

DISEÑO Y CONTROL DE UN ASISTENTE ROBÓTICO PARA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA

Victor F. Muñoz, J. Gómez de Gabriel, J. Fernández Lozano, I. García Morales, C. Pérez del Pulgar, M. Azouaghe

Instituto de Automática y Robótica Avanzada de Andalucía. Universidad de Málaga
Severo Ochoa, 4. Parque tecnológico de Andalucía
E-mail: victor@ctima.uma.es
Málaga
España

Resumen

Este artículo presenta un asistente robótico para ayudar en operaciones de cirugía mínimamente invasiva. El sistema permite el control directo del posicionamiento de la cámara en el interior de la cavidad abdominal, tanto mediante órdenes por voz del cirujano como por teleoperación. Este sistema es una evolución de un proyecto previo basado en un manipulador industrial. El nuevo sistema mantiene todas las prestaciones del diseño anterior, pero incorpora un brazo diseñado especialmente para esta aplicación. Este prototipo no requiere ninguna modificación de un quirófano estándar (mobiliario o instrumental quirúrgico) para su instalación y puesta en funcionamiento. El sistema se ha probado utilizando simuladores de paciente y tejidos in vitro.

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de cirugía mínimamente invasivas, tales como la laparoscopia, han surgido como un nuevo campo para la investigación en robótica. En estas intervenciones, el cirujano sólo utiliza la información visual suministrada por una cámara fijada al endoscopio. De este modo, el cirujano manipula el laparoscopio y la cámara de vídeo dentro de la cavidad abdominal para explorar las estructuras anatómicas y sus patologías. Puesto que estas operaciones pueden durar hasta dos (o incluso más) horas, la imagen de la cámara puede sufrir una pérdida de estabilidad considerable. Asimismo, la capacidad para enfocar un punto de interés puede empeorar. En tal situación, un asistente robótico, capaz de mover la cámara laparoscópica de acuerdo a las órdenes por voz del cirujano (permitiéndole utilizar ambas manos en la operación), podría convertirse en una herramienta muy útil en la sala de operaciones.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las técnicas laparoscópicas implican el uso de instrumentos alargados que se insertan a través de unas pequeñas incisiones en la pared abdominal del paciente. Una cámara especial, cuya óptica también se introduce en el abdomen, ayuda al cirujano a manipular los instrumentos y realizar la operación [11]. De esta manera, existen dos posibilidades para desarrollar un asistente robot: moviendo los instrumentos o moviendo la cámara. Cada una de estas opciones se centra en un objetivo diferente: los instrumentos robotizados pueden ayudar para llevar a cabo telecirugía, desplazando al cirujano desde la sala de operaciones a un emplazamiento remoto; una cámara robotica, en cambio, permite mejorar la coordinación y eficiencia, y libera a un segundo cirujano (que se encarga de mover la cámara) para poder asistir al cirujano principal, o para llevar a cabo otra operación en una sala de operaciones diferente.

Una revisión de la literatura muestra diferentes maneras de afrontar el desarrollo de un asistente laparoscópico.

En 1995 Taylor y otros [12] propusieron un sistema completo que incluía un manipulador, un efector final especial para sostener la cámara laparoscópica y una nueva estrategia de control. El manipulador tenía siete grados de libertad (gdl) divididos en tres componentes: un componente de translación (tres gdl), un componente para asegurar el movimiento en torno a un centro de rotación remoto (dos gdl) y un componente distal (dos gdl) que completaba los cuatro gdl que ofrece un punto de inserción (giro, elevación, desviación y penetración). De este modo, la orientación de la cámara a través de la incisión estaba desacoplada de su posicionamiento. El interfaz estaba basado en un joystick montado sobre las herramientas quirúrgicas, puesto que un sistema por reconocimiento de voz no era muy viable en aquel momento.

Green, en SRI International [6] desarrolló un concepto diferente. El propósito de este sistema se centraba en explorar la posibilidad de un esquema de telecirugía, apropiado no solo para cirugía mínimamente invasiva, sino también para cirugía abierta. De este modo, se incluyeron dos manipuladores (cinco gdl) en el subsistema local (aunque la incorporación de dos manipuladores de siete gdl estaba ya prevista), y se desarrolló una estación de trabajo remota completa, que incluía video y audio, y dos manipuladores maestros con realimentación de esfuerzos. Una cámara montada en un tercer manipulador proporcionaba una vista del campo quirúrgico. Este concepto de telecirugía fue mejorado posteriormente y llevado a una fase comercial en el sistema Da Vinci de Intuitive Surgical (Guthart, 2000).

