

# DISEÑO MECÁNICO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO CAMARÓGRAFO CON APRENDIZAJE COGNITIVO

I. Rivas-Blanco, C. López-Casado, C. Pérez-del-Pulgar, F. García-Vacas, E. Bauzano, V.F. Muñoz  
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga, mclopezc@uma.es

J. C. Fraile

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid, jcfraile@eii.uva.es

## Resumen

*Este artículo describe el diseño mecánico y la arquitectura cognitiva de un asistente robótico camarógrafo que combina las ventajas de los dispositivos intra-abdominales y la navegación autónoma. El asistente robótico está compuesto por un robot cámara intra-abdominal con acople magnético y con dos grados de libertad. La inteligencia del robot se basa en una arquitectura cognitiva basada en memoria a largo plazo para almacenar el conocimiento del robot y capacidades de aprendizaje para mejorar el comportamiento del mismo. La estrategia de navegación del robot cámara combina un control reactivo basado en el seguimiento del instrumental quirúrgico; junto con un control proactivo basado en comportamientos predefinidos dependientes del estado actual de la tarea. Tanto la arquitectura cognitiva como el diseño mecánico han sido validados con una serie de experimentos que se detallan en el artículo. Previamente, todo el diseño e implementación son descritos.*

**Palabras Clave:** Mecatrónica, robótica médica, robótica cognitiva, control robótico, navegación robótica.

## 1 INTRODUCCIÓN

La cirugía mínimamente invasiva está globalmente aceptada y proporciona una serie de beneficios para los pacientes. Aun así, presenta una serie de limitaciones con respecto a la cirugía abierta convencional. Una de las principales limitaciones es la necesidad de un endoscopio que permita visualizar el campo de visión de la intervención. El movimiento del endoscopio está restringido por el puerto de acceso del mismo, el cual sólo proporciona cuatro grados de libertad (DoFs) de movimiento: dos rotacionales alrededor del punto de entrada, otro rotacional alrededor del eje longitudinal del endoscopio y por último uno translacional a lo largo de dicho eje. Esta limitación de movimiento se

traduce directamente en una limitación en el campo de visión, ya que aparecen muchas zonas ocultas a las que el endoscopio no puede acceder. Por otro lado, la laparoscopia convencional necesita de un asistente dedicado únicamente a la sujeción y movimiento del endoscopio. La fatiga y el estrés, especialmente en intervenciones de larga duración, pueden afectar a la calidad y a la estabilidad de la imagen.

Una posible solución para aumentar el campo de visión durante intervenciones laparoscópicas es el uso de endoscopios flexibles. Estos dispositivos disponen de DoFs adicionales, pero son complejos de usar. La falta de rigidez afecta la estabilidad de la imagen y la existencia de horizontes visuales fijos hacen que el cirujano se tenga que adaptar a vistas inclinadas o incluso invertidas [1]. Otra opción es el uso de dispositivos intra-abdominales. Estos dispositivos son introducidos en la cavidad abdominal a través de orificios naturales o a través de incisiones abiertas para introducir el instrumental médico. Diferentes mecanismos de fijación a la pared abdominal han sido explorados: sutura [2], adosada a la aguja [3]... pero sólo el acople magnético [4] permite el movimiento de los dispositivos. A través de un agarre magnético externo, la cámara puede ser desplazada por la cavidad abdominal accediendo a zonas inalcanzables por los endoscopios tradicionales [5]. La viabilidad de este tipo de dispositivos magnéticos ha sido validada en experiencias de clínica humana [6] y se ha demostrado que esta técnica proporciona una vista mayor que la obtenida con dispositivos fijos [7]. Algunos autores han diseñado dispositivos con dos DoFs (rotación e inclinación) que se activan por medio de motores internos [8]. Aunque estas soluciones aumentan el campo de visión en comparación con los endoscopios tradicionales, este tipo de dispositivos todavía necesitan un asistente para manejar el agarre externo.

Con respecto a la navegación de la cámara, existen robots quirúrgicos específicamente diseñados para sostener los endoscopios. Éstos mejoran la eficiencia y reducen el número de personal necesario [9]. Normalmente, los movimientos de la cámara están

restringidos a un número de comandos, tales como ‘derecha’, ‘izquierda’... indicando la dirección de movimiento de la cámara. Estas instrucciones deben ser comandadas por el cirujano, haciendo que distraiga su atención de la tarea quirúrgica que desempeña. Por el contrario, estrategias de auto guiado de la cámara reducen la carga de trabajo del cirujano, ya que sólo debe atender a las tareas de cirugía propiamente dichas. Las estrategias de movimiento automáticas se dividen en dos: seguimiento de instrumental y navegación basada en el flujo de trabajo del protocolo quirúrgico.

El seguimiento del instrumental es una técnica que se basa en el seguimiento de la punta del instrumental quirúrgico [10]. Muchas de estas técnicas se fundamentan en procesado de imágenes, generalmente utilizando marcas de color [11]. Esta técnica tiene la ventaja de que no se necesitan sensores adicionales, pero el seguimiento sólo es posible cuando las marcas están visibles. Hay autores que mejoran el guiado de la cámara prediciendo el movimiento del instrumental utilizando modelos de Markov [12]. Sin embargo, todas las estrategias siguen reglas estáticas tales como seguir un instrumento, o el punto medio de dos instrumentos...[13].

