



# 手術支援ロボットが 外科手術を変える！

21世紀は「ロボットの時代」といわれ、医療、介護、福祉分野でもロボット工学の応用に対する期待が高まっている。中でも、患者にとって、医療分野でのロボット進出には無関心ではられない。それは、患者にとって、何を意味するのか。いま、百花繚乱ともいえるほどの研究開発が行われている＜手術支援ロボット＞の現状を紹介し、その可能性と外科手術の将来像を探ってみた。

写真：手術支援ロボット「ダヴィンチ」を使用した手術

## ● 低侵襲手術普及で手術支援ロボットのニーズが高まる

直径8mmほどのロボットアームの先に取りつけられた極小の電気メスや鉗子、そして内視鏡が、腹部に開けられた約1cmほどの小さな穴から体内に静かに入り込んでいく。外科医は手術台から離れた操作ボックスに座り、内視鏡の3次元画像を見ながらロボットアームを操作する。その手の動きは縮小されてロボットアームの先端に正確に伝わり、まるで人間の手にかかったように電気メスが患部を切り取り、続いて縫合用の針を持った鉗子が伸びてきて、スッ、スッと患部を縫い合わせていく。

これは未来の手術を描いたものではなく、すでに臨床使用されている「ダヴィンチ」という手術支援ロボットによる手術風景である。

外科医の限界をカバーする＜新しい

手＞として、その必要性が説かれてきた手術支援ロボットは、近年の手術法の変化によって開発に拍車がかかり、実用化の段階までできている。

手術法の変化とは、切開創を小さくするなどして、患者の負担を減らす「低侵襲手術」の普及をさす。低侵襲手術は入院期間を短縮して患者の早期社会復帰を可能にし、結果的に医療費軽減につながる。低侵襲手術の代表格が開腹せずに小さな穴を開け、そこから内視鏡と鉗子を体内に挿入し、内視鏡の画面を見ながら体外から鉗子を操作する「内視鏡下手術」である。

しかし、この手術法は非常に狭い作業空間しか取れず、患部を縫うなどの微細な作業が困難となる。さらに、内視鏡の操作を助手にゆだねるため、術者は自分が望む手術視野を常に確保できるとは限らない。そうした外科医の負担とストレスを軽減

するために、手術支援ロボットの必要性が高まったのである。

## ● 「手術支援ロボット」とは何か

ここで、「手術支援ロボットとは何か」を説明しておかねばならない。わが国の手術支援ロボット開発をリードしてきた東京大学大学院情報理工学系研究科の土肥健純教授によれば、次の2種類に大きく分けられるという。

一つ目は、患部に到達するためのナビゲーション用である。従来の切開に比べてはるかに小さな切開で患部に到達したり、外科医自身の手では直接到達できない患部にも安全確実に到達する機能が要求される。

二つ目は、患部において治療作業を行う処置用である。切開、切除、剥離、縫合などの処置を外科医の思い通りに遂行す

る機能が要求される。

いずれも外科医の新しい手となり、低侵襲手術を遂行する手術支援ロボットである。日本が世界に誇る技術としてロボット分野が挙げられるが、「医療分野に我々ロボット工学の研究者が入ったのは1980年代後半から」(土肥教授)というから、意外にも最近のことなのである。

## ● 術者の手指の動きに近づいた「ダビンチ」

患者に直接触れる手術支援ロボットの最重要課題はなんといっても安全性であろう。医師の操作ミスを防ぐために最大速度を十分に低く設定し、万が一、誤作動したとしても、患者に危害が及ばないように軽量化を図り、発生する力を必要最小限にとどめることも必要となる。従来の工業用ロボットに求められてきた高速・高剛性・高精度とはまったく違う設計方針のものでなければならない。

ところが、初期の頃に登場した外国製の手術支援ロボットには、工業用ロボットを応用したものが多かったのである。たとえば、1988年、世界初の手術支援ロボットの臨床使用に用いられた米国製の「ピューマ(Puma)」もその一例である。このロボットは脳外科手術で穿刺(針刺し)を行ったが、機能的に当時の工業用ロボットと同等のレベルのものであり、手術支援ロボットに要求される安全性の課題があり、すぐに姿を消している。

