

Cirugía coronaria miniinvasiva asistida por computadora (robótica)

ROBERTO BATTELINI, VOLKMAR FALK, FRIEDRICH MOHR

RESUMEN

El principio básico de los robots utilizados corrientemente es el de brazos manipuladores con una arquitectura serial de articulaciones y conexiones. La movilidad de las articulaciones está provista por actores mecánicos que se manejan eléctrica o hidráulicamente. Los robots usados hoy en cirugía cardíaca son los llamados *on line*, porque el operador está en control permanente del sistema por vía de una interfase hombre-máquina. El concepto es combinar las habilidades humanas, como el juicio y la percepción, con la mecánica precisa del robot mediante tecnología mejorada por computadora. A causa de que los movimientos manuales del cirujano son convertidos en señales electrónicas por el *input device* de la consola, el paciente no necesita estar en la misma sala de operaciones ni ciudad que el cirujano para ser operado.

El concepto de inmovilización virtual para eliminar los efectos del movimiento cardíaco también es atrayente. Moviendo la cámara y los instrumentos sincrónicamente con las excursiones del corazón, se puede crear una imagen de inmovilidad virtual, de modo de trabajar con la imagen detenida.

REV ARGENT CARDIOL 2003;71:302-306

Dirección para separatas: e-mail:
batter@medizin.uni-leipzig.de
Universidad de Leipzig, Alemania

Palabras clave

> Robótica - Cirugía coronaria - Cirugía miniinvasiva coronaria

El futuro de la cirugía –y de la medicina en general– no está en la sangre e intestinos, sino en bits y bites.

Richard Satava

HISTORIA

En mayo de 1998, en París, Alain Carpentier operó por primera vez en el mundo una válvula mitral por medio del robot Da Vinci®, utilizando el sistema Heartport. (1) Dos semanas más tarde, F. W. Mohr, en Leipzig, repite la intervención con el mismo sistema y opera incluso a pacientes coronarios. Estas prestaciones también se realizaron a corazón parado, lo cual constituye por ahora un retraso con respecto a los MIDCAB porque necesita de CEC. Dos años después, Douglas Boyd, en Canadá, hizo el primer *bypass* coronario a corazón latiendo en forma totalmente endoscópica.

INTRODUCCIÓN

Inconvenientes de la cirugía videoscópica convencional

Los cirujanos cardíacos enfrentan las mismas limitaciones que se les presentan a los de otras especialidades cuando trabajan en un ambiente endoscópico: están restringidos por la escasa movilidad de los instrumentos dentro del cuerpo humano. El uso de instrumentos largos y rígidos a través de un punto fijo obliga a invertir los movimientos (*fulcrum effect*).

Además, existe pérdida de fuerza por fricción del instrumento a través de los *ports*, lo cual lleva a la

fatiga muscular. Al mismo tiempo, la transmisión del movimiento es dependiente de la relación entre la longitud del instrumento dentro y fuera del cuerpo y esto causa una proporción indeseada del primero. (2)

Para ejecutar un movimiento completo en tres dimensiones se necesitan 6 grados de libertad o dof (*degrees of freedom*). La mano humana permite 20 dof, mientras que la palma tiene todavía 7 a los que se les deben sumar los posibles en el hombro, el codo y la muñeca. (3)

Los instrumentos endoscópicos habituales tienen solamente 4 grados de libertad (arriba/abajo, izquierda/derecha, dentro/fuera, rotación y un adicional para prensión o *grip*), que determinan una gran reducción de la destreza manual. Esta falta de control total de la punta del instrumento impide ciertos movimientos, como suturar una arteria coronaria. Más aún, la ergonomía no es favorable en la cirugía endoscópica convencional. Así, la movilidad limitada de los instrumentos dentro del cuerpo es compensada por movimientos no naturales que llevan a la fatiga y falta de concentración.

Las imágenes videoscópicas tienen un papel primordial en la cirugía endoscópica. El uso de imágenes endoscópicas 2D no sólo disminuye el campo visual, sino también la resolución y la profundidad del campo: las imágenes bidimensionales carecen de percepción de profundidad (estereoscópica). El manejo manual de las cámaras provoca dificultades de comunicación y causa distracción al cirujano al mover constantemente el blanco.

