



Ingeniería quirúrgica

La tecnología al servicio de la cirugía

Jose María Sabater-Navarro*

Carlos Pérez-Vidal *

Nicolás García-Aracil *

Jose Maria Azorin-Poveda *

Miguel Almonacid-Kroeger **

Dr. Ingeniero Industrial

Dr. Ingeniero

Dr. Ingeniero Industrial

Dr. Ingeniero

Dr. Ingeniero Industrial

* Universidad Miguel Hernández. Tfno: + 34 966 658426. j.sabater@umh.es

** Universidad Politécnica de Cartagena. Tfno: +34 968 32 54 00. miguel.almonacid@upct.es

Recibido: 04/09/09 • Aceptado: 09/10/09

Surgical engineering. Technology at surgery service

ABSTRACT

- The operation room (OR) is a place where the engineers could, and we must, give our work and knowledge. This work presents firstly a small summary of the present reality of the technology on the OR, and secondly it presents two examples of applications developed by Spanish engineers for applications of surgical engineering. The material and methods section show a physically realistic simulator where surgeons can simulate and practice the laparoscopic surgical procedures and learn the skills. It is also shown a robot developed to be a intrinsically safe wrist for bringing the orientation to the surgical tool. The results section shows the first experiments, simulations and results for both developments. The main goal of the paper is to motivate the collaboration among surgeons and engineers in such a way we can give new and better systems to the surgical engineering.
- **Key words:** medical robotics, surgical robotics, medical image, healthcare technology, surgery.

RESUMEN

El quirófano es un lugar más donde los ingenieros podemos, y debemos, aportar nuestro trabajo y conocimientos. Este trabajo presenta en primer lugar una pequeña revisión de la situación actual de la tecnología en los quirófanos, y posteriormente muestra dos ejemplos de aplicaciones desarrolladas por ingenieros en España para su aplicación en el ámbito de la ingeniería quirúrgica.

En el apartado de materiales y métodos se describen un simulador físicamente realista en el que se pueden simular los procedimientos quirúrgicos de laparoscopia y un robot concebido bajo restricciones de un diseño intrínsecamente seguro y destinado a ser la muñeca de orientación de las herramientas de laparoscopia. En el apartado de resultados se muestran los primeros experimentos, simulaciones y resultados de ambos desarrollos.

El objetivo del artículo es motivar la colaboración entre cirujanos e ingenieros, de forma que logremos aportar nuevos y mejores desarrollos a la ingeniería quirúrgica.

Palabras clave: robótica médica, robótica quirúrgica, imagen médica, tecnología sanitaria, cirugía.

1.- INTRODUCCIÓN

Según una de las definiciones que se puede encontrar del término revolución, una revolución es un cambio o transformación radical y profunda respecto a un pasado inmediato. Si aplicamos esta definición a la situación actual de la tecnología médica, se puede afirmar que los procedimientos médicos y quirúrgicos están sufriendo una transformación profunda gracias al uso de la tecnología. Además, se puede observar que las revoluciones son un fenómeno cíclico; sucede la revolución, se produce una aceptación de los cambios, se logran unos estándares que codifican estos cambios, aparece una resistencia a futuros cambios de estos estándares, de nuevo, sucede la revolución. Este carácter regenerador de las revoluciones tiene un aspecto claramente positivo, y es la capacidad de producir ese cambio o avance. Los ingenieros hemos demostrado, a lo largo de la historia, que sabemos aprovechar esa parte positiva de este ciclo en lo referente a revoluciones científicas, y que estamos acostumbrados a formar parte activa de estos acontecimientos.

Es patente que en la actualidad está sucediendo una revolución tecnológica

que afecta a la medicina, y por ende a la cirugía. El rápido desarrollo tecnológico está permitiendo una transformación radical y profunda de los procedimientos quirúrgicos que se empleaban en un pasado reciente. Haciendo un breve resumen histórico, las anteriores revoluciones quirúrgicas sucedieron con el descubrimiento y uso de la anestesia a mediados del siglo XIX; ya en el siglo XX, los trabajos de **Alessandro Vallebona** dieron lugar a la tomografía, y en la segunda mitad del siglo, a los primeros aparatos de tomografía computerizada (CT) de imagen médica. Esto dio lugar a nuevas técnicas terapéuticas como quimioterapia o radioterapia. En 1990 aparece la cirugía mínimamente invasiva (MIS), y se convierte rápidamente en un estándar para muchos procedimientos quirúrgicos. Si prestamos atención a las fechas de este fugaz repaso, nos daremos cuenta de que los intervalos temporales entre cada ciclo se han ido reduciendo bruscamente, dando lugar a una necesidad de inmediatez en los procesos de aceptación de cambios y estandarización de los mismos. Por esto, cada vez es más importante ser capaz de asimilar y conocer los cambios de una manera eficiente y rápida. La actual revolución quirúrgica está fundamentada en la multi-disciplinariedad de los equipos quirúrgicos. La celeridad con que se producen los cambios necesita de una modificación en la estructura personal de los equipos quirúrgicos, una adaptación para poder sacar partido de forma eficiente a las herramientas tecnológicas que están disponibles. En palabras del doctor **Javier Herrero**, cirujano y presidente del congreso internacional CARS2008 celebrado en Barcelona, *"el quirófano se está convirtiendo en un laboratorio de ingeniería en el cual no sólo hay un cirujano sino también ingenieros y radiólogos"*.

Por lo tanto, los ingenieros debemos darnos cuenta que el quirófano es un lugar más de trabajo, en el que podemos desarrollar nuestras habilidades y realizar nuestras aportaciones. En esta nueva revolución tecnológica de la cirugía, aparecen dos pilares fundamentales: la *intervención quirúrgica guiada por la imagen* y la *aplicación de la robótica en el quirófano*. En ambas ramas existen importantes aportaciones tecnológicas ya consolidadas en algunos quirófanos, como por ejemplo, los *navegadores quirúrgicos* Cuadro 1 para intervenciones guiadas por imagen, y que son ampliamente utilizados en cirugías ortopédicas, o el sistema robótico *teleoperado daVinci*® Cuadro 2, utilizado para muchos procedimientos de cirugía laparoscópica. Sin embargo, en el momento actual nos encontramos todavía inmersos en esta excitante revolución, y son muchos los problemas que aún quedan por solucionar.

En primer lugar, en cuanto a la intervención guiada por imagen, es cierto que se ha avanzado mucho, y se avanza, en la mejora de los equipos de imagen médica, obteniendo mejores resoluciones, mejores segmentaciones para diferenciar órganos y tejidos, mayor información sobre la funcionalidad y comportamiento de órganos, etc. Sin embargo, uno de los caballos de batalla actuales es la imagen intraoperatoria. Las imágenes médicas (CT, MRI, fMRI...) se conocen principalmente como herramientas

preoperatorias y/o diagnósticas, que proporcionan una información del estado del paciente antes de empezar la operación en el quirófano (habitualmente varios días antes). Esto conlleva que los cambios geométricos, que tienen lugar durante la operación quirúrgica, (deformaciones de tejidos, resecciones, cambios de posición relativos...) no aparecen reflejados en estas imágenes. Esto queda reflejado en las palabras del doctor **Enric Ferrer**, presidente de la *Sociedad Española de Neurocirugía*, *"llegar al tumor puede ser una fuente de problemas, por los cambios que se producen durante el abordaje"*. Esta es una de las principales razones por las que los navegadores quirúrgicos han tenido mejor aceptación en cirugías como la traumatología y ortopédicas, en las que se trabaja con huesos rígidos e indeformables, que en otorrino, abdominal o neurocirugía, en la que los cambios intraoperatorios son notables, pues al producirse un corte o una resección, el resto de los órganos y tejidos de alrededor del tejido estirpado, se acomodan en función de las nuevas restricciones geométricas. Bien es cierto que existen técnicas de imagen médica intraoperatoria, como el ultrasonido (US), la fluoroscopia, el CT intraoperatorio o el MRI abierto, si bien cada una de ellas tiene su particularidad para la aplicación intraoperatoria, y ninguna ha logrado un alto grado de aceptación.