El sistema HISAR [4] presentó una nueva configuración del manipulador. Se trataba de un robot de siete gdl montado en el techo, con tres gdl para posicionar la cámara y cuatro gdl para conseguir la orientación adecuada. Dos de estos ejes de orientación eran pasivos para garantizar la acomodación con el punto de entrada. Como este punto actúa como un fulcro, es necesario tener un conocimiento exacto de su posición para mover la cámara con precisión. Para conseguir esto se propuso un procedimiento para recalcular el punto de pivote en línea.

Hurteau [8] propuso un sistema basado en un manipulador industrial de seis gdl, modificado por medio de una articulación universal entre el efector final y el portador de la cámara. Este dispositivo permite colocar el robot lejos del paciente, de manera que no necesita fijarse a la camilla. Además, el uso de ejes pasivos proporciona una manera simple de afrontar el problema de control de movimiento evitando la posible aplicación de esfuerzos no deseados sobre el paciente.

El sistema de la Universitat Politècnica de Catalunya [1][2] proporciona un paso más, y muestra un sistema de control capaz de mover la cámara siguiendo los movimientos de los instrumentos. De este modo permite al cirujano olvidar el problema del control de la cámara y así permitirle concentrarse en la operación propiamente dicha. El sistema está basado en un manipulador industrial SCARA modificado con una articulación universal en el efector final. Una extensión de este dispositivo permite liberar espacio cerca de la camilla dado que el robot no necesita estar situado en justo al lado de la misma. El control de la cámara se consigue mediante un sistema de visión por computador que sigue unas marcas especiales en los instrumentos.

El Computer Motion Aesop [13] Es un sistema comercial proyectado para mover la cámara de acuerdo a unos comandos del cirujano, primero a través de un pedal y, más tarde, a través de un sistema de reconocimiento de voz. Se trata de un robot de cuatro gdl fijado a la camilla que presenta un efector final con tres ejes (dos pasivos y uno activo). Los ejes pasivos garantizan la acomodación entre la cámara y el punto de inserción, y el eje activo gira la cámara alrededor de su eje longitudinal. Se han realizado muchas operaciones quirúrgicas utilizando este sistema, y ha recibido la aprobación de la FDA (*Food and Drug Administration*).

Otro dispositivo comercial es el Laparobot [3] de EndoSista. Este sistema ha sufrido diferentes modificaciones desde una configuración experimental hasta llegar finalmente a una versión comercial. Está basado en un posicionador de tres gdl que soporta tres ejes activos que orientan la cámara. Un eje adicional ofrece la posibilidad de trabajar con endoscopios con ángulo distinto de cero. No incorpora ningún eje pasivo que asegure la acomodación entre la cámara y la pared abdominal. En lugar de esto, el sistema de orientación está diseñado para mover la cámara alrededor de un centro de rotación remoto. El robot debe ser situado junto al paciente de tal modo que su centro de rotación coincida exactamente con el punto de inserción.

El sistema Black Falcon [9] presenta una visión diferente. Su objetivo fue sujetar un instrumento, no la cámara. De esta forma, el sistema tiene un manipulador esclavo de ocho gdl y un manipulador maestro de siete gdl (incluyendo realimentación de esfuerzos en tres de sus ejes). El manipulador esclavo separa un sistema de cuatro gdl para mover el instrumento de acuerdo a las restricciones en el punto de inserción, y una muñeca de cuatro gdl para trabajar dentro del paciente. Para garantizar que no se produzca ningún daño en el punto de inserción, la estructura mecánica de los cuatro ejes implicados está diseñada para acomodarse necesariamente a las restricciones.

3. DISEÑO CINEMÁTICO DEL ROBOT

El propósito principal del sistema propuesto es asistir al cirujano moviendo la cámara de acuerdo a sus órdenes. En esta fase no se pretende la robotización de ningún instrumento. Por otra parte, para ser una solución práctica, debe cumplir las siguientes condiciones [8]:

1. El sistema resultante debe evitar (o al menos minimizar) modificaciones en un quirófano estándar.
2. No debe ser voluminoso.
3. Debe ser seguro
4. Los cirujanos deben ordenar los movimientos de una forma sencilla

De acuerdo a estas condiciones, el primer paso fue elegir una configuración cinemática. Como se puede observar en la literatura, la mayoría de los sistemas -si no todos- separan el problema del posicionamiento del problema de la orientación. De esta manera, se consideran dos problemas diferentes:

1. Desplazamiento vertical del plano de trabajo de la muñeca, manteniéndolo paralelo a la camilla (traslación a lo largo del eje Z del sistema de coordenadas global del robot)
2. Movimiento en el del plano de trabajo de la muñeca (traslaciones combinadas a lo largo de los ejes de coordenadas locales a la muñeca X_c y Y_c)

