三本のマニピュレータと内視鏡を直径 10 mm の挿入部に装備した 脳神経外科用 HUMAN システム*

西澤 幸司^{*1}, 菅 和俊^{*2}, 藤江 正克^{*3}
伊関 洋^{*4}, 小林 茂昭^{*5}

HUMAN System for Neurosurgery which has an Insertion Part of 10 mm in Diameter Housing Three Manipulators and an Endoscope

Kouji NISHIZAWA^{*6}, Kazutoshi KAN, Masakatsu FUJIE,
Hiroshi ISEKI and Shigeaki KOBAYASHI

^{*6} Advanced Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
1-280 Higashi-Koigakubo, Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8601 Japan

Surgery using manipulator systems for medical treatment has recently attracted considerable attention as a method for realizing minimally invasive surgery. In the field of bellybutton surgery, some manipulator systems for medical treatments are used in Europe and the United States. However, it is inappropriate to apply these systems to neurosurgery. This is because the size of the manipulators is too large, and only one of them can be used in one insertion part. To solve this problem, we developed the HUMAN system which has an insertion part with a diameter of 10 mm and contains one endoscope and three manipulators. A clinical application using this system took place in August, 2002, and ended in success. Since the manipulator is small and an operation is possible from one small incision, this system is effective in realizing minimally invasive neurosurgery. In this paper, we propose the concept for realizing minimally invasive surgery, and discuss the mechanism of the system which was developed based on this concept.

Key Words: Manipulator, Mechatronics and Robotics, Medical Engineering, Medical Equipment, Minimally Invasive Surgery, Neurosurgery, Clinical Application

1. 結 論

患者の体力的・精神的負担を軽減し、術後の早期回復を実現するために、患者の身体をなるべく傷つけない低侵襲手術の実現が望まれている。

低侵襲手術には通常の手術と異なる巧みな術具操作技術が要求される。低侵襲手術は身体に開けられた小さな挿入孔から内視鏡や鉗子など細径の術具を挿入して行なう。執刀医は内視鏡画像を見ながら体内に挿入した術具を操作して治療を進める。腹腔手術の分野ではこのような低侵襲手術がすでに行われている^①。

低侵襲手術を実施する一つの方法として、ロボット技術を駆使した手術用マニピュレータを用いる手術が注目されている。これまで欧米を中心に臨床応用されている医療用マニピュレータには da VinciTMや ZEUS[®]があげられ、操作性等の点で高い評価を受けている^{②-④}。これらは従来の腹腔鏡下手術の術具をマスタスレーブ方式のマニピュレータに置き換えた

システムであり、複数のマニピュレータと内視鏡をそれぞれ別の切開から体内に挿入して治療を実施する。

脳神経外科でも腹腔同様手術の低侵襲化が強く望まれており、神経内視鏡を用いた熱的治療や生検等の処置はすでに実現している^⑤。しかし、その治療内容は単純な動作に限定されるため、腫瘍摘出等の繊細で複雑な操作が求められる手術では大きく開頭し、手術顕微鏡を用いたマイクロサージェリを実施する^⑥。

脳神経外科手術では腹腔全般の手術と比較して次のような特徴への配慮が必要だと考えている。(1)患部周囲には正常な重要組織が密集している。(2)組織が損傷しやすく、圧迫に弱い。(3)術野が狭い。(4)患部にアプローチできる開頭位置が限定される。(5)正常組織を損傷しないように、微細で正確な手術操作が重要である。

従来の開頭手術を代替する低侵襲手術を実現するには、術者が一つの小さな開頭部から挿入した複数の細長い術具を狭い術野の中で巧みに操り、患部周囲の正常組織へ圧迫や損傷を与えずに患部のみを正確に治療するという器用な手術操作が必要となる。このような器用な手術操作を人の手で実現することは困難である。

da VinciTMや ZEUS[®]のような手術用マニピュレータは術具や装置の大きさから脳神経外科への適用は難し

* 原稿受付 2003年5月7日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所(☎300-0013 土浦市神立町502)、東京女子医科大学大学院(☎162-8666 東京都新宿区河田町8-1)。

