

Hält die Roboterchirurgie, was sie verspricht?

François Pugin, Pascal Bucher, Nicolas Buchs, Francesco Volonté, Monika Hagen, Philippe Morel

Service de Chirurgie Viscérale, Département de Chirurgie, HUG, Genève

Quintessenz

- Die Roboterchirurgie erlebt derzeit einen grossen Aufschwung. Die Zwischenschaltung eines elektromechanischen Interface zwischen Patient und Chirurg ist eine wichtige Neuerung. Als logische Weiterentwicklung der minimalinvasiven Chirurgie hält sie Lösungen für die der Laparoskopie eigenen Einschränkungen bereit.
- Die Roboter-assistierte Chirurgie gehört mittlerweile zum Rüstzeug sämtlicher chirurgischer Disziplinen. Indikationen bilden komplexe Eingriffe mit technisch schwierigen Rekonstruktionen.
- Neuentwicklungen in diesem dynamischen Gebiet, wie die neue Plattform für Laparo Endoscopic Single Site Surgery, zeigen, wie wichtig technische Innovationen für die weitere Entwicklung der minimalinvasiven Chirurgie sind.
- Dank dem Roboter-Interface eröffnen sich für zahlreiche Anwendungsgebiete neue Perspektiven, zum Beispiel die Nutzung der Virtual Reality für die chirurgische Ausbildung und Planung von Eingriffen oder die Bildung einer Augmented Reality durch Integration verschiedener (radiologischer, anatomischer, chirurgischer) Daten während des Eingriffs.

Einleitung

Mit den Arbeiten von Kelling (1901) und Jacobeus (1911), die bereits die grundlegenden Prinzipien definiert haben, reicht die Geschichte der endoskopischen Chirurgie bis an den Anfang des letzten Jahrhunderts zurück. Es sollte dann bis 1969 dauern, bis sich mit dem Erscheinen des CCD (Charge-coupled Device oder ladungsgekoppelten Bauteils) die minimal-invasive Chirurgie richtig entwickeln konnte. Dank diesen an das Endoskop gekoppelten Sensoren wird sichtbares Licht in ein analoges Signal umgewandelt, das verstärkt, digitalisiert und bearbeitet werden kann, so dass ein digitales, auf dem Bildschirm sichtbares Bild entsteht. In der Folge sollte sich im Laufe der 1970er Jahre die video-laparoskopische Chirurgie im Bereich der gynäkologischen Chirurgie rasch verbreiten, Ende der 1980er Jahre dann, nach den durch Eric Mühe 1985 und Philippe Mouret 1987 durchgeführten Cholezystektomien, auch in der Chirurgie der Verdauungsorgane. Heute erweitert sich das Spektrum der laparoskopischen Eingriffe ständig, und die Vorteile gegenüber der offenen Chirurgie bezüglich Hospitalisationsdauer, parietaler Komplikationen, postoperativer Schmerzen, kosmetischer Resultate und rascherer Rückkehr zur gewohnten Tätigkeit sind eindeutig nachgewiesen. Allerdings braucht es eine spe-

zielle Ausbildung, um sich die für diese Technik und deren Grenzen nötigen Kompetenzen anzueignen. Der Chirurg hat die Kontrolle über die Sicht auf das Operationsfeld nicht mehr selbst in der Hand, das Bild erscheint zweidimensional (2-D) auf dem Bildschirm, die Sicht der Tiefendimension fehlt. Überdies weisen die verwendeten Instrumente nur vier Freiheitsgrade auf, der Eintrittspunkt ist fix. Dadurch entsteht ein Hebeleffekt, der die Bewegungsamplitude verstärkt, was die Präzision der Bewegungen des Operateurs vermindert und den physiologischen Tremor verstärkt. Somit hat die laparoskopische Methode ihre spezifischen Grenzen. Durch die Zwischenschaltung eines (informatisierten und elektromechanischen) Interface werden sowohl Bewegung des Chirurgen wie Bild digitalisiert und dann bearbeitet und optimiert. Ziel dieser Übersicht ist es zu zeigen, wie die Roboterchirurgie zur Überwindung der der laparoskopischen Chirurgie eigenen Grenzen beitragen kann, und deren Resultate zu analysieren.

