

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究（B）一般

研究期間：2009～2012

課題番号：21360169

研究課題名（和文） 集積化 MEMS 技術による局所高精細触覚イメージング

研究課題名（英文） High-Resolution Local Tactile Imaging with Integrated MEMS Technology

研究代表者

高尾英邦（TAKAO HIDEKUNI）

香川大学・微細構造デバイス統合研究センター・准教授

研究者番号：40314091

研究成果の概要（和文）：

本研究では、集積化 MEMS 技術を用いて複合的なセンシング機能を統合した触覚イメージセンサを実現し、微小エリアを高精細で検知可能な触覚イメージング技術を開発した。人間の皮膚と類似の触覚機能や感度を実現する新しいセンサデバイスを実現し、3軸力覚の2次元イメージングや、手触り感を取得するための表面粗さと柔軟性のセンシング、並びに、そのデバイスを用いたリアルタイムイメージングシステムを実現することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, a multi-functional integrated tactile imager device has been developed for high-resolution and local area tactile imaging applications. The device has realized sensing functions and sensitivities similar to human's fingertip skin. Using the developed tactile imager device, 2-dimensional detection of tri-axis force distribution, detection of surface texture with roughness and softness of object surface have been realized as real-time tactile imaging system with PC software.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2012年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：センシング

1. 研究開始当初の背景

今日の機械における自動制御システムにおいて、半導体集積回路技術は中央処理装置（知能）、メモリ（記憶）、バス制御（神経伝達）の機能において、システムの脳・神経系

となる極めて重要な役割を果たしてきた。機械の自律制御システムを人体に例えた場合、その感覚系を担うのが各種のセンサデバイスとなる。「動力系」を担う強力なエンジンやモータの進化とともに、半導体技術と各種

センサ技術を核とする「制御系」の高度化が進められてきたことで、機械は自律システムとして驚異的に進化しているといえる。

次に、五感センシングの実情について述べる。私たちが機械を操作する際に使う感覚は、五感で言えば「視覚」・「聴覚」・「触覚」である。今日のセンサ技術において、「視覚」は CMOS イメージセンサや高感度 CCD 等で高集積かつ広ダイナミックレンジの性能が実現されており、まさに微細シリコン技術の賜である。「聴覚」については、すでに各種の高感度マイクロフォン技術が存在し、マイクロデバイス分野においては、MEMS 技術を用いたシリコンマイクの高感度化が進んでおり、アレイとしての集積化の利点を活かした指向性検知等が可能となっている。「触覚」は視覚や聴覚とならぶ人間の空間把握能力を担う基本的感覚であり、特に、人間の指先にある精緻で鋭い触覚機能に匹敵する触覚センサシステムは幅広い分野で実現が期待されている。ところが、「触覚」のセンシング技術は現在、視覚、聴覚と比較し、著しく立ち後れた状態にある。触覚をセンシングするためにはデバイス表面が対象に直接接触する必要がある、時には柔軟な対象表面に応じてセンサ自身も変形しながら、力、振動、温度など複数の物理情報を 2 次元面の情報として検出しなければならない。触覚センサ技術が立ち後れている理由を端的に述べると、対象に直接接触するために必要な、素子表面の「ロバスト性（堅牢性）と柔軟性」を維持しながら、触覚情報の各種要素となる情報の「多次元センシング」ができる素子の実現が非常に困難なためである。機械の自律制御化が一層の進化を成し遂げ、人間と同等の適切な判断情報を得られる様にするには、人の触覚をセンサデバイスとして実現することが可能な人工皮膚型多次元アレイセンサ（イメージセンサ）の開発が必要である。

人が持つ皮膚感覚機能は、指先が最も敏感で緻密となるように形成されている。これは物体の判別や操作を指先で行っているからと考えられる。我々は人の皮膚がもつ各能力を、(1) 接触力の分布を見る「触覚（垂直力覚）」と、(2) 触り心地の判別をする「触感（摩擦力、温覚、冷覚、振動覚、湿潤度）」に分けて考え、これらを複合的にセンシングすることによって、初めて触覚機能を人工的に実現することが可能になると考えている。しか

