深部狭所での操作を対象とした 脳神経外科手術用多自由度ロボット鉗子の開発

Multi-DOF robotic forceps for neurosurgery
designed for dexterous manipulation in deep and narrow space

○学	大久保 拓郎 (東大)	正	原田 香奈子 (東大)
学	藤井 雅弘 (東大)	学	田中 真一 (東大)
	石丸 哲也 (東大)		中富 浩文 (東大)
	楚良 繁雄 (東京警察病院)		森田 明夫 (日医大)
正	杉田 直彦 (東大)	正	光石 衛 (東大)

Takuro OKUBO, The University of Tokyo
Kanao HARADA, The University of Tokyo
Masahiro FUJII, The University of Tokyo
Shinichi TANAKA, The University of Tokyo
Tetsuya ISHIMARU, The University of Tokyo
Hirohumi NAKATOMI, The University of Tokyo

Shigeo SORA, Tokyo Metropolitan Police Hospital
Akio MORITA, Nippon Medical School Hospital
Naohiko SUGITA, The University of Tokyo
Mamoru MITSUISHI, The University of Tokyo

Neurosurgical procedures require the dexterous manipulation of a surgical suture in a narrow and deep space in the brain to perform surgical tasks such as an anastomosis of micro blood vessels and dura mater suturing. A multi-DOF robotic forceps has been developed to perform such difficult surgical tasks with robotic aid. The diameter of the developed robotic forceps is 3.5 mm, and the tip has three degrees of freedom (DOFs), namely, bending, rotation and grip. In particular, the intersecting axes of the bending and rotation DOFs were designed for facilitating the needle placement in a narrow and deep space. Experiments were performed to evaluate the needle insertion force, and the result showed that the robotic forceps had a needle insertion force of 1.7 N on average. The needle insertion force needs to be further increased for practical applications.

Key Words: Neurosurgery, Surgical Robot, Microsurgery, Endoscopic Surgery, Microscopic Surgery

1. 緒言

1.1 研究の背景

脳神経外科手術の中でも脳深部における微細血管の吻合は極めて困難な手術であるといわれている。鼻腔から術具と内視鏡を挿入して脳下部にアプローチする経鼻下垂体手術における硬膜縫合も熟練を要する手術である。これらの手術では、術具のワークスペースが限られるだけでなく、術具先端近くの非常に狭い空間において、血管吻合や硬膜縫合などの複雑な手術タスクを高精度に行うことが要求されるため、これらの手術を支援するロボットを開発することが期待されている。

脳神経外科手術支援ロボットの先行研究には McBeth らの NeuroArm [1]や Morita らの MM-2 [2]などが知られている。NeuroArm と MM-2 は脳神経外科手術における微細なタスクを可能としたが、術具先端部の自由度が不足しており、本研究が対象とするような深部狭所においては複雑なタスクを行うことができない。

1.2 研究の目的

脳の浅い領域での術具操作では術具全体を大きく動かして自由に姿勢を選択することができる一方、本研究が対象とする深部狭所での手術では術具が挿入可能な領域が細長い円筒形となるため、術具の姿勢が制限される。このため、深部狭所における手術で用いる術具は先端部の自由度が重要になる。そこで脳の深部狭所での複雑な操作を高精度に行うことを目的として、多自由度のロボット鉗子を開発する。先行研究における脳神経外科手術支援ロボットでは、患部へのアプローチ

にもロボットを用いるため、ロボットの機構が大きくなるという問題があった。本研究は、患部へのアプローチは医師の手により行い、医師の手では困難な極めて困難なタスクのみをロボットで行うことを提案する。これにより、ロボットの小型化・軽量化を図る。

2. 深部狭所に対応した多自由度ロボット鉗子の開発

2.1 要求仕様

脳深部手術及び経鼻下垂体手術におけるワークスペースを直径 20 mm、深さ 100 mm の円筒としてモデル化する (図 1)。

Fig. 1 Available workspace for surgical instruments: (a) in microsurgery in a deep and narrow space, (b) in trans-nasal microsurgery.

