

La Robótica, una valiosa herramienta en Cirugía.

Alicia Casals*, Manel Frigola* y Josep Amat**

*Institut de Bioenginyeria de Catalunya (IBEC). Parc Científic de Barcelona.
Baldori Reixac, 13, 08028, Barcelona, España
(e-mail: {alicia.casals, manel.frigola}@upc.edu)

**Centre de Recerca en Enginyeria Biomèdica (CREB), Universidad Politècnica
de Catalunya, Pau Gargallo nº 5, 08028, Barcelona, España
(e-mail: josep.amat@upc.edu)

Resumen: Los avances tanto en las técnicas de diagnóstico por la imagen como la incorporación de nuevas tecnologías en el instrumental están cambiando de forma progresiva los procedimientos quirúrgicos. Por otra parte, las técnicas de cirugía mínimamente invasiva, que están actualmente muy consolidadas, han supuesto un avance tanto tecnológico como de tratamiento quirúrgico. Las limitaciones, tanto en precisión como en accesibilidad, que implica la realización de operaciones de forma manual pueden ser abordadas con la ayuda de la robótica. Asimismo, el control de robots basado en sensores está abriendo paso a nuevas mejoras de estos procedimientos, ya sea mediante la teleoperación, en que cirujano y robot establecen la mejor sinergia para conseguir óptimos resultados o mediante la automatización de determinadas acciones. En este artículo se describe esta evolución, repasando inicialmente los ámbitos de aplicación de la robótica, para a continuación analizar las tecnologías y métodos implicados en el proceso de robotización de la cirugía y los sistemas de interacción cirujano-robot. Copyright © 2009 CEA.

Palabras Clave: Robótica, Aplicaciones Médicas, Teleoperación, Sistemas Biomédicos, Cirugía asistida por Computador, Interfaces Persona-Máquina.

1. INTRODUCCIÓN

Mientras que la evolución de la robótica en la industria ha sido notable desde su introducción a finales de los años 60 su extensión en el sector de servicios y en el ámbito de la medicina no empieza a tener cierta incidencia hasta la década de los 90. Así, los quirófanos actuales, aun habiendo incorporado gran cantidad de equipos de alto nivel tecnológico, carecen en su mayoría de las ayudas que potencialmente la robótica puede ofrecer (Satava, 2002).

Este desfase entre el entorno industrial y el quirúrgico tiene su explicación en las grandes diferencias en las condiciones de trabajo. En la industria se adapta la instalación para conseguir una gran eficiencia en las tareas robotizadas, operando a menudo con una limitada capacidad de decisión o inteligencia, manteniendo los robots apartados del entorno donde hay personas. En el quirófano por el contrario, el robot trabaja interaccionando estrechamente con las personas y se enfrenta a las condiciones de trabajo de este entorno tan poco estructurado. Factores como la diversidad entre la anatomía de los pacientes, su posicionado sobre la mesa de operación, la deformabilidad de algunos órganos o tejidos blandos, las incertidumbres o imprevistos, o las condiciones de seguridad exigidas, determinan la complejidad de los sistemas de cirugía robotizados.

La evolución tecnológica que progresivamente ha ido transformando los quirófanos, ha propiciado una importante evolución de los procedimientos quirúrgicos. Por otra parte, la cirugía no puede considerarse limitada al propio acto

quirúrgico, sino que va directamente ligada al procedimiento previo de exploración, diagnóstico y planificación de la intervención. Así pues, el diagnóstico por la imagen, la evolución de la informática con su incidencia en los equipos tanto de diagnóstico como de soporte a la cirugía y la sofisticación de equipos, materiales e instrumental, han dado lugar a un cambio drástico en la cirugía (Casals, 2008; Wall et al., 2008). Esta evolución comporta sin duda grandes beneficios para los pacientes y son un gran apoyo a los cirujanos, abriendo incluso nuevas posibilidades en intervenciones que no serían viables sin un alto nivel de tecnología. Sin embargo, los cirujanos deben afrontar el reto de adaptarse a un nuevo entorno, a familiarizarse con los nuevos equipos y a aprender nuevas técnicas quirúrgicas que exigen un continuo nivel de reconversión y la incorporación de personal técnico cualificado en sus equipos de trabajo.

A fin de ofrecer una visión global sobre la situación actual y las perspectivas de la robótica en el ámbito de la cirugía, este artículo parte de una descripción de cómo la evolución de las tecnologías de diagnóstico y la evolución del instrumental quirúrgico han ido cambiando los procedimientos quirúrgicos, dando lugar a la introducción de la robótica. Con el objetivo de plantear las posibilidades y limitaciones de la robótica en este campo tan amplio y diverso, se parte de una clasificación, desde el punto de vista más técnico que clínico, de las tipologías de intervenciones quirúrgicas, sección 3. Con este planteamiento, y después de describir la estructura general de un procedimiento quirúrgico completo desde el diagnóstico hasta la intervención, sección 4, se pasa a analizar las formas de operación de la

robótica en cirugía. En la sección 5 se abordan las técnicas tanto de ayuda a la cirugía asistida por computador, como los distintos modos de operación robotizada: el posicionado preciso, los distintos niveles de teleoperación y las tareas realizadas de forma autónoma. Debido al elevado grado de interacción persona-robot necesario en este entorno con tanta necesidad de cooperación, se dedica una sección a describir los dispositivos de interfaz cirujano-robot. La sección 7 expone estrategias y aspectos de seguridad y fiabilidad, para acabar con una visión de las perspectivas futuras de la robótica en este campo.

2. EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA Y ROBÓTICA QUIRÚRGICA

El hecho de poder disponer de información anatómica interna utilizando tecnologías de exploración externa, como la radiografía, la ecografía o la tomografía ha sido sin duda un factor clave en el progreso de la cirugía (Roux et al., 2003). Estos dispositivos de exploración externa permiten no solo diagnosticar una enfermedad o patología, sino también obtener la información necesaria sobre la localización o características de tumores u otras patologías, y así poder planificar y simular la intervención e incluso poder efectuar el guiado del robot en operaciones robotizadas. Esta evolución de los dispositivos de adquisición de imágenes médicas es el resultado combinado de un avance tecnológico y de la creciente capacidad computacional de la informática. Los avances tecnológicos han permitido por ejemplo, el desarrollo de sensores en *array*, que permiten obtener una mayor resolución en la tomografía por rayos X, o poder efectuar análisis espectrales de mayor resolución en resonancia magnética (RM). Por otra parte, el continuo incremento de la capacidad computacional, permite procesar un mayor número de datos permitiendo obtener reconstrucciones 3D más detalladas en un menor tiempo.

La tecnología ha permitido también diseñar y fabricar nuevos instrumentos que han producido cambios significativos en la evolución hacia nuevos procedimientos quirúrgicos. La miniaturización de los dispositivos electro-mecánicos y ópticos ha sido una de las claves de la cirugía mínimamente invasiva o *MIS* (*Minimally Invasive Surgery*). Así, el laparoscopia por ejemplo, ha dado lugar a la introducción de la cirugía laparoscópica, una de las primeras técnicas de cirugía mínimamente invasiva. El laparoscopia integra un sistema óptico capaz de contener en un tubo, normalmente de unos 8 mm de diámetro, un sistema de lentes que permite transmitir la luz de un foco externo y captar la imagen del interior del paciente, a partir de una cámara también externa.

Los dispositivos endoscópicos se han ido sucediendo y algunos de ellos, en cierto grado, se han ido robotizando para conseguir un mejor acceso y capacidad de manipulación. Un ejemplo de esta continua evolución puede verse en el prototipo de la figura 1, que muestra una versión futura de la actual cápsula endoscópica (*smart pill*) utilizada para el proceso de exploración visual del aparato digestivo (Quirini et al., 2007). Mientras que la cápsula actual es ingerida por el paciente y sigue su recorrido por todo el sistema digestivo con un control muy limitado, este nuevo prototipo (inicialmente concebido para la exploración del colon) está dotado de unos elementos articulados, que al apoyarse a las paredes de las vías internas, permite controlar su posicionamiento de forma remota.

La conjunción de estos avances ha permitido, para un gran número de tipologías de intervenciones, pasar de la clásica intervención a “cielo abierto” a la cirugía mínimamente invasiva, (Figura 2). La gran mejora que supone el paso de tener que efectuar una gran incisión, a la posibilidad de operar a través de pequeños orificios, ya sea artificiales como en cirugía laparoscópica o naturales como cateterismo u otras técnicas endoscópicas, comporta también nuevas dificultades y limitaciones (Tercero et al., 2007). En la cardiología intervencionista clásica, por ejemplo, el profesional que guía el catéter está expuesto también a una cierta radiación de rayos X. La posibilidad de robotizar el guiado, además de evitar esta exposición, aporta claras ventajas al paciente al poder conseguir una mayor habilidad de guiado. El uso de catéteres activos, como en (Jayender et al., 2008), proporciona un control del esfuerzo realizado, además de ofrecer la capacidad de torcerse por el hecho de estar dotados de actuadores basados en materiales de memoria de forma (*MSA-Memory Shape Alloy*). Su sensorización permite un control cooperativo mejorando las prestaciones. En (Bertocchi et al., 2008) la realimentación de información visual y de presión permite supervisar el guiado en neurocirugía de la espina dorsal.



Figura 1 Dispositivo endoscópico para la exploración del colon y controlado remotamente (Sc. Sup. Sant'Anna)

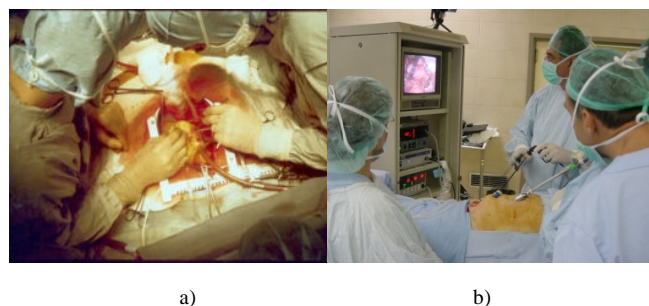


Figura 2. Evolución de la cirugía. a) Cirugía a “cielo abierto”, b) Cirugía mínimamente invasiva

La menor invasión comporta sin embargo, una mayor dificultad de operación para el cirujano, tanto en lo que se refiere a la percepción de sus acciones y los efectos que produce, como en la mayor habilidad necesaria en la manipulación de las pinzas o útiles quirúrgicos. La utilización de estos instrumentos, que alejan las manos del cirujano de los órganos o partes a operar del paciente, ha motivado el estudio y desarrollo de técnicas de sensorización de los mismos para poder aportar realimentación sensorial, ya sea visual, táctil o acústica. El problema de la percepción táctil de forma indirecta, a través del instrumento, radica en la distorsión de la sensación percibida debido al efecto que produce la fricción a través del trocar (cilindro que guía el instrumento a través del orificio de entrada). La sensorización de los instrumentos no es trivial debido a la necesaria miniaturización, las condiciones de esterilización, etc., siendo

también crítica la elección de la ubicación de los sensores. En (Seibol et al., 2005) se estudia tanto el sensor a utilizar, como su ubicación, ya sea en el extremo del instrumento (dedos de la pinza), eje de la articulación o entre la pinza y la articulación y se propone un sensor en un montaje tipo plataforma poli-articulada, tipo plataforma *Stewart*, para ubicar un sensor de fuerzas y pares de 6 ejes. Para ello se define una geometría que permite obtener una matriz bien condicionada para calcular los esfuerzos reales y así poderlos transmitir de forma efectiva al cirujano. Por otra parte, la percepción táctil constituye una gran ayuda que complementa a la visión, ya que permite discriminar mejor diferentes tipos de tejidos. En (Eisinberg et al., 2006) se estudian los modelos de respuesta a realimentar al usuario para que pueda discriminar con elevada fiabilidad diferentes tejidos y así aumentar su eficiencia.