^{*2} (株)日立製作所機械研究所(☎300-0013 土浦市神立町502)。

^{*3} 正員、早稲田大学理工学部(☎169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)。

^{*4} 東京女子医科大学大学院先端生命医科学専攻。

^{*5} 正員、信州大学医学部(☎390-8621 松本市旭3-1-1)。

E-mail: n-kouji@rd.hitachi.co.jp

い。da VinciTMの場合、術具の直径が 11mm^④と大きいため、複数のマニピュレータと内視鏡を挿入するには大きな開頭が必要となってしまう。また、どちらのマニピュレータも術具の反対側に位置する駆動機構が大きく、複数のマニピュレータが近づくと互いに干渉する構造である。このため小さな開頭部から複数のマニピュレータを挿入できない。一方、干渉を避けて複数の開頭部からマニピュレータを挿入する方法は広い術野を必要とするため、圧迫を与えない手術が望まれる同分野では適当ではない。

脳神経外科分野で低侵襲手術を実現するには一つの小さな開頭部から内視鏡と複数の術具を挿入し、微細で正確な手術操作を可能とするシステムが必要である。我々はこの考えに基づいてマニピュレータシステム‘HUMAN’を開発し、2002 年 8 月には本分野で世界初の臨床応用に成功した。

本論文では、脳神経外科での低侵襲手術方法のコンセプトを述べ、これを実現する HUMAN システムの構成と機構について論じる。最後に HUMAN システムを用いて実施した臨床応用を通して本システムの有効性について評価する。

2 HUMAN システムによる低侵襲手術

図 1 は HUMAN システムが目指す低侵襲手術のイメージを示している。一つの小さな開頭から治療を実施するために、開頭部位や挿入方向等の手術計画を事前に策定し、これに基づいて開頭を行う。その後、脳ヘラ等を用いて術野を確保した後、外科医の目の代わりになる内視鏡と手の代わりになる複数のマニピュレータを挿入して治療を行う。

Fig. 1 Concept image of minimally invasive neurosurgery

本システムでは、外科医との検討の結果、直径 10mm の開頭から内視鏡と三本のマニピュレータを挿入し、1cm³ 程の容量の腫瘍を対象に手術操作を行う低侵襲手術の実現を最終目標とした。大きく広がる腫瘍は大きく開頭せざるを得ないが、このように小さな腫瘍の場合は低侵襲手術を実施する効果が大きく、患

者の QOL 向上にも有効であると判断した。

マニピュレータを 3 本装備する利点は通常手術でのアシスタントの役割も備える点にある。手術では、執刀医が行う治療動作に加えて、アシスタントが臓器を圧迫し術野を確保するなどのサポートが必要である。本システムでは 3 本のうち 1 本が他の 2 本の作業をサポートすることが可能となる。

本システムが実用化されると、従来の全悪性脳腫瘍手術の約 30% に微細治療を支援する高機能術具として併用することも可能と考えられる他、従来手術が不可能な部位の小さい腫瘍や機能領域に隣接する残存腫瘍を正確に過不足なく取り除くことなども可能になる。

このような治療を実現するために、次のような開発課題を抽出した。

- (1) 低侵襲手術の実施に合わせた寸法および自由度を有するマニピュレータシステム
- (2) 複数のマニピュレータを細く束ねることが可能で、動作中に互いに干渉しない細束システム機構
- (3) 患部状況や治療の進捗具合にあわせて、最適な術具を使える術具交換機構

3. HUMAN システムの機構

3.1 マニピュレータシステム

図 2 は HUMAN システムの外観を示している。図 3 には挿入部先端の拡大した様子を示している。主な部位の寸法と自由度を表 1 にまとめる。

本システムは、内視鏡画像を見ながら術者が操作入力装置を操作して術具側のマニピュレータによる手術操作を行う、マスタスレーブ方式のシステムである。

直径 10mm の挿入部には直径 4mm の内視鏡を一本と、直径 3mm のマニピュレータを三本束ねている。マニピュレータの先端には直径 1mm の着脱可能な術具を装備する。マニピュレータと内視鏡を束ねた隙間には液滴や吸引を行う五本の灌流管を設けている。