Algunos autores utilizan clasificadores probabilísticos para modelar las tareas quirúrgicas [14]. En estos casos, la estrategia de guiado depende del estado actual de la tarea [15]. En trabajos previos de nuestro grupo [16], se propuso una mejora del tradicional seguimiento del instrumental definiendo diferentes puntos de seguimiento dependiendo del estado actual de la tarea quirúrgica. Además, este trabajo incluía un mecanismo de aprendizaje basado en las preferencias de los distintos cirujanos para mejorar el comportamiento del robot. Aunque este método tiene en cuenta el flujo de trabajo de la intervención, la cámara permanecía estática en cada estado del mismo. Aunque todos los métodos proporcionan un movimiento autónomo, carecen de inteligencia y conocimiento como para ser considerados autónomos [17].

Este artículo propone un concepto novedoso de asistente robótico camarógrafo, que combina las ventajas de los dispositivos intra-abdominales y los sistemas de navegación autónomos. El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. El apartado 2 detalla el diseño mecánico del asistente robótico. En el apartado 3 se explica la arquitectura cognitiva que gestiona el movimiento automático del mismo. El apartado 4 incluye los experimentos y resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones están en el apartado 5.

## 2 ROBOT CÁMARA

Este apartado describe el diseño mecánico del asistente robótico camarógrafo y el modelo geométrico de la tarea.

### 2.1 DISEÑO MECÁNICO

La Figura 1 muestra el escenario de trabajo del asistente robótico. Éste está dividido en dos partes: un brazo robótico externo y un robot cámara interno. Ambos dispositivos están unidos a través de un agarre magnético que se encuentra ubicado en el efector final del brazo robótico. El robot cámara se introduce en la cavidad abdominal a través de una de las incisiones abiertas para introducir el instrumental médico. Una vez dentro de la cavidad abdominal, se sujeta a ésta a través de un acople magnético con el agarre externo. Este asistente robótico tiene seis DoFs: dos desplazamientos a través de la pared abdominal ( $d_x$  y  $d_y$ ), una rotación ( $\varphi$ ) generada por el robot externo; rotación e inclinación internas ( $\alpha$  and  $\beta$ ) y zoom digital que simula el movimiento entrante-saliente de los endoscopios tradicionales. El desplazamiento a lo largo de la pared abdominal permite acceder a cualquier área dentro de la cavidad abdominal, mientras que la rotación externa controla el horizonte de la imagen. Adicionalmente, la rotación e inclinación internas permiten ver el área de operación desde distintas perspectivas. Hecho bastante útil en imágenes 2D donde la percepción de profundidad se pierde.

El diseño mecánico del robot cámara se muestra en la Figura 2. El robot tiene las siguientes dimensiones: 30 mm × 27 mm × 88 mm, mientras que los imanes utilizados son de 20 mm de diámetro y 5 mm de altura. La cámara (modelo MO-F3506LSC-3T, Misumi Electronics Corp., Taiwan), de 8 mm de diámetro y 10.5 mm de longitud, tiene una resolución de 400 líneas TV, 50 fps y una distancia focal entre 5-10 cm, adecuada para proporcionar imágenes de alta resolución en un ambiente laparoscópico. La cámara incluye seis LEDs blancos, por lo que no se necesita iluminación adicional.

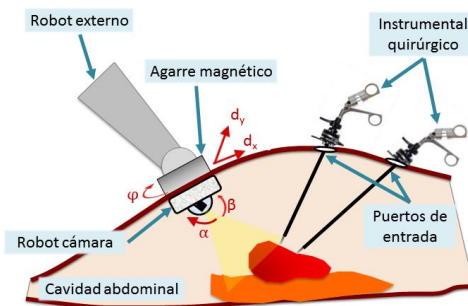


Figura 1. Escenario de trabajo.

El sistema de cableado que actúa sobre las rotaciones e inclinaciones internas puede verse en la Figura 3. La parte accionada está formada por dos mecanismos concéntricos (rotación e inclinación) que mueven la cámara en las direcciones indicadas por  $\alpha$  y  $\beta$ . La parte motora está compuesta por dos motores (motor 1 y 2) que se encargan de la actuación del sistema. Ésta se basa en la transmisión de movimiento entre las dos poleas de la parte motora (poleas 1 y 2) y la dos de la parte accionada (poleas 3 y 4). En la parte accionada, unos cables (rojo y azul) están sujetos a la polea del mecanismo de rotación (polea 3) y otros (verde y naranja) están sujetos a la polea del mecanismo de inclinación (polea 4). En cuanto a la parte motora, los cables rojo y azul están conectados a la polea del motor 1 (polea 1) y los verde y naranja a la polea del motor 2 (polea 2). Esta conexión hace que una rotación incremental,  $\theta_1$ , del motor 1 se transmita como una rotación incremental,  $\alpha$ , en el mecanismo de rotación. Por otro lado, una rotación incremental,  $\theta_2$ , del motor 2 se transite como una rotación incremental,  $\beta$ , en el mecanismo de inclinación. Suponiendo que no hay desplazamiento en los cables y que la anchura de los mismos es despreciable, las ecuaciones de la transmisión de movimiento pueden escribirse como:

$$\alpha = \frac{D_1}{D_3} \theta_1 \quad (1)$$

$$\beta = \frac{D_2}{D_4} \theta_2 \quad (2)$$

donde  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  y  $D_4$  son los diámetros de las poleas 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

