

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K12106

研究課題名（和文）手術用マスタースレイブ型ロボットにおける精密な力覚伝達システムの開発

研究課題名（英文）Development of a transfer system of a precise inner force sense for a master-slave robotic surgical system

研究代表者

森實 修一（MORIZANE, Shuichi）

鳥取大学・医学部附属病院・講師

研究者番号：50419496

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ロボット手術用鉗子内のワイヤ部分に取り付けた加工した光ファイバを利用した Fabry-perot 干渉計を利用した新たな発想の圧力検知システムの構築を実施した。本システムは、先端を特殊加工した光ファイバを用い、鉗子動作によるワイヤ変位を光信号に変換して力覚を測定するものである。変位センサを構成する干渉部分にスペーサーを用いて干渉計を作成して、キャビティ作成による干渉スペクトルを分光器にて測定した。本システムでは、鉗子の力覚センシングは可能な分解能であると考えられた。また、鉗子モデル内の駆動ワイヤにこの変位センサを実装し、鉗子の把持力に対する駆動ワイヤの微小変位を計測し、相関性が確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、今後、触覚を有する手術支援ロボットシステムの実臨床応用を考える上で大変有用なデータと考えられ、安全なロボット支援手術の実施の一助となる可能性がある。しかし、現時点ではまだ基礎実験段階であり、今後のさらなる追加研究が必要であると思われる。

研究成果の概要（英文）：A new concept of forceps pressure sensing system using a Fabry-perot interferometer with a processed optical fiber attached to a wire part in the forceps of robotic surgery was constructed. This system used an optical fiber with a specially processed tip to convert the wire displacement caused by forceps motion into an optical signal to measure the force sensation. An interferometer was created using a spacer for the interference part that constitutes the displacement sensor, and the interference spectrum due to cavity creation was measured with a spectrometer. Force sensing of forceps was considered to be possible resolution in this system. We also implemented this displacement sensor on the driving wire in the forceps model and measured the minute displacement of the driving wire against the forceps grasping force, and the correlation was confirmed.

研究分野：ロボット手術

キーワード：手術用鉗子 力覚 センシング 変位センサ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、日常診療の現場において手術支援ロボットの進出が目覚ましく、低侵襲手術や質の高い繊細な手術を目指して、本邦でも研究開始時点で200台以上もの手術支援ロボット da Vinci が導入されていた。本邦での保険収載に関しては、2012年より前立腺癌に対する前立腺全摘除術、また2016年より腎癌に対する腎部分切除術がロボット支援手術として認可されていた。現時点では、触覚や力覚を有する手術用ロボットは未だ開発途上であり、日常診療の現場では視覚や経験により力覚を補完しているのが現状である。この力覚の欠如に関連した有害事象として、胃癌手術の際の隣臓損傷や前立腺癌手術の際の外腸骨静脈損傷などはロボット支援手術の視野外で生じる事象であり、力覚を有する手術支援ロボットの存在によりある程度回避できるものと考えられた。さらに力覚の追加によって患者への身体的負担や精神的負担を軽減できるだけでなく、術者への手術に対する精神的負担も大幅に軽減されることが期待される。申請者らは、これまで感圧エラストマーを使用した独自の圧感知システムを搭載した手術用鉗子や EAM プレーキデバイス（電氣的吸引材料）を用いて、出願特許（特願 2015-149250 鉗子器具および圧力センサ、特願 2016-070125 医療用鉗子、特願 2016-070129 医療装置モータ）を行いつつ、力覚フィードバックシステムの開発を進めてきた。研究開始当初、本研究では力覚伝達システムの全体的な改善を図ることにより、よりタイムラグが少ない力覚フィードバックを有する手術用鉗子システムの構築を目的とした。

