

氏名(本籍)	前田 祐作 (高知県)
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122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29年3月24日
学位論文題目	低侵襲治療応用にむけた微細皮膚感覚センサに関する研究
論文審査委員	(主査) 高尾 英邦 (副査) 下川 房男 (副査) 寺尾 京平

論文内容の要旨

本研究では、ヒトの触覚を再現する“微細皮膚感覚センサ”の実現とその医療分野への応用を検討し、有効性の検討を行った。

第一章では、本論文の導入として、本研究の背景、目的について述べている。皮膚感覚の認知プロセスや、機械量センサとしてのヒト触覚の性能についてまとめ、それを再現する触覚、あるいは皮膚感覚センサに対して期待されている応用分野について述べた。また、これまでに開発されている多くの触覚センサについて、その構造や原理についてまとめ、ヒト触覚との対比を行っている。研究の目的として、第一に、柔軟さ等の皮膚感覚に相当する情報を抽出可能な“微細皮膚感覚センサ”を高分解能かつ高空間解像力で実現することを提案し、第二の研究目的として、先端医療分野への展開を設定した。

第二章では、皮膚感覚に相当する情報を取得可能な、微細皮膚感覚センサアレイを試作した。試作センサは、摩擦および硬さを取得するため、基準面構造を有したデバイス構造によって、センサと対象物間の接触荷重に加えてそれぞれを抽出する原理を提案し、ヒトの触覚受容器の密度程度の820 μm ピッチの4 \times 4アレイとして設計した。集積化センサの製作プロセスを確立し、デバイスを製作した。製作したセンサの評価においては、ヒト触覚に相当する力覚検出能力と、提案した原理によって摩擦力及び硬さのそれぞれの検出について実証した。

第三章では、集積化センサを先端医療分野へ応用するための、重要な検討として、軟性内視鏡手術における圧力・温度モニタリングへの適用技術について述べている。センサデバイスを体液や、強い照明、温度変動等多くのノイズ要因が存在する過酷な環境において、

安定的な信号検出を行うための手法についての検討結果をまとめた。また、その有効性の検証実験を行うと目、圧力と温度のモニタリングシステムを構築し、複数回の試作と香川大学医学部との共同実験によって、実際の動物体内からの圧力・温度検出を実現した。

第四章では、センサの構造色を用いて電氣的配線を必要とせず情報を取得可能なセンサ構造を提案した。圧力に応答する $1\mu\text{m}$ 以下の可動ギャップを微細加工技術により実現し、干渉により構造色が変化するセンサを実現した。また、内視鏡画像を処理することでセンサの構造色変化を単一の評価値である色相変化として検出する手法を開発し、内視鏡治療において配線不要なセンシングシステムを実現した。

第五章では、内視鏡治療への適用を目指した、臓器硬さ検出センサについて述べた。 1cm 以下の治療器具に対して治療行為を阻害しない硬さ検出を実現するため、 2mm 角の小型センサによって脂肪や脱力状態の筋肉等を含む柔軟な体組織の硬さ検出を実現するため、最適な感度設計や、製作プロセスの改善を行い、これまでに開発されてきた微小硬さセンサの限界を超える硬さ感度をもったセンサを実現した。

第六章では、本研究の総括として、開発したセンサにより開ける応用事例についてまとめた。小型アレイセンサを先端医療に応用することで実現が期待できる事例の基礎検討や、製作を行った電気式および構造色式の各検出手法について、それぞれが適用可能な応用事例についてまとめた。

以上の微細皮膚感覚センサの実現と先端治療への応用を目指した研究の結果、高精度、高空間解像力を有するセンサを実現し、皮膚感覚に相当する情報を抽出した。また、先端治療への本技術の適用に向けて、微小領域へセンサを集積化し、体内で安定動作させる実装技術を確立した。これらの研究により、集積化皮膚感覚センサの実現により期待される多くの応用分野に対する知見を得た。

審査結果の要旨

本研究では、先進医療分野において特に低侵襲医療技術に着目し、軟性内視鏡手術や腹腔鏡手術の分野で求められている「狭小空間における医師の指先感覚に代わる触覚センシング情報の提供」を目指している。触覚センシングにおける現在の技術開発状況を鑑みて、上記目的に向けてヒトの触覚を再現する“微細皮膚感覚センサ”の実現と、その医療分野への実応用について検証し、その適用効果と将来への実現可能性について検討を行っている。

本論文の第一章では、本論文の導入として、本研究の背景、目的について述べている。

皮膚感覚の認知プロセスや、機械量センサとしてのヒト触覚の性能についてまとめており、それを再現する触覚、あるいは皮膚感覚センサに対して期待されている応用分野について述べられている。また、これまでに開発されている多くの触覚センサについて、その構造や原理についてまとめ、ヒト触覚との対比を行っている。研究の目的として、第一に、柔軟さ等の皮膚感覚に相当する情報を抽出可能な“微細皮膚感覚センサ”を高分解能かつ高空間解像力で実現することが提案され、第二の研究目的として、先端医療分野への展開が設定されている。

