

Arquitectura de Control de una Plataforma Robótica sin Realimentación de Posición Articular para Cirugía Mínimamente Invasiva

I. Rivas-Blanco, V. F. Muñoz, I. García-Morales

*Universidad de Málaga – Andalucía Tech
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, 29071 Málaga, Spain.
Email: irivas[@]uma.es*

G. Tortora, A. Menciassi

*Universidad de Málaga – Andalucía Tech
BioRobotics Institute, Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, Italy.
Email: g.tortora@sssup.it*

Abstract - Este trabajo presenta una plataforma robótica para cirugía mínimamente invasiva (CMI) compuesta por diferentes unidades robóticas miniaturizadas ancladas a una estructura magnética. El artículo describe las características hardware de la plataforma, así como la arquitectura de control maestro/esclavo que permite el manejo de dos unidades robóticas. El acoplamiento cinemático entre el maestro y el esclavo hace más intuitivo el sistema, haciendo posible que se maneje con destreza mediante dos dispositivos Phantoms Omni. Con el objeto de evaluar la viabilidad del esquema de control propuesto, se han llevado a cabo experimentos de "pick and place" y, a través de sesiones experimentales con cinco usuarios diferentes, se ha determinado la curva de aprendizaje del sistema. Debido a que las unidades robóticas miniaturizadas no están provistas de sensores, se ha desarrollado un método de autocalibración inicial basado en análisis de imagen con el objeto de evitar errores de posición de las articulaciones. La arquitectura de control propuesta muestra un adecuado funcionamiento en términos de control de velocidad.

Keywords: Arquitectura de control, mini-robot, NOTES, cirugía mínimamente invasiva.

This document is a self-archiving copy of the accepted version of the paper.

Citation Information:

Rivas-Blanco, I.; Muñoz, V.F.; García-Morales, I.; Tortora, G.; Menciassi, A.,
"Arquitectura de Control de una Plataforma Robótica sin Realimentación de Posición Articular para Cirugía Mínimamente Invasiva," *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*, Bilbao, Spain, pp.793-800, Sep. 2015

```
@INPROCEEDINGS{Rivas-Blanco:JA2015,  
author={I. Rivas-Blanco and V.F. Muñoz and I. García-Morales and G. Tortora and A. Menciassi},  
title={Arquitectura de Control de una Plataforma Robótica sin Realimentación de Posición Articular para  
Cirugía Mínimamente Invasiva},  
booktitle={Actas de las XXXVI Jornadas de Automática},  
year={2015},  
pages={793-800},  
address={Bilbao, Spain}  
}
```

ARQUITECTURA DE CONTROL DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA SIN REALIMENTACIÓN DE POSICIÓN ARTICULAR PARA CIRUGÍA MINIMAMENTE INVASIVA

I. Rivas-Blanco, V. F. Muñoz, I. García-Morales
Universidad de Málaga, Andalucía Tech, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Campus de
Teatinos s/n , 29071 Málaga, España. irivas@uma.es

G. Tortora, A. Menciassi
BioRobotics Institute, Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, Italy. g.tortora@sssup.it, arianna@sssup.it

Resumen

Este trabajo presenta una plataforma robótica para cirugía mínimamente invasiva (CMI) compuesta por diferentes unidades robóticas miniaturizadas ancladas a una estructura magnética. El artículo describe las características hardware de la plataforma, así como la arquitectura de control maestro/esclavo que permite el manejo de dos unidades robóticas. El acoplamiento cinemático entre el maestro y el esclavo hace más intuitivo el sistema, haciendo posible que se maneje con destreza mediante dos dispositivos Phantoms Omni. Con el objeto de evaluar la viabilidad del esquema de control propuesto, se han llevado a cabo experimentos de "pick and place" y, a través de sesiones experimentales con cinco usuarios diferentes, se ha determinado la curva de aprendizaje del sistema. Debido a que las unidades robóticas miniaturizadas no están provistas de sensores, se ha desarrollado un método de autocalibración inicial basado en análisis de imagen con el objeto de evitar errores de posición de las articulaciones. La arquitectura de control propuesta muestra un adecuado funcionamiento en términos de control de velocidad.

Palabras Clave: Arquitectura de control, mini-robot, NOTES, cirugía mínimamente invasiva.

1 INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la cirugía mínimamente invasiva (CMI) y la laparoscopia multipuerto se han convertido en técnicas ampliamente aceptadas como alternativa a los procedimientos de cirugía abierta tradicional. Con el objeto de minimizar el número de puertos de entrada a la cavidad abdominal de los procedimientos laparoscópicos, han surgido algunas técnicas prometedoras como la cirugía laparoscópica de puerto único (Single Incision Laparoscopic

Surgery, SILS) y la cirugía endoscópica transluminal a través de orificios naturales (Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery, NOTES) [3], [11].