2. 研究の目的

上記のとおり本研究では、力覚を有する手術支援ロボットのマスタースレイブ型鉗子システムの開発を目的として研究を開始した。しかし、これまで共同研究を行っていた企業での想定外の諸事情があり、研究方法を当初の予定から一部変更することとなった。実際、本研究では本学工学部の先生にご協力いただき、手術支援ロボット用鉗子の精密な力覚センシング技術の開発研究を再開した。しかし、当初予定していた感圧エラストマーや EAM プレーキデバイスを用いた圧力検知システムの構築は、センサ感度や電気メスなどのエネルギーデバイス使用時の電磁ノイズなどの懸念から断念した。そこで、鉗子内のワイヤ部分に取り付けた加工した光ファイバを利用した Fabry-perot 干渉計を利用した新たな発想の圧力検知システムの構築を行うことを新たな目的とした。

3. 研究の方法

(1) 変位センサの構造

図1にセンサシステムの概要を示す。変位センサは外径 $125\mu\text{m}$ の光ファイバ、くさび形干渉計、センサホルダで構成される。手術支援ロボットで用いられる鉗子には、電気メスなどの機能が組み込まれている。エネルギーデバイスとして高周波電圧が一時的に鉗子先端に印加されるため、センサには耐電磁ノイズ特性が求められる。本研究では光干渉を用いた計測原理を用いることで、電磁ノイズを防ぐ。光ファイバ先端は 45° の傾斜ファイバ加工されており、ミラー処理されている。光ファイバに入射した白色光は、光ファイバ先端の傾斜ミラーで反射し垂直方向に照射され、光ファイバの側面からくさび形干渉計へ照射する。照射光が長軸方向から短軸方向に曲がる特殊な構造を用いることで、センサの細径化が可能になる。干渉計はくさび形状に研磨された石英ガラスで、光の照射面（上面）はハーフミラー（Cr）、下面は全反射ミラー（Al）が成膜されている。くさび形干渉計内で反射した光はミラー間距離（cavity length）の光路差に応じた干渉波形となり、分光器によりスペクトル解析される。くさび形干渉計上の光ファイバの位置が変わると、その変位量に合わせてくさび形干渉計の厚みも変化する。くさび形干渉計の厚みを計測することで光ファイバの変位量が算出できる。

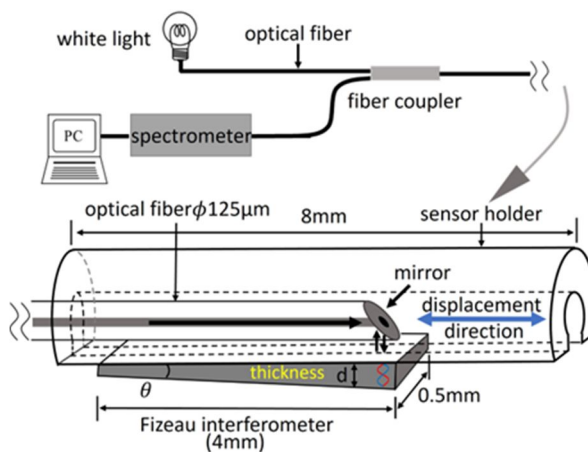


図1 システム概要

(2) 変位センサ作製

本変位センサはくさび形干渉計、先端傾斜形状光ファイバ、センサホルダで構成され、それぞれの作製工程について説明する。

くさび形干渉計の作製

図2にくさび形干渉計の作製工程を示す。厚み 0.5 mm の石英ガラスの下面に全反射ミラー（アルミ）を成膜し、その後研磨時の基板となるベースガラス上に固定する。本研究では、石英ガラスをベースガラス上で固定する際に、低収縮率で低応力な特性を有するUV硬化接着剤を用いた。また、接着剤を硬化する前に、石英ガラスの上で 0.3 kg の重りを乗せて、重力を利用し

接着剤層の平坦化を行った。この石英ガラスを任意の角度で研磨し干渉計となる。また、変位センサの距離分解能は研磨角度に依存する。研磨した後、上面にハーフミラー(Cr)を成膜し、ダイサーを用いて干渉計を任意の大きさに切り出す。小型化した後、ベースガラスから分離することで作製した。

先端傾斜形状光ファイバ作製

図3に先端傾斜形状光ファイバの作製工程を示す。ダイサーを用いてシリコン基板の上で溝を作製し、その上に光ファイバを埋め込み接着剤で固定する。45°で切断し、切断した端面にAl蒸着により成膜し、ミラーを作製する(11)。なお、光源からの光はファイバ先端のミラーで90°反射され、照射光が対面に照らされていることを確認した。

