

氏名(本籍)	馬 旭 (中国)
専攻	知能機械システム工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第 91 号
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者
学位授与の年月日	平成 25 年 9 月 30 日
学位論文題目	Study on a Tele-operative Catheter System for Endovascular Neurosurgery
論文審査委員	(主査)郭 書祥 (副査)平田 英之 (副査)鈴木 桂輔

論文内容の要旨

1. Outline of the research

With the quickening pace of modern life, the brain diseases of people are increasing, such as cerebral aneurysm and infarction and so on. The traditional surgery spends patients a lot of operation time and has long recovery time, the burden on patients is heavy. Minimally invasive surgery (MIS) has grown as a very suitable domain by using robot-assisted system. A lot of diagnosis and medical surgery with an endoscope or a catheter are performed for minimally invasive surgery recently. There are a lot of advantages as earliness etc. However, it requires a lot of skills for the operation so that this may do the operation in the inside of the body that cannot be watched directly. Such surgery presents many challenges: 1) Doctors must be very well trained and possess the skills and experience to insert catheters. Intravascular neurosurgery is much more difficult than traditional surgery and there are few skilled doctors who can perform this type of operation. To keep pace with the growing number of patients, a mechanism is required to allow the training of sufficient numbers of doctors. 2) During the operation, doctors check the position of the catheter tip using the X-ray camera. Although they wear protective suits, it is very difficult to shield the doctor's hands and face from the effects of the X-ray radiation, which may result in radiation-related illness after long periods of exposure. 3) In intravascular neurosurgery, catheters are inserted into the patient's blood

vessels, which in the brain are very sensitive. When operating in this area, extreme care is required to avoid damaging the fragile vessels. An experienced neurosurgeon can achieve an accuracy of about 2 mm. However, as the contact force between the blood vessel and the catheter cannot be judged accurately by the doctor, so how to measure the contact force and feedback to the surgeon become significant. 4) There is not a kind of robotic catheter system can imitate surgeon's operating skill to insert and rotate catheter. Therefore, a master-slave robot-assisted catheter system is required for such cases so that the operation can be proceeded.

2. Research results

(1) Development of a robot-assisted catheter system with PID fuzzy control

In this study, a new prototype robot-assisted catheter system has been designed and constructed based on the requirements for the endovascular surgery. After completing evaluation performance of this developed system, we presented a practical application of a fuzzy PID control to this developed system and compared it with the traditional control method experimentally. The accuracy of axial and rotational movement during the remote operations has been improved. The tracking error with fuzzy PID is below 2mm and 10° in terms of insertion and rotation and it can satisfy the practical application in minimally invasive surgery.

(2) Evaluating performance of a novel catheter manipulating system

We redesigned and developed a novel robotic catheter manipulating system with haptic device which surgeon could manipulate the clinical catheter in the master side and can feel force feedback. Performance evaluation of this system was conducted to test both the dynamic and static performance of manipulation and synchronization between master and slave side. The presented system is a unique platform that provides the surgeon with the ability to use their dexterous skills to perform catheter interventions from a location remote to the patient. The experiments showed the system has the ability to be a training system for neurosurgeons and to complete the clinical interventional surgery in the future.

(3) Experiment (In Vitro) of the robotic catheter manipulating system

In this part, the experiment of the robotic catheter manipulating system

was carried out by using Endovascular Evaluator (EVE). Combining the remote operation on EVE simulator, implementation with the surgeon's skill verifies this system as an effective approach to reduce surgeon's radiation exposure and physical discomfort. The experimental results indicated that the contact information between catheter and blood vessel can be measured well. Also, the detected information can be transmitted to the surgeon as the feedback information.

3. Conclusions and future work

In this research, firstly, we designed and developed a kind of novel robot-assisted catheter system, including design of mechanisms and design of control system. After completing evaluation performance of this developed system, we improved control method to this developed system and the feasibility and effectiveness of this control method were demonstrated. Secondly, We redesigned and developed a novel robotic catheter manipulating system with haptic device which surgeons could operate the clinical catheter in the master side and could feel the force feedback. The whole system was evaluated in terms of dynamic and static performance both in the axial and radial motions. The results of synchronization experiments had to evaluate the accuracy and precision of sensed and replicated motions. Finally, Tele-operation had been done by EVE simulator to provide the performance under the similar situations of clinical surgery. In the future, the performance of the haptic device will be discussed. Moreover, utilizing this system to perform a range of interventional surgery in vivo is required to the clinical practice.

