ナビゲーション脳神経外科手術の現況と展望

梶田 泰一¹⁾, 森 健策²⁾, 林 雄一郎²⁾, 若林 俊彦¹⁾, 吉田 純³⁾

1) 名古屋大学大学院医学系研究科脳神経外科, 2) 同 情報科学研究科, 3) 中部労災病院脳神経外科

The Current Status and Perspective of Navigation Neurosurgery

Yasukazu Kajita, M.D.¹⁾, Kensaku Mori, M.D.²⁾, Yuichiro Hayashi, M.D.²⁾,
Toshihiko Wakabayashi, M.D.¹⁾, and Jun Yoshida, M.D.³⁾

1) Department of Neurosurgery, Nagoya University, Graduate School of Medicine, 2) Nagoya University, Graduate School of Information Science, 3) Department of Neurosurgery, Chubu Rousai Hospital

Neuronavigation has become an established technology to provide objective data on localization in 3D space. In the surgery for lesions near the eloquent area, obtaining a functional image including functional magnetic resonance imaging (fMRI) and tractography is important for making presurgical planning. Navigation technology is essential to perform the operation according to the pre-surgical planning. The surgeons, however, must realize that it does not always correlate well with real localization accuracy. Error analysis includes image distortion, fiducial localization error and registration error, which can all be minimized. Brain shift, caused by the loss of cerebrospinal fluid and tumor resection, is a major problem negatively affecting navigation accuracy. Intraoperative imaging to obtain updated anatomic image data overcomes the problem of brain shift, but the equipment is not so easily installed into the operating room. The development of computer technology is expected to solve this problem in the future.

The following are some perspectives of neuronavigation with the advance of computer technology: The 3D virtual image will be more intuitive to navigate for surgeons. The development of navigation workstations could have the potential to interpret the real surgical view and provide an automated nomenclature of brain structure to surgeons. Robotic systems might facilitate the navigation procedure to enhance the localization accuracy. Networked neuronavigation is a future direction to assist in operations performed at remote hospitals using navigation image software that utilizes network technology. Finally, to improve the navigation procedure amongst the operation team as well as surgeons, environmental navigation could be proposed to monitor the operative staff and to show the optimal arrangement in the operating room.

(Received February 18, 2013; accepted March 1, 2013)

Key words : neuronavigation, computer technology, robotic surgery**Jpn J Neurosurg (Tokyo) 22 : 510-518, 2013**

はじめに

脳神経外科手術が従来困難とされたのは、1) 脳の機能局在が不明のまま、脳を手術操作したことで予期せぬ後遺症が出現したこと、2) 脳神経外科手術は、脳内の

きわめて狭く、重要な血管や神経に囲まれたスペース内での手術操作技術が要求されたことにある。顕微鏡の導入により、繊細な手術操作が可能となり、手術成績は格段に向上したが、脳深部病変では、顕微鏡視野はさらに狭くなり、オリエンテーションを失うことも多い。脳神

連絡先: 梶田泰一, 〒466-8550 名古屋市昭和区鶴舞町 65 名古屋大学医学部脳神経外科

Address reprint requests to: Yasukazu Kajita, M.D., Department of Neurosurgery, Nagoya University, Graduate School of Medicine, 65 Tsurumai, Shouwa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-8550, Japan

Fig. 1 The development of neuronavigation surgery and computer assisted surgery

経外科手術を，できるだけ低侵襲に，最適にアプローチするためには，手術中にリアルタイムに位置情報を提供するナビゲーションシステムは，きわめて有用である．1986 年，他領域に先駆けて，渡辺らは脳神経外科用多関節アーム式ニューロナビゲーションを開発した．その後，位置情報の取得方法（トラッキングシステム）として，光学式，磁気式が開発され，現在はその位置精度の高さにより，光学式が主流となっている．

