

図4 外科医の新しい手：精密誘導手術システム  
 右：装置の全体図とレーザーシステムの外観  
 左：微細レーザー手術システムの拡大部分

る。インテリジェント手術室では、医療スタッフの要望に応じて、腫瘍を蛍光画像や必要な鳥瞰図や手術経路に沿った三次元断面像などをリアルタイムに表示することもできる。術中画像による手術支援は、安全かつ正確に手術を終了させるためには必須な支援技術なのである<sup>6,7)</sup>(図3)。

### Ⅲ. 外科医の新しい手

低侵襲手術治療を推進する上では、微細操作における外科医の技能の限界を超えるための道具装置が必要である。手術支援マニピュレータは、人間の手の動きや形態を模倣する必要はない。また設定された命令だけを忠実に遂行する産業用ロボットのようなものも適さない。むしろ、思うがままに動く道具であって、外科医の肉体的技能によらず、一定の微細操作能力で手術ができるシステムが望ましい。さらに、非接触で手術計画通りに機能領域の残存腫瘍に対して、100ミクロン単位で微細手術が可能な精密レーザー手術システム (computer aided design & computer aided manipulation: CAD-CAM) が必須である。脳神経外科手術領域では、手術前に撮影したMRI、CTなどの三次元画像を用いて術前計画を行い、術者を誘導するナビゲーションシステムが普及し始めている。これは脳の内部の腫瘍位置を定量的に把握した後、ディスプレイ表示もしくはマニピュレータにより術具を誘導する。腫瘍

を取り除く方法としては、放射線治療器を患部まで誘導し、物理的に腫瘍にダメージを与えるか、もしくは鉗子を用いて術者の手により取り除くのが一般的である。しかしながら、いずれの方法でも正常組織を傷つけずに、腫瘍を全て取り除くことは困難であった。特に脳神経外科分野では、腫瘍の除去率と5年後の生存率は密接に関係しており、除去率の向上は治療の上では重大な問題であった。

手術支援マニピュレータは少なくとも以下の3つの機能を持っていなければならない。(1) 対象組織を的確に手術する「手」を提供する、(2) 外科医が手術対象物をしっかり確認し・観察するための「目」を提供する、(3) 手術中に手術を誘導(ナビゲーション)するための情報を「目」の情報と統合して提供する。われわれが目指す手術支援マニピュレータとは、外科医の新しい目と手となるインテリジェント・マニピュレータシステムである。すなわち、手術デバイス単体ではなく、上記の3つの機能を持つ総合的システムである。たとえば、普通の手術器具を手を持って操作する際、外科医は視覚と並んで「手応え」の微妙な感覚に依存している。しかし手術マニピュレータにおいては、手応えを人工的に作り出してフィードバックしなくてはならない。このようなフィードバックには、代行感覚を用いるのが適当である。手術マニピュレータの先端に自分の手と目があるかのように感じられる操作環境

### インテリジェント手術室での235症例 症例内訳

#### ■グリオーマ (149)

- 下垂体近傍腫瘍 (40)
- 水頭症 (3)
- 脳動静脈奇形 (7)
- 血管芽腫 (14)
- 髄膜腫 (4)
- その他 (18+ (1))

#### 235 症例

- ナビゲーション (157)
  - 覚醒下手術 (27)
  - 5-ALA 化学的ナビゲーション (76)
- (2003年3月13日~2004年7月23日)