Los robots quirúrgicos se desarrollaron en un esfuerzo por superar estas limitaciones, aumentar la destreza y facilitar la cirugía endoscópica.

Descripción de un sistema robótico: telemanipuladores

El principio básico de los robots utilizados corrientemente es el de brazos manipuladores con una arquitectura serial de articulaciones y conexiones. La movilidad de las articulaciones está provista por actores mecánicos que se manejan eléctrica o hidráulicamente. Los robots usados hoy en cirugía cardíaca son los llamados *on line*, porque el operador está en control permanente del sistema por vía de una interfase hombre-máquina. El concepto es combinar las habilidades humanas, como el juicio y la percepción, con la mecánica precisa del robot mediante tecnología mejorada por computadora.

Estos telemanipuladores se diseñaron para facilitar trabajo en un ambiente remoto o riesgoso, como las plantas nucleares. Están en constante control por un operador que trabaja en un *input device*, réplica de un instrumento quirúrgico, llamado comúnmente el *master* o amo, mientras que sus comandos o movimientos se ejecutan en un ambiente remoto por un manipulador *slave* o esclavo.

El brazo robótica activado por la voz

El AESOP (Automated Endoscope System for Optimal Positioning), de Computer Motion, La Goleta, California, se usa primordialmente como un endoscopio. Tiene un brazo que puede aplicarse a mesas de operaciones normales y es controlado por la voz del cirujano. Se describió en 1998 para reemplazar al ayudante en la cirugía miniinvasiva mitral (4) y también para preparación endoscópica de la mamaria (Figura 1).

Sistemas de telemanipuladores que se usan corrientemente en cirugía cardíaca

La virtud de los telemanipuladores que nos interesa aquí es la de poder trabajar a distancia. Las unidades de amo y esclavo pueden acoplarse mecánicamente o interactuar electrónicamente a través de varios

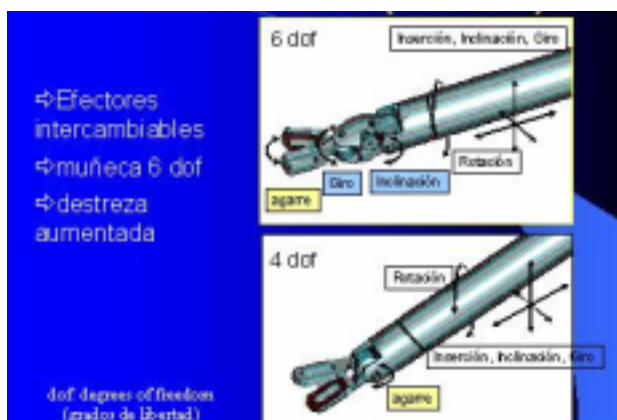


Fig. 1. Brazos robóticos (Da Vinci®)

ABREVIATURAS

AESOP	Sistema endoscópico automático de posición óptima
CEC	Circulación extracorpórea
DA	Descendente anterior
EII	Espacio intercostal izquierdo
LIMA	Arteria mamaria interna izquierda
MIDCAB	Cirugía coronaria mínimamente invasiva
TECAB	<i>Bypass</i> coronario endoscópico
TECAB HB	<i>Bypass</i> coronario endoscópico a corazón latiendo

procesadores que expanden vastamente sus posibilidades. (5)

El sistema Da Vinci®, de Intuitive Surgical, Mountain View, California, consiste en una consola maestra o *master*, de diseño ergonómico. Contiene una pantalla en la cual el cirujano observa el campo quirúrgico a través del sistema de video. Su dispositivo *master* quirúrgico consiste en dos mangos o *master handles* (remedan la forma de un portaagujas convencional seccionado por la mitad). El *master* está conectado con el manipulador del robot, que a distancia mueve la muñeca mecánica.