審査結果の要旨

審査申請者の博士学位論文「脳神経外科介入用遠隔カテーテル操作支援システムに関する研究」(**Study on a Tele-operative Catheter System for Endovascular Neurosurgery**) について、審査委員会にて審査を行った。本論文では、特に脳神経外科手術の応用に焦点を当て、マスタースレーブカテーテル操作支援システムを提案・試作し、また、カテーテルを操作するために視覚と力覚を組み合わせたシミュレーションモデルを開発した。そして、触覚装置を有する新型のロボティックカテーテル操作システムを開発し、マスター側には外科医が臨床用カテーテルを操作することができ、力フィードバックも与えることができる。

最先端の医療支援システムの構築とその制御法に関する研究として高く評価できると考えられる。

以下に本論文の特徴的な成果を要約する。

1. 医師の操作手技を模倣し、カテーテルの操作を安全に行うためのマスタースレーブカテーテル操作支援システムの開発を行い、操作特性評価実験を行った。そして、マスタースレーブカテーテル操作支援システムの有効性を検証した。
2. 開発されたマスタースレーブカテーテル操作支援にファジィPID制御を応用し、実験でPID制御方法と比較した。その結果、リモート操作中の挿入運動及び回転運動の精度が改善された。ファジィPIDによるトラッキングエラーは、挿入運動と回転運動について、それぞれ1mmと10°未満であり、低侵襲手術における実際応用の可能性を示した。
3. インターネットに基づくマスタースレーブカテーテル操作支援システムを開発した。開発したシステムを利用して、カテーテル遠隔操作実験を行った。今回の実験では双方向遠隔操作を実現した。北京にあるマスター端末で香川大学にあるロボットのスレーブ端末を遠隔操作し、また逆に、香川大学にあるマスター端末で北京にあるスレーブ端末を遠隔制御し、その有効性を検証した。遠隔制御操作は遠隔地の医療関係者の交流と訓練に役立つことを実証した。
4. マスタースレーブカテーテル操作支援システムに対して、力覚と視覚に基づく制御方法を提案し、実験より、提案したシステムの操作性と有効性を検証した。
5. 触覚装置を有する新型のロボティックカテーテル操作システムを開発し、マスター側には外科医が臨床用カテーテルを操作することができ、カフィードバックを与えることもできる。また、システムの操作特性評価実験を行った。開発したシステムは、外科医の熟練のスキルを提供するユニークなプラットフォームとして有効性を検証した。
6. EVE(血管シミュレーター)を用いて、カテーテルの遠隔操作実験を行った。実験により、外科医のX線被曝を減らすとともに外科医の操作感の不快さを減少させる効果的なアプローチ方法を検証した。

本論文の脳神経外科医学分野への応用についての技術進化への貢献は以下のようにまとめられる。

1. 熟練した医師の操作スキルを抽出するために、マスタースレーブカテーテルのシステムを提案、試作し、さらにその有効性を検証した。これらの研究成果は、脳神経外科における高度専門医の育成、次世代のセンサー統合マイクロ能動カテーテルによる低侵襲脳外科手術の支援システムの確立に貢献できる。
2. 開発したマスタースレーブカテーテル操作支援システムを利用して、医師が不足している地域での医療問題を解決に貢献できる。臨床への使用が始まれば、遠隔制御操作

は遠隔地の医療関係者の交流と訓練に役立つことが考えられる。また、同システムの一層の臨床応用のための基礎が築かれた。

3. 医師が直接カテーテルを操作するのと違い、マスタースレーブカテーテル支援操作システムはスレーブ端末の操作をロボットが行うため、医師のX線被爆が回避され、同時に手術の能率を高めることによって、患者が放射線の影響をうける時間が減少する。
4. 従来の提案されてきたシステムとは異なり、提案した新型のロボティックカテーテル操作システムは、実際の手術に用いられるカテーテルを使用することが可能である。また、それと同時に触覚装置によって、従来の手で手術を行う操作感とカテーテルに働く抵抗力を使用者にフィードバックすることが可能である。
5. 開発した新型ロボティックカテーテル操作支援システムを利用して、育成期間中の医師に、臨床訓練と教育が可能である。また、手術の安全性を高めて、医療事故を減少することに貢献できる。

以上により本審査委員会は、審査申請者が香川大学大学院からの博士（工学）の学位授与に値するものであると判定した。

本学位論文に関する内容として、以下の学術学会論文誌掲載 2 編、および国際会議論文 1 編があり、研究成果はいずれも独自に完成したものである。

[1] **Xu Ma**, Shuxiang Guo, Nan Xiao, Shunichi Yoshida and Takashi Tamiya, Evaluating Performance of a Novel Developed Robotic Catheter Manipulating System, *Journal of Micro-Bio Robotics*, DOI : 10.1007/s12213-013-0068-2, 2013.