Los beneficios que se producen en el paciente con estos nuevos procedimientos menos invasivos incluyen la disminución de las lesiones en los tejidos, un menor tiempo de recuperación, mejoras estéticas y mayor grado de satisfacción. Sin embargo, ambas técnicas, SILS y NOTES, requieren nuevas habilidades por parte de los cirujanos debido a la falta de visión directa del interior del paciente y del contacto directo con los tejidos, combinado con el reducido rango de movimiento y maniobrabilidad de los instrumentos disponibles. En este sentido, la cirugía robótica aparece como una disciplina encaminada a paliar las principales limitaciones de los procedimientos mínimamente invasivos, proporcionando más destreza a los cirujanos y unos movimientos más precisos e intuitivos de las herramientas. El sistema quirúrgico Da Vinci (Intuitive Surgical Inc., Sunnyvale, CA) se ha convertido en la referencia más importante del mundo en cuanto a cirugía laparoscópica asistida por robots. Se trata de una plataforma maestro/esclavo que proporciona ventajas como filtrado del temblor de las manos del cirujano, escalado del movimiento, visión 3D y movimientos intuitivos [8]. Hay trabajos que muestran resultados del sistema da Vinci también en procedimientos SILS [6]. Asimismo, el robot SPRINT es una plataforma robótica bimanual diseñada específicamente para este tipo de procedimiento [7] cuyo tamaño, comparado con el sistema da Vinci, es pequeño. En [2] se presenta otro sistema enfocado a SILS, donde se utilizan dos robots continuos tipo serpiente.

Aunque las técnicas SILS reducen los puertos de entrada a uno, y por tanto son menos invasivos, las técnicas NOTES eliminan por completo las incisiones en la pared abdominal, utilizando accesos naturales y perforación de órganos internos. A pesar de que el sistema presentado en este artículo también

puede utilizarle en SILS a través de una única incisión en el abdomen, se ha decidido enfocarlo para procedimientos NOTES, ya que son procedimientos más complejos que implican mayores restricciones. En general, los dispositivos enfocados para NOTES presentan limitaciones debido a las restricciones del tamaño del puerto de entrada, lo que lleva a la miniaturización del diseño de los robots. Así, en [4] presentan una nueva generación de endoscopios flexibles teleoperados. Lehman et al. [5] proponen una plataforma formada por dos brazos para NOTES, anclada magnéticamente a la pared abdominal del paciente. Phee et al. [10] han diseñado un dispositivo flexible maestro-esclavo de dos brazos con 9 grados de libertad (GDLs). En [13] se muestra un robot tipo serpiente que puede utilizarse tanto en procedimientos SILS como en NOTES. Sin embargo, todos estos sistemas normalmente tienen carencias en lo que se refiere a modularidad y estabilidad.

Se ha propuesto una plataforma robótica diseñada para NOTES, dotada de un mini-robot cámara acoplado a una estructura de anclaje magnética. La estructura de anclaje se introduce en la cavidad abdominal a través del esófago por un puerto de 17 mm de diámetro en una configuración abierta. Una vez dentro del abdomen, se consigue una configuración triangular a través de actuadores *Shape Memory Alloy* (SMA). Se ha demostrado que los actuadores SMA son adecuados en términos de efectividad y de seguridad [12]. Un mecanismo de acoplamiento permite el anclaje de tres unidades robóticas modulares miniaturizadas [15]-[18]. A diferencia del robot SPRINT, cuyo espacio de trabajo está limitado por el puerto de entrada, el espacio de trabajo de esta plataforma se puede extender trasladando la estructura de anclaje a lo largo de la pared abdominal. Además, debido a que las unidades robóticas están realizadas mediante la conexión de módulos robóticos básicos, se pueden ensamblar distintas configuraciones en función de unos requisitos quirúrgicos determinados. En este trabajo se han acoplado a la estructura dos unidades robóticas provistas en su extremo de una pinza y un eléctrico, además del robot cámara, tal y como se muestra en la Figura 1.

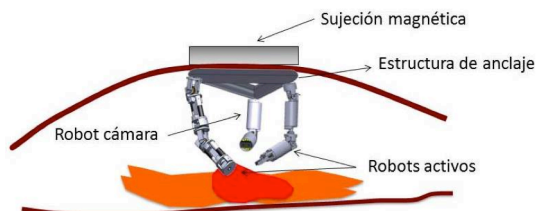


Figura 1. Plataforma completa

El objetivo de este artículo consiste en ilustrar la arquitectura de control de las unidades robóticas activas y su validación a través de experimentos de

Pick and Place. Así, el apartado 2 presenta el dispositivo propuesto, y a continuación, el apartado 3 describe su arquitectura de control. El apartado 4 muestra un método de autocalibración inicial a partir de análisis de imagen. Los resultados obtenidos durante los experimentos de *Pick and Place* se detallan en el apartado 5. Finalmente, el apartado 6 está dedicado a las conclusiones.

2 ARQUITECTURA HARDWARE

El sistema presentado en este artículo se trata de una plataforma maestro-esclavo teleoperada diseñada para procedimientos NOTES (véase Figura 2). El maestro está compuesto por dos dispositivos hápticos Phantom Omni (Sensable Technologies Inc., Woburn, MA, USA) para controlar el movimiento de cada robot, y un pedal que permite al cirujano cambiar la velocidad del sistema. Así, una velocidad mayor puede utilizarse para tareas de aproximación y de alejamiento, mientras que velocidades pequeñas pueden proporcionar movimientos más precisos para tareas específicas. La información procedente de los dispositivos hápticos y del pedal se procesan en un ordenador personal y se transmiten de forma inalámbrica al sistema esclavo, que está compuesto por dos mini-robots modulares: uno de ellos provisto de una pinza en su extremo, y el otro dotado de un bisturí eléctrico (Figura 3). El robot cámara no se ha considerado en este esquema porque permanece en una posición y orientación fija (y conocida) durante la intervención. Los dispositivos hápticos disponen de dos botones para abrir o cerrar la pinza y para rotar el efector del efector final del robot que porta el bisturí eléctrico. Estos botones se emplean además para activar o desactivar la teleoperación de los dispositivos (es decir, para poder mover el sistema maestro sin que esto conlleve un movimiento del sistema esclavo), y así evitar movimientos no deseados del manipulador e incrementar el espacio de trabajo del maestro.