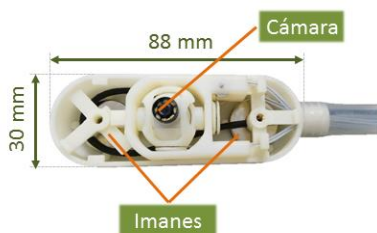


Figura 2. Vista desde arriba del robot cámara.

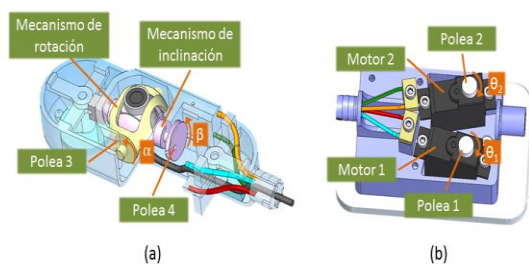


Figura 3. Sistema de cableado: (a) Parte accionada; (b) parte motora.

## 2.2 MODELO GEOMÉTRICO DE LA TAREA

El modelo geométrico de la tarea aparece en la Figura 4, donde el sistema de referencia global está indicado como  $\{0\}$  y el sistema de referencia de la imagen 2D es el  $\{I\}$ . El origen del sistema de coordenadas  $\{0\}$  está ubicado en el punto central de contacto del robot cámara con la pared abdominal. En cuanto al sistema de coordenadas  $\{I\}$ , su origen está ubicado en el centro de la imagen. El ancho,  $w$ , y alto de la imagen,  $h$ , dependen de la resolución. Los desplazamientos  $d_x$  y  $d_y$  originan movimientos de la imagen en los ejes  $X_0$  e  $Y_0$ , respectivamente. Por otro lado, la rotación externa,  $\varphi$ , origina una rotación de la imagen en el eje  $Z_0$ . El zoom de la imagen se calcula digitalmente a través de la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} w_z \\ h_z \end{pmatrix} = \frac{1}{\text{zoom}} \begin{pmatrix} w \\ h \end{pmatrix} \quad (3)$$

Donde  $w_z$  y  $h_z$  son el ancho y alto de la imagen para un valor determinado de zoom.

## 3 ARQUITECTURA CONGNITIVA DEL ROBOT CÁMARA

La arquitectura cognitiva (Figura 5) del robot cámara implementa la base del conocimiento del robot y las funciones de razonamiento para inferir la vista óptica en cada estado de la intervención. Para ello se basa en la información del escenario proporcionada a través del sistema de percepción. Una vez calculada la vista óptica, informa de la posición adecuada del robot cámara al sistema encargado de su movimiento. El módulo de interacción Hombre-Máquina permite la comunicación entre el robot cámara y el cirujano. Esta interacción se realiza a través de un interfaz hombre-máquina (HMI) que directamente comanda al robot un movimiento en concreto; y a través de un sistema de reconocimiento de gestos que permite inferir en qué estado de la tarea se encuentra la intervención.

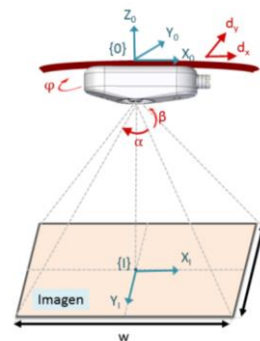


Figura 4. Modelo geométrico de la tarea.

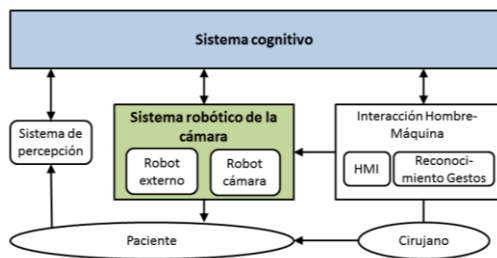


Figura 5. Arquitectura cognitiva.

Este sistema cognitivo combina un comportamiento reactivo basado en el seguimiento del instrumental junto con un comportamiento proactivo dependiente del flujo de trabajo de la intervención. De esta manera el asistente robótico es capaz de acomodar la vista de la cámara al estado actual de la intervención, pero con flexibilidad suficiente como para adaptar el comportamiento a situaciones no planificadas.

El sistema de reconocimiento de gestos ha sido analizado en trabajos previos [18][19], de ahí que quede fuera del ámbito de este trabajo. Para los experimentos, el sistema de percepción se ha reducido a un sistema de visión que monitoriza la posición de unas marcas.

