

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25540069

研究課題名(和文)単一MEMSセンサ素子による近接覚・触覚計測手法

研究課題名(英文)Proximity and Tactile Measurement Using a Multifunctional MEMS Sensor

研究代表者

寒川 雅之(Sohgawa, Masayuki)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：70403128

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：物体の近接と接触力を一つの微小センサで検出する手法について検討した。接触力は柔軟なシリコンゴムに埋め込んだ微小立体構造の変形により検知する。一方、近接は物体の接近によるセンサに入射する反射光の変化を、半導体の導電性の変化として検知できる。また、光を用いた検知手法では、ごく近傍では光が入射しにくくなるため、接触直前の状況では検知しにくく、また、透明な物体は検知が困難であるが、物体接近によるセンサ近傍の電界分布の変化を静電容量の変化として検知する方法を組み合わせることでそれらの場合でも検知を可能とした。

研究成果の概要(英文)：A miniature sensor to detect both proximity and touch force has been investigated. Touch force can be detected as deflection of micro structures in silicone rubber. On the other hand, proximity can be detected as conductivity change in semiconductor by reflected light from the object. Moreover, in the case of transparent object or extremely short distance, proximity can be detected as change of electric field distribution around the sensor instead of an optical method.

研究分野：センサ・マイクロマシン工学

キーワード：触覚センサ 近接センサ マルチモーダルセンサ MEMS

1. 研究開始当初の背景

介護ロボットや農産物を扱うような産業用ロボットに器用な動作能力を与えるためには、指先に触覚センサを高密度に設置し物体の把持状態を検知する必要がある。研究代表者らはこれまで MEMS プロセスにより作製したカンチレバー構造を柔らかいエラストマ(弾性体)の中に埋め込み、また 1mm²あたり1つの検出素子を配置できる触覚センサにより人間の触覚と同様に垂直方向の圧力と水平方向の剪断力の同時検知に成功している。これまでカンチレバー構造の変形を検知するためにはひずみゲージ抵抗を直流で計測してきた。これを LCR メータにより高周波(100 kHz オーダ)でインピーダンス計測を行ったところ、物体が接触していなくてもセンサ表面との距離に応じてインピーダンスが増加することを発見し、触覚に加え近接も1つの素子で検出できる可能性を示したが、原理的な裏付けが必要な状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、物体接近によるセンサの高周波インピーダンス変化の原理を明らかにするため、インピーダンス周波数特性測定と等価回路分析と、物体接近による電場変化解析と検知手法の検討を行い、それらの結果を基にして近接覚・触覚一体型センサの設計と試作により、近接覚を備えた超触覚センサの実現の可能性を探ることを目的とした。

3. 研究の方法

- (1) センサ素子の複素交流インピーダンスの周波数特性を計測し、その結果を用いて Cole-Cole プロット等の手法で等価回路解析し、物体接近時にどの等価回路成分が変化しているかを調べる。
- (2) 光や電界に対するインピーダンス変化を詳細に計測し、その依存性を調べるとともに、理論的に検討する。
- (3) 光を用いた物体近接計測の手法とその有効性を検討する。
- (4) 有限要素法により電界分布解析を行い、静電容量変化による検知の可能性を検討する。

4. 研究成果

- (1) インピーダンス周波数特性と等価回路分析

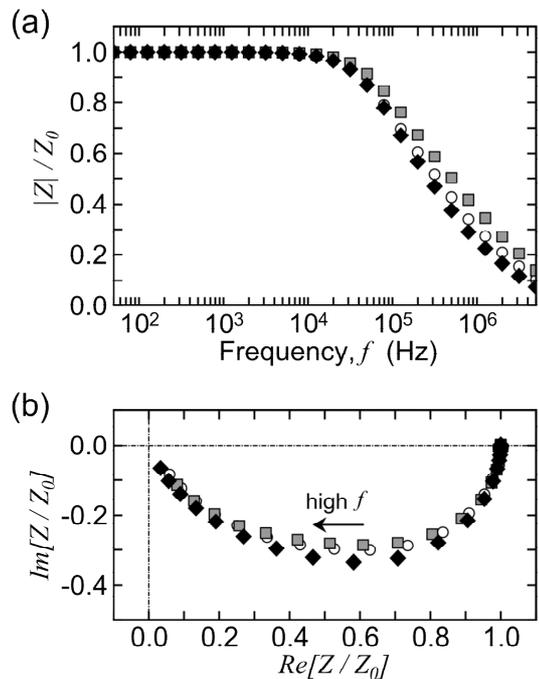
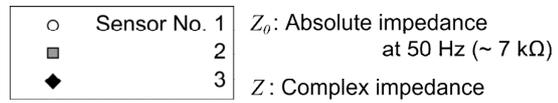


