脳神経外科手術支援ロボット (NeuRobot)

—現状と今後の展望—

本郷 一博 後藤 哲哉 柿澤 幸成 小山 淳一

Microsurgery-assisting Robotics (NeuRobot) : Current Status and Future Perspective

by

Kazuhiro Hongo, M.D., Tetsuya Goto, M.D., Yukinari Kakizawa, M.D., and Jun-ichi Koyama, M.D.

from

Department of Neurosurgery, Shinshu University School of Medicine

Surgical robotics has been widely used in the field of abdominal and urological surgeries to achieve less invasiveness. In neurosurgery, however, there are no such surgical robotics systems available clinically. We have been developing a surgical robotics system for treating deep-seated lesions in collaboration with Hitachi Co. Ltd., as well as the Department of Neurosurgery, Tokyo Women's Medical University, the Department of Engineering, University of Tokyo, etc. The system, named NeuRobot, consists of our main parts, i. e., a micromanipulator (slave manipulator), a manipulator-supporting device, an operation-input device (master manipulator), and a display monitor. Three 1-mm forceps and an endoscope, which can be remotely controlled with three degrees of freedom (rotation, neck swinging, and forward/backward motion), were installed in the slave manipulator. After conducting animal experiments and receiving permission from the Ethical Committee, this system has been applied for clinical cases including convexity meningioma, obstructive hydrocephalus, etc. Further modification has been carried out installing a 6-axis robotic arm to hold the slave manipulator, this is just for the experimental set-up, though.

Although there are several hurdles to overcome such as approval from the government and usability of the system, surgical robotics must have a promising future to achieve less invasive neurosurgery.

(Received January 5, 2011; accepted January 18, 2011)

Key words : surgical robotics, less invasive surgery, manipulator

Jpn J Neurosurg (Tokyo) 20 : 270-274, 2011

はじめに

手術の低侵襲性および手術成績の向上は、さまざまな術具が開発され改良されることで得られてきた。脳神経外科領域においては、手術顕微鏡、神経内視鏡、手術ナビゲーションなどの導入がその一例として挙げられる。頭蓋内手術の特徴である、狭く、深く、そして神経・血

管などの重要な構造物が密集する術野において低侵襲手術を行うために、手術顕微鏡は必須の手術機器であるが、われわれは、脳深部病変に対してもより低侵襲的に手術を行う手段として操作型手術ロボットの開発に携わってきた。脳神経外科領域以外では、鏡視下手術の発展型として、消化器外科、心臓血管外科、泌尿器科領域などですでに手術ロボットは実用化され、世界的に広く使用さ

信州大学医学部脳神経外科／〒390-8621 松本市旭 3-1-1〔連絡先：本郷一博〕

Address reprint requests to: Kazuhiro Hongo, M.D., Department of Neurosurgery, Shinshu University School of Medicine, 3-1-1 Asahi, Matsumoto 390-8621, Japan

Fig. 1 A : Drawing of conventional microsurgery for a deep seated lesion.
 B : Drawing shows neuroendoscopic surgery.
 C : Concept of robotics-assisted neurosurgery for installing “surgeon’s hands” to treat deep seated lesions.

Fig. 2 A : Photograph of the complete system, which consists of four main parts, i. e., the micromanipulator (slave manipulator), the manipulator-supporting device, the operation-input device (master manipulator), and the display monitor.
 B : Schematic drawing of the slave manipulator.
 C : Magnified view of the slave manipulator with three forceps.

れている⁴⁾⁷⁾¹²⁾。しかしながら、術野も狭く、脳深部病変の手術に対応するような脳神経外科手術ロボットは、研究段階のものはある¹¹⁾が、いまだ実用化されたものはない。脳深部、特に脳室内病変に対しては、神経内視鏡の進歩によって、より低侵襲的な手術がなされるようになってきている。しかしながら、神経内視鏡により深部病変を視認することは可能であっても、腫瘍摘出鉗子、止血器具など、精密な手術操作を行うことができる術具を搭載したものは、いまだ開発されていない。そこでわれわれは、ロボット技術を応用し、術者の「眼」ととも

に術者の「手」を持ち合わせた低侵襲脳神経外科手術機器を開発してきた (Fig. 1)。

NeuRobot の開発および構造

このようなコンセプトに基づき、信州大学医学部脳神経外科では 1995～1999 年まで新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成を受け、東京大学工学部、東京女子医科大学脳神経外科、日立製作所などとの共同研究により、低侵襲脳腫瘍摘出を目的として、マニピュ

Fig. 3 A : Preoperative Gadolinium-enhanced MR images revealing a left temporal meningioma.
B : Photogram of the endoscopic view during tumor removal.