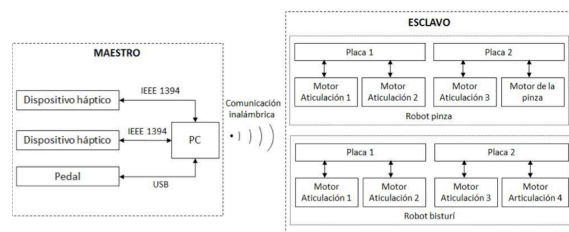


Figura 2. Arquitectura hardware

Los robots activos, mostrados en la Figura 3, están constituidos por dos módulos robóticos básicos conectados en una conexión en serie, tal y como se describe en [16]. Cada módulo básico proporciona 2 GDLs, que pueden ser cabeceo (C) y alabeo (A), o cabeceo y Efector-Final (EF). El robot bisturí está

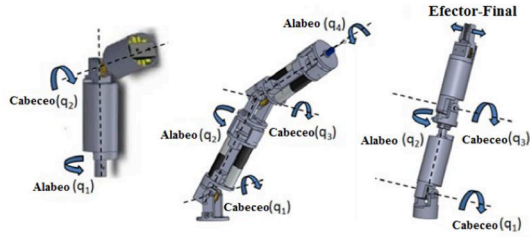


Figura 3. Unidades robóticas modulares: Robot cámara (derecha). Robot bisturí (centro). Robot pinza (izquierda)

compuesto por dos módulos P/R, de manera que está provisto de 4 GDLs. Este robot también incluye un bisturí eléctrico comercial como herramienta. Por otro lado, el robot pinza está compuesto por un módulo P/R ensamblado con uno P/EE. El efector final de este robot es una pinza activa, así que el grado de libertad EE es el responsable de abrir y cerrar la pinza. La fuerza en el extremo de la herramienta es de 0.65N, que es suficiente para la ejecución de tareas básicas en cirugía endocavitaria, mientras que la fuerza de agarre es alrededor de 5.3N [19]. Finalmente, el robot cámara está compuesto de un módulo simple R/P. El diámetro del robot es de 12 mm, lo que le hace compatible con su inserción a través del esófago por el puerto de acceso. Los motores de los robots (SBL04 de Namiki, Akita, Japón, con un ratio de reducción de 1:337) se controlan mediante microcontroladores con comunicación inalámbricos integrados en unas placas dedicadas situadas dentro de los manipuladores (CC2430 ZigBee, Texas Instruments, Dallas, Tx, USA). Cada una de las placas es capaz de controlar dos motores sin escobillas.

Los sistemas de referencias de cada robot se muestran en la Figura 4, donde $\{C\}$, $\{G\}$ y $\{E\}$ son los sistemas base correspondientes a la cámara, al robot pinza y al robot bisturí, respectivamente, y $\{0\}$ es el sistema de referencia de la imagen. Los parámetros Denavit-Hartenberg de los robots se detallan en la Tabla 1. Se destaca que $q_4=0$ para el robot pinza y que tanto q_3 como q_4 son nulos para el robot cámara. El espacio de trabajo alcanzable por cada robot con respecto al sistema de referencia de la base se muestra en la Figura 5. El giro máximo para la primera articulación es de $\pm 180^\circ$, mientras que la tercera articulación está limitada al rango de $[0^\circ, 90^\circ]$ para evitar las soluciones múltiples del modelo cinemático inverso. Por razones de seguridad, sólo se consideran valores positivos para el eje z (definido como el eje perpendicular a la pared abdominal, apuntando hacia dentro) con el objeto de no dañar la pared abdominal del paciente desde el interior. Este espacio de trabajo puede extenderse desplazando el sistema de anclaje a lo largo de la pared abdominal, haciendo posible alcanzar casi cualquier punto en el interior de la cavidad abdominal.

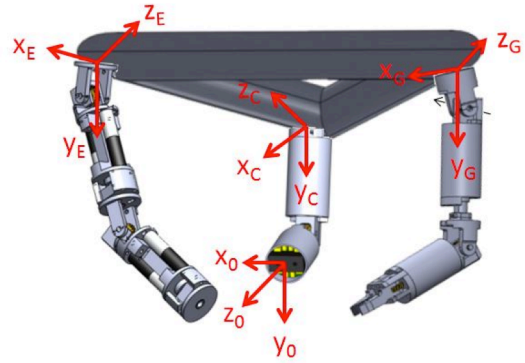


Figura 4. Sistemas de referencia de las unidades robóticas en la estructura de anclaje

Tabla 1: Parámetros Denavit-Hartenberg de los robots.

