

氏 名 (本籍)	郭 晋 (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 107 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 27 年 3 月 24 日
学 位 論 文 題 目	Study on a Virtual Reality-based Training System for the Vascular Interventional Surgery
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

1.1 Background

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. Vascular Interventional Surgery (VIS) is a revolutionary surgical technique, in which surgery is done using precise medical devices and viewing equipment inserted through a small incision instead of making a large incision to expose the operation site. A lot of diagnosis and medical surgery with an endoscope or a catheter are performed for vascular interventional surgery recently. The main advantage of this technique is to reduce trauma to healthy tissue since this trauma is the leading cause of patient' pain and scarring and a prolonged hospital stay. Fast recovery and a short hospital stay also reduce the cost of surgery and radiation exposure. A critical disadvantage of this surgery technique, however, is its complexity, requiring extensive training efforts of the interventionalists to achieve competency because the arteries through which the catheter passes are extremely intricate and delicate. It is difficult for novice surgeons to insert the catheter from femoral to the target position within the patients' vascular structure especially the blood vessel of patient's brain. In addition, repeated insertion of the catheter through several tests

could tear a blood vessel and cause bleeding instantaneously, while excessive pressure could rupture blood vessels. For practical and ethical reasons, realistic virtual-reality simulators provide a promising alternative method compared to other available alternatives such as anesthetized animals, human cadavers and patients. VR-based simulators enable novice interventionalists to learn basic wire and catheter handling skills and provide expert practitioners with the opportunities to rehearse new operation procedures prior to performing them on a patient.

Additionally, distance teaching/training has become indispensable to novice surgeons around the world. As an example, the use of this advanced minimally invasive technique in Canada has been severely hampered by the inability to provide adequate training and support to community surgeons, many of who live in remote regions of the country. If a remote surgical system is in place, a competent surgeon can work cooperatively to assist in a surgical procedure that takes place in another region. However, due to long transmission times and the variable quality of the visual image feedback, these surgeons may be exposed to prolonged periods of radiation. A more efficient, safe, and reliable method is needed to disseminate new surgical knowledge worldwide.

1.2 Research approach

In this thesis, a virtual reality-based endovascular catheterization training system was designed and developed. Firstly, a hybrid 3D reconstruction method was proposed to extract the blood vessel walls from the specific patients' CT or MRI files. Physics-based deformation models were built to simulate the behavior after the interaction between the blood vessel walls and the virtual catheter. A new master controller with force feedback for the virtual reality training system was designed and developed to allow the interventionalists to do the surgical training courses by using the natural endovascular catheterization skills. To solve the high cost and difficulties in distance teaching in Canada, a virtual reality and image-processing based method was described to improve the feasibility and maneuverability of the remote learning and training course.

1) To reconstruct a realistic three-dimensional vascular model, a median filter algorithm was employed to reduce the noise of CT images. Next is to rebuild the 3D surface of a vascular segment from CT or MR images using

level sets. Finally, centerlines of a vascular segment were computed and the surface of a vascular segment was smoothed.

2) To maintain the natural endovascular catheterization skills of the interventional radiologist, a camera is employed to detect the axial and radial motions of a catheter simultaneously with the ability to allow interventional radiologists to use their dexterous skills while performing catheter-based interventions. Additionally, a haptic unit is developed to provide the interventionalists with force and torque feedback.

3) The transmission time of visual feedback was effectively reduced due to the significant reduction in data volume using coordinates instead of actual images.

2. Research results

2.1 Reconstruction of realistic three-dimensional vascular models based on CT or MR images

Core components of virtual-reality surgical simulators and training systems are the realistic vascular models that are virtual representations of real blood vessels that display accurate displacement due to the fact that models with incorrect material properties and shapes could result in adverse training effects. In this study, two kinds of reconstruction algorithms were proposed. One is to rebuild the vascular structure based on normal and advanced CT or MR images. The normal images were employed to subtract their corresponding advanced images to remove human bones and other soft tissues, thereby remaining the data of blood vessels. This approach is adaptable to calculate the whole vascular structure. The other one is reconstruct the 3D vascular models based on advanced CT or MR images only according to marching cube and level sets algorithms. This approach is preferable to build a vascular segment due to its flexibility.