1998 年，伊関ら¹²⁾が本誌にナビゲーションシステムの将来展望を，既述している．本稿では，それ以降のナビゲーションの発展を中心に報告する（Fig. 1）．最近の最も大きなニューロナビゲーションの発展は，画像技術の進歩に伴い多くの機能情報を統合したナビゲーション画像の作成と，3D virtual 画像に代表される術者に直感的に提示する画像技術の開発にある．また，手術の進行に伴う脳偏位によりニューロナビゲーション位置精度が正確性を失う問題を解決するために，術中画像を撮像し，ナビゲーション画像をアップデートしていく試みである¹³⁾¹⁶⁾²²⁾²⁶⁾．術中画像として，computed tomography (CT)，magnetic resonance image (MRI)，超音波画像，赤外線カメラ装置などが導入されている²⁰⁾．

ニューロナビゲーション手術の将来展望では，コン

ピューター技術の進歩に合わせ，より高度化されたナビゲーションワークステーションの開発，ロボット技術に代表されるコンピューター支援技術やネットワーク技術の導入が期待されている．

ニューロナビゲーションの現況

ニューロナビゲーション手術のワークフローは，1) ナビゲーション画像の取得，2) 手術計画の作成，3) ナビゲーション画像空間と手術実空間とのレジストレーション，4) ナビゲーション手術である．

① ナビゲーション画像の取得

ナビゲーション画像の基本となるのは，手術実空間とのレジストレーションに必要な fiducial marker をつけて撮像される CT，MRI の解剖学的画像である．加えて，重要な脳機能近傍の病変に対する脳神経外科手術に対しては，functional magnetic resonance image (fMRI) にて脳皮質を局在化し，diffusion tensor imaging (DTI) 撮像による fiber tracking 画像を作成し，病変との位置関係を知る必要がある．脳腫瘍手術においては，腫瘍の境界や性状を知る指標として，MR spectroscopy や，fludeoxyglu-

Fig. 2 A navigation image with integrated anatomical and functional image

cose (F^{18}) positron emission tomography (FDG-PET) や, methionine PET も有用である。的確な手術計画を作成し、安全に手術を進行するため、各施設で利用できる多くの機能画像を取得しておくことが重要である。今後、脳画像技術の進歩に合わせて、ナビゲーション画像の向上が期待される。

② 手術計画の作成

前述した脳機能画像を解剖学的画像に統合して、最適な手術計画を作成する (Fig. 2)。ただ、脳機能画像に基づいて手術を実施するには、少し注意を要する。fMRI は、echo-planar imaging (EPI) 法にて撮像されるが、その撮像法による画像の歪み (特に下側頭回や前頭葉で強い) が出たり、特定のタスク (言語マッピングなど) により活性化された脳機能部位は、実際の脳機能部位より広範囲であるかもしれないことを留意しておいたほうがよい。PET, DTI は、脳腫瘍の性状や錐体路や弓状束などの重要な線維をそれぞれ描出するが、解像度が低い。Fiber tracking image は、汎用されているニューロナビゲーションシステムのワークステーションで作成可能であるが、使用されるアルゴリズムやパラメーターで image に差が生じる。Fiber が交差するところでは、過小評価となるかもしれない²¹⁾。一方、fiber tracking image の妥当性を、術中に電気生理学的に検証している論文もある³⁷⁾。

近年、3D 画像の発達はめざましく「高速、高精度可

視化手法 (高速ボリュームレンダリング)」「各種モダリティ画像間のレジストレーション手法」「3D 画像変形処理手法」、3D 画像から手術を行ううえで必要な種々の情報を取り出す「3D 画像解析技術」などますます高度化している²⁹⁾ (Fig. 3)。精密な血管や神経の高精細画像が可能になったことにより、腫瘍と血管、神経の位置関係を明瞭に重畳した 3D ヴァーチャル画像は、術者が直観的に理解しやすく大変有用である。

