

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289104

研究課題名(和文) 多元的触情報の時間相関性に着目した超触覚センシングデバイス

研究課題名(英文) A Novel Tactile Sensor Focusing on Time Correlation of Multi-Dimensional Tactile Information

研究代表者

高尾 英邦 (Takao, Hidekuni)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：40314091

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、半導体表面に高密度なセンサ回路構造を高密度に集積した後、MEMS技術で半導体シリコンを柔軟に変形可能な構造として、指先の皮膚に近い機能と柔軟性を両立させる高度な検知能を備えた人工皮膚型触覚センサの実現を目指して研究を行った。触感の定量化にむけて、人間の皮膚感覚による対象物表面の評価を模倣し、様々な物理量から各因子を抽出して総合的に評価することを目指して研究を実施した。半導体集積回路技術とMEMS技術の融合により、人間の指先が有する様々な触覚・触感に関する検知能を備えた人工皮膚型触覚センサを実現し、その応用展開に向けたデバイス技術開発と触感の定量化にむけたシステム化研究を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, a novel integrated tactile sensing device with integrated electronics and movable microstructures have been developed for quantitative detection of delicate tactile sense. Semiconductor based tactile sensor devices are realized by advanced integration technology of silicon MEMS, and they can detect various tactile information at the same time and the same point. Using their time correlation and the features, quantitative detection of delicate tactile sense is effectively performed using paper samples. The applications of the sensing technology are such as condition monitoring of human skin or hair, texture measurement of luxury material, and advanced medical devices with tactile sense, etc.

研究分野：マイクロセンサ工学

キーワード：触覚センサ MEMS 集積化センサ 半導体 人工皮膚

### 1. 研究開始当初の背景

知性と感性を備えた賢明な自動化システムの実現に向けて、今日では「感性」のエレクトロニクス化が一層重要な課題となっている。「視覚」と「聴覚」については、半導体技術による「イメージセンサ」や「シリコンマイク」などが普及して人々の日常で活用されている一方、皮膚が持つ「触感覚」については、生物に最初に宿される最も基本的な感性であるにも関わらず、その能力を再現するデバイスの実現には至っていない。触覚技術開発の困難性は、触覚が持つ多面的特性と複雑性に起因していると考えられる。しかしながら、これまで研究されている多くの触覚センサは、圧力分布などの単一情報のみに性能が特化されており、その時間変化にはあまり着目されていなかった。我々は触感覚の定量化にむけて、様々な要素のセンシング相互の時間相関性を調べることのできるデバイス技術が必要と考えており、半導体技術の高い集積性を活用し、複数の触覚センシング要素を集積化した生体模倣型触覚センサを実現してきた。この技術は、情報の時間相関性に着目する本研究に展開可能である。

### 2. 研究の目的

本研究では、触感を構成する基本要素となる情報として「圧力分布」「振動」「凹凸感」「冷温感」「乾湿感」「硬軟感」を検知するデバイスを構築し、これらの時間相関性を用いた触感の定量化を実施する。センシング機能を高密度アレイに統合化した触覚センサを開発し、測定時の触圧変化と同時刻・同位置における多面的触覚情報を計測できるデバイスの実現とその検証を行ってゆく。最終的には、人間の触感を人間以上の性能で数値評価可能とする触覚センシングシステムの実現を目指す。また、指先の高度な触覚情報を必要とする応用技術分野において、本研究の効果と有効性を検証する。従来の触覚センサにあるダイヤフラム構造など、回路形成面に垂直に対象を接触させる触覚センサは、その構造上ストロークが短いことや、接触対象物表面の微細な凹凸による圧力変化の検知性能が乏しいといった点があり、対象物の微細な凹凸や柔軟性が生み出す繊細な手触り感の評価を行うのは困難であると言える。本研究では、大ストロークかつ微細な凹凸にも対応する新構造の触覚センサを開発し、対象の手触り感評価を目指す。人間の触覚は、ものに触れてその表面をなでる際、皮膚内に存在する数種類の触覚感覚器がそれぞれ異なった順応性で圧力やその変化の振動を感じ取って「サラサラ」や「ザラザラ」、「ふんわりする」などといった手触り感を形成している。そのものに触れた時に、触れる際の圧力となる時の摩擦力がどの程度なのか測定することにより、そのものの手触り感に関する特性の評価を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、触覚情報測定時の触圧変化と多面的な触覚情報を同時に取得可能な機能集積型の触覚センサデバイスが重要な技術要素となっている。触覚情報を忠実に取得し、小型化・高感度化を両立可能な微細センサ構造の開発を進めてゆく。センサ要素をアレイ化して集積化した触覚センシングデバイスを実現し、時間相関性に基づく触感評価のモデル化と、デバイスを実装した触感評価用プロトタイプを完成させる。触感の定量化とその有効性に関する評価については、応用評価を希望する研究者と連携しながら、実用的な機能と性能を有する触感評価システムを目指して開発を行なう。