### 3.1 SISTEMA COGNITIVO

Como se muestra en la Figura 6, el sistema cognitivo del robot está compuesto por dos tipos de memoria. La memoria a largo plazo que contiene el conocimiento global del sistema y en la que se codifica la información durante largos períodos de tiempo; y la memoria de trabajo, en la que se combinan la información del sistema cognitivo y la información de la memoria a largo plazo para presentar la situación actual.

La memoria a largo plazo se divide a su vez en memoria semántica y procedural. La primera almacena el conocimiento actual de la situación y se modela como una base de datos. Para el escenario de este trabajo, la memoria semántica incluirá información para el reconocimiento de los objetos a través de algoritmos de visión de segmentación. Es decir, se almacenarán los códigos HSV de las marcas de color asociadas a cada uno de los objetos que es necesario ubicar dentro del escenario, principalmente el instrumental quirúrgico. También, se incluirá información sobre las distintas fases en las que se divide el protocolo quirúrgico. Por cada protocolo quirúrgico a realizar se debe almacenar cada una de las fases que lo componen. Por último, se almacena también información sobre el punto de vista de la cámara para cada una de las fases del protocolo definidas anteriormente si se siguiera un comportamiento proactivo puro.

Por otro lado, la memoria procedural está asociada con el conocimiento no consciente. En este tipo de memoria se codifican las estrategias de navegación de la cámara. Éstas están divididas en dos grupos: seguimiento de instrumental y navegación basada en la fase del protocolo quirúrgico. La primera estrategia se considera un comportamiento reactivo; mientras que la segunda se considera proactivo. Ambas estrategias se basan en acciones pre-programadas rígidas y no contienen inteligencia ni conocimiento para ser consideradas estrategias de navegación autónomas. Mientras que el comportamiento reactivo tiene flexibilidad suficiente para seguir al instrumental médico, no posee la capacidad de adaptar el punto de vista dependiendo de la tarea que se está haciendo en el momento. Por el contrario, el comportamiento proactivo tiene la flexibilidad de ofrecer diferentes puntos de vista dependiendo del estado del protocolo, pero este comportamiento no puede ser modificado durante la duración de dicho estado. Por lo tanto, una estrategia que combine ambos comportamientos podría ofrecer un comportamiento proactivo sin perder las ventajas del seguimiento reactivo del instrumental.

Esta estrategia combinada se basa en calcular el foco de atención de la imagen ( $P_{FOA}$ ) como una composición ponderada de las contribuciones de un comportamiento y otro:

$$P_{FOA} = K_r \cdot P_{INSTRUMENTAL} + K_p \cdot P_{ESTADO} \quad (4)$$

Donde  $K_r$ ,  $K_p$  son los pesos asociados al comportamiento reactivo y proactivo, respectivamente. Estos pesos deben cumplir que  $K_r, K_p \in [0,1] / K_r + K_p = 1$ . El valor de estos pesos será aprendido a través del algoritmo de refuerzo que será descrito en el siguiente apartado.

En cuanto a la contribución reactiva, la posición considerada para el seguimiento de las dos herramientas utilizadas en el escenario (Figura 1) se calcula de la siguiente manera:

$$P_{INSTRUMENTAL} = K_{TOOLS} \begin{pmatrix} P_D \\ P_I \end{pmatrix} \quad (5)$$

Siendo  $K_{TOOLS} = (\delta_D \delta_I) / (\delta_D + \delta_I)$ , donde  $\delta_D$  y  $\delta_I$  son variables binarias que son verdaderas cuando la herramienta derecha y la izquierda, respectivamente, están en movimiento. Las posiciones de cada una de las herramientas son obtenidas a través de marcadores en las mismas y utilizando algoritmos de visión. Similarmente, la posición base asociada a la fase del protocolo ( $P_{ESTADO}$ ) y por tanto base del comportamiento proactivo, se obtiene de manera equivalente, a través de marcadores en el escenario quirúrgico.

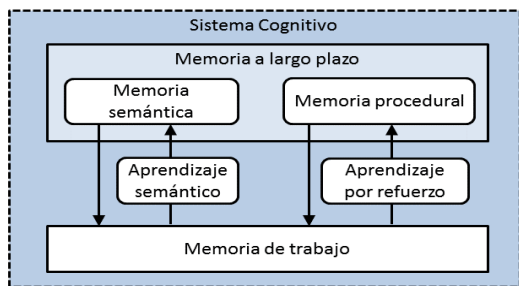


Figura 6. Sistema cognitivo.

### 3.2 APRENDIZAJE

El comportamiento del robot depende altamente de los valores de  $K_r$  y  $K_p$ . Valores elevados de  $K_r$  hacen que la cámara siga a las herramientas independientemente de la fase del protocolo, un comportamiento normalmente más cómodo para principiantes. Sin embargo, valores bajos de  $K_r$  hacen que la estrategia de navegación dependa del estado actual, comportamiento más apropiado para cirujanos expertos. Por lo tanto, para cada usuario, el sistema debe aprender los valores de  $K_r$  y  $K_p$  que proporcionan un mejor comportamiento del robot, es decir, que maximicen la satisfacción y rendimiento del usuario. El proceso de aprendizaje de estos valores se hace a través de un algoritmo de aprendizaje por refuerzo. Este método se basa en una serie de reglas ponderadas dependiendo del valor de refuerzo proporcionado al sistema. Este refuerzo depende de la adecuación de la regla elegida en cada momento, pudiendo ser un refuerzo o una penalización de la misma, dependiendo de lo acertada o no que fuese la acción para el estado actual del sistema [20].