Eslabón	a_i (mm)	α_i (rad)	d_i (mm)	θ_i (rad)
1	0	$-\pi/2$	0	q_1
2	0	$\pi/2$	40.85	q_2
3	0	$-\pi/2$	0	q_3
4	0	0	32.85	q_4

3 ARQUITECTURA DE CONTROL

Se ha diseñado una arquitectura de control dedicada para la teleoperación de manera que el usuario sea capaz de controlar directamente el movimiento del esclavo a través del interfaz maestro. Una de las principales limitaciones cuando se trabaja con dispositivos para NOTES es la disponibilidad limitada de sensores comerciales miniaturizados para integrarlos en los dispositivos, ya que el tamaño máximo está restringido por el tamaño del puerto de acceso a través del esófago por el que deben introducirse. De esta forma, el esquema de control se ha implantado sólo en el maestro (a la izquierda de la Figura 2), tomando como entrada el pedal y los dispositivos hápticos manejados por el cirujano, y proporcionando las correspondientes posiciones de los motores a los robots esclavos, en bucle abierto. El

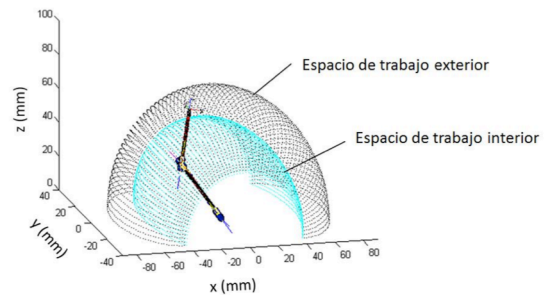


Figura 5. Espacio de trabajo alcanzable por cada robot

bucle de control se cierra a través del usuario, que puede corregir la posición de los robots basándose en información visual proporcionada por la cámara (control man-on-the-loop). Aunque la implementación de un control de posición de un motor sin escobillas sin hacer uso de sensores, tal y como se muestra en [20], puede incrementar la precisión del sistema, requeriría espacio para integrar electrónica adicional. En este trabajo se propone una metodología predictiva de los pasos de los motores y el esquema de control propuesto se basa en una metodología de cruce-cero, tal y como se describe en [19] permitiendo al microcontrolador manejar motores sin escobillas que no están dotados de sensores.

La Figura 6 muestra la arquitectura de control de movimientos del robot pinza (para el robot bisturí el esquema es el mismo, pero referido a su sistema de referencia, es decir, sustituyendo G por E). El sistema de referencia para el dispositivo háptico es el mismo que el de la imagen, es decir, el sistema $\{0\}$. Aunque tanto el dispositivo háptico como el robot tienen tres GDLs para posicionar el EE (la cuarta articulación del robot bisturí no influye en la posición del EE), no tienen la misma estructura cinemática y, por lo tanto, conectar ambos dispositivos a nivel articular no permite un manejo intuitivo del robot. Así, el extremo del dispositivo háptico (${}^0\Delta P$) es mapeado en la posición del EE del robot (${}^G\Delta P$). Para evitar una configuración articular no segura para una posición del EE determinada, se evalúa la posición articular del codo para asegurarse que está dentro del espacio de trabajo. Debido a que el espacio de trabajo de los dispositivos maestro y esclavo son diferentes (tanto en forma como en tamaño) se han mapeado incrementos de posición en lugar de posiciones absolutas. Para conseguir un manejo del robot lo más intuitivo posible, la posición del dispositivo maestro se mide en relación al sistema de referencia de la imagen, $\{0\}$. En un movimiento intuitivo, cuando el usuario mueve el dispositivo háptico en una dirección, espera que el robot se mueva en la misma dirección en la imagen proporcionada por la cámara. De esta forma, las posiciones del maestro se deben transformar al sistema de referencia de los robots.

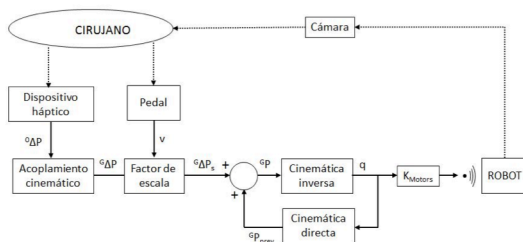


Figura 6. Arquitectura de control

Esto se realiza en el módulo de *acoplamiento cinemático* de la siguiente manera:

$${}^G\Delta P = {}^G R_0 {}^0\Delta P \quad (1)$$

Donde ${}^G R_0$ es la matriz de rotación entre los sistemas de referencias de la imagen y el robot pinza. Dado que la posición relativa entre el robot cámara y los robots activos en la estructura de anclaje es conocida (Figura 4), una vez que la cámara se ha colocado en la posición y orientación deseada, lo que se realiza al comienzo de la operación, ${}^G R_0$ es conocida y constante durante toda la intervención. Una vez que se obtiene ${}^G\Delta P$, se aplica un factor de escala e con el objeto de asemejar el tamaño de los espacios de trabajo del sistema maestro y esclavo. Como estos espacios de trabajo no solo son diferentes en tamaño, sino también en forma, se aplicará un factor de escala diferente para cada dirección del espacio:

$$e_x = \frac{X_{robot}}{X_{haptic}} ; e_y = \frac{Y_{robot}}{Y_{haptic}} ; e_z = \frac{Z_{robot}}{Z_{haptic}} \quad (2)$$

Donde X_{robot} , Y_{robot} , Z_{robot} y X_{haptic} , Y_{haptic} , Z_{haptic} representan los límites de los espacios de trabajo en cada dirección del espacio de los robots y de los dispositivos hápticos, respectivamente. Además, se han implementado dos velocidades posibles de la punta de los robots ($v=1$ y $v=0.5$). Por lo tanto,

$${}^G\Delta P_s = v {}^G\Delta P e = v ({}^G\Delta P_x \quad {}^G\Delta P_y \quad {}^G\Delta P_z) \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