Los movimientos del cirujano, que parecen repetir como un mimo los de la cirugía convencional, estimulan sensores de movimientos electrónicos, altamente sensibles para cada componente de un movimiento dado. Estos datos son procesados por una computadora que utiliza una matriz de transformación basada en coordenadas cartesianas y luego son transferidos a los manipuladores quirúrgicos que reproducen exactamente los movimientos dentro del tórax, de modo tal que los movimientos de la mano y la muñeca del cirujano se trasladan directamente a los instrumentos en el robot insertados por trócares.

La tecnología avanzada de computación permite trasladar los datos digitalizados desde la consola hacia la unidad esclava en movimientos mecánicos finos y filtrados. Las puntas de los instrumentos están controladas por cables internos deslizantes dentro de los brazos mecánicos o efectores finales, que son intercambiables.

Gracias a la muñeca mecánica, los efectores finales proveen 6 grados de libertad más *grip* (agarre). Es posible desconectar temporariamente el *slave* del *master* (igual efecto que en un ratón de computadora) para permitir la reposición del *master* dentro de su lugar de trabajo, mientras que la posición de los instrumentos permanece inalterada. Esto permite que el operador trabaje siempre en la posición ergonómica más conveniente. (6)

El sistema de cámaras utilizadas es de dos de estas bidimensionales que alinean la imagen de video de manera tal que las puntas de los instrumentos parecen ser la extensión de los mangos maestros que el cirujano está manteniendo en sus manos y así se provee la alineación mano-ojo.

Hay *motion scaling* o proporción de movimientos de hasta 10:1, lo cual significa que un movimiento de

2 cm en el panel de control significa uno de 2 mm dentro del paciente. También se provee una filtración del temblor de 6 a 10 Hz y, por último, cierto *feedback* de fuerzas, de modo que el contacto con los tejidos se siente con el *master*. Este *feedback*, sin embargo, es inferior al que se puede sentir cuando se utiliza la mano humana.

Una ventaja más de este sistema es que con él se es ambidextro. (3) El *set up* o colocación de los brazos del robot dura 15 minutos. El intercambio de un instrumento por otro puede hacerse por medio de un cirujano ayudante, vestido y lavado tradicionalmente al lado del paciente, en cuestión de segundos. Este profesional está preparado para convertir la operación si fuera necesario.

En resumen, el sistema consiste en una consola maestra, un carro de brazos quirúrgico o robot, instrumentos o manos adecuadas, un endoscopio de alta resolución 3D (presenta una cámara para cada ojo y puntas de 0° y 30° para diversos usos) y magnificación de 25X y un equipamiento de procesamiento de imágenes (iluminadores, unidades de control de color y contraste, controlador de foco y de imagen).

El sistema Zeus®, de Computer Motion, La Goleta, California, también es un telemanipulador amo-esclavo. La mayor diferencia es que el sistema Da Vinci® está instalado sobre un carro, mientras que los manipuladores del Zeus® son unidades modulares que pueden montarse libremente en la mesa de operaciones, de menor tamaño global. El cirujano también trabaja frente a una consola y usa dos mangos maestros que remedan un portaagujas de Castroviejo en el primer modelo y un *mouse* de computadora en el actual. Los manipuladores son brazos del AESOP modificados, dos de los cuales se usan para guiar los instrumentos, mientras que un AESOP se emplea para la cámara. La imagen se exhibe en un monitor de video. Dado que la lente es única, se necesitan anteojos polarizantes para generar una vista de 3D. El sistema también provee *motion scaling* de 2:1 a 10:1 y un filtro para temblor. Los efectores finales tienen 4 grados de libertad en el primer modelo (sin muñeca) y actualmente tienen agregado uno más.

Estudios experimentales

Comenzaron en California (1996) con modelos de tubos y luego en cadáveres. En 1998 Falk hace los pri-

meros estudios con el sistema Da Vinci® (7) mediante un estudio comparativo en corazones de cerdo aislados colocados dentro de un modelo "fantasma". Se establecieron dos grupos: grupo I, con el sistema Intuitive, y grupo II, con técnica convencional manual. Se suturó la circunfleja a la DA.

En la evaluación angiográfica a doble ciego, las anastomosis no presentaban estenosis y en el estudio anatomopatológico, también ciego, todas estaban intactas.