Por otra parte, en cuanto a la robótica quirúrgica, ésta representa un cambio radical en el trabajo del quirófano, convirtiendo al robot en un integrante más del equipo quirúrgico. En palabras del doctor **Julio Mayol**, cirujano y coordinador de la Unidad de Cirugía Guiada por la Imagen del *Hospital Clínico San Carlos*, *"este nuevo enfoque representa una visión de futuro y requiere un esfuerzo de cambio conceptual del abordaje quirúrgico. Todo ello la convierte en una cirugía integra, intuitiva e inteligente"*. Según **Russell Taylor**, uno de los pioneros en el campo de la robótica quirúrgica, las nuevas tecnologías quirúrgicas pretenden crear una sociedad entre el cirujano y el robot de forma que se aumenten las habilidades del cirujano y se puedan realizar los procedimientos de forma más eficiente que podrían hacerlos por separado cirujano o robot. Robots como el *DaVinci* [Ballantyne02] o *Robodoc* [Pransky97] son pioneros en la integración de robots en un quirófano, y están convirtiéndose en compañeros del cirujano. Sin embargo, y como pioneros que son, están en continua evolución para llegar a ser robots más eficientes, más ergonómicos y sobre todo que permitan realizar nuevos procedimientos quirúrgicos que aumenten las posibilidades y destrezas de que actualmente dispone el cirujano. En la actualidad existen muchos debates abiertos alrededor de la aplicación de robots en el quirófano. Algunos de estos debates hacen referencia al uso de esquemas de control de robots autónomos o de robots teleoperados. Otros discuten acerca de la morfología de los robots, que pueden ser de grandes dimensiones y estar fijos a la propia estructura del quirófano (*table-mounted robots*), como el *Ciberknife* (www accuray.com) o el *daVinci*, o pequeños y estar fijados a la propia estructura ósea del paciente (*patient-mounted robots*), como el *SpineAssist*

(www.mazorst.com), evitando desplazamientos relativos entre la base del robot y el paciente. También aparecen los robots móviles, capaces de navegar por el interior del cuerpo humano, y por extensión, los robots colaborativos, pequeños robots de capacidades limitadas que trabajan conjuntamente para realizar una determinada tarea quirúrgica.

1.1.- EL CICLO GLOBAL (EN LA CIRUGÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR)

El proceso global de una operación quirúrgica computerizada (CAS) puede esquematizarse según se indica en la Fig. 1. En ella se observa como en las etapas preoperatorias de planificación existe un gran número de tecnologías involucradas, imágenes médicas de diferente naturaleza física, algoritmos de fusión de la información de dichas imágenes, algoritmos de reconstrucción 3D y visualización de dicha información, procedimientos para la generación de la planificación, etc. Los resultados del uso de todas estas tecnologías son utilizados posteriormente en la etapa intra-operatoria, y, por tanto, es necesario conocer las incertidumbres existentes en las etapas previas para poder garantizar un comportamiento correcto de las herramientas intra-operatorias. En la etapa intra-operatoria, la navegación

quirúrgica y la robótica hacen uso de la información 3D y 2D previa, por lo que las operaciones de calibración de estos sistemas, conocidas como registro quirúrgico, son claves para asegurar un incremento en las prestaciones del sistema frente a los procedimientos clásicos.

Por otra parte, toda esta complejidad inherente a la revolución tecnológica implica un aprendizaje de las nuevas capacidades disponibles. Históricamente, el aprendizaje en cirugía ha sido un aprendizaje por oportunidad, es decir, si un paciente tiene apendicitis, los estudiantes pueden aprender aspectos técnicos de la apendicetomía. Esta situación está cambiando: gracias al uso de simuladores quirúrgicos se pueden generar diferentes escenarios, y, además se puede ir incrementando la complejidad de la operación quirúrgica simulada de forma gradual. De esta forma, las intervenciones se pueden practicar de forma segura en un simulador antes de operar a un paciente. Sin embargo, la sensación de realidad que ofrecen estos simuladores es todavía claramente mejorable [Liu03].

En cuanto a los lugares donde se está produciendo la revolución, se debe destacar el aspecto global de la misma. Por ejemplo, en el plano docente, en la *Universidad de California*, San Diego, ingenieros, médicos y científicos, están uniendo fuerzas para desarrollar el nuevo *Instituto*

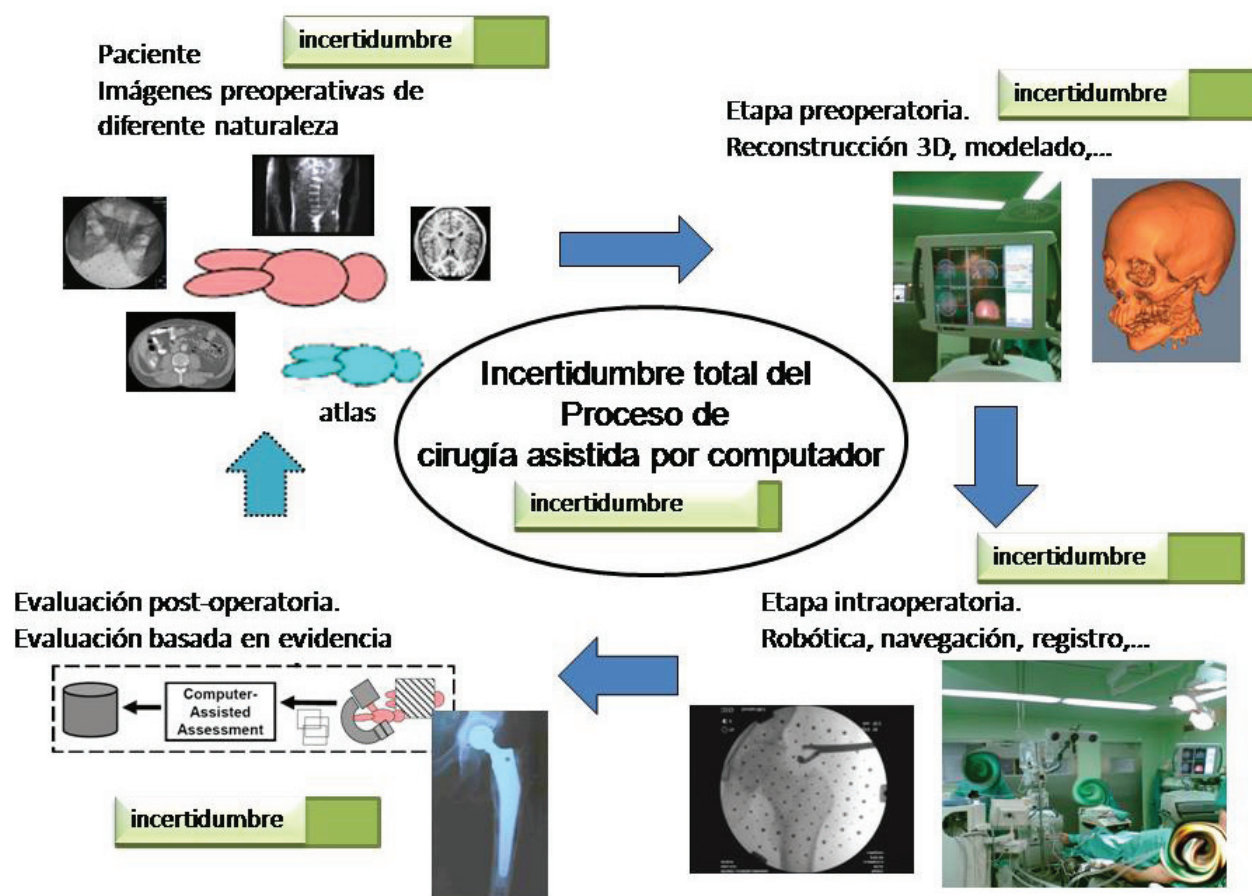


Fig. 1: Proceso CAS global

de *Ingeniería en Medicina*, que trata de dar respuesta a la necesidad de colaboración entre ingenieros y médicos. En España, universidades como la *Universidad Miguel Hernández* han puesto en marcha programas de master en bioingeniería donde aparecen asignaturas de robótica, imagen o señal aplicadas a medicina. En lo referente a aplicaciones concretas, tanto comerciales como proyectos de investigación, se puede encontrar un excelente resumen y multitud de referencias en los tutoriales recientemente publicados en *IEEE Robotics & Automation Magazine* [Kazanzides08a], [Kazanzides08b], [Kazanzides08c] o en [Casals09].

