

令和元年6月13日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K20018

研究課題名(和文)人の感覚能力を超えて触診するスレーブ型マイクロハンドロボット

研究課題名(英文)Slave type micro hand robot for palpation beyond the ability for the human sense

研究代表者

小西 聡 (Satoshi, Konishi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：50288627

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「人の感覚能力を超えて触診するスレーブ型マイクロハンドロボット」に関し、触診機能センサとして歪センサと温度センサ、pHセンサを取り上げ、センサ開発とマイクロハンドへの集積化を中心に研究を進めた。アクチュエータとの整合性が高い液体金属ひずみセンサや薄膜熱電対センサ、TaO<sub>2</sub>製薄膜pHセンサ等の開発とマイクロハンドへのセンサ集積化について成果を挙げた。並行して開発を進めてきたオペレータ用のインタフェースであるマスター部への信号提示にも成功している。オペレータがマスターインタフェースを通して触覚や温覚を提示する足掛かりとなる成果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、マイクロハンドを駆動する人工筋肉であるマイクロアクチュエータと触覚機能のためのセンサに関する研究内容を組み合わせたマイクロハンドロボットの実現を目指してきた。いずれも独創性の高い内容であり、最新の国際会議でも学術的に高く評価されている。マイクロハンドロボットは、人の手が入り込めない空間にも進入できるため、触診することを想像したこともない部位にアプローチすることもできる。本研究の成果は、触覚提示ロボットシステムとしての展開を目指している。本研究の推進にあたり、医療関係者との意見交換も行って進めてきたように、社会のアンメットニーズを刺激する意義を有する研究内容である。

研究成果の概要(英文)：This study worked on the research and development of "Slave type microhand robot to palpate with more than ability for human touch sense".

Strain sensor, temperature sensor, and pH sensor were studied as promising sensors for the touch sense of the microhand. Integration of sensors into microhand was studied as well. The strain sensor using liquid metal having high compatibility with a pneumatic microactuator for the microhand was developed. The thermistor and thermocouple sensor were studied as the temperature sensor. The thermocouple sensor composed of thin film metals or alloys was batch fabricated and integrated into the microhand. In addition to characterization of devices, developed microhand integrated with sensors was applied to a sense presentation robot system. These results will be lead to the master-slave robot system for the sense presentation in future.

研究分野：マイクロマシン

キーワード：マイクロマシン パーチャルリアリティ 知能ロボティクス

## 1. 研究開始当初の背景

少子高齢化が進む中、より質の高い医療・介護の提供により「国民の健康寿命の延伸が求められている。国の日本再興戦略の中でも医療健康分野における科学技術の貢献が強く期待されている。質の高い医療において、低侵襲医療技術の研究開発と実用化が重要な課題となっている。低侵襲医療では、消化器官や腹腔、子宮といった狭窄、もしくは切開が必要な空間へのアクセスと空間内でのオペレーションをいかに実現するかが重要となり、ロボット技術への期待が高まっている。医工連携において、例えばコンピュータ外科学会等でも精密機械技術、ロボット技術を用いた低侵襲医療技術の研究開発が活発に進められている。既に実用化されているダヴィンチのようなマスタースレーブ型手術ロボットはその代表例といえる。一方、さらなる小型化、精密化においては、マイクロマシン技術の活用が有効であり、内視鏡やカテーテル、ステントや脳神経インタフェースといった器具の高度化に貢献してきている。基盤技術を提供するロボットの分野では、力学的な触覚デバイスについての研究も多く、バーチャルリアリティの分野への応用も盛んである。