Este distanciamiento del paciente que implica, tanto una visualización, no directa sino a través de cámaras para la captación continua de imágenes, como la necesidad de operar utilizando instrumentos con largas cánulas y el hecho de disponer de instrumental sensorizado, hace que la forma de operar se vaya acercando al concepto de teleoperación, en que, a través de un dispositivo maestro se controla y guía remotamente un útil o instrumento.

En el ámbito de la cirugía ortopédica, donde se hace más patente el desfase entre la robótica industrial, con un alto grado de automatización en el mecanizado, y la robótica quirúrgica que muy escasamente se beneficia de estas potencialidades, la robótica ofrece grandes perspectivas. Su avance tan lento se debe a la dificultad en resolver aspectos clave que van desde la necesidad de inmovilizar al paciente y la localización precisa del miembro u órgano a intervenir, hasta el diseño, para ciertos procedimientos quirúrgicos, de robots altamente especializados (Berkelmann et al., 2005). La inmovilización del paciente con sistemas de fijación, como por ejemplo los marcos de estereotaxia, es una operación imprescindible para el uso de técnicas ya muy consolidadas en la industria como el mecanizado por CAD/CAM. Para evitar esta dependencia, se sigue investigando en la localización y el seguimiento en tiempo real del órgano o parte del paciente a intervenir, de manera que se pueda referenciar adecuadamente la posición del robot a un sistema de coordenadas ligado al paciente. Este seguimiento debe hacer factible la robotización de las intervenciones en que la inmovilización no es posible o aquellas en que las técnicas para hacerlo son demasiado invasivas.

Un factor clave al considerar la potencial robotización de algunas acciones a realizar en el transcurso de una intervención es la tipología de los tejidos involucrados. Por este motivo, se distingue la operación sobre tejidos blandos (órganos, músculos, etc.), que son deformables y pueden desplazarse al actuar sobre ellos, o sobre tejidos rígidos o duros (huesos), no deformables, aunque a menudo no pueden fijarse en una posición estable. Con estas consideraciones, se describen a continuación los diferentes ámbitos de aplicación para, a partir de ellos, profundizar en las tecnologías robóticas involucradas.

3. AMBITOS DE APLICACIÓN

Con el fin de estudiar las posibilidades de la implantación de la robótica en cirugía, se plantea una clasificación de las técnicas quirúrgicas, enfocada desde un punto de vista tecnológico, y se

evalúan sus necesidades. A partir de este planteamiento tecnológico, y sin ánimo de ser exhaustivos, se pueden clasificar las tipologías de intervenciones como:

- Cirugía sobre tejidos rígidos (cirugía ortopédica)
- Cirugía sobre tejidos blandos (torácica y abdominal)
- Cirugía a través de orificios (mínimamente invasiva)
- Microcirugía

En base a estos cuatro tipos básicos de intervenciones se analizan las necesidades tecnológicas específicas o genéricas que hacen, o deberían hacer posible, la implantación de la robótica en cada especialidad.

3.1 La problemática de la robótica ortopédica

Considerando sus características y desde el punto de vista tecnológico, la cirugía ortopédica es la tipología más susceptible de robotización. El hecho de que las partes a intervenir sean huesos, considerados como elementos rígidos no deformables, favorece su robotización. La tipología de este tipo de intervenciones que comportan operaciones básicamente de mecanizado como: cortar, fresar, taladrar, o la inserción de prótesis, ofrece un gran paralelismo al mecanizado industrial, altamente automatizado y robotizado.

En este contexto favorable a la robotización, el principal reto que afronta la cirugía quirúrgica es la localización. A diferencia del entorno industrial, en que las piezas suelen estar sobre una base fija y se puede conseguir un posicionado de gran precisión, la localización de una parte concreta del tronco o de los miembros del paciente constituye el principal problema en la introducción de la robótica en la cirugía. La localización constituye un problema no únicamente para la automatización de la actuación robótica, sino incluso también para las operaciones manuales. El principal problema a resolver es el registro, o puesta en correspondencia, entre las imágenes obtenidas en el proceso preoperatorio de diagnóstico y la posición y orientación del paciente en la mesa de operaciones. Es pues básicamente un problema de fijar el sistema de coordenadas de referencia del robot, problema que se agrava si no puede asegurarse que se mantiene constante durante la intervención (Amat, 2006). La dificultad en conseguir una información del posicionado en tiempo real cuando hay movimiento, ha propiciado que las primeras intervenciones robotizadas fueran en neurocirugía, donde mediante marcos de estereotaxia puede fijarse la cabeza del paciente (Taylor et al., 1994). Cuando esta fijación no es posible, la mecanización precisa depende totalmente de la habilidad del cirujano en posicionar el instrumento en cada momento.

Esta necesidad de posicionado hace que los robots diseñados para la cirugía ortopédica lleven asociado su sistema de navegación. Así pues, la operación del robot *Robodoc* (Kazanzides et al., 1995), que fue utilizado principalmente para la cirugía de implante de prótesis de cadera, se basaba en su simulador y planificador, el sistema *Orthodoc*. De la misma forma que *Acrobot*, (Jakopec et al., 2003), opera con: *Acrobot modeller* a partir de las imágenes 3D de tomografía; *Acrobot planner*, el software que permite al cirujano planificar su intervención, y el *Acrobat Navigator* que sigue el movimiento de los instrumentos para realizar la operación con la precisión necesaria.

Los sistemas de posicionado, o navegadores (sección 4.1) son ampliamente utilizados en la actualidad en el proceso de guiado manual a partir de imágenes lo que permite acceder a zonas no visibles directamente por el cirujano. Los navegadores permiten minimizar el grado de invasión en un gran número de intervenciones, o hacer posible otras que serían inviables sin la utilización de técnicas *MIS*.

3.2 Limitaciones tecnológicas de la cirugía torácica y abdominal

La cirugía sobre tejidos blandos, deformables o en movimiento, es un tipo de operación que presenta la mayor dificultad para la aplicación de las técnicas robóticas. Ello es debido a que muy difícilmente pueden planificarse tareas complejas, como las que deben realizarse en toda intervención quirúrgica. A esta dificultad de planificación, se le añade además el problema de no disponer de posiciones absolutas de los elementos poco deformables, o la dificultad que supone tener que efectuar la deformación topológica de los modelos disponibles, para aplicarlos sobre estos elementos deformables sobre la mesa de operaciones. A esta problemática vista desde el punto de vista estático, debe añadirse también el problema dinámico que suponen los movimientos anatómicos de tipo periódico, la respiración o el latido del corazón, así como los espasmódicos.

A pesar de estas dificultades, la robótica puede prestar una gran ayuda al cirujano mediante la teleoperación, en que es el propio cirujano quien realiza las complejas tareas de planificación y continua corrección de estos planes durante la intervención, necesaria por los continuos imprevistos y la localización de los distintos órganos. En este caso, el beneficio de la robótica se centra en la miniaturización y una mejor accesibilidad y un control de la teleoperación que puede incorporar cambio de escala, filtrado o incluso la estabilización dinámica. Así pues, la cirugía mediante robots teleoperados facilita el acceso y operatividad en zonas restringidas, mediante instrumentos con largas cánulas y terminales miniaturizados y reduce el tiempo de operación.

3.3 Necesidades tecnológicas y la robótica en cirugía mínimamente invasiva

Las intervenciones a través de pequeñas incisiones o introduciendo el instrumental a través de orificios naturales comporta evidentemente ventajas para el paciente debido a su menor trauma. En contraposición, exige disponer de nuevo equipamiento en el quirófano. El cirujano por su parte carece de visión directa, normalmente percibe el campo operatorio a través de una imagen bidimensional, perdiendo en consecuencia información de profundidad. La imagen presenta también el efecto espejo, debido a la inversión óptica entre movimiento e imagen, que comporta dificultades de interpretación espacial. Se pierde el tacto directo, ya que no se tocan los tejidos y órganos con las manos sino a través de largos instrumentos controlados desde el exterior. Asimismo, el acceso es más restringido a través de las incisiones practicadas, lo que limita la maniobrabilidad y en consecuencia exige una mayor habilidad. En este tipo de intervenciones, la robotización de tareas pueden estar orientadas a **funciones de soporte** o ayuda, o a **funciones operativas**. Estas funciones operativas son realizadas mediante la teleoperación que puede ser de funcionamiento autónomo o asistido (semiautónomo).

La robótica, en **funciones de soporte**, se utiliza en el guiado de la cámara, una función imprescindible para la visualización del campo operatorio, para conseguir la focalización del campo de visión que se desplaza durante la intervención de acuerdo con la evolución de la intervención. El guiado autónomo exige la interpretación de la escena de operación mediante el procesado de la imagen visualizada. La determinación de la zona de interés mediante la detección y seguimiento de los instrumentos ya ha conseguido resultados factibles para su utilización en el guiado del robot (Casals et al., 1996), (Guo-Qing et al., 1997). En cambio, la segmentación y reconocimiento de los distintos órganos para interpretar el campo operatorio comporta tal complejidad, que no permite de momento la interpretación de la escena visualizada para su operación en tiempo real.

El guiado teleoperado de la cámara ha dado resultados significativos utilizando interfaces manos libres como la voz (Muñoz V.F et al., 2004), o con dispositivos master basados en una cinta en la cabeza o un pedal. En esta línea, Aesop fue el primer sistema robótico aprobado para cirugía por la FDA en 1994. Este robot, tipo SCARA, actúa llevando la cámara en cirugía laparoscópica. Una versión posterior aprobada en el 2000 incorpora un sistema de reconocimiento de voz y actúa frente a órdenes orales del cirujano en el posicionado de la cámara, orientándola en la dirección que indica la cabeza del cirujano que lleva un sensor de orientación.