Fig. 2 Human manipulator system

Fig. 3 Magnified image of cylindrical insertion part

Table 1 Size and DOF (Degree of Freedom) of devices

Device	Insertion part	Endoscope	Manipulator	Surgical tool
Diameter	10 mm	4mm	30 mm	1.0mm
DOF	6	—	3	2

図 4 はマニピュレータ先端の微細関節の構造を示している。微細関節は基部側と駆動側の二つのパーツを凹凸のはめ合わせからなる回転軸で組み合わせて構成する。また、内部に術具を装備するために中空形状の設計を行った。基部側は内径 2 mm、駆動側には術具を保持できるように内径を 1.6mm から 1.0mm へ絞り込む形状を施した。回転軸は、肉厚 0.3mm の梁にワイヤ放電加工を用いて高さ 0.15mm の凹凸を形成した。材料にバネ材を用い、はめあわせ部位の根元にスリットを設けることで、はめあわせ部位が組立時に塑性変形を起こさないよう設計した。

Fig. 4 Hollow micro joint

三本のマニピュレータの駆動部と内視鏡をアダプタで一体にまとめ、アダプタを保持装置に装備する。保持装置は六自由度を有し、術前計画に基づいて挿入部を所定の位置姿勢に導き、開頭後は術者の操作に従い挿入部を術野に挿入する。挿入時の安全を確保するために、挿入部内にマニピュレータ全体を納めたまま挿入し、治療を行う段階で挿入部から出して運用する。

マニピュレータは三自由度を有し、図 3 の α (首振り) β (回転) Z (並進) の動作が可能である。図 5 はマニピュレータの駆動部の模式図である。首振りとは一方のワイヤをバネに接続し、他方をモータで巻き取り、関節角度を制御する。この駆動部位を関節駆動ユニットと呼ぶ。関節を取り付けた管を別のモータで

回転制御し、さらに、ボールねじの回転を制御して並進動作を行う。管とボールねじは並進方向のみ拘束しており、管の回転と並進機構は干渉しない。また、関節駆動ユニットは管と同期して回転・並進する構造としているため、関節角度が回転・並進の影響を受けることはない。各自由度の可動範囲を表 2 に示す。

Fig. 5 Drive mechanism of Micro joint

Table 2 Working area of manipulator

DOF	α	β	Z
Working area	1/2prad	2prad	50mm

3.2 細束システム機構

マニピュレータを挿入部に束ねて運用するために、マニピュレータの駆動部同士および内視鏡カメラとの間で干渉せず、マニピュレータを束ねた状態で回転・並進の動作を滑らかに実現する機構が必要である。

本システムでは、図 6 に示すようにマニピュレータの一部を可撓性部品で構成することでこれを解決した。アダプタ部で可撓部を湾曲させ、駆動部が干渉しない位置に固定している。剛性部にはステンレスパイプを用い、可撓部にはステンレスブレードで編んだチューブに樹脂皮膜を施したトルクチューブを応用している。トルクチューブは回転動作によって生じる捻りを先端関節部に高効率で伝達し、首振りや並進の動作によって生じる圧縮・引張りに対しては変形しない剛性を有するようにブレードの仕様設定を行った。

Fig. 6 Structure of thin bundle system

アダプタに固定した駆動部内で図 5 に示したように細い管部を三自由度で制御すると、トルクチューブは管部の動作に応じて所定の湾曲経路に沿って動作をするため、管の回転・並進の動作を邪魔することがない。

