

氏名(本籍)	宋 雨 (中華人民共和国)
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132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30年9月28日
学位論文題目	A Robot-assisted Endovascular Catheterization System with Haptic Feedback
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. Background

In recent two decades, the development of robot-assisted endovascular catheterization system was motivated by the desire to reduce fluoroscopy time, radiation dosage to surgeon and patient in addition to the reduction of surgeon fatigue, and improvement of position accuracy of the catheter. Unlike the conventional bedside technique, the robot-assisted endovascular catheterization system allows the interventionalist to offer axial and radial motion by master robot placed in a remote location through the control console to guide the slave robot to insert, retract and rotate the catheter. Currently, interventionalists overwhelmingly rely on 2-D visual feedback, as one of their dominant information sources, during robotic endovascular surgery. However, lack of the sensation of touch or haptic feedback from catheter-tissues contact to the operator is a drawback in current robot-assisted endovascular catheterization systems. The medical professionals strongly rely on the sense of touch and their intuitive skills during endovascular surgery. However, the employment of the robot-assisted endovascular catheterization system removes the catheter from the interventionalist's hands, also eliminates the direct contact between the clinician and patient. To this end, recreating effective haptic sensation by master haptic interface becomes urgently in the robot-assisted endovascular catheterization procedure.

Inspired by such motivations, the robot-assisted endovascular

catheterization system is presented. Firstly, a dynamic model of catheter intervention is established to reflect the interactions between the catheter and vasculature. Secondly, the haptic shared controlled architecture is presented for the robotic endovascular procedure. Thirdly, an MR fluids-based master haptic interface is presented. It can provide the physicians with the ability to use their conventional bedside skills during the robotic endovascular procedure. Fourthly, the catheter manipulator with a novel miniaturized proximal sensing unit, as the slave robot, is proposed to actuate the patient catheter in traditional ways (push, pull, and rotate) and measure the contact force between the catheter and vasculature.

2 Research results

2.1 The establishment of a dynamic model of catheter intervention

The model of catheter interventional has been presented, and then discrimination theory of ‘pseudo collision’ and ‘real collision’ is established. This interaction force between the catheter tip and blood vessel wall can be divided into three classifications: no contact and no collision, contact, collision (pseudo collision or real collision). In our design, when the collision force exceeds safety threshold value (deformation of blood vessel δ exceeds elastic limit δ_{max}), it can be viewed as ‘real collision’. Also, when the deformation of blood vessel δ does not exceed elastic limit δ_{max} , it is viewed as ‘pseudo collision’.

2.2 Haptic shared control architecture based on catheter tip-vessel contact situations

The surgery safety depends on the collision discrimination, hence the haptic shared guidance has been designed to assist human decision making during surgery practice. The designed haptic guidance was governed by the collision forces between the catheter tip and blood vessel wall. The results illustrate that designed model based haptic shared control scheme had substantially reduced the total path length of the catheter, shorten the procedure time, and decreased the duration times of “pseudo collision” and “real collision” compared to no haptic guidance during the manipulation by both the inexperienced and experienced operators.

2.3 Development of a robot-assisted endovascular catheterization system

The robot-assisted endovascular catheterization system is designed as master-slave control architecture. The master haptic interface (to be placed at a master side) measures the axial and radial motions of an input catheter which is operated by the physician. Meanwhile, the haptic feedback can be provided to the physician during the operation. To achieve a quick response to haptic force, a novel hall sensor-based closed-loop control scheme is proposed. The catheter manipulator (to be placed at the slave side) replicates the physician's operation motions which measured by the sensor part of the master haptic interface. A novel force sensor attached to the proximal end of the catheter in catheter manipulator is used to measure the contact forces between the catheter and the blood vessel wall.

2.4 Performance evaluation of the robot-assisted endovascular catheterization system

At first, the catheter manipulator was evaluated for axial and radial positioning accuracy. It was found that the mean slip or error in insertion was 0.6 mm (precision, ± 1.1 mm) for 100 mm length of the catheter advancing. The maximum value of tracking error in radial motion is less than 1.9 deg. The second experiment was performed to evaluate the lag times of radial and axial motion transmission between the master haptic interface and catheter manipulator. From the results, the maximum response time in both directions is less than 160 ms. To verify the efficacy of the proposed haptic guidance method, the evaluation experiments in vitro are carried out. The results demonstrate that the proposed system has the ability to enable decreasing the contact forces between the catheter and vasculature.