し、今日市販されている多くの触覚センサは、柔軟なゴムや導電インク材を用いた低感度、低空間分解能のものが主流である。今日、研究段階にある各種の触覚センサも同様にポリマーをベースに形成したものであり、その材料特性から、力覚のみ、または振動覚のみが検知可能となっている。これらは柔軟な有機材料には加工精度や配線総数に限界が生じ、精緻なアレイの形成ができないため、空間分解能は数 mm 以上に粗くなる。全ての検知能を備えた人工皮膚型の触覚センサ実現には、機能集積性を高めた、全く新しい概念のセンサを形成するアイデアが必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、集積化 MEMS 技術を用いることで、複雑な機能を統合した高精細な新機能マイクロデバイスを実現する。我々はこの特徴を活かすべく、人間の皮膚感覚と同等かそれ以上の機能・性能を有する新しいセンサの実現を目指している。本研究において、我々は指先の皮膚と同様な機能と高感度を有する新しいセンサの実現に向けて、力覚・冷覚・温覚・振動覚・湿度覚に相当するセンサを面状に高密度集積する「人工皮膚型触覚・触感センシングデバイス」を実現する。集積回路技術が得意とする「機能性」、「集積性」、「知能性」を活用して、指先の皮膚と同様に高いセンシング能力を持つ新しいデバイスを実現できる。性能とロバスト性を両立する観点からもセンサ構造を追求し、新しい機能を実現するデバイスを用いて高い空間分解像度の触覚イメージング技術を構築することが研究の最終目標である。高度な触覚機能を集積化する分布型センサを実現し、人間の肌と同様な感覚で微小エリアを高分解能で観察可能な触覚イメージングが実現可能と考えられる。

3. 研究の方法

本研究の目的は、触覚と併せて触感のセンシングも可能な人工皮膚型センサの実現であり、これまで確立したシリコン集積化触覚イメージセンサに「触感」の機能を集積することが、現在のところ最も重要な開発課題である。よって、本研究の実施期間においては、検出対象表面の摩擦（スベスベ感）、材質の熱伝導性（ひんやり感）、表面の粗さ（ザラ

ザラ感)をそれぞれセンシングが可能な触覚センシング技術の実証と、その集積化デバイスの実現を目指して研究を推進する。本研究が目指す人工皮膚型センサを実現する上では、従来の触覚センサにおける以下の課題を全て克服し、センサの機能や感度を指先の皮膚と同等かそれ以上に向上させる必要がある。本研究では、高機能の集積化MEMS触覚イメージセンサを開発し、その機能と基本的特性について各種の実験を通じて検証する。

4. 研究成果

(1) 集積化触覚デバイスの形成と評価

人間の指先における指紋は、局所的な滑りの発生を高感度に検知する上で不可欠である。本研究では、従来我々が開発した多機能触覚センサ技術をベースとし、人間の指先と同様に、表面に指紋構造を有する半導体型触覚センサを新たに開発し、垂直抗力や剪断力などの3軸力覚分布を取得可能にするとともに、人間の感性である「ざらざら感」や「スベスベ感」など、表面の摩擦状態や固さに起因する情報を取得可能な集積化触覚・触覚イメージセンサの実現を目指している。本研究では、エポキシ系感光性樹脂SU-8による指紋模擬構造を形成し、様々な触覚検知機能を集積する半導体触覚イメージセンサを実現する。

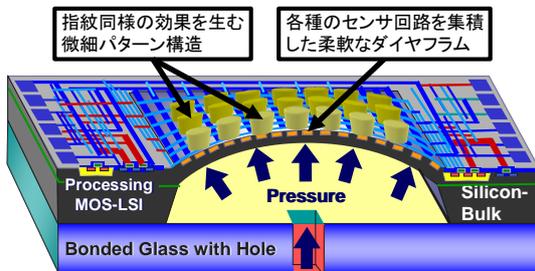


図1 SU-8の立体指紋構造を有する集積化MEMS触覚イメージセンサ

半導体ダイアフラム状の触覚センサ表面にスピコートで形成したエポキシ系感光性薄膜樹脂(SU-8)を表面保護膜として形成すると同時に、指先の指紋と同様の役割を持つ微細パターン構造を形成する技術を確認した。図1はSU-8を用いた指紋構造を有する本研究の触覚イメージセンサデバイスの概略である。指紋構造により、複合機能と併せて、滑り方向(水平面上)を含む多軸方向の力覚が検知可能となった。