以下は具体的な研究内容である。

1. センシング要素の開発
2. センサ画素の小型化と高感度化の両立
3. 二次元触覚デバイスの実現
4. 時間相関性に基づく触感評価
5. 応用での検証

### 4. 研究成果

#### 4.1 多面的触覚情報の時間相関性を取得可能な触覚デバイスの実現

本研究では、デバイスの構成、製造技術、ならびにその機能検証に関する研究成果を得ることができた。本研究において開発した触覚デバイスの構成図を図1に示す。本デバイスは測定対象物と接触させる接触子と、それを支えるサスペンション、接触子のオーバーレンジストッパの機能を含むチップのフレーム部分で構成される。接触子先端は、チップ端の平面から突出している。このセンサチップを測定対象に押し当てた時と、押し当てながらデバイスをチップ表面に平行に移動させた場合に、突出した接触子は押し込まれ、接触子につながるサスペンション上に変位に対する応力が発生する。サスペンション上は拡散層によるピエゾ抵抗を形成している。検出回路でx方向の深さ変位と、摩擦によるy方向の変位を検出する。また、後述するオーバーレンジストッパ機構により、サスペンションの破壊を防ぐよう接触子の動きを制限することが可能である。

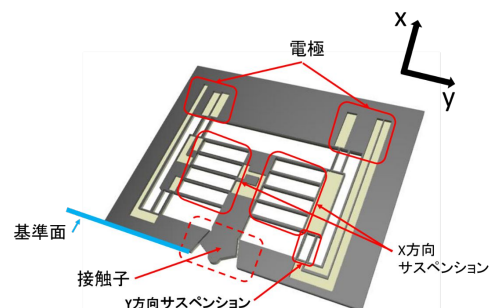


図1 本研究の横型触覚センサ構成図

実際には本センサにX方向（すなわち表面形状）とY方向（すなわち摩擦力変化）が同時

に印加されるため、計測中の挙動は図2に示すような状態でX軸信号、Y軸信号が同時に得られる。

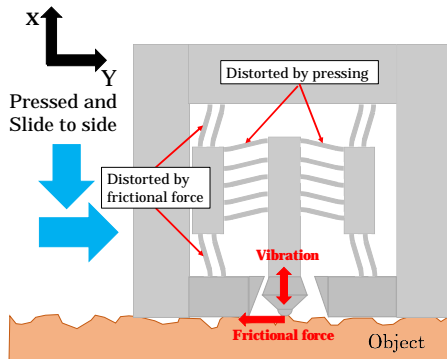


図2 走査による触覚センシング動作

高い信頼性をもって触覚センサを動作させるためには、過大入力に対する保護機構が必要である。これは、オーバーレンジ入力に対してセンサが過大に変位しないような制限機構を用いることで解消可能である。本センサのオーバーレンジストップの構成を図3に示す。このオーバーレンジストップは接触子をサスペンションが破壊される変位未満の範囲に止める働きを持つ。接触子の先端は基準面から飛び出しており、縦方向の変位はこの基準面がストップとなる。横方向のストップと接触子の距離は、接触子が押し込まれていない際は加工製作が可能な距離があるが、接触子が押し込まれた際に、ストップと接触子の距離が狭くなり、サスペンションの破壊を防ぐ範囲で接触子の変位を制限する。