Lo que se presenta a continuación son dos de las soluciones aportadas por el grupo de investigación de la *Universidad Miguel Hernández* en dos aspectos puntuales del proceso CAS descrito anteriormente: el de un simulador de cirugía físicamente realista y el de un robot intrínsecamente seguro para aplicaciones de laparoscopia. El simulador presentado incorpora varios avances frente a otras investigaciones y simuladores existentes. En primer lugar, las herramientas quirúrgicas son modeladas como objetos 3D realistas, y sus colisiones con los órganos y tejidos se calculan para toda la geometría 3D de la herramienta. Esta característica permite un mayor realismo en las intervenciones simuladas, ya que permite que el usuario note las colisiones entre las herramientas virtuales o que note las fuerzas que produce un determinado tejido en una herramienta. Por otra parte, la capacidad de simular herramientas 3D completas, que además incorporen articulaciones móviles y mecanismos internos, permite incluir en el simulador nuevos dispositivos robóticos que se diseñen ahora y en un futuro. Esta importante característica permite que el simulador pueda programarse para ser una herramienta de aprendizaje del uso de sistemas robóticos en entornos quirúrgicos. Como segunda aportación de este artículo se presenta un nuevo e innovador dispositivo porta-herramientas que es en sí mismo un pequeño robot paralelo que permite el manejo remoto de las herramientas de laparoscopia. Este dispositivo es completamente novedoso, y, por tanto, requerirá de un entrenamiento para su uso por los cirujanos. Este entrenamiento se verá facilitado por la capacidad del simulador para incorporar el modelo cinemático del nuevo dispositivo, de forma que los cirujanos

puedan practicar previamente la intervención de forma simulada, aprendiendo cómo sus movimientos se “traducen” a los movimientos de la herramienta quirúrgica.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- SIMULADOR FÍSICAMENTE REALISTA

Una primera imagen del aspecto del simulador háptico¹ desarrollado puede verse en la Figura 2. Como se puede apreciar, la escena muestra una reconstrucción 3D de una cadera junto con dos herramientas laparoscópicas, un cutter y un puntero. La reconstrucción 3D está basada en imágenes CT de un paciente real [Badesa09], y se ha utilizado el algoritmo de *marching cubes* para obtener la reconstrucción superficial (el valor umbral utilizado para obtener la superficie triangulada se selecciona con el *slider Valor Contorno* de la Figura 2). La interacción con las herramientas es de tipo háptico, es decir, el usuario recibe realimentación de las fuerzas de contacto entre las herramientas y el/los órganos visualizados (en este caso la cadera). La particularidad principal de esta aplicación es

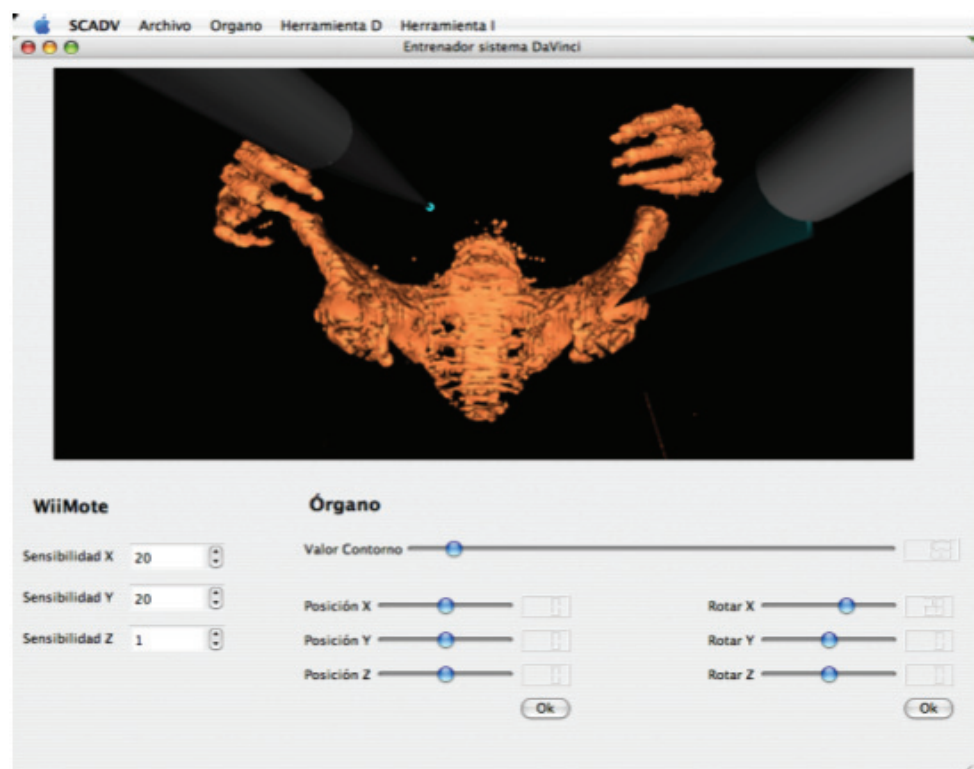


Fig.2: Aspecto del simulador físicamente realista

¹ Proviene del griego *haptik* o “sentido del tacto”. Referente a la capacidad de sentir tacto o fuerzas kinestésicas por parte del usuario. En el caso de un simulador, indica su capacidad de reflejar fuerzas hacia el usuario.

que las herramientas laparoscópicas están modeladas como geometrías 3D completas [Ivorra08], sin las simplificaciones geométricas habituales en otros simuladores y que reducen la herramienta quirúrgica a un punto. De esta forma, la interacción con el usuario es realista, al no simplificar los posibles contactos entre herramientas o con otros órganos/tejidos. Para poder recibir esta información, el usuario dispone de dos dispositivos hápticos, uno en cada mano (ver Fig.3). Actualmente el simulador ha sido probado con los dispositivos *Phantom Omni de Sensable* (www.sensable.com) y con los mandos *wiimote* de Nintendo (www.nintendo.com). En el caso de utilizar los mandos *wiimote*, la sensación háptica se reduce a una vibración de los mandos cuando se producen colisiones.

En cuanto a las herramientas software utilizadas para realizar el simulador, consiste en una serie de clases en código fuente C++ que hacen uso de las siguientes librerías:

- VTK (modelado y visualizado 3D)
- QT (interfaz gráfica)
- V-COLLIDE (detección de colisiones)

VTK (www.vtk.org) (*Visualization Toolkit*) es un conjunto de librerías desarrollado por *Kitware* consistente en un sistema de visualización por software que permite la visualización de geometrías 3D, soportando una amplia variedad de algoritmos de visualización y modelado. El ser una herramienta *open-source* ha impulsado una gran difusión de la misma, extendiendo su aplicación a prácticamente todos los campos en los que se emplean objetos 3D, entre los que destacan la medicina, la industria, etc. Para la reconstrucción 3D de la imagen de la Fig.2 se ha utilizado el método de *marching cubes* existente en las librerías *VTK*. *QT* (www.trolltech.com) son unas librerías para creación de interfaces gráficas (menú, barras de herramientas, etc.), y *V-Collide* es una librería de detección de colisiones gratuita desarrollada por el grupo GAMMA (*Geometric algorithm for modeling, motion and animation*) de la *Universidad de Carolina del Norte*. Esta librería realiza una detección rápida y exacta de colisiones entre modelos poligonales triangulados, por lo que puede ser usada para realidad virtual y en una gran variedad de aplicaciones de simulación. La librería está diseñada para operar en ambientes que contienen un gran número de objetos geométricos formados con mallas de triángulos. *V-Collide* fue seleccionada debido a su mejor comportamiento en entornos de múltiples objetos después de comprobar su funcionamiento frente a otras librerías de colisiones similares (*SWIFT, RAPID, PQP, I-Collide...*).