図1 (a)センサのインピーダンス絶対値周波数特性と(b)Cole-Cole プロット

図1にセンサのインピーダンス絶対値の周波数特性とその Cole-Cole プロット(ベクトル軌跡)を示す。10 kHz 以上になるとインピーダンスの絶対値が周波数とともに減少している。これは、インピーダンスが低周波領域では抵抗成分だけで構成されているが、周波数が高くなると静電容量の成分が入ってくるためと考えられる。一方、Cole-Cole プロットによると、インピーダンスベクトルは下半円を描くような軌跡を持つため、抵抗と静電容量が並列に接続された等価回路となっていることが分かる。これらの結果から、ひずみゲージ抵抗や配線と Si のセンサ基板の間は Si₃N₄ 薄膜で絶縁しており、高周波になるとこの薄膜部分の静電容量成分が無視できなくなり、ひずみゲージ抵抗に並列に接続された回路になり、光導電効果を持つ Si 基板の影響が現れるものと考えた。

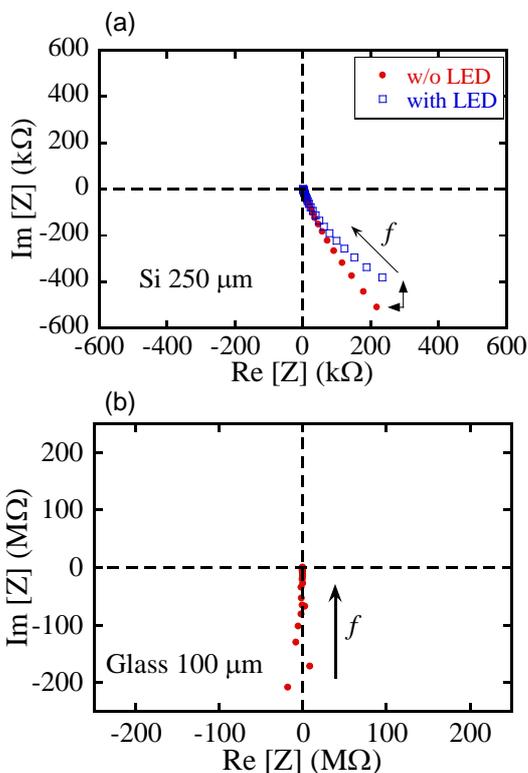


図2 ひずみゲージ抵抗を除いた(a)Si基板、(b)ガラス基板のインピーダンススペクトル Cole-Cole プロット

そこで、ひずみゲージ抵抗を除き、Si 基板上に絶縁膜を介して電極配線のみが存在する試験片と、ガラス基板上に配線を作製した試験片を作製し、インピーダンスの周波数特性と光に対する変化を調べた結果を図2に示す。ガラス基板(図2(b))ではインピーダンススペクトルは虚軸上を移動することから、配線の静電容量のみで構成された回路になっていることが分かる。また、光に対してインピーダンスは変化しなかった。一方、Si 基板(図2(a))では、インピーダンスは実数成分を含んでおり、抵抗成分と静電容量成分からなる等価回路となっている。また、光を照射すると主に虚数成分、すなわち静電容量が変化していることが分かる。図3にSi 基板を用いた試料において、電極間距離を変化させたときの光照射によるインピーダンス絶対