可撓性材料部はステンレスパイプより外径を 1 mm 細くすることで樹脂皮膜と挿入部経路との間の摩擦抵抗を低減し、スムーズな駆動を実現している。

3.3 術具交換機構

3.3.1 術具交換を可能にするための技術課題

術具を交換可能にする目的は、患部の具合や手技に合わせて術具を選択し、最適な治療を実現することにある。寸法や形状の違いも含め、術具の種類は豊富に存在するため、術具の数だけマニピュレータを用意することは実用上適当ではない。また、術具交換に手間取ると侵襲が増大することが危惧される。

そこで、術具部分のみを交換できることと、誰でも容易に交換できることが重要であると考え、次の四つの機構を開発した。(1) マニピュレータと術具の機能分離と、駆動部の後端からマニピュレータ内部を通して術具部分を抜き差しする中空構造、(2) 湾曲した経路を通して抜き差しでき、先端まで動力を伝達可能で、かつマニピュレータの動作を阻害することの無い専用術具、(3) マニピュレータに通した術具をワンタッチで着脱可能とし、迅速な術具交換を実現するアダプタモジュール、(4) 様々な手技・状況に対応可能にするために、専用に開発した術具以外にもマニピュレータに装備可能とする術具保持器。

3.3.2 機能分離と中空構造

術具をマニピュレータから取り外し可能とするため、術具を三自由度で誘導する完全中空マニピュレータ機構と中空部に挿入して使用する術具機構とに分離する設計を行った。マニピュレータの中空機構は図 4 図 5 に示したように先端関節から駆動部までの構造全体を中空形状で設計し、さらに駆動部から術具機構との結合位置までの中空経路を設けた。術具機構は図 7 に示すような外観をしており、ワイヤ駆動方式で術具の開閉を制御する駆動部、マニピュレータの先端までワイヤ張力を伝達する外径 1 mm の張力伝達経路部、および先端の開閉部からなる術具機構として独立させた。

Fig. 7 Surgical tool unit

マニピュレータ機構と術具機構の結合は、図 8 に示すようにマニピュレータ機構の後端から先端の関節まで中空部を通して挿入し、後述するアダプタモジュールによって固定する。このとき、マニピュレータ先端

では図 3 のように関節と術具が一体となって使用される。中空部には駆動部後端から関節先端まで術具ガイド用チューブを設け、術具の導通経路が図 6 のように途中で湾曲しても、関節先端まで術具を確実に誘導することを可能とした。

Fig. 8 Hollow manipulator mechanism

この機能分離と完全中空構造により、マニピュレータ後端からの抜き差しによる術具交換を可能とした。さらに、術具を誘導する機構と術具機構を独立したことで、駆動部を有する専用術具の他、市販の術具であっても外径が 1 mm 以下のフレキシブルな術具を挿入して装備することも可能となった。

3.3.3 専用 φ1 術具

術具には挿入可能であるために、術具先端と張力伝達経路部全体に外径 1 mm 以下という条件が求められる。さらに、専用術具の装備時に微細で正確な手術操作を実行可能とするために、内挿した術具が関節の首振り動作に干渉しない構造が必要となる。

これらの条件を満たすため、張力伝達系路部には捻じりと撓みに対する剛性が高いトルクチューブを用い、マニピュレータの関節位置に対応する部位には図 9 に示すように全周方向に湾曲可能なフレキシブルネック構造を有する専用術具を開発した。

トルクチューブの特性から、術具を挿入する際には術具ガイド用チューブに沿って湾曲しながら抜き差しが可能である。さらに、駆動ワイヤをトルクチューブ内部に初期張力を与えて配線することが可能であり、マニピュレータに挿入した状態で実用上問題のない応答性を得ている⁹⁾。また、術具の駆動部を長手方向まわりに回転させると、途中で捻じれることなく挿入された術具先端まで術具用駆動部の回転を伝えることができ、状況に合わせて関節の首振り方向と術具の開閉方向の調整・変更が可能である。

フレキシブルネック構造の湾曲部には、繰り返しの首振り動作で曲がり癖を防止するため超弾性を有する形状記憶合金製のバネを用いている。これにより、首振りへの干渉を防止することに加えて耐久性を向上させた。さらに、駆動ワイヤは湾曲したフレキシブルネ