理想的な手術支援ロボットは、ロボットアームの先端が術者の縮小された手の如く、術者の手の動きとまったく同じに反応する、というものであろう。1999年に製品化された「ダビンチ(da Vinci)」(米国Intuitive Surgical社)は鉗子先端部分に2



「ダビンチ」の先端部には2つの関節があり、人間の手指のような動きが可能となる。



最新鋭の手術支援ロボット「ダビンチ」。術者はコンソール(操作ボックス)に座り、高解度3次元画像により術野を観察できる。アーム・ユニットは内視鏡と鉗子を持つ3本のアームを持つ。

つの回転可能な関節を有し、人間の手や指に近い動きができる手術支援ロボットとして大きな話題となった。さらに、術者の手の動きを5対1まで縮小でき、高解像度の3次元画面で術野が観察できるという点でも評価が高い。

このダビンチはコントロール側(マスター)と患者に接するマニピュレータ側(スレーブ)とに分かれているマスター・スレーブ方式であり、内視鏡と鉗子を遠隔で操作し、血管縫合などの微細な作業も可能である。ヨーロッパでは、心臓の冠動脈バイパス手術といった難易度の高い手術にも使用されている。

## ● 日本における手術支援ロボットの現状と課題

これまで製品化された手術支援ロボットはすべて米国などの外国製である。この分野で日本が遅れているのかというと、そうではない。現在、日本では、各大学をはじめ、産業技術総合研究所(旧工業技術院)などの公的研究機関、日本学術振興協会の未来開拓学術研究推進事業などで、手術支援ロボット関連の研究開発が活発に行われている。欧米では外科医の処置と同じ動作をする手術支援ロボットの開発が多いのに対し、わが国では安全性

を重視し、ロボットでなければならない処置をめざした研究が主流となっている。

なぜ、日本の製品が出てこないのか。その最大の理由は「命に関わる機器」ということにある。「日本の技術力に問題はない。しかし、それを販売してくれる会社がなかなか出てこないのです。万が一、事故が起きたら信用問題になるという理由から、どうしても及び腰になる」(土肥教授)。

米国ではベンチャー企業がロボットを開発する力があるが、日本では技術力を持つ大手企業が参加しないと作れないという事情もある。土肥教授のグループが開発した腹腔鏡操作ロボット「ラパロナビ(Laparo Navi)」は、腹壁を貫通する腹腔鏡を腹壁部で保持するボールジョイントを採用し、どんなことがあっても絶対に腹壁や内臓を傷つけない、という安全性が認められ、日本の手術支援ロボットとして、初めて製品化することが決定した。

さらに、認可に長時間かかるといった問題もある。ちなみに、ラパロナビはマニピュレータとしてではなく、<内視鏡を支持する機器>として認可を受けたという。日本製の手術支援ロボットが製品化されるには、まだまだ環境整備不足といわざるを得ないだろう。

表1 臨床使用された主な手術支援ロボット

|      |            |      |     |           |
|------|------------|------|-----|-----------|
| 1988 | Puma200*   | 脳外科  | 米国  | 中止        |
| 1992 | TURP Robot | 泌尿器科 | 英国  | 中止        |
| 1993 | MINERVA*   | 脳外科  | スイス | 中止        |
| 1993 | ROBODOG*   | 整形外科 | 米国  | 市販        |
| 1993 | NeuroMate* | 脳外科  | 米国  | 市販        |
| 1995 | AESOP      | 腹部外科 | 米国  | 市販        |
| 1995 | EndoSista  | 腹部外科 | 米国  | 市販        |
| 1999 | LaparoNavi | 腹部外科 | 日本  | 2002年市販予定 |
| 1999 | da Vinci   | 腹部外科 | 米国  | 市販        |
| 1999 | Zeus       | 腹部外科 | 米国  | 市販        |