Las reglas se codifican con una precondition (“SI”) y una acción (“ENTONCES”). La precondition depende de la fase actual del protocolo y la acción incluye todos los posibles valores de  $K_r = \{K_{r1}, K_{r2}, \dots, K_{rm}\}$  y  $K_p = \{K_{p1}, K_{p2}, \dots, K_{pm}\}$  tal que  $K_{pi} = 1 - K_{ri}$ . Por tanto, cada regla se codifica como:

$$SI\ fase = i\ ENTONCES\ K_r = K_{ri}\ y\ K_p = K_{pi} \quad (6)$$

Donde  $1 \leq i \leq n$ , siendo  $n$  el número de fases del protocolo. Para cada fase se generan  $m$  reglas posibles, las  $m$  posibles combinaciones de las constantes  $K_r$ ,  $K_p$ . Además, todas las reglas llevan asociada una ponderación dependiente del refuerzo siguiendo la técnica de  $Q$ -learning [21]:

$$Q_i = (1 - \tau) \cdot Q_{i-1} + \tau \cdot (\text{refuerzo} + \mu \cdot EFR) \quad (7)$$

Donde  $0 \leq \tau \leq 1$  es la tasa de aprendizaje;  $0 \leq \mu \leq 1$ , es el factor de descuento y EFR es el refuerzo futuro

esperado. La tasa de aprendizaje determina la importancia del nuevo conocimiento frente al antiguo; mientras que el factor de descuento determina la importancia de los refuerzos futuros. Finalmente, la manera de elegir una regla u otra en función del estado se realiza utilizando la política  $\epsilon$ -greedy [22]. Según ésta, las reglas cuya precondition se cumpla, son seleccionadas aleatoriamente con una probabilidad  $\epsilon$  y la acción con mayor ponderación es seleccionada con una probabilidad  $1 - \epsilon$ .

En cuanto al cálculo del refuerzo se hace a través de un modelo de lógica difusa que evalúa el comportamiento del robot durante cada fase. Este modelo depende de tres parámetros:

$$\text{refuerzo} = \text{difuso} (n\text{Correcciones}, \text{tiempo}, \text{satisfacción}) \quad (8)$$

Donde  $n\text{Correcciones}$  es el número total de correcciones que el usuario hace de la cámara utilizando el interfaz hombre-máquina de la arquitectura.  $\text{Tiempo}$ , es el tiempo total que tarda el usuario en completar una fase. Por último,  $\text{satisfacción}$ , es una variable cualitativa que mide cómo de satisfecho está el usuario tras haber completado la fase. El modelo de lógica difusa ha sido diseñado de manera que la satisfacción del usuario predomine sobre las otras dos variables. El tiempo y el número de correcciones informan si el comportamiento de la cámara ha ayudado al cirujano durante la tarea. Sin embargo, estas dos variables dependen de la destreza del cirujano y de las condiciones particulares de cada tarea.

En la Figura 7 se puede ver gráficamente todo el proceso de aprendizaje que se acaba de explicar.

### 4 RESULTADOS

El robot cámara y la arquitectura cognitiva presentados en este artículo han sido testeados y evaluados haciendo uso de la plataforma robótica quirúrgica CISOBOT, desarrollada por la Universidad de Málaga [23]. Esta plataforma está formada por dos brazos robóticos de 6 DoFs. A los efectores finales de los mismos se han conectado dos

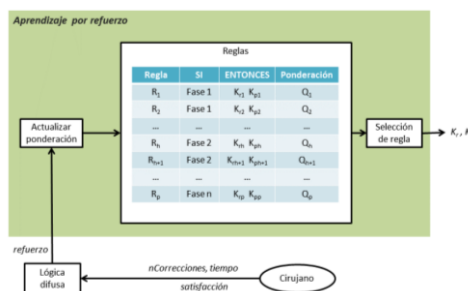


Figura 7. Algoritmo de aprendizaje por refuerzo.

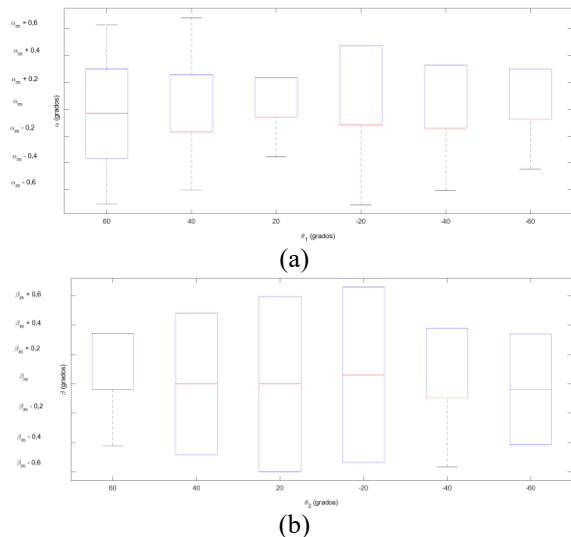


Figura 8. Distribuciones para los datos experimentales del análisis de repetitividad: (a) rotación; (b) inclinación.