本センサの触覚検知部は、 $10\mu\text{m}$ 程度まで薄化された1枚の単結晶シリコンダイアフラムであり、完成後に空気圧で膨らませて柔軟な接触面として機能する。ダイアフラム上には、複数の触覚情報を検知する画素回路がアレイ状に集積されており機能集積化の利点を活かした高性能な触覚検知が行えるようになっている。人間の皮膚触覚が力覚だけでなく振動覚や温度覚を有するように、本センサも力覚センサに加えて温度センサや指紋の働きをする微細構造物をセンサ画素回路に集積しており、指先と同様に、測定対象物の表面形状や柔らかさ、摩擦感の強弱などを同時に感じ取ることが可能である。

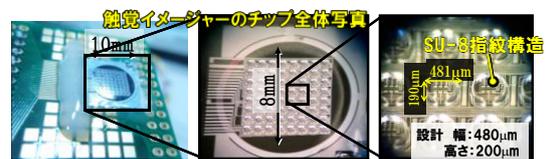


図2 製作した集積化触覚イメージセンサ

図2は、製作したSU-8保護構造膜を有する触覚センサ素子の写真である。本センサにおいては、8行×8列の64画素の回路が円形のシリコンダイアフラム上に形成されており、各画素回路上にはSU-8樹脂による円柱状の指紋構造が形成されている。SU-8自体は光学的に透明な材質であるため、下部に形成された画素回路が透けて見える。製作したデバイスの評価は、図3に示す多軸力覚センシングの評価系を構築して行った。 50nm の精度で触覚センサデバイス上の指紋構造に変位を与えて、各入力軸からの入力に対する出力応答を評価した。また、フォースゲージ先端に様々な評価サンプルを取り付けることで、特定の対象物に対する触覚センサの応答評価を可能にしている。

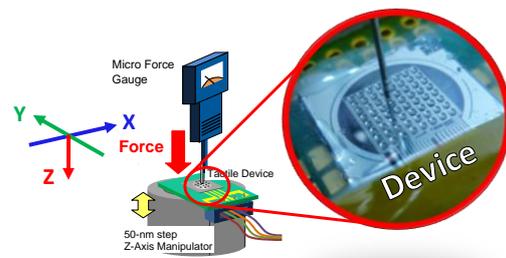


図3 集積化触覚イメージセンサ評価系

(2) 表面状態判別のための「手触り感」検知機能の開発

対象物のミクロ的な表面情報を取得する上では、微小な信号を抽出する上で物理的な「基準」となる位置情報が必要となる。本研究では、新たに局所的な位置基準となる「基準面」をもつ触覚センサ構造を提案し、それをを用いた表面の固さ計測や表面の粗さ計測を行う新たなセンサ構造を開発した。人間の指先皮膚にある振動覚受容体（パチニ小体、マイスナー小体）に代わるデバイスをアレイ状に実現するため、表面形状の空間波（表面の凹凸波形）を取得できる微小触針構造を形成している。図4は、今回製作した「手触り感」検知用触覚イメージセンサとその実装状態を示す写真である。チップサイズの制限から、本デバイスは4×4の16画素から構成されている。図5は、製作した微小触針を有するセンサ回路を円形ダイヤモンドフラム上に集積したデバイスの1画素構造を3次元形状測定装置で計測した画像である。シリコン集積回路技術で形成した検出回路の上に、微小探針、ならびに、基準面となる立体構造が適切な位置に形成されている。