※:工業用ロボットの応用

## コラム 1

### 音声認識装置で動くゼウス(Zeus)



米国 Computer Motion社が内視鏡手術(鏡視下手術)に使用するために開発した手術支援ロボット「ゼウス」は、音声認識装置が付いているのが特徴のひとつ。内視鏡の移動、ズーム等の操作は外科医の言葉の指示でスムーズに行われる。ゼウスの価格は約80万ドル。米食品医薬品局(FDA)の認可も受け、多数の手術に用いられている。現在、日本では大阪大学、東北大学、医誠会病院、児島中央病院に導入された4台が稼働している。

表2 日本の主な医療用ロボットシステム研究機関

(コンピュータ外科学会ホームページより抜粋)

|                                 |                                                                  |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 慶應義塾大学医学部<br>形成外科               | 形成外科における手術シミュレーションや光硬化性樹脂のモデリング。                                 |
| 名古屋大学工学部<br>生体医用マイクロ工学講座(生田研究室) | 医用マイクロマシンや生体組織のバイオメカニクスなどの研究。                                    |
| 名古屋大学工学部<br>鳥脇研究室               | 画像処理、とりわけ三次元医用画像処理に関する研究。                                        |
| 産業技術総合研究所<br>人間福祉工学研究部門         | 手術ロボット、軟組織変形、医用画像工学、MRコンパチビリティ、手術ナビゲーション、医用ヒューマンインタフェースなどの研究。    |
| 大阪大学大学院医学系研究科<br>多元的画像解析分野      | 骨切り術支援システムや股関節3D計測など画像処理技術の医学応用に関する研究。                           |
| 東海大学開発工学科<br>情報通信工学科周藤研究室       | 医用画像処理・三次元表示の研究。                                                 |
| 東京電機大学理工学部生命工学科<br>先端治療工学研究室    | 超音波画像やX線CT、MRIの持つ形態情報・機能情報を利用したカテーテル誘導ロボットの研究開発。                 |
| 東京女子医科大学<br>脳神経センター脳神経外科        | 定位脳手術関連の各種研究(定位脳手術用マニピュレータ等)。Hi-Visionを用いた手術支援システムHivisCASなどの開発。 |
| 東京大学大学院工学系研究科<br>光石研究室          | 遠隔手術(テレ・マイクロ・サージェリー)システムを試作し、東京-岡山間の遠隔操作実験を行った。                  |
| 東京大学工学部<br>吉本・中村研究室             | 能動鉗子や手術支援ロボットなど、医療用ロボットに関する研究。                                   |
| 東京大学大学院新領域創成科学研究科<br>医用精密工学研究室  | 長年にわたって医用画像の三次元再構成・手術シミュレーション・術中ナビゲーション・手術支援ロボットなどを研究。           |
| 東京大学大学院情報理工学系研究科<br>先端治療福祉工学研究室 | 情報・機械技術と臨床医学を融合し治療を支援する「コンピュータ外科-Computer Aided Surgery」の研究。     |

通信システムを提供した。同社によると、通信速度は10Mbpsで、時間遅れはわずか0.2秒であり、ほとんど気付かない程度だったという。

日本では、1997年9月に東京大学大学院工学系研究科光石衛教授のグループが開発した手術支援ロボットを使って、東京大学に制御室を置き、約700km離れた岡山県を手術室とした遠隔手術実験を成功させている。この時は直径1mmの人工血管に太さ0.1mmの縫合糸を通す血管縫合実験を行った。また、新たに開発した多重曲率ガイドを用いたマニピュレータを用い、ラットの直径0.3mmの頸動脈に針を通すことも可能となっている。

なお、遠隔医療は対面診断を基本とする日本の医療法に抵触する恐れがある。しかし、社会の切実な要望と近年の医療技術の進歩により、それを促進する動きが出てきた。1998年に旧厚生省から各都道府県知事宛に情報通信機器を用いた診療(遠隔診療)についての通知が行われるなど、規制緩和に乗り出している。ただし、遠隔手術や遠隔手術指導は従来予想されなかった医療形態であり、その安全性には法的にも十分な対応が必要だろう。