herramientas quirúrgicas de agarre comerciales, previamente motorizadas para automatizar la apertura y cierre. Para teleoperar estas dos herramientas se han utilizado dos dispositivos hápticos. Por otro lado, el robot que controla los movimientos del robot cámara es una Barret WAM (Barrett Technology, Inc.), un brazo de 7 DoFs con baja fricción y baja inercia. Toda la arquitectura ha sido montada en ROS (Robotic Operating System) y utilizando como base cognitiva SOAR [24], una arquitectura cognitiva de propósito general.

Se han realizado dos tipos de experimentos, uno encaminado al análisis del robot cámara y otro para testear y comprobar la estrategia de navegación de la cámara dentro la arquitectura cognitiva. A continuación, se detalla los experimentos realizados y los resultados de los mismos.

#### 4.1 ANÁLISIS DEL ROBOT CÁMARA

Este experimento va encaminado al estudio del comportamiento de los grados de libertad internos del robot cámara. El control interno de la rotación ( $\alpha$ ) y la inclinación ( $\beta$ ) se realiza a través de un bucle abierto lo que impide medir la orientación de la cámara en un escenario real. Debido a esto, el comportamiento de estos movimientos ha sido estudiado a través de un análisis de repetitividad. En concreto, se han seleccionado 6 posiciones de los motores 1 y 2:  $\theta_1$  y  $\theta_2$ . Cada una de estas posiciones se ha repetido 10 veces y se ha medido el valor de  $\alpha$  y  $\beta$  para cada una de ellas. Las posiciones elegidas fueron:  $\pm 60^\circ$ ,  $\pm 40^\circ$ , y  $\pm 20^\circ$ . En la Figura 8 se ve la distribución de los datos obtenidos, donde  $\alpha_m$  y  $\beta_m$  representan el valor medio de  $\alpha$  y  $\beta$  respectivamente. Como se puede observar los valores medidos están

dentro del rango  $[\alpha_m - 0.7, \alpha_m + 0.7]$  y  $[\beta_m - 0.6, \beta_m + 0.65]$ . Teniendo en cuenta que el valor máximo para estos parámetros es de  $\pm 30$  grados, el máximo error es de 2.3% para  $\alpha$  y 2% para  $\beta$ . Estos errores son aceptables para mover la cámara dentro del ámbito quirúrgico, ya que este tipo de tareas no necesitan una precisión demasiado elevada. De hecho, posicionando la cámara a 10cm de altura, un error de  $0.7^\circ$  en la orientación se traduce en un error de 1.22mm en el área mostrada por la cámara, lo que se puede considerar despreciable.

#### 4.2 ESTRATEGIA DE NAVEGACIÓN

El objetivo de este experimento es probar la estrategia de navegación del robot cámara propuesto en este artículo. El experimento se basa en la primera tarea del manual SAGES para cirugía laparoscópica [25]. El principal objetivo de esta tarea es ejercitar la percepción en un escenario 2D, por lo que es adecuada para validar si la estrategia de navegación propuesta ayuda a los cirujanos o no. El escenario del experimento se puede ver en la Figura 9, éste es un tablero de clavijas comercial con dos anillos de goma (Anillo 1 y 2) y marcas de colores para identificar las distintas áreas de interés dentro del tablero. El experimento consiste en coger y ubicar en clavijas determinadas cada uno de los anillos. Siendo la secuencia de acciones la siguiente:

- *Estado 1.* Coger el anillo 1 de la clavija 1 con la herramienta izquierda.
- *Estado 2.* Transferir el anillo 1 de la herramienta izquierda a la derecha.
- *Estado 3.* Colocar el anillo 1 en la clavija 4.
- *Estado 4.* Coger el anillo 2 de la clavija 3 con la herramienta derecha.
- *Estado 5.* Transferir el anillo 2 de la herramienta derecha a la izquierda.
- *Estado 6.* Colocar el anillo 2 en la clavija 2.

Durante la realización de esta tarea el robot cámara se mueve de manera autónoma según la estrategia descrita en este artículo. Si el usuario no se encuentra cómodo con la vista presentada, puede modificarla a través del interfaz hombre-máquina también incluido en la arquitectura.

El experimento ha sido realizado por usuarios inexpertos y con el algoritmo de aprendizaje por refuerzo habilitado, de manera que la aportación de la estrategia reactiva y proactiva se adapte a cada uno de los usuarios. El objetivo de este experimento es analizar si la navegación aprende los parámetros  $K_r$  y  $K_p$  que maximizan el refuerzo obtenido en cada acción decidida por la arquitectura. Cada usuario ha realizado 15 repeticiones de la tarea anteriormente descrita. Los valores asociados al algoritmo de  $Q$ -



Figura 9. Vista inicial del experimento de navegación.

learning (ecuación (7)) elegidos son:  $\tau = 0.3$  y  $\mu = 0.9$ . Estos valores han sido elegidos para que la información ya obtenida prevalezca sobre la nueva. En cuanto al parámetro asociado a la política  $\epsilon$ -greedy, se ha elegido  $\epsilon = 0.4$ , para las 10 primeras repeticiones y  $\epsilon = 0.2$ , para las restantes. De esta manera, inicialmente se favorece la exploración de nuevos valores y para finalizar se explotan los datos ya conocidos.