対象とする手術タスクは円筒形のワークスペース底部での吻合・縫合操作である。狭小なワークスペース内で十分な術具先端可動域を確保するため、また、顕微鏡の視野を遮らないようにするため、術具の軸径は 3.5 mm とした。

吻合・縫合操作に必要となる自由度は、図 2 に示す術具先端の屈曲・回転・把持の 3 自由度である。屈曲自由度は、狭小なワークスペースにより術具の角度が制限されるという状況下で、術具先端がターゲットに対して適切な角度をとってアプローチするために必要である。ターゲットの位置・角度によらず最適なアプローチができるよう、最大屈曲角は 90 度に設定した。

脳外科手術の血管吻合や硬膜縫合用の湾曲針は円弧形状をしているため、針の円弧にそった回転操作を行いながら刺入すると抵抗なく対象組織に刺入することができる。深部狭所での刺入動作において重要な役割を果たすのは鉗子先端が屈曲した状態での先端軸周りの回転自由度である。この自由度がない場合、先端屈曲自由度によって針の刺入動作を行うことになるが、鉗子の屈曲半径が湾曲針半径に対して大きいため、鉗子全体の位置・角度調整が必要となる。鉗子全体の位置・角度調整は鉗子の経路上の生体組織へ負荷を与えるため、安全面での問題がある。鉗子先端が屈曲した状態での先端軸周りの回転自由度を備えることでこのような危険性が減り、狭小ワークスペースのでも針の刺入動作が行えるようになると期待できる。

Fig. 2 Required motion and dimensions of forceps

2.2 鉗子部の設計

3.5 mm の術具径において、屈曲した先での回転と把持を実現するために図 3 に示す二重ピンギア機構を提案する。本機構では、屈曲および回転自由度をそれぞれ独立したピンギアで実現する。図 3 において黄色で示した部分が回転自由度を実現する機構であり、青色で示した部分が屈曲自由度を実現する機構である。この機構により、屈曲の回転軸と先端回転の回転軸を直交させることが可能となり、直感的な鉗子の操作が可能となる。把持自由度はねじりコイルばねを用いて常に開放方向に力を与えておき、ワイヤを引くことで把持を行う。

ワイヤの経路は術具軸中心及び回転軸中心と一致するように設定することで、回転自由度を駆動した際にもワイヤの経路長を一定に保つことができる。

Fig. 3 Sectional view of the double pin gears and wire mechanism

製作した鉗子を図 4 に示す。狭所での操作性を考慮し、屈曲軸から鉗子先端までの長さを 16 mm とした。術具の軸方向が視界の奥行き方向に一致する顕微鏡下手術、内視鏡下手術における視認性を確保するため、医師と相談の上把持部長さを 8 mm とし、把持部先端に曲率を設けた。

Fig.4 Multi-DOFs forceps: (a) Shaft, (b) Enlarged view of the forceps' tip, (c) Endoscopic view.

2.3 鉗子駆動部の製作

二重ピンギア機構では回転・屈曲自由度を駆動する 2 つのピンギアの軸が同軸上に配置されているため、屈曲用のピンギアを駆動した際に、回転用のピンギアが干渉して同時に動くという問題がある。また、先端屈曲により把持自由度を駆動するワイヤの経路長も変化し、先端開閉量に影響する。これらの問題に対応するため、製作した鉗子をアクチュエータにより駆動することとした。開発した駆動部を図 5 に示す。

開発した多自由度ロボット鉗子は、将来的にはマスター・スレーブ型手術支援ロボットに組み込むことを想定している。手術支援ロボットではロボット鉗子の駆動部の位置・姿勢も変化させる必要がある。このため、駆動部を極力小型、軽量化することができればシステム全体の小型化、高精度化につながる。要求される駆動力に対して極力小型・軽量のアクチュエータとして、直径 10mm の DC モータ (maxon motor, DCX10L) を選択した。また、アクチュエータの配置も鉗子軸に対して同心円上に配置することで、駆動部の小型化を図ると同時に、鉗子軸を中心とした際の回転半径も最小となるようにした。

DC モータに内蔵されたエンコーダを用いて角度制御を行うことで、各自由度の動作を高精度に行うことができる。また、把持自由度においてはトルク制御を併用することで把持力を安定して出力することができる。