## ● オープンMRIの登場

現在、外科領域で最も期待されているのが「MRI対応手術支援ロボット」である。MRI(magnetic resonance imaging; 磁気共鳴画像法)はX線CTが得意な軟組織の分別に優れ、脳腫瘍の位置なども極めて正確に把握することができる。

最近、「オープンMRI」と呼ばれる開放型のMRIが登場して、MRI観察下での手術が可能となった。MRIの持つ多彩な可



東京大学大学院情報理工学系研究科の土肥健純教授らのグループが開発した内視鏡(腹腔鏡)マニピュレータ「ラバロナビ」。安全性、洗浄、滅菌および操作性といった手術支援ロボットの重要な条件を満たしている。

## ● 医療格差をなくす 遠隔医療にも貢献

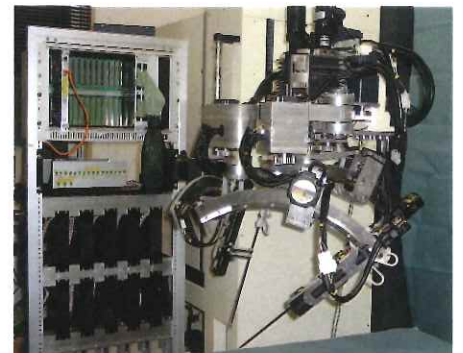
手術支援ロボットは遠隔医療の実現に向け、その可能性を大きく広げる存在になると期待されている。過疎地や離島では十分な医療体制が取れず、高度な診察や手術を受けるためには都会の病院で受診しなくてはならない。また、地方の病院に専門医がいるとは限らない。このような状況では、遠隔地にいる専門医が現地の医師にアドバイスを与えたり、ときには、遠隔地から実際に専門医が執刀することが望

まれる。

こうした遠隔手術の臨床例も報告され始めている。2001年9月にはニューヨークにいる外科チームが遠隔操作で、6千km以上も離れたフランスにいる患者の胆嚢摘出手術に成功した。この手術では「ゼウス」が使われ、フランス・テレコム社が非同期転送モード技術(※高速に情報通信を行う技術で、53バイトの固定長データ列=ATMセルを単位として情報をやり取りする)を用いてデータを伝送する大西洋横断

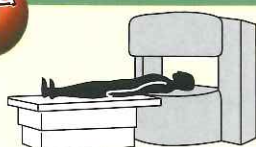


東京大学大学院工学系研究科・光石研究室が行った多次元ジョイスティックを用いた遠隔手術実験。

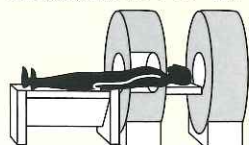


東京大学大学院工学系研究科・光石研究室が開発した内視鏡下低侵襲手術システム。鉗子にはセンサーが取り付けられ、触感が音としてフィードバックされる。

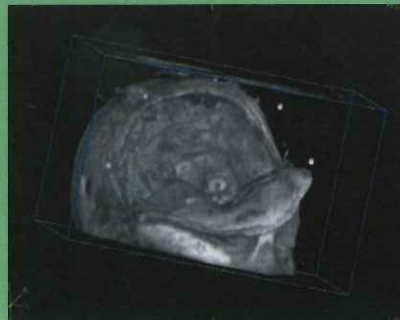
コラム  
2



垂直磁場型（ハンバーガー型）



水平磁場型（ダブルドーナツ型）



術中MRI画像情報による3次元再構築画像。

## 注目を浴びるオープンMRI

通常のMRI装置は巨大な円筒型磁石で患者を覆う格好となり、医師が手をつ込む余地もなかった。これに対して、オープンMRIと呼ばれる開口部の大きな磁石を持つMRIが最近登場し、注目を集めている。このオープンMRIには垂直磁場型（ハンバーガー型）と水平磁場型（ダブルドーナツ型）の2種類がある。開口部は40～55cm程度で、この幅を大きくすることは傾斜磁場の性能確保、磁場均一性の確保などの問題から、容易ではないといわれる。ダブルドーナツ型のほうが高価だが、自然な姿勢で患者にアクセスできるため、複雑な手術に適している。