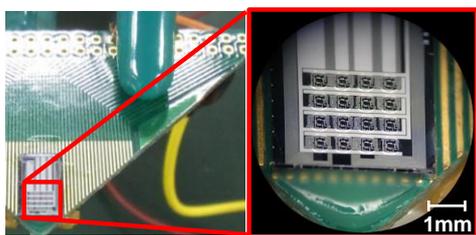


図4 実装した集積化触覚イメージセンサ

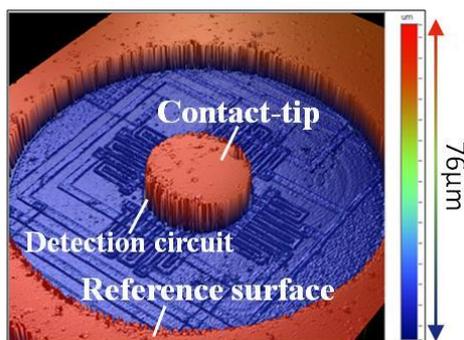


図5 微小触針型センサの画素形状

また、この基準面構造と微小触針型センサ画素の組合せにより、対象表面の柔軟性（固さ）を容易に取得することが可能である。基準面を変位計測の基準位置に用い、ダイヤフ

ラムに印加された内部圧力に対して対象物が発生する反発力を垂直変位として読み取ることによって、かなり柔軟な物質から固い物質まで、その固さを判別することが可能となる新しい原理を提案している。

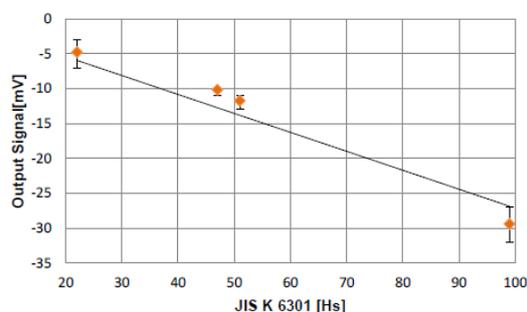


図6 Shore A 固さとセンサ画素出力

図6は、対象物質の Shore A 固さと画素回路の出力電圧の測定結果をまとめたグラフである。印加圧力に対する依存性の低さを実証するため、各ポイントは測定された全印加圧力のデータを全て平均して織り込んでいる。本原理は、測定時にセンサへ加わる圧力の影響が基準面構造によって本質的に抑えられており、広い範囲の Shore A に対して線形的な応答特性が得られている。

(3) 指紋構造による多次元触覚機能と局所高密度 3次元触覚イメージングシステムの開発

測定対象に直接接触れる触覚センサでは、スクラッチや過大入力に対する素子表面のロバスト性確保が大変重要である。樹脂製の表面保護膜を用いることで、柔軟なセンサ構造の柔軟性を維持しつつ、局所的な応力集中を防いでセンサの突然破壊を防止可能となった。SU-8 保護膜構造ならびにオーバーレンジストップ構造の開発により、シリコン薄膜の触覚センサ部に対して、当初目標である2N 以上の入力荷重に耐える構造を実現した。また、50mN の垂直荷重下においてスクラッチ試験に耐え、触覚センサの機能が失われないことを実験で確認した。SU-8 保護膜構造を画素構造毎に独立して形成することで、人間の指先がもつ空間分解能 1mm を凌駕する分解能を達成した。

また、本技術で可能となる3次元力覚イメージングにむけた、各画素の力覚検出特性についても評価を行った。図7は、本研究で製作した触覚センサデバイス1画素における3軸力覚検出特性である。従来のセンサで検出

可能であった垂直抗力（Z 軸）の検出はもちろんのこと、水平方向の入力である X,Y 軸の検出が行っている。また、各検出回路の出力における他方向軸の影響（他軸感度）は 5% 以下となっており、十分な精度で 3 次元の入力成分検出が可能となった。指紋構造の形成により、本触覚センサ表面での剪断力検出が実現された。このことから、これまでの触覚センサでは検出が困難であった「表面滑り」の初期検出を行うことが可能となった。