La nueva referencia de posición del robot (${}^G P$) se calcula añadiendo el incremento de posición realizado por el usuario (${}^G\Delta P_s$) a la posición previa teórica del robot (${}^G P_{prev}$). La cinemática inversa del robot proporciona los valores articulares q necesarios para alcanzar la posición deseada. Tal y como se mencionó en el apartado anterior, se evitan las soluciones múltiples de la cinemática limitando el valor de q_3 . Finalmente, la matriz K_{motors} convierte valores articulares en los correspondientes pasos de los motores, que se envían de forma inalámbrica al robot. Para una posición del robot ${}^G P = (x,y,z)$, la cinemática inversa se realiza haciendo uso de las siguientes ecuaciones, donde q_4 no se ha tenido en cuenta debido a que esta articulación no afecta a la posición del efector final:

$$q_3 = \pi - \arccos\left(\frac{d_2^2 + d_4^2 - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{2d_2 d_4}\right) \quad (4)$$

$$q_2 = -\arcsin\left(\frac{y}{d_4 \cos(q_3)}\right) \quad (5)$$

$$q_1 = \operatorname{atan}\left(\frac{-(x(d_2 + d_4 \cos(q_3)) + z d_4 \cos(q_2) \sin(q_3))}{z(d_2 + d_4 \cos(q_3)) - x d_4 \cos(q_2) \sin(q_3)}\right) \quad (6)$$

4 AUTOCALIBRACIÓN INICIAL

Debido a la falta de sensores internos, resulta complicado colocar los robots en la configuración inicial (Figura 7b), que corresponde con un valor nulo de todas las articulaciones, una vez que se han colocado en la estructura de anclaje. Dado que se desconoce el valor real de los ángulos de las articulaciones, el controlador asume que la configuración inicial es aquella en la que se colocan los robots al comienzo de la operación. Aunque los errores iniciales no suponen un problema en cuanto al movimiento del robot, ya que la teleoperación está basada en el mapeo de incrementos de posición en lugar de posiciones absolutas, provocan problemas en el cálculo del espacio de trabajo. Tal y como se mencionó en la sección 2, el espacio de trabajo alcanzable se ha limitado al eje z positivo para evitar daños en la pared abdominal del paciente. Una mala calibración de la posición inicial del robot puede llevar a errores en el cálculo de la orientación del espacio de trabajo, en cuyo caso el eje z no será perpendicular a la pared abdominal, lo que podría provocar una colisión del robot con la misma. Por lo tanto, la calibración de los robots es importante en términos de seguridad. Teniendo en cuenta la geometría de todos los módulos, el error máximo permitidos para preservar la seguridad del paciente es $q_1 + q_3 \approx 11^\circ$ (el error inicial de q_2 no afecta a la orientación del espacio de trabajo, aunque es importante para preservar la intuitividad durante la teleoperación). Para evitar la realización de una calibración manual, que resultaría muy tediosa, se ha desarrollado un método de autocalibración basado en análisis de imagen. Esta autocalibración no ha sido incluida en el esquema de control de la Figura 6 porque representa un paso inicial antes de comenzar la teleoperación de los robots.

Tal y como se muestra en la Figura 7a, se han adherido siete marcadores (de 5 mm de altura) en los eslabones de cada robot. Cada articulación se calibra

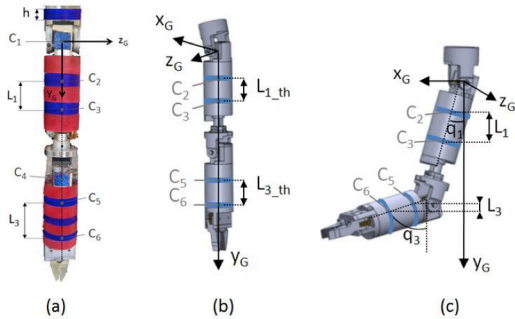


Figura 7. (a) Marcadores utilizados para la identificación de puntos, (b) Robot en configuración inicial, (c) Robot en configuración no inicial

de forma independiente, de manera que los centroides del primer y cuarto marcador (C_1 y C_4) se utilizan para calibrar la articulación 2, mientras que los centroides del segunda y el tercer marcador (C_2 y C_3), y el quinto y el sexto (C_5 y C_6) se utilizan para la calibración de las articulaciones 1 y 3, respectivamente. El marcador colocado en la parte superior del robot se utiliza para calcular la escala de la imagen. Para la calibración de cada robot, la segunda articulación del robot cámara se fija en 90° , mientras que q_1 tiene un valor tal que el plano x_0-y_0 de la imagen sea paralelo a los planos x_G-y_G y x_E-y_E de los robots pinza y bisturí eléctrico, respectivamente. De esta manera, la altura del marcador superior, h en la Figura 7a, se utiliza para calcular la escala de la imagen, ya que en estas condiciones, dicha altura es paralela al eje y_G (o y_G para el robot bisturí). Por lo tanto, el factor de escala, s , se obtiene como sigue:

$$s = \frac{\text{longitud de } h \text{ en la imagen}}{\text{longitud real de } h} \quad (7)$$