視覚機能を活用しながら、手術支援ロボットによる手術が行えるようになれば、「極めて細かい作業が可能となり、腫瘍の取り残しがない手術が可能になります。腫瘍と神経が接しているような場合など、医師の手による手術では後遺症の危険が伴うような手術でも、成功率が格段に上がるでしょう」（東京女子医科大学脳神経センター脳神経外科 伊関 洋氏）

しかし、MRI環境下で手術を行う際に、避けて通れない問題がある。現在のMRI装置では、静磁場を生む磁石として永久磁石や超伝導磁石が使用され、静磁場強度0.2～1.5Teslaが一般的である。つまり、磁気環境対策が絶対条件なのである。

手術支援ロボットをMRI対応にすることは、①手術室内でロボットが安全上の問題を起こさないこと、②ロボットの存在、動作がMRI画像に影響を及ぼさないこと、③MRIの磁場、撮像動作がロボットの所定の機能に影響を及ぼさないことが挙げられる。具体的な留意点を表3に示す。通常の手術支援ロボットを含む多く

のメカトロニクス機器はこれらの留意点をことごとく満たしていない。ここにMRI対応手術支援ロボットの難しさがある。

### ● 磁気対策をクリアしたMRI対応ロボット

しかし、この分野での研究・開発を進めている産業技術総合研究所・治療支援技術グループでは、前立腺ガンの放射線治療を前提としたオープンMRI対応の手術支援ロボットの開発に成功した。

「手術支援ロボットでは機械材料用のマ

### 表3 MRI対応の留意点

- 鋼鉄などの強磁性体を多く含まない。  
（磁場を強く歪ませる。磁石に吸い寄せられて危険）
- 撮像部分近傍（中心から30cm程度の内側）では微弱な磁性を示す常磁性体以外は置かない。
- 電氣的ノイズを導くもの（適切にシールド、ノイズ処理されていない電線、大半の電気製品、とくにデジタル機器）はMRI室内に持ち込まない。
- MRIの発する電磁波の影響を受けない。

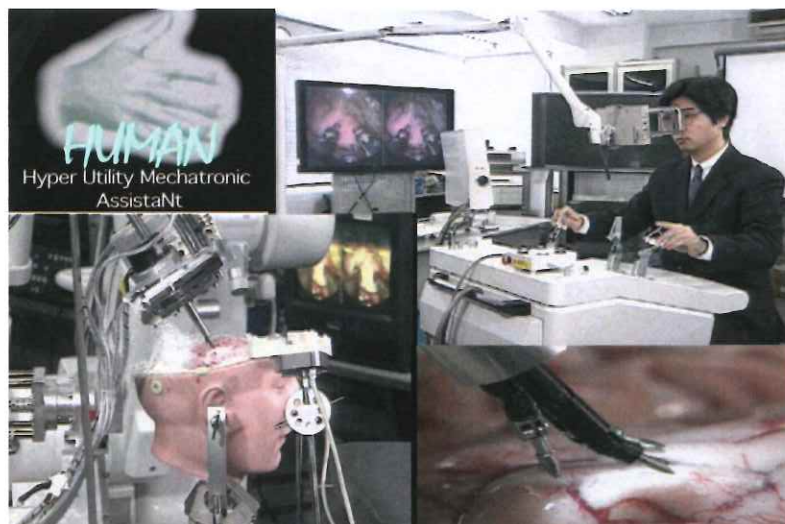
ルテンサイト系ステンレス鋼であるSUS440Cあたりがよく使われます。加工しやすいという点でアルミも用いられます。手術支援ロボット用としては純アルミよりもジュラルミン系のほうが一般的ですね。しかし、MRI対応となると、ステンレスをそのまま使うわけにはいきません」（治療支援技術グループリーダー 鎮西清行氏）