③ ナビゲーション画像空間と手術実空間のレジストレーション

ナビゲーション画像空間を、手術実空間にレジストレーションするには、1) マニュアルで、fiducial marker を使い、paired-point で、2) 自動アルゴリズムを使って行う方法がある。マニュアルレジストレーションは、術者が精度を高めるために、レジストレーションの最適化が可能である。加えて、surface marker レジストレーションを追加することで、位置精度の誤差が減少する。トラッキングシステムは、光学式、磁気式、多関節式があり、それぞれに利点と発展性がある。

1. 光学式

赤外線を利用して位置情報を知るシステム。多くは、カメラユニットより赤外線を発光し、手術器具に取り付けた反射素材で反射された赤外線を charge coupled device (CCD) カメラで認識する。位置精度は、最も正確であり汎用されている。ファントム研究のナビゲー

Fig. 3 Virtual 3D image provided by the New Virtual Endoscope

Fig. 4 Magnetic neuronavigation guided endoscopic surgery for pituitary adenoma

ションシステム位置精度で、Polaris Spectra を用いた光学式トラッキングでは、0.25~0.3 mm, Aurora を使った磁気式トラッキングでは、0.9~1.5 mm の誤差であった³⁸⁾。

2. 磁気式

手術操作空間内に磁界を発生させ、手術器具に磁気センサを装着させることで位置情報を取得する。トラッキング可動領域が狭いことや、周囲の金属により磁場の歪みが生じ、位置精度に影響が出る問題がある。一方、専用器具が小型で軽量であり、光学式と違い、手術器具が体内に入っても、トラッキングは可能である (Fig. 4)。実内視鏡ビデオフレーム画像と三次元 MR 画像から生成されるヴァーチャル内視鏡画像との間の画像間類似度が最も高くなるヴァーチャル内視鏡画像の描画パラメータを連続的に求めることで、実内視鏡のカメラの動きを推定したり、内視鏡先端に取り付けた磁気センサーにて、磁気の歪みをリアルタイムに測定、補正することでさらに正確なナビゲーション機能をもたせる技術開発が進んでいる¹⁵⁾¹⁸⁾。

3. 多関節式

可動性のアームの先端にプローブを装着し、プローブが動いた時に、アームの角度から位置を算出するシステム。主にナビゲーション技術開発の初期に設計された。しかしながら、多関節式トラッキングシステムは、術前計画の位置情報に基づいて自動的に多関節アームを調節しナビゲートする (ロボット技術) ことが可能である。詳細は、ナビゲーションの展望の項で後述する。

脳神経外科医が、ニューロナビゲーションを使用して手術をする際に、位置精度誤差の要因を把握していることは重要である。位置精度の誤差をきたす原因としては、センシング位置と対象位置精度、器具の製造精度、CT・MRI・X 線画像などのスライス厚・画像の歪み、ヒューマンエラーに関する誤差要因、器具取り付け、赤外線に起因する問題、パッシブマーカーの再使用などが挙げられる⁴²⁾。術者は、許容できない位置誤差が出た場合に、上述した誤差要因を検討し、精度が高いナビゲーション手術を心がける必要がある。

Fig. 5 Comparison between virtual deformity of a 3D image following tumor resection and the real intraoperative magnetic resonance image

④ ナビゲーション手術

ナビゲーションを使い、術前計画に沿って手術を進める中で、開頭後に、髄液漏出等に伴う脳偏位により、ナビゲーション誤差が生じてくることが多い²⁾³⁾⁸⁾³¹⁾。Nimsky ら³³⁾³⁴⁾³⁵⁾は、術中 MRI にて、脳表で平均 24 mm、脳深部で平均 3 mm の脳偏位や、術中や脳腫瘍摘出後に錐体路が移動することを報告している。したがって、術前ナビゲーション画像を盲目的に信用して、手術を行うことは危険である。画像解像度が高い術中 MRI によるナビゲーション画像のアップデートは、誤差を解消する最も確実な方法であるが、汎用性に乏しい³⁹⁾。超音波画像の進歩により、超音波画像を用いたアップデートの報告が増加しているものの、画質に限界がある。術中画像を用いずに、バネ理論に基づいたリアルタイム脳変形画像技術 (4D 画像) による脳偏位のシミュレーションや脳偏位を最小化するフェンスポスト法等のさまざまな工夫がなされている¹⁷⁾²⁷⁾ (Fig. 5)。