センサホルダ作製

光ファイバと干渉計間の距離を一定に保つためには、光ファイバが安定してスライドさせる必要があり、センサホルダを試作した。外径550 μm、内径140 μmのホウケイ酸ガラス製のガラスキャピラリーを用いた。図4に示す様にキャピラリーをスライドガラスに固定し、キャピラリーの中心から150 μm離れた位置で切断し、その後、切断した端面を上に向けキャピラリーの中心に幅100 μmの溝を作製した。

センサの組立

試作したセンサホルダに干渉計を固定し、先端傾斜形状光ファイバをセンサホルダに挿入する。スライドできることを確認し光ファイバの回転方向を調整する。光ファイバの変位より、戻り光の干渉スペクトルが変わることを確認し変位センサを組み立てた。図5に試作したセンサを示す。

4. 研究成果

(1) 変位計測実験

光ファイバがセンサホルダ内で移動すると、くさび形干渉計と先端傾斜形状光ファイバの相対変位によって、照射部の干渉計厚みは変化する。光ファイバの変位と干渉計厚みの変化の相関を調査するために図6に示す実験系を用い、変位計測実験を行った。精密ステージを用い、光ファイバを0.4 mm ずつ3.6 mm まで変位させ、干渉計厚みの変化を分光システムにより計測した。その結果を図7に示す。光ファイバの変位と干渉計厚みの変化は比例関係であり、先端傾斜形状光ファイバを用いた光干渉計測が可能であることがわかった。また、干渉計厚みの変化は直線であることから、研磨により作製したくさび形干渉計は均一な傾斜状態で平面であるといえる。

(2) ワイヤ伸張量計測実験

本変位センサの実使用において、傾斜形状光ファイバとくさび形干渉計との距離を一定に保持し、安定的な光干渉計測を可能にする必要がある。ガラスキャピラリーを用いて試作したホルダの有用性を確認するために、図8に示す実験系を用いて実験を行った。センサホルダは鉗子内部に見立てた