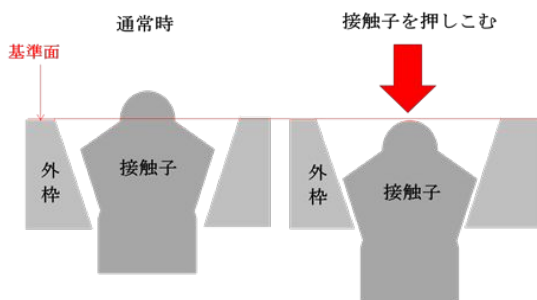


図3 オーバーレンジストップ構造

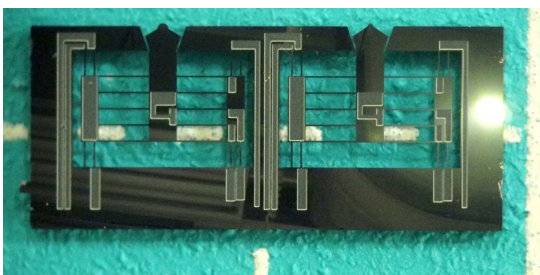


図4 開発した触覚センサデバイスの写真

横型触覚センサの機械構造は、SOI ウェハ

を加工して製作する。活性層部分は、可動構造部となる接触子とサスペンション、また基準面の働きも持つ。接触子のサスペンション上には拡散層によるピエゾ抵抗を形成させている。拡散層による回路部分は分圧回路になるよう設計されており、ピエゾ抵抗部にかかる応力を分圧回路で測定する。実現したデバイスのチップ写真を図4に示す。

#### 4.2 実現した二次元触覚デバイスによる対象評価

評価に向けて、製作した横型触覚センサをユニバーサル基盤に接着し、ワイヤボンディングにより電極を取り出した。本研究の横型触覚センサが有する最大の特徴は、表面凹凸形状と局所的な摩擦力変化の時間相関性を取得可能なことである。そこで、その機能と有用性を評価すべく、様々なサンプルでデータの取得を行った。図5は実装した本デバイスで、測定サンプル(樹脂)表面を「撫でる」評価実験の様子の一例である。

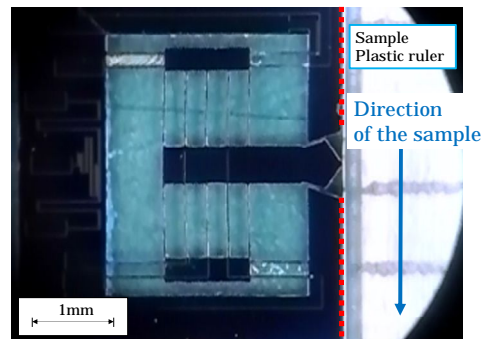
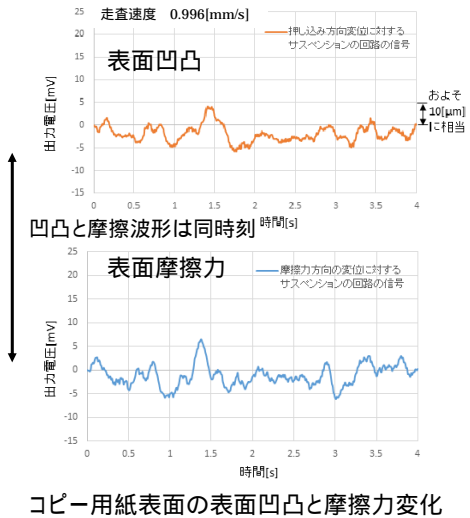