Fig. 4 A : Sagittal view of the preoperative MR images showing the foramen of Monro.
B : Intraoperative photo showing a widening of the opened window in the third ventricular floor created using two forceps.

レータロボットの開発を行った (Fig. 2A)⁵⁾⁸⁾。脳神経外科手術を行うためのマニピュレータロボットの条件として、①対象に到達するまでのアプローチはできるかぎり狭く動かないこと、②術野で操作する術具はできるかぎり小さいが、手術に必要な荷重に耐えられること、③術野に到達してからの術具は大きな作動範囲を持つが、その際にアプローチルートが偏位しないこと、④術具の操作が正確にコントロールできること、⑤ナビゲーション機能があることを挙げ、これらを達成するための構造を検討して製作し、NeuRobot と命名した。

NeuRobot はマニピュレータ型ロボットであり、スレーブ部分とマスター部分から成る。スレーブ部分は術野で手術操作をするマニピュレータとそれを支える支持装置から構成されている。スレーブ部分は、先端が直径 10 mm の円筒であり、円筒には直径 3 mm のロボットアームが 3 本、5 本の洗浄吸引用の細管、直径 4 mm の

立体内視鏡が組み込まれている (Fig. 2B, C)。おのこのロボットアームは術野の中で前進後進、屈曲、回転の 3 自由度の操作が可能であり、さらにアーム先端部に直径 1 mm 大のさまざまな術具 (鉗子⁹⁾、はさみ、メスなど) を装着して使用することができる。操作を行う術者はスレーブ部分から送られた内視鏡画像を見ながら、マスター部分である操作台のレバーを操作して手術を行う。操作台のレバーは 3 本あり、おのこのロボットアームに対応している。アームの操作とレバーの動きは完全に対応しており、精度は 20 μ m である。脳の深部まで間口 1 cm で進入し、内視鏡の像を見ながらロボットアームを動かして手術操作を行う。

NeuRobot の臨床に向けての基礎実験

2000～2003 年までは文部科学省産学官連携イノベー

ション創出事業により、開発したシステムを臨床応用、遠隔使用するための研究を行った。臨床応用に向けた基礎的な研究としては、ロボットアームの操作による至適手術操作範囲の検討¹⁰⁾、洗浄吸引機能の検討、バイポーラ機能を含む先端術具の開発、屍体脳を用いた手術シミュレーション⁶⁾、止血機能と動作の正確性、安全性の検討²⁾などを行い、このシステムの臨床使用の可能性と限界性能の検討を行った。さらにこれらの研究と並行して、安全な臨床使用に向けて、システムの洗浄と滅菌方法の確立と改良³⁾、手術中を通じて清潔操作を行うための装置の改良、ロボットアーム保持装置部分のドレーピング方法の確立を行い、麻酔科、手術室スタッフとの合同で手術室での手術シミュレーションを行った。

