



Investigación con el sistema da Vinci® en el Hospital St Mary's de Londres*

JUAN DAVID HERNÁNDEZ, MD**, ARISTOTELIS DOSIS, MD**, FERNANDO BELLO, MD**, DOROTHY WANG, MD**, JOAO BORELLI, MD**, ARA DARZI, MD**

Palabras clave: robótica, videocirugía, aprendizaje, análisis y desempeño de tareas.

Resumen

Hipótesis: El sistema robótico da Vinci™ permite superar las limitaciones que impone al cirujano la cirugía mínimamente invasora en términos de destreza, control del campo operatorio y ergonomía. Los estudios incluidos en esta compilación evalúan la curva de aprendizaje, la visión en tercera dimensión y el análisis de movimientos, con el propósito de comprobar las ventajas del sistema da Vinci sobre la cirugía mínimamente invasora y establecer métodos de evaluación de desempeño.

Métodos: Sistema: da Vinci™. Tres estudios experimentales comparativos con diez y trece cirujanos quienes realizaron diferentes pruebas. Estudiaron: curva de aprendizaje entre cirujanos experimentados/no experimentados, ventajas de visión 3D sobre 2D y de cirugía robótica (CR) sobre cirugía

mínimamente invasora. Evaluación de mediciones: el desempeño de los cirujanos se midió con una escala global de habilidades y medición de errores. Calificación: a ciegas por expertos; además se empleó un software de análisis de movimiento para cirugía mínimamente invasora y para cirugía robótica, ambos desarrollados en el departamento y previamente validados en otros estudios. Cálculos estadísticos: programa Statistical Package for Social Sciences 10,0™. $p < 0,05$.

Resultados: La curva de aprendizaje reveló un puntaje de valoración objetiva y estructurada de destrezas técnicas de 18 (primer intento) contra 26 (quinto) $p=0,02$ Cronbach $\mu=0,894$. El análisis de movimiento mostró reducción del número de movimientos y trayectoria ($p > 0,01$). La comparación de cirugía mínimamente invasora con cirugía robótica mostró reducción del 40% del tiempo ($p=0,001$) y de 70% de la trayectoria ($p=0,008$) con reducción de 93% de errores. La visión 3D demostró ser superior a 2D en esta y otras pruebas. La comparación entre cirugía laparoscópica y robótica en dos estudios mostró ventajas para el da Vinci.

Conclusión: Los instrumentos articulados, la abolición del temblor, los movimientos a escala reducida y la visión 3D del da Vinci mejoran la habilidad y desempeño del cirujano en cirugía mínimamente invasora asistida por robot.

* Presentado en el XXX Congreso "Avances en Cirugía" de la Asociación Colombiana de Cirugía, agosto 19 de 2004.

** Department of Surgical Oncology and Technology, Imperial College. St Mary's Hospital Londres, Gran Bretaña.

Fecha de recibo: Septiembre 3 de 2004
Fecha de aprobación: Abril 26 de 2005

Introducción

En septiembre de 2000 llegó al St Mary's Hospital de Londres el sistema telemanipulador quirúrgico da Vinci, producido por Intuitive Surgical (Santa Bárbara, California), adquirido con donaciones para investigación y con capital del Hospital y del Colegio Imperial (Imperial College London), del cual St Mary's es uno de los hospitales asociados. Hasta junio del 2004, era el único sistema da Vinci en el Reino Unido.

Desde su adquisición, el robot se ha utilizado en 98 procedimientos (tabla 1), incluyendo varios realizados por primera vez en el mundo ⁽¹⁾. Además de su uso clínico, el sistema hace parte de un programa de investigación que incluye nuevas ayudas técnicas instaladas en el robot y medición del impacto del robot en el desempeño del cirujano en diferentes pruebas.

TABLA 1

Procedimientos realizados con el sistema da Vinci en St Mary's Hospital de Londres, entre septiembre de 2000 y julio de 2004

Procedimiento	Número
Colelap ¶	9
Funduplicatura de Nissen	21
Miotomía de Heller	5
Adrenalectomía	2
Resección anterior de recto §	1
Rectopexia §	7
Resección abdominoperineal ¶	3
Hernia inguinal - TAPP (2 casos bilaterales)	5
Prostatectomía radical	2
Pieloplastia	2
Disección AMI + pericardiotomía	16
Igual + Anastomosis fallida (Conversión)	4
PCR abierto	1
PCR totalmente endoscópico	16
Reemplazo válvula mitral	1
Lobectomía pulmonar	3
Total	98

¶ = un procedimiento abandonado § = primer caso en el mundo
AMI = arteria mamaria interna PCR = puente coronario robótico

El objetivo de este artículo es resumir todo este trabajo de investigación para crear un cuadro general de la labor realizada por el equipo del Imperial College, que en esencia pretende responder las pre-

guntas respecto a cuál debe ser el papel y la dirección de la cirugía robótica en el futuro. Algunos de estos estudios han sido publicados ⁽²⁻⁶⁾, otros se encuentran en curso y de éstos se menciona el trabajo realizado hasta ahora o los resultados parciales.

Materiales y métodos

Sujetos

Participaron cirujanos y residentes de cirugía con diferentes niveles de competencia en cirugía laparoscópica. En los primeros estudios se aprovechó que no conocían el sistema y únicamente se dio una instrucción básica en el funcionamiento del robot para establecer una curva de aprendizaje; en las otras pruebas se empleó el entrenamiento adquirido previamente. Para la curva de aprendizaje se dividieron en dos grupos de acuerdo a la experiencia en cirugía mínimamente invasiva (CMI) básica y avanzada ⁽²⁾. Para las pruebas con equipo convencional de CMI sólo se incluyeron cirujanos con experiencia clínica en sutura por laparoscopia o con amplio entrenamiento en el laboratorio, confirmado por los investigadores. En todos los casos el orden en que cada sujeto realizó una u otra prueba fue aleatorio.

