

深部脳神経外科手術支援 ロボット MM-1

脳腫瘍を治療する未来の名医

医療現場で活躍をはじめた手術ロボット。東京大学で開発中の「MM-1（マイクロマニピュレーター1）」は、脳深部というかぎられた空間で、周囲の正常組織を傷つけることなく腫瘍を摘出したり血管を縫合することができるという。そのスーパーテクノロジーを紹介しよう。

協力

光石 衛

東京大学大学院工学系研究科
産業機械工学専攻教授

森田明夫

東京大学大学院医学系研究科
臨床精神神経医学脳神経外科助教授

割澤伸一

東京大学大学院工学系研究科
産業機械工学専攻助教授

楚良繁雄

東京大学大学院医学系研究科
臨床精神神経医学脳神経外科助手

東京大学で開発が進められているMM-1。医師の操作にしたがい、微細な手術を行える。中央の写真は、MM-1の鉗子が人工血管をぬう実験である。右端の写真は、MM-1の開発にたずさわる東京大学の光石教授（下）、森田助教授（上）、楚良助手（中）。

脳深部へ鉗子が到達し、微細な手術を正確に行う

東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻の光石 衛教授が中心となって開発をつづけている深部脳神経外科手術支援ロボット MM-1は、これまで不可能と判断されていたむずかしい手術を成功させる能力を秘めている。

脳の深部に見つかった脳腫瘍を摘出するのは、非常にむずかしい手術である。なぜなら、手術を行う医者（術者）は、脳腫瘍の周囲に存在する正常脳組織をできるかぎり傷つけないように作業を進めなければならないからだ。

微細な手術は、たとえ熟練した医師が行ったとしても、0.1ミリメートル程度の精度が限界だという。これに対して MM-1 を使って手術を行えば、つねに0.1ミリメートル

より高い精度を保つことが可能である。そしてなれた医師が操作をすれば、その精度はさらに上昇する。

MM-1は大きく分けて三つの部分からなる。術者が操作する部分（マスターマニピュレーター）と、手術を実行する部分（スレーブマニピュレーター）、映像や制御信号を送受信する部分である。

術者はハイビジョンカメラから送られてくる精細な映像を立体視しながら、マスターマニピュレーターを操作する。その動きは極細の鉗子を2本もつスレーブマニピュレーターへと伝わる。人の手では届かない脳深部へ鉗子が到達し、微細な手術を正確に行うことができる。

大型モニター

ハイビジョンカメラで撮影された映像を、術者以外の人が見るためのモニター。モニターを介して手術の進行状況の把握や、見学をすることができる。なお、映像は術者が小型高精細LCDモニターで見ているものと同じである。

立体視ビューア 小型高精細LCDモニター

撮影した患部の映像を立体的に見るための装置。術者はこの映像を見ながら手術する。小型高精細LCDモニターには、同じ映像が角度を変えて左右に映し出される。立体視ビューアを介して左右の眼でそれぞれの映像を見ると、映像が立体的に見える。

操作ハンドル

鉗子を前後左右あらゆる方向に動かす、操作する装置。右手用と左手用があり、それぞれ1本の鉗子に対応している。

ペダル

鉗子の動きを補助的に制御する。鉗子がある方向へ動かないようにしたり、完全に固定したり、鉗子の動く速さを変えたりできる。

位置合わせ用ハンドル

鉗子の位置を手術部分に大まかに合わせるためのハンドル。

ハイビジョンカメラ

患部を撮影するカメラ。撮影された映像は、立体視するために横に二つに分けられる。

鉗子

脳の深部で腫瘍をかき出したり、血管の縫合を行う。鉗子は2本あり、直径は約5ミリメートル、長さは約18センチメートルある。

MM-1の全体像

MM-1は大きく分けると三つの部分からなる。それは、術者が操作して命令をくだす部分（マスターマニピュレーター）と、手術を命令通りに実行する部分（スレーブマニピュレーター）、そして映像を撮影し送受信する部分である。

マスターマニピュレーター側では、送信されてくる患部の映像を見ながら術者が操作ハンドルを動かす。するとその動きが信号に変換され、マスターマニピュレーター側のコンピューターからスレーブマニピュレーター側のコンピューターに送信される。さらに、スレーブマニピュレーター側のコンピューターからスレーブマニピュレーターに信号が伝わり、手術が実行される。

スレーブマニピュレーター

マスターマニピュレーター

コンピューター

マスターマニピュレーター側の動きを感知し、スレーブマニピュレーター側のコンピューターに送信する。

コンピューター

マスターマニピュレーターからの信号を受け取り、スレーブマニピュレーターの動きを制御する。

通信について

マスターマニピュレーターとスレーブマニピュレーターは、コンピューターネットワークで通信を行っている。両者は遠隔操作が可能である。なお、映像の回線は、コンピューターとは別の回線を用いている。