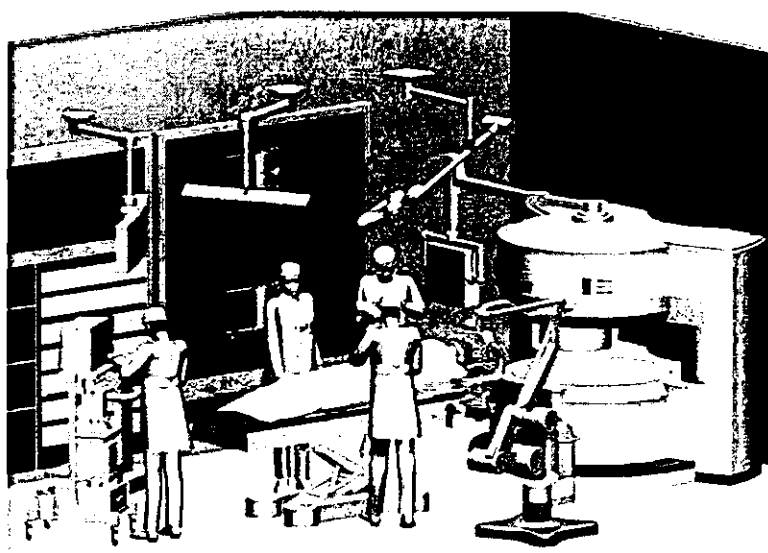


図5 インテリジェント手術室の情景

(tele-existence)を提供することによって初めて、外科医はマニピュレータを自在にあやつて安全・確実に操作できるようになる。

精密レーザー手術システムは、CAD (computer-aided design) にて手術対象部の状態を特定し、その部位を正確に蒸散するCAM (computer aided manipulation)の機能を有す。ケミカルナビゲーションである5-ALAを用いて、蛍光染色された残存腫瘍部位の三次元位置・形状を計測し、segmentationすることで蒸散すべき範囲をコンピュータ上で指定する。指定された範囲に微細手術器具(波長2.8 $\mu$ mの微細レーザー)を位置決めした後、蒸散治療を行う。本システムは、レーザー位置決めマニピュレータと、患部の三次元位置・形状データ計測部から構成される。機能画像と位置情報および、微細作業を可能とするロボット技術、レーザー技術が融合し、より安全、確実、かつ精密に腫瘍を切除することが可能となるシステムである<sup>8)</sup>(図4)。

#### IV. 外科医の新しい脳

手術に際しては、戦略デスクはその機能を拡張した手術戦略デスクになる。これは手術プロセスを管理する中枢である。手術戦略を立案し、手術の進捗をチェックしつつ執刀医を誘導し、状況に合わせて戦略を修正する。もちろん執刀医自身も手術戦略デスクに参画する。

術前に手術計画を立案する。医療情報・画像情報を収集して分析し、手術の経過をシミュレーション等で予想して、手術の手順を組立て、日印を設定するなどして計画を立案する。さらに術中に計画の手直しが必

要になった時に備えて、判断の材料となる情報を整理して、手術戦略(strategy)を準備する。そして手術時に観察されるであろう形態情報・機能部位の位置・手術予定部位の範囲・手術の過程に伴う形態の変化の予想図などの様々な情報を、相互に位置的に対応付けてコンピュータのIT空間に蓄積し、1つの三次元的手術戦略地図に集約する。

手術中には、手術戦略デスクは術中モニターや術中撮影の情報を収集して、執刀医に手術戦略地図やナビゲーション情報をオンラインで供給する。執刀医は増強現実映像(augmented reality)として表示された手術戦略地図を使って、操作部位を計画と照合しつつ操作を行う。手術戦略デスクは手術の過程をモニターし、必要に応じて術中撮影で得た情報を地図に付け加えて、計画を修正したり、術中の予期せぬ問題に対する手術戦略の修正・再構築を行い、必要に応じDoc On Demandを介して助言する。執刀医との連携には、マルチメディアを利用した双方向的インターフェイスを用いる。さらに手術戦略デスクは、医療情報ネットワークにリンクして、低侵襲手術に必要な手術精度の向上、検査診断システムの低侵襲化・多角化・迅速化などの技術改良に寄与し、また遠隔手術(tele-operation)を含む遠隔医療(tele-medicine)を支援することが期待される。

「手術イベントレコーダ」は、術中のすべての医療情報を経時的に記録し保存するシステムで、特に術後の回復期の管理を最適かつ効率的にするのに有効とされている。麻酔管理情報・生体情報・手術情報(術野映像)を経時的デジタル情報として収集し、記録する。