Definition

Der tschechische Ausdruck *Robota* wurde 1921 durch den Schriftsteller Karel Čapek eingeführt. Er bedeutet «Zwangsarbeit, Fronarbeit» und hat sich später zum Ausdruck Roboter im heutigen Sinn entwickelt. Ein Roboter lässt sich heute als technologisches System definieren, das in der Lage ist, spezifische Aufgaben anhand eines fixen oder modifizierbaren Programms automatisch auszuführen. Die heute in der Chirurgie verwendeten Robotersysteme sind streng genommen keine Roboter, sondern Systeme zur Manipulation von Instrumenten. Systeme, mit denen Manipulationen aus der Ferne ausgeführt werden können, nennt man Telemanipulatoren. Es handelt sich um ein «Master-Slave»- oder «Meister-Sklaven»-System, das nicht Aufgaben automatisch ausführt, sondern einfach den gesprochenen oder manuellen Befehlen des Chirurgen gehorcht.

Geschichtliches

Roboter fanden vor mehr als zwanzig Jahren Eingang in die Chirurgie, zuerst in den Fachgebieten, die in einem anatomisch stabilen Umfeld arbeiten, wie der Neurochirurgie oder Orthopädie.

In der Viszeralchirurgie war das wegen der Beweglichkeit der Organe schwieriger. In der weiteren, speziell auch von der amerikanischen Armee geförderten Entwicklung entstanden dann aber Systeme, mit denen chirur-



François Pugin

Dr. M. Hagen hat finanzielle Verbindungen mit «Intuitive Surgical». Die anderen Autoren haben keine finanziellen oder persönlichen Verbindungen im Zusammenhang mit diesem Beitrag deklariert.

gische Eingriffe aus der Ferne durchgeführt werden konnten (Telechirurgie), und so entstanden verschiedene für Fernbedienung geeignete Robotersysteme, darunter

Der tschechische Ausdruck *Robot* bedeutet «Zwangsarbeit, Fronarbeit»

das DaVinci®-System (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA). Bis heute wurden 1840 Roboter dieses Typs installiert, 1344 davon in den USA

und 330 in Europa. In der Schweiz sind derzeit 15 Systeme in Betrieb.

Der Roboter DaVinci®

Das Robotersystem DaVinci® setzt sich aus drei Elementen zusammen:

- der Konsole für den Chirurgen,
- einem Patientenwagen mit Armen, die über Gelenke verfügen, dem eigentlichen Roboter,
- einem bildgebenden System, ähnlich demjenigen bei der Laparoskopie.

Der Patientenwagen besteht aus Armen, die Kamera und Instrumente tragen (Endowrist®). Sie haben aussen Gelenke, können die Bewegungen des Handgelenks nachmachen und verfügen über sieben Freiheitsgrade.

Die Chirurgenkonsole verfügt über ein binokulares stereoskopisches bildgebendes System, das die endoskopischen Bilder aus zwei Kameras überträgt. Die beiden Kameras übertragen je ein Bild an eines der beiden Augen, wodurch ein dreidimensionales Bild des Operationsfelds entsteht.

Zwei Griffe oder Hebel übertragen die Handbewegungen des Chirurgen, mit denen dieser die Instrumente und die Optik steuert. Dazu gehören ein System zur Umersetzung der Bewegungen von 1:1 zu 5:1 sowie ein Filtersystem, das den physiologischen Tremor unterdrückt. Mittels Pedal können die Koagulation und die Führung von Kamera und Instrumenten gesteuert werden.

Das Darstellungssystem besteht aus einer Einblasvorrichtung, einer Lichtquelle und einer Doppelkamera mit Bildschirm.