4.1 AUTOCALIBRACIÓN DE LAS ARTICULACIONES 1 Y 3

La estrategia de autocalibración es la misma para las articulaciones 1 y 3. Por lo tanto, con objeto de aclarar las explicaciones, el desarrollo se va a realizar para la primera articulación. Cuando q_1 es nulo, la distancia L_1 entre C_2 y C_3 corresponde con la distancia real que hay entre los marcadores, L_{1_th} (Figura 7b). Este valor se obtiene haciendo uso del factor de escala obtenido en (7):

$$L_{1_th} = s \cdot (\text{longitud real de } L_1) \quad (8)$$

Sin embargo, cuando q_1 no es nulo, L_1 es la proyección de L_{1_th} en el plano x_0-y_0 (Figura 7c). El método de autocalibración, mostrado en la Figura 8, consiste en corregir en ángulo q_1 dependiendo del valor de L_1 , obtenido mediante identificación de los centroides C_2 and C_3 en la imagen. Cuando $L_1 = L_{1_th}$, el valor de q_1 es nulo y por lo tanto el algoritmo de autocalibración llega a su fin. Por otro lado, mientras $L_1 < L_{1_th}$, se requiere una corrección en la primera articulación para colocar el robot en posición vertical. De acuerdo con la Figura 7c, la ley de control es:

$$q_1 = \text{acos}(L_1/L_{1_th}) \quad (9)$$

Sin embargo, además de determinar el valor de la rotación de q_1 es necesario determinar el sentido de giro de dicha articulación, ya que la proyección de L_{1_th} es la misma para ángulos de giro positivos y negativos. Para determinar el sentido de giro se ha tenido en cuenta que cuanto más pequeño sea el valor

de q_1 mayor deberá ser el valor de L_1 . Por tanto, la ley de control (9) se completa como:

$$q_1 = \text{sign}(L_1(k) - L_1(k-1)) \cdot \text{acos}(L_1/L_{1_th}) \quad (10)$$

Donde $L_1(k)$ y $L_1(k-1)$ son dos medidas consecutivas de L_1 . La ley de control para la tercera articulación se obtiene sustituyendo el subíndice 1 por 3 en la ecuación (10).

4.2 AUTOCALIBRACIÓN DE LA ARTICULACIÓN 2

La articulación 2 tiene una ley de control diferente, ya que es una articulación de cabeceo en lugar de alabeo. En este caso, el valor nulo de q_2 se obtiene cuando los centroides C_1 y C_4 están alineados con el eje y_0 . Considerando que el centroide $C_i = (x_0^i, y_0^i)$, la ley de control para la segunda articulación se define como:

$$q_2 = \text{signo}(L_2) \cdot L_2/k \quad (11)$$

Donde $L_2 = (x_0^4 - x_0^1)$ y k es una constante que relaciona la distancia a lo largo del eje x y el ángulo q_2 . En este caso, el valor de L_{2_th} , utilizado en el esquema de control de la Figura 8 es nulo ya que $x_0^4 = x_0^1$ en la configuración inicial.

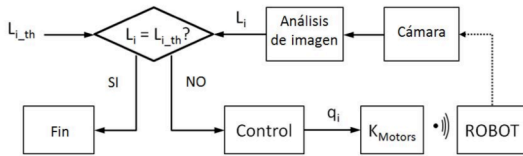


Figura 8. Algoritmo de autocalibración

5 EXPERIMENTOS

En este apartado se evalúa de forma experimental tanto el método de autocalibración presentado en el apartado anterior, como el esquema de control propuesto en el apartado 3, mediante un experimento *pick and place*.

5.1 AUTOCALIBRACIÓN

Antes de comenzar los experimentos *pick and place*, es necesario llevar a cabo una autocalibración para colocar los robots en la posición inicial. En la Figura 9 se muestran las distancias entre los marcadores medidas durante dicho proceso. Tal y como se mencionó en el apartado anterior, cada articulación se calibra de forma independiente, por lo que el número de iteraciones necesarias es diferente para cada una de ellas. Las distancias reales para L_1 y L_3 son 8 y 13 mm, respectivamente, siendo el factor de escala de 2.51. Así, los valores de L_{1_th} y L_{3_th} son 20.1 y 32.6

mm, respectivamente. Los errores de L_1 , L_2 y L_3 después de la calibración son 0.35, 0.06 y 0.02 mm, respectivamente. Las oscilaciones del robot durante el proceso se deben a las correcciones realizadas por la ley de control en cuanto al sentido de giro de las articulaciones, como consecuencia de errores en la estimación de la posición de los centroides.

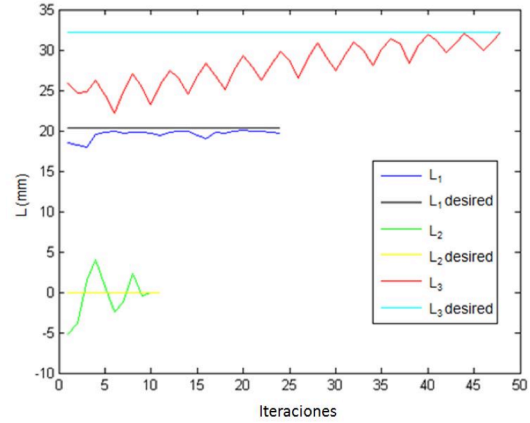


Figura 9. Distancia entre marcadores durante el proceso de autocalibración

5.1 EXPERIMENTOS PICK AND PLACE

Para evaluar la viabilidad e intuitividad del esquema de control presentado en la sección 3, se ha diseñado un experimento basado en la primera tarea del manual SAGES de habilidades laparoscópicas [19]. Dado que únicamente se dispone de un robot pinza, el experimento se ha adaptado para poder realizarlo con los dos robots presentes en la plataforma. Así, el experimento se divide en tres tareas básicas (Figura 10):

- **Tarea 1:** consiste en coger la pieza triangular con el robot pinza. Esta tarea se considerará completada cuando la pieza se ha retirado completamente de la base en la que está colocada.
- **Tarea 2:** esta tarea comprende la colocación de la pieza triangular en una posición diferente. Se considerará que se ha completado la tarea cuando la pieza se haya colocado y soltado por completo.
- **Tarea 3:** consiste en golpear la pieza con el robot bisturí hasta hacerlo caer de la base. El experimento termina una vez que la pieza cae de la base.