ニューロナビゲーションの展望

今後のナビゲーション手術の発展にまず期待するものは、術中脳偏位に伴う位置精度誤差の解決である。前述したように術中 MRI によるアップデートは、最も確実であるが、リアルタイムの補正や装置の導入には限界がある⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁹⁾。将来、術中画像に頼らないコンピューター技

術を用いての補正が望まれる。今井ら¹¹⁾は、有限要素法解析に基づく変形画像技術を用いて実画像を極力追従するナビゲーション画像を開発する取り組みをしている。

将来展望としては、1) intelligent surgical assistance, 2) ネットワークナビゲーション手術, 3) ロボット技術と連携, 4) environmental navigation などの方向性がある。

① Intelligent surgical assistance

磁気式ナビゲーションの項で前述したように、術野画像の解剖学的構造をコンピューターが自動解析し、的確な情報を提示するとともに、術前シミュレーションに合わせて、術者をナビゲートするシステムである。術野の解剖学的情報を、文字情報で情報提示し、かつ、術中に生じる電気生理学的、病理学的情報を統合することで、よりの確かなナビゲートを行う³⁰⁾。気管支構造や、腹腔内臓器においては、すでに臨床応用され、気管支ファイバー検査等において、検査医師が病巣気管支にファイバーを正確に誘導している²⁵⁾ (Fig. 6)。伊関らの論文にある active navigation も同じ方向性を示唆していると思われる。

さまざまなコンピューター外科技術は、外科医のシミュレーションやトレーニングに大いに貢献している。コンピューターグラフィック画像によるヴァーチャルトレーニング技術は、外科医の縫合、切除などの手術操作を実手術に近く再現している。脳神経外科手術において

Fig. 6 Automated nomenclature of upper abdominal arteries for displaying anatomical names on virtual bronchofiberscope and laparoscopic images

も、3D ヴァーチャル画像生成技術は、患者個々の術前画像から立体ファントムを作成し手術計画をシミュレーションすることや、若手脳外科医のトレーニングに役立っている³⁰⁾。今後、術前シミュレーションした四次元画像をナビゲーション画像に使用して、術前シミュレーションと術中ナビゲーションがシームレスにつながることも期待される。

② ネットワークナビゲーション手術

ナビゲーション画像に、多くの手術支援情報を統合して、手術支援 3D 画像を作成することを、各病院のワークステーションで実施することは困難である。このような高度ナビゲーションにおいては、cloud 技術を用いればホストコンピューターサーバーで作業可能である。また、ネットワーク化した病院においては、遠隔地の手術症例に対して熟練医師が術前手術計画を作製し、術中にナビゲーション画像を用いて遠隔支援 (headquarter 支援) できる。Hayashi ら¹⁰⁾は、3D 画像生成ソフトウェア (New Virtual Endoscope) にナビゲーション画像を使って、遠隔手術支援するためのコンピューターネットワーク分散強調技術を実装している¹⁰⁾ (Fig. 7)。吉田らは、今後、手術支援情報が増加するに伴い、術者が手術操作と並行して、多数の手術支援情報を的確に判断し、手術計画をアップデートする負担を軽減する必要があると考えた。手術室とは別に手術計画作成ワークステーションなどの設備を備えた手術戦略室を設け、手術室、放射線部、脳神経外科医局間を結び、手術支援情報ネットワークシステム (Nagoya Surgical Information Network System) を構築した¹⁸⁾⁴¹⁾。さらに、最先端の 3D 画像解析技術を有する情報科学研究科、保健学科放射線技術科にネット

ワークを拡充し、ヴァーチャル 3D 画像により、手術支援を得るネットワークを構築している¹⁹⁾。このようにナビゲーションに IT 技術を実装することにより、困難な手術症例に対しリアルタイムに多地点で遠隔手術支援や、新しい手術手技の開発を共同で行うことが実現する¹⁷⁾。