Para la integración de las librerías *V-Collide* en el simulador se ha desarrollado una clase llamada *CollisionObjectFactory* que hace de interfaz entre *VTK* y *V-Collide*. La clase *CollisionObjectFactory* provee de diferentes métodos para el tratamiento de las colisiones así como de la estructura de datos con el fin de almacenar información sobre los objetos añadidos al sistema de colisiones. Las funcionalidades más importantes de esta clase son:

- añadir objetos al sistema de colisiones
- eliminar objetos del sistema de colisiones
- desactivar la colisión entre pares de objetos
- actualizar la matriz de transformación de un ensamblado
- determinar qué órgano ha colisionado con alguna herramienta
- determinar si una determinada pieza ha colisionado
- calcular colisiones
- informar sobre colisiones

Para añadir objetos al sistema de colisiones, *CollisionObjectFactory* se encarga de realizar las siguientes operaciones:

- triangulación de los polígonos
- escalado en los ejes X, Y y Z
- obtención de información de los triángulos (coordenadas de los vértices y asociaciones de vértices) y almacenamiento en matrices dinámicas
- creación de un objeto *V-Collide* utilizando para ello la información de los triángulos almacenada en las matrices dinámicas
- almacenamiento de información sobre los objetos añadidos en una estructura de datos

La Figura 3 muestra una foto del uso del simulador junto con dos dispositivos hápticos *phantom*. En esta configuración, cada dispositivo es capaz de controlar la posición y orientación de una herramienta quirúrgica, simulando así la situación real de una operación MIS de laparoscopia. Estos dispositivos tienen capacidad de reflexión de fuerzas en 3 de sus 6 grados de libertad², lo cual es suficiente para las aplicaciones de simulación quirúrgica.

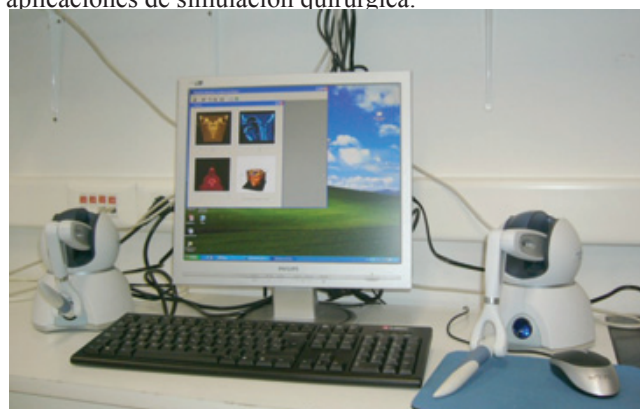


Fig.3: Dos dispositivos Phantom Omni integrados en el simulador

² Cada uno de los movimientos independientes que tiene el mecanismo. En este caso se habla de 3 grados de libertad en la traslación y 3 grados de libertad de orientación. La reflexión de fuerzas está en los 3 grados de traslación.

2.2.- ROBOT INTRÍNSECAMENTE SEGURO

Otro apartado en el que se han realizado aportaciones ha sido el desarrollo de un pequeño robot para realizar operaciones de cirugía mínima invasiva (*Minimally Invasive Surgery*, MIS) tales como la cirugía laparoscópica. El objetivo es diseñar un robot cuyo espacio de trabajo se adapte lo más justamente al espacio de trabajo objetivo, sin singularidades³ en dicho espacio, y que sea capaz de producir las fuerzas necesarias en una operación MIS. La figura 4 muestra un dibujo con la idea de este robot. En la figura se muestran cuatro pequeñas muñecas paralelas portadoras de herramientas quirúrgicas.



Fig. 4: Dibujo conceptual de muñecas esféricas para laparoscopia

La cirugía mínima invasiva se caracteriza por la utilización de pequeñas incisiones menores de 10 mm de forma que los instrumentos penetran en el cuerpo atravesando dichas incisiones. En estos puntos de entrada se colocan los trocares, que son elementos que permiten el acceso de dichos instrumentos restringiendo la cinemática de operación a una articulación esférica más un grado de libertad de traslación a lo largo del eje de la herramienta quirúrgica (Fig. 5). Los dispositivos robóticos que se diseñen, han de obedecer dicha cinemática y, por supuesto, se deben añadir criterios de seguridad. El robot se define como intrínsecamente seguro porque su diseño mecánico se ha basado en dos requisitos, evitar colisiones entre sus elementos y evitar singularidades dentro del espacio de trabajo de la herramienta del robot [Sabater09]. La solución más común es el uso del “*remote center of motion*” (RCM) [Boctor04], que coloca el centro de rotación de la muñeca del robot en el trocar. De esta forma se genera un RCM virtual sobre el trocar de manera que no se produce ninguna traslación de dicho punto, evitando que cualquier fallo en el control del robot provoque algún

daño en el paciente. Sobre esta idea se han ido añadiendo diferentes soluciones mecánicas como las presentadas por el *bluedragon* [Rosen02] o el *WA-slave* [Rosen06] que colocan la intersección de los ejes de la muñeca sobre el punto trocar.

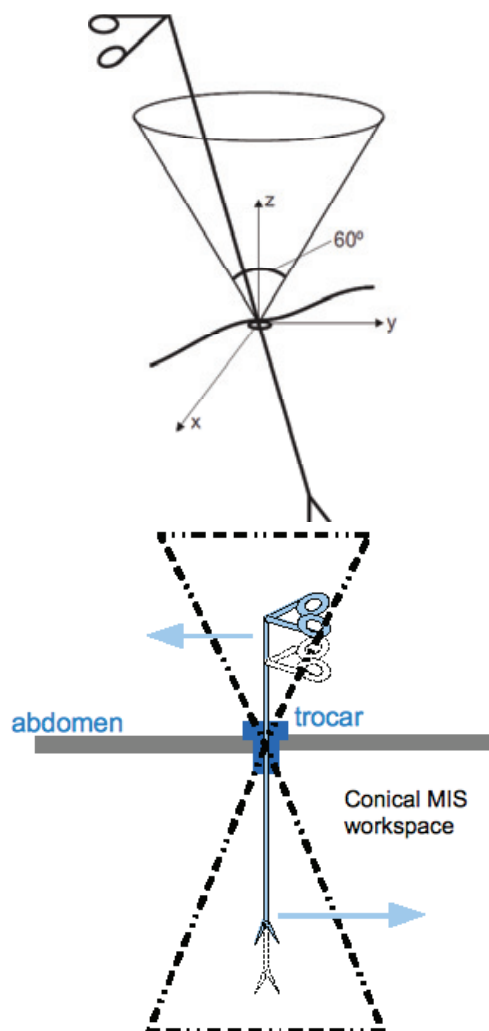


Fig. 5: Cinemática de la herramienta quirúrgica

La solución presentada en este trabajo propone el uso de una muñeca esférica robotizada, de estructura paralela y optimizada para realizar operaciones de cirugía laparoscópica. La plataforma, de arquitectura paralela, presenta una configuración *3UPSIS* de dimensiones reducidas. Esto permite la orientación de la herramienta MIS, disponiendo de los 3 grados de libertad de orientación. Adicionalmente, se adapta un dispositivo para permitir el grado de libertad traslacional de la herramienta sobre su eje. Este dispositivo presenta una rigidez dinámica alta, una capacidad de ejercer grandes pares utilizando para ello motores lineales de 3,13 N de fuerza nominal.