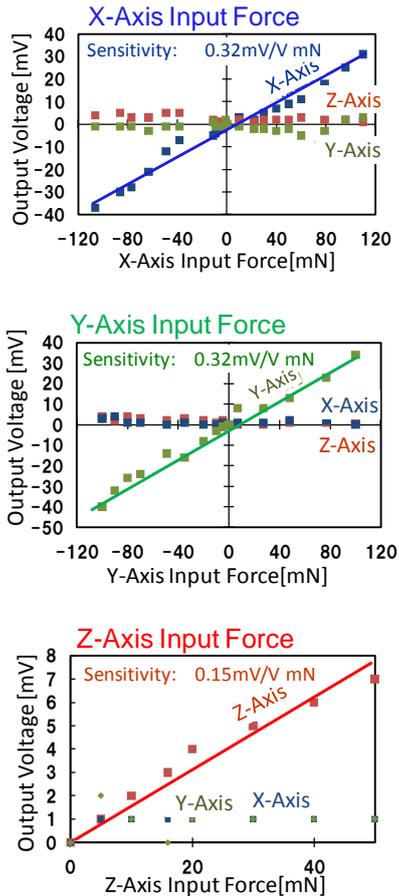


図 7 製作した集積化触覚・触感イメージセンサにおける 3 軸力覚検出特性

図 8 は、本センサの 1 画素が示す X 軸方向出力の時間軸波形であり、指紋構造と接触対象物の間で生じた「初期滑り」の瞬間をとらえた画像である。増大した横方向力により指紋表面が最大静止摩擦力の限界を超え、滑りが発生して動摩擦へと移行している。独立した各画素に生じる滑りの初期段階を高い空間解像力でモニタリングすることで、人間が物体把持を行う際に行なうような細やかな力加減をロボットハンドでも行うことが可能となり、人間同様に繊細な操作を行う機械システムの実現につながる。

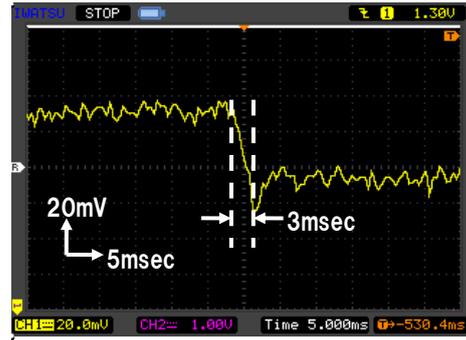
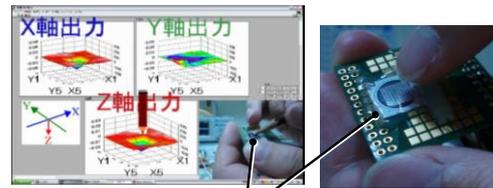


図 8 センサがとらえた「滑り」の瞬間



触覚イメージャー

図 9 開発した「局所高密度 3 次元触覚イメージング」システム

図 9 は、本研究で開発した集積化触覚センサを用いて実現した「局所高密度 3 次元触覚イメージングシステム」である。アレイ中の全画素からの X,Y,Z 軸出力を取得し、PC 上に 2 次元分布情報としてリアルタイムに表示するシステムである。先端の鋭い鉛筆をセンサ表面になぞらせた場合においても、鋭角な鉛筆の表面形状（Z 軸出力）と、横方向に生じる剪断力（X,Y 軸）の空間分布を的確に捉えることができている。また、表面にコーティングされた保護膜である SU-8 の効果もあり、鉛筆の接触による物理的な損傷や、黒鉛粉による電気的な問題（配線間の短絡等）も皆無であった。以上より、SU-8 樹脂による指紋構造の形成は、本触覚センサの多次元触覚機能実現と、実使用時におけるロバスト性向上において絶大なる効果があったと結論づけられる。

本研究期間において、3 軸力覚検知の 2 次元イメージングや、材料判別のための冷温感・湿潤度検出要素、ならびに、手触り感を取得するための表面粗さ計測と柔軟性計測のセンシング要素開発を完了し、それぞれ一定水準で原理検証まで行なうことができた。今回実現した様々な触覚センシング要素を統合的に用いて、人間の皮膚でしか分かり得