## 2. 研究の目的

本研究が着目する低侵襲医療においても、ニーズが顕在化しないアンメットニーズは多いといわれる。例えば腹腔内で人の手の代わりになって触診するマイクロハンドがあれば、今までにない生体情報が得られ、診断に新しい考え方を導入することが期待される。研究代表者は、小さく・柔らかく・安全なシリコンラバー製圧力駆動マイクロバルーンアクチュエータを特徴技術として有している。本研究では、「人の感覚能力を超えて触診するスレーブ型マイクロハンドロボット」の研究開発に挑戦する。人工筋肉で動く小さな指で実現したマイクロハンドに触診機能を搭載し、スレーブ型ロボットとすることに取り組む。高い性能をもつセンサを搭載した小さな指で生体を触診することができれば、医師が自らの手による従来の触診では体験したことのない生体情報を得て診断を考えられる。人の指感覚にないマイクロデバイスの導入も可能である。加えて、新たな触診対象には直接手で触ったことのないものも含まれてくる。小さく・柔らかいマイクロハンドロボットは、人の手が入り込めない空間にも進入できるため、触診することを想像したこともない部位にアプローチすることもできるからである。本研究では、小さく・柔らかく・安全な圧力駆動マイクロアクチュエータと斬新な触診用マイクロデバイスを集積一体化した「人の感覚能力を超えて触診するスレーブ型マイクロハンドロボット」の実現により課題の解決を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、「人の感覚能力を超えて触診するスレーブ型マイクロハンドロボット」の研究開発に挑戦する。高い性能をもつセンサを搭載した小さな指で生体を触診できれば、手による触診では体験したことのない生体情報を得て診断を考えることができる。

本研究では、1) 人の指感覚よりも高い性能をもつマイクロデバイスの導入、2) 人の指感覚にないマイクロデバイスの導入、3) 人の手がアプローチできない対象への触診、に取り組む。実現するマイクロハンドをスレーブ型ロボットとして生体を触診することができれば、医師が自らの手による従来の触診では体験したことのない生体情報を得て診断を考えられる。マイクロハンドロボットは、人の手が入り込めない空間にも進入できるため、触診することを想像したこともない部位にアプローチすることもできる。

研究体制に関しては、研究協力者である生体電気信号計測の専門家、医療分野からは内科および消化器外科の専門家の助言を頂きながら研究を推進した。

課題解決に向け以下の内容を重点研究項目に設定した。

- ・マイクロハンド本体に関する研究
- ・各種マイクロデバイスに関する研究
- ・実装技術に関する研究
- ・触診信号の処理に関する研究

まず期間前半では、プラットフォームとなるマイクロハンド本体、マイクロハンドの触診機能を担う各種マイクロデバイスの内容に研究の重心を置く。人の指感覚にある触覚、温覚センサに加え、電気生理センサや生化学センサ等も検討を行うことにした。

期間後半では、前半より取り組みを開始したデバイスのマイクロハンドへの実装技術、コンピュータへの触診信号の取り込みとその処理、といった研究内容に重心を移してシステム化を本格化し、ロボット構築を推進することにした。将来的には、マスタースレーブシステムを構築することを念頭に、本研究では挑戦的要素の強い項目を解決し、アンメットニーズの顕在化、応用ターゲットの把握に取り組む。次のフェーズで確立を目指しているマスタースレーブシステムは、オペレータとのインタフェースとなるマスター部が加わるが、本研究計画は次フェー

ズのシステム化に向けたスレーブ部の確立に貢献することになる。

#### 4. 研究成果

本研究では、「人の感覚能力を超えて触診するスレーブ型マイクロハンドロボット」の研究開発に取り組んできた。高い性能をもつセンサを搭載した小さな指で生体を触診できれば、手による触診では体験したことのない生体情報を得て診断を考えることができる。

本研究では、1) 人の指感覚よりも高い性能をもつマイクロデバイスの導入、2) 人の指感覚にないマイクロデバイスの導入、3) 人の手がアプローチできない対象への触診への応用、に着目している。マイクロハンド本体、各種マイクロデバイス、実装技術、触診信号の処理に関する研究を重点推進した。本研究では、「人の感覚能力を超えて触診するスレーブ型マイクロハンドロボット」の実現に向けて、特にマイクロハンドへの以下のデバイスの一体化を目指した。