2.2 Development of a new master controller for the VR based training system

Based on analysis of requirements and state of the art in computer-assisted and robot-assisted training systems for vascular interventional surgery, a new master controller capable of contactless measuring the axial push-pull and twisting motions of a catheter with force feedback to the operators was proposed, whilst still preserving the natural ergonomic skills of conventional catheterization. A camera was employed to detect the motions of the catheter freely and operators can manipulate the

real catheter intuitively with a familiar, ergonomic setting. Force feedback to the operator, in radial and axial directions, were generated by Ampere forces based on the calculated forces between the vascular model and the virtual catheter in a virtual reality environment or the forces from the sensing unit of the slave system. Several experiments were conducted to evaluate the performance of the new master controller. The experimental results show that the errors of the catheter sensing unit and haptic unit of the new master controller are in an acceptable range and it can be used as a controller in a computer-assisted or robot-assisted training system.

2.3 Design of a new prototype to reduce the transmission time of visual feedback based on VR-based method

In this part, a newly developed method was described, based on virtual reality and image-processing technology, for efficiently reducing visual feedback transmission times, making it easier to control the time difference between haptic signals, control data, and image information. This was achieved by reducing the amount of communication data in the image information. Several remote visual feedback transmission experiments were conducted to demonstrate the feasibility of the proposed prototype, via a cooperative surgical effort between research groups in China and Japan. The purpose of the experiments was to evaluate the performance of the new catheter operating system and its associated transmission times for visual feedback, by comparing performance before and after the application of the proposed architecture. The maximum error for catheter reconstruction on the tip of the catheter was 0.93 mm less than 1 mm in these 10 frames. Remote transmission experiments show that the transmission time of the visual feedback is reduced significantly based on the newly developed method.

2.4 Contributions of this research

There are three key points in this research. Firstly, a hybrid reconstruction method for 3D vascular model based on a special patient's CT or MR images was proposed. It is more flexible and reliable than relative works. Secondly, a newly developed master controller capable of contactless measuring the axial push-pull and twisting motions of a catheter with force feedback to the operators was proposed. Compared to relative works, it still preserves the natural ergonomic skills of conventional catheterization.

Finally, a new method was described, based on virtual reality and image-processing technology, for efficiently reducing visual feedback transmission times, making it easier to control the time difference between haptic signals, control data, and image information.

3. Conclusions and future work

In this research, firstly, we developed a new hybrid method to reconstruct the 3D vascular models based on a special patient's CT or MR images. It can be used to reconstruct the whole vascular structure or a vascular segment. Additionally, smoothing algorithms were employed to obtain a better surface model. Secondly, a new master controller was designed and developed with much consideration of the conventional catheter handling skills used in a real endovascular interventional surgery compared to the existing commercially available products and research achievements. Finally, we proposed a two-camera system to detect the position of a catheter inside a tube (used to represent a blood vessel), and transformed its red markers into 3-D coordinates using an image-processing algorithm at the patient's location. The 3-D coordinates were then transmitted to the operation location and reconstructed in a virtual reality environment as visual feedback. The transmission time of visual feedback was effectively reduced due to the significant reduction in data volume using coordinates instead of actual images.

In the future, I will realize the force feedback in the virtual reality environment including the tip feedback and the proximal feedback.

審査結果の要旨

審査申請者の博士学位論文「仮想現実（VR）に基づく血管介入手術のためのカテーテル手術訓練システムに関する研究」(**Study on a Virtual Reality-based Training System for the Vascular Interventional Surgery**) 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、仮想現実に基づく新型カテーテル手術訓練システムを提案・試作し、また、カテーテル遠隔手術支援システムに用いる視覚フィードバックの送信時間を短縮する方法を開発した。そして、仮想現実に基づくシミュレーションシステムを開発し、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、カテーテル側にも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. 患者のCT又はMRI画像から必要な血管内壁を抽出する方法の開発および仮想現実環境で患者の特定の3D血管モデルを構築する方法を確立した。さらに、血管内壁の物理パラメータを加味した**mass-spring**モデルによる変形可能な血管モデルおよび弾性モデルに基づいたカテーテルVRシミュレータを開発した。
2. カフィードバックデバイスの試作を行い、力情報をリアルタイムで表示するために新型ユーザインターフェースを開発した。この新型力覚インターフェースを利用してカテーテルと血管内壁面の接触する状況や接触する力の大きさを随時に検知、提示できることを実証した。
3. 医者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手術訓練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、熟練者の操作スキル抽出を可能にした。
4. ビジュアルフィードバックの遅延時間を減少させるための新方法を提案し、ステレオビジョン画像処理技術（ステレオキャリブレーション、平行ステレオ、ステレオマッチングと3次元座標の再構築）に基づいた画像転送処理時間を短縮するアルゴリズムを確立し、仮想現実環境で画像を再構築する手法を開発した。複数回にわたる遠距離間（北京市—高松市）での遠隔視覚フィードバックの転送実験を行い、視覚フィードバックの送信時間を大幅に減少できることを実証した。
5. 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。
6. 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。