Para la robotización de **funciones operativas**, que son las propiamente quirúrgicas, la robótica ofrece dos posibles formas de operación: autónoma o teleoperada. Al trabajar sobre órganos deformables que además pueden desplazarse durante la intervención, voluntariamente o no, la operación autónoma actualmente no es posible, debido a la imposibilidad de programarlas *a priori*.

La sinergia entre cirujano y robot en teleoperación asistida, ofrece la posibilidad de aportar las mejores capacidades tanto de la persona, como del robot, mejorando en consecuencia los resultados de la intervención. La teleoperación asistida, en que las ordenes del operador humano son moduladas o modificadas por el computador de acuerdo a unos parámetros preestablecidos y de acuerdo a la evolución de la operación, permite aportar a la inteligencia, conocimientos, intuición y capacidad de decisión del cirujano, la precisión, capacidad de cálculo e interpretación geométrica del computador, soportado por la percepción sensorial necesaria en cada caso. De esta forma el sistema teleoperado permite al cirujano dirigir y guiar la operación con la supervisión y asistencia del robot.

En esta línea, en los años 90, el robot Zeus realizó ya múltiples intervenciones por teleoperación utilizando dos brazos robot para el seguimiento de los movimientos de las manos del cirujano. Las acciones de asistencia radican básicamente en: el cambio de escala entre los espacios de operación (maestro y esclavo) para, en general, aumentar la precisión; en la posibilidad de definir restricciones en el movimiento del robot dentro del campo operatorio para conseguir una operación más segura; y en la compensación del movimiento del paciente, como la respiración o el latido del corazón. En (Seibol et al., 2005) se introduce el concepto de *MIRS, Minimally Invasive Robotic Surgery*, donde la realimentación *haptic* supone una ayuda adicional al cirujano para mejorar su habilidad de operación.

Aunque la teleoperación se efectúa normalmente de forma local, con el cirujano a unos metros del paciente, también se ha experimentado operando remotamente, entre puntos muy alejados, para poder disponer de un determinado especialista en momentos determinados, o para disponer de personal cualificado en situaciones de emergencia.

3.4 Posibilidades y limitaciones de la robótica en microcirugía

La microcirugía se caracteriza por la necesidad de operar sobre elementos de reducidas dimensiones y mediante la utilización de un microscopio (escala mili o micrométrica), lo que dificulta y en muchos casos imposibilita la operación manual (Figura 3). La microcirugía, que se caracteriza pues por requerir una elevada precisión, permite por ejemplo, reducir el temblor, que aún siendo inapreciable a simple vista, su efecto sobre la punta de los instrumentos de microcirugía, puede ser crítico. (Kragic et al., 2005), (Riviere et al., 2006). Las aplicaciones de la microcirugía son básicamente la oftalmología, la cirugía vascular y nerviosa, implantes de miembros, y la neurocirugía, cerebro y médula espinal.



Figura 3. Realización manual de micro-operaciones

En el campo de la cirugía oftalmológica, donde se ha implantado de forma más generalizada la utilización de técnicas de guiado con precisión micrométrica, se han conseguido elevadas prestaciones tanto en la corrección de dioptrías de la cornea como en operaciones de retina. A nivel de operaciones sobre la retina, las intervenciones se efectúan mediante técnicas laser pero también se están desarrollando técnicas que implican la inserción de instrumentos en el globo ocular a través de una pequeña incisión. La robotización de estas intervenciones, actualmente en fase de experimentación, comporta el disponer de soportes robotizados bajo el paradigma *steady-hand* en que cirujano y robot comparten el control del instrumento sujeto al propio robot. En (Mitchell et al., 2007), y con el objetivo fijado en la cirugía de la retina, se ha experimentado en un sistema robotizado sobre un modelo biológico. El robot percibe los esfuerzos ejercidos, para de esta forma realizar un movimiento suave, sin temblor y con un posicionado preciso.

La neurocirugía, que implica operaciones como punciones con una aguja que requieren gran precisión incluye tanto el cerebro como la columna vertebral. La precisión y la protección de áreas próximas es clave para evitar, por ejemplo, que se produzcan daños medulares. También en el campo de la neurocirugía, en los implantes de miembros se requiere efectuar la conexión de nervios así como el empalme y cosido de venas y capilares de dimensiones sub-milimétricas. Para este tipo de

aplicaciones la teleoperación permite efectuar a otra escala estas tareas con mayor eficacia y celeridad.

En cirugía vascular, el cosido de venas y arterias, aun no siendo vasos capilares, requiere igualmente una gran habilidad y experiencia. Esta tarea se facilita grandemente utilizando las técnicas de teleoperación asistida, en que el cambio de escala se puede complementar además con la linealización de un espacio circular. Para poder realizar la cirugía coronaria, se requiere paralizar el latido del corazón, para estabilizar la zona de trabajo, utilizando un bombeo externo. Esta paralización, puede evitarse, utilizando un sistema de teleoperación que compense los efectos del movimiento, presentando al cirujano la escena estática aún siendo ella dinámica, y permitiendo operar en condiciones estáticas (sección 5.3.2).

4. LA PLANIFICACIÓN Y LA OPERACIÓN EN ROBÓTICA QUIRÚRGICA.

La utilización de la robótica concebida como una herramienta quirúrgica, requiere una programación previa del conjunto de trayectorias que comporta la realización de la tarea deseada. Dado que no resulta posible el poder preprogramar estas trayectorias como lo es en los entornos industriales, es necesario efectuar una planificación previa a la intervención, consistente en definir zonas de trabajo y zonas de exclusión sobre el modelo 3D obtenido previamente por tomografía. En la figura 4 se muestra un esquema general de las distintas funciones que integra la utilización de la robótica en un entorno quirúrgico.

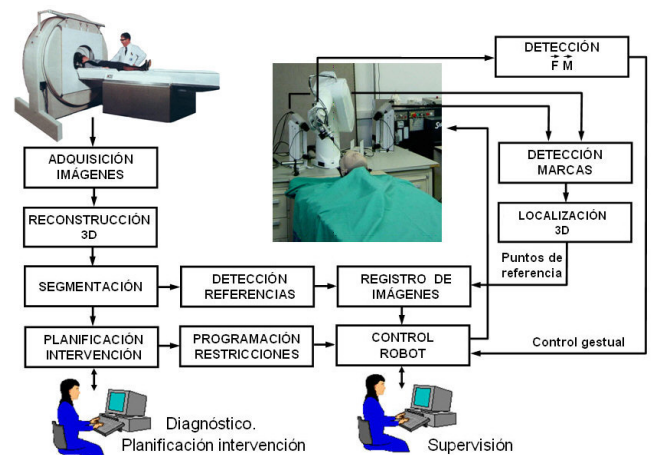


Figura 4. Conjunto de tareas asociadas a la robótica quirúrgica

Para que las condiciones de trabajo o las restricciones geométricas impuestas puedan ser referenciadas respecto a la anatomía del paciente, es preciso poder obtener los puntos de referencia necesarios para poder definir los ejes de coordenadas del espacio de trabajo del robot con respecto a los ejes de referencia anatómicos.

Para ello se pueden utilizar puntos de referencia claramente diferenciados sobre la anatomía, como pueden ser algunos elementos geométricos prominentes de algunas piezas dentales, o puede recurrirse a la implantación de elementos referenciales específicos, por ejemplo algunos tornillos de referencia sobre el cráneo del paciente, que deberán ser implantados antes de la obtención de las imágenes tomográficas.

Durante la fase de planificación, deberán identificarse sobre el modelo 3D obtenido por tomografía estos puntos de referencia (*landmarks*), para que pueda posteriormente efectuarse el registro, es decir, la puesta en correspondencia entre las imágenes tomográficas y la posición de la anatomía sobre la mesa de operaciones.

Una vez conseguida esta puesta en correspondencia entre el modelo CAD de la anatomía interna obtenida por tomografía, y la posición de esta misma anatomía respecto al robot en la mesa de operaciones, se obtiene la posición en el espacio de trabajo del robot, de los mismos puntos de referencia introducidos anteriormente a la obtención de las imágenes tomográficas. Así pues, se dispone también de la posición referenciada de los distintos espacios de trabajo establecidos por el cirujano en la fase de planificación.

Pero para poder llevar a cabo la intervención con eficacia y seguridad, también debe ser posible el poder modificar los parámetros predefinidos siempre que sea necesario durante la intervención. Para ello se deberá disponer en el quirófano también de una estación de trabajo, para poder monitorizar la tarea realizada y poder introducir estos cambios tantas veces como sea necesario. Es por ello que la interfaz del usuario es un elemento altamente relevante en la definición del sistema en este campo de aplicación de la robótica.

5. ROBÓTICA QUIRÚRGICA. FORMAS DE OPERACIÓN

Las formas de operación de la robótica en cirugía son múltiples, que desde el punto de vista del control pueden clasificarse en: intervenciones en que únicamente se requiere un posicionado preciso, como en radioterapia; intervenciones en que las órdenes o los movimientos de actuación del cirujano son ejecutados por un robot, la teleoperación; o intervenciones en que el robot puede realizar de forma autónoma una o más acciones.

Para la realización de estos tres tipos de operaciones son necesarias diferentes técnicas que las hacen posibles: la localización a partir de imágenes, el posicionado en el espacio de seis dimensiones, el guiado, la teleoperación y la operación autónoma.

5.1 La localización y el guiado a partir de imágenes

El guiado de útiles o instrumentos radica en disponer de dispositivos que permitan localizar en el espacio los objetos de interés en cada caso. Los localizadores o navegadores utilizados en cirugía se basan normalmente en un conjunto de marcadores que pueden ir incorporados, o no, sobre los instrumentos quirúrgicos. Las técnicas para poder localizar estos marcadores incorporados en los instrumentos o sobre partes del paciente, suelen basarse en sistemas de visión estereoscópica, aunque también pueden utilizarse sistemas basados en otras tecnologías como los sensores magnéticos.

El cálculo de la posición y orientación relativa entre paciente y robot comporta una cadena de calibrados entre paciente-instrumento de medida-robot, ya que todos ellos tienen ejes de coordenadas diferentes que deben referenciarse mutuamente. Los localizadores permiten situar en el espacio referenciado por el propio instrumento de medida las marcas o elementos anatómicos relevantes del paciente. Por otro lado, los mismos

localizadores pueden obtener un cierto número de puntos, correspondientes a posiciones en el espacio del robot, lo que permite obtener los ejes de referencia del robot en relación con el sistema de localización. De esta forma el sistema de localización permite registrar los ejes correspondientes a la anatomía del paciente con los ejes de coordenadas del robot. La figura 6, muestra los diferentes sistemas de coordenadas y la figura 7, la localización de un elemento anatómico utilizando un localizador óptico. Para poder realizar la operación quirúrgica a partir de la información obtenida previamente por tomografía, hace falta también el registro entre los ejes de las imágenes 3D reconstruidas en la tomografía y los ejes del paciente en el quirófano, cuya posición no es coincidente (Figura 7).