[2] **Xu Ma**, Shuxiang Guo, Nan Xiao, Jian Guo, Shunichi Yoshida, Takashi Tamiya and Masahiko Kawanishi, Development of a Novel Robotic Catheter Manipulating System with Fuzzy PID Control, *International Journal of Intelligent Mechatronics and Robotics*, Vol. 2, No. 2, pp. 58-77, 2012.

[3] **Xu Ma**, Shuxiang Guo, Nan Xiao, Jin Guo, Shunichi Yoshida, Takashi Tamiya, Masahiko Kawanishi and Baofeng Gao, NARX Model-based Identification for the Developed Novel Robotic Catheter Manipulating System, *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp.2225-2229, 2012.

最終試験結果の要旨

平成 25 年 7 月 29 日に公聴会を開催した。公聴会では、審査申請者は、学位論文の内容に関する発表を約 50 分間行い、また、公聴会后、口述試験により、新型カテーテル遠隔操

作支援システムに関する研究について、その開発経緯、理論モデルと制御アルゴリズム、評価結果及び専門知識の確認を実施し、本審査委員会において、最終試験とした。

最終試験における学位論文に対する質疑応答の概要は以下のとおりであり、審査申請者はすべての確に回答した。

なお、本審査会は英語で実施した。

- ファジィPID制御を行うことにより、どの程度、操作精度が改善されるか。

(回答) リモート操作中の挿入運動及び回転運動の精度が改善された。ファジィPIDによる平均のトラッキングエラーは、挿入運動と回転運動について、それぞれ1mmと10°未満であり、操作精度は4.5%(挿入運動)と3.4%(回転運動)と高いレベルを実現した。それは低侵襲手術における実際の用途を満足できた。

- なぜファジィPID制御を採用したか。

(回答) ファジィPID制御は使用者が自由にダイナミックなモデルを構築するのに適している。また、医師の熟練されえたスキルはこのシステムにファジィPID制御方法によって反映される。そして、このファジィPID制御によって誤った情報を排除し、正確で精度の良いシステムを構築することが可能であるから。

- 提案したロボティックカテーテル操作システムの新規性は何か。

(回答) 従来のマスターシステムでは、ハンドルやジョイスティックを用いていたが、提案した新しい方法は、実際の手術用カテーテルを用いて測定するため、機械に慣れてない医師でもすぐに扱うことができる新規性がある。また、触覚フィードバックを与えることで、従来にはなかった手術感をより詳細に与えることができる。

- 本研究が提案する触覚フィードバックとは具体的に何か。

(回答) マスターシステムに用いるカテーテルに触覚フィードバックを与えることはとても難しいことである。提案した触覚フィードバック装置は、カテーテルの上方から圧力を与えることで、医師が操作する際に、スレーブの側のカテーテルの抵抗力を感知することが出来る。そして、提案した触覚装置の実現できる最小の力は5mNであり、このシステムを視覚フィードバックシステムと組み合わせることにより安全な操作が可能なシステムを構築できる。

- 実施した遠隔操作実験を行ったとき、どのくらいの遅延があるか。

(回答) 遠隔操作実験をしたときに生じた遅延の要因は主にインターネットの遅延である。遅延時間は200ms以内であり、デバイスの遅延はあまり存在しなかった。

- マスタースレーブカテーテル操作支援システムを開発する目的は何か。

(回答) 現段階では、医学部の4年生ー5年生の脳神経外科におけるカテーテル実習のために、カテーテル操作支援システムを開発した。熟練医者への操作スキルを抽出し、モデル化、訓練することにより、その脳神経外科における高度専門医の育成、および臨床応用を目指す。

- 開発したマスタースレーブカテーテル操作支援システムを利用してどのように初心者

を訓練するか。

(回答) 熟練医者の操作スキルを抽出して、データベースを構築し、熟練医者の操作スキルを含めたデータベースに基づいて初心者を訓練する。さらに、患者の血管 CT と MRI データを開発した VR システムに導入して、患者の血管モデルを再構築する。実際の手術をする前に医者が訓練できるため、手術の安全性を高めて医療事故を減少できる。

本審査委員会における審査は、学位論文の内容、研究方法論を確認しようとするものである。

本審査委員会は、提出された博士学位請求論文が博士（工学）の学位に値するものであり、かつ審査申請者は専門領域に関する十分な学識と研究能力を有するものと判断した。以上より、本最終試験の評価を合格とする。