NeuRobot の臨床使用

2002 年 6 月、信州大学医学部倫理委員会においてこのシステムの臨床使用許可の承認を受けた。2002 年 8 月から臨床使用を開始し、2003 年度までに計 4 症例に使用した。第 1 例目は脳表に腫瘍が露出している円蓋部髄膜腫で、腫瘍の部分摘出、腫瘍の脳からの剥離操作などを NeuRobot を用いて行った (Fig. 3)¹⁾。その後、通常の手術顕微鏡下手術で予定どおり腫瘍摘出術を施行した。第 2 例目も円蓋部髄膜腫であったが、NeuRobot 単独で腫瘍の部分摘出、腫瘍の脳からの剥離操作を行った。第 3 例目は閉塞性水頭症の第三脳室底開窓術を行った。脳室内にスレーブ部分の円筒を安全に挿入するための専用シースを作製し、このシースをガイドにしてマニピュレータを脳室内に挿入した。モンロー孔のサイズが 8 mm とスレーブ部分の円筒の直径よりも狭いため、円筒部分をモンロー孔手前の側脳室に置き、マニピュレータのロボットアーム先端を第三脳室内に進め、両腕を用いて第三脳室底を開窓した (Fig. 4)。アームを橋前槽に刺入することなく、確実に第三脳室底開窓を行うことができた。第 4 例目は脳室内腫瘍で、第 3 例目と同様に専用シースを用いて脳室内に到達後、髄液の洗浄吸引を行いながら、脳室内腫瘍の部分摘出と、脳室と腫瘍の剥離操作を行った。すべての手技を NeuRobot を用いて行ったわけではないが、NeuRobot で予定した手技は完遂し、いずれの症例とも経過順調で術後合併症はみられなかった。

NeuRobot 実用化に向けての問題点および今後の展望

2004 年 4 月に改定となった薬事法により未承認の医

Fig. 5 Photograph showing the slave manipulator mounted on the 6-axis robotic arm.

療機器の臨床試みが制限され、その後は、実用化に向けての改良を非臨床研究として行っている。2004～2006 年度においては日本学術振興会科学研究費補助により、NeuRobot のスレーブマニピュレータ部分の改良を行った。支持装置に装着して使用していたマニピュレータを産業用 6 軸ロボット (株式会社安川電機) に保持させて、マニピュレータを術野へ導入するようにした。さらに、マニピュレータを回転式のアタッチメントを介して 6 軸ロボットに装着することで、先端のロボットアームを回転させることができ、手術操作を行いやすくした (Fig. 5)。本研究では、産業用 6 軸ロボットを、操作プログラムを改変して最高作動スピードを低下させたり、6 軸ロボット本体に何か当たった場合に動作が緊急停止する、緊急提示用スイッチをアームおよびアーム支持台に装着するなどの改造を加えて実験を行った。この 6 軸ロボットの使用により、マニピュレータの術野への導入は、より安定かつ確実に行えるようになった。

これまでの研究で、NeuRobot の精度、安全性についての問題はないが、現在のシステムでは 1 回の使用のたびに精密なメンテナンスが必要となるため、使用コストが高くなるのが問題点として挙げられる。ロボットアームの微細関節に付着する生体組織の問題、関節を動かすワイヤーの使用に伴う伸びの問題はケーブル駆動方式の手術ロボットでは必ず発生する問題である。患者接触部分の部品の耐久性を向上させ、メンテナンスの簡便化を達成することが実用化には必要である。

おわりに

脳神経外科手術ロボットとして開発した NeuRobot の開発経緯, 現状, および実用化に向けての課題などについて述べた。本システムは, いまだ実用化の段階には至っていないが, 実用化のためには, 許認可の問題とともに, より一層の操作性の向上, メインテナンスの簡便化などを目指す必要がある。しかしながら, 術者の「眼」と「手」を持った微細な手術ロボットにより, 脳深部に対する, より低侵襲な手術が可能になると思われる。