Sistema da Vinci

El da Vinci Surgical System® es un sistema telemanipulador amo-esclavo, formado por una consola para el cirujano (amo) y un carro que se sitúa al lado del paciente (esclavo) con tres brazos, dos para los instrumentos y el de la mitad para la cámara. Ahora existe un cuarto brazo que se puede adaptar a los sistemas previos. Un endoscopio de doble lente, conectado a dos juegos independientes de luz y cámaras, provee visión tridimensional en tiempo real. Dos monitores proyectan las imágenes en un visor binocular. Una torre de laparoscopia aloja un monitor convencional para el resto del equipo quirúrgico, las cámaras y fuentes de luz. Las características principales del sistema son: visión en tercera dimensión (3D), precisión en el control de los instrumentos con filtración del temblor, movimientos reducidos en escala y la presencia de "muñecas" o articulaciones en la punta de los instrumentos. Estos permiten seis grados de libertad de movimientos (degrees of freedom, DOF) más uno específico de la función del instrumento, recordando

los movimientos ejecutados en cirugía abierta por la muñeca humana ^(7, 8). Los instrumentos laparoscópicos corrientes tienen cuatro DOF ⁽⁹⁾.

Para obtener datos válidos, se estandarizaron la posición de los brazos del robot, de la cámara y las pruebas para realizar, con base en los requerimientos de cada tarea.

Equipo de laparoscopia

La cámara está colocada de tal forma que el campo visual sea el mismo que para el robot y siempre con los mismos instrumentos.

Modelos y suturas

Piel sintética, intestino delgado (Limbs & Things™) y algunos diseñados por los investigadores. Estos también se han estandarizado para cada tarea e incluyen sutura sobre piel artificial, transferir objetos de un recipiente a otro y mover un cordel cambiando de mano alternativamente. El tipo de sutura, el tamaño de la aguja y la longitud del hilo se estandarizaron en todas las pruebas.

Evaluación

Todos los procedimientos se grabaron en imágenes digitales y el desempeño en las pruebas se evaluó empleando varios métodos:

Análisis de movimientos: para las pruebas de laparoscopia un sistema de análisis de movimientos previamente validado, ICSAD (Imperial College Surgical Assessment Device) ^(10, 11). Consiste en un equipo de rastreo electrónico (Isotrak II, Polhemus, USA) conectado a un computador portátil. El sistema de rastreo está formado por un generador de campo electromagnético y dos sensores que fijados al dorso de las manos del cirujano reportan al computador la posición de éstas, lo cual permite obtener así el número de movimientos, la distancia recorrida y el tiempo empleado.

Los datos de análisis de movimientos del cirujano en las pruebas realizadas en el robot se obtuvieron de los controles de la consola usando la interfase

de aplicación de programación (API) incluida en el sistema como parte de la colaboración entre el Imperial College e Intuitive Surgical. Se trata de un protocolo que permite a terceras partes obtener señales en tiempo real directamente del sistema. Esta información es analizada mediante el programa de computador RoViMAS (Robotic Video Motion Analysis Software) ⁽¹²⁾, diseñado por uno de los autores (DA); este programa analiza la información posicional y genera la información en iguales términos que el ICSAD (tiempo empleado, número de movimientos de las manos y la distancia total recorrida por cada mano). La diferencia entre los dos es que el ROVIMAS, además de obtener datos de movimiento, puede hacer análisis de dicha información e incluye sincronización de vídeo y análisis de las imágenes obtenidas en medio electrónico. Se aplicaron filtros de Gauss para evitar interferencias con parámetros basados en mediciones de experimentos previos, tanto para las mediciones del robot como en las de cirugía laparoscópica.

Vale la pena mencionar que el uso del análisis de movimientos para examinar el desempeño parte del principio de que un cirujano experimentado realiza un menor número de movimientos y es más preciso en ellos al practicar un procedimiento quirúrgico; como consecuencia la distancia total recorrida y el tiempo empleado deben ser menores que los de uno sin experiencia, de quien se espera repita unos movimientos y corrija otros, dando mediciones mayores.

OSATS: valoración objetiva y estructurada de destrezas técnicas (Objective Structured Assessment of Technical Skills, OSATS). Esta escala es un instrumento de valoración subjetiva de aspectos técnicos clave, ocho puntos que se califican de uno a cinco ⁽¹³⁻¹⁵⁾. Para ello todos los procedimientos son filmados, codificados para evaluación a ciegas y calificados independientemente por tres cirujanos expertos. El puntaje total posible varía entre 8 y 40 puntos. Se consideró que un sujeto era competente cuando alcanzaba un OSATS de 24 puntos o más.

Conteo de errores: se hizo de acuerdo a parámetros preestablecidos y listados en una tabla, que fueron explicados al evaluador.

Análisis estadístico

Todos los cálculos estadísticos se realizaron con el programa Statistical Package for Social Sciences (SPSS 10,0™). Las pruebas se utilizaron con base en los parámetros que se quería medir. Los métodos más usados fueron la pruebas Wilcoxon Signed Rank (datos no paramétricos), Mann-Whitney U, alfa de Cronbach (confiabilidad de los observadores). Se consideró estadísticamente significativo un valor de probabilidad menor de 0,05.

Experimentos

Se realizaron tres estudios consecutivos con los mismos sujetos en todos ellos, con la participación de diez y trece cirujanos.