Zusammengefasst bietet diese Roboter-Plattform gegenüber der konventionellen Laparoskopie zahlreiche Vorteile: Verbesserung der Geschicklichkeit und Bewegungspräzision des Operateurs dank Instrumenten mit sieben Freiheitsgraden, Unterdrückung des physiologischen Tremors und Umersetzung der Bewegungen sowie eine durch den Operateur steuerbare dreidimensionale stabile Sicht auf das Operationsfeld.

Klinische Anwendung

Rund zehn Jahre nach der Zulassung des DaVinci®-Systems (DV) für die Viszeralchirurgie durch die FDA hat man praktisch sämtliche derartigen Eingriffe, von der Nierentransplantation über die Entfernung von Duodenum und Pankreaskopf bis zur Entnahme von Lebertransplantaten beim lebenden Spender, schon damit durchgeführt. Wegen der hohen Kosten lohnen sich zwar einfache oder mittelschwere Eingriffe mit dem DV-Robo-

tersystem kaum, da diese hier verglichen mit konventioneller Laparoskopie keine Vorteile bringen; sie bieten allerdings eine ausgezeichnete Gelegenheit zum Erlernen der Roboter-assistierten Chirurgie [1]. Das Hauptanwendungsgebiet der Roboter-assistierten Chirurgie stellen Eingriffe dar, bei denen die konventionelle Laparoskopie an ihre Grenzen stösst (Ösophagektomien, Gastrektomien, Rektumexstirpation, Hepatektomie, Pankreatektomien). In der bariatrischen Chirurgie kann die postoperative Morbidität beim Magenbypass dank der Roboter-Assistenz im Vergleich zur Laparoskopie signifikant gesenkt werden (Häufigkeit von Lecks und Anastomosenstenosen).

Heute werden in den USA 80% der Prostatektomien wegen Krebs mit Roboterunterstützung durchgeführt. Dieser Anteil, in Europa sicher geringer, steigt nach wie vor Jahr für Jahr an. Viele Urologen sind von der offenen radikalen Prostatektomie zur Roboter-assistierten Prostatektomie übergegangen. Dies ist ein Beispiel, wie diese Technik zur Entwicklung und Weiterverbreitung minimalinvasiver Operationsmethoden beiträgt. In der Gynäkologie nimmt seit einigen Jahren die Anwendung des DV-Robotersystems sehr stark zu, z.B. für Hysterektomien und Myomektomien. Neuerdings wird das DV-Robotersystem auch in der ORL-Chirurgie für den transoralen Zugang bei verschiedenen Eingriffen wie Pharynx- und Larynxkarzinomen verwendet. Auch in der Kinderchirurgie wird das DV-System mit kleineren Instrumenten verwendet. Auch Eingriffe mit komplexen Rekonstruktionen im hepatobiliären Trakt oder in den Harnwegen sind damit möglich.

Kosten

Die Verwendung des DV-Robotersystems ist kostspielig, dies wegen der hohen Anschaffungskosten (etwa 1 800 000 CHF), aber auch wegen des hohen Aufwands für den Unterhalt (etwa 120 000 CHF/Jahr) und der speziellen Instrumentenausrüstung (etwa 200 bis 300 CHF/Instrumentenanwendung). Auch die längere Belegung des Operationssaals, z.T. wegen verlängerter Vorbereitungs-

In den USA werden 80% der Prostatektomien wegen Krebs mit Roboterunterstützung durchgeführt

dauer («setup») und Anschluss des Roboters («docking») verursacht ebenfalls Mehrkosten. Mit einem guteingespielten Team lässt sich dieser Zeitaufwand in

Grenzen halten. Wir konnten dank unserer Erfahrung zeigen, dass bei Magenbypass-Operationen trotz dieser Mehrkosten aufgrund der verminderten Morbidität nach Roboter-assistierten Eingriffen die gesamten Hospitalisationskosten am Schluss vergleichsweise günstig ausfielen [2].