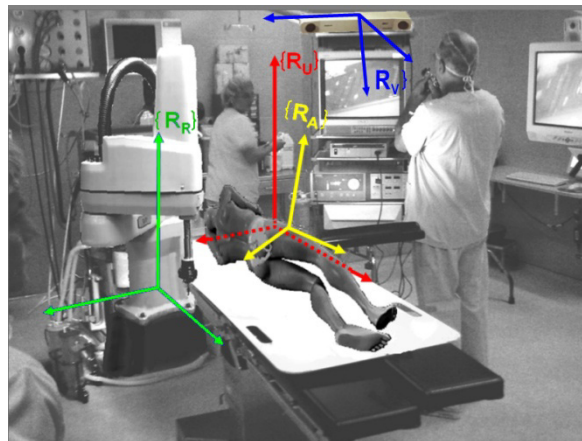


Figura 5. Sistemas de referencia que intervienen en la robotización de tareas quirúrgicas



Figura 6. Utilización de un localizador óptico

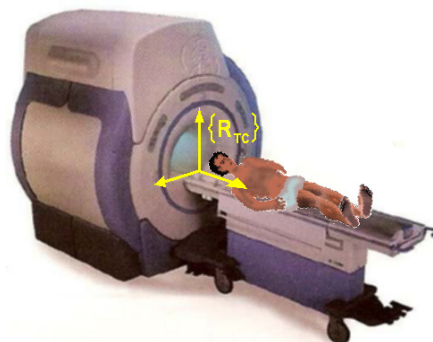


Figura 7. Referenciado de la anatomía del paciente sobre el tomógrafo

Para poder obtener unos ejes de referencia de la anatomía del paciente que sean reconstruibles en la etapa de reconstrucción

tridimensional de las imágenes obtenidas por tomografía, se recurre a la implantación de marcadores antes de realizar la adquisición. Si estos marcadores se conservan implantados hasta el acto quirúrgico, los localizadores permiten obtener de una forma más precisa el registro de los datos memorizados del modelo 3D utilizado para la planificación de la intervención, con la misma anatomía del paciente, aunque hayan sido tomados en posición distinta sobre la mesa de operaciones.

La exactitud conseguida en este proceso de calibración 6D (tres dimensiones para la posición y tres dimensiones para la orientación) determinará la precisión con la que se localizarán los diferentes elementos en la escena de trabajo (herramientas, marcos de estereotaxia, imágenes tomográficas, robot, etc.).

Para calibrar una cámara u otro dispositivo de adquisición de imágenes se hace necesario establecer primeramente cual va a ser el modelo matemático que aproximará la proyección de la escena (3D) sobre el dispositivo captador (2D). Según sea la geometría del sistema de captación utilizado (rayos X, ultrasonidos...) y el tipo de lentes o prismas utilizado, el modelo de proyección será diferente: proyección ortográfica, en perspectiva, con deformación, etc. El proceso de obtención de los parámetros del modelo de proyección se llama calibración de los parámetros intrínsecos, pues estos parámetros, propios de la cámara, no dependen de su posición ni de su orientación. Se trata pues de encontrar los parámetros de una función de proyección o función de mapeado que relaciona cada punto del espacio con el punto de la superficie de captación (ya sea en un plano de un CCD, en una superficie cilíndrica, esférica, etc.). La calibración intrínseca de una cámara pasa por conocer los parámetros del modelo de proyección f que, para cada coordenada s de la superficie del sensor de captación, indica cual es la recta r de proyección que el punto define, es decir $r = f(s)$. Se entiende aquí como recta de proyección a la recta definida por un punto en la imagen y que abarca todos los puntos del espacio que quedan proyectados en el mismo punto de la imagen. Según la precisión que se deba alcanzar, esta función f deberá incluir los diferentes efectos de distorsión que producen las ópticas, desalineaciones, falta de ortogonalidad entre el eje óptico y la superficie del sensor, etc. La calibración de los parámetros intrínsecos del sistema de captación se suele realizar en el laboratorio mediante bancadas específicas, utilizando elaborados patrones de calibración (*phantoms*) situados a diferentes distancias y orientaciones (Selby et al., 2008). Una calibración precisa en el laboratorio de los parámetros intrínsecos permitirá calibrar la posición y orientación de la cámara en el escenario de operación utilizando menos puntos de referencia, simplificando así la tarea.

Al proceso de conocer la posición y orientación de la cámara en relación a un sistema de coordenadas del escenario, se le llama calibración extrínseca. Esta calibración se suele realizar mediante un conjunto $\{p_i\}$ de N puntos de coordenadas conocidas, llamados puntos de calibración y las coordenadas de sus respectivos puntos $\{s_i\}$ en la imagen. La solución a este problema, conocido como *Perspective-n-Point problem* o abreviadamente *PnP problem*, ha sido estudiada en profundidad, encontrando las soluciones analíticas para los casos particulares $N = 3, 4, 5$ y soluciones iterativas y no iterativas $O(n)$ para el caso general (Moreno et al., 2007).

El objetivo de la calibración es determinar la posición c de la cámara y su orientación, expresada normalmente como una

matriz de rotación R o su equivalente mediante cuaterniones (Horn, 1986), en relación al mismo sistema de coordenadas en que se han medido los puntos de calibración. Así pues, la calibración extrínseca pasa por encontrar los valores de c y R tales que minimicen la función de error expresada como el sumatorio de las distancias entre las rectas definidas por los puntos de calibración en la imagen y los respectivos puntos de calibración del escenario.

$$error = \sum_{i=1}^n Distancia(\bar{r}_i, R(p_i - c)) \quad (1)$$

Donde *Distancia* significa la expresión de la mínima distancia entre la recta r_i y el punto correspondiente. Si se puede considerar que todos los rayos pasan por un único punto (centro de perspectiva), como por ejemplo el punto focal en el caso de cámaras *pinhole* o la fuente de rayos X en el caso de imágenes obtenidas mediante fluoroscopia, entonces (1) puede reducirse notablemente si se hace coincidir el centro de coordenadas de la cámara c con dicho punto. De este modo todas las rectas de proyección r_i pasan por un punto común c y si t_i es el vector director (de módulo unitario) asociado a cada recta r_i entonces (1) queda reducida a:

$$error = \sum_{i=1}^n |(R(p_i - c)) \times t_i| \quad (2)$$

En (Aramanovitch, 1992) primero y posteriormente en (Shevlin, 1998) se propuso utilizar la expresión (2) como la medida del error en el espacio de trabajo, en vez de tratar de minimizar el error en coordenadas de la imagen. Si se busca minimizar el error en coordenadas de la imagen, todos los puntos tienen la misma influencia sobre el error, independientemente de su distancia a la cámara. Hay que tener en cuenta que los puntos más alejados de la cámara definen mejor la orientación y los situados más cerca definen mejor la posición.

Una vez se conoce la posición y orientación de los dispositivos de adquisición se pueden localizar diferentes instrumentos, marcos de estereotaxia o estructuras anatómicas mediante triangulación, en el caso de disponer de dos o más cámaras, o por técnicas de localización 3D mono-oculares para aquellas situaciones en que solo se dispone de una vista (Doignon et al., 2007).

5.2 La robótica y las técnicas terapéuticas

La radioterapia es una tecnología terapéutica que se utiliza para destruir selectivamente determinados tejidos o para asegurar una mejor eliminación de los tejidos cancerígenos, por ejemplo, después de la extirpación de un tumor.

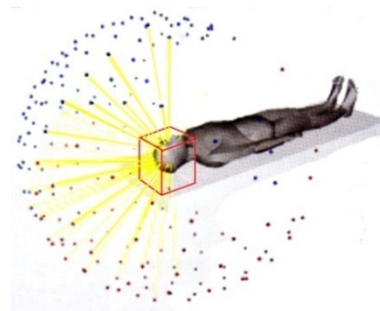


Figura 8. Focalización del punto de aplicación de la radiación

Para evitar en lo posible daños colaterales debidos a la radiación de tejidos periféricos sanos, se recurre a la aplicación de radiación de forma focalizada y desde distintos puntos de orientación. De esta forma se consigue minimizar la radiación recibida sobre los tejidos sanos, que globalmente reciben una dosis de radiación mucho menor que el punto focalizado, que es alcanzado por la radiación emitida desde los distintos puntos. Figura 8.

Desgraciadamente, en muchos tratamientos (Schlaefter et al., 2008) se parte de la información de la tomografía computerizada, pero se opera sin visión y no se dispone de ayudas a la planificación de las sucesivas orientaciones de radiación. El disponer de un soporte informático para planificar la secuencia de barrido de los puntos de aplicación de la dosis a partir de la imagen TC del paciente concreto, y no de un modelo genérico, permite simular el tratamiento y optimizar los parámetros involucrados: posición y orientación del haz, tiempo de haz activo y la dosis a aplicar. Con esta planificación, la utilización de un sistema robótico hace posible manejar simultáneamente todas las variables a controlar.

Un problema adicional que aparece es compaginar esta secuencia con los movimientos del paciente, como la respiración. En (Ma et al., 2007) se realiza una predicción del movimiento del tumor debido a la respiración para modular la secuencia del movimiento de barrido del haz.

Un problema similar aparece en tratamientos a través de punciones con agujas ya sea para la extracción de muestras para efectuar biopsias o para liberar dosis de medicamento de forma focalizada. En (Podder et al., 2007) se describe el procedimiento de la punción para tratar el cáncer de próstata mediante braquioterapia.

Probablemente el equipo más significativo en este campo es CyberKnife, un sistema que integra un robot de elevada precisión que posiciona un acelerador de partículas (Linac) para el tratamiento de acuerdo con la planificación previa sobre la imagen TC, una mesa de operaciones con 6 grados de libertad para mejorar el posicionado del paciente para el tratamiento, y un conjunto de cámaras de rayos X en el entorno para la visualización de la zona de interés durante el tratamiento. De esta forma se puede efectuar el correcto guiado del robot sin necesidad de utilizar un marco de estereotaxia para fijar al paciente. Desde el primer prototipo en 1990 se han sucedido varias generaciones habiéndose tratado con éxito tratamientos de cáncer de próstata, de pulmón, columna o cerebro.