Para realizar el movimiento en el plano horizontal XY, se llega a la conclusión de que es adecuado un manipulador RR estándar en el plano. Este brazo está montado sobre una plataforma monocarrier. Otra posibilidad para la parte RR del robot podría haber sido una estructura de doble paralelogramo. Sin embargo, esta estructura añadiría peso y menos exactitud [12]. La única ventaja de una configuración basada en paralelogramos (la disponibilidad de más espacio para encoders y otros sensores) puede ser fácilmente compensada en el manipulador RR a través de un apropiado diseño de sus articulaciones.

La longitud de los dos elementos del manipulador RR se ha calculado estudiando el espacio de trabajo de la cámara fuera de la cavidad abdominal cuando la óptica se inserta a través del trócar. La figura 1 muestra los límites exteriores del posicionamiento de la cámara, definidos por una longitud mínima de inserción de la óptica a través del trócar con un ángulo de desviación máximo de 75° . Por lo tanto, el espacio de trabajo cartesiano de la cámara se define como un cono invertido con una base de radio a . Si se supone una longitud de la óptica de 360 mm desde el extremo distal (d) hasta el punto de agarre de la cámara (g), el valor de la longitud de los elementos (L_1, L_2) se calcula mediante la expresión $L_1 \cdot L_2 = 278750 \text{ mm}^2$. Esta ecuación se ha obtenido considerando que el brazo debe alcanzar cualquier punto dentro de un cuadrado de un tamaño de 40 cm de lado, que contenga la base del cono invertido. Teniendo en

cuenta esto, y que el robot no está fijado a la camilla, este cuadrado puede estar situado en una posición asimétrica con respecto al brazo robot. Si se elige el tener los dos brazos con la misma longitud, que ha sido nuestra elección para hacer más sencillo su almacenaje y operación, se llega a una longitud de eslabones de: $L_1 = L_2 \cong 530 \text{ mm}$

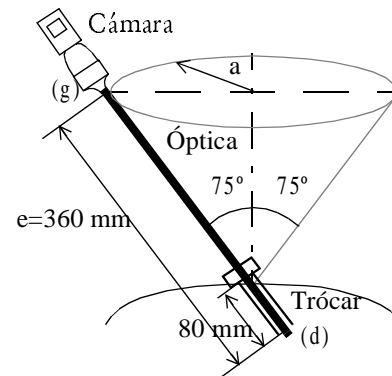


Figura 1. Espacio de trabajo de la óptica

El problema de la orientación se puede resolver de dos formas: a través de ejes pasivos, y a través de articulaciones limitadas mecánicamente. Esta última solución, aunque es inherentemente segura, implica normalmente una estructura abultada que debe situarse junto al paciente. De esta forma se puede restringir la libertad de movimiento del cirujano, con lo que esta posibilidad fue desechada en una primera fase del diseño [10]. Así, el sistema propuesto alcanza la orientación apropiada de la cámara a través de ejes pasivos. El primero de estos ejes está dispuesto paralelo a las articulaciones actuadoras (rotación en torno al eje Z). El segundo eje pasivo (rotación alrededor del eje X) completa los grados de libertad que la cámara necesita para conseguir el espacio de trabajo requerido. La figura 2 muestra un movimiento vertical del brazo de robot desde el punto A al punto B. En esta situación, la óptica pivota en el punto de inserción C del trócar gracias a la rotación en torno al eje X del sistema de sujeción.

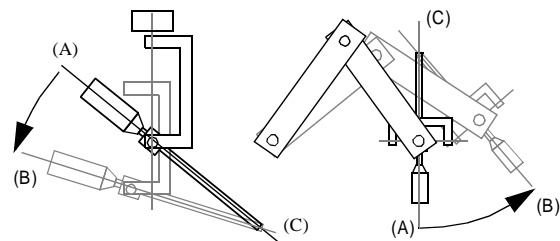


Figura 2. Movimiento vertical y horizontal

Igualmente, el movimiento horizontal del brazo es posible gracias a la rotación alrededor del eje Z de dicho sistema.

La figura 3 muestra el espacio de trabajo cartesiano de la cámara relacionado con el espacio de trabajo del robot. Se puede observar que el espacio de trabajo de la cámara puede situarse en un amplio rango de posiciones dentro del espacio de trabajo del robot, permitiendo, de esta manera, emplazar al sistema de acuerdo a las necesidades de cada caso.