Erlernen der Technik

Unbestrittenermassen muss die Roboter-assistierte Technik zusätzlich erlernt werden. Dies geschieht am besten in einem Team, das sämtliche Akteure im Operationssaal

umfasst. Dank diversen Simulationsprogrammen für Roboter-assistierte Chirurgie kann der Chirurg sich mit der Technik (Handhabung der Chirurgenkonsole) vertraut machen. Für Instrumentier-Fachpersonen und Chirurgen werden von den Referenzzentren spezielle Kurse angeboten; für die Referenzzentren gehört die Ausbildung angesichts der noch geringen Zahl verfügbarer Systeme zu den vorrangigen Aufgaben. Der Lernprozess für einen konkreten Eingriff kann durch die Zuschaltung einer zweiten Konsole vereinfacht werden. So können zwei Chirurgen als «Duo» operieren, der Anfänger wird von seinem Mentor beim Eingriff begleitet, was das Lernen vereinfacht und erhöhte Sicherheit gewährleistet.

Single Site Surgery (LESS)

Bei der neuesten Version des DV-Robotersystems lässt sich eine Plattform für Single Site Surgery integrieren. Bei dieser seit einigen Jahren immer beliebteren Methode bestehen allerdings zahlreiche Einschränkungen vor allem im Hinblick auf die Instrumentierung. Die halbsteifen Instrumente werden durch gebogene Kanülen (Abb. 1 ) , die sich bei der einzigen, meist beim Bauchnabel angebrachten Öffnung treffen, eingeführt. So lassen sich Kollisionen zwischen den verschiedenen Roboterarmen vermeiden [3], und der Chirurg verfügt weiterhin über die Geschicklichkeit, die er von der konventionellen Laparoskopie her gewohnt ist. Bei unseren ersten Erfahrungen haben wir in einem unselektionierten Patientenkollektiv festgestellt, dass dank diesem System die Cholezystektomie durch LESS vereinfacht wird, speziell bei adipösen Patienten. Zweifellos werden diese technischen Entwicklungen dazu beitragen, in naher Zukunft Indikation und Verbreitung der Single Site Surgery auszuweiten.

Ausblick

Bildgebende Verfahren entwickeln sich in der Medizin ständig weiter. Sie sind nicht mehr nur Domäne des Radiologen. Dank Osirix, einer teilweise in unserer Klinik entwickelten «Open-source»-Software, können Anfänger radiologische Untersuchungen einfach visualisieren und bearbeiten und Bilder in verschiedenen Dimensionen rekonstruieren. So können Eingriffe einfach geplant und die kritischen Phasen anhand eines virtuellen Modells (virtual reality) durchgespielt werden. Mit dem Computer-Interface eines chirurgischen Robotersystems können überdies dem Gesichtsfeld des Chirurgen dreidimensionale anatomische Bilder aus einem CT-Scan superponiert werden (augmented reality). Durch Kombination dieser beiden Verfahren schliesslich, von virtual reality (präoperativer Planung) und augmented reality (Superposition von in Echtzeit aktualisierten anatomischen Bildern) und Einspeisen in ein Robotersystem wird eine Automatisierung gewisser chirurgischer Aufgaben vorstellbar.

Zusammenfassend darf man festhalten, dass das DV-Robotersystem seine Versprechen bezüglich Machbarkeit und Sicherheit weitgehend eingehalten hat. Es stellt einen logischen und natürlichen Schritt in der Entwicklung der minimalinvasiven Chirurgie dar, denn es hält Lösungen für deren Probleme bereit. Sein Indikationspektrum wächst in allen chirurgischen Disziplinen ständig. In einigen Bereichen setzt es sich allerdings weniger rasch durch, vor allem wegen der hohen Kosten und gewisser technischer Grenzen. Diesbezüglich sei auf das Fehlen einer Rückmeldung bezüglich Krafteinwirkung auf die Instrumente, das Fehlen mechanischer Klammergeräte und Überlastung des Roboters hingewiesen. Dies erklärt vermutlich den zurückhaltenden Einsatz der Roboterchirurgie in der Kolorektalchirurgie. In naher Zukunft dürften randomisierte Studien inkl. ökonomischer Analyse eine bessere Beurteilung und klarere Definition der Indikationen zur Roboterchirurgie ermöglichen.