3 Conclusions and future work

The development of robotic platforms in recent years has aimed to reduce radiation exposure, increase precision and stability of motion, and add operator comfort. However many such systems have been designed without considering the combination of natural motions of the operator during bedside practice with the robot-assisted endovascular catheterization system. For most existing robotic solutions, the master interface takes the shape of a

joystick or a haptic device, therefore potentially altering the natural behavior and motion patterns of experienced operators. Furthermore, existing studies on effective haptic feedback with robot-assisted endovascular catheterization system have been very limited. To address these issues, the study presented in this thesis proposes the robot-assisted endovascular catheterization system which can provide the operator with the ability to use their conventional bedside skills in the robot-assisted endovascular catheterization procedure. Meanwhile, the haptic feedback can be provided to the operator during the operation. In this design, the force model was presented to characterize the kinematics of the catheter intervention. Afterward, the ‘pseudo collision’ and ‘real collision’ were utilized to describe the catheter tip-vessel contact. The proposed haptic shared control strategy has the ability to assist the surgeon in decision-making and improving catheter interventional skills during teleoperated robot-assisted catheter interventional neurosurgery practice. Experimental results also illustrated that haptic shared control was a benefit for providing natural haptic sensation and reducing the human cognitive workload as well as keep the safety of surgery. According to the performance evaluation metrics, we also found that the challenge of improving system transparency in robot-assisted endovascular catheterization procedure can be addressed by adopting haptic shared control.

For widespread use of robot-assisted endovascular catheterization systems, the development of ergonomic robotic platforms that maintain the natural skill of the operator is a potential area for future research.

審査結果の要旨

審査申請者の博士学位論文「ハプティックフィードバック機能を有するロボット補助血管カテーテル操作システム」(A Robot-assisted Endovascular Catheterization System with Haptic Feedback) について、審査委員会にて審査を行った結果、本論文は特に脳神経外科手術の応用に焦点を当て、新型カテーテル遠隔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マスター触覚オペレーティングシステムを開発した。そして、カテーテルインターベンション力モデルを構築し、カテーテル先端と側面の力覚情報を計算し、マスターコントローラにフィードバックな情報提示により危険を自動的に回避できた。医療支援システムの構築、その制御法及び特性評

価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. 医者の操作手技を模倣、カテーテルの操作を安全に行うための新型触覚特性を持ってマスタースレーブカテーテル遠隔操作支援システムの設計改良と試作を行い、操作特性評価実験を行った。そして、新型触覚特性を持って遠隔操作支援システムの有効性を検証した。
2. 新型触覚特性を持つマスターオペレーティング・システムを開発、カテーテルの先端とサイドの両方の力情報をモニターリング可能にした。カテーテルインターベンション力モデルを作成、触覚フィードバックと視覚的な情報フィードバックの効果を検証、開発されたシステムが操作性と安全性を高めることを実証した。
3. 透明感の制御アルゴリズムが提案された、テレプレゼンスを持ち遠隔操作支援システムを構築。そして、遠隔操作支援システムの有効性を検証した。
4. 安全にカテーテルを操作する意識の感覚の制御アルゴリズムが提案された。そして、カテーテルインターベンション危険を自動回避することを検証した。
5. 新型触覚特性を持ってマスター遠隔操作支援システムに対して、新たに人間アシスト制御アルゴリズム(Haptic Shared Control Algorithm)が改良された。そして、カテーテルインターベンション危険を自動回避できること、人間のカテーテルインターベンション操作力の削減を検証した。これらの実験により、実応用の可能性と安全性の向上が実証できた。