図5 表面を「撫でる」触覚センサ評価

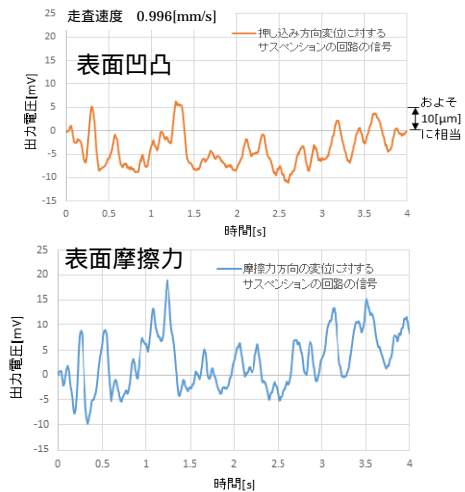
#### 4.3 多元情報の時間相関性による触感評価

本センサの計測動作においては、主に押し込みによる応力に対する表面形状追従サスペンション側の信号の変化量が大きくなると、摩擦サスペンション側の信号の変化も大きくなる。垂直抗力と摩擦は比例するが、取得した双方の信号も相関性のある変化を示した。これらの信号から、接触対象の材料や表面形状に依存する特性が取得できると、人間の触覚に関する重要な情報を取得でき、その相関性を分析することで、手触り感の評価が行えることを新規に提案し、実証した。そこで、比較的人間が判別しやすい「紙」の触感評価結果を例として示す。本センサでは、この2種類の紙を触れた場合の表面形状の違いを読み取れるだけでなく、同時に取得される摩擦力変化も比較することが可能である。そこで、本センサを用いて「コピー用紙」と「わら半紙」の計測を行ない、その紙質の差を判別できるだけの十分な情報が得られるかどうか評価する実験を行った。



コピー用紙表面の表面凹凸と摩擦力変化

図6 コピー用紙の表面計測結果



わら半紙表面の表面凹凸と摩擦力変化

図7 半紙裏面の計測結果

図6はコピー用紙の表面を横型触覚センサで計測した表面凹凸信号波形、ならびに摩擦力信号波形である。また、同じく図7は半紙裏目のざらざらした表面を横型触覚センサで計測した表面凹凸信号波形、ならびに摩擦力信号波形である。一見して両者の違いは明らかである。例えば、コピー用紙表面形状は比較的振幅の小さな凹凸からなっており、その波形も全体的に丸みを帯びている。それに対応するように、摩擦力波形も比較的振幅変化が穏やかであり、波形全体も丸みを帯びている。一方で、半紙をセンサで計測した場合の波形は、コピー用紙の場合とは様相が大きく異なっている。まず、表面凹凸については、コピー用紙表面と比較して大きな凹凸が存在し、その変化も激しく、波形全体は尖った形状をしている。これは、コピー用紙と比較して、わら半紙が荒い紙繊維で作られていることと対応しているであろう。その違いは

摩擦力波形にも明らかに現れる。荒い繊維に引っかかるように、摩擦力の変化は激しく、また、その変化も速いため、尖った波形となっている。このように、大きく、かつ速い変動をともなう振動感摩擦は、人間の指先で感じる「ざらざら」「ガサガサ」という感覚に相当する。このように、表面形状だけでなく、それに相関する摩擦変化を同時に取得することで、物質表面の触感を定量化できるための重要な情報が取得できていると考えて良い。

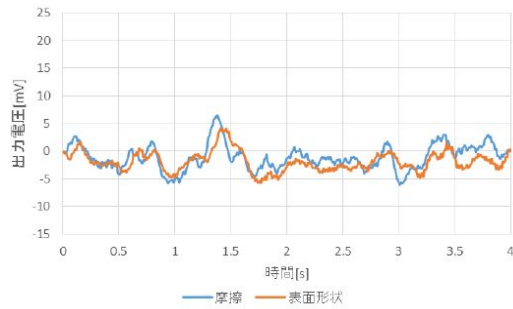


図8 凹凸と摩擦波形の重ね合わせ

表面凹凸と摩擦力変化については、概ね相関関係が成り立つものである。しかし、その相関の程度、逆に、その差分については、材料表面の状態を表現する重要な情報が含まれている可能性が高い。そこで、表面凹凸と摩擦力波形を重ね合わせて描くことで、対象材料の触感に含まれる情報が抽出できるかどうか調べてみた。図8はコピー用紙表面の表面凹凸波形と摩擦力波形の重ね合わせプロットである。