③ ロボット技術との連携

多関節アーム式ナビゲーションにおいては、術前計画の位置情報に基づいて、多関節アームを自動的に操作してナビゲーションするロボット技術の導入が可能である²³⁾³²⁾。1990 年代より、外科治療をナビゲートするロボット技術の開発は始まり⁴⁴⁾⁴⁵⁾、整形外科や泌尿器科領域等においては、その導入の簡便さにより、病変組織の生検等をナビゲートする手術ロボットが、臨床応用されている⁷⁾¹⁴⁾。高精度な局在化が要求される脳神経外科手術では、CT や MRI により術前計画を作成し、6 自由度の多関節アームでナビゲートする NeuroMate robot が、欧米を中心に、定位脳手術などに広く臨床応用されている¹⁾²⁴⁾ (Fig. 8)。さらに、ロボット技術に光学式トラッキングと組み合わせたハイブリッド式ナビゲーション技術の報告もある⁴³⁾。

④ Environmental surgical assistance

外科手術は、術者とともに、看護師、助手を含めた手術スタッフのチーム医療である。脳神経外科手術をより円滑に進めるため、術野のナビゲーションのみならず、手術室全体を統括ナビゲーションする取り組みが、environmental surgical assistance である。手術室内に設置された複数のカメラでスタッフの動き、手術支援装置の配

Illustration of the proposed headquarter system with computer network technology

Fig. 7 Surgical assistant headquarter system for appending communication and collaborating with the imaging software providing the surgery assisted 3D virtual image

NeuroMate robot neurosurgery

Fig. 8 The NeuroMate robot and stereotactic surgery navigated by the NeuroMate

置などを監視する。手術室全体をモニタリングしたデータ解析から、最適な手術環境をナビゲートしたり、手術室内でスタッフの異常な動きを察知して、より安全に脳神経外科手術が実施される。鈴木ら⁴⁰⁾は、その先駆けとして、PC 1 台で 8ch の映像・音声情報を十分な画質で録画し、解析するシステムを開発している⁴⁰⁾。

結 語

ニューロナビゲーションの現況を報告するとともに、今後の展望を述べた。現在、ニューロナビゲーションは、必須の手術支援技術となっている。コンピューター技術

の開発に併せて、ニューロナビゲーションの発展が期待されている。

文 献

- 1) Benabid AL, Cinquin P, Lavalie S, Le Bas JF, Demongeot J, de Rougemont J: Computer-driven robot for stereotactic surgery connected to CT scan and magnetic resonance imaging: technological design and preliminary results. *Appl Neurophysiol* 50: 153-154, 1987.
- 2) Black PM, Alexander E 3rd, Martin C, Moriarty T, Nabavi A, Wong TZ, Schwartz RB, Jolesz F: Craniotomy for tumor treatment in an intraoperative magnetic resonance imaging unit. *Neurosurgery* 45: 423-433, 1999.
- 3) Bobinski RJ, Kokkino AK, Warnick RE, Gaskill-Shipley