La plataforma *3UPSIS* (Fig. 6) está compuesta por tres cadenas cinemáticas o “patas”, donde cada una de las

³ Una posición o configuración de un mecanismo en donde el comportamiento subsiguiente no puede ser predicho, o las fuerzas o otras magnitudes se hacen infinitas o indeterminadas.

mismas tiene tres articulaciones, una articulación esférica (S) que une la plataforma inferior con cada “pata”, una articulación prismática (P) a lo largo de cada “pata” y una articulación universal (U) que une la cadena cinemática con la plataforma superior. Adicionalmente, hay una articulación esférica (S) que une directamente las plataformas inferior y superior. Como se muestra en la Fig. 6, la 3UPS1S tiene la característica especial de que el punto de rotación del mecanismo PR, situado en la articulación 1S, se encuentra por debajo de la plataforma inferior. Esta característica permite situar el punto PR sobre el trocar, de forma que las rotaciones producidas en la herramienta MIS lo hacen sobre el punto de inserción, formando el cono de laparoscopia.

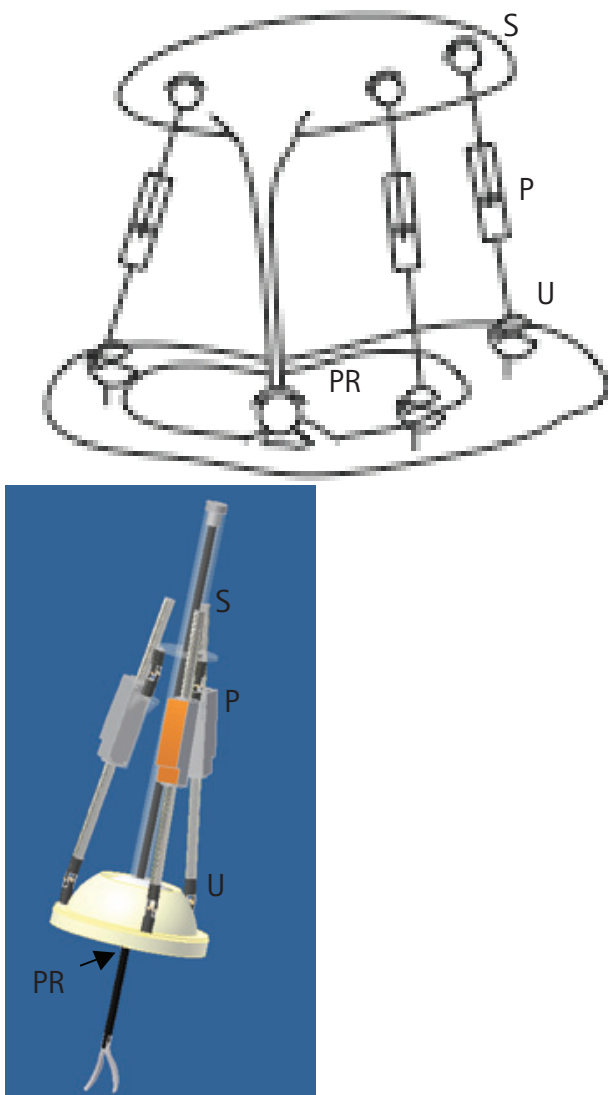


Fig. 6: Esquema cinemático y modelo cad realizado en Inventor®

Para el diseño del prototipo se parte de la proyección de una sección de la muñeca con un dibujo del espacio de trabajo que es un cono invertido de 60° donde su vértice superior coincide con el punto de pivote. La base o anillo inferior se alinea con dicho punto (centro del trocar). El efector final se coloca en su posición extrema en el límite del cono, (a

30° de la línea normal imaginaria del punto de pivote). Para evitar posibles auto-colisiones de los motores lineales que se utilizan en el diseño, se trazan dos semicircunferencias con sus centros en los respectivos puntos de apoyo de la base inferior, de forma que se tiene un rango de posiciones viables para dichos servos sin colisiones.

2.2.1.- Cinemática de la 3ups1s

Para poder analizar y simular el comportamiento cinemático de la plataforma diseñada se tiene que disponer de un modelo cinemático de la misma. Las siguientes ecuaciones muestran una solución de la cinemática inversa y directa de una plataforma 3UPS1S. Estas ecuaciones permiten programar las trayectorias de las articulaciones para lograr controlar el extremo final de la herramienta quirúrgica.

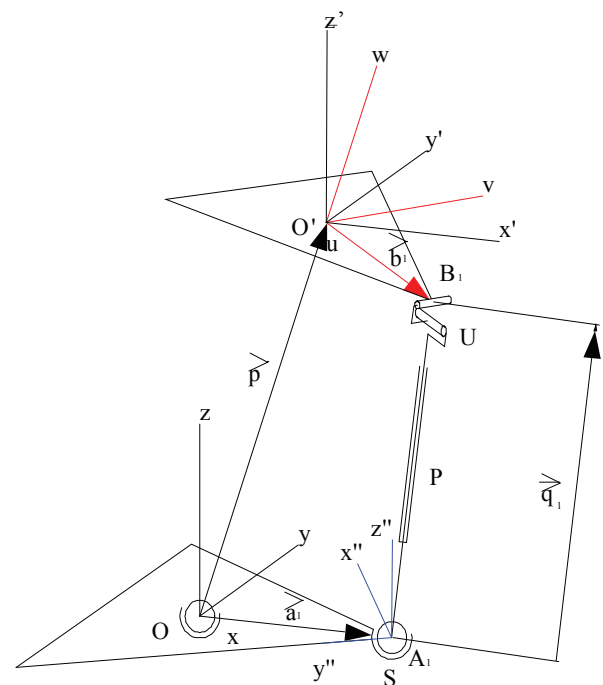


Fig. 7: Nomenclatura del análisis cinemático de la 3UPS1S

La base del robot, tendrá un sistema de referencia fijo llamado $O(x, y, z)$ y un sistema de coordenadas $A_i(x'', y'', z'')$ asociado a cada vértice de la plataforma. La plataforma tendrá otro sistema de coordenadas $O'(u, v, w)$ centrado en el punto O' (centro de gravedad de la plataforma) que gira en torno al punto O . El vector $\vec{p}$ será el formado por la unión de los puntos $O - O'$, el vector $\vec{a}_i$ vendrá dado por la posición de los vértices de la base respecto al sistema de referencia, y el vector $\vec{b}_i$ por los vértices de la plataforma respecto al sistema O' , por lo se definen los siguientes vectores:

$$\overset{V}{p} = \overline{O'P}; \quad \overset{V}{a_i} = \overline{OA_i}; \quad \overset{V}{b_i} = \overline{O'B_i};$$

El sistema de coordenadas $O'(u, v, w)$ se deriva a partir de rotación sucesiva del sistema $O(x, y, z)$ dada por los ángulos α, β, γ , según la siguiente matriz de rotación:

$$R_{(\alpha, \beta, \gamma)} = \begin{bmatrix} c\beta \cdot c\gamma + s\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma & -c\beta \cdot s\gamma + s\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma & c\alpha \cdot s\beta \\ c\alpha \cdot s\gamma & c\alpha \cdot c\gamma & -s\alpha \\ -s\beta \cdot c\gamma + s\alpha \cdot c\beta \cdot s\gamma & s\beta \cdot s\gamma + s\alpha \cdot c\beta \cdot c\gamma & c\alpha \cdot c\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde s y c son las abreviaturas de seno y coseno.