Estudios en el cadáver

Estos estudios se hicieron para lograr un ajuste del *set up* de las ubicaciones de los *ports* y practicar la preparación de la mamaria, su manejo y las anastomosis. La técnica de extracción de la mamaria debe considerar el uso de CO₂ para separar el pericardio de la mamaria, ya que el ángulo entre ambos es muy agudo.

Experiencia clínica en cirugía coronaria endoscópica en Leipzig

Con el objeto de minimizar el riesgo para los pacientes, la mayoría de los centros comenzaron su programa usando el robot sólo para una parte del procedimiento. El Comité de Ética de la Universidad de Leipzig consideró importante no superponer la posibilidad de errores por el uso de la nueva tecnología.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se conformaron tres grupos (Tabla 1):

Grupo I (esternotomía): la anastomosis se hizo con el robot, a corazón parado cardiopléjicamente (CEC convencional). Un cirujano controló la confección de la sutura al lado del paciente.

Grupo II (MIDCAB): extracción mamaria por robot, la anastomosis se hizo a corazón latiendo con la técnica de MIDCAB clásico.

Grupo III (TECAB): 27 casos totalmente endoscópicos a corazón parado con el sistema Heartport, ya descrito, (8) y posteriormente 8 casos a corazón latiendo con el estabilizador Endowrist®.

Técnica de la cirugía a corazón latiendo (TECAB-BH)

Se coloca al paciente en posición supina, con el lado izquierdo del tórax levantado 30° y el brazo izquierdo

Tabla 1
Conformación de los grupos

Grupo	Abordaje	Nº de casos	Extracción de mamaria	Confección de anastomosis
I	Esternotomía	15	Manual	Robot
II	MIDCAB	81	Robot	Manual
III	TECAB	27	Robot	Robot
	TECAB-BH	8	Robot	Robot

descendido. Después de desinsuflar el pulmón izquierdo, se inserta un endoscopio de 30° en el cuarto espacio intercostal izquierdo (EII), línea axilar anterior. Se usa insuflación continua de CO₂.

Los *ports* se colocan en el tercero y el sexto EII sobre la línea axilar anterior. Se libera la mamaria como pedículo, al igual que para los grupos II y III (TECAB) desde la primera costilla hasta el sexto EII mediante electrobisturí con baja energía. Luego de abrir el pericardio y heparinizar, se ocluye la mamaria con un *bulldog* y queda aún *in situ* cuando se prepara para la anastomosis. El campo exangüe en la coronaria se consigue por medio de puntos con siliconas adaptados al estabilizador Endowrist® de Intuitive introducido por un cuarto *port* en una posición subxifoidea. (5, 9)

Resultados clínicos

Los resultados clínicos de cada grupo se muestran en la Tabla 2.

DISCUSIÓN

El grupo I (esternotomía) representa la demostración de que la anastomosis LIMA-DA es posible con el robot con seguridad. Todas las anastomosis fueron permeables. El tiempo de anastomosis es similar al logrado con el "fantasma"; no hay colisión de instrumentos.

El grupo II (MIDCAB) muestra la curva de aprendizaje favorable para la preparación robótica de la mamaria, aceptando ya que el MIDCAB está estandarizado. Hubo un paciente fallecido luego de endarterectomía coronaria a corazón latiendo, donde hemos decidido evitarla a causa de los problemas que conlleva. La extracción robótica de la mamaria y MIDCAB posterior es una operación realmente atraumática al permitir disminuir el tamaño de la minitoracotomía y adecuarla a la anastomosis más que a la extracción de la mamaria. Con esta técnica la permeabilidad es del 96,3%, similar a la de las series del MIDCAB en grandes centros.

El grupo III (TECAB), a pesar de que muestra una tendencia clara hacia procedimientos más cortos, con su tiempo general de 3,5 a 8 horas excede el requeri-

do para un MIDCAB estándar y permanece en experimentación clínica por su curva de aprendizaje sustancial. (4)

El grupo III-TECAB-BH continúa en plena fase de experimentación clínica y debe esperar nuevos adelantos en la tecnología robótica (mejor *feedback* táctil o desarrollo del Doppler endoscópico (10) para definir lugar de arteriotomía, mejores estabilizadores endoscópicos, suturas por clips coalescentes o por acople magnético (ISMICS 2001), todos en fase de experimentación.