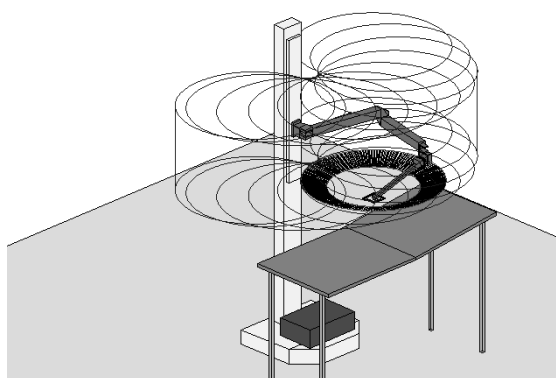


Figura 3. Límites del espacio de trabajo de la cámara en relación con el espacio de trabajo del brazo

4. EL SISTEMA DE CONTROL LOCAL-REMOTO.

El esquema general del sistema de control distribuido del asistente robótico se muestra en la figura 4. Como se puede observar, el brazo del robot puede ser controlado local y remotamente por medio de instrucciones de movimiento básicas de alto nivel de la cámara. El interfaz de usuario local (cirujano) permite órdenes por voz. El usuario remoto (el cirujano experimentado o mentor) puede ver la imagen de vídeo endoscópica e interactuar con el cirujano local por medio de un sistema de anotación de marcas sobrepuestas en la imagen. Asimismo, se dispone de un canal de videoconferencia para una comunicación más natural.

El propósito del sistema va más allá de los límites de las aplicaciones de tele-medicina y tele-asistencia. En este sentido el primer paso es controlar la posición de la cámara dentro del cuerpo del paciente e interactuar con el cirujano local para encontrar el área de interés y mostrarle el procedimiento recomendable. Debido a que la generación de la trayectoria y el bucle cerrado de control del robot son locales, el sistema remoto de teleoperación es estable [5] bajo órdenes de supervisión remota.

La comunicación entre ambos puntos depende de la distancia, y varía desde redes de internet de bajo ancho de banda, hasta canales ATM dedicados de alto ancho de banda. Distancias más cortas permiten diferentes conexiones físicas para vídeo analógico de bajo coste, datos y canales de voz.