En el primero ⁽²⁾, los trece sujetos sin experiencia en el uso del da Vinci y con apenas una explicación básica de su funcionamiento debían efectuar una anastomosis termino-terminal en intestino delgado sintético. Este procedimiento se realizó en cinco oportunidades. Después de cada anastomosis podían revisar el resultado y se les daba retroalimentación en cuanto a la técnica quirúrgica y el uso del robot. Cada procedimiento se calificó a ciegas con la escala global del OSATS y evaluó con análisis de movimientos, con un precursor del programa ROVIMAS. El objetivo era establecer una curva parcial de aprendizaje y comparar el desempeño de cirujanos con y sin experiencia en CMI.

El segundo estudio ⁽³⁾ buscaba establecer cualitativa y cuantitativamente alguna ventaja entre visualización en tercera dimensión (3D) comparada con la visión en dos dimensiones a la que está limitado el cirujano en CMI. El sistema da Vinci tiene la opción de cambiar la visión de 3D a 2D, por tanto los dos aspectos del estudio se llevaron a cabo en el robot. Para ello se emplearon cuatro pruebas en la caja de entrenamiento de CMI: realizar una sutura de tres puntos, pasar cuatro agujas de un recipiente a otro en cuadrantes específicos, mover un cordel cambiando alternativamente de mano y pasar fragmentos de icopor de un lado a otro de dos cajas de muestras colocadas en "V", para crear un espacio "más tridimensional". Los once cirujanos fueron evaluados cuantitativamente con análisis de movi-

mientos mediante el ROVIMAS y cualitativamente por un cirujano, quien empleó una escala de errores diseñada para el estudio.

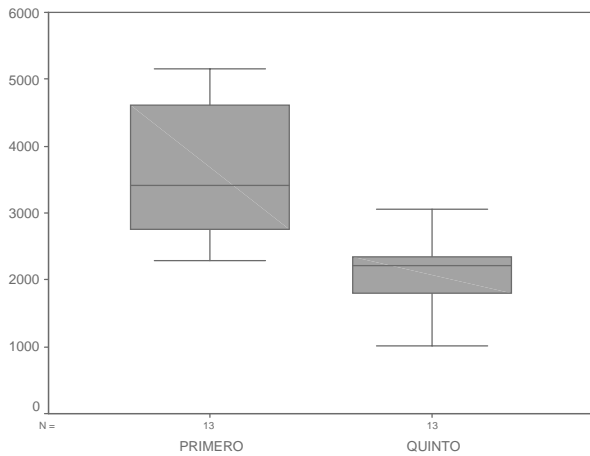
El tercer experimento ⁽⁴⁾ consistió en establecer qué tan importante es el aumento de la habilidad o destreza facilitada por el robot, tratando de cuantificar su influencia de manera objetiva. Para ello se comparó el desempeño de diez cirujanos en el robot y en cirugía laparoscópica. La prueba consistió en realizar tres suturas (puntos separados) en una incisión longitudinal sobre piel sintética. Cada cirujano efectuó el mismo procedimiento en CMI y en el da Vinci en 2D y en 3D. Los resultados se evaluaron con ICSAD en CMI, con ROVIMAS en las pruebas con el robot, y en todos los casos se realizó un conteo de errores.

Resultados

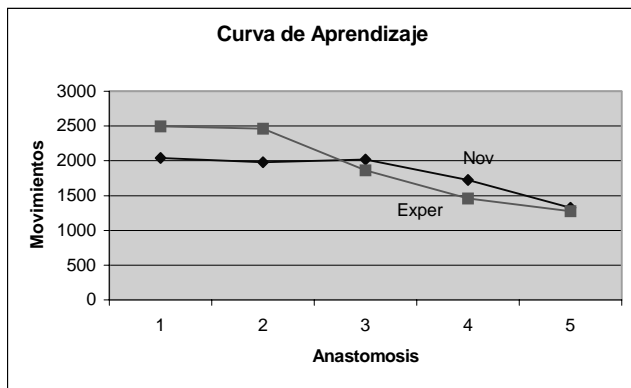
El siguiente es un resumen de los resultados de los tres estudios publicados, para una lectura más completa el lector se debe remitir a las publicaciones originales ⁽²⁻⁴⁾.

En el estudio del análisis de la curva de aprendizaje se observó que en efecto la repetición del procedimiento producía un progreso significativo en todos los parámetros medidos. El puntaje del OSATS para los trece cirujanos pasó de una media de 19 ⁽¹⁴⁻²⁴⁾ en la primera anastomosis a una de 26 ⁽²²⁻²⁷⁾ en la quinta ($p = 0,002$). El análisis de movimiento mostró una reducción en el tiempo empleado de una media de 3.420 segundos en la primera a una de 2.220 segundos en la segunda anastomosis con $p < 0,001$ (figura 1A). El número total de movimientos bajó de 2.040 a 1.303 ($p = 0,011$) y la distancia recorrida disminuyó de 17.217 mm a 13.403 mm ($p = 0,015$).

Cuando se analizaron los resultados del grupo de cirujanos experimentados y los del grupo sin experiencia, se encontró que aunque cada grupo había mejorado todos los parámetros con buena significancia estadística, al compararlos entre sí no hubo diferencias significativas en el tiempo ($p = 0,39$) o puntaje OSATS ($p = 0,25$), y es de esperar lo mismo para la distancia recorrida y el número de movimientos (figura 1B).