本論文の要旨は, 第 30 回日本脳神経外科コンgres (2010 年 5 月, 横浜, 木内博之会長) で講演した。

文 献

- 1) Goto T, Hongo K, Kakizawa Y, Muraoka H, Miyairi Y, Tanaka Y, Kobayashi S: Clinical application of robotic telemanipulation system in neurosurgery. *J Neurosurg* **99**: 1082-1084, 2003.
- 2) Goto T, Hongo K, Koyama J, Kobayashi S: Feasibility of using the potassium titanyl phosphate laser with micromanipulators in robotics neurosurgery: A preliminary study in the rat. *J Neurosurg* **98**: 131-135, 2003.
- 3) 後藤哲哉, 本郷一博, 柿澤幸成, 小山淳一, 新田純平, 田中雄一郎, 小林茂昭, 村瀬澄夫, 澤谷ゆき江: NeuRobot (Microscopic-Micromanipulator System) のエチレンオキサイドガスによる滅菌について: 臨床使用に向けて. *信州医誌* **50**: 347-352, 2002.
- 4) Gutt CN, Oniu T, Mehrabi A, Kashfi A, Schemmer P, Büchler MW: Robot-assisted abdominal surgery. *Br J Surg* **91**: 1390-1397, 2004.
- 5) Hongo K, Kakizawa Y, Koyama J, Nishizawa K, Tajima F, Fujie MG, Kobayashi S: Microscopic-manipulator system for minimally invasive neurosurgery. in Lemke HU, Vannier MW, Inamura K, Farman AG, Doi K, Reiber JHC (eds): *Computer Assisted Radiology and Surgery*. Amsterdam, Excerpta Medica, 2001, pp.265-269.
- 6) Hongo K, Kobayashi S, Kakizawa Y, Koyama J, Goto T, Okudera H, Kan K, Fujie MG, Iseki H, Takakura K: NeuRobot: Telecontrolled micromanipulator system for minimally invasive microneurosurgery. *Neurosurgery* **51**: 985-988, 2002.
- 7) Jacobs S, Falk V: Pearls and pitfalls: Lesions learned in endoscopic robotic surgery—the da Vinci experience. *Heart Surg Forum* **4**: 307-310, 2001.
- 8) Kan K, Fujie MG, Tajima F, Nishizawa K, Kawai T, Shose A, Takakura K, Kobayashi S, Dohi T: Development of HUMAN system with three micro manipulators for minimally invasive neurosurgery. in Lemke HU, Vannier MW, Inamura K, Farman AG, Doi K, Reiber JHC (eds): *Computer Assisted Radiology and Surgery*. Amsterdam, Excerpta Medica, 2001, pp.144-149.
- 9) Kawai T, Nishizawa K, Tajima F, Kan K, Fujie MG, Takakura K, Kobayashi S, Dohi T: Development of exchangeable microforceps for a micromanipulator system. *Advanced Robotics* **15**: 301-305, 2001.
- 10) Koyama J, Hongo K, Kakizawa Y, Goto T, Kobayashi S: Endoscopic telerobotics for neurosurgery: Preliminary study for optimal distance between an object lens and a target. *Neurol Res* **24**: 373-376, 2002.
- 11) Morita A, Sora S, Mitsuishi M, Warisawa S, Suruman K, Asai D, Arata J, Baba S, Takahashi H, Mochizuki R, Kirino T: Microsurgical robotic system for the deep surgical field: Development of a prototype and feasibility studies in animal and cadaveric models. *J Neurosurg* **103**: 320-327, 2005.
- 12) Thiel DD, Winfield HN: Robotics in urology: Past, present, and future. *J Endourol* **22**: 825-830, 2008.

要 旨

脳神経外科手術支援ロボット (NeuRobot)

—現状と今後の展望—

本郷 一博 後藤 哲哉 柿澤 幸成 小山 淳一

欧米において, 腹部・泌尿器科領域などでは, すでに手術ロボットによる治療が低侵襲手術法として定着しているが, 脳神経外科領域ではいまだ臨床現場で日常的に使用される手術ロボットはない。われわれは, より低侵襲手術を目指した脳神経外科手術支援ロボット (NeuRobot) を東京女子医科大学脳神経外科, 東京大学工学部, 日立製作所などと共同開発を行ってきた。NeuRobot は, 操作部 (マスター部)・手術部 (スレーブ部) からなるマスター・スレーブ型マニピュレータで, 10 mm の円筒に直径 4 mm の立体内視鏡, 直径 1 mm の先端術具を装着した 3 自由度を持つマイクロマニピュレータ 3 本を装備している。新薬事法施行前の 2003 年までに円蓋部髄膜腫 2 例, 脳室内腫瘍 1 例, 第三脳室底開窓術 1 例の 4 例を合併症なく行いえた。現在いくつかの改良を実験室レベルで行っている。本稿では, 本システムを紹介するとともに, 現状および今後の展望について述べる。

脳外誌 20: 270-274, 2011