5.3 La robótica en teleoperación y cooperación

Al hablar de teleoperación se pueden considerar diferentes niveles de cooperación. La **teleoperación convencional** comporta la existencia de un dispositivo maestro que controla directamente la operación de un robot esclavo que replica sus movimientos y acciones. Su campo de aplicación cubre principalmente operaciones que no pueden ser realizadas por personas, no por su complejidad, sino por la dificultad o imposibilidad de acceder al área de operación. Para mejorar la operación puede considerarse la existencia de un cambio de escala entre maestro y esclavo. La **teleoperación asistida** supone la interposición de una estrategia de control intermedia entre maestro y esclavo que permite mejorar las cualidades del cirujano. En este tipo de teleoperación puede considerarse la

asistencia que contempla la reducción del temblor que se produce a escala milimétrica, la estabilización del movimiento, un cambio progresivo de escala, o la delimitación del espacio de trabajo o de la orientación idónea en cada punto de la herramienta. Finalmente, puede considerarse el concepto de **co-manipulación**, o teleoperación *in situ*, es decir, operando en contacto cirujano y robot.

Teleoperación directa

La teleoperación directa, es aquella en la que el robot esclavo reproduce los movimientos ejecutados por el brazo o el útil manipulable maestro. Este tipo de teleoperación tendría un interés de aplicación muy reducido, si no fuese porque además de poder proporcionar al cirujano una mayor comodidad ergonómica, permite introducir cambios de escala o cambios de orientación, con lo que se consigue trabajar con mayor precisión y comodidad dentro de los espacios de trabajo preconfigurados. Igualmente, se consigue el acceso en espacios muy reducidos no accesibles sin la ayuda de estos instrumentos robotizados. La seguridad de operación comporta el poder trabajar en mejores condiciones permitiendo disminuir apreciablemente las condiciones de stress de trabajo.

Teleoperación asistida

La teleoperación asistida es aquella en que el ordenador que efectúa la conversión de coordenadas entre el brazo o el útil manipulable que actúa de maestro y el robot esclavo, asume también funciones de corrección o control previamente definidas y ejecutables durante la intervención. Una de las funciones que puede ser realizada por el controlador de la teleoperación es la estabilización dinámica del movimiento de un elemento anatómico del espacio de trabajo. La estabilización del movimiento es necesaria en operaciones teleoperadas que comportan operaciones precisas, como el corte, la sutura o inserción de agujas, y que se ven afectadas por el movimiento periódico de algún órgano como los latidos del corazón o la respiración. Por ejemplo, se puede operar sobre la caja torácica sin percibir el movimiento de la respiración o sobre el corazón sin tener que paralizar su latido durante la intervención. Ello es posible si puede efectuarse la adaptación del modelo tridimensional disponible de la anatomía con la posición real en el espacio. Para ello es necesario poder efectuar un suficientemente elevado número de capturas de los puntos de referencia utilizados que permiten ajustar la deformación periódica del modelo al movimiento real del órgano anatómico y poder efectuar la predicción en tiempo real.

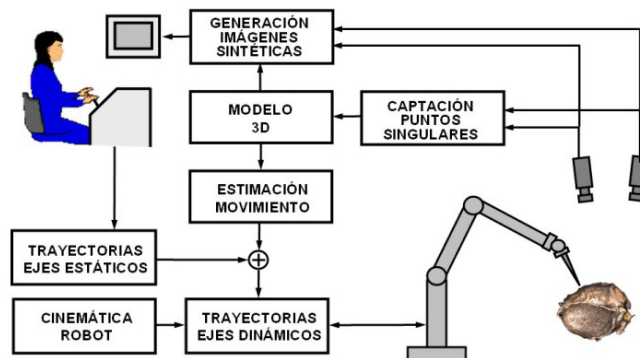


Figura 9 Estructura del sistema de estabilización del movimiento

En este caso, el cirujano podría no sólo operar sobre un órgano en movimiento como si se mantuviera estático, sino que podría igualmente visualizarlo estáticamente, mediante la estabilización de la imagen. Incluso puede mejorarse la calidad de la visualización utilizando imágenes potenciadas, es decir, imágenes reales complementadas con imágenes sintéticas. La estructura de un sistema con estabilización del movimiento se muestra en la Figura 9.

En (Ortmaier et al., 2005) se estudia el movimiento del corazón a partir del análisis de características de la imagen visualizada, como el propio instrumento, para seguirlo, y así modelizar el ciclo de latencia y predecir el movimiento que se superpondrá a las órdenes dadas de forma teleoperada por el cirujano. Por otra parte, los movimientos producidos por la respiración producen desplazamientos cíclicos de varios órganos de las zonas abdominal y torácica que afectan en la ejecución de cirugía laparoscópica. Los modelos predictivos de control (MPC) permiten considerar tanto la modelización del movimiento perturbador como los retrasos producidos en teleoperación. En (Gangloff et al., 2006) se estudia un MPC multientrada que separa la perturbación periódica respecto al movimiento no periódico producido por el cirujano (*master*).

La diferente precisión que se requiere durante un movimiento de aproximación respecto a la velocidad de actuación (sutura, corte, etc.) hace muy conveniente el disponer de un cambio de escala entre maestro y esclavo de forma progresiva. (Muñoz, L.M et al., 2004). De esta forma, a distancias alejadas del punto de actuación, la velocidad de avance del robot puede ser elevada, reduciéndose progresivamente al acercarse al objetivo. La figura 10 muestra una aplicación en que los movimientos del orden de centímetros del operador, se traduce en órdenes milimétricas que permiten, por ejemplo, enhebrar una aguja.



Figura 10 Entorno de trabajo para la micromanipulación

Otra posible ayuda que aporta la teleoperación es la supervisión del robot en base a la definición, en la fase de planificación, de superficies virtuales, no franqueables, que impedirán el acceso a zonas críticas, aunque el cirujano trate de redirigir el instrumento a dicha zona. Es el concepto de *virtual fixtures*.

Co-manipulación. Control de robots basado en la fuerza ejercida e interacción cirujano robot

En la co-manipulación, el cirujano y el robot colaboran directa y estrechamente en la ejecución de una tarea, mediando entre ellos un computador. El cirujano aporta el conocimiento y experiencia, el robot la fuerza y la precisión y el computador

evalúa la situación y coordina la actuación de acuerdo a lo previamente planificado. La figura 11 muestra una escena donde el instrumento quirúrgico es soportado simultáneamente por la persona y el robot, para permitir esta co-manipulación.

En la situación de co-manipulación que se describe como ejemplo, el robot soporta el peso de la herramienta y el cirujano la dirige en la dirección deseada. Mediando entre los dos, el ordenador comprueba que no se excedan los límites establecidos del área de trabajo (Figura 12) Estos límites del área de trabajo pueden representar zonas singulares de la operación que se desean proteger, plantillas virtuales de corte, etc. Estas zonas se pueden representar de diversas formas, que van desde sencillos planos ortogonales hasta complejos modelos de elementos finitos (Berkley et al., 2004).



Figura 11. Co-manipulación en un entorno experimental de cirugía robotizada

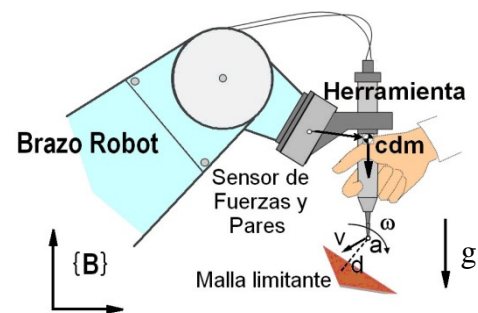


Figura 12. Esquema herramienta-malla limitante

El ciclo de trabajo del sistema empieza realizando una lectura del sensor de fuerza (f_s , p_s), después se compensa el peso de la herramienta y los pares que provoca en el sensor (3).

$$\begin{aligned}\vec{f} &= \vec{f}_s + m\vec{g} \\ \vec{p} &= \vec{p}_s + \vec{cdm} \times m\vec{g}\end{aligned}\quad (3)$$

Donde los vectores f y p son, respectivamente, el vector de fuerzas y pares compensados, g es el vector gravedad, m la masa de la herramienta y cdm el vector que une la posición del sensor de fuerza y el centro de masas de la herramienta. Todos los vectores se suponen referenciados al sistema de coordenadas

de la base del robot $\{B\}$. Mediante (3) se conocen las fuerzas que el entorno produce en la herramienta en ausencia de gravedad (considerando que debido a la baja velocidad de trabajo se pueden despreciar las fuerzas dinámicas).

El ordenador de control pasa a calcular las nuevas consignas de velocidad (v , ω) que el robot debe aplicar a la herramienta para reducir las fuerzas que se perciben en ella (4), de modo que el resultado que se produce comporta dejarse llevar por la mano del cirujano (comportamiento dócil o acomodable, del inglés *compliance*).

$$\begin{aligned}\vec{v} &= K \cdot \vec{f} \\ \vec{\omega} &= Q \cdot \vec{p}\end{aligned}\quad (4)$$

Donde K y Q son las matrices de admitancia que se ajustan para que la traslación y el giro de la herramienta resulten adecuados según el empuje que el cirujano da a la herramienta. Este esquema de control basado en la admitancia (control de velocidad proporcional a la fuerza) es muy conveniente en este tipo de situaciones pues el robot deja de moverse cuando el cirujano deja de ejercer fuerza sobre la herramienta. Aunque por razones de claridad no se exprese en (4), se hace necesario añadir una zona muerta para evitar movimientos residuales que pueden ser causados por pequeños desajustes.

En caso que la herramienta se aproxime a algún triángulo de la malla limitante, se calculan las nuevas consignas de movimiento para que las componentes de velocidad perpendiculares al plano límite se vayan anulando a medida que la herramienta se va acercando. Si se considera que es suficiente con el control del extremo de la herramienta (punto a), el problema se simplifica considerablemente. En este caso la velocidad del robot puede quedar expresada (5) de la siguiente manera:

$$\vec{v}' = \begin{cases} \vec{v} + (\vec{n} \cdot \vec{v})\vec{n} \cdot f(d) & \text{si } (\vec{n} \cdot \vec{v}) < 0 \\ \vec{v} & \text{si } (\vec{n} \cdot \vec{v}) \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Donde v' , representa la nueva consigna de velocidad cuando se está en presencia de un plano límite, n representa el vector normal al plano apuntando hacia el exterior o zona libre. La variable d corresponde a la distancia del extremo de la herramienta (a) al triángulo que forma la malla, y f es una función real que pondera la distancia d al intervalo $[0, 1]$, donde $f(0) = 1$ y $f(D_{max}) = 0$. D_{max} es un parámetro específico de las prestaciones del robot en relación a su desaceleración, asegurando que en cualquier circunstancia el robot será capaz de reducir su velocidad lineal hasta cero en un recorrido inferior a la longitud D_{max} . Este parámetro puede ser constante (aplicando el peor de los casos) o variable según las capacidades de aceleración que son dependientes de la configuración del robot a través de su matriz Jacobiana.