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. 経験ない医者の操作スキルを育成するために、低侵襲カテーテル手術遠隔操作システムを提案、新型触覚特性を持ってマスター操作システムを改良し、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. カテーテルインターベンション力モデルを作成、カテーテル操作力覚をマスター側にフィードバックでき、臨床訓練と教育ができるようなカテーテル触覚操作マスターシステムを構築した。
3. 透明感の制御アルゴリズムが提案され、テレプレゼンスを持つ遠隔操作支援システム

を構築した。これにより、医師のX線被爆を大幅に低減できる。

4. 提案されたカテーテル安全操作意識の感覚制御アルゴリズム、マスター側に触覚特性を持ってマスター操作システムを構築した。遠隔操作ロボット支援型のカテーテルは、低侵襲手術の安全性が改善された。
5. 新規なハプティック共有制御アルゴリズムが提案され、カテーテルの操作特性評価を行い、遠隔操作ロボット支援型のカテーテル手術のパフォーマンスが改善された。

以上により、本論文はその新規性、発展性が高く評価され、本審査委員会は審査申請者が香川大学大学院から博士（工学）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、学会誌に英文**2**編、および国際会議論文**2**編を含む複数の学術論文を掲載された。研究成果はいずれも独自に完成したものである。

1. **Yu Song**, Shuxiang Guo, Xuanchun Yin, Linshuai Zhang, Hideyuki Hirata, Hidenori Ishihara, Takashi Tamiya, “Performance Evaluation of a Robot-assisted Catheter Operating System with Haptic Feedback”, *Biomedical Microdevices*, DOI: 10.1007/s10544-018-0294-4, 2018. SCI, Impact Factor (IF): **2.077**.
2. **Yu Song**, Shuxiang Guo, Xuanchun Yin, Lingshuai Zhang, Yu Wang, Hideyuki Hirata, Hidenori Ishihara, “Design and Performance Evaluation of a Haptic Interface based on MR Fluids for Endovascular Tele-surgery”, *Microsystem Technologies*, Vol.24, No.2, pp.909-918, DOI:10.1007/s00542-017-3404-y, 2017. SCI, Impact Factor (IF): **1.581**.
3. **Yu Song**, Shuxiang Guo, Linshuai Zhang, Miao Yu, “Haptic Feedback in Robot-assisted Endovascular Catheterization”, *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 404 - 409, 2017. (EI)
4. **Yu Song**, Shuxiang Guo, Linshuai Zhang, Xuanchun Yin, “MR Fluid Interface of Endovascular Catheterization Based on Haptic Sensation”, *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 542 - 546, 2016. (EI)

最終試験結果の要旨

平成 30 年 7 月 30 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、引き続き口述試験による審査委員および参加者からの質疑に的確に回答することを求めた。また、公聴会后、口述試験により、「ハプティックフィードバック機能を有するロボット補助血管カテーテル操作システム」(A Robot-assisted Endovascular Catheterization System with Haptic Feedback) に関する研究について、マスターオペレーティングシステムの開発経緯、操作側カテーテルの力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的確に回答した。

- 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。新型触覚特性を持つマスターオペレーティング・システムを開発、先端とサイドの両方の力情報をモニターリング可能にした。カテーテルインターベンション力モデルを作成、触覚フィードバックと視覚的な情報フィードバックの効果を検証、開発されたシステムが操作性と安全性を高めることを実証した。

- カテーテル操作支援システムの安全性をどのように保証されるか。

(回答) 現段階では、先端とサイドの両方の力情報を力センサーで測定し、それをもとに、安全操作の最大値を超えないように、フィードバックを制御することにより、安全性の確保を目指す。

- カテーテルインターベンション力モデルにおいて、衝突力はどのように対処されるか。

(回答) カテーテルインターベンション力モデルにおいて、疑似衝突 (Pseudo Collision) 力と真実衝突 (Real Collision) 力を同時にハプティックフィードバックに用いている。その情報を医者側に提示し、危険域などを判別し、事故を防ぐ操作方法を実現した。

- 開発したカテーテル操作支援システムについて、ガイドワイヤとカテーテルの協調操作制御は重要であるが、今後どう展開されるか

(回答) ガイドワイヤとカテーテルの協調操作は熟練医者の操作スキルである。それを抽出して、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。