CONCLUSIÓN

1. En términos de acceso quirúrgico, el TECAB es el procedimiento menos invasivo en cirugía coronaria, menos que el MIDCAB y que la cirugía convencional.

2. En el TECAB-Heartport, a pesar de que el trauma quirúrgico está reducido, en el TECAB todavía son necesarios el uso de la CEC y el paro cardiopléjico. Teniendo en cuenta los efectos colaterales de la CEC y a la luz del éxito del MIDCAB, el beneficio del TECAB hoy es evidente solamente desde los puntos de vista estético y de reducción del dolor, dado que los tiempos operatorios y de CEC son muy elevados. Ésta es la razón por la cual se está focalizando la operación a corazón latiendo o TECAB-BH. (9)

3. El TECAB-BH será beneficioso en el futuro, al eliminar el trauma quirúrgico, los efectos de la CEC y acortar el tiempo operatorio al no ser necesarias las canulaciones, el enfriamiento, la reperfusión y el recalentamiento que se requieren. Aún permanece en fase clínica experimental.

El futuro del futuro: el futuro es excitante ...

1. Telecirugía: un cirujano podrá operar en un hospital remoto a aquel en el que yace el paciente con el cirujano asistente. Ya está en marcha el sistema Sócrates® (*telementoring*) de Computer Motion para ayuda docente.

2. A causa de que los movimientos manuales del cirujano son convertidos en señales electrónicas por el *input device* de la consola, el paciente no necesita estar en la misma sala de operaciones ni ciudad que el cirujano, para ser operado.

Tabla 2
Resultados clínicos

Grupo	Nº casos	Conversión/reoperación	Angiografía: permeabilidad	Tiempo de robot	Mortalidad
I (esternotomía)	15	No	100%	16-37 min	1
II (MIDCAB)	81	2 por lesión de LIMA 1 reoperación por oclusión	96,3%	25-40 min	1
III (TECAB)	27	5/27 (18,5%)	100%	15-40 min	0
III TECAB-BH	8	6/8 (75%)	62,5%	24-49 min	1

La telecirugía tiene limitaciones causadas por el retraso, latencia o *lag*, que es el tiempo que se requiere para que la señal inicial pueda viajar desde el *input device* hasta la punta del instrumento. La *performance* humana puede compensar este retraso hasta 200 milisegs, pero retrasos mayores terminan en un posicionamiento inadecuado del instrumento o en inestabilidad del sistema (causada por conflicto en las señales de *output-input*). A causa de que las señales no pueden viajar más rápidamente que la luz, la distancia calculada para telecirugía con una latencia menor de 200 miliseg es de 320 km por cables terrestres y 80 km para transmisión sin cable. De este modo, las transmisiones satelitales hoy en día son imposibles por la localización lejana en el espacio de los satélites convencionales. Una medición por Rovetta mencionada por Richard Satava fue de 1,5 miliseg.

La telecirugía realizada por Jacques Marescaux entre Nueva York y Estrasburgo el 7 de septiembre de 2001 se transmitió por fibra óptica (vía cable submarino muy moderno, con fibras de vidrio) por Telecom de Francia, para lo cual se empleó tecnología llamada ATM o *asynchronous transfer model*, que aseguró un débito de 10 megabits por segundo. De esta manera el tiempo de transmisión de los movimientos se redujo a 150 milisegundos, aceptable para una colecistectomía. Esta solución es por el momento mucho mejor que la comunicación vía satélite, que ofrece un tiempo de latencia para los movimientos de 600 milisegundos. Los norteamericanos que utilizan la comunicación vía satélite consideran que la telecirugía de guerra o de catástrofe podría realizarse vía satélite, accesible en cualquier parte del mundo.

3. También existe la posibilidad de unir dos consolas con un concepto del tipo "escuela de manejo", para entrenamiento quirúrgico.