Localizar la posición de cada “pata”, será en definitiva, encontrar la longitud del vector $\overset{V}{q_i}$. Según la Figura 7, se tiene la siguiente relación vectorial, que define la cinemática inversa:

$${}^O \overset{V}{q_i} = {}^O \overset{V}{p} + {}^O R_{(\alpha, \beta, \gamma)} {}^{O'} \overset{V}{b_i} - {}^O \overset{V}{a_i} \quad (2)$$

Para resolver la cinemática directa del mecanismo, se ha recurrido a la utilización del método de **Newton-Raphson** multivariable de un sistema de ecuaciones no lineales de tres incógnitas α, β, γ . Se parte de las ecuaciones 1 y 2 para obtener la ecuación 3.

$${}^O \overset{V}{q_i} = \begin{pmatrix} {}^O p^x - {}^O a_i^x + (c\beta \cdot c\gamma + s\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma) {}^{O'} b_i^x + (-c\beta \cdot s\gamma + s\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma) {}^{O'} b_i^y + (c\alpha \cdot s\beta) {}^{O'} b_i^z \\ {}^O p^y - {}^O a_i^y + (c\alpha \cdot s\gamma) {}^{O'} b_i^x + (c\alpha \cdot c\gamma) {}^{O'} b_i^y + (-s\alpha) {}^{O'} b_i^z \\ {}^O p^z - {}^O a_i^z + (-s\beta \cdot c\gamma + s\alpha \cdot c\beta \cdot s\gamma) {}^{O'} b_i^x + (s\beta \cdot s\gamma + s\alpha \cdot c\beta \cdot c\gamma) {}^{O'} b_i^y + (c\alpha \cdot c\beta) {}^{O'} b_i^z \end{pmatrix} \quad (3)$$

Siendo d_i la longitud de cada cadena cinemática, se obtiene:

$$d_i^2 = ({}^O q_i^x)^2 + ({}^O q_i^y)^2 + ({}^O q_i^z)^2 \quad (4)$$

Utilizando la ecuación 3, junto con la expresión 4, se obtiene el sistema de ecuaciones no lineales, que sólo depende de los ángulos α, β, γ .

2.2.2.- Modos de operación del robot 3UPS1S

Como puede intuirse en la Figura 4, el robot 3UPS1S debe ser capaz de portar las herramientas quirúrgicas y producir los movimientos necesarios para la realización de las tareas en una operación de laparoscopia. No obstante, el hecho de substituir los dispositivos clásicos por esta muñeca robotizada implica un nuevo entrenamiento para el cirujano,

de forma que, una vez entrenado, sea capaz de tener mejores habilidades utilizando la muñeca robótica que sin ella. Parte de este entrenamiento se hace con el simulador anterior. Para ello, el modelo cinemático de la muñeca ha sido modelado, y los movimientos realizados con los dispositivos hápticos corresponden con los movimientos de las herramientas en la zona quirúrgica.

Además, se han programado diferentes modos de operación de la muñeca 3UPS1S para facilitar su aplicación gradual en las intervenciones quirúrgicas:

- Un modo pasivo en el que la muñeca robotizada se utiliza como posicionador. El cirujano orienta libremente la herramienta quirúrgica y el robot permite fijar y mantener esa orientación.
- Un modo teleoperado. Se trata de un modo de teleoperación unilateral en la que no se tienen reflexión de fuerzas.
- Un modo teleoperado con reflexión de fuerzas. En este modo, las intensidades de los actuadores lineales son traducidas a esfuerzos en el extremo de la herramienta, y esta fuerza es reflejada hacia el operador utilizando los dispositivos *phantom omni*.

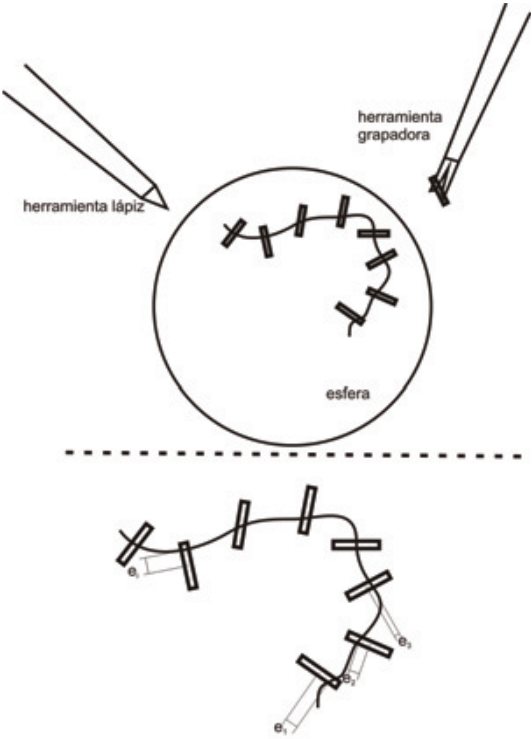
3.- RESULTADOS

3.1.- SIMULADOR FÍSICAMENTE REALISTA

Se muestra a continuación los resultados de dos de las pruebas que se realizaron con la finalidad de comprobar el funcionamiento de la aplicación simulador desarrollada.

La primera de las aplicaciones trabaja con sólidos rígidos (huesos), de forma que no produce deformación en ellos, mientras que en el segundo experimento se añade la capacidad de deformación del tejido/órgano simulado.

En el primer experimento, la secuencia de operaciones realizadas fue la siguiente: en primer lugar, se utiliza la herramienta lápiz para trazar una trayectoria sobre una superficie 3D (una esfera), y posteriormente utilizar la herramienta grapadora para tratar de colocar la grapas orientadas perpendicularmente a la trayectoria y centradas sobre ella. Ambas herramientas se manejaron con la misma mano. Se realizaron varios experimentos (mostrados en la tabla 1) donde varios usuarios probaron el sistema, midiendo el error de colocación obtenido.



	Nº grapas	Error = $\sum e_i$ [mm]
Usuario1	17	0.2516
Usuario2	15	0.1908
Usuario3	20	0.1978

Tabla 1: Experimento de grapado

Fig. 8: Experimento de grapado

En el segundo experimento mostrado se comprobó el funcionamiento háptico con modelos de sólidos deformables. Para ello se utilizó un modelo L.E.M. (*lumped element model*) de masas concentradas [Liu03], [Sabater06]. Los resultados de la Tabla 2 muestran la evolución del tiempo de cómputo frente al número de nodos utilizados (cada nodo-masa forma un sistema muelle-amortiguador con sus vecinos en vecindad a 8).

3.2.- ROBOT INTRÍNSECAMENTE SEGURO

El prototipo de muñeca esférica se ha modelado utilizando el software de simulación dinámica ADAMS® (Figura 10) y se ha comprobado su funcionamiento en lazo abierto. La grafica de la Figura 10 muestra que las fuerzas máximas ejercidas por cada motor durante una trayectoria genérica (se realizó la más desfavorable) no superan los 2 N, inferior a los 3,13 N de capacidad nominal de los actuadores elegidos en el diseño (LM1247 de Faulhaber).

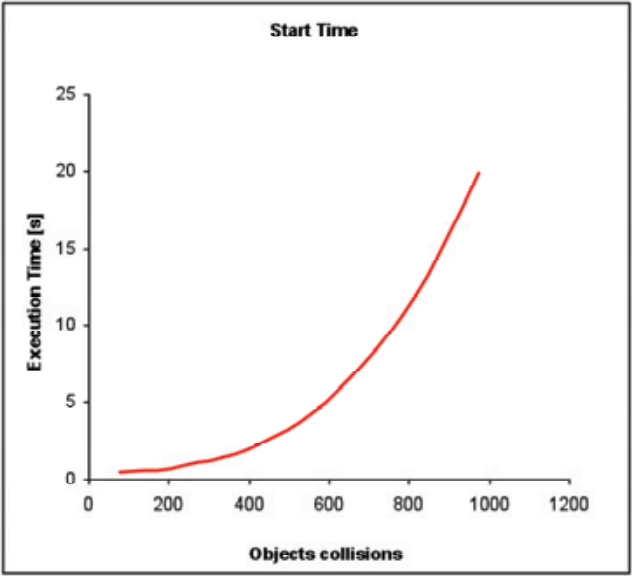


Fig. 9: Tiempo de ejecución de la simulación

Objetos colisionables	Tiempo de ejecución [s]
76	0,539263509
140	0,64531805
204	0,765520199
270	1,111810859
334	1,496977968
398	2,01980112
462	2,78335822
526	3,747162
590	5,03052455
654	6,600382171
718	8,440641199
782	10,71064116
846	13,28337345
910	16,40858545
974	19,90127963

Tabla 2: Tiempo de cálculo

Por otra parte, la Fig. 11 muestra los desarrollos realizados utilizando ADAMS-Control® y Matlab® para la selección de los controladores necesarios para el robot. La parte derecha de la figura muestra una trayectoria circular realizada por el extremo de la herramienta quirúrgica.

