

氏 名	たかしま かずと 高 嶋 一 登
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2600 号
学位授与の日付	平 成 18 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 機 械 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Development of tactile sensor and surgical simulator for minimally invasive surgery (低侵襲手術のための触覚センサおよび手術シミュレータの開発)
論文調査委員	(主 査) 教 授 池 内 健 教 授 堤 定 美 教 授 岩 田 博 夫

論 文 内 容 の 要 旨

内視鏡やカテーテルを用いる低侵襲治療法は、患者の負担が少ない反面、高度の熟練を要するため術者の数が限られており、また危険性も低くない。本論文は、低侵襲治療における安全性を高めるために、内視鏡用触覚センサおよび手術シミュレータを開発した過程を述べたものであり、6章から構成されている。

第1章は序論であり、内視鏡とカテーテルを用いる治療法の原理、歴史および問題点に触れ、本研究の目的と意義について記述している。

第2章では、血管用内視鏡に装着して三分力を同時に測定できる光学式触覚センサについて述べている。このセンサは先端に赤外線フィルターを取り付けてターゲットとしており、横向きの外力が加わるとターゲットが横方向に移動し、長軸方向の外力が加わると縦方向に移動する。そこでファイバーによって画像を取り込み、画像処理を行うと、ターゲットの幾何学的重心の変化から横方向の力の大きさと方向がわかり、ターゲットの面積の変化から長軸方向の力の大きさがわかる。本センサは画像観察用の光学系を使用するため、付加物の占める体積が少ない。また赤外線によって測定するため、内視鏡本来の画像に影響を与えないばかりでなく、高い透過性のため周囲の血液の影響は少ない。センサを試作して外力を加える実験を行い、入力と出力の関係を詳しく調べている。同時に有限要素解析を行い、外力の方向が出力に影響を与えることを明らかにしている。以上の結果をもとに、3方向の力を高精度で測定できることを示している。さらに、内視鏡先端部にセンサを装着し、血管モデルに挿入するときの3方向の力を経時的に測定している。

第3章では、力測定用触覚センサをもとに開発した剛性測定用の触覚センサについて述べている。このセンサは触覚センサにアタッチメントを追加することにより、軸方向の外力だけでなく、同時に軸方向の変位も測定するものである。本センサを用いて各種の工業材料を測定することにより、材料の剛性を測定することが可能であることを確認するとともに、ブタの関節軟骨に適用してクリープ変形を伴う変形過程における剛性を測定できることを示している。本触覚センサは、専用の力学試験機に比べれば精度が低いものの、可視光の画像を損なわないので、内視鏡の観察下で対象とする部分を特定して剛性を測定することが可能である。生体組織の剛性は成熟・老化によって変化するだけでなく、病気の発症・進行によっても変化するもので、臨床診断や治療技術の開発など医療に応用できる可能性があり、たとえば、関節鏡に装着すれば軟骨の変性を早期に発見できることを示している。

第4章では、血管内皮を試料とする実験によってカテーテルの挿入時に接触部に加わる力と摩擦力を測定した結果を述べている。血管用カテーテルと血管内壁を力学試験機に装着して一定速度で挿入する実験ではカテーテルの軸と血管壁が垂直に近いほど、反力と摩擦力が大きいことおよび接触部でのすべりが少ない反面、カテーテルの弾性変形が大きいことを示し、挿入時にこのような状態になると血管の損傷が著しいことを示唆する結果を得ている。また、カテーテルの軸と血管壁が垂直に近い場合には、接触によって血管壁が変形することにより、接触力がさらに増加することを見出している。以上の様に、血管内治療における血管内壁の損傷は術者の熟練の程度によって著しく異なることが示されており、トレーニングの重要性

が指摘されている。

第5章では、脳血管内でカテーテルを安全に操作・誘導するために必要な、カテーテル経路予測用シミュレータの開発について述べている。まず市販のガイドワイヤの実測結果をもとに作成したモデルと血管モデルによってシミュレーションを行った結果、ガイドワイヤ先端の挿入軌道と接触力に及ぼす摩擦係数、血管の弾性特性、ガイドワイヤ先端の形状と曲げ剛性の影響を明らかにするとともに、摩擦係数が大きい場合にはガイドワイヤ先端が振動して接触応力が大きく変動する現象を見出している。また、血管の弾性係数が低いとき、およびガイドワイヤの曲げ剛性が高いときには血管の変形が大きくなるとともにガイドワイヤの軌道が変化すること、および屈曲したガイドワイヤを用いると血管の屈曲部で反力が大幅に軽減されることを示している。

第6章においては論文の内容をまとめると共に、低侵襲治療の安全性向上に本研究によって開発された光学式触覚センサと手術シミュレータが有効であるだけでなく、これらを組み合わせて制御すれば、カテーテルや内視鏡を患部まで自動的に誘導できると述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、低侵襲医療のための光学式触覚センサおよび手術のシミュレータの開発研究についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 血管用内視鏡に装着して、先端部に加わる三分力を同時に測定できる光学式触覚センサを開発した。このセンサは内視鏡の光学系をそのまま利用するため、付加的なパーツが少ない。また、赤外線によって測定するため、測定に及ぼす血液の影響が少なく、内視鏡本来の画像に影響を与えないなどの特徴がある。
2. 有限要素解析と実験によって、試作した光学式触覚センサにおいて各出力の干渉によって誤差が生じることを明らかにするとともに、その補正法を示した。また血管モデルを用いる実験によって、挿入時にカテーテル先端に加わる力を正確に測定できることを示した。
3. 生体組織の剛性を測定する光学式触覚センサを開発した。これは力測定用触覚センサにアタッチメントを取り付けて、力と変位を同時に測定できるようにしたものであり、工業材料の剛性だけでなく、関節軟骨のようなクリープを伴う変形過程の経時的な測定が可能である。
4. カテーテルと血管内壁との接触による力をモデル実験によって調べ、カテーテルが血管内壁に対して垂直に近い角度で接触するときに接触部でのすべりが少ない一方で、接触力およびカテーテルの変形が大きいことを見出した。また、接触力による血管の変形は接触力をさらに増加させることを明らかにし、血管用カテーテルの操作に関するトレーニングの重要性を指摘した。
5. 脳梗塞、脳動脈瘤などの血管内治療に用いカテーテルの手術シミュレータを開発し、市販のカテーテルを血管モデルに挿入する場合のシミュレーションを行い、ガイドワイヤ先端の軌道と接触部の反力におよぼすガイドワイヤと血管の摩擦係数、血管の弾性係数、ガイドワイヤの曲げ剛性の影響を明らかにした。
6. カテーテルの挿入におけるガイドワイヤ屈曲の影響を調べ、ガイドワイヤの形状が曲がった血管に沿う場合には血管の反力は小さいが、逆の場合には血管内壁が損傷する可能性があることを示し、カテーテルにおけるねじり操作の重要性を定量的に示した。

以上、要するに本論文は、触覚センサや手術シミュレータなどの工学的手段によって低侵襲治療の安全性を高める研究であり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成18年1月26日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。