A



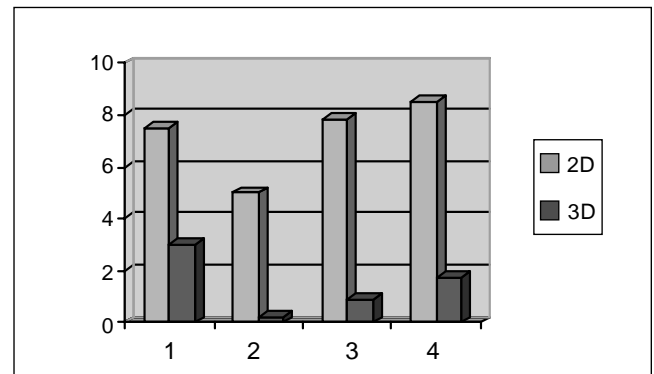
B

FIGURA 1: A) Gráfica del tiempo empleado por los trece cirujanos para completar la prueba en el primero y quinto intentos. Las líneas negras dentro de los cuadros indican la media, los cuadros la distribución de la mayoría y las líneas de los extremos señalan los rangos máximos. B) Ejemplo de las curvas de aprendizaje de novicios y expertos. Ambos grupos redujeron el número de movimientos, pero la diferencia no fue estadísticamente significativa.

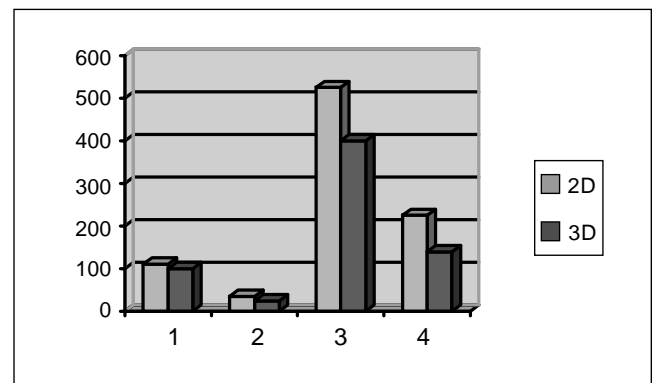
El experimento de 2D/3D lo completaron once cirujanos; se observó un mejor desempeño de todos los cirujanos en 3D (figura 2). Estos resultados se repitieron en las cuatro pruebas y en todos los parámetros medidos (errores, tiempo, trayectoria, movimientos), siempre con diferencias estadísticamente significativas. Se midió también el porcentaje de mejoría de cada parámetro y cada prueba con la fórmula $[(2D-3D)/2D] \times 100$, y se encontró que la tasa de progreso fue también significativa. Por ejemplo, el número de errores disminuyó al usar visión estereoscópica 63% en la primera prueba ($p = 0,003$), 100% en la segunda ($0,005$), 86% en la tercera y 83% en la cuarta (ambos $p = 0,003$). En el

análisis de movimientos los porcentajes fueron igualmente significativos. Todos los sujetos fueron más precisos y necesitaron menos movimientos para completar cada prueba en 3D, tanto en el análisis cuantitativo como en el cualitativo.

En el tercer experimento diez cirujanos, todos con entrenamiento en sutura intracorpórea en CMI y cirugía robótica (CR) realizaron tres suturas cada vez en piel sintética, con instrumentos de cirugía laparoscópica y con el robot en 2D y 3D. Todas las variables medidas mejoraron al comparar CMI con el robot en 2D, pero la reducción del tiempo (20%) no fue significativa. Al comparar CMI con CR en 3D el tiempo disminuyó 40% ($p = 0,01$). El número de movimientos y la trayectoria también se redujeron de manera estadísticamente significativa en más del 50%. La diferencia en el número de errores de destreza pasó de 23 en CMI a 8,5 con el robot en 2D y a 1,5 con el robot en 3D, es decir, una reducción final del 93% con visión estereoscópica.



A



B

FIGURA 2. Comparación del uso de visión en 3 y 2 dimensiones. A) Número de errores (y) en cada uno de las pruebas (x). B) Tiempo empleado (y) en cada prueba.

Estudios y desarrollos tecnológicos en curso

En este momento se investigan varios frentes de desarrollo para el sistema; se busca hacer que su utilización sea aun más intuitiva, más sencilla y dotada de herramientas que garanticen una mayor precisión con la mayor seguridad para el paciente. Estos frentes son:

- Proveer realidad aumentada (RA) para CMI robótica: RA es la mezcla o superposición de objetos sintéticos o artificiales con situaciones reales, en tiempo real. Este proyecto busca dotar al sistema con un programa que permita integrar una imagen reconstruida en 3D de TAC o resonancia magnética preoperatoria con el campo operatorio, representado por la imagen en 3D producida por el videoendoscopio del robot. En otras palabras, el cirujano podrá ver la lesión y los puntos de referencia anatómicos superpuestos al campo operatorio y decidir con más precisión, por ejemplo, márgenes de resección.

Tres propiedades de tal superposición deben ser perfeccionadas para hacer posible la inclusión de la RA: calibración, registro y seguimiento (Tracking). La calibración determina las propiedades de la cámara empleada para ver el campo operatorio, propiedades que deben conocerse para crear la escena simulada sin distorsionar la imagen. El siguiente paso es alinear con absoluta precisión los objetos virtuales con su contraparte real en las imágenes de vídeo. Este emparejamiento de elementos reales y virtuales se llama registro. Una vez lograda esta mezcla, se debe tener en cuenta la dinámica del procedimiento quirúrgico. Cualquier deformación de los tejidos, especialmente por contacto con los instrumentos, debe ser rastreada. De esta forma las imágenes virtuales pueden ser actualizadas según la evolución de la operación y retransmitidas al visor del cirujano con la imagen real del campo quirúrgico.