Es importante notar que (5), no puede ser aplicada recursivamente con todos aquellos triángulos que estén a una distancia inferior a D_{max} , debido a que ello provocaría que no se pudieran doblar correctamente las esquinas. En la figura 13 se muestra como la velocidad v queda modificada incorrectamente (v') al aplicar (5) para todos los planos que están a una distancia menor que D_{max} (estos planos están representados en la figura por su normal n_1 y n_2). En ella se puede apreciar como el vector n_1 es el que impide el desplazamiento en la dirección definida por v al tener componentes contrarias. Para evitar este efecto indeseado es

necesario analizar en todo momento que triángulo es el que debe ser aplicado para calcular la modificación de la trayectoria. Para ello hay que diferenciar que triángulo o superficie colisiona primero con el segmento definido por el extremo de la herramienta a y el punto b de intersección de la esfera de radio D_{max} con la dirección de movimiento v .

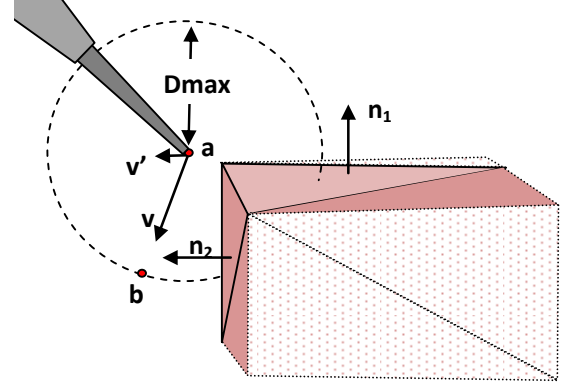


Figura 13. Efectos de las esquinas sobre la modificación de la trayectoria

Para poder ofrecer tiempos de ciclo reducidos cuando el volumen de triángulos de la malla limitante es elevado se hace necesario optimizar la detección de colisiones entre el segmento y los triángulos cercanos al extremo a . En (Glencross et al. 2005) se propone utilizar una caché que mantiene solo los objetos cercanos a la punta de la herramienta.

Si fuese necesario controlar en todo momento la posición y la orientación de la herramienta, entonces se hace necesario buscar estrategias más elaboradas y costosas que deberían ser efectuadas eficientemente para obtener un tiempo de cómputo reducido. Antes de abarcar complejos modelos de mallas para definir las formas singulares de la herramienta es conveniente evaluar si se pueden obtener los mismos resultados suponiendo un modelo simplificado de la herramienta de forma que se permita acelerar los cálculos (Li et al., 2004). Es importante hacer notar que no es suficiente con tener un algoritmo rápido de test colisión (Tropp et al., 2006), también es necesario determinar cuál va a ser la trayectoria resultante del deslizamiento entre superficies, problema que resulta tanto o más complejo que el cálculo de colisión. Cuando existen múltiples puntos de contacto hay que analizar qué restricción impone cada contacto y encontrar el desplazamiento resultante que cumpla todas las restricciones. Para ello se hace necesario simular las ecuaciones de la dinámica de un cuerpo rígido sometido a restricciones expresadas mediante inequaciones. Mediante la integración de las ecuaciones de Newton-Euler se intenta encontrar una solución que produzca movimientos físicamente válidos.

Debido a la complejidad de encontrar la solución, es común encontrar aproximaciones que consideran que cada punto de contacto influye sobre la herramienta de forma independiente, aplicando unas fuerzas de reacción virtuales en función de la penetración (o acercamiento) entre las superficies. Este tipo de esquema es simple y efectivo, aunque solo representa una aproximación de la dinámica del deslizamiento restringido entre superficies duras. Un problema que aparece asociado a este tipo

de enfoques es que si se desea reducir al mínimo la penetración hay que introducir altas ganancias lo que a menudo conlleva inestabilidades en el contacto.

5.4 La realización autónoma de tareas

La realización autónoma de tareas es posible en actuaciones que son programables *a priori*. El ejemplo de robot quirúrgico capaz de realizar tareas de forma autónoma es Robodoc (Kazancides, 1995), robot diseñado para cirugía ortopédica, capaz de preparar la cavidad en el hueso donde se implantará una prótesis. El cirujano, mediante órdenes simples de movimiento posiciona el robot en el punto aplicación y el robot efectúa el taladrado según la planificación previa del cirujano, realizada a partir de la imagen 3D. Este robot dispone de un sensor de fuerzas y pares de 6 grados de libertad, con la doble función de, por una parte, dejarse llevar por el cirujano, programación gestual o guiado manual, y por otra, detectar los esfuerzos efectuados durante su operación, y en su caso regular la velocidad o parar el robot si se superan unos esfuerzos límite preestablecidos.

6. DISPOSITIVOS DE INTERFAZ CIRUJANO – SISTEMA

El objetivo principal de las interfaces persona-máquina es captar las ordenes del operador y mostrar cómo se desarrolla la tarea de la forma más inmersiva y ergonómica posible. Una interfaz de control y visualización que se ajuste a las particularidades del procedimiento, que responda a las necesidades del cirujano y que sea intuitiva y natural, siempre repercutirá en beneficio del resultado (Greer et al., 2008).

Los dispositivos o periféricos HMI (*Human Machine Interface*) se pueden dividir en dispositivos de control (órdenes), dispositivos de monitorización (visualización del procedimiento) o combinados (que actúan a la vez como entrada y salida). Los dispositivos de monitorización son los encargados de influir sobre los sentidos del cirujano para transmitir la información: gráficamente (visualización de imágenes e indicaciones alfanuméricas), por voz o sonidos y por tacto, (*haptic*: percepción táctil y reflexión de fuerzas).

Los dispositivos de control se pueden clasificar según la activación que el usuario debe producir: por accionamiento (pulsadores, potenciómetros, palancas de mando), voz o sonidos, movimientos (desde simples movimientos 2D hasta complejos movimientos articulados), o gestos.

Aunque la variedad de dispositivos es muy amplia, los dispositivos *haptic* y la visualización estereoscópica aumentada son, hoy por hoy, el centro de atención de los desarrollos en HMI para cirugía robotizada. En los sistemas más básicos de teleoperación maestro-esclavo la información de la cinética (posición, velocidad, aceleración) solo fluye desde el dispositivo maestro hasta el robot, perdiéndose la sensación táctil y la percepción de las fuerzas de reacción.

La falta de percepción *haptic* supone en cirugía una desventaja en según qué situaciones: por ejemplo, el cirujano no sabe cuán fuerte se está cerrando una sutura o no se pueden encontrar nódulos internos mediante la palpación (Tavakoli et al., 2008). Para paliar los efectos de la falta de percepción *haptic* es

necesario dotar al dispositivo master de cierta capacidad activa (actuadores) para poder reflejar estas sensaciones. Muchos de los dispositivos comerciales se centran en hacer sentir al usuario las fuerzas que se están produciendo en el escenario remoto, prescindiendo de otras sensaciones táctiles.

Las capacidades dimensionales de los dispositivos *haptic* para la reflexión de fuerzas van desde los sistemas de 3 ejes activos, de cinco ejes (con tres o cinco de ellos activos), de seis ejes (posición y orientación), siete ejes (se refleja la fuerza de cierre de la herramienta), hasta la reflexión de fuerzas en todos los dedos de la mano (como el Cyber Grasp) utilizados en entornos virtuales y rehabilitación, pero con escaso impacto en cirugía.

Hay dos tipos de control de los dispositivos *haptic*: los basados en la impedancia y los basados en la admitancia. Los dispositivos basados en la impedancia miden la posición del dispositivo (master) y aplican una fuerza en función de la reacción que se calcula en el entorno de simulación. Un ejemplo comercial de este tipo de dispositivos es el Phantom. Por otro lado, los dispositivos basados en la admitancia miden primeramente la fuerza aplicada por el operador y el dispositivo se mueve con una velocidad en función de la fuerza aplicada o calculada. Un ejemplo de un robot de este último tipo es el *Haptic-Master*.

A los dispositivos maestro se le exigen otros requerimientos además de una alta resolución espacial como elemento posicionador, un rango dinámico de fuerzas suficientemente elevado y una rápida respuesta. Cuando el robot remoto se está moviendo en el espacio libre, el usuario no debe notar ningún impedimento ni fuerza de arrastre que resulte molesto. El peso del dispositivo y las fricciones deben ser reducidas y/o los pares o fuerzas de arrastre residuales eliminadas electrónicamente o por software (Madhani et al., 1998). Es importante que las fuerzas que realiza el robot esclavo en el entorno sean reproducidas con precisión y con igual sensibilidad en todas direcciones (isotropía) para no confundir al cirujano.

Existen dos estrategias en cuanto a la disposición de la estructura del dispositivo maestro: disposición especular o disposición exoesquelética (Rosen y Perry, 2007). El problema de los dispositivos maestro con la estructura dispuesta de forma más o menos especular en relación al usuario es la posibilidad de colisión entre las dos estructuras cuando el usuario cruza las manos. Las estructuras en forma de exoesqueleto, son más complicadas de ajustar, pero permiten, en general, un mayor rango de movimientos y una menor posibilidad de colisión.

Tener una buena percepción del escenario de la intervención quirúrgica mediante una visión de alta resolución es de vital importancia. Muchos de los problemas de pérdida de percepción táctil pueden ser compensados mediante la observación directa de sus efectos en las imágenes (Figura 14). La importancia de la imagen sobre la percepción táctil se hace más relevante cuando se trabaja con tejidos muy ligeros, blandos o flexibles (Katz et al., 2005) por debajo del umbral de sensibilidad de los sistemas *haptic*. La visión estereoscópica no tan sólo se utiliza en imágenes convencionales, en (Vasilyev et al., 2008) se describe la utilidad de la visión estereoscópica para imágenes de eco-cardiografía 3D.

Actualmente ya es posible encontrar una gama de aparatos de laparoscopia que ofrecen imágenes estereoscópicas. Estos

dispositivos muestran una imagen a cada ojo con la ayuda de dos visualizadores independientes y suelen incorporar un micrófono para el reconocimiento de órdenes por voz.



Figura 14. Interfaz maestra: accionamientos y pantalla estereoscópica (©2005 da Vinci, *Intuitive Surgical, Inc.*)

Un inconveniente de los sistemas estereoscópicos altamente inmersivos, como son los visualizadores montados en la cabeza, es su aceptación por parte de los cirujanos. Ello es debido al inconveniente de tener la visión del entorno en todo momento ocluida y por la sensación de mareo que produce (Omar et al., 2007) al perder la referencia visual de la vertical.