ック内部を誘導されるので、 $1/2\pi\text{rad}$ に首振りした状態でも術具の開閉操作を行なうことが可能となる。

専用術具としては、ピンセット型、生検鉗子型、剪刀型、バイポーラ鉗子などの駆動部を有する術具や、モノポーラ、S字フック、ヘラ、針などの駆動部を有しない術具を開発し⁹⁾、装備・交換を可能にした。

Fig. 9 Surgical tool exclusively for micromanipulator

3・3・4 アダプタモジュール

挿入した術具は、マニピュレータと一体となって回転、並進の動作を行い、かつ、ワンタッチで脱着できることが求められる。これらの条件を基に、図 10 に示すようなアダプタモジュールを開発した。

Fig. 10 Exchangeable adapter module

位置決め羽根をマニピュレータ側アダプタの溝に合わせて術具側アダプタを回転させると、マニピュレータ側アダプタに内蔵したボールプランジャが位置決め羽根とかみ合い、所定の位置で固定される。取り外しは、取付け時と逆に回転させるだけで良い。

マニピュレータ側アダプタは図 8 に示すように、マニピュレータの関節駆動ユニットに固定する。関節駆動ユニットは、マニピュレータの回転、並進と同期して動作するため、マニピュレータ側アダプタに結合させる術具側アダプタもマニピュレータと一体となって動作することが可能である。

Fig. 11 Usage of exchangeable adapter module

これらによって迅速で容易な着脱と、マニピュレータとの一体動作を実現する。図 11 はこのアダプタを取り付けた両駆動部の状態を示している。

3・3・5 術具保持器

直径が 1mm 以下のフレキシブルな市販の術具をマニピュレータに装備するために、図 12 のような術具側アダプタを取り付けた術具保持器を開発した。この保持器は取手部を A 方向に押し込むと、板バネが B 方向に湾曲して導入パイプが口を開ける。術具を導入パイプから術具誘導チューブに通した後、手を放すと板バネが戻り、取手の間に取り付けたゴムで術具を保持する仕組みである。

これにより、専用以外の術具をマニピュレータに装備することが可能となる。一例として、市販のレーザメス用光ファイバを装備し、使用可能であることを実験により確認している。

Fig. 12 Tool holder

4. 臨床応用による評価

これまで述べたように、HUMAN システムの開発において、(1)外径 3mm の中空関節を有する三自由度マニピュレータシステム、(2)互いに干渉することなく複数のマニピュレータと内視鏡を細い挿入部に束ねる細束システム機構、(3)術中の術具交換を可能にする術具交換機構を開発した。

これらの機構開発に加えて、外科医とともに滅菌対応の確認および、操作実験、手術シミュレーションを繰り返した^{9)~(12)}。これらの実験を通して、マニピュレータを分離可能なユニットごとにガス滅菌あるいは高圧蒸気滅菌が可能であることを確認した。操作実験および装置を用いた手術シミュレーションでは、実際の手術を想定してシステムの運用方法や術式の確認などを繰り返した。

これらの実験結果を基に外科医の判断によって本システムを臨床にて使用することができた。図 13、図 14 は手術の様子を示している。今回は通常の開頭を行い、術者自身の手と、鉗子やレーザメスを装備したマニピュレータを併用して腫瘍摘出を行った。

操作中、レーザメスによる煙や、内視鏡のレンズの曇りや汚れなどが発生したが、挿入部に設けた灌流管を用いて煙の吸引や液滴を行うことで、終止クリアな視界を確保することができた。

今回の臨床での使用は、マニピュレータ単独ではなかったが、細い挿入部に三本のマニピュレータを束ねたマニピュレータシステムの効果を確認できた。術者の傍らに本システムを配置し、術者の手術操作と連携して運用できたことで、一つの開頭部から微細な治療を行う低侵襲手術への見通しを得ることができた。

また、術中の状況に合わせてS字形フック、ヘラ、ピンセット型鉗子、バイポーラ鉗子、レーザメスを使用した。それぞれの交換は手術スタッフによって行われたが、約1分以内での交換・再操作が可能であった。これから術具交換機構の効果を確認できた。