- Debido a la exitosa aplicación del análisis de movimiento con el ICSAD (11, 16), se decidió aplicar el mismo concepto para la evaluación de destrezas quirúrgicas en el sistema da Vinci. Para ello fue necesario crear un programa de computador completamente nuevo, ROVIMAS (12). Éste pue-

de calcular y presentar datos de los movimientos de las manos, incluyendo tiempo, la distancia total recorrida, el número de movimientos hechos, la dirección de las manos, la velocidad y otros más. Un desarrollo adicional reciente es que al filmar en cinta electrónica de vídeo el procedimiento, el análisis de movimientos se puede sincronizar con la imagen, y en consecuencia, datos de un momento específico de la cirugía o tarea que se esté realizando pueden ser analizados (figura 3). Esto facilita una evaluación subjetiva y objetiva muy completa, permitiendo analizar errores o movimientos de experto con mediciones de destreza (17) (figura 4).

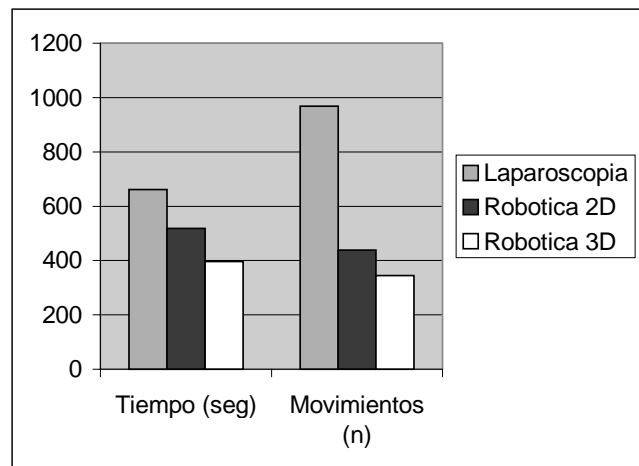


FIGURA 3. Ejemplo del análisis de movimiento.



FIGURA 4. Evaluación de un procedimiento quirúrgico con ROVIMAS en la pantalla del computador.

Actualmente se realiza una investigación más profunda del análisis de movimiento para mejorar su sensibilidad, mediante el uso de modelos estocásticos tratando de discriminar el nivel de experiencia y destreza en procedimientos reales y complejos. Los casos de cirugía cardiovascular que hoy se practican son los más firmes candidatos. Se emplean los Modelos Ocultos de Markov usados ampliamente en áreas de reconocimiento de patrones como en la voz o la escritura. En el caso del sistema da Vinci se utilizan para reconocer diferentes pasos de un procedimiento, distintos niveles de pericia y para modelar movimientos quirúrgicos.

- Desde el punto de vista de retroalimentación táctil del robot al cirujano se trabajan dos aspectos: háptica y restricción activa.

Háptica se denomina desde el punto de vista técnico al estudio de cómo combinar el sentido del tacto con un mundo generado por computador. Para nuestros propósitos, se trata de la información que el cirujano obtendría en su interacción con los controles del robot, información a su vez generada originalmente en el campo operatorio. En la actualidad, el excelente desempeño del sistema depende principalmente de la información obtenida por su visión en 3D, su manejo intuitivo y el entrenamiento del cirujano. Existe aún un vacío de datos que puede ser llenado con la retroalimentación háptica. Esto permitiría al cirujano “sentir” cuando toca un tejido o graduar la presión con que sujeta o retrae una estructura. Como hoy no es posible poner sensores en la punta de los instrumentos, esto se hace con métodos indirectos, tomando mediciones de expertos en diferentes tejidos para establecer parámetros que permitan graduar las sensaciones que se transmiten al cirujano.

La restricción activa, desarrollada por B. Davies en el Imperial College ^(18, 19), consiste en establecer límites a los movimientos de los instrumentos, creando áreas prohibidas (figura 5). En un caso, la restricción impide al instrumento salirse de un área demarcada; por ejemplo, el electrocauterio no podría cortar sobre una región donde de antemano se sabe que hay una arteria

mayor. Lo opuesto también es posible, el instrumento puede funcionar solamente por fuera de un área establecida, como cuando se reseca un tumor tratando de mantener márgenes adecuadas. La transición de una región a otra, es decir, permitir el paso del instrumento cerca del área prohibida cuando no se está utilizando, para entrar o salir, se hace con mecanismos especiales que evitan inestabilidad en el sistema ⁽²⁰⁾.

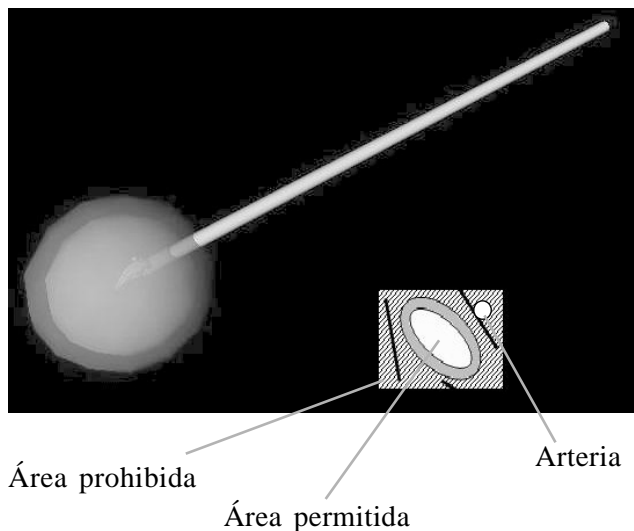


FIGURA 5. Representación de la restricción activa, en este caso impidiendo activar el instrumento fuera de los límites previamente establecidos.