La visión auto-estereoscópica “con los ojos desnudos”, es decir visión directa 3D sin necesidad de dispositivos oculares especiales, se puede implementar con diferentes tecnologías (Nakajima et al., 2001). Actualmente, una de las tecnologías más atractivas para la reproducción de imágenes tridimensionales son las pantallas videográficas paralelas integrales (traducción del inglés *Parallel Integral Videography*) que utilizan arrays de microlentes convexas acopladas a un monitor LCD de muy alta definición. Cada micro-lente cubre una agrupación numerosa de píxeles, desviando su luz en direcciones diferentes. Para poder producir una imagen videográfica, es necesario que un procesador gráfico de altas prestaciones calcule la iluminación de cada elemento según su posición relativa. Estos sistemas han sido utilizados para la visualización tridimensional de imágenes CT y MRI (H. Liao et al., 2002).

7. FIABILIDAD Y SEGURIDAD EN EL QUIRÓFANO

Unos de los temas más importantes a tener en cuenta en cualquier sistema robotizado, y muy especialmente en robótica médica, son los aspectos relacionados con la seguridad y fiabilidad. En la robótica médica, debido al estrecho contacto entre el personal médico y el paciente, así como al tipo de escenario y las posibles consecuencias, las preocupaciones de seguridad se acentúan si se comparan con las aplicaciones de los robots en la industria.

A pesar de los múltiples sistemas de seguridad que se adoptan en los modernos robots de cirugía, las incidencias están siempre presentes. Por ejemplo, durante el periodo de enero del 2004 a mayo del 2007, se admitieron 23 eventos adversos relacionados con el robot da Vinci (*Intuitive Surgical, Inc.*) según consta en el sumario (Sum. MedSun 2007). Los problemas relatados van desde la rotura de instrumentos, fallos electro-mecánicos y hasta cuerpos extraños caídos de los instrumentos. En siete

ocasiones el paciente sufrió heridas presumiblemente como consecuencia directa o indirecta de los fallos producidos por el robot.

Demostrar que una solución robotizada es segura y altamente fiable son requisitos indispensables para obtener la necesaria aprobación de las entidades reguladoras para su comercialización. Las directivas de seguridad inciden en las protecciones adoptadas para evitar fallos y, en el caso que se produzcan, determinar cuáles son los sistemas de detección y las acciones de emergencia que se activan y sus consecuencias. La fiabilidad se define como la capacidad de un sistema para continuar realizando su tarea o función durante largos periodos de tiempo bajo condiciones preestablecidas. Son comunes las expresiones “fallar bien”, que está relacionada con la seguridad y deja a entender que el fallo no provocó ningún daño, y la expresión “fallar poco” que está relacionada con la probabilidad de fallo, un aspecto que está asociado a la fiabilidad.

Desde el momento que se decide emprender una nueva aplicación de cirugía robotizada, es necesario plantearse los aspectos de seguridad y fiabilidad, e incorporarlos ya en la concepción inicial del sistema. La seguridad debe estar presente tanto en el diseño e implementación del software y del hardware, como en las fases de producción, test y mantenimiento.

7.1 Estrategias y elementos de seguridad utilizados en robótica médica

Las estrategias más comunes que se suelen utilizar en ingeniería industrial para dotar de mayor seguridad a un diseño, son los sistemas de detección, prevención y predicción temprana de fallos. Además de ello, los sistemas se complementan con estrategias que pueden reducir los efectos de un fallo: redundancia y limitación de los rangos de operación.

Puesto que la probabilidad de que dos componentes fallen al mismo tiempo es considerablemente más pequeña que la probabilidad que ocurra un sólo fallo, se utilizan elementos redundantes para realizar la misma acción (a pesar del aumento del coste). En (Laible et al., 2004) se utilizan dos unidades independientes que ejecutan en paralelo el cálculo de la cinemática y se comparan sus resultados antes de realizar las activaciones. También se suelen utilizar dos sistemas de medida de la posición, como por ejemplo colocar sensores de posición, *encoders* en las articulaciones y también en los ejes del motor. De esta forma se puede comprobar si las dos medidas son coherentes.

Es posible hacer un sistema más seguro limitando algunas de las prestaciones que el sistema puede realizar, tales como limitadores de fuerza y par, de velocidad o del rango de los movimientos. El objetivo es controlar que en todo momento los actuadores y demás elementos trabajen siempre por debajo de unos valores considerados seguros. Por ejemplo, los robots *Neurobot* y *Hippocrate* están equipados con limitadores mecánicos de par: cuando una articulación colisiona con un obstáculo esta deja de moverse aunque lo siga haciendo el eje del motor. La gran mayoría de robots llevan frenos de seguridad que se activan cuando hay una caída de tensión, para prevenir que el robot se desplome por su propio peso. Esta medida debe ir acompañada de un sistema que permita desmontar o mover el robot fácilmente para poder proseguir con la intervención de

forma manual. Es muy importante tener en cuenta en el diseño del robot, que en cualquier posición que haya quedado el brazo debido a un paro de emergencia, se pueda extraer el instrumental del cuerpo del paciente sin que el robot obstaculice la operación.

Para cada uno de los diferentes tipos de intervenciones quirúrgicas es necesario asegurar la total maniobrabilidad del robot, lo que comporta verificar que el robot no se sitúa cerca de ninguna singularidad cinemática ni que se está cerca de una colisión entre los diferentes brazos u otros elementos del robot. Es por estas razones que algunos fabricantes de sistemas robotizados optan por una solución cinemática redundante con 7 o más ejes por brazo.

Estas estrategias, en general, deberían conllevar un menor riesgo en caso de fallos, sean estos debidos a desviaciones sobre lo planificado, desajustes, averías electro-mecánicas o incluso errores ocasionados por el factor humano.

7.2 Estándares, guías y propuestas en cirugía robotizada

Actualmente no existe una normativa o una regulación específica para la cirugía robotizada, existe sin embargo una multitud de normativas de carácter más o menos genéricas. Entre otras: ISO 9000, ISO 10360, IEC 60601, EN 46000, EN 61 000, EN 60529, IEC 601 o más específicas como el estándar para los sistemas de guiado y localización en el entorno quirúrgico (ASTM 2008) que pueden ser exigidas por parte de los organismos certificadores.

En el aspecto relacionado con arquitecturas que incidan en la seguridad, existen algunas propuestas como las que aparecen en (Varley, 1999), donde se hace especial hincapié en las técnicas a utilizar para el desarrollo de software seguro, identificando los puntos potencialmente más peligrosos y las actuaciones que se pueden llevar a cabo para mitigarlos. Otras propuestas en la misma línea (Davies, 1995) y (Rovetta, 2000) o en (Feia et al., 2000 and 2001) donde se describe una metodología sistemática (HISIC: *Hazard Identification and Safety Insurance Control*) para analizar, controlar y evaluar los riesgos asociados a los robots en cirugía con una aplicación de un robot para intervenciones urológicas.

8. ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS

Si en otras áreas de la robótica, como la industria o los servicios, no se están produciendo avances al ritmo que inicialmente podía esperarse, en cirugía, las dificultades tanto técnicas como éticas o de seguridad son aún mayores dificultando más su progreso. Así, el robot Robodoc estuvo operativo clínicamente desde 1993 habiendo realizado miles de intervenciones de forma exitosa, operando con su simulador y planificador, el sistema Orthodoc. Sin embargo, la aparición, años después, de algunos efectos secundarios en algunos pacientes, causados por la fijación de la pierna durante el tiempo de la intervención obligó a suspender su utilización. Este problema no es debido al propio robot, sino al procedimiento completo que implica la intervención robotizada. Realidades como ésta, muestran la dificultad de la implantación de forma normalizada de la robótica en cirugía, en parte por las exigencias legales que comporta la utilización de robots, que debido a una falta de comparativa profunda entre los resultados

de operar con o sin robot, hace que no se admita ningún tipo de riesgo con el uso de robots. Ello hace evidente la necesidad de resolver los problemas tecnológicos pendientes de la robotización para poder demostrar sus claras ventajas y las mejores prestaciones que puede ofrecer operar con la ayuda de un robot en determinadas circunstancias. Probablemente el principal problema a resolver en cirugía ortopédica es el de la localización precisa del paciente, o registro paciente - imagen TC - robot, siendo uno de los temas de investigación actual.

La implantación actual más consolidada clínicamente es la del robot DaVinci, un sistema multibrazo teleoperado de aplicación en cirugía mínimamente invasiva. El sistema es operado gestualmente por el cirujano que también puede dar órdenes orales. Con las dos manos, el cirujano controla los 4 brazos del robot y percibe la imagen tridimensional. Su gran ventaja sobre la operación manual es la capacidad de cambio de escala que permite al cirujano operar con una mayor precisión y la posibilidad de cambiar la orientación (3 gdl) de la herramienta. Su predecesor, el robot Zeus, de características similares, fue absorbido por la empresa, Intuitive Surgical, fabricante del robot Da Vinci.

Una nueva modalidad de robots son los aplicados en la llamada radiología intervencionista. Los robots compatibles con equipos de resonancia magnética, RM, permiten hacer actuaciones sobre la imagen adquirida in vivo, con lo que puede conseguirse intervenciones mínimamente invasivas y consiguiendo gran precisión. Para conseguir no perturbar el campo magnético de los equipos RM y operar en su interior, es necesario recurrir a arquitecturas específicas y utilizar materiales compatibles, por ejemplo plástico para el robot y motores ultrasónicos (Bricault et al., 2008). Este robot permite hacer punciones percutáneas para por ejemplo hacer biopsias, drenajes o ablaciones en tumores.

Esta visión de la robótica quirúrgica actual, tan diversa por las características propias de los distintos tipos de intervenciones, y por las soluciones adoptadas, demuestra el potencial que ofrece la robótica en el campo de la cirugía, aunque actualmente el grado de utilización de robots es todavía muy bajo. Los inicios de la implantación de robots de asistencia en cirugía está encontrando múltiples dificultades, tanto debido a aspectos técnicos como legales, sin embargo, se están haciendo evidente sus posibilidades a medida que la tecnología permite solventar las trabas actuales. La localización precisa del paciente, estática y dinámicamente, favorecerá la utilización de la robótica en cirugía ortopédica. Las constantes mejoras en los sistemas teleoperados asistidos supondrán un nuevo avance para la utilización de robots en cirugía mínimamente invasiva y en cirugía torácica y abdominal a cielo abierto. La miniaturización que permite la actuación a través de vías naturales supondrá también un avance en los dispositivos endoscopios (cateterismo, colonoscopia,...) y dispositivos autónomos o teleoperados miniaturizados, como la cápsula inteligente. La radiología intervencionista promete también ser una nueva técnica que supone un avance sustancial en el ámbito de la cirugía mínimamente invasiva.