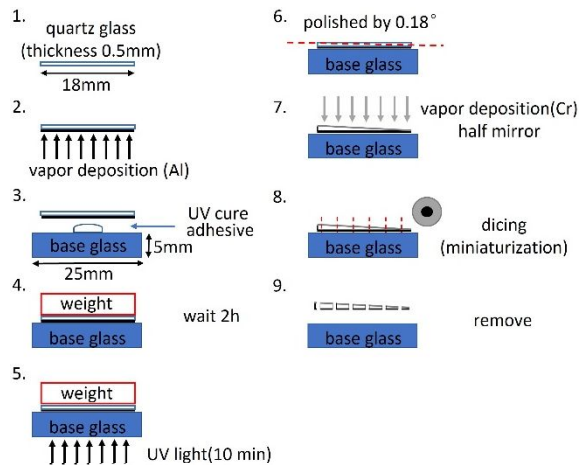


図2 プロセスフロー：くさび形干渉計

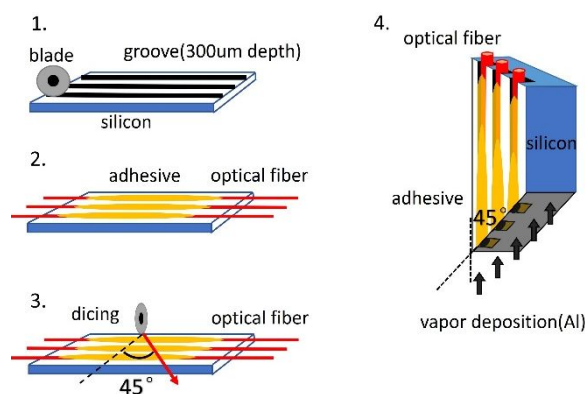


図3 プロセスフロー：先端傾斜光ファイバ

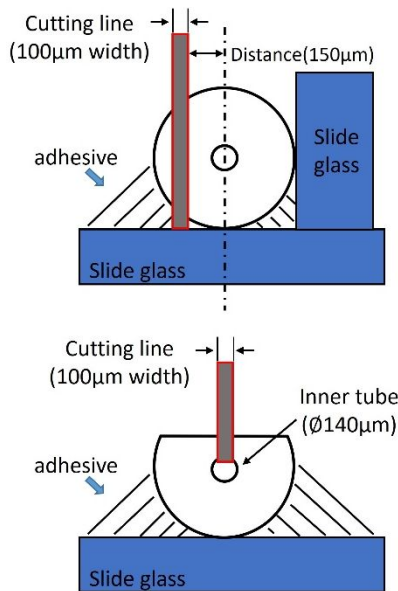


図4 プロセスフロー：センサホルダ

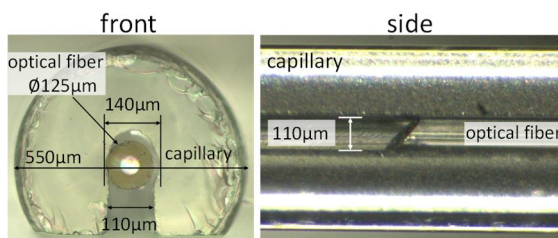


図5 試作した光学変位センサ

ステージの一部に固定し、傾斜光ファイバは駆動ワイヤ上に固定した。また、駆動ワイヤはフォースゲージに固定し、ワイヤ牽引力も同時に測定し鉗子把持力との関係も確認した。高倍率実体顕微鏡でワイヤの伸び量を光学計測しながらセンサ出力変化を記録した。ワイヤの引張力と変位量の計測結果を図9に示す。実線は顕微鏡、点形状のデータは変位センサの実測値である。センサの光学観察結果と光干渉計測結果はほぼ同じ値となった。

(3) 考察

本実験で用いたセンサの変位分解能について考察する。白色光源を用いた光干渉計測に用いた分析システムのキャビティ長の距離分解能は約 10 nm であることから、本センサのくさび形干渉計の厚みの分解能 Δd は 10 nm と考え、変位センサの変位分解能は約 3.14 μm であるといえる。臨床上の経験から、手術ロボットが組織を把持する場合は、10 N の最大把持力に対して、本センサは 1/100 の力分解能が実現でき、手術ロボット鉗子の要求に満たされると考える。一方で、ロボット鉗子に用いられる駆動ワイヤのばね定数は様々であり、鉗子の開閉を制御するソフトウェアやモータなどの仕様に合わせてばね定数の値は設定する必要があることから、例えば 30 kN/m よりばね定数を大きくする必要がある場合は、くさび形干渉計の角度を増やすことで、センサの変位分解能を小さくすることができ、分解能を調整することが出来る。

次にガラスキャピラリーを用いたセンサホルダの有効性について検討する。顕微鏡を用いて光ファイバの動作を光学観察すると(図8)光ファイバがワイヤの伸び方向のみに安定して移動することを目視しにより確認でき、内径 140 μm のセンサホルダを利用することで、外径 125 μm の光ファイバの感度方向以外への移動量は制限された。また、図7、9に示す変位計測結果からも、光干渉計測結果が得られており、センサホルダを用いることで傾斜形光ファイバとくさび形干渉計間が安定して移動できていることが考えられ、センサホルダの有効性が確認できた。

実験結果図9はワイヤの牽引力と伸び量でありワイヤのばね定数を表しているが、牽引力が約 5 N を堺に変位量の増加が小さくなっている。グラフの傾きから、5 N 以下ではワイヤのばね定数は約 5 kN/m、5 N 以上では 43 kN/m のばね定数と算出された。今回の計測では、試作したセンサの変位量は光学的にも変位量を確認しており、センサの光学観察結果と光干渉計測結果はほぼ同じ値となっていることからセンサの誤差とは考えにくい。一方、計測に用いた駆動ワイヤはステンレス素線の撚り線ワイヤで、かつ内空がある柔らかいワイヤを用いた。牽引力が小さい場合は、撚っているコイル状のワイヤが引っ張られて変位するコイル形状のばね定数であるために柔らかく、また、5 N 以上の牽引力では、コイル状から直線形状に近づいたワイヤの材料特性で決まるばね定数に切り替わったために大きなばね定数となったと考えられる。