マイクロハンドに搭載するデバイスとして、触覚センサや温度センサなどによる指感覚よりも高い性能をもつデバイスに加え、生化学センサなどの指感覚にない機能をもつデバイスの導入を計画した。触覚センサとしては、液体金属や薄膜を用いた歪センサの検討を実施した。温度センサについては、既製のセンサの導入に加え、熱電対の設計、製作にも着手した。さらに、生化学センサとしては、pH センサの研究開発に取り組んだ。

期間前半では、マイクロハンド本体、各種マイクロデバイスの内容に研究の重心を置き、マイクロハンド本体の設計構成は、触診機能の選定結果、進捗状況に基づいて実施した。触覚センサとしては、液体金属や薄膜を用いた歪センサの検討を実施した。シリコンラバー製の柔軟なマイクロハンドの特性を損なわないように、柔軟な歪センサが求められる。また圧力駆動のマイクロハンドは、流路を用いて圧力供給を行うため、流路構造を集積化することは容易である。そこで、マイクロハンドに歪センサ用の流路を増設し、液体金属を注入することにより歪センサを実現した。温度センサについては、まず既製のサーミスタタイプの温度センサの集積化を実施した。マイクロハンドの指にサイズに合わせ、数ミリ角サイズの温度センサを指構造に埋め込み、薄膜金属配線を施すことにより、極力指の柔軟性を損なわないようにした。さらに、マイクロハンドの指の製作工程中に一体形成可能な熱電対タイプのセンサを指構造表面に形成することに成功した。生化学センサとしては、pH センサの研究開発に取り組んだ。TaO<sub>2</sub>を用いた pH センサチップを実現し、特性評価を行った。pH センサの特性評価結果、pH の段階的な違いを検出することに成功した。pH センサの指への集積化に関しては、実装方式の温度センサと共通内容となるため、本研究では温度センサの集積化を優先して進めることにした。マイクロハンドについては、指に集積化するセンサ等のデバイスからの要求仕様に応じて設計を都度修正し対応するようにしてきた。

これらの期間前半の成果については、学術会議での報告も実施している。温度センサについては、国際会議 Transducers2017 に論文が採択され発表している。温度センサとしてサーミスタを採用し、シリコンラバー (PDMS) 製のマイクロハンドの指の指先に実装、薄膜金属配線をパターンニングして検出のための信号線を集積化した成果を報告している。温度センサと配線は PDMS 層で覆うことにより保護している。保護膜の有無による温度検出への影響も評価しており、熱伝導の観点から顕著な影響はみられないことを報告している。一方で、マイクロハンドの指は、内蔵の人工筋肉アクチュエータによって動作し対象に対して接近し接触することができる利点をもつ。本研究では、対象と指先センサの距離の影響に関する評価を行った。結果、室温中で直接触れ時の計測温度が 40 の場合、離れた直後から温度は下がり始め、1 mm離れたときには 5 の違いがみられた。この結果より、接触計測の重要性について報告している。

歪センサについては、国際会議 IEEE MEMS2018 に論文が採択され発表している。新たに開発した歪センサは、マイクロ流路内に液体金属を充填して実現したセンサに関する報告である。本研究では、これまでにマイクロハンドの指の動作検出のためのセンサとして流路抵抗型センサを報告した実績をもつ。マイクロハンドの指の曲げ角度を検出するために、人工筋肉のための構造と共通製作プロセスで実現可能なマイクロ流路構造を形成し、流路の変形による流路抵抗変化から曲げ情報を取得するセンサである。流路抵抗型歪センサは、当該応用において多くの利点がある一方で、コンピュータ制御のための電気信号に変換する前に、流量計測のためのセットアップが必要となる。流路内に液体金属を充填することにより、直接電気抵抗変化を計測することができるのが新たに構成したセンサの利点となる。国際会議での発表では、幅 150 μm、長さ 600 μm のバルーンを擁した人工筋肉マイクロアクチュエータの周囲に幅 50 μm、長さ 2mm の歪センサを集積一体化したマイクロハンドの指を報告した。マイクロハンドの指の曲げ角度に対して線形な抵抗変化特性が得られている。また、マイクロハンドの指を対象物に接触させた際のセンサ信号の変化から対象物の情報が得られることを報告している。