記録は手術の評価や潜在的問題点の洗い出しのほか、手術中に危険な状況(ニアミス)などが発生した場合の事後分析にも用いられる。手術イベントデータを蓄積して、最終的には術中の患者の状態を予測できるデジタル病態生体モデル「手術イベントシミュレータ」を構築することを目指している。これを用いて手術計画の事前検討を行い、問題点や留意点をピックアップし、手術戦略を系統的に構築する。

処置中にトラブルが発生した時には、程度の差こそあれ、専門医でも研修医でもその対処にリアルタイムでの決断が迫られる。コンピュータ支援技術で、現状の事態をわかりやすく提示し、その解決法をわかりやすく示すことで、混乱を防止し悪循環の輪を断ち切ることが可能となる。これを実現するリアルタイムデモンストラーションを支援する技術の1つが、目標制御管理システム(target-controlled management: TCM)である。TCMとは、治療に対する患者の反応の予測と実際の反応との違いを測定してフィードバックすることで、治療手段を調節し最適化する手法である。このためには、治療プロセスを可視化することが本質的に重要である。逆に、治療チームの一員として患者自身が参画するケースが増えるにしたがって、治療プロセスの可視化は否応なく進むであろう。まず、長期的治療計画と当面の計画を組み合わせた治療ロードマップを作成し、患者をどんな状態に持っていかを定量的目標として設定する。そして、治療の選択肢を事前に評価して、選択を行う。実際に治療を行ったあと、患者の反応を治療動態パラメータとして計測し、これに基づいて次の選択肢を検討する。選択肢の事前評価には、治療操作に対する患者の反応の因果関係モデル(効果部位コンパートメント, effect-site compartment)を使い、強く期待される反応、および、たとえ可能性が低くても留意すべきリスクを、患者の治療動態パラメータから予測する<sup>1,2)</sup>。

### おわりに

将来の術中三次元画像に基づく治療技術として、残存腫瘍の確認にも術中のリアルタイムセグメンテーションが可能となりつつあり、腫瘍の切除率に貢献することは間違いない。現在、超小型ガンマカメラの開発が進められ、術中に使用されているガンマカメラの小型化とともに、RI (radio isotope) を利用して病変部を標識し、術中に標識組織を可視化しながら、病変部を的確にかつ容易に摘出する術中臨床応用が進められ、センチネルリンパ節を同定する RI-guided surgery が脚光を浴びている。術中に大腸がんや直腸がんをよ

り精度よく、正確に摘出する目的で免疫核医学を応用した免疫 RI ガイド手術 (radioimmunoguided surgery) や、乳がんのセンチネルリンパ節生検への臨床応用が始まり、さらに脳腫瘍への応用も試みられている。SPECT (single photon emission tomography) は、PET (positron emission tomography) に比べて空間分解能は劣るが、放射性医薬品を注射後 24 時間後に術中で検出しながら手術することも可能で、逆に PET の被曝問題を解決することができる。悪性腫瘍そのものをガンマカメラで検出する免疫 RI ガイド手術の進展や、病変の組織部位などや手術スケジュールなどにより、適切な放射性医薬品の選択がなされれば、RI 誘導手術が、CT MRI 誘導手術と並んで使われる日も近い。また、X 線平面検出器を基にした術中イメージング装置として、現在開発が進められている DVT (digital volume tomography) は、第 3 のボリューム CT ともいうべきものである。透視装置のように上部開口部は広く、腹部領域をもカバーできる側部の開口部は、全身の CT ともいうべきスペックを持っている。現在、MR 対応として開発されており、オープン MRI 室で、近未来の MRI-DVT 誘導手術が行われる日も近い<sup>3)</sup> (図 5)。