Discusión

La CR, en la cual el cirujano controla un sistema telemanipulador que amplifica las destrezas del cirujano para permitir la práctica de un procedimiento de alta complejidad con gran precisión, es una realidad. Así lo evidencian las cifras de la experiencia clínica de St Mary's (tabla 1) y de otros centros donde inclusive se han creado programas de entrenamiento ⁽²¹⁾. Estas experiencias muestran que el da Vinci permite un aprendizaje rápido de técnicas complejas, los cirujanos se adaptan fácilmente al sistema y su desempeño es mejor que con la CMI convencional en procedimientos complejos y en el laboratorio. De hecho, estas afirmaciones son a la inversa en la CMI.

La CMI ha demostrado ampliamente sus beneficios para el paciente. Menor invasión, menor riesgo de infección, recuperación y retorno a las activida-

des normales más rápido ^(22, 23). Todo ello a un costo igual o menor a la cirugía abierta. Ha sido tal su éxito, que inclusive ha modificado la actitud de los clínicos hacia los tratamientos quirúrgicos de patologías como el reflujo gastroesofágico ^(24, 25). Sin embargo, el cirujano tiene que adaptarse a perder su visión estereoscópica, confiar lo que sus ojos ven a un ayudante y emplear instrumentos con un diseño ergonómico inapropiado, colocados en puntos fijos y con un movimiento paradójico por el efecto de fulcro ⁽²⁶⁾. Como consecuencia, el cirujano pierde su destreza habitual y su habilidad para resolver situaciones difíciles o inesperadas ⁽²⁷⁾, lo cual puede ir en detrimento del paciente. Tal vez es por eso que, a pesar de que casi todos los hospitales de alto nivel de complejidad poseen una torre de laparoscopia, a nivel mundial son relativamente pocos los cirujanos dedicados a la CMI avanzada.

Los sistemas telemanipuladores tienen con características que superan estas desventajas; tres aspectos se destacan sobre los demás. El primero es el uso de instrumentos articulados. La punta o parte funcional del instrumento cuenta con "carpo". De esta forma, todos los movimientos efectuados por el cirujano en la consola son reproducidos por el brazo robótico y el instrumento en su extremo. Esto es particularmente útil en maniobras complejas como la sutura intracorpórea, y absolutamente indispensable, por ejemplo, en un puente coronario, que era imposible realizar en forma endoscópica antes de la aparición del da Vinci. Dos ventajas adicionales son la abolición del temblor, es decir, que los movimientos no intencionales son filtrados y, por otro lado, los movimientos se producen a una escala de 10 a 1: si el cirujano mueve su mano 5 cm, la punta del instrumento se mueve 0,5 cm. Todo esto hace que los movimientos sean más precisos, se pierda menos tiempo y haya menos riesgos de complicaciones.

Esto quedó demostrado en el experimento que comparó la CMI con la CR, donde se vio que el número de errores y el desempeño en el análisis de movimiento mejoraron sensiblemente aun con visión 2D, lo que da valor por sí mismo al diseño de los instrumentos.

El segundo aspecto es la visión en 3D, que a diferencia de los incómodos y costosos aparatos que

se fijaban a la cabeza del cirujano y producían una imagen de poca calidad ⁽²⁸⁾, el instrumento binocular del da Vinci crea dos imágenes independientes, una para cada ojo. Esto es posible porque el endoscopio tiene dos lentes en su interior, cada uno con fuente de luz y cámara propias. Cada imagen es proyectada en el visor por un monitor para cada ojo, creando así una visión realmente estereoscópica. Este es un elemento indispensable del robot, ya que la única fuente de información para el cirujano en CR son sus ojos ^(3, 29). El tacto, tan útil en cirugía abierta, no existe debido a la separación entre el cirujano y el campo operatorio. El segundo estudio (comparación 2D/3D) y marginalmente el tercero evaluaron la importancia de la visión en 3D. Todas las pruebas realizadas demuestran su superioridad sobre la 2D, controlando todas las variables, ya que para todo el experimento se utilizó el propio da Vinci cambiando el tipo de visión ⁽⁵⁾. La destreza mejoró hasta 25% como lo muestra la reducción en el tiempo y los movimientos realizados, y la precisión aumentó de tal forma que llevó casi a cero el número de errores. Varios estudios han demostrado que los cirujanos expertos en CMI se benefician poco o nada de la visión en 3D, porque aprenden a compensar la falta de ésta con otras claves y signos en el campo operatorio. El trabajo de Mueller y colaboradores sugiere que ni siquiera los novicios se benefician de la 3D ⁽³⁰⁾. Sin embargo, las pruebas que emplearon no parecen ser apropiadas para evaluar objetivamente este asunto. En los experimentos expuestos en este escrito hubo una ventaja significativa de la visión en 3D sobre la 2D en cirujanos con y sin experiencia.

El tercer aspecto combina los dos anteriores y es el manejo intuitivo del robot. Al sentarse frente a la consola, tomar los controles y mirar por el visor, la persona tiene al frente los instrumentos, en una posición similar a la que encontraría en cirugía abierta (eje ojos-mano-instrumento). Al mover sus manos, parece que los instrumentos fueran una extensión de éstas, ya que duplican los movimientos con gran precisión. El visor tiene una almohadilla sobre la cual descansa la frente y de esta forma el cirujano se siente inmerso en el campo quirúrgico. Con un pedal controla la cámara (movimientos, foco, profundidad), de manera que recupera la independencia en cuanto a lo que sus ojos ven, ya no depende de un ayudante. Esto tiene el beneficio de hacer la CMI accesible

a los cirujanos en entrenamiento, disminuye el tiempo de aprendizaje de la técnica laparoscópica y presumiblemente la duración de la curva de aprendizaje. La ventaja para los cirujanos expertos en CMI es que el aumento de la precisión les permite realizar procedimientos muy difíciles o imposibles para la CMI, como los puentes coronarios.