Para los experimentos, el bisturí eléctrico se ha sustituido por una pieza metálica, ya que tiene más sentido para el presente experimento. Para el desarrollo del experimento se ha pedido a los participantes que realicen la tarea con realimentación visual de la cámara, en lugar de con visión directa. Dado que el robot cámara se encuentra fuera del alcance del presente artículo, por comodidad se ha

hecho uso de una cámara comercial de alta resolución (Sony, Japón). De hecho, tal y como se observa en la Figura 10, ambas cámaras ofrecen un campo de visión muy similar, por lo que esta decisión no afecta al valor científico del trabajo que aquí se presenta.

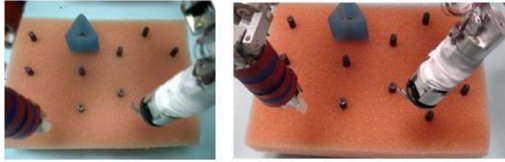


Figura 10. Imagen adquirida con el robot cámara (izquierda) y con la cámara comercial utilizada durante los experimentos (derecha)

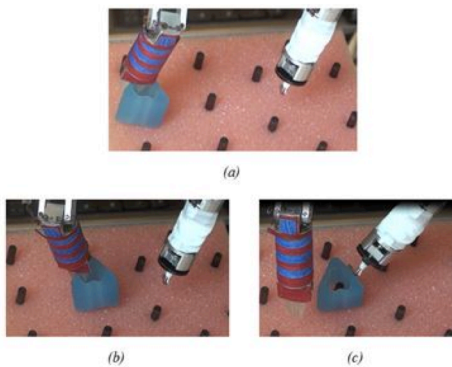


Figura 11. Protocolo del experimento: (a) Tarea 1, (b) Tarea 2, y (c) Tarea 3

Se han realizado dos tipos de experimentos; el primero de ellos con el objetivo de estimar la curva de aprendizaje asociada con el uso de la plataforma robótica, y el segundo con el objeto de verificar la destreza de los participantes con el sistema, a partir del tiempo empleado en la realización de la tarea completa. Los participantes en estos experimentos son técnicos en robótica, pero no cuentan con habilidades en el campo de la cirugía, por lo que no están familiarizados con la realización de tareas bajo visión en 2D. Este hecho es importante para poder evaluar la intuitividad del esquema de control desarrollado.

Tabla 2: Resultados de los experimentos *pick and place*

Usuario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tarea 1	23	19	26	119	10	52	55	14	24	18
Tarea 2	93	38	26	65	24	52	74	30	31	34
Tarea 3	19	5	19	8	13	9	77	9	3	9

Tiempo medido en segundos

Para estimar la curva de aprendizaje asociada con el uso del sistema, se han seleccionado cinco usuarios

que no han utilizado la plataforma con anterioridad, y se les ha pedido que realicen la misma tarea tres veces consecutivas, para las que se ha recogido el tiempo empleado. La Figura 11 muestra la media del tiempo empleado en realizar la tarea respecto al intento. Como se puede observar, las tres curvas decrecen significativamente con el número de intentos, aproximadamente un 70% para la primera tarea, y alrededor de un 70% para el resto de tareas. Para evaluar la destreza de los participantes con el sistema se ha pedido a diez usuarios que realicen el experimento (diferentes de los cinco utilizados para estimar la curva de aprendizaje). Los usuarios no estaban familiarizados con el sistema, pero se les concedió un periodo de entrenamiento, de entre 5 y 10 minutos. Los resultados se recogen en la Tabla 2. El tiempo medio empleado en realizar las tareas 1, 2 y 3 es de 36, 46.7 y 17.1, respectivamente. Estos valores se consideran aceptables si se comparan con los resultados obtenidos en otros trabajos, como en [19]. Las diferencias entre los tiempos empleados por diferentes participantes se deben esencialmente a la habilidad innata de los usuarios en el manejo de dispositivos hápticos. Además de estos diez usuarios, se ha contado con la colaboración de un cirujano especializado en cirugía general con experiencia en el uso de sistemas robóticos aplicados a este campo. El tiempo empleado por dicho cirujano en realizar las tareas ha sido de 15, 17 y 29 segundos para las tareas 1, 2 y 3, respectivamente. Durante el experimento, el especialista expresó su satisfacción con el sistema y declaró que el sistema le parecía intuitivo de manejar respecto a otros sistemas que había manejado.

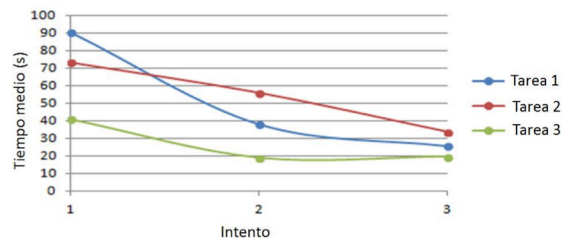


Figura 12. Curva de aprendizaje

6 CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado la arquitectura hardware y de control de una plataforma robótica para CMI. Debido a la falta de sensores internos en los robots, se ha desarrollado un esquema de control en bucle abierto, que cierra el propio usuario mediante correcciones basadas en la realimentación visual proporcionada por la cámara. El acoplamiento cinemático entre los sistemas maestro y esclavo proporciona un manejo intuitivo y fácil de utilizar del sistema. Asimismo, se ha realizado una autocalibración inicial basada en análisis de

imágenes, que permite colocar el robot en la configuración inicial de forma automática. El esquema de control propuesto se ha validado mediante una serie de experimentos *pick and place*. La curva de aprendizaje del sistema muestra que los usuarios se familiarizan rápidamente con el manejo de los robots. Además, los tiempos empleados por un conjunto de usuarios en realizar el experimento muestran que el sistema es sencillo de controlar. Además, un cirujano experto ha expresado su satisfacción con la intuitividad de la plataforma. Como trabajo futuro se plantea cerrar el bucle de control mediante el desarrollo de un control de posición basado en la estimación del efector final de los robots mediante análisis de imágenes.