4. Nuevos grados de libertad en los instrumentos, con el agregado de un "codo" a la muñeca.

5. Registración y segmentación: sería posible programar partes del procedimiento basado en un modelo espacial del paciente registrado geométricamente a partir de datos obtenidos por TAC, RMN, angiografía y eco 3D, de modo que se pueda optimizar la colocación de los *ports* y minimizar el riesgo de colisión entre instrumentos y de éstos con el paciente. En el *Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique* de Francia (11) se está investigando un sistema que incluye la reconstrucción tridimensional de las coronariografías fusionado con la imagen videoscópica intraoperatoria.

6. El concepto de inmovilización virtual para eliminar los efectos del movimiento cardíaco también es atrayente. Moviendo la cámara y los instrumentos sincrónicamente con las excursiones del corazón, se puede crear una imagen de inmovilidad virtual, de modo que el cirujano trabajaría con una imagen detenida mientras que en realidad la coronaria sí se mueve. (11)

SUMMARY

Computer-aided minimally invasive coronary surgery (robotics)

The essential component of surgical robots is the manipulation arm, typically equipped with several electrical or hydraulically driver actuators, so as to move a series of joints or articulations. Currently available robots for cardiac surgery are termed "on line" machines, meaning the human operator must be in permanent control of the system through a man-machine interface. The underlying concepts is to enhance human ability to perform small scale (sub-millimeter) manipulative tasks requiring human judgment and perception through the smooth action and precise positional control of a computerized robot. Since the surgeon's hand movements are transformed into electronic impulses by the system's input device, it is unnecessary for the patient and the operator to be in the same room, facility, city or even the same continent. This technique is known as tele or cyber surgery. Virtual immobilization is an attractive new concept, aimed at the apparent elimination of cardiac activity. Perfect synchronization between the motion of the robotic camera and instruments and the heart allows the operator to work as if on a stationary environment.

Key words: Robotics - Coronary bypass - Minimally invasive coronary surgery

BIBLIOGRAFÍA

1. Carpentier A, Loulmet D, Aupecle B, Berrebi A, Relland J. Computer assisted cardiac surgery. *Lancet* 1999;352:37.
2. Emam TA, Hanna GB, Kimber C, Dunkley P, Cuschieri A. Effect of intracorporeal-extracorporeal instrument length ratio on endoscopic task performance and surgeon movements. *Arch Surg* 2000;135:62-5.
3. Falk V, McLoughlin J, Guthart G, Salisbury JK, Walther T, Gummert J, et al. Dexterity enhancement in endoscopic surgery by a computer controlled mechanical wrist. *Min Invas Ther & Allied Technol* 1999;8:235-42.
4. Falk V, Walther T, Autschbach R, Diegeler A, Battelini R, Mohr FW. Robot-assisted minimally invasive solo mitral valve operation. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1998;115:470-1.
5. Falk V, Diegeler A, Walther T, Autschbach R, Mohr FW. Developments in robotic cardiac surgery. *Curr Opin Cardiol* 2000;15:378-87.
6. Mohr FW, Falk V, Diegeler A, Autschbach R. Computer-enhanced coronary artery bypass surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1999;117:1212-4.
7. Falk V, Gummert JF, Walther T, Hayase M, Berry GJ, Mohr FW. Quality of computer enhanced totally endoscopic coronary bypass graft anastomosis-comparison to conventional technique. *Eur J Cardiothorac Surg* 1999;15:260-5.
8. Mohr FW, Falk V, Diegeler A, Walther T, van Son JA, Autschbach R. Minimally invasive port-access mitral valve surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1998;115:567-74.
9. Mohr FW, Falk V, Diegeler A, Walther T, Gummert JF, Bucerius, et al. Computer-enhanced "robotic" cardiac surgery: experience in 148 patients. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2001;121:842-53.
10. Falk V, Fann JI, Grünenfelder J, Burdon T. Endoscopic Doppler for detecting vessels in closed chest bypass grafting. *The Heart Surgery Forum* #2000-93443.html
11. Falk V, Diegeler A, Walther A, Löscher N, Vogel B, Ulmann Ch, et al. Endoscopic coronary artery bypass grafting on the beating heart using a Computer Enhanced Telemanipulation System. *The Heart Surgery Forum* #1999-85922.html