これらの結果より、力覚フィードバックを有する手術支援ロボット用鉗子システムの構築に繋がる結果を得られたと考える。

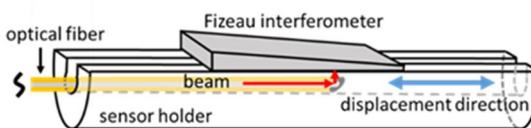
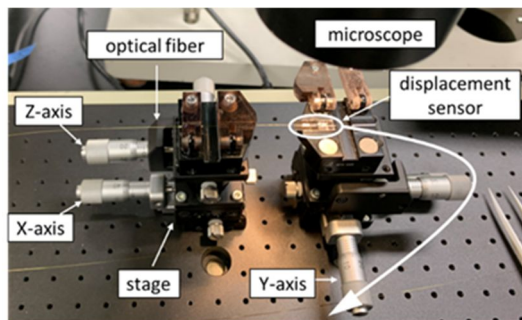


図6 変位計測実験系

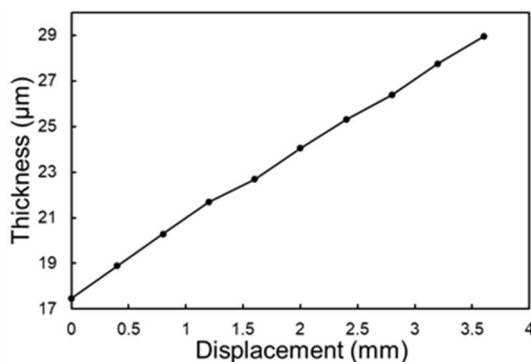


図7 くさび干渉計厚み計測結果

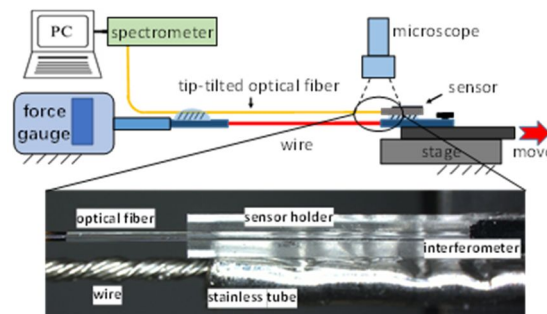


図8 ワイヤ伸張量計測実験

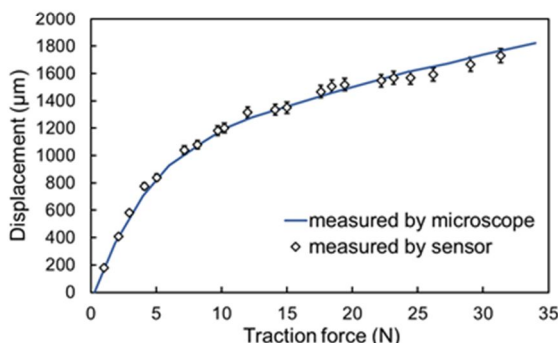


図9 ワイヤ伸張計測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 矢谷真樹生、董 佳遠、森實修一、植木賢、上原一剛、李 相錫、松永忠雄
2. 発表標題 手術支援ロボット用鉗子のための把持力計測の検討
3. 学会等名 第27回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢谷 真樹生、李 相錫、松永 忠雄
2. 発表標題 低侵襲医療ツール用光干渉細径変位セン
3. 学会等名 令和2年度電気学会E部門総合研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 医療装置	発明者 松永忠雄、植木賢、 森實修一、上原一 剛、李相錫	権利者 鳥取大学
産業財産権の種類、番号 特許、2022-12853	取得年 2022年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	武中 篤 (TAKENAKA Atsushi) (50368669)	鳥取大学・医学部・教授 (15101)	
研究分担者	松永 忠雄 (MATSUNAGA Tadao) (00396540)	鳥取大学・工学研究科・准教授 (15101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------