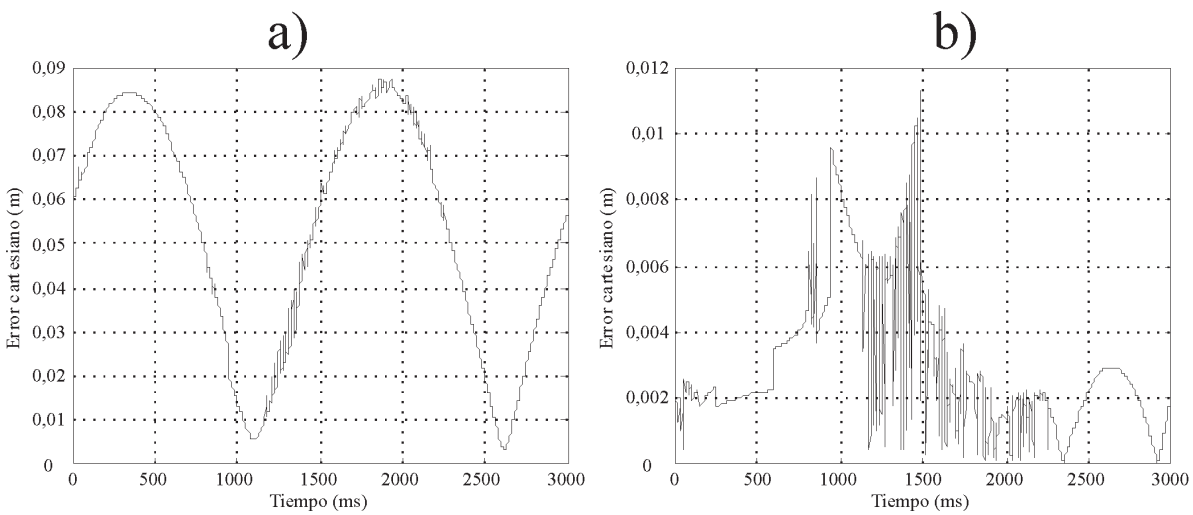

Figura 14 Error de seguimiento cartesiano al final del instrumento: a) Robot Puma b) Robot PA10

Referencias

1. P. Mouret. "How I developed laparoscopic cholecystectomy". *Annals of the Academy of Medicine Singapore*. Vol. 25. 1996. pp. 744-747.

2. A.T. Spaw, E.J. Reddick, D.O. Olsen. "Laparsocopic laser cholecystectomy: analysis of 500 precedures". *Surgical Laparoscopy & Endoscopy*. Vol. 1. 1991. pp. 2-7.

3. G.S. Lytinski. "Endoscopic surgery: The history, the Pioneers". *World Journal of Surgery*. Vol. 23. 1999. pp. 745-753.

4. D.B. Jones. Laparoscopic *Surgery: Principles and Procedures*. Ed. Marcel Dekker. New York. 2004. pp. 1-6.

5. M. Jacobs, M. Gagner. J. Cueto-García. *Laparoscopic Surgery*. Ed. McGraw Hill. New York. 2003. pp. 35-40.

6. M. D. Diodato, R. J. Damiano. "Robotic cardiac surgery: Overview". *Surgical Clinics of North America*. Vol. 82. 2003. pp. 1351-1367.

7. M. R. Satava. "Emerging technologies for surgery in the 21st century". *Archieves of Surgery*. Vol. 134. 1999. pp. 1197-1202.

8. G. H. Ballantyne, F. Molle. "The Da Vinci telerobotic surgical system: the virtual operative field and telepresence surgery". *Surgical Clinics of North America*. Vol. 83. 2003. pp. 1293-1304.

9. J. Marescaux, F. Rubino. "The Zeus robotic system: experimental and clinical applications". *Surgical Clinics of North America*. Vol. 83. 2003. pp. 1305-1315.

10. G. S. Guthard, K. Salisbury. "The intuitive telesurgery system: overview and application". *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation.* Detroit, USA. 1999. pp. 618-621.

11. S. Krut. "Introduction to medical robotics". *Memorias IV Seminario de Automática*. Popayán, Colombia. 2006.

12. Frequently Asked Questions. Intuitive Surgical. www.intuitivesurgical.com. Consultada el 10 de diciembre de 2007.

13. Y. S. Kwoh, J. Hou, E. A. Jonckheere, S. Hayall. "A robot with improve absolute positioning accuracy for CT guide stereoscopic brain surgery". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. Vol. 35. 1988. pp. 153-161.

14. J. L. Mosso, A. Minor, V. Lara, E. Maya. "Brazo robótico para sujetar y posicionar laparoscopios. Primer diseño y construcción en México". *Revista Cirujano General*. Vol. 69. 2001. pp. 295-299.

15. M. Michelin. *Contribution à la commande de robots pour la chirurgie mini-invasive.* PhD Thesis. Université de Montpellier II. France. 2004.

16. K. Levenberg. "A method for the solution of certain problems in least squares". *Quarterly of Applied Mathematics*. Vol. 2. 1994. pp. 164-168.

17. W. Khalil, E. Dombre. *Modeling, Identification and Control of robots.* Ed. Hermes Penton Science. Londres. 2002. pp. 35-43.

18. B. Garcés, O. Mora. *Estudio del desempeño de un robot Puma en operaciones de laparoscopia.* Tesis de pregrado. Universidad del Cauca. Popayán. Colombia. 2008.

19. Mitsubishi Heavy Industries. http://www.sdia.or.jp/mhikobe/products/mechatronic. Consultada el 30 de septiembre de 2007.