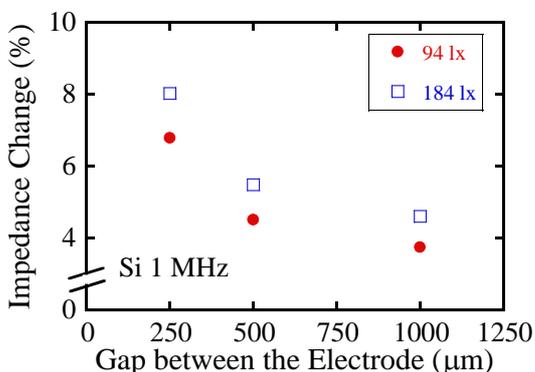


図3 Si 基板のインピーダンス変化の電極間距離依存性

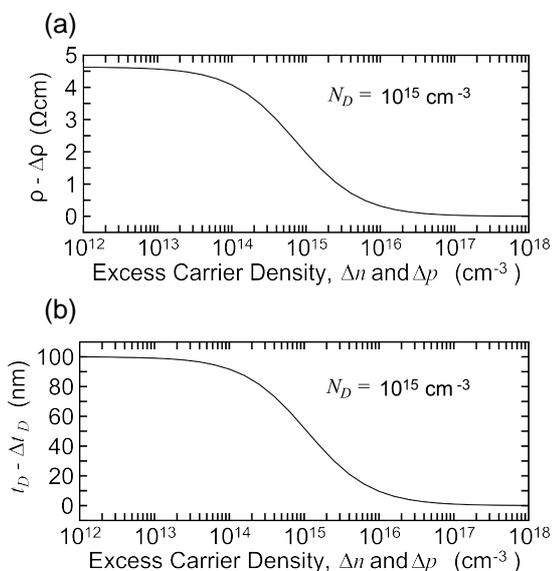


図4 抵抗率と空乏層幅の過剰キャリア濃度に対する依存性計算結果

値の変化を示す。電極間距離が増加すると光に対する変化が小さくなっていく。これは、電極間距離が増えると Si の抵抗成分が大きくなることから、その光に対する感度が小さいことによると考えられる。先の結果と併せて考えると、電極と Si の仕事関数差により電極下に生じている空乏層容量が、光照射により形成されたキャリアが電極下に拡散して変化することで、インピーダンスの変化が表れているものと結論付けられる。

(2) 光に対するインピーダンス変化の検討

インピーダンスの変化が光入射による Si の空乏層容量変化によるものと分かったので、Si 中の光キャリアの発生とそれによる導電率変化と空乏層の変化を理論的に検討した。光生成キャリア濃度は光強度に比例するため、光源からの距離の自乗に反比例する。キャリアの生成により Si の抵抗率が減少するとともに、キャリアが電極下に拡散することで空乏層の幅が減少する。これらの現象を n 型 Si について定式化し、光照射により生成された過剰キャリアに対するそれぞれの変化を計算した結果を図4に示す。過剰キャリアの増加に伴い、抵抗率・空乏層幅ともに減少し、その変化率は不純物濃度付近で大きくなることが明らかとなった。

不純物濃度の影響が大きいことが理論的に分かったので、次に Si の不純物濃度と伝導型による影響を調べた。n 型と p 型の基板で試験片を作製し、光に対するインピーダンス変化を調べたところ、p 型の方が変化が大きくなることを見出した。また、不純物濃度を変化させることで、光に対する感度を制御できることを明らかにした。p 型の方が感度が高い要因としては、電極(NiCr)との仕事関数差が n 型よりも大きく、空乏層容量がより大きくなっていることが考えられる。

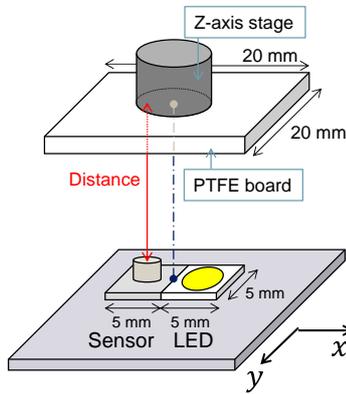


図5 光を用いた近接計測システム概略図

(3) 光を用いた近接計測手法の検討

インピーダンス変化が光によるものであることが明らかとなったため、LEDをプローブ光として物体に照射し、その反射光の距離による変化を検知することで近接を計測する手法を検討した。図5に計測の模式図を示す。センサに隣接してセンサと同程度の大きさのチップLED(白色光)を設置し、対象物としてPTFE板を用いて、センサと対象物間の距離を変化させた場合と接触させた場合のひずみゲージ抵抗(直流抵抗)と交流インピーダンスを計測した。図6にその測定結果を示す。直流抵抗は接触時にのみ接触力に比例して変化し、対象物が離れている時には一定である。一方、交流インピーダンスは対象物の距離が大きくなるほど増加している。これは対象物が離れることによりセンサに入射する反射光が減少したことによる。単一のセンサ素子で接触力と近接距離を計測周波数を切り替えることで計測可能であることを示した。