Fig. 5 Driving Unit

3. 刺入力評価実験

3.1 実験目的

開発したロボット鉗子が吻合・縫合動作に必要な針の刺入力を有するか確認するため、刺入力を測定した。

3.2 実験方法

刺入力は鉗子が把持した針を組織に刺入する際に刺入方向に加わる力であり、これは鉗子の把持力、および把持面と針の摩擦力に依存する。そこで、ロボット鉗子で糸付縫合針を把持し、縫合糸を引き、針が滑り抜けた時の力を本研究における刺入力と定義する。

実験セットアップとして、図 6 に示すように力センサ (WACOH-TECH inc., MAF-3) に針付き縫合糸 (Ethicon, 5-0) の糸を固定し、多自由度ロボット鉗子の把持部根本から 5 mm の位置で縫合針を把持して引っ張った。針が把持部から滑り抜けた際の力センサの値を刺入力として計測した。把持自由度の駆動に用いるワイヤは直径 0.3 mm であり、破断張力は 58 N である。ただし、屈曲自由度を動かした際の曲げによりワイヤは強度低下を起こすため、強度低下後の破断張力約 45 N を基準とし、安全係数を 3 として把持駆動用アクチュエータの出力はワイヤ張力が 15 N となるように設定した。

屈曲角度の刺入力に対する影響を調べるため、屈曲角度を 0 deg., 45 deg., 90 deg. とし、それぞれについて 5 回ずつ計測を行った。

3.3 実験結果と考察

実験結果を表 1 に示す。先行研究では、脳深部での操作に必要な刺入力は 0.5 N であり、多自由度ロボット鉗子が十分な刺

Fig. 6 Experimental setup for the needle insertion force measurement: (a) the gripping position of the needle (b) setup.

入力を出力できることがわかった。一方で、加えたワイヤ張力に対して出力が非常に小さいという問題があった。

Table 1 Needle insertion force

Bending Angle (deg.)	Needle Insertion Force		
	Min.	Max.	Ave.
0	1.2	1.8	1.4
45	1.4	2.2	1.8
90	1.6	2.3	1.8
Ave.	1.2	2.3	1.7

そこで、鉗子把持機構のモデルにより摩擦の影響を調べた。設計した把持機構を図 7 に示す。

ワイヤ張力を F とおいた時、生じる把持力 T は

$$T = \frac{a_1 F \sin(\theta_1 + \theta_2)}{2a_2 \cos \theta_0} - \tau_1 \quad (1)$$

で表される。ここで τ_1 はねじりコイルばねによって開放方向に加わる力である。 $\theta_0 = 23.48 \text{ deg.}$, $\theta_1 = 56.86 \text{ deg.}$, $\theta_2 = 35.75 \text{ deg.}$, $a_1 = 2.5 \text{ mm}$, $a_2 = 5.0 \text{ mm}$, $\tau_1 = 0.10 \text{ N}$ を代入し

$$T = 0.3F - 0.10 \quad (2)$$

となる．この式より，ワイヤ張力を 15N とした際の鉗子把持力は摩擦がないと仮定すると 4.4N である．この把持力に対する刺入力測定結果は約 25 % であり，摩擦の影響が極めて大きいといえる．また，屈曲角度が 0 度の場合は加工誤差・組み立て誤差・ガタなどの影響で把持力が小さくなったと考えられる．

Fig.7 Model of gripping mechanism.

4. 結言

脳深部での高精度なタスクを対象として多自由度ロボット鉗子を開発した．2重ピンギア機構による屈曲・回転とワイヤ駆動による把持を組み合わせることで，軸径 3.5 mm と非常に細径ながらも屈曲・屈曲先端回転・把持の 3 自由度を実現した．刺入力評価実験の結果，吻合・縫合タスクに必要な刺入力を得られることを確認した．今後は，開発した多自由度ロボット鉗子を用いて実際の手術タスクの評価を行い，将来的にマスター・スレーブ式手術支援ロボットに組み込む．

文 献

- [1] P. B. McBeth, D. F. Louw, P. R. Rizun, and G. R. Sutherland, "Robotics in neurosurgery.," *Am J Surg*, 18(4). Suppl, pp. 68S-75S, 2004.
- [2] Morita, et al. "Microsurgical robotic system for the deep surgical field: development of a prototype and feasibility studies in animal and cadaveric models", *J. Neurosurgery*, 103(2), pp. 320-327, 2005.