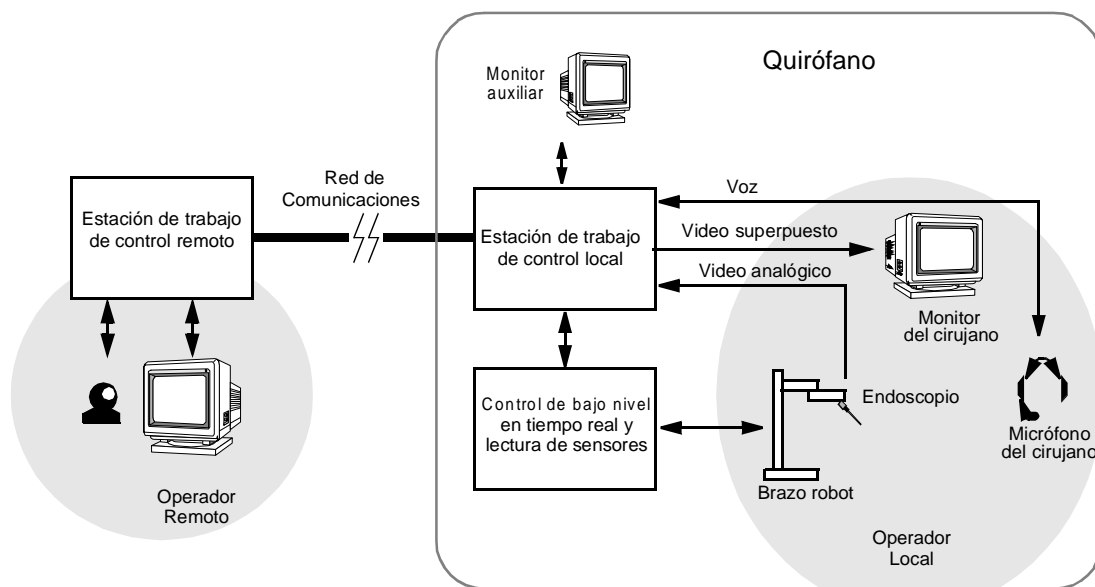


Figura 4. Esquema general de la arquitectura de control local-remota

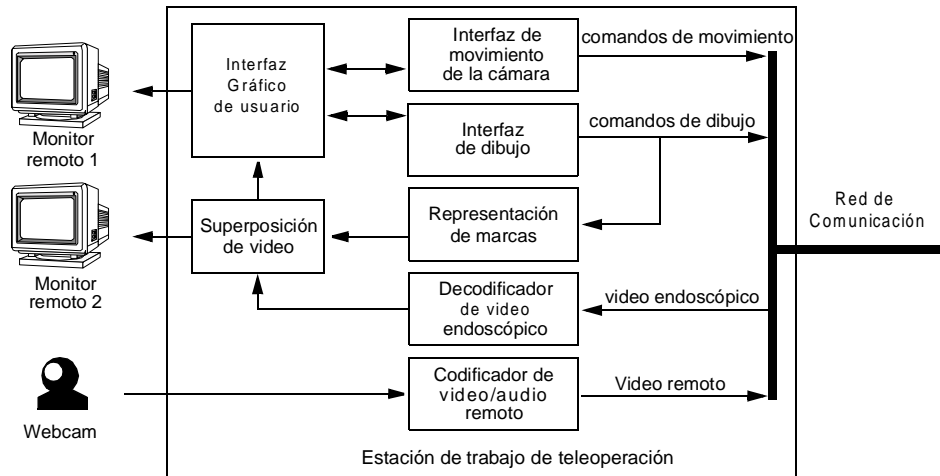


Figura 5. Arquitectura de la estación de trabajo remota

5. EL INTERFAZ DE OPERADOR REMOTO.

El interfaz de usuario remoto (véase figura 5) se proyecta para propósitos de instrucción y supervisión. De este modo, este operador puede ver la imagen laparoscópica y aconsejar al cirujano local mediante un conjunto de marcas superpuestas a dicha imagen. Estas marcas, dibujadas por el operador remoto sobre la imagen recibida, son mostradas por pantalla tanto en la estación de trabajo local como la remota. Además, se puede establecer una conexión vía videoconferencia entre ambos cirujanos.

La estación de trabajo con doble monitor (véase figura 6) es un PC Pentium III con 128 MB de RAM, tarjeta de vídeo Matrox con salida AGP doble y con Microsoft Windows 98 como sistema operativo. La aplicación principal se ha desarrollado en Delphi 4.0 estándar (Borland). Los dispositivos externos incluyen una webcam USB Philips y un sensor de fuerza/par SpaceBall de control manual. También se utiliza Microsoft Netmeeting para videoconferencias.

El sistema de superposición de vídeo utilizado está basado en el chip de captura de vídeo Brooktree bt878 PCI, con un tamaño de imagen de 768x576 pixels, 15 bits de profundidad y modo de superposición. Esto permite una velocidad de transferencia de 25 imágenes por segundo (sistema PAL), de modo que la adquisición/procesamiento de imagen puede hacerse más rápidamente.

El ratón como dispositivo de entrada dió los mejores resultados por su facilidad de uso e integración con el interfaz gráfico de usuario del sistema operativo. De este modo, se ha usado para dibujar marcas y para

enviar órdenes de movimiento al robot. Estas órdenes se pueden emitir por medio de un click del ratón sobre el nuevo punto objetivo. Las órdenes de inserción/extracción se emiten usando la ahora estándar rueda del ratón. También es posible seleccionar órdenes especiales del robot desde un menú contextual, o utilizando el teclado. El uso de dispositivos y ordenadores estándar permite tener una estación de teleoperación en casi cualquier ordenador conectado en red.



Figura 6. Estación de trabajo remota con doble monitor

6. LA ESTACIÓN DE TRABAJO DE CONTROL LOCAL.

La estación de trabajo de control local (véase figura 7) comprende el interfaz del cirujano y el control del robot. El primero incluye el motor de vídeo y de gráficos, así como los componentes de reconocimiento