- MF, Kormos DW, Lukin RR, Tew JM: Glioma resection in a shared-resource magnetic resonance operating room after optimal image-guided frameless stereotactic resection. *Neurosurgery* **48**: 731-744, 2001.
- 4) Bobinski RJ, Warnick RE, Gaskill-Shipley MF, Zuccarello M, Loveren HR, Kormos DW, Lukin RR, Tew JM: Intraoperative magnetic resonance imaging to determine the extent of resection of pituitary macroadenomas during transsphenoidal microsurgery. *Neurosurgery* **49**: 1133-1144, 2001.
 - 5) Chinzei K, Miller K: Towards MRI guided surgical manipulator. *Med Sci Monit* **7**: 153-163, 2001.
 - 6) Claudia HM, Schwartz R, Jolesz F, Black PM: Transsphenoidal resection of pituitary adenomas in an intraoperative MRI unit. *Pituitary* **2**: 155-162, 1999.
 - 7) Fichtinger G, DeWeese TI, Patricitu A, Tenace A, Masilu D, Anderson JH, Masamune K, Taylor RH, Stolanovici D: System for robotically assisted prostate biopsy and therapy. *Acad Radiol* **9**: 60-74, 2002.
 - 8) Hadani M, Spiegelman R, Feldman SZ, Berkenstadt H, Ram Z: Novel, compact, intraoperative magnetic resonance imaging-guided system for conventional neurosurgical operating rooms. *Neurosurgery* **48**: 799-809, 2001.
 - 9) Hall WA, Martin AJ, Liu H, Nussbaum ES, Maxwell RE, Truwit CL: Brain biopsy using high-field strength interventional magnetic resonance imaging. *Neurosurgery* **44**: 807-814, 1999.
 - 10) Hayashi Y, Nimura Y, Kitasaka T, Kajita Y, Fujii M, Mizuno M, Wakabayashi T, Yoshida J, Mori K: Surgical-assistance headquarter system based on collaboration of navigation system for image-guided surgery. *Int J CARS* **5**: S406-S407, 2010.
 - 11) 今井良輔, 安達和彦, 林 雅人, 伊関 洋, 村垣善浩, 鈴木孝司, 小西良幸: 有限要素解析に基づく腫瘍摘出後の脳変形シミュレーションの誤差定量評価. *J JSCAS* **14**: 276-277, 2012.
 - 12) 伊関 洋, 南部恭二郎, 土肥健純, 高倉公朋: ナビゲーションシステムと手術戦略システムの将来展望. *脳外誌* **7**: 150-156, 1998.
 - 13) 伊関 洋: インテリジェントオペ室・MRI 誘導手術対応システム. *Medix* **39**: 11-16, 2001
 - 14) Jakopc M, Harris SJ, Rodriguez, Baena F, Gomes P, Cobb J, Davies BL: The first clinical application of a hands-on robotic knee surgery system. *Comput Aided Surg* **6**: 329-339, 2001.
 - 15) Jiang Z, Nimura Y, Kitasaka T, Hayashi Y, Ito E, Fujii M, Nagatani T, Kajita Y, Wakabayashi T, Mori K: A method for registering the rotation of virtual and real endoscopic images in flexible neuroendoscopic surgery navigation system. *Int J CARS* **5**: S298-S299, 2010.
 - 16) Kaibara T, Saunders JK, Sutherland GR: Advances in mobile intraoperative magnetic resonance imaging. *Neurosurgery* **47**: 131-138, 2000.
 - 17) 梶田泰一, 林雄一郎, 若林俊彦, 森 健策, 吉田 純, 3D ヴァーチャル 画像を用いた術前・術中遠隔手術支援システムの開発, CI 研究 (in print).
 - 18) 梶田泰一, 林雄一郎, 森 健策, 吉田康太, 前澤 聡, 水野正明, 若林俊彦, 吉田 純: バーチャルネットワーク手術室 (Brain THEATER) におけるヘッドクォーター型脳機能モニタリング遠隔支援システム. *機能脳神経* **50**: 38-39, 2011.
 - 19) 梶田泰一, 藤井正純, 前澤 聡, 吉田 純: 脳腫瘍の画像誘導手術の現状と今後の展望. *No Shinkei Geka* **36**: 443-456, 2008.
 - 20) Kanner AA, Vogelbaum MA, Mayberg MR, Weisenberger JP, Barnett GH: Intracranial navigation by using low-field intraoperative magnetic resonance imaging: preliminary experience. *J Neurosurg* **97**: 1115-1124, 2002.
 - 21) Kinoshita M, Yamada K, Hashimoto N, Koto A, Izumoto S, Baba T, Maruno M, Nishimura T, Yoshimine T: Fiber-tracking does not accurately estimate size of fiber bundle in pathological conditions: initial neurosurgical experience using neuronavigation and subcortical white matter stimulation. *Neuroimage* **25**: 424-429, 2005.
 - 22) Knauth M, Wirtz CR, Tronnier VM, Aras N, Kunze S, Sartor K: Intraoperative MR image increase the extent of tumor resection in patients with high grade gliomas. *AJNR Am J Neuroradiol* **20**: 1642-1646, 1999.
 - 23) Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayathi S: A robot with improved absolute positioning accuracy for stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng* **35**: 153-160, 1988.
 - 24) Li QH, Zamorano L, Pandaya A, Perez R, Gong J, Diaz F: The application accuracy of the Neuromate robot: A quantitative comparison with frameless and frame-based surgical localization systems. *Comput Aided Surg* **7**: 90-98, 2002.
 - 25) Luo X, Feuerstein M, Reichl T, Kitasaka T, Mori K: An application driven comparison of several feature extraction algorithms in bronchoscope tracking during navigated bronchoscopy. Proc. of MICCAI 2010 Workshop: Medical Imaging and Augmented Reality. *LNCS* **6326**: 475-484, 2010.
 - 26) Martin CH, Schwartz R, Jolesz F, Black PM: Transsphenoidal resection of pituitary adenomas in an Intraoperative MRI unit. *Pituitary* **2**: 155-162, 1999.
 - 27) Masuda Y, Ishikawa E, Takahashi T, Ihara S, Yamamoto T, Zaboronok A, Matsumura A: Dual-port technique in navigation-guided endoscopic resection for intraparenchymal brain tumor. *Surg Neurol Int* **3**: 35 2012.
 - 28) 森 健策: 仮想化内視鏡と手術支援画像作成. *日本ロボット会誌* **22**: 455-459, 2004.
 - 29) 森 健策: 医用 3 次元画像 医用 3 次元画像の基礎と応用. *外科* **69**: 1-8, 2007.
 - 30) Mori K, Oda M, Egusa T, Jiang Z, Kitasaka T, Fujiwara M, Misawa K: Automated nomenclature of upper abdominal arteries for displaying anatomical names on virtual laparoscopic images. Proc. of MICCAI Workshop: Medical Imaging and Augmented Reality. *LNCS* **6326**: 353-362, 2010.
 - 31) Nabavi A, Black PM, Gering DT, Westin CF, Mehta V, Pergolizzi RS, Ferrant M, Warfield SK, Hata N, Schwartz RB, Wells WM 3rd, Kikinis R, Joles FA: Serial intraoperative magnetic resonance imaging of brain shift. *Neurosurgery* **48**: 787-798, 2001.
 - 32) Nathoo N, Cavulsoglu MC, Vogelbaum MA, Barnett GH: In touch with robotics: Neurosurgery for the future. *Neurosurgery* **56**: 421-433, 2005.
 - 33) Nimsky C, Ganslandt O, Cerny S, Hastreiter P, Greiner G, Fahlbusch R: Quantification of, visualization of, and compensation for brain shift using intraoperative magnetic resonance imaging. *Neurosurgery* **47**: 1070-1079, 2000.
 - 34) Nimsky C, Ganslandt O, Kober H, Buchfelder M, Fahlbusch R: Intraoperative magnetic resonance imaging combined with neuronavigation: A new concept. *Neurosurgery*