この針穿刺を行う5自由度ロボットシステムは、オープンMRIの中心部に近い範囲で動作する部分（フレームやアーム、ねじなど）にはチタン合金を使用している。「最も標準的なチタン合金の6-4Tiを使っています。純チタンよりも磁化率が大きく、MR対応性は劣りますが、使用を妨げるほどではありません。純チタンはMRI用鉗子などに使われますが、やはり合金より軟いので機械材料としては不向きです」（鎮西氏）

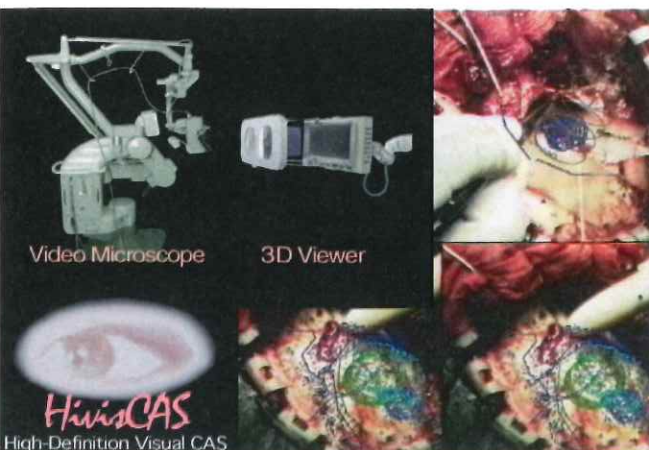
全軸がボールねじとリニアガイドの組み合わせから成る受動機構部品は、高い表面硬さと低い磁化率を両立するベリリウム銅、あるいは鋼材としては磁化率の低い特殊ステンレス鋼YHD 50製の部品で構成さ



産業技術総合研究所が開発したMRI対応手術支援ロボット。



「ヒューマン」は、手術中のMRI画像を直ちにコンピュータに取り込んで、執刀医に常時精密な位置ナビゲーション情報を提供できるシステムである。



ハイビジョン立体ビデオ顕微鏡システム「ハイビスカス」。単なる脳外科手術用顕微鏡ではなく、手術中に手術計画を表示する機能、術野から目を離さずにMRI画像などを参照できる機能、遠隔地にいる専門家の助言を受けることができる機能などを含んでいる。

れている。

米国などでは前立腺ガンに対して、直径1~2mmの非常に半減期の短い放射線源を直接、体内の病巣部分に置くという放射線治療がよく用いられているが、うまく配置できないと効果が上がらないばかりか、尿道にも放射線障害を及ぼす危険がある。しかし、MRI対応の手術支援ロボットを使えば、より正確に放射線源を配置できて確実な効果が期待でき、術者の放射能被曝も防ぐことができる。今後、こうしたMRI対応手術支援ロボットの応用分野が広まっていくことはまちがいないだろう。

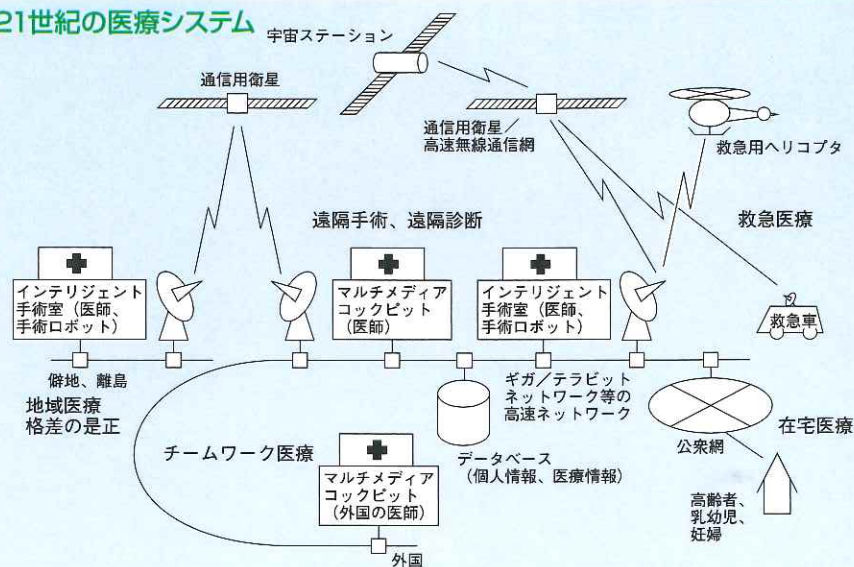
## 新しい手を生かす「新しい目」

いくら、優れた新しい手が登場しても、そこに目がなければ、手術を行うことはできない。それも、手術に必要な情報を含んだ「新しい目」と一体になって、新しい手は威力を発揮することが可能となる。