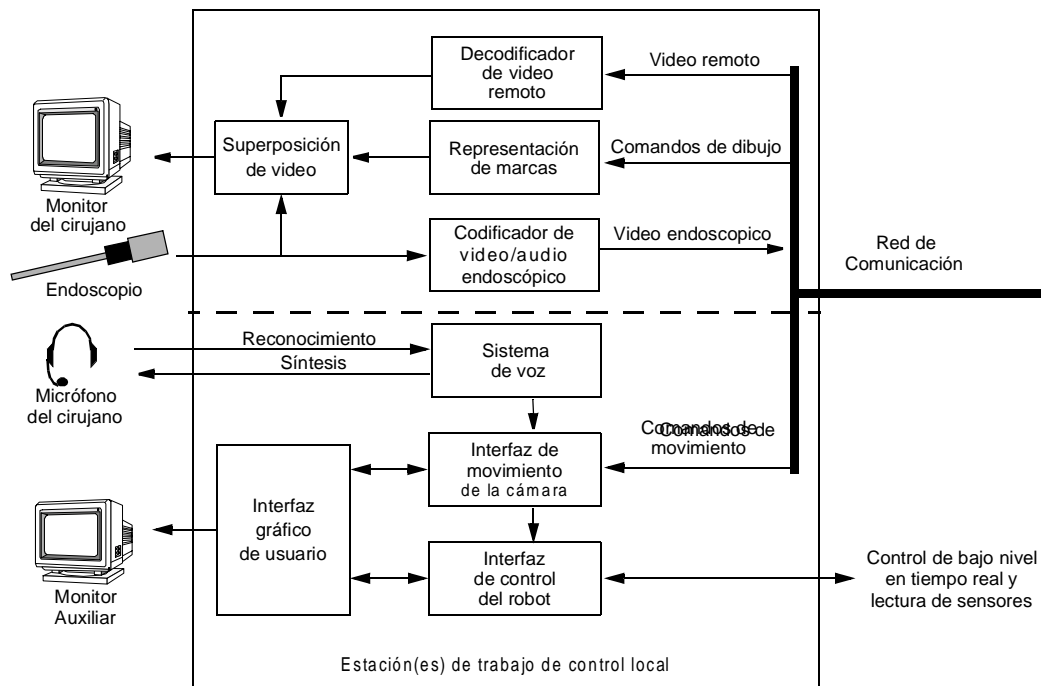


Figura 7. Arquitectura de la estación de trabajo local

y síntesis de voz. El sistema de control de alto nivel del robot traduce las órdenes de movimiento de la cámara en coordenadas articulares y referencias para el controlador de bajo nivel en tiempo real de las articulaciones.

Este sistema por computador es también un PC Pentium III con Windows 98 provisto de un sistema de vídeo con dos salidas (AGP y PCI Voodoo 3-300). La pantalla principal abre un área de superposición de 768 x 576 pixels y dibuja las marcas remotas. La segunda pantalla ofrece información técnica acerca del estado del robot, posición y control a diferentes niveles de control, que es utilizada principalmente durante las etapas de desarrollo. La pantalla principal también se usa para mostrar el sistema de videoconferencia de baja resolución con imágenes del operador remoto.

El cirujano puede entrenar un conjunto reducido de órdenes intuitivas relativo al sistema de coordenadas de la cámara ("Mover Arriba", "Mover Izquierda", "Mover fuera"...). El sistema de reconocimiento de voz se ha realizado por medio de componentes especializados ActiveX. También se han utilizado componentes de síntesis de voz para que el usuario reciba información del sistema de un modo natural. El sistema de superposición de vídeo local se implementa mediante el uso del chip de captura de vídeo analógico bt878 PCI, citado previamente, ya que la mayoría de los sistemas de cámara laparoscópica comerciales

ofrecen salidas analógicas (S-video/composite). Otros beneficios son el bajo coste y la ausencia de retrasos de compresión-descompresión que pueden dificultar la realimentación visual del cirujano.

La generación y seguimiento de trayectoria se realiza mediante hebras de programación concurrentes de alta prioridad. Dado que no es un sistema operativo de tiempo real, las restricciones en este aspecto son suaves, y los tiempos de respuesta no pueden garantizarse. Por esta razón el control de bajo nivel articular de los tres grados de libertad activos se realiza mediante microcontroladores externos de función especial (LM628) de National Semiconductor, que realizan un control PID con generación de trayectoria y actualización de parámetros y trayectoria en línea. El amplificador de potencia es un puente en H (LMD18200) capaz de suministrar una señal PWM de 3 A.

Para un control rápido de los movimientos del brazo, se ha utilizado un puerto paralelo estándar para el envío de referencias y parámetros de control. El puerto de impresora del PC en modo EPP (bidireccional con control *handshake* automático) permite una velocidad de transferencia de hasta 1,5 Mb por segundo. En la figura 8 se incluye una ilustración de la implantación de este controlador en forma de tarjeta de circuito impreso de una sola cara y 8x9 cm de dimensión.