El primer estudio mencionado mostró como después de sólo cinco sesiones con el robot realizando una prueba muy compleja (anastomosis intestinal), todos los cirujanos, tanto experimentados como no experimentados, mejoraron la calidad de su desempeño (OSATS), disminuyeron el tiempo requerido en más de la tercera parte y necesitaron casi 40% menos movimientos. En una encuesta cuyos datos no han sido publicados, todos los participantes se adaptaron rápidamente al sistema, lo encontraron cómodo (considerando que algunos tardaron más de una hora en las primeras pruebas) y no experimentaron molestias. Además, fue posible construir una curva de aprendizaje con todos los parámetros, que se considera inconclusa por el número de mediciones realizadas.

Una etapa fascinante es la del desarrollo de nuevas propiedades para el sistema. La disponibilidad de la RA permitiría realizar CR guiada por imágenes

diagnósticas en tiempo real, haciendo que ciertos procedimientos sean más precisos, ya que se conocería la posición exacta de la lesión que se va a tratar y de estructuras adyacentes que deban preservarse. Esto también facilitará la preparación de cirujanos en entrenamiento, permitiéndoles efectuar procedimientos simulados sobre estas imágenes. El ROVIMAS permitirá analizar y guardar la información del desempeño de expertos en diferentes procedimientos no sólo para evaluar a otros cirujanos, sino para que cirujanos en entrenamiento puedan aprender de expertos duplicando sus patrones de movimientos. La seguridad en el empleo del sistema se verá incrementada con el uso de la háptica. El cirujano tendrá conciencia de la presión o tracción que ejerce sobre un tejido y podrá regularla para evitar el trauma de éste.

En conclusión, la CR tiene, con los modelos existentes y la tecnología disponible, su campo principalmente en los casos complejos que requieren gran habilidad y mucha precisión, o que se practican en campos quirúrgicos limitados. Ejemplos pueden ser los puentes coronarios, remplazo de válvulas cardíacas, prostatectomía radical, adrenalectomía. Sin embargo, se ha visto cómo casi cualquier procedimiento de CMI puede ser realizado con CR con buenos resultados y sin compromiso del paciente.

Abstract

Hypothesis: *The da Vinci™ Surgical System allows surgeons to overcome the limitations imposed by minimally invasive surgery (MIS) in terms of dexterity, operative field control and ergonomics. The studies included evaluate the learning curve, 3-D vision and motion analysis to reveal the system's advantages over MIS and to establish performance assessment methods.*

Methods: *system employed: da Vinci™ Surgical System. Three comparative experiments with 11 to 13 surgeons performing different tasks looking at: learning curve comparing experienced and non-experienced surgeons, advantages of 3D over 2D vision, and advantages of robotic surgery over Minimally Invasive Surgery (MIS). Assessment: measurement of surgeon's performance by means of a global scale for skills (OSATS) and errors count, with blind scoring by experts. Additionally, motion analysis software for MIS (ICSAD) and robotic surgery (ROVIMAS), both developed by the Department and previously validated in other studies. Statistic calculations: SPSS 10,0™ software. $P < 0,05$.*

Results: *The learning curve rendered an OSATS score of 18 for the first attempt and 26 for the fifth ($p=0,02$, Cronbah alpha: 0.894). Motion analysis showed reduction in number of movements and path length ($p=0,01$).*

Comparing robotic surgery with 3-D vision vs. MIS rendered a 40% reduction in time taken ($p=0,001$) and 70% reduction in path length (0,008), with 93% less skill-related errors. 3-D vision was proved to be superior to 2-D in several trials.

Conclusion: *“Endowrist” instruments, tremor abolition, motion scaling and 3-D vision of the da Vinci™ Surgical System enhance the surgeon’s dexterity and performance in robotic assisted MIS.*

Key words: Robotics, video-assisted surgery, learning, task performance and analysis.