La Figura 10 muestra los valores de  $K_r$  ( $K_p = 1 - K_r$ ) para cada usuario, definidos como la moda estadística de los resultados obtenidos en las 15 repeticiones. Se puede observar como los estados 1, 3, 4 y 6 tienen valores de  $K_r$  por debajo de 0.5. En estos casos los usuarios prefieren un control proactivo al reactivo. Sin embargo, en los estados 2 y 5 los valores  $K_r$  de están cercanos a la unidad, lo que implica que los cirujanos prefieren en estos casos un seguimiento del instrumental. También se puede observar como el valor  $K_r$  de es ligeramente distinto para cada usuario, debido a las preferencias particulares de cada uno.

Por otro lado, la Figura 11 muestra la frecuencia de aparición a lo largo de todo el experimento del valor de  $K_r$  que el sistema finalmente aprende para cada usuario. La barra roja representa la frecuencia global a lo largo de los 15 experimentos. Las otras tres barras representan la evolución de este porcentaje a lo largo del experimento. Como se puede observar, durante las cinco primeras repeticiones, la frecuencia de aparición del valor final de  $K_r$  elegido por el sistema es baja. Conforme el sistema va aprendiendo, en sucesivas repeticiones, se puede observar como dicha frecuencia aumenta, siendo máxima en las últimas 5 repeticiones, donde el sistema ha aprendido por completo el comportamiento con el que el usuario se siente más cómodo.

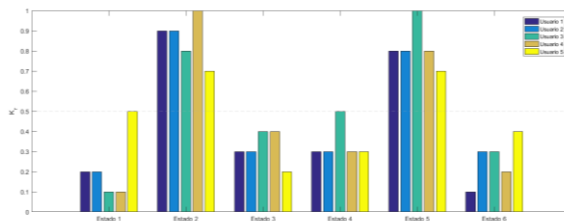


Figura 10. Valores de  $K_r$  aprendidos.

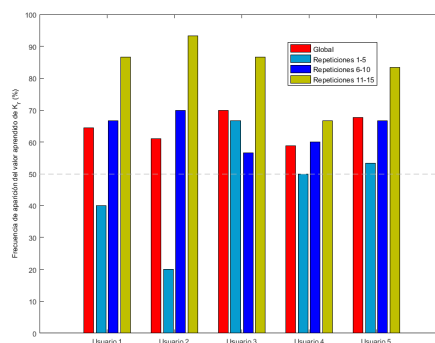


Figura 11. Frecuencia de aparición del valor aprendido de  $K_r$ .

## 5 CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado el diseño mecánico y la arquitectura cognitiva de un novedoso concepto de asistente robótico camarógrafo. Éste está compuesto por un dispositivo intra-abdominal que contiene una cámara de alta resolución con un acople magnético que se conecta a un robot externo para su movimiento. Un novedoso mecanismo de cableado permite mover en rotación e inclinación la cámara.

La arquitectura cognitiva que controla el movimiento autónomo del robot cámara proporciona una estrategia de navegación con flexibilidad suficiente como para adaptarse a distintos usuarios y reaccionar ante situaciones imprevistas. Los resultados experimentales muestran como el punto de vista proporcionado por el robot cámara ayuda a los usuarios a realizar las tareas quirúrgicas.

## Referencias

- [1] V. Karimyan, M. Sodergren, J. Clark, G.Z. Yang, and A. Darzi, "Navigation systems and platforms in natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES)," *Int. Journal of Surgery*, vol. 7, no. 4, pp.297-304, 2009.
- [2] T. Hu, P.K. Allen, N.J. Hogle, D.L. Fowler, "Insertable surgical imaging device with pan, tilt, zoom and lighting," *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 10, pp. 1373-1389, Oct. 2009.

