

脳外科・眼科手術を対象とした手術支援ロボット・システム

Surgical Robotic Systems for Neurosurgery and Eye Surgery

○ 原田香奈子（JST/東大） 光石衛（東大）

Kanako HARADA, Japan Science and Technology Agency, The University of Tokyo
Mamoru Mitsuishi, The University of Tokyo

Abstract: Microsurgery in neurosurgery and eye surgery requires safe, accurate and precise manipulation of thin and long surgical instruments, which is difficult even for experienced surgeons. We have been developing master-slave surgical robotic systems for neurosurgery and eye surgery; we successfully demonstrated an anastomosis of 0.3 mm artificial blood vessels and cannulation to a blood vessel on the eye ground using our robotic systems, and now are trying to implement automation to our robots. This paper describes our research achievements and latest updates. We also propose “Bionic Humanoid”, which is an elaborate model of a human body equipped with sensors, as a platform for Medicine-Engineering collaboration.

Key Words: Surgical robots, Microsurgery, Neurosurgery, Eye surgery

1. 背景

近年，地方の病院にもダ・ヴィンチ外科手術システムが導入されるようになり，ロボット手術が社会的にも受け入れられるようになってきた．ダ・ヴィンチは主に腹部の疾患を対象とするが，脳外科・眼科手術では，更に安全かつ正確な手術支援が求められる．著者らは，脳外科及び眼科における顕微鏡下微細手術を対象として，様々な手術支援ロボット・システムを開発してきた．現在までに，0.3 mmの微細人工血管の吻合や眼底の微細血管に対するマイクロ・カニューレションなどを実現しており，タスクの自動化についても研究を行ってきた．本稿では，最新の研究成果についてまとめるとともに，手術ロボットの開発・評価環境としてのセンサ付精密人体モデル「バイオニックヒューマノイド」の提案についても簡単に紹介する．

2. 手術支援ロボット・システムと自動化

本章では，筆者らが開発してきた顕微鏡下微細手術支援ロボット・システムの概要と自動化の取り組みについて紹介する．

2.1 脳外科手術支援

脳外科手術支援ロボット・システムには NeuroArm⁽¹⁾，Neurobot⁽²⁾，そして著者らが開発した MM-3⁽³⁾などがある．これらはいずれも脳深部における縫合などの複雑な作業は対象としていなかった．脳深部では，脳の開頭部から細径の術具を挿入して治療を行うため，術具の動作が制限される．そこで脳深部を対象とした手術支援ロボット・システムを開発した⁽⁴⁾．脳深部へのアプローチは，顕微鏡用保持アームにより行うこととし，6自由度の位置決め機構（Fig.1(a)）を小型化することに成功した．また，屈曲，先端の回転，把持の3自由度を有する3.5 mm多自由度術具⁽⁵⁾を搭載した（Fig.1(b)）．これらのロボットの制御には，既製品の力覚入力デバイスをカスタマイズしたマスタ・マニピュレータ⁽⁶⁾（Fig.1(c)）を用いる．このマスタは微細手術用ピンセットの保持を参考にして把持部の形状などを決定したものである．開発したロボットを用いて，脳深部を模擬した内径25 mmの筒状の作業空間内において，人工血管に針を刺入するタスクを行い，深部での微細な作業が可能であることを示した（Fig. 2）．現在，もう一台開発中であり今後は双腕によるタスクを実現する．

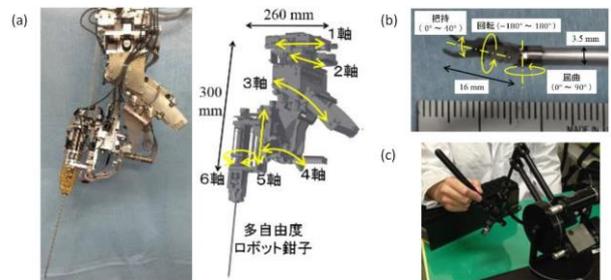


Fig. 1 Neurosurgical robotic system for deep and narrow spaces in the brain

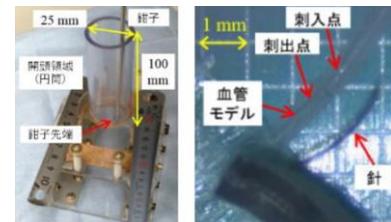


Fig. 2 Needle insertion experiment

これまで開発してきた MM-3 やこのロボットではマスタ・スレーブによる制御を行ってきたが，自動化による制御の研究も行っている．自動化は医師に取って代わることを目的としているのではなく，タスクを自動で認識して制御パラメータを自動で調節するなど，医師の能力をより高めるツールとして位置づけている．例えば，顕微鏡視野内で自動で術具先端を検出してトラッキングを行う研究⁽⁷⁾や鉗子の速度に応じてマスタ・スレーブ制御の動作倍率を自動で変更する研究⁽⁸⁾などを行っている．

2.2 眼科手術支援

眼科手術においては，硝子体手術を対象とした手術支援ロボット・システムがある^(9,10,11)．これらはいずれも数十ミクロンの眼底血管に対するマイクロ・カニューレションあるいは，数ミクロンの内境界膜（ILM 膜）の剝離を対象としたものである．