Korrespondenz :

Dr. med. François Pugin
Chirurgie Viscérale
Département de Chirurgie
Hôpitaux Universitaires de Genève
4, rue Gabrielle-Perret-Gentille
CH-1211 Genève 14
[francois.pugin\[at\]hcuge.ch](mailto:francois.pugin[at]hcuge.ch)

Literatur

- Herron DM, Marohn M. SAGES-MIRA RoboticSurgery Consensus Group. A consensus document on roboticsurgery. *SurgEndosc.* 2008; 22(2):313–25.
- Hagen ME, Pugin F, Chassot G, Huber O, Buchs N, Iranmanesh P, et al. Reducingcost of surgery by avoidingcomplications: the model of roboticroux-en-ygastrichypass. *ObesSurg.* 2011 May 3. [Epubahead of print]
- Haber GP, White MA, Autorino R, Escobar PF, Kroh MD, Chalikhonda S, et al. Novelrobotic da Vinci instruments for laparoendoscopic single-site surgery. *Urology.* 2010;76(6):1279–82.

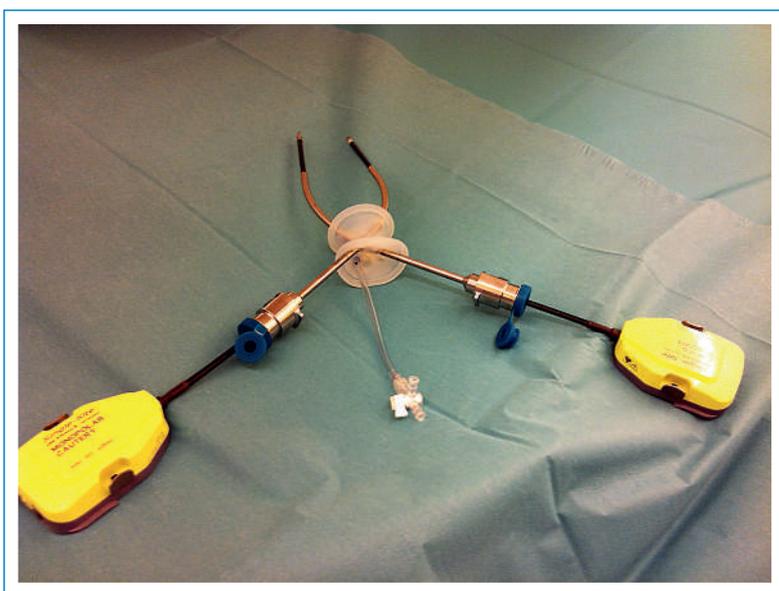


Abbildung 1
Instrumentenset für Single-Site-Chirurgie.

CME www.smf-cme.ch

1. Welche der folgenden Aussagen über das DaVinci®-System trifft *nicht* zu?

- A Es handelt sich um einen chirurgischen Roboter, der gewisse Aufgaben automatisch ausführt.
- B Es verfügt über ein dreidimensionales optisches System.
- C Es verwendet Instrumente mit 7 Freiheitsgraden.
- D Mehrheitlich wird es durch Urologen angewendet.
- E Es ermöglicht das Operieren aus der Ferne (Telechirurgie).

2. Welche der folgenden Aussagen über die Roboter-assistierte Single-Site-Chirurgie trifft *nicht* zu?

- A Sie verbessert Ergonomie und Geschicklichkeit.
- B Dadurch können die Indikationen für die Single-Site-Chirurgie weiter gestellt werden.
- C Sie ist nun weitverbreitet.
- D Als Zugang zum Abdomen wird in erster Linie der Nabel verwendet.
- E Diese chirurgische Methode befindet sich im Aufwind.