Finalmente, el primer prototipo de muñeca esférica 3UPS1S para aplicaciones de laparoscopia ha sido construido en los laboratorios de la Universidad Miguel Hernández y se muestra en la Figura 12.

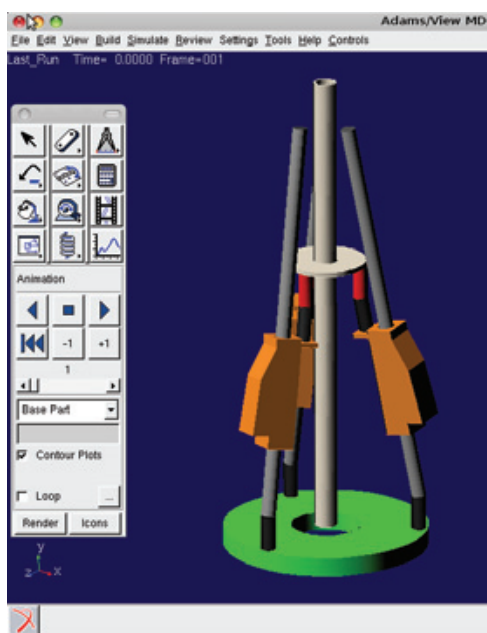
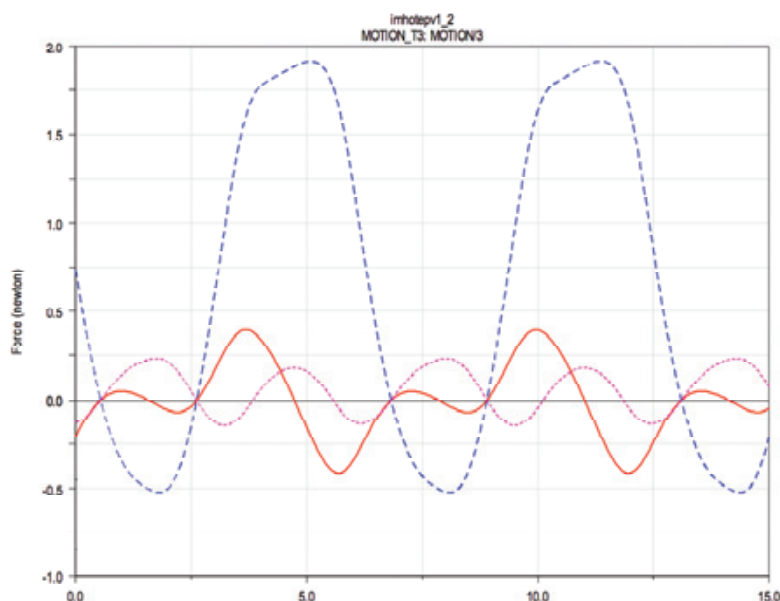


Fig. 10: Modelo Adams® de la muñeca esférica

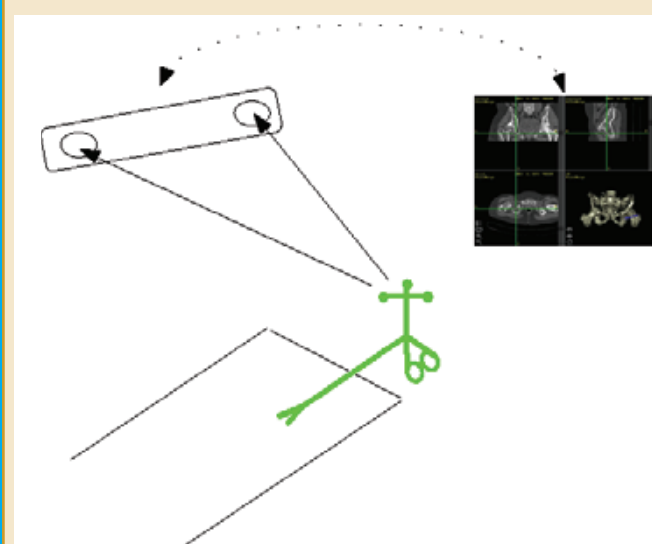
4. CONCLUSIONES

Las aportaciones de este artículo permiten abrir una pequeña ventana para la aplicación de la robótica dentro del quirófano. El pequeño dispositivo presentado, de no más de 40 cm de largo y 10 cm de diámetro, puede ser introducido con algo menos de resistencia dentro del equipo quirúrgico de un cirujano y además ir mostrando gradualmente sus ventajas tales como mejora de la precisión, disminución del temblor, mantenimiento preciso de la orientación, realización de trayectorias más complejas y, sobre todo, avanza en



un complicado campo de investigación con el objetivo de lograr situar al cirujano en un cómodo asiento, en un lugar adecuadamente acondicionado, con una visión aumentada de la intervención y con una percepción inclusive mejorada respecto a la real en cirugía normal abierta. Además, hemos de ser conscientes que las nuevas tecnologías que se pretendan introducir han de ir acompañadas de herramientas que permitan vencer la curva de aprendizaje que supone para muchos cirujanos la aparición de estas tecnologías en el quirófano. Recientes estudios están valorando el efecto de

NAVEGADOR QUIRÚRGICO



El navegador quirúrgico es un dispositivo cuya finalidad es determinar con precisión, y, en tiempo real, la localización (posición y orientación) de las estructuras anatómicas y de las herramientas quirúrgicas durante la cirugía. Actualmente existen dos tecnologías para la localización ("tracking") de las marcas utilizadas durante la cirugía: los navegadores ópticos y los magnéticos. Aunque con diferente principio físico, ambos se fundamentan en la triangularización y localización 3D de unas marcas fijas bien a las estructuras anatómicas, bien a los instrumentos quirúrgicos. La figura muestra un esquema de este principio de funcionamiento. Estos dispositivos integran la información preoperativa con la localización en tiempo real intraoperativa. La navegación quirúrgica empezó a utilizarse en los años 90, y actualmente se utiliza principalmente en operaciones de neurocirugía y traumatología, donde aprovecha la naturaleza rígida de las estructuras óseas.