著者らのグループは，パラレルロボットを用いた眼科手術ロボットを開発し，脳外科と同じマスタ・マニピュレータを用いたマスタスレーブ制御，及び自動制御を実装してきた．開発したロボットを Fig.3 に示す．



Fig.3 Robot for eye surgery

この開発した眼科手術支援ロボット・システムに Image based visual servoing を実装し、カニューレ挿入時の挿入点への位置決めを自動で行う制御を実装した。ロボットを使わない場合の手技、マスタ・スレーブによる制御、自動化それぞれにおいて、指定した点への位置決め精度を比較した(Fig.4)。このような、ある程度単純化できるタスクにおいては、オペレータ（術者）の能力が依存するマスタ・スレーブ制御よりも自動化の方が精度が高く、平均誤差を1/5にまで減少させることに成功した。今後はタスクの複雑さに応じて制御を切り替える研究を行う予定である。

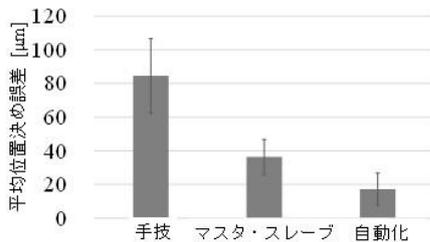


Fig.4 Robot for eye surgery

3. バイオニックヒューマノイド

上記のような手術支援ロボット・システムの研究においては、実際の臨床を再現した環境下での性能評価が求められる。例えば、作業空間の大きさ、それによる術具の拘束、対象となる組織の性状がロボットの評価に大きく影響する。しかし、脳や眼球で人体に近いモデルは存在せず、適切な動物モデルもない。動物モデルがあったとしても、そのモデルで特定のタスクができた、というデモ的な評価になってしまう。そこで、センサを搭載した精巧な人体モデル“バイオニックヒューマノイド”を提案している。センサ付の精巧なモデルがあれば、実際の臨床の拘束条件を再現した実験において、Fig.4のような医師の手技とロボットによる比較が可能となり、更にはロボットの制御による効果も定量的に示すことが可能となる。Fig.5に名大との共同研究により試作した眼球モデルを示す。眼球の回転や術具の挿入点による拘束を維持しつつ、光弾性及び力センサにより眼底への負荷を計測することができる。現在は、内閣府 ImPACT プログラムにより、バイオニックヒューマノイドの研究開発を行っている。また、このバイオニックヒューマノイドを活用した手術ロボットの開発や評価も実施する予定である。



Fig.5 Eye model

4. まとめ

脳外科・眼科手術支援を目的とした手術ロボットシステムの開発と自動化について最新の研究成果を紹介した。手術ロボットだけでなく、バイオニックヒューマノイドのような開発・評価環境も含めて包括的な研究開発を行っていくことにより、試行錯誤をなくすことができると期待する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23226006, 26700023, 15H01110, 内閣府 ImPACT の助成を受けたものです。本稿に示す研究における共同研究者に感謝します。

参考文献

- (1) G. R. Sutherland. et al., NeuroArm: An MR compatible robot for microsurgery, Int. Congr. Series, pp. 504-508, 2013.
- (2) T. Goto, et al., Clinical application of robotic telemanipulation system in neurosurgery, J. Neurosurgery, pp.1082-1084, 2003.
- (3) M. Mitsuishi, et al., Master-slave robotic platform and its feasibility study for microneurosurgery, Int. J. Med. Robot. Comp, pp.180-189, 2013.
- (4) 忽滑谷, 他, 多自由度鉗子を搭載した深部脳外科小型手術支援システムの開発, ROBOMECH2016, 1A1-03a1, 2016.
- (5) T. Okubo, et al., Hand-held multi-DOF robotic forceps for neurosurgery designed for dexterous manipulation in deep and narrow space, EMBC, pp.6868-6871, 2014.
- (6) Y. Kamei, et al., Master manipulator with high usability designed for microsurgical robotic system, IJCARS, pp.127-128, 2013.
- (7) YM Baek, et al., Robust visual tracking of robotic forceps under a microscope using kinematic data fusion, IEEE/ASME T-MECH, 19(1), 278 - 288, 2014.
- (8) Sunho Ko, et al., Dynamic motion scaling for master-slave microsurgical robotic system and its preliminary evaluation, ICAM2015, 1A2-03, 2015.
- (9) A. Gijbels et al., Design and Realization of a Novel Robotic Manipulator for Retinal Surgery, IEEE/RSJ IROS2015, pp. 3598 - 3603, 2015.
- (10) B. Gonenc et al., Force-based puncture detection and active position holding for assisted retinal vein cannulation, IEEE Int. Conf. Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp. 322 - 327, 2015.
- (11) Y. Ida, et al., Microsurgical robotic system for vitreoretinal surgery, IJCARS, 7(1), pp.27-34, 2012.
- (12) T. Sakai, et al., Autonomous 3-D positioning of surgical instrument concerning compatibility with the eye surgical procedure, ROBOMECH2016, 1A1-01b6, 2016.
- (13) 吉原, 他, センサ付眼球モデルを用いた眼科手術手技評価に関する研究, JJSCAS, 16, 3, 332-333, 2014.