また、本手法による計測の有効性を検討するため、温度や環境光の影響を検討した。その結果、温度に対しては1あたり-0.5%のインピーダンス変化を示した。これはSi内のキャリアの熱的な励起によるものであり、遮光した参照素子を用いることで補正することが可能であると考えられる。一方、環境光に対しては、一般の製造工場等での照度基準である500 lxのオンオフに対して-1.2%であった。通常のほぼ一定の環境光下では、それよりもはるかに小さい変化となり、環境光の影響はほとんど受けないと考えられる。

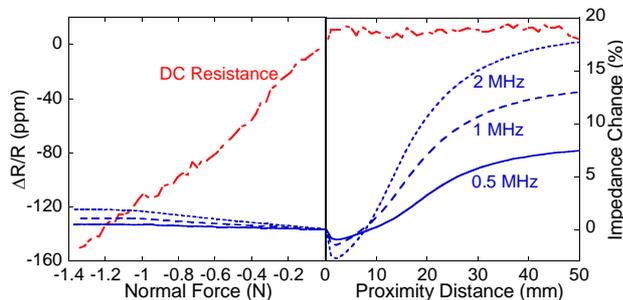


図6 物体近接および接触による直流抵抗と高周波インピーダンス変化

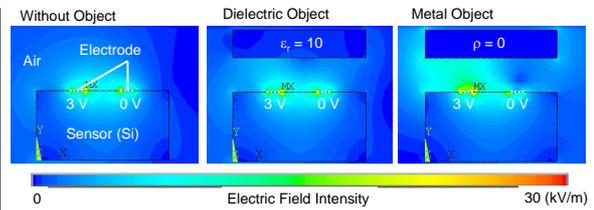


図7 有限要素法解析によるセンサ近傍の電界分布の物体近接時の変化

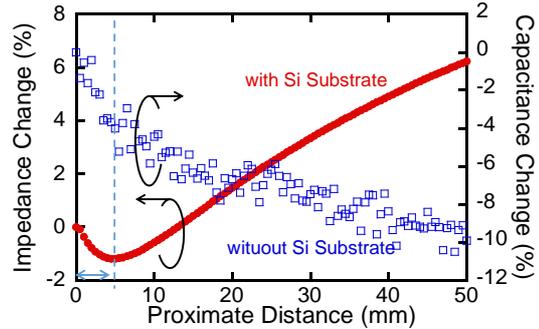


図8 物体近接時の反射光変化によるインピーダンスとガラス基板上平面キャパシタの静電容量の電界分布による変化

(4) 電界による極近接検知の検討

光を用いた計測では図6に示したように50 mm程度までの近接距離が検知可能であるが、センサのごく近傍(1 mm以下)では、反射光が入射しにくくなるため、距離に対する依存性が逆転してしまうので、厳密な接触の有無の検知を行うことが困難である。また、透明な物体だと反射光が小さくなり、検知が難しくなる。そこで、電界分布による計測を組み合わせることでセンサの極近傍の近接の検知可能性を検討した。図7にセンサ近傍の電界分布の有限要素法による解析結果を示す。胴体や誘電体等の物体が近接することにより、電界分布が変化しており、これを平面型キャパシタの静電容量変化として捉える手法を考えた。光に対する感度と分離するため、ガラス基板上に平面キャパシタを作製した試料を用いて、物体近接による静電容量変化を計測した結果を図8に示す。光を用いた計測では、極近傍でインピーダンスが減少から増加に転じているが、平面キャパシタの静電容量は単調に変化しており、光では計測できない距離を補うことが可能であることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

三原 雅人、野沢 瑛斗、安部 隆、奥山 雅則、野間 春生、東 輝明、寒川 雅之、BiFeO₃ 圧電体薄膜を用いたマイクロカンチレバー触覚センサの検討、電気学会論文誌E(センサ・マイクロマシン部門誌)、査読有、Vol.135、2015、158-164

DOI: 10.1541/ieejsmas.135.158

横山 輔久登、金島 岳、奥山 雅則、安部 隆、野間 春生、東 輝明、寒川 雅之、光・歪複合検知 MEMS センサによる近接覚・触覚計測、電気学会論文誌 E(センサ・マイクロマシン部門誌)、査読有、Vol.134、2014、229-234

DOI: 10.1541/ieejsmas.134.229

Hokuto Yokoyama, Takeshi Kanashima, Masanori Okuyama, Takashi Abe, Haruo Noma, Teruaki Azuma, Masayuki Sohgawa, Active Touch Sensing by Multi-axial Force Measurement Using High Resolution Tactile Sensor with Microcantilevers、電気学会論文誌 E(センサ・マイクロマシン部門誌)、査読有、Vol.134、2015、58-63