第二章では、皮膚感覚に相当する情報を取得可能な、微細皮膚感覚センサアレイの試作評価結果について述べられている。試作センサは、摩擦および硬さを取得するため、基準面構造を有したデバイス構造によって、センサと対象物間の接触荷重に加えてそれぞれを抽出する原理が新規に提案された。ヒトの触覚受容器の密度程度の820 μm ピッチの4 \times 4アレイとして設計が行われている。この集積化センサの製作プロセスが確立されることで実際のデバイスが製作された。センサの評価においては、ヒト触覚に相当する力覚検出能力と、提案した原理によって摩擦力及び硬さのそれぞれの検出について実証が行われている。

第三章では、集積化センサを先端医療分野へ応用するための、重要な検討として、軟性内視鏡手術における圧力・温度モニタリングへの適用技術について述べられている。体液や、強い照明、温度変動等多くのノイズ要因が存在する過酷な環境において、センサからの安定的な信号検出を行うための手法についての検討が行われている。また、その有効性検証を行うために圧力と温度のモニタリングシステムが構築され、香川大学医学部との共同実験によって実際の動物体内からの圧力・温度検出が実現されている。

第四章では、センサの構造色を用いて電氣的配線を必要とせず情報を取得可能なセンサ構造が新規に提案されている。圧力に応答する1 μm 以下の可動ギャップを微細加工技術により実現しており、干渉により構造色に変化するセンサが完成された。また、内視鏡画像を処理することでセンサの構造色変化を単一の評価値である色相変化として検出する手法を新規に開発し、配線不要な完全無線型のセンシングシステムを実現した。

第五章では、内視鏡治療への適用を目指した臓器硬さ検出センサについて述べられている。1cm以下の治療器具に対して治療行為を阻害しない硬さ検出を実現するため、2mm角の小型センサによって脂肪や脱力状態の筋肉等を含む柔軟な体組織の硬さ検出が実現された。デバイスの最適な感度設計や、製作プロセスの改善が行われ、これまで実現されている微小硬さセンサの限界である10HS以下の硬さ検出能力を有する臓器硬さセンサが実現された。

第六章では、本研究の総括として、開発したセンサにより開ける応用事例についてまとめられている。小型アレイセンサを先端医療に応用することで、応用分野にて実現が期待できる技術の基礎検討や、製作された電気式および光学式の完全無線型センサの検出手法について、適用可能性が見込まれる応用事例についてまとめられている。

以上の微細皮膚感覚センサの実現と先端治療への応用を目指した研究の結果、高精度、高空間解像力を有するセンサが実現され、医師の指先における皮膚感覚に相当する触覚情

報の抽出に成功したといえる。また、低侵襲治療分野における本技術の適用に向けて、微小領域へのセンサ集積化技術、体内で安定動作が可能となるセンサの実装技術が確立された。これらの研究成果により、低侵襲治療分野で期待される触覚センシング技術適用の可能性が十分に示されたといえる。本論文はその新規性、発展性ともに高く評価されるものであり、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。本学位論文に関しては、学会論文誌への掲載論文2編と国際会議 Proceedingsへの掲載論文1編を含む複数の学術論文を公表している。研究成果はいずれも独自に完成したものである。

最終試験結果の要旨

平成29年2月6日に公聴会ならびに最終試験を実施した。公聴会では、申請者が学位論文の内容に関する発表を60分間実施した。引き続き、審査委員ならびに公聴会参加者からの質疑に対して的確に答えることを求め、質疑応答を45分間行った。また、公聴会終了後、審査委員による15分間の理解度確認を口述で実施し、微細構造デバイス技術等の専門知識を確認して最終試験とした。全ての質疑に対して申請者は的確に回答した。以下はその一部の要約である。

1) ヒトの触覚受容器がもつ能力と本研究のセンシング性能を対比しているが、従来の触覚センサがヒトの触覚の能力に達していないとされる理由は何か。

【回答】従来はヒトの触覚の能力を超越する研究がほとんど行われていない。また、性能の良い回路技術が触覚センサの分野に適用されてこなかったことも理由である。

2) センササイズ的设计指針として、どの様なことを基準において設計が行われたか。

【回答】人間の指先にある感覚受容器の特性を考慮して設計した。実現可能な限りに素子を小さく実現し、応用が可能な分野を拡げている。

3) 体内動作を想定したセンサデバイス表面にCr薄膜を形成して利用しているが、その生体適合性についてはどの様に考えるべきであるか。

【回答】Cr自体は胃酸に対して僅かな量しか溶解しないことが判明している。また、溶解したとしても人体への影響はなく、安全な材料であるといえる。

4) 開発したセンサは動物実験まで行われているが、今後、人体に適用しようとする場合はどの様な検出方式が最も適すと考えられるか。

【回答】技術的な課題は本研究ですでに多くが解決されている。一方で、人体への適用に向けては法的な部分で一定のハードルがあり、最終的には、より安全な光学式センサによる完全無線型構成が適していると考えている。

5) 光学式センサの分解能が電気式と比較して低くなっているが、その原因と対策については考えられているか。

【回答】光学式センサの分解能は、用いるカメラのダイナミックレンジで決定されている。

将来的には高感度・高分解能の内視鏡カメラを用いることで十分解決可能である。

公聴会での質疑応答と最終試験を経て、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、審査申請者が専門領域に関する十分な学識と研究能力を有すると判断した。よって、本最終試験の評価を合格とする。