エンコーダからの信号が鉗子に伝えられる

手術を正確に行うには、術者の動きがマスターマニピュレーターの操作ハンドルからスレーブマニピュレーターの鉗子へ正確に伝わらなければならない。

それを可能にしているのが、マスターマニピュレーターの操作ハンドルについている、「エンコーダ」と呼ばれる装置だ。エンコーダはハンドルの可動部分に取り付けられており、可動部分が動くとき動いた角度に応じて電気信号を発する。その信号がコンピューターによって処理され、スレーブマニピュレーターの鉗子に伝えられる。

また、鉗子の移動速度は操作ハンドルの20分の1まで減速させることができる。これは、操作ハンドルを2センチメートル動かしたとき、ようやく鉗子が1ミリメートル動く状態である。より精密な操作が可能になる。

さらに、操作ハンドルと鉗子の位置関係は、手術中に設定しなおすこともできる。つまり、連続する操作で鉗子を目的の位置まで移動できない場合、鉗子の位置を固定したまま操作ハンドルの位置を動かすことができる。

これらのくふうによって、MM-1では微細な手術が正確かつ円滑に行えるようになっている。

鉗子先端の関節

先端から約2センチメートルの部分には、鉗子自身を曲げることができる関節がついている。この関節によって、先端は約90度まで角度を変えられる。

鉗子先端

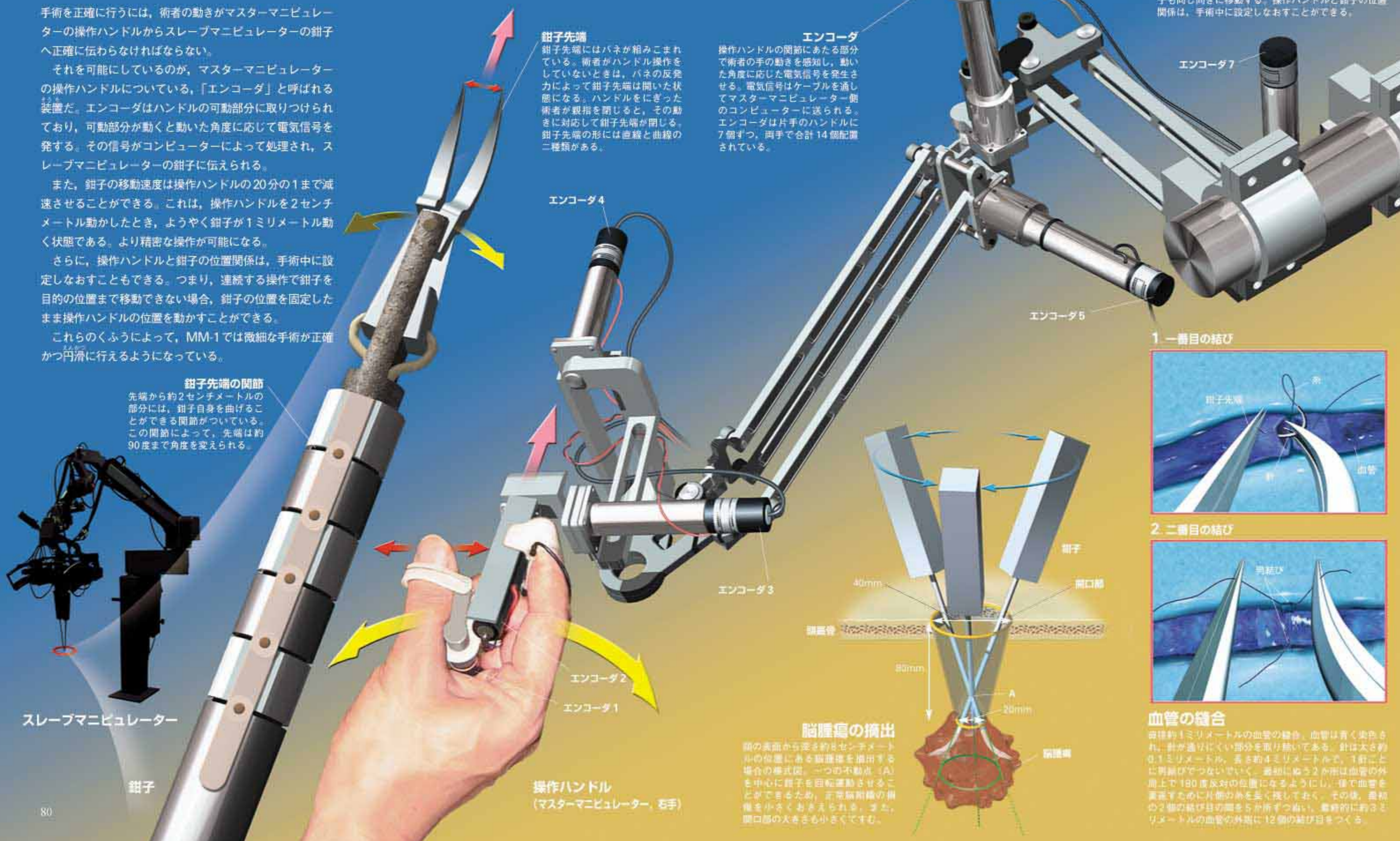
鉗子先端にはバネが組み込まれている。術者がハンドル操作をしていないときは、バネの反発力によって鉗子先端は開いた状態になる。ハンドルをにぎった術者が親指を閉じると、その動きに対応して鉗子先端が閉じる。鉗子先端の形には直線と曲線の二種類がある。