この分野でも研究開発は進んでいる。東京女子医科大学大学院医学研究所の伊関氏らが開発したハイビジョン立体高精細顕微鏡システム「ハイビスカス(HivisCAS)」は、さまざまな医用画像装置で得た情報を総合して手術計画を練り、その計画を手術中に分かりやすく術者に表示し、さらに遠隔地にいる専門化のアドバイスを受けることができるリアルタイム総合情報システムである。

このハイビスカスには「augmented

## 21世紀の医療システム



reality; 増強現実」と呼ばれる表示方法が採用されている。これは映画『ロボコップ』の目のように、実空間の映像に仮想空間のナビゲーション情報(図形など)を正確に重ね合わせて3次元で表示するのである。これによって、術者は「位置が本当に正しいのか」「計画通りに手術が進んでいるのか」といったことを常時確認でき、手術の安全性や有効性が向上するとともに、手術時間の短縮にもつながる。

ハイビスカスはすでに実用化され、学内病院に設置された「インテリジェント手術室」(2000年開設)において、脳外科の臨床に使われている。さらに、ハイビスカスの機能を使って内視鏡下手術ができる「ヒューマン」(HUMAN; Hyper Utility Mechatronic Assistant)も開発されている。

「いってみれば、ハイビスカスやヒューマンはアポロの宇宙船。みんな、マニピュレータの先で何をするのかばかり気にしますが、本当に重要なのはNASAの司令室です。すべての情報を集め、管理し、分析し、指示を出す手術の戦略本部といえるもので、こうした<新しい脳>が絶対に必要となる。そこでは熟達した医師がチーフとなり、手術をチェックし、刻々と変わる手術情報をもとに計画を修正したり助言も行う。我々はこうした手術戦略システムを構築しているのです」(伊関氏)。

## <手術なき外科>が実現する日も近い!

メスやはさみの改良に始まった医療の発達は、21世紀に入り、ついには手術支援ロボットを使った低侵襲の「高精度治療」時

代にまで到達した。これから先、外科領域では、どんなことが起こるのであろうか。鎮西氏は「外科のイメージはどんどん変わっていくでしょうね。いずれは、注射をするような感覚で手術が行われ、患者はすぐに帰ることができる時代がくるかもしれません。いわゆる手術なき外科ですね。そこまでのいかににしても、ガンの部分を認識して、ロボットが針を刺して高濃度の抗ガン剤を注入すれば、副作用も防げて、効果が上がるかもしれません。また遺伝子治療や再生治療といった分野とも結びつく可能性も高い。手術支援ロボットが活躍する分野は広く、その重要性が一層高まることはまちがいない」と予測する。

今後、手術支援ロボットが普及していくためには、安全の確保はもちろん、装置の低価格化も必要である。MRI対応などにチタンを使わざるを得ないなども、製造コスト面での課題のひとつである。

どこにいても、質の高い手術を可能とし、費用も含めて安心して使える手術支援ロボットが実現すれば、我々にとって、これ以上の心強い存在はない。そうした手術支援ロボットの普及が進むことをぜひ期待したい。

### ■取材協力/写真・資料提供

独立行政法人・産業技術総合研究所 東京大学大学院情報理工学系研究科 東京大学大学院工学系研究科 東京女子医科大学脳神経センター 米国Intuitive Surgical社 財団法人仁厚医学研究所・児島中央病院

### ■参考文献

日本ロボット学会誌Vol.18 No.1およびvol.19 No.8 日本定位・機能神経外科学会機関誌Vol.40 No.1