まず両者に共通する重要な摩擦の性質として、表面の摩擦力の最大値は、表面の凸部を乗り越える直前に現れるということが明らかとなった。すなわち、はじめに表面で感じられる摩擦力は、凹凸の山を登るに従って上昇してゆく。これは山を登るとともに加わる垂直抗力が強まり、発生する摩擦力も強まるということと説明される。一方、表面の最高部分に到達する直前から登りの勾配が緩み始めると、そこで押し当てられていた接触子表面の摩擦力も弱まり始め、急激に大きなスリップが生じている。このような局所の凹凸形状と摩擦力の位相関係はこれまで全く明らかにされていなかった。その理由は、それを明らかにできる高性能触覚センサが存在していなかったからである。この横型触覚センサを用いることで、従来のセンシング技術では明らかにされなかった、「微小な表面形状」と「発生する摩擦力」の関係を解明することが可能となり、素材の手触り感の定量化や、全く新しい手触りを持つ素材の開発などに貢献できる可能性がある。

図9は、わら半紙の表面凹凸波形と摩擦力波形の相互相関関係をプロットしたグラフの一例である。横軸が表面形状の波形が持つ値であり、縦軸は同時刻に摩擦力波形が持つ

値である。この時の相互相関係数は 0.42 であった。各素材の相互相関係数を比較することで、材料表面の手触り感を定量化できる可能性を示した。

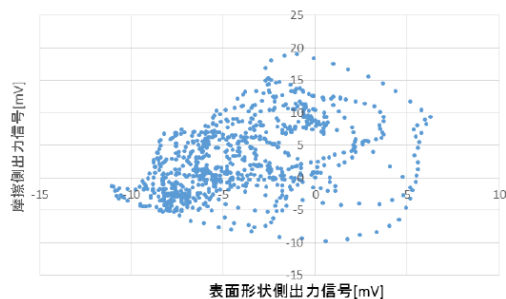


図9 半紙の表面凹凸波形と摩擦力波形の相互相関係数 (散布図)

#### 4.4 まとめ

本研究では、半導体集積回路技術と MEMS 技術の融合により、人間の指先が有する様々な触覚・触感に関する検知能を備えた人工皮膚型触覚センサを実現し、多次元情報の時間相関性に着目した触感の定量化の実現可能性について検討をおこなった。

手触り感を定量化して計測することが可能な横型触覚デバイスは、固い対象物から紙、布地など幅広い物性を持つものの表面特性を数値として取得することができた。これらデバイスは日用品から日常の健康管理まで様々な応用が期待される。本研究を通じて開発された技術等の活用により、手触り感の定量化技術とそのセンシングデバイス技術の実用化が十分期待できる。触覚技術は様々な応用への展開が期待される技術であり、紙の手触り感判別など、従来では実現されていなかった新しい分野の計測技術を開拓することができた。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

1. Y. Maeda, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, H. Takao, "A Post-Complementary Metal Oxide Semiconductor Formation Process of High-Adhesiveness SU-8 Structures for Reliable Fabrication of Integrated Microelectromechanical System Sensors" Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 52, Issue 6, pp. 06GL18-06GL18-5, 2013.
2. H. Mori, H. Takao, H. Kobara, N. Nishiyama, S. Fujihara, T. Matsunaga, M. Ayaki, T. Masaki, "Precise tumor size measurement under constant pressure by novel real-time micro electro mechanical system hood for proper treatment (with videos), Surgical Endoscopy, DOI: 10.1007/s00464-014-3642-3, 2014.
3. Y. Maeda, K. Terao, F. Shimokawa, H. Takao, "A MEMS Hardness Sensor with Reduced Contact Force Dependence Using the Reference Plane Concept Aimed to Medical Applications," Japanese Journal of Applied

Physics, in print, 2016.