- gergy 48: 1082-1091, 2001.
- 35) Nimsky C, Ganslandt O, Hastreiter P, Greiner G, Fahlbusch R: Preoperative and intraoperative diffusion tensor image-based fiber tracking in glioma surgery. *Neurosurgery* 56: 130-137, 2005.
 - 36) 大石 誠, 福多真史, 高尾哲郎, 石田 剛, 佐藤光弥, 藤井幸彦: MR 仮想神経内視鏡による微小血管減圧術前シミュレーションの有用性. *No Shinkei Geka* 35: 1087-1095, 2007.
 - 37) Prabhu SS, Gasco J, Tummala S, Weinberg JS, Rao G: Intraoperative magnetic resonance imaging-guided tractography with integrated monopolar subcortical functional mapping for resection of brain tumors. *J Neurosurg* 114: 719-726 2011.
 - 38) Paraskevopoulos D, Unterberg A, Metzner R, Dreyhaupt J, Eggers G, Wirtz CR: Comparative study of application accuracy of two frameless neuronavigation systems: experimental error assessment quantifying registration methods and clinically influencing factors. *Neurosurg Rev* 34: 217-228, 2011.
 - 39) Schulder M, Liang D, Carmel PW: Cranial surgery navigation aided by a compact intraoperative magnetic resonance imager. *J Neurosurg* 94: 936-945, 2001.
 - 40) 鈴木孝司, 吉光喜太郎, 岡本 淳, 村垣善浩, 伊関 洋: 術室映像 8ch 同時録画・解析システムの開発. *J JSCAS* 14: 414-415, 2012.
 - 41) 津坂昌利: ネットワーク技術の基本と 3D PACS 構築のノウハウ. *Innervision* 20: 69-84, 2005.
 - 42) Wang MN, Song ZJ: Classification and analysis of the errors in neuronavigation. *Neurosurgery* 68: 1131-1145, 2011.
 - 43) Wei J, Wang T, Liu D: A vision guided hybrid robotic prototype system for stereotactic surgery. *Int J Med Robotics Compt Assist Surg* 7: 475-481, 2011.
 - 44) Zamorano L, Jain QL: Robotics in Neurosurgery: state of the art and future technological challenges. *Int J Med Robotics Compt Assist Surg* 1: 7-22, 2004.
 - 45) Zimmerman M, Krishnan R, Raabe A, Seifert V: Robot-assisted navigated neuroendoscopy. *Neurosurgery* 51: 1446-1452, 2002.