エンコーダ

操作ハンドルの関節にあたる部分で術者の手の動きを感知し、動いた角度に応じた電気信号を発生させる。電気信号はケーブルを通してマスターマニピュレーター側のコンピューターに送られる。エンコーダは片手のハンドルに7個ずつ、両手で合計14個配置されている。

操作ハンドルと鉗子の動き

操作ハンドルの動きは、操作ハンドルに取り付けられたエンコーダのはたらきによって、正確に鉗子へと伝達される。操作ハンドルを矢印の向きに動かすと、鉗子も同じ向きに移動する。操作ハンドルと鉗子の位置関係は、手術中に設定しなおすことができる。



スレーブマニピュレーター

鉗子

操作ハンドル
(マスターマニピュレーター、右手)

1 一縫目の結び

2 二縫目の結び

血管の縫合

直径約1ミリメートルの血管の縫合。血管は青く染色され、針が通りにくい部分を取り除いてある。針は長さ約0.7ミリメートル、長さ約4ミリメートルで、1針ごとに別縫ひでつないでいく。最初のように2針は血管の外周上で180度反対の位置になるようにし、その後血管を貫通するために片側のみを強く挟みとる。その後、糸の2つの縫ひ目の間を5か所ずつ縫ひ、最終的に約3ミリメートルの血管の外周に12個の縫ひ目をつくる。

手術ロボットが未来の医療を支える

かつて人間の手では不可能だったごく精密な作業も、技術の進歩によってロボットがこなせるようになってきている。それは、医療の分野でも例外ではない。

手術ロボットには、人でおこりうる手のぶれがない。また、作業アームの可動範囲は人の関節よりも大きい。加えて手術ロボットと通信技術を駆使すれば、たとえ専門医がいない病院でも遠隔操作で手術を行うことができる。手術ロボットは、医療そのものをかえる可能性をもっている。

遠隔操作で微細な作業をこなす工作機械を利用

東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻の光石衛教授は、工作機械開発の専門家である。手術ロボットの開発にたずさわる以前から、光石教授は微細な作業をこなせる工作機械の開発を行っていた。

その一つが、工作機械の遠隔操作による生産システムの開発である。たとえば、ある精密部品のアイデアが浮かんだとする。図面をかくて業者に発注し製作してもらおう場合、多くの時間が必要となる。もし自分で機械を遠隔操作して部品を加工できれば、すぐにアイデアを実現できる。

材料を機械の設置場所に送り、加工した製品を送り返してもらうのにそれほど多くの時間はかからない。自分のアイデアがよいかどうかすぐにわかり、また次のアイデアを試すことができる。遠隔操作の生産システムが確立すれば、開発のスピードが飛躍的に向上する。

光石教授が手術ロボットの開発に着手したのは、1990年代のはじめである。友人の整形外科医から、次のような興味深い話を聞いたのがきっかけだった。

事故で指を切断してしまっても、数時間のうちだったら結合することができる。その際、神経や血管はぬい合わせなければならない。一般的には、神経をぬい合わせるほうがむずかしく思えるかもしれない。しかし、血管は血液がもれずに流れるようにぬい合わせる必要があり、むしろ血管のほうがむずかしい。

この話を聞いて、光石教授は遠隔操作のシステムと、微細な作業をこなすことができる工作機械を手術に利用してはどうかと考えた。必要なときに必要な器具を使うことができれば、治療できるけがや病気の種類がふえるはずである。現在光石教授は、同大学院医学系研究科の医師たちと協力して手術ロボットの開発を進めている。

鉗子の先端には動力装置を組みこめない

「手術ロボットは、機構が複雑でむずかしいですね。それをいかに作りこむかが開発の焦点になります」と光石教授は話す。MM-1は、最も緻密な作業が必要とされる脳の深部で手術を行うロボットである。そのため、鉗子の先端部分があらゆる方向に向かなければならない。鉗子そのものの動きと鉗子の先端部分の動きに大きな自由度が必要となる。