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. 三次元の血管モデルは、ハイブリッド（構造全体の再構成のための高速計算法と部分血管再構築のための柔軟計算法）再構成アルゴリズムに基づいて再建された。さらに、リアルタイムでの計算を達成するために、**mass-spring**モデルで血管壁の変形をシミュレートするアルゴリズムを開発した。そして、弾性ジョイントモデルに基づく仮想現実環境の中にカテーテルの挙動をシミュレートする方法を確立した。また、熟練した医者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、次世代の仮想現実（VR）に基づく血管介入手術の訓練システム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. カテーテルの移動量及び回転角度を検出するために、新型の非接触測定方法を開発した。カテーテルにマーカを取り付け、パターン認識を用いた画像処理技術により、カテーテルの移動量と回転角度の検出を行った。本物のカテーテルを利用して、医師の操作手技の訓練を可能にした。
3. カテーテルと血管内壁面との間の接触力の情報取得と、新型のカフィードバックデバイスで、取得した力を手術中の医師にリアルタイムで表示できる。この新型のカフィードバックデバイスを用いる新型マスターコントローラを利用して、初心者に向けて、臨床訓練と教育ができるようになった。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。
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、医者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。

以上により、本論文はその新規性、発展性を高く評価できる。本審査委員会は申請者が香川大学大学院の博士（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、学会誌に英文 **2編**、および国際会議論文 **3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] **Jin Guo**, Shuxiang Guo, Takashi Tamiya, Hideyuki Hirata, Hidenori Ishihara, A Virtual Reality-based Method of Decreasing Transmission Time of Visual Feedback for a Tele-operative Robotic Catheter Operating System, The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, DOI: 10.1002/rcs.1642, 2015.
- [2] **Jin Guo**, Shuxiang Guo, Nan Xiao, Baofeng Gao, Virtual Reality Simulators based on a Novel Robotic Catheter Operating System for Training in Minimally Invasive Surgery, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 24, No. 4, pp. 649-655, August, 2012.
- [3] **Jin Guo**, Shuxiang Guo, A Haptic Interface Design for a VR-based Unskilled Doctor Training System in Vascular Interventional Surgery, Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.1259-1263, 2014.
- [4] **Jin Guo**, Shuxiang Guo, Nan Xiao, A Method of Decreasing Transmission Time of Visual Feedback for the Internet-based Surgical Training System, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.914-919, 2013.

- [5] **Jin Guo**, Shuxiang Guo, Nan Xiao, Baofeng Gao, Xu Ma and Mohan Qu, “A Method of Decreasing Time Delay for A Tele-surgery System”, Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.1191-1195, 2012.

最終試験結果の要旨

平成 27 年 2 月 12 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、口述試験による審査委員および外部専門家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、口述試験による仮想現実 (VR) に基づく血管介入手術のためのカテーテル手術訓練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。

- 開発した血管モデルについて、物理特性をどのように表現するか。
(回答) 開発した血管モデルは幾何情報だけではなく、弾性と粘性の物理特性を血管モデルに含まれている。
- 実施した遠隔操作実験をしたとき、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 1 秒間以内であり、デバイスの遅延はあまり存在しなかった。
- 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－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。熟練医者の操作スキルを抽出し、モデル化、訓練することにより、高度専門医の育成、および臨床応用を目指す。
- 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。
- 開発した仮想現実 (VR) に基づく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。
- 視覚フィードバックの中身は何か。
(回答) 視覚フィードバックは二つの部分を含み、一つ目はカメラからのモニターリング

イメージで、二つ目は VR カセンサーからの操作中における力覚を表す視覚情報である。両方のモニターリングイメージを医者側に提示し、危険域などを視覚フィードバックして、事故を防ぐ操作方法を実現した。

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。