要 旨

ナビゲーション脳神経外科手術の現況と展望

梶田 泰一 森 健策 林 雄一郎 若林 俊彦 吉田 純

近年、画像診断技術の進歩により、脳神経外科手術の術前計画を詳細に作成することが可能となっている。特に、重要な脳機能近傍病変の手術においては、functional magnetic resonance image (fMRI) や tractography を用い脳機能皮質と白質線維を描出し、病変との位置関係を知り、最適な手術計画を検討する必要がある。ニューロナビゲーション技術は、術前計画を確実に実行するために、必要不可欠となっている。一方、術中にナビゲーションの位置精度を失うこともしばしば経験し、術者が過度にナビゲーションを信頼することも危険である。位置精度誤差の原因は、画像の歪み、レジストレーション等から生じるわずかな誤差の積み重ねであるが、最大の問題は、術中の髄液漏出や脳腫瘍切除に伴う脳偏位である。術中画像撮像による術前ナビゲーション画像のアップデートがこの問題の最もよい解決法である。術中 MRI 撮影をするには、装置を手術室に導入する困難さがあり、また、安全に手術をするための制限も多く、広く普及していない。超音波画像は、簡便な撮像法であるが、ナビゲーション精度を生かせるほどの画質には至っていない。

今後のニューロナビゲーションに期待されるものは、まず手術の進行に伴う脳偏位に対し、ナビゲーション精度を失わない対策である。また、術前、術中に得られる多くの手術支援情報を、ナビゲーション画像に統合し、術者が直観的に理解できる画像生成技術の開発も有用となる。コンピューター技術の発展は、術野内の重要な血管や神経線維の構造物をコンピューターが解釈し、術者に解剖学的情報を提供しながら主導的にナビゲートする手術、ニューロナビゲーションが手術計画を超えて手術スタッフや手術室全体をナビゲートする (environmental navigation) 技術や、cloud 技術を用いたネットワーク型ナビゲーション、あるいはナビゲーション画像を使って熟練脳外科医が遠隔手術を支援するヘッドクォーター型ナビゲーションなどの展開が期待される。

脳外誌 22: 510-518, 2013