### 文 献

- 1) 伊関 洋, 杉浦 円, 村垣善浩: 術中オープン MRI での脳外科手術, 第 10 回コンピュータ支援画像診断学会大会, 第 9 回日本コンピュータ外科学会合同論文集, pp.117-118, 2000
- 2) Iseki H, Muragaki Y, Taira T, et al: New possibilities for stereotaxis information-guided stereotaxis. *Stereotac Funct Neurosurg* 76: 159-167, 2001
- 3) 伊関 洋, 村垣善浩, 丸山隆志, 他: 脳腫瘍摘出手術に必要な検査法—術中検査—, *脳神経外科ジャーナル* 11: 508-514, 2002
- 4) 伊関 洋, 村垣善浩, 中村亮一, 他: 手術における医療トレーサビリティと戦略デスク, *泌尿器外科* 16: 731-737, 2003
- 5) 伊関 洋, 村垣善浩, 中村亮一, 他: インテリジェントオペ室・MRI 誘導手術対応システム, *MEDIX* 39: 11-17, 2003
- 6) Iseki H, Muragaki Y, Naemura K, et al: Clinical application of augmented reality in neurosurgical field. *Proceedings Computer Graphics International* 2003, pp44-49, 2003
- 7) 村垣善浩, 丸山隆志, 伊関 洋, 他: 機能的マッピングと術中 MRI を併用したグリオーマの手術, *Brain Medical* 13: 255-263, 2001
- 8) Maruyama T, Muragaki Y, Iseki H, et al: Intraoperative detection of malignant gliomas using 5-Aminolevulinic acid induced protoporphyrin fluorescence, open MRI and real-time navigation system. In *Computer Assisted Radiology and Surgery, CARS2001, Berlin*, eds by Lemke HU

- et al, Elsevier, Amsterdam, 2001, pp279
- 9) Nambu K, Nomura S, Ohryu S : Digital volume tomography : a new three-dimensional imaging apparatus designed for intraoperative examination. In Computer Assisted Radiology and Surgery ; CARS2003, London, eds by Lemke HU et al, Elsevier, Amsterdam, 2003, pp1295
- 10) 杉浦 円, 伊関 洋, 村垣善浩, 他 : オープンMRIを中心とするインテリジェント手術室の構築, 第10回コンピュータ支援画像診断学会大会, 第9回日本コンピュータ外科学会合同論文集, 2000, pp121-122

## Abstract

### Intelligent operating theater

Hiroshi Iseki<sup>1,2)</sup>, Yoshihiro Muragaki<sup>1)</sup>, Takashi Maruyama<sup>2)</sup>, Ryoichi Nakamura<sup>1)</sup>,  
Kyojiro Nanbu<sup>1)</sup>, Shigeru Ohmori<sup>1)</sup>, Tomokatsu Hori<sup>2)</sup>, Kintomo Takakura<sup>1)</sup>

from

<sup>1)</sup> Faculty of Advanced Techno-Surgery (FATS), Division of Advanced Biomedical Engineering & Science (R & D),  
Graduate School of Medicine, Tokyo Women's Medical University,

<sup>2)</sup> Institute of Advanced Biomedical Engineering & Science (ABME & S) / Department of Neurosurgery,  
Neurological Institute (Clinical Division), Tokyo Women's Medical University,  
8-1 Kawada-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8666, Japan.

Computer-aided surgery commenced in the late 1980s when computer was clinically used for diagnosis and surgical planning. Since then the computer has been used in a surgical navigation system. In the early 1990s a robotic surgery using intelligent manipulator as surgeon's new hands took place. Nowadays intraoperative diagnostic imaging as surgeon's new eyes has become ubiquitous. Diagnosis, surgical planning, and navigation are required to be real-timely performed intraoperatively. The time has really come to concurrently diagnose and treat, in which technology visualizing intraoperative medical information and minimally invasive surgery are fused. For that it is necessary to develop a system that real-timely updates information for decision making, and at the same time to present the timely, optimum treatment to be done according to the results of instant evaluation of ongoing treatment. To realize and support above system it is essential to combine a sensor which can precisely distinguish a focal area from a normal tissue intraoperatively, and a manipulator which participates the treatment. In addition, the manipulator should be accurately controlled using a computer (computer-aided manipulation) according to the surgical plan made by a method aided by a computer (computer-aided design) based on intraoperatively acquired information. It is about to change quality of life to quality of treatment.

(Received : August 3, 2004)