〔学会発表〕(計26件)

1. H. Takao, "Integrated Silicon MEMS Technology and Novel Functional Sensor Devices" Proceedings of 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, pp. 8B-8-1 (2pages), Sapporo, Japan, Nov. 5-8, 2013.
2. 高尾英邦, 「最新マイクロセンサー技術: ~人間の感覚に迫る多様なセンサー技術で何が、どんな可能性が開けるのか~」 Embedded Technology West2013 組込み総合技術展 関西 テクニカルセッション, 大阪
3. Y. Oka, R. Shinozaki, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, and F. Oohira, H. Takao, "Assist-Free Assembly Technique of Standing Optical Devices on Soft Spring Actuator Stages," Proc. of the 27th IEEE MEMS2014, Jan. 26-30, San Francisco, USA, 2014.
4. 岡 勇作, 篠崎 亮輔, 寺尾 京平, 鈴木 孝明, 下川 房男, 高尾 英邦, 可動 MEMS デバイスへの光学素子自動アライメント技術, 第30回 センサ・マイクロマシンと応用システム シンポジウム, 2013年11月05日~07日, 仙台
5. 前田 祐作, 寺尾 京平, 鈴木 孝明, 下川 房男, 高尾 英邦, SU-8 密着層により信頼性を向上した 接触子を有する集積化皮膚感覚センサの製作, 第5回集積化 MEMS シンポジウム, 2013年11月05日~07日, 仙台
6. 香西亮吾・寺尾京平・鈴木孝明・下川房男・高尾英邦, 手触り感の定量的評価に向けた MEMS 横型触覚センサ, 平成 26 年電気学会全国大会, 2014年03月18日~2014年03月20日, 愛媛大学
7. 前田祐作・寺尾京平・鈴木孝明・下川房男・高尾英邦, 生体組織などの柔軟材料における硬さ判別を目指した MEMS 硬さセンサ, 平成 26 年電気学会全国大会, 2014年03月18日~2014年03月20日, 愛媛大学
8. 高尾英邦, 「最新マイクロセンサー技術の応用と展望」: ~人間の感覚に迫る多様なセンサー技術と有用性を探る~, Embedded Technology West2014 組込み総合技術展 関西 テクニカルセッション
9. H. Takao, "Silicon Integrated Tactile Sensor Arrays Based on CMOS Compatible MEMS Fabrication Technology," Proceedings of Seventh ISSS International Conference on Smart Materials Structures & Systems (ISSS-2014), Indian Institute of Science, Bangalore, India, July 8-11, 2014.
10. H. Takao, Short Course B, Integrated MEMS Technology for Construction of Diverse Functional Devices, International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM2014), 2014年09月08日~11日, Tsukuba, Japan.
11. 大杉亮太; 高木優佑; 前田祐作; 寺尾京平; 鈴木孝明; 下川房男; 高尾英邦, 材料判別

を実現する熱伝導率センサ集積型メッシュ状シリコン触覚イメージャ, 2014年 第75回 応用物理学学会秋季学術講演会, 2014年 09月 20日, 北海道大学

12. 大杉亮太; 高木優佑; 前田祐作; 寺尾京平; 鈴木孝明; 下川房男; 高尾英邦, 材料判別を実現する熱伝導率センサ集積型メッシュ状シリコン触覚イメージャ, 第31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2014年 10月 20~22日, くにびきメッセ, 松江市

13. 香西亮吾; 寺尾京平; 鈴木孝明; 下川房男; 高尾英邦, 凹凸と摩擦力の相関を取得可能なMEMS横型触覚センサ, 第31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2014年 10月 20~22日, くにびきメッセ, 松江市

14. 前田祐作; 寺尾京平; 鈴木孝明; 下川房男; 高尾英邦, 基準面構造を有する高感度MEMS硬さセンサによる柔軟材料の評価, 第31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2014年 10月 20~22日, くにびきメッセ, 松江市

15. R. Kozai, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, and H. Takao, "A Novel Configuration of Tactile Sensor to Acquire the Correlation between Surface Roughness and Frictional Force," Proc. of the 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 245-248, Jan. 18-22, Estoril, Portugal, 2015.