- [3] C.A. Castro, S. Smith, A. Alqassis, T. Ketterl, Y. Sun, S. Ross, A. Rosemurgy, P.P. Savage, R.D. Gitlin, "MARVEL: a wireless miniature anchored robotic videoscope for expedited laparoscopy," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2012, pp. 2926-2931.
- [4] Valdastrì P, Quaglia C, Buselli E, Arezzo A, Di Lorenzo N, Morino M, Menciassi, P. Dario, "A magnetic internal mechanism for precise orientation of the camera in wireless endoluminal applications," *Endoscopy*, vol. 42, no. 6, pp. 481-486, 2010.
- [5] A.C. Lehman, J. Dumpert, N.A. Wood, L. Redden, A.Q. Visty, S. Farritor S, B. Varnell, D. Oleynikov, "Natural Orifice Cholecystectomy Using a Miniature Robot," *Surg Endosc*, vol. 23, pp.260-266, 2009.
- [6] J. Cadeddu, R. Fernandez, M. Desai, R. Bergs, C. Tracy, S.J. Tang, P. Rao, M. Desai, D. Scott, "Novel Magnetically Guided Intra-abdominal Camera to Facilitate Laparoendoscopic Single-Site Surgery: initial human experience," *Surg Endosc*, vol. 23, no. 8, pp.1894-1899, 2009.
- [7] M. Fakhry, B. Gallagher, F. Bello, G.B. Hanna, "Visual Exposure Using Single-Hand Magnet-Driven Intra-abdominal Wireless Camera in Minimally Access Surgery," *Surg Endosc*, vol. 23, pp. 539-543, 2009.
- [8] M. Simi, M. Silvestri, C. Cavallotti, M. Vatteroni, P. Valdastrì, A. Menciassi, P. Dario, "Magnetically Activated Stereoscopic Vision System for Laparoscopic Single-Site Surgery," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 18, no. 3, pp. 1140-1151, 2013.
- [9] R.H. Taylor, P. Kazanzides, "Medical Robotics and Computer-Integrated Interventional Medicine", *Adv. in Computers*, vol. 73, pp. 219-260, 2008.
- [10] M. Azizian, M. Khoshnam, N. Najmaei, R.V. Patel, "Visual servoing in medical robotics: A survey. Part I: Endoscopic and direct vision imaging—Techniques and applications," *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg*, vol. 11, no. 1, pp. 67-79, 2013.
- [11] A. Casals, J. Amat, and E. Laporte, "Guidance of an assistant robot in laparoscopic surgery," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, Apr 1996, pp. 895–900.
- [12] O. Weede, A. Bihlmaier, J. Hutzl, B.P. Müller-Stich, H. Wörn, "Towards Cognitive Medical Robotics in Minimal Invasive Surgery" *Proc. of the Conf. on Adv. in Robotics*, 2013, pp. 1–8.
- [13] B.W. King, L.A. Reisner, A.K. Pandya, A.M. Composto, R.D. Ellis, M.D. Klein, "Towards an autonomous robot for camera control during laparoscopic surgery," *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech.*, vol. 23, pp. 1027–1030, 2013.
- [14] J. Rosen, J.D. Brown, L. Chang, M.N. Sinanan, B. Hannaford, "Generalized approach for modeling minimally invasive surgery as a stochastic process using a discrete Markov model," *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 53, no. 3, pp. 399–413, 2006.
- [15] S.Y. Ko, J. Kim, D.S. Kwon, and W.J. Lee, "Intelligent interaction between surgeon and laparoscopic assistant robot system," *IEEE Int. Workshop on Robots and Human Interactive Communication*, pp. 60- 65, Oct. 2005.
- [16] I. Rivas-Blanco, B. Estebanez, M. Cuevas-Rodríguez, E. Bauzano, V.F. Muñoz, "Towards a cognitive camera robotic assistant," *IEEE RAS & EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 2014, pp. 739-744.
- [17] A. Pandya, L. A. Reisner, B. King, N. Lucas, A. Composto, M. Klein, R.D. Ellis, "Review A Review of Camera Viewpoint Automation in Robotic and Laparoscopic Surgery", *Robotics*, vol. 3, pp. 310-329, 2014.
- [18] E. Bauzano, B. Estebanez, I. Garcia-Morales, and V.F. Muñoz- Martínez, "Collaborative Human-Robot System for HALS suture procedures" *IEEE Systems Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 957-966, 2014.
- [19] B. Estebanez, P. del Saz-Orozco, I. Rivas-Blanco, E. Bauzano, V.F. Muñoz, I. García-Morales, "Maneuvers recognition in laparoscopic surgery: artificial neural network and hidden Markov model approaches," *IEEE RAS/EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 2012, pp. 1164-1169.
- [20] Y. Song, Y-B. Li, C-H. Li, G-F. Zhang, "An efficient initialization approach of Q-learning for mobile robots," *Int. Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 166-172, 2012.
- [21] M.L. Littman, "Value-function reinforcement learning in Markov games," *Journal of Cognitive Systems Research*, vol. 2, pp. 55-66, 2001.
- [22] M. Tokic, G. Palm, "Value-Difference Based Exploration: Adaptive Control between Epsilon-Greedy and Softmax," *Proc. of the 34th Annual German Conf. on Adv. in artificial intelligence*, Berlin, Germany, 2011, pp. 335-346.
- [23] C.J. Pérez-del-Pulgar, I. García-Morales, I. Rivas-Blanco, V.F. Muñoz, "Navigation method for teleoperated single-port access surgery with soft tissue interaction detection," *IEEE Systems Journal*, in press, 2016.
- [24] J. Laird, "Extending the Soar Cognitive Architecture", *Proc. of the first AGI conference*, 2008, pp. 224-235.
- [25] I. Choy, A. Okraíneć, "Fundamentals of laparoscopic surgery-FLS", *The SAGES manual of Quality, Outcomes and Patient Safety*, vol. 46, pp. 461-471, 2012.