期間前半の成果を踏まえ、期間後半では、マイクロハンドへの集積化において顕在化した課題の解決に取り組んだ。マイクロハンドを駆動する圧力駆動マイクロアクチュエータと動作のセンサ特性への影響や、繰り返し動作による特性変化について分析し、設計に反映する等の改良を進めた。歪センサについては、特性の向上に加え、新たに三軸の力センサの開発にも成功している。pH センサについては、引き続き TaO<sub>2</sub> をイオン感応膜として利用した薄膜センサの特性向上に取り組んだ。さらには、歪センサと温度センサについては、マイクロアクチュエータ

で駆動するマイクロハンドへの集積化を進め、並行して開発を進めてきたオペレータ用のインタフェースであるマスター部への信号提示にも成功している。本研究の成果を応用し、オペレータがマスターインタフェースを通して触覚や温覚を感じるシステムの構成に展開している。

これらの期間前半の成果については、学術会議で報告をするに至っている。

機械学会主催の国内会議では、「温覚提示のための温度センシング機能を有するマイクロフィンガーに関する研究」と題して最新の成果を報告している。電気学会主催の国内会議では、「圧力駆動柔軟アクチュエータへの液体金属ひずみセンサの集積化と設計最適化」と題して、期間後半に取り組んだマイクロハンドへの液体金属ひずみセンサの集積化において顕在化した課題に対する対策結果について報告している。さらには、国際会議 IEEE MEMS2019 で採択された発表では、最新の成果である液体金属ひずみセンサを用いた三軸力センサについて報告している。

実現するマイクロハンドをスレーブ型ロボットとして生体を触診する医療応用を念頭に、内科および外科の内視鏡治療関係者からのアドバイスを受けて検討を行ってきた。医師が自らの手による従来の触診では体験したことのない生体情報を得て診断を考えられる。触覚提示機能の医師による体験、評価を実施し、その評価結果を基に应用展開の際の課題の抽出も進めている。マイクロハンドロボットは、人の手が入り込めない空間にも進入できるため、触診することを想像したこともない部位にアプローチすることもできる。

本研究では、マイクロハンド本体、各種マイクロデバイスとその実装、さらには触診信号の処理に関する研究で成果を挙げることができ、今後の触覚提示ロボットシステムとしての展開に道筋をつけることができたといえる。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計5件)

1. Shohei Otake, Fuminari Mori, and Satoshi Konishi, "COMMON FLEXIBLE CHANNEL STRUCTURE FOR INTEGRATION OF THREE-AXIS FORCE SENSOR AND SOFT MICRO ACTUATOR", Materials for Physical Sensors, IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems 2019.
2. 大竹祥平, 小西 聡, 「圧力駆動柔軟アクチュエータへの液体金属ひずみセンサの集積化と設計最適化」, 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 2018.
3. 平田暁也, 川嶋涼介, 小西 聡, 「温覚提示のための温度センシング機能を有するマイクロハンドの指に関する研究」, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018.
4. S. Otake and S. Konishi, "INTEGRATION OF FLEXIBLE STRAIN SENSOR USING LIQUID METAL INTO SOFT MICRO-ACTUATOR", IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems 2018.
5. R. Kawashima, S. Hagimori, H. Sato, and S. Konishi, "SLAVE FLEXIBLE MICRO-FINGER INTEGRATED WITH SENSOR FOR MASTER-SLAVE SENSE PRESENTATION SYSTEM", The 32nd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems 2017.

## 6. 研究組織

### (1)研究協力者

研究協力者氏名：牧川 方昭

ローマ字氏名：Makikawa Masaaki

研究協力者氏名：来見 良誠

ローマ字氏名：Kurumi Yoshimasa

研究協力者氏名：馬場 重樹

ローマ字氏名：Bamba Shigeki

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。