Las interfases son también clave para la cooperación cirujano-robot. Es por ello, que los avances que puedan producirse en sistemas naturales de comunicación más allá de los actuales, como la comunicación cerebro-máquina, supondrán un nuevo impulso para la cirugía robotizada.

REFERENCIAS

- Amat J. (2007) La robótica Mèdica. *Revista de Tecnologia. Institut d'Estudis Catalans*. N. 2, pp: 11-17, Barcelona
- ASTM F1719 – 96 (2008) Standard Specification for Image-Interactive Stereotactic and Localization Systems
- Aramanovitch, L. I (1992). Solution of the problem of photo orientation in aerial surveying by means of the quaternion algebrat. *Manuscripta Geodaetica*, 17:334–341
- Berkelmann, P., P. Cinquin, E. Boidard, J. Troccaz, C. Létoublon y J.A. Long, (2005) Development and testing of a compact endoscope manipulator for minimally invasive surgery. *Computer Aided Surgery*, Vol 10, N. 1, Taylor & Francis, pp: 1-13
- Berkley, J., G. Turkiyyah, D. Berg, M. Ganter, S. Weghorst (2004). Real-Time Finite Element Modeling for Surgery Simulation: An Application to Virtual Suturing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. Volume 10, Issue 3, 314 – 325
- Bertocchi, U., et al., (2008) Human-Robot shared control for Robot-Assisted endoscopy of the spinal cord. *First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp: 543-548 IEEE CNF
- Bricault, I. Zemiti, N. Jouniaux, E. Fouard, C. Taillant, E. Dorandeu, F. Cinquin, P. (2008) Light Puncture Robot for CT and MRI Interventions, *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, Vol: 27, N: 3, pp: 42 - 50
- Casals A. (2008). L'impacte de la Tecnologia en el tractament quirúrgic. *Editorial. Institut d'Estudis Catalans*
- Casals, A., Amat, J., Laporte, E. (1996). Automatic guidance of an assistant robot in laparoscopic surgery, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp: 895 – 900, IEEE
- Davies, B.L (1995). A Discussion of Safty Issues for Medical Robots. *Computer-Integrated Surgery - Technology and Clinical Applications*, pp: 287- 296, The MIT Press, 1995.
- Doignon, C., F. Nageotte, B. Maurin, A. Krupa (2007). Pose estimation and feature tracking for robot assisted surgery with medical imaging, *Unifying Perspectives in Computational and Robot Vision*, D. Kragic, V. Kyrki (eds.), Springer Verlag
- Eisnberg, A., et al., (2006) Microfabricated instrument for hàptic tissue recognition in fetal cardiac surgery. *First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp: 1183-1188 IEEE CNF
- Feia, B., W. Sing, S. Chauhana and C. K. Kwobh (2001). The safety issues of medical robotics. *Journal of Reliability Engineering & System Safety*, Ed. Elsevier Ltd. Volume 73, Issue 2, August 2001, pp: 183-192
- Feia, B., W. Sing, C. K. Kwobh (2000). The hazard identification and safety insurance control (HISIC) for medical robots. *Engineering in Medicine and Biology Society. Proceedings of the 22nd Annual International Conference of the IEEE*. Volume 4, Issue, 2000, pp:3022 - 3026 vol.4
- Gangloff, J. et al., (2006) Model predictive control for compensation of cyclic organ motions in teleoperated laparoscopic surgery, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 14, N. 2, pp: 235-246
- Glencross M., R. Hubbard, B. Lyons (2005). Dynamic Primitive Caching for Haptic Rendering of Large-Scale Models. *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* pp: 517 - 518
- Greer, A. D, P. M. Newhook, and G. R. Sutherland. Human Machine Interface for Robotic Surgery and Stereotaxy (2008). *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, Vol. 13, N. 3
- Guo-Qing Wei Arbter, K. Hirzinger, G. (1997). Real-time visual servoing for laparoscopic surgery. Controlling robot motion with color image segmentation, *IEEE Eng. in Medicine and Biology Magazine*, Vol, 16, N.1, pp: 40-45
- Horn B.K.P (1987). Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 4, pp: 629
- Jakopec, M. et al. (2003). The hands-on orthopaedic robot "Acrobot": Early clinical trials of total knee replacement surgery, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Volume 19, N 5, pp: 902 – 911
- Jayender, J. Azizian, M. Patel, R.V. (2008), Autonomous Image-Guided Robot-Assisted Active Catheter Insertion, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.24, N. 4 pp: 858 – 871, IEEE
- Kazanzides, P. et al. (1995). An integrated system for cementless hip replacement, *Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE Volume 14, Issue 3*, pp: 307 - 313
- Katz, R. D. Gedge D. Rosson, Jesse A. Taylor, Navin K. Singh (2005). Robotics in microsurgery: Use of a surgical robot to perform a free flap in a pig. *Microsurgery*. Volume 25, Issue 7, pp: 566 – 569. Wiley-Liss
- Kragic, D., et al. (2005) Human-Machine collaborative systems for microsurgical applications. *The International Journal of Robotics Research*, Vol 24, N. 9, Sage Publications, DOI 10.1177/0278364905057059
- Laible U., T. Bürger, and G. Pritschow (2004). A fail-safe dual channel robot control for surgery applications. *Journal of Safety, Reliability and Security of Industrial Computer Systems* Volume 42, Issue 5, June 2004, pp: 423-436
- Li, M. and R. H. Taylor (2004). Spatial motion constraints in medical robot using virtual fixtures generated by anatomy. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp: 1270-1275
- Liao, H., N. Hata, M. Iwahara, S. Nakajima, I. Sakuma and T. Dohi (2002). High-Resolution Stereoscopic Surgical Display Using Parallel Integral Videography and Multi-projector. *Lecture Notes in Computer Science. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, MICCAI*
- Ma, L., C. Herrmann and K. Schilling, (2007). Modelling and prediction of lung tumor motion for robot assisted radiotherapy. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp: 189-194
- Madhani, A. J. (1998). Design of Teleoperated Surgical Instruments for Minimally Invasive Surgery. *Ph. D Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering*
- Mitchel, B., et al. (2007) Development and application of a new steady-hand manipulator for retinal surgery. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp: 623-629
- Moreno-Noguer, F., V. Lepetit and P.Fua (2007). Accurate Non-Iterative O(n) Solution to the PnP Problem, *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp 1-8
- Muñoz, V.F, et al. (2004), adaptive cartesian motion control approach for a surgical robotic cameraman *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp: 3069 – 3074

- Muñoz, L.M., A. Casals, J. Amat (2004). Scale dynamic adaptation of the local space for assisted Teleoperation. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp: 4134-4139
- Nakajima, S., et al. (2001) Three-dimensional medical display with computer-generated integral photography, *Computing Medical Imaging and Graphics*, Vol. 25, pp:235-241
- Omar, M., F. Elise; F. Moira; S. Thomas A (2007). Motion Sickness, Console Video Games, and Head-Mounted Displays. *Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Volume 49, Number 5, pp. 920-934 (15)
- Ortmaier, T., et al. (2005). Motion Estimation in Beating Heart Surgery', *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 52, no. 10, pp. 1729-1740
- Podder, T.K., W. S. Ng and Y. Yu (2007). Multichannel robotic system for prostate brachytherapy. *IEEE MBS International Conference*. pp: 1233-1236
- Quirini, M, R. Webster, A. Menciassi, P. Dario. (2007). *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp: 1856-1862
- Riviere CN, Gangloff J, De Mathelin M. (2006). Robotic compensation of biological motion to enhance surgical accuracy. *Proc IEEE*. 94 (9) pp:1705-16
- Rosen J., and J.C. Perry (2007). Upper Limb Powered Exoskeleton, *Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 4, No. 3 pp: 1-20
- Roux, C., J.K. Udupa, Ed. (2003). Special Issue on: Emerging Medical Imaging Technology *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, N. 10
- Rovetta, A, (2000) Telerobotic Surgery Control and Safety, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 2895-2900
- Satava R. M. (2002). The operating room of the future, *Surgical Endoscopy*, DOI:10.1007/s00464-002-0018-x
- Schlaefter, A, J. Gill, A. Schweikard, (2008). A simulation and training environment for robotic radiosurgery, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol.3, N. 3-4, pp: 267-274
- Seibol, U, B. Kubler and G. Hirzinger (2005) Prototype of instrument for minimally invasive surgery with 6 DoF force sensing capability. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 496-501
- Selby B. P., Sakas G., Walter S. ; Stilla U. (2008). Geometry calibration for X-ray equipment in radiation treatment devices and estimation of remaining patient alignment errors. *J. Progress in biomedical optics and imaging*, Vol. 9 (3), N.30. Ed. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers
- Shevlin, F. (1998). Analysis of orientation problems using Plücker lines. *International Conference on Pattern Recognition*, Brisbane, Vol. 1, pp. 685-689
- Summary of MedSun Reports (2007) Describing Adverse Events With da Vinci Surgical Devices. MedSun Newsletter #18, Site www.fda.gov/cdrh/medsun
- Tavakoli, M and R. V. Patel. Haptics in Telerobotic Systems for Minimally Invasive Surgery. *Book Telesurgery*. ISBN 978-3-540-72998-3. Pub. Springer , 2008
- Taylor, R, et al. , (1994) An Image directed robotic system for precise orthopedic surgery. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.10, N. 3, pp: 261-275
- Tercero Villagran, C.R. et al. (2007). Catheter insertion path reconstruction with autonomous system for endovascular surgery. *Internacional Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp: 398 - 403
- Tropp, O, A. Tall y I. Shimshoni (2006). A fast triangle to triangle intersection test for collision detection. *Computer Animation and Virtual Worlds archive*, Vol. 17, N. 5, John Wiley and Sons LTd., pp: 527 - 535
- Varley, P (1999). Techniques for development of safety-related software for surgical robots. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*. Volume 3, Issue 4, Dec. 1999 pp: 261 - 267
- Vasilyev, N. V., Paul M. Novotny, Joseph F. Martinez, Hugo Loyola, Ivan S. Salgo, Robert D. Howe, Pedro J. del Nido (2008). Stereoscopic vision display technology in real-time three-dimensional echocardiography-guided intracardiac beating-heart surgery. *Journal Thorac Cardiovasc Surg*, 135:1334-1341
- Wall, J, V. Chandra and T. Krummel (2008) Robotics in general surgery. *Medical Robotics, I-Tech Education and Publishing*, pp: 401-506, www.i-techonline.com