16. Y. Maeda, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, and H. Takao, "A Tactile Sensor with the reference plane for Detection Abilities of Frictional Force and Human Body Hardness Aimed to Medical Applications" Proc. of the 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 253-256, Jan. 18-22, Estoril, Portugal, 2015.

17. 前田光平; 前田祐作; 寺尾京平; 鈴木孝明; 下川房男; 高尾英邦, 低侵襲内視鏡手術への適応に向けたMEMSセンサ埋め込み型内視鏡フードの研究, 平成27年電気学会全国大会, 15年 3月 24~26日, 東京都市大学

18. 前田祐作; 寺尾京平; 鈴木孝明; 下川房男; 高尾英邦, MEMS硬さセンサにおける基準面構造による押し当て荷重依存性低減効果の検証, 平成27年電気学会全国大会, 2015年 03月 24~26日, 東京都市大学

19. Y. Maeda, K. Maeda, H. Kobara, H. Mori, H. Takao, "A Pressure/Temperature Sensor Embedded in an Endoscopy Hood for Intraluminal Monitoring During Flexible Endoscopic Operation" Proc. of the 28th IEEE Sensors Conference, pp. 779-782, Nov. 1-4. Busan, Korea, 2015.

20. R. Kozai, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, and H. Takao, "A New Extraction Method of Information for Quantification of the Sense of Touch Using a Novel Two-axis Tactile Sensor," Proc. of the 18th International Conference on

Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, pp. 1191-1194, June. 21-25, Anchorage, USA, 2015.

21. 高尾英邦, 人間のように変化を感じるマイクロセンサー技術の最前線 : 日常生活に染み込むセンサ技術の将来を予測, Embedded Technology West2015 組込み総合技術展 関西 テクニカルセッション

22. H. Takao, Digitizing Our Sense of Touch with Semiconductor Micro Integrated Sensors, The 3rd Taiwan-Japan Smart Tourism Workshop, Aug.11-13 Mitoyo, Kagawa, Japan, 2015.

23. Y. Maeda, K. Terao, F. Shimokawa and H. Takao, Design and Characteristics of a MEMS Human Body Hardness Sensor Aimed to Diagnosis of Lesion Size, Solid-State Devices and Materials 2015, 2015年 09月 26~30日 Sapporo, Japan.

24. Y. Maeda, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, and H. Takao, Reduction of Contact Force Dependence on the MEMS Hardness Sensor Using Reference Plane to Detect Human Body Hardness, The 28th IEEE Sensors Conference 2015, 2015年 11月 01~04日, Busan, Korea

25. Y. Maeda, K. Maeda, H. Kobara, H. Mori, H. Takao, A Pressure/Temperature Sensor Embedded in an Endoscopy Hood for Intraluminal Monitoring During Flexible Endoscopic Operation, The 28th IEEE Sensors Conference 2015, 2015年 11月 01~04日, Busan, Korea

26. H. Takao, High Resolution Silicon MEMS Tactile Sensors for Measurement of Fingertip Sensation, IEEE IMFEDK2016, 2016年 06月 23~24日, Kyoto, Japan.

〔産業財産権〕

出願状況(計2件)

名称: 触覚センサ

発明者: 高尾英邦

権利者: 国立大学法人香川大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-40189

出願年月日: 2014年 03月 03日

国内外の別: 国内

名称: 触覚センサおよび手触り感の評価方法

発明者: 高尾英邦

権利者: 国立大学法人香川大学

種類: 特許

番号: PCT/JP2015/001073

出願年月日: 2015年 03月 02日

国内外の別: 外国

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高尾英邦 (TAKAO HIDEKUNI)

香川大学・工学部・教授

研究者番号: 40314091