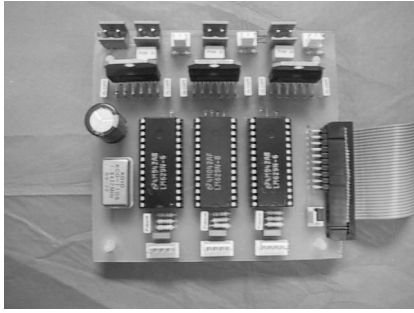


Figura 8. Tarjeta de circuito impreso del control de bajo nivel de los tres ejes y sistema de potencia

7. EXPERIMENTOS Y CONCLUSIONES.

Este artículo está enfocado a aplicaciones de nuevas tecnologías en cirugía mínimamente invasiva. Se ha propuesto un asistente robótico como una ayuda a los cirujanos en cirugía laparoscópica y *tele-mentoring*. Este diseño se ha basado en una experiencia previa con un robot industrial Stäubli RX60 (véase figura 9). Este sistema se ha probado utilizando simuladores de paciente y animales de laboratorio. Comparado con un asistente humano, los resultados han mostrado que en tareas de corta duración (aproximadamente tres minutos), como las suturas estándar *dos ceros*, el equipo cirujano utilizó unos doce segundos más. Sin embargo, se obtuvo una alta eficiencia en suturas de hilo muy fino (*siete ceros*). Si bien los cirujanos se han encontrado cómodos con el sistema durante todos los experimentos, la posibilidad de realizar suturas de precisión de una forma eficiente y confortable resultó especialmente notable para ellos.



Figura 9. El primer prototipo durante una prueba

El nuevo asistente robótico (véase figura 10) ha demostrado las mismas prestaciones que la versión anterior. Además, se le han añadido características de teleoperación a través de una red de comunicación convencional. Actualmente, el sistema se ha probado por medio de un simulador de paciente demostrando el mismo rendimiento en modo local y en pruebas remotas.

Los resultados cuantitativos se muestran en la figura 11. La posición deseada del extremo de la óptica y la posición actual se comparan en la coordenada cartesiana X. Tal como se muestra, no se producen errores significativos a pesar de los dos grados de libertad pasivos y la acomodación del punto de inserción. Los ejes de coordenadas Y y Z producen resultados similares.

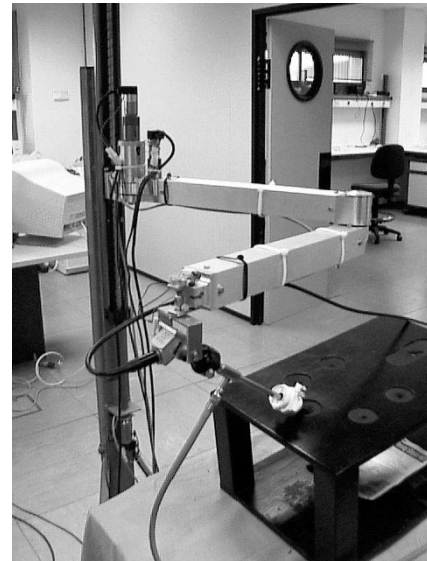


Figura 10. El nuevo asistente robot

8. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a la financiación del proyecto de investigación FIS 00/0050-02.

Referencias

- [1] Casals A., Amat J., Prats D. and Laporte E. (1995) "Vision Guided Robotic System for Laparoscopic Surgery". IFAC International Congress on Advanced Robotics. Barcelona, España.