Referencias

- [1] Derossis, A. M., G. M. Fried, M. Abrahamowicz, H. H. Sigman, J. S. Barkun, and J. L. Meakins, "Development of a model for training and evaluation of laparoscopic skills", *Am J Surg* 175, 1998, pp. 482-487.
- [2] Ding, J., K. Xu, R. Goldman, P. Allen, D. Fowler, and N. Simaan, "Design, simulation and evaluation of kinematic alternatives for Insertable Robotic Effectors Platforms in Single Port Access Surgery", in *Proceedings of the IEEE International Conference on robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1053-1058, 2010.
- [3] Forgione, A., "In vivo microrobots for natural orifice transluminal surgery. Current status and future perspectives", *SurgOncol.*, Vol. 18, pp. 121-129, 2009.
- [4] Karimyan, V., M. Sodergren, J. Clark, G. Z. Yang, and A. Darzi, "Navigation systems and platforms in natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES)", in *International Journal of Surgery*, Vol. 7(4), pp. 297-304, 2009.
- [5] Lehman, A. C., J. Dumpert, N. A. Wood, L. Redden, A. Q. Visty, S. Farritor, B. Varnell, and D. Oleynikov, "Natural orifice cholecystectomy using a miniature robot", *Surg End*, Vol. 23, pp. 260-266, 2009.
- [6] Morel, P., M. E. Hagen, P. Bucher, N. C. Buchs, and F. Pugin, "Robotic single-port cholecystectomy using a new platform: initial clinical experience", in *J GastrointestSurg*, Vol. 15 (12), pp. 2182-2186, 2011.
- [7] Niccolini, M., G. Petroni, A. Menciassi, and P. Dario, "Real-time control architecture of a novel Single-Port lapaRoscOPYlmaNual robot (SPRINT)", in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3395-3400, 2012.
- [8] Palep, J., "Robotic assisted minimally invasive surgery", *J Minim Access Surg.*, Vol. 5 (1), pp. 1-7, 2012.
- [9] Petroni, G., M. Niccolini, A. Menciassi, P. Dario, and A. Cuschieri, "A novel intracorporeal assembling robotic system for single-port laparoscopic surgery", *Surg End*, Vol 27(2), pp. 665-670, 2012.
- [10] Phee, S. J., S. C. Low, V. A. Huynh, A. P. Kencana, Z. L. Sun, and K. Yang, "Master And Slave Transluminal Endoscopic Robot (MASTER) for Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery (NOTES)", in *International Conference of the IEEE EMBS*, pp. 1192-1195, 2009.
- [11] Romanelli, J. R., L. Mark, and P. A. Omotosho, "Single port laparoscopic cholecystectomy with the TriPort system: a case report", in *Surgical Innovation*, Vol. 5 (3), pp. 223-228, 2008.
- [12] Salerno, M., S. Tognarelli, C. Quaglia, P. Dario, A. Menciassi, "Anchoring frame for intra-abdominal surgery", *The International Journal of Robotics Research*, 32: 360-370, 2013.
- [13] Shang, J., D. Noonan, C. Payne, J. Clark, M. Sodergren, A. Darzi, and G. Z. Yang, "An articulated universal joint based flexible access robot for minimally invasive surgery", in *Proceedings of the IEEE International Conference on robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1147-1152, 2011.
- [14] Susilo, E., P. Valdastrì, A. Menciassi, and P. Dario, "A miniaturized wireless control platform for robotic capsular endoscopy using advanced pseudokernel approach," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 156, pp. 49-58, 2009.
- [15] Tognarelli, S., M. Salerno, G. Tortora, C. Quaglia, P. Dario, A. Menciassi, "An endoluminal robotic platform for Minimally Invasive Surgery", in *Proc. IEEE RAS/EMBS BioRob*, 2012.
- [16] Tortora, G., P. Dario, A. Menciassi, "Array of robots augmenting the kinematic of endocavitary surgery", in *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2014.
- [17] Tortora, G., T. Ranzani, I. De Falco, P. Dario, A. Menciassi, A Miniature Robot for Retraction Tasks under Vision Assistance in Minimally Invasive Surgery, *Robotics*, 3, 1, 70-82, 2014.
- [18] Tortora, G., M. Salerno, T. Ranzani, S. Tognarelli, P. Dario, A. Menciassi, A modular magnetic platform for Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery (NOTES), *EMBC* 2013.
- [19] Tortora, G., T. Ranzani, I. De Falco, P. Dario, A. Menciassi, A Miniature Robot for Retraction Tasks under Vision Assistance in Minimally Invasive Surgery, *Robotics*, 3, 1, 70-82, 2014.
- [20] Zeng, L., and L. Zicheng, "An Approach to Position Sensorless Control System for Brushless DC Motor", in *Int. Conf. on Information Engineering and Computer Science (ICIECS)*, pp. 1-4, 2010.