なかった対象物の詳細な表面状態が明確にセンシング可能であるとの見通しが得られた。また、各要素の研究開発過程から得られた知見をもとに、統合的に集積化した局所高精細触覚イメージングにおける基盤的技術を開発することに成功したといえる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① Y. Maeda, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, H. Takao, A Post-CMOS Formation Process of High-Adhesiveness SU-8 Structures for Reliable Fabrication of Integrated MEMS sensors, Japanese Journal of Applied Physics, in print, 2013.
- ② 高尾英邦, 皮膚感覚の超越をめざすシリコン集積化触覚イメージャー, 電子情報通信学会誌, Vol. 94, No. 6, pp. 470-474, 2011年6月.
- ③ H. Takao, T. Ichikawa, T. Nakata, K. Sawada, M. Ishida, "A Versatile Integration Technology of SOI-MEMS/CMOS Devices Using Microbridge Interconnection Structures," ASME/IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 19, No. 4, pp. 919-926, 2010.
- ④ H. Takao, M. Yawata, K. Sawada, M. Ishida, "A Multifunctional Integrated Silicon Tactile Imager with Arrays of Strain and Temperature Sensors on Single Crystal Silicon Diaphragm," Sensors and Actuators A Physical, Vol. 160, pp. 69-77, 2010.

[学会発表] (計25件)

- ① Y. Maeda, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, and H. Takao "A Novel Integrated Tactile Image Sensor for Detection of Surface Friction and Hardness Using the Reference Plane Structure," Proc. of IEEE Sensors2012 Conference, Taipei, Taiwan, Oct. 28-31, 2012.
- ② Y. Maeda, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, and H. Takao "A Post-CMOS Process of High Adhesion SU-8 Structure to Apply to Sensor Device," Proc. of 25th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2012), Kobe, Japan, Oct. 30-Nov. 2, 2012.
- ③ H. Takao, R. Kodama, H. Miyao, M. Ishida "Evaluation of Highly Sensitive C/V Converter with an Inverter for CMOS/MEMS Integration," Proc. of World Automation Congress 2012

(WAC2012), 4pages in CD-ROM, Puert Varralta, Mexico, June 24-27, 2012.

- ④ H. Takao, H. Okada, M. Ishida, T. Suzuki, F. Oohira, "Flexible Silicon Triaxial Tactile Imager with Integrated 800 μ m-Pitch Sensor Pixel Structures on a Diaphragm," Proc. of IEEE Sensors2011 Conference, 4pages in CD-ROM, Limerick Ireland, Oct. 28-31, 2011.
- ⑤ R. Kodama, H. Miyao, M. Ishida, and H. Takao, "In-pixel type small-scale integrated C-V converter with chopper stabilized CMOS inverter", Proc. of 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2011), GH-2-3, pp. 1039-1040, Sept. 28-30, Nagoya, Japan, 2011.
- ⑥ H. Takao, H. Okada, M. Ishida, T. Terao, T. Suzuki, F. Oohira "A Robust and Sensitive Silicon Tactile Imager with Individually Formed SU-8 Protective Layers on Piezoresistor Pixels," IEEE Sensors 2010 Conference, pp. 2079-2082, Hawaii, USA, Nov. 1-4, 2010.
- ⑦ H. Okada, M. Yawata, M. Ishida, K. Sawada, H. Takao "A Membrane Tyep Si-MEMS Tactile Imager with Fingerprint Structure for Realization of Slip Sensing Capability," Proc. of The 23rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS2010), pp. 608-611, Jan. 24-28, HongKong, China, 2010.

[図書] (計3件)

- ① 高尾英邦, 異種機能集積化ハンドブック, 担当箇所: 第14章 集積化MEMSセンサ実現のための回路設計, CMC出版 2012年11月
- ② 高尾英邦, Electronic Journal Archives No. 186, センサ・CMOS集積化技術★徹底解説, 全76ページ, 株式会社電子ジャーナル, 2011.09

[産業財産権]

- 出願状況 (計1件)
- 取得状況 (計1件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高尾英邦 (TAKAO HIDEKUNI)

香川大学・微細構造デバイス統合研究センター・准教授

研究者番号: 40314091