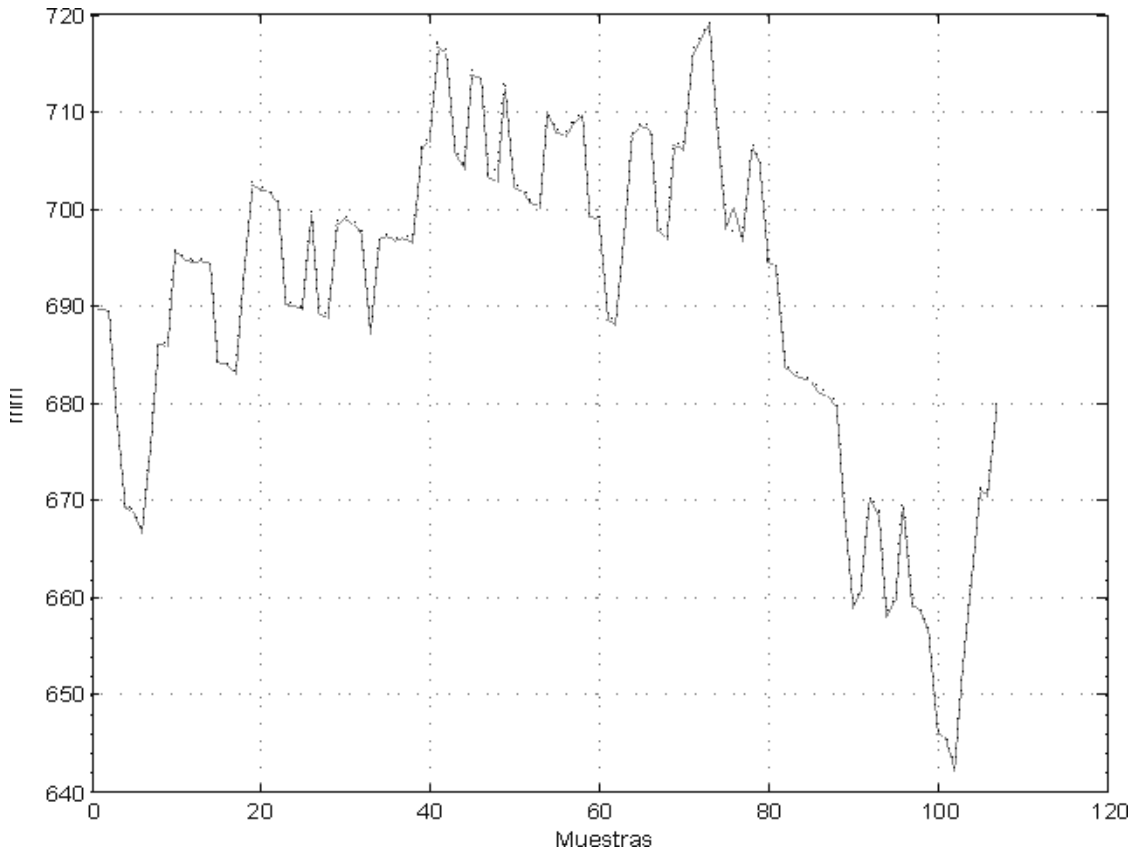


Figura 11. Posición deseada del efector final (línea de puntos) frente a posición real (línea continua) en el eje de coordenadas cartesianas X

- [2] Casals, A.; Amat, J.; Laporte, E. "Automatic guidance of an assistant robot in laparoscopic surgery". *Robotics and Automation*, 1996. Proceedings., 1996. IEEE International Conference on , Volume: 1 , 1996. Page(s): 895 - 900 vol.1.
- [3] Dowler, N.J.; "Holland, S.R.J. The evolutionary design of an endoscopic telemanipulator" . *IEEE Robotics & Automation Magazine* , Volume: 3 Issue: 4 , Dec. 1996 Page(s): 38 -45
- [4] Funda, J.; Gruben, K.; Eldridge, B.; Gomory, S.; Taylor, R. "Control and evaluation of a 7-axis surgical robot for laparoscopy". *Robotics and Automation*, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on , Volume: 2 , 1995
- [5] Gómez de Gabriel J. (1999), "Contribuciones a la teleoperación con retardos de comunicación", Universidad de Málaga, España.
- [6] Green, P.S.; Hill, J.W.; Jensen, J.F.; Shah, A. "Telepresence surgery". *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, Volume: 14. Issue: 3 , May-June 1995.
- [7] Guthart, G.S.; Salisbury, J.K., Jr. "The Intuitive/ sup TM/ telesurgery system: overview and application". *Robotics and Automation*, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on , Volume: 1 , 2000. Page(s): 618 - 621 vol.1
- [8] Hurteau R., DeSantis S., Begin E. and Gagner M. (1994) "Laparoscopic Surgery Assisted by a Robotic Cameraman: Concept and Experimental Results". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 2286-2289.vol. 3.
- [9] Madhani, A.J.; Niemeyer, G.; Salisbury, J.K., Jr. "The Black Falcon: a teleoperated surgical instrument for minimally invasive surgery". *Intelligent Robots and Systems*, 1998. Proceedings., 1998 IEEE/RSJ International Conference on , Volume: 2 , 1998. Page(s): 936 - 944 vol.2

- [10] Muñoz V. F. et al. (2000) "A Medical Robotic Assistant For Minimally Invasive Surgery". IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, EE.UU. pp 2901-2906.
- [11] Satava R. M. (1998). "Cybersurgery: Advanced Technologies for Surgical Practice". Wiley-Liss. ISBN 0-471-15874-7. Nueva York, EE.UU.
- [12] Taylor, R.H.; Funda, J.; Eldridge, B.; Gomory, S.; Gruben, K.; LaRose, D.; Talamini, M.; Kavoussi, L.; Anderson, J. "A telerobotic assistant for laparoscopic surgery". IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, Volume: 14. Issue: 3, May-June 1995.
- [13] Yuan-Fang Wang; Uecker, D.R.; Wang Yulun. "Choreographed scope manoeuvring in robotically-assisted laparoscopy with active vision guidance". Applications of Computer Vision, 1996. WACV '96., Proceedings 3rd IEEE Workshop on, 1996. Page(s): 187 -192