Referencias

1. MUNZ Y, MOORTHY K, KUNDCHADKAR R, HERNÁNDEZ JD, MARTIN S, DARZI A, ROCKALL T. Robotic assisted rectopexy. *Am J Surg* 2003; 187: 88-92.
2. HERNÁNDEZ J, BANN SD, MUNZ Y, MOORTHY K, MARTIN S, DOSIS A, BELLO F, *et al.* Qualitative and quantitative analysis of the learning curve of a simulated surgical task on the da Vinci system. *Surg Endosc* 2004; 18 (3): 372-378.
3. MUNZ Y, HERNÁNDEZ J, BANN SD, BELLO F, DOSIS A, MARTIN S, MOORTHY K, *et al.* The use of motion analysis in determining the advantages of 3D vision in surgical performance with the da Vinci telemanipulation robotic system. *Surg Endosc* 2003; 17:S59.
4. MOORTHY K, MUNZ Y, DOSIS A, HERNÁNDEZ J, BANN SD, MARTIN S, BELLO F, *et al.* Dexterity enhancement with robotic surgery. *Surg Endosc* 2004; 18: 790-795.
5. MUNZ Y, HERNÁNDEZ J, BANN SD, BELLO F, DOSIS A, MARTIN S, MOORTHY K, *et al.* The advantages of 3D visualization in surgical performance with the da Vinci telemanipulation robotic system. *J Soc Laparoscopic Surg* 2002; 6: 264.
6. HERNÁNDEZ J, BANN SD, MUNZ Y, MOORTHY K, MARTIN S, DOSIS A, BELLO F, *et al.* The learning curve of a simulated surgical task using the da Vinci telemanipulator system. *Br J Surg* 2002; 89 (Suppl 1): 17-18.
7. FALK V, AUTSCHBACH R, KRAKOR R, WALTHER T, DIEGELER A, ONNASCH JF, CHITWOOD WR, *et al.* Computer-enhanced mitral valve surgery: Toward a total endoscopic procedure. *Semin Thorac Cardiovasc Surg* 1999; 11: 244-249.
8. WATSON DI, BAIGRIE RJ, JAMIESON GG. A learning curve for laparoscopic fundoplication: definable, avoidable, or a waste of time? *Ann Surg* 1996; 224: 198-203.
9. PATKIN M, ISABEL L. Ergonomics, engineering and surgery of endosurgical dissection. *J Royal Coll Surg Edinburgh* 1995; 40: 120-132.
10. TAFFINDER N, SMITH S, MAIR J, *et al.* Can a computer measure surgical precision? Reliability, validity and feasibility of the ICSAD. *Surg Endosc* 1999; 13: 81.
11. DATTA V, MACKAY S, MANDALIA M, DARZI A. The use of electromagnetic motion tracking analysis to objectively measure open surgical skill in the laboratory-based model. *J Am Coll Surg* 2001; 193: 479-485.
12. DOSIS A, BELLO F, ROCKALL T, MUNZ Y, MOORTHY K, MARTIN S, DARZI A, “ROVIMAS: A software package for assessing surgical skills using the da Vinci telemanipulator system”, *Itab 2003: 4Th International Ieee Embs Special Topic Conference on Information Technology Applications in Biomedicine, Conference Proceedings - New Solutions for New Challenges*, 2003; 326-329.
13. FAULKNER H, REGEHR G, MARTÍN J, REZNICK R. Validation of an objective structured assessment of technical skill for surgical residents. *Acad Med* 1996; 71: 785-790.
14. MARTIN JA, REGEHR G, REZNICK R, MACRAE H, MUMAGHAN J, HUTCHINSON C, BROWN M. Objective structured assessment of technical skills (OSATS) for surgical residents. *Br J Surg* 1997; 84: 273-278.
15. MACRAE H, REGEHR G, LEADBETTER W, REZNICK RK. A comprehensive examination for senior surgical residents. *Am J Surg* 2000; 179: 190-193.
16. DATTA VK, MACKAY SM, CHANG AA, DARZI AW. Electromagnetic motion analysis in the assessment of surgical technical skill. *British J Surg* 2001; 88: 79.
17. DOSIS A, BELLO F, MOORTHY K, MUNZ Y, GILLIES D, DARZI A. Real-time synchronization of kinematic and video data for the comprehensive assessment of surgical skills. 98, 82-88. 2004. Newport Beach, Los Ángeles, California, *Stud Health tech Inform. Medicine Meets Virtual Reality 12 (MMVR)*. Westwood JD, *et al.* 14-1-2004. Conference Proceedings.
18. DAVIES BL, HARRIS SJ, LIN SL, HIBBERD RD, MIDDLETON R, COBB JC. Active compliance in robotic surgery- the use of force control as dynamic constraint. *Proc Instn Mech Eng* 1997; 214 (H): 285-292.
19. DAVIES B. Robotic devices in surgery. *Min Invas Ther & Allied Technology* 2003; 12: 5-13.
20. BORELLI J, BELLO F, RODRÍGUEZ Y, BENA F, DAVIES B, An active constraint environment for minimally invasive heart surgery: early experience of a cutting operation. *Medicine Meets Virtual Reality 12 CA, USA, IOS Press, ISSN: 0926-9630, 2003.*

21. CHITWOOD RW, NIFONG LW, CHAPMAN WHH, FELGER JE, BAILEY BM, BALLINT T, MENDESON KG, *et al.* Robotic surgical training in an academic institution. *Ann Surg* 2001; 234: 475-486.
22. WILLIAMS LF, CHAPMAN WC, BONAU RA, MCGEE EC, BOYD RW, JACOBS JK. Comparison of laparoscopic cholecystectomy with open cholecystectomy in a single center. *Am J Surg* 1993; 165: 459-465.
23. ZUNDEL N, HERNÁNDEZ J. Profilaxis antibiótica en cirugía laparoscópica. *Rev Colomb Cir* 1998; 13: 159-162.
24. HINDER RA, PERDIKIS G, KLINGER PJ, DE VAULT KR. The surgical option for gastroesophageal reflux disease. *Am J Med* 1997; 103: 144S-148S.
25. WATSON DI, BAIGRIE RJ, JAMIESON GG. A learning curve for laparoscopic fundoplication: definable, avoidable, or a waste of time? *Ann Surg* 1996; 224: 198-203.
26. SMITH CD, FARRELL TM, MCNATT SS, METREVEL RM. Assessing laparoscopic manipulative skills. *Am J Surg* 2001; 181:547-550.
27. CADIÈRE GB, HIMPENS J, GERMAÏ O, IZZAW R, DEGUELDRE M, VANDROMME J, CAPELLUTO E, *et al.* Feasibility of robotic laparoscopic surgery: 146 cases. *World J Surg* 2001; 25: 1467-1477.
28. CHEAH WK, LENZI JE, SO J, DONG F, KUM CK, GOH P. Evaluation of a head-mounted display (HMD) in the performance of a simulated laparoscopic task. *Surg Endosc* 2001;15: 990-991.
29. SCHURR MO, KUNERT W, AREZZO A, BUESS G. The role and future of endoscopic imaging systems. *Endoscopy* 1999; 31: 557-562.
30. MUELLER MD, CAMARTIN C, DREHER E, HANGGI W. Three-dimensional laparoscopy. Gadget or progress? A randomized trial on the efficacy of three-dimensional laparoscopy. *Surg Endosc* 1999; 13: 469-472.

Correspondencia:
JUAN DAVID HERNÁNDEZ RESTREPO, MD.
juandah@uniandes.edu.co
Bogotá, D.C., Colombia