通常、機械の関節を曲げたり回転させるには、モーターのような動力装置を用いる。しかし、手術ロボットの場合は、モーターなどを鉗子の先端部分に組みこむことができない。なぜなら、モーターなどの動力装置は滅菌洗浄ができないからだ。また、グリスなどの機械油を使うことも当然許されない。モーターなどの動力装置を患者からできるだけはなれたところに配置し、なおかつ自由に自由度の多い機構をつくるかが焦点となる。

MM-1の鉗子の先端には、細いワイヤーが通っており、それが鉗子の根本のモーターにつながっている。モーターがワイヤーを巻いたり出したりすることで、鉗子の先端部分が動く。鉗子の中を通っているワイヤーは、ヒトというアキレス腱のようなはたらきをしている。

不可能といわれてきた手術を可能にする

MM-1の最大の長所は、脳の深部というかぎられた空間で、周囲の正常組織を傷つせずに腫瘍の摘出や血管の縫合をこなせることである。このような手術は、熟練した医師でもむずかしいという。

東京大学大学院医学系研究科臨床精神神経医学脳神経外科の森田明夫助教授は、「人間は、非常にゆっくりとした動きを一定の間つづけたり、まったく動きをとめて同じ姿勢でいるということが苦手です」と話す。脳の深部での手術は、人間が苦手とする作業の連続である。

「たとえば、深さ9センチメートルの位置にある血管の縫合ができる医師は、ごく限られた名医だけです。世界に数人しかいないでしょう」と同脳神経外科の楚良繁雄助手は話す。このようなむずかしい手術も、MM-1を使えばこなすことが可能である。

また、そこまでむずかしくない脳外科の手術であっても、MM-1を使えば今までよりも短時間で確実に作業を終わらせることができる。MM-1は今まで不可能といわれてきた手術を可能にするとともに、手術の質の向上にも貢献できるのだ。

手術ロボットの必要性は今後ますます高まる

光石教授の開発するロボットは、MM-1だけではない。患者の肉体的負担を低くおさえた手術を行える「低侵襲手術支援ロボット」や、人工関節を膝に入れるために骨を正確にけずることができる「人工関節置換術支援ロボット」などがある。

「今後、科学がさらに発展すれば、手術をしないで治療できる病気や症例がふえることでしょう。当然、医師が手術をする機会も減っていきます。したがって、残されたむず



骨を正確にけずる「人工関節置換術支援ロボット」
病気などが原因で膝の関節を人工関節に置き換える際、足の骨を人工関節にあわせて整形する必要がある。人工関節置換術支援ロボットは高速回転する刃物をコンピューターで制御し、計画通り正確に骨をけずることができる。精度の高いけずりだしは、患者の回復の早さにつながる。



東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻の光石衛教授。「もし名医が手術ロボットを操作したときの動きを数値化することができれば、その技術や技能を手術ロボットに記憶させることができます。手術の質はさらに高まるでしょう」と話す。



患者の肉体的負担を低くおさえた手術を行える「低侵襲手術支援ロボット」

光石教授が開発する手術ロボットの一つ、低侵襲手術支援ロボット。スレーブマニピュレーター（左の写真）には2本の鉗子と1本の内視鏡の合計3本の“手”が装備されている。マスターマニピュレーター（右の写真）のすぐ前にある小さいモニターには、内視鏡から送られてくる映像が映る。写真では、肝臓を模したピンク色の模型が映っている。術者はこの映像を見ながら手術を進める。大きなモニターには、患者の近くに設置されたカメラからの映像が映る。スレーブマニピュレーターはマスターマニピュレーターによって遠隔操作することが可能だ。患者に挿入された3本の手を医師が自在にあやつり、手術はすべて体内で行われる。術後の患者に残る傷あとは、直径数センチメートルの大きさのものが3か所だけである。

かしい手術を、経験の少ない医師が行うことになります」と光石教授は話す。難易度の高い手術を高精度で行うために、手術ロボットの必要性は今後ますます高まりそうだ。

一方で、手術ロボットには乗り越えなければいけない問題もある。たとえば、技術的には軽量化や小型化などの課題がある。なかでも、遠隔操作の通信で発生する時間差は重要な問題だ。遠隔操作では、約0.3秒ほどの時間差が発生すると操作しにくくなるといわれている。そのほかにも、インターネットなどの通信回線を通して国境をこえた遠隔手術を行う場合、国が発行する医師免許はどうなるのかといった複雑な問題がある。

しかし、正確性や安定性といった面で、手術ロボットが人間の能力を上まわっていることは明らかである。問題が解決され、医師と手術ロボットの協力によって患者の生活がより豊かになることを期待したい。