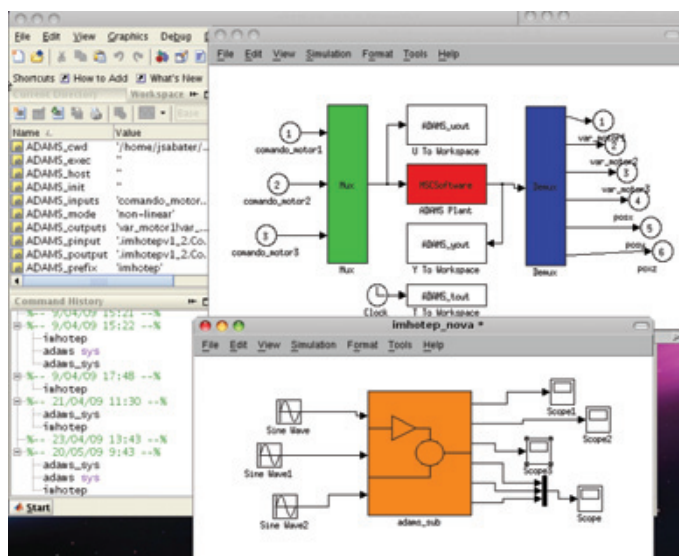


Fig. 11: Simulaciones de control

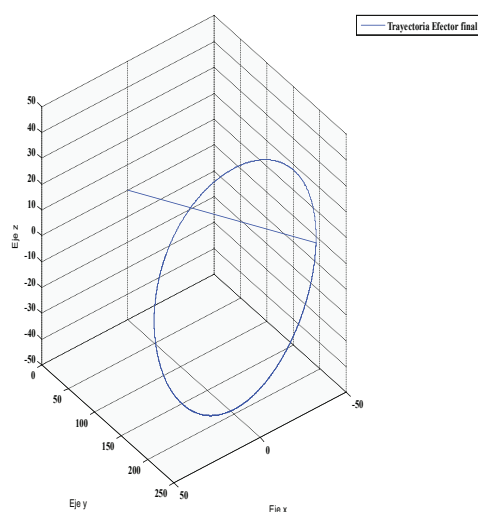
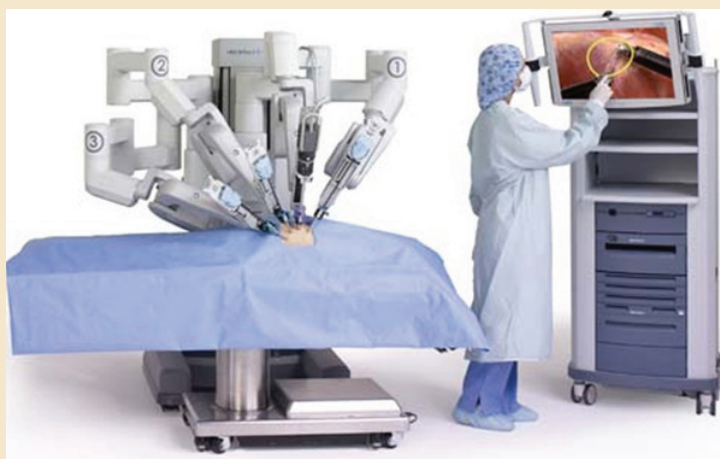


Fig. 12: Prototipo experimental

los simuladores quirúrgicos en el aprendizaje de diferentes técnicas, resultando una notable aceleración en el proceso de adoptar dicha tecnología. No obstante, los resultados mostrados en la Tabla 2 indican que con la potencia de cálculo actual, no es posible modelar entornos quirúrgicos complejos que incluyan objetos deformables. A pesar de utilizar un modelo sencillo como el L.E.M., la aplicación con objetos deformables tiene tendencia a aumentar exponencialmente el tiempo de cómputo, siendo necesaria una simplificación de los modelos 3D de los objetos que aparecen en el entorno, herramientas, tejidos, órganos, etc. En la actualidad se trabaja con modelos mixtos (parte rígida-parte deformable) que permitan una ejecución realista y rápida de la simulación.

SISTEMA DAVINCI



Cortesía de www.intuitivesurgical.com

El sistema robótico da Vinci, fabricado por Intuitive Surgical®, (www.intuitivesurgical.com), consiste en un sistema de teleoperación a distancia en el que el cirujano, sentado en la consola de comando, es capaz de controlar los tres o cuatro brazos robóticos de los que consta el da Vinci. El cirujano inserta sus manos en unos dispositivos joystick, y mira a través de un sistema de visión que le permite ver en 3D lo que está siendo captado por una cámara endoscópica 3D situada en uno de los brazos del da Vinci. Los dispositivos joystick controlan los movimientos de los brazos robóticos del sistema da Vinci, diseñados para aplicaciones de cirugía MIS y que utilizan el concepto de RCM para pivotar sobre el trocar.

El campo de la ingeniería quirúrgica abre grandes posibilidades para los ingenieros actuales. La constante necesidad de avances tecnológicos es una motivación para incentivar una colaboración entre médicos cirujanos e ingenieros que de como resultado una mejora en los procedimientos quirúrgicos actuales. El presente trabajo muestra dos ejemplos, entre los muchos campos, donde la ingeniería puede, y debe, colaborar y prestar su ayuda. Es necesario convencernos que debemos mejorar la capacidad de interlocución con los cirujanos, que nos expliquen sus necesidades, entenderlas, y hacernos explicar nuestros requisitos tecnológicos y nuestras capacidades. De esta mejora en la comunicación se obtendrán, en un futuro muy cercano, nuevas herramientas y nuevos sistemas que mejoren los actuales, y los ingenieros debemos estar ahí.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno de España, desde el Ministerio de Ciencia e Innovación, dentro del marco Plan Nacional I+D+I 2008-2011 mediante el proyecto DPI2008-06775-C02-01, y por el proyecto 509AC0372 de CYTED - programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo.

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

CAS	Computer Assisted Surgery. Cirugía asistida por computador.
CT	Computerized tomography. Tomografía computerizada
fMRI	Functional- magnetic resonance imaging.
LEM	Lumped Element Model. Modelo de masas reducidas utilizado en modelado de mallas.
MIS	Minimally Invasive Surgery. Cirugía mínimamente invasiva.
MRI	Magnetic Resonance Imaging. Imagen médica de resonancia magnética
RCM	Remote Center of Motion. Centro de rotación instantáneo.
US	Ultrasound. Imagen obtenida mediante ultrasonidos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [Badesa09]
- Badesa FJ, Pinto ML, Sabater JM, et al. "Efficient collision algorithm the 3D haptic interaction with solid organs in medical environments" Proc. Of the 2nd Int. Conf. On advances in computer-human interaction p. 187-192, 2009.
- [Ballantyne02]
- Ballantyne G.H., "Robotic surgery, telerobotic surgery, telepresence and telementoring" en: Surgical Endoscopy, Vol 16. (10), p. 1389-142002.
- [Boctor04]
- Boctor E., Webster III R., Mathieu H. et al. "Virtual remote center motion control for needle placement robots" Computer Aided surgery Vol.9-5, p.75-183. 2004
- [Casals09]
- Casals A, Frigola M, Amat J. "La robótica, una valiosa herramienta: cirugía". Revista Iberoamericana de Automática e informática indust Vol.6-1, p.5-19., 2009
- [Ivorra08]
- Ivorra D, Sabater JM, Azorin JM et al., "Integración de herramientas 3D en un simulador de entrenamiento de técnicas de laparoscopia" Actas XXVI congreso anual de la sociedad española de ing. Bioméd CASEIB08 p.112-115. , 2008
- [Kazanzides08a]
- Kazanzides P, Fichtinger G, Hager GD, et al., "Surgical and interent robotic- Core concepts, technology and design" IEEE Robot. Automat. Mag., Vol.15-2, p.122-130., 2008
- [Kazanzides08b]
- Kazanzides P, Fichtinger G, Hager GD, et al., "Surgical and interent robotic- Surgical CAD-CAM Systems" IEEE Robot. Automat. M Vol.15-3, p.94-102., 2008
- [Kazanzides08c]
- Kazanzides P, Fichtinger G, Hager GD, et al., "Surgical and interent robotic- Surgical Assistance Systems" IEEE Robot. Automat. M Vol.15-4, p.84-93., 2008
- [Liu03]
- Liu A., Tendick F., Cleary K. et al. "A survey of surgical simulation applications, technology, and education". Presence Vol.12-6, p.599-62003
- [Pransky97]
- Pransky, J. "Robodoc - surgical robot success story". En: Industrial robot an international journal.Vol 24 (3) p. 231-233, 1997
- [Rosen02]
- Rosen, J., Brown, J. Ghang, L. et al. "The blue-dragon, a system measuring the kinematics and the dynamics of minimally invasive surgical Tools in-vivo" En: Proc. Of 2002 IEEE Int. Conf. On Robotics automation, Vol.1, 2002.
- [Rosen06]
- Rosen, J. Hannaford, B. "Doc. At distance" IEEE Spectrum, Vol.44 p.34-39., 2006
- [Sabater06]
- Sabater JM., Azorin JM, Garcia N. et al. "Herramientas software para interacción háptica con superficies deformables generadas a partir imágenes CT" En: Actas XXVII Jornadas de automática, Almería 2006
- [Sabater09]
- Sabater JM, Garcia N, Perez C. et al. "Kinematics of a robotic 3UP spherical wrist designed for laparoscopic applications". En Roboti (aceptada en julio2009 para su publicación)