以上のように、臨床を通してHUMANシステムの基本機能の実用性を確認できた。

Fig. 13 Clinical use of the HUMAN system

Fig. 14 Clinical use of the HUMAN system

5. 結 論

脳神経外科を対象とした低侵襲手術を支援する医療用マニピュレータの開発において以下の結論を得た。

(1) 低侵襲手術方法のコンセプトを示し、これに基づき、直径 10mm の挿入部に三本のマニピュレータと内視鏡を組み込んだマニピュレータシステムHUMANを開発した

(2) 中空マニピュレータ機構および術具着脱機構に

よる術中の術具交換機能の開発、湾曲した経路を抜き差し可能な専用術具、およびレーザメス用光ファイバ等の装備が可能な術具保持器を開発し、適宜最適な術具が使用できるシステムを開発した

(3) 本システムを用いた臨床応用に成功し、本システムの実用性を確認できた

今後は適用可能な症例や分野の拡大などの展開を図る予定である。

6. 謝 辞

本研究の一部は医療福祉機器技術研究開発制度の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託により実施しました。

共同研究者である東京女子医科大学の高倉公朋先生ならびに東京大学の土肥健純先生に多大なご指導をいただきました。臨床応用には本郷一博先生をはじめとする信州大学医学部脳神経外科学教室の多くの先生方に多大なご協力とご指導をいただきました。共同研究者である日立製作所の宮本朝技師および河合俊和研究员には研究推進に多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

7. 参考文献

- (1) Muhe E. Die erste Cholecystektomie durch das laparoskop, *Langenbecks Arch Chir*, 369, (1986), 804
- (2) 高倉公朋・菊池晴彦監修, 機能的脳神経外科の最先端, (2002), 28-34, 先端医療技術研究所
- (3) 古川俊治・大上正裕・北島正樹・中澤和夫, ロボティックサージェリーの現状と将来, *日本ロボット学会誌*, 18-1, (2000-1), 8-11
- (4) F.W. Mohr, V. Falk, A. Diegeler and R. Autschbach, Computer-enhanced coronary artery bypass surgery, *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, 117, (1999), 1212-1215
- (5) H. Shennib, A. Bastawisy, J. McLoughlin and F. Moll, Robotic computer-assisted telemanipulation enhances coronary artery bypass, *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, vol. 117, (1999), 310-313
- (6) 福山誠一・島田光生・橋爪誠・杉町圭蔵 他, 縦隔外科領域への内視鏡下手術支援装置(da Vinci™)の応用, 第10回日本コンピュータ外科学会大会論文集, (2001-11), 79-80
- (7) Robert J. Maciunas, Interactive Image-Guided Neurosurgery, (1994), 217-232, American Association of Neurological Surgeons.
- (8) 河合俊和, 微細マニピュレータ用交換可能微細鉗子の動特性向上, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (2001-9), 959-960

- (9) Kazutoshi Kan, Masakatsu G. Fujie, Fujio Tajima, Kouji Nishizawa et al., Development of HUMAN System with Three Micro Manipulators for Minimally Invasive Neurosurgery, Proc. CARS2001, (2001-6), 144-149
 - (10) Kazuhiro Hongo, Yukinari Kakizawa, Jun-ichi Koyama, Kouji Nishizawa, et al., Microscopic manipulator system for minimally invasive neurosurgery -Preliminary study for clinical application -, Proc. CARS2001, (2001-6), 265-269
 - (11) Kazuhiro Hongo, et al., NeuRobot: Telecontrolled Micromanipulator System for Minimally Invasive Microneurosurgery -Preliminary Results, Neurosurgery, 51-4, (2002-10), 985-988
 - (12) Jun-ichi Koyama, Kazuhiro Hongo, et al., Endoscopic telerobotics for neurosurgery: Preliminary study for optimal distance between an object lens and a target, Neurol Res, 24, (2002-6), 373-376
-