DOI:10.1541/ieejsmas.134.5

Hokuto Yokoyama, Masayuki Sohgawa, Takeshi Kanashima, Teruaki Azuma, Masanori Okuyama, Haruo Noma、Fabrication and Noise Reduction of the Miniature Tactile Sensor Using Through-Silicon-Via Connection with Signal Amplifier、Japanese Journal of Applied Physics、査読有、Vol.52、2013、06GL08

DOI:10.7567/JJAP.52.06GL08

〔学会発表〕(計 14 件)

高橋 賢太、安部 隆、奥山 雅則、野間 春生、寒川 雅之、MEMS 多軸触覚センサを用いた定量的質感計測のための基礎検討、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015、2015 年 5 月 18 日、京都市勧業館「みやこめっせ」(京都府京都市)

寒川 雅之、安部 隆、積層マイクロカンチレバー構造の作製とそれを用いた小型センサデバイス、電気学会交通・電気鉄道/フィジカルセンサ合同研究会、2015 年 3 月 18 日、豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市)

寒川 雅之、安部 隆、奥山 雅則、野間 春生、縄田 厚、褥瘡管理用装置のためのマイクロメカニカルセンサ、日本機械学会北陸信越支部 第 52 期 総会・講演会、2015 年 3 月 7 日、新潟工科大学(新潟県柏崎市)

Masayuki Sohgawa, Akito Nozawa, Hokuto Yokoyama, Takeshi Kanashima, Masanori Okuyama, Takashi Abe, Haruo Noma, Teruaki Azuma, Multimodal Measurement of Proximity and Touch Force by Light and Strain-sensitive Multifunctional MEMS Sensor、IEEE Sensors 2014、2014 年 11 月 5 日、Valencia (Spain)

Masayuki Sohgawa, Kosuke Watanabe, Takeshi Kanashima, Masanori Okuyama, Takashi Abe, Haruo Noma, Teruaki Azuma, Texture Measurement and

Identification of Object Surface by MEMS Tactile Sensor、IEEE Sensors 2014、2014 年 11 月 5 日、Valencia (Spain)

野沢 瑛斗、安部 隆、奥山 雅則、野間 春生、東 輝明、寒川 雅之、近接覚・触覚マルチモーダルセンサの近接検知原理の解析、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 日、くにびきメッセ(島根県松江市)

Masayuki Sohgawa、Multifunctional tactile sensors using MEMS cantilevers、The 6th IEEE International Nanoelectronics Conference (IEEE INEC 2014)、2014 年 7 月 28 日、北海道大学(北海道札幌市)

三原 雅人、安部 隆、奥山 雅則、野間 春生、東 輝明、寒川 雅之、BiFeO₃ 圧電体薄膜を用いたマイクロカンチレバー触覚センサの検討、平成 26 年度電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会、2014 年 5 月 28 日、東京大学(東京都目黒区)

野沢 瑛斗、横山 輔久登、金島 岳、奥山 雅則、安部 隆、野間 春生、東 輝明、寒川 雅之、光・ひずみ複合 MEMS センサを用いた近接覚・触覚マルチモーダル計測、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014、2014 年 5 月 26 日、富山市総合体育館(富山県富山市)

渡部 公介、金島 岳、奥山 雅則、野間 春生、東 輝明、安部 隆、寒川 雅之、MEMS 触覚センサによる物体表面質感の計測法、平成 26 年電気学会全国大会、2014 年 3 月 20 日、愛媛大学(愛媛県松山市)

横山 輔久登、金島 岳、奥山 雅則、安部 隆、野間 春生、東 輝明、寒川 雅之、単一 MEMS センサ素子による近接覚・触覚計測手法の検討、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 5 日、仙台国際センター(宮城県仙台市)

Hokuto Yokoyama, Masayuki Sohgawa, Takeshi Kanashima, Masanori Okuyama, Takashi Abe, Haruo Noma, Teruaki Azuma, High Resolution Measurement of Multi-axial Force in Real Time Using Miniature Tactile Sensor with Microcantilevers Embedded in PDMS、IEEE Sensors 2013、2013 年 11 月 5 日 Baltimore (USA)

Kosuke Watanabe, Masayuki Sohgawa, Takeshi Kanashima, Masanori Okuyama, Haruo Noma, Teruaki Azuma, Multi-axial Tactile Sensor with Micro-cantilever Embedded in Hemispherical Elastomer for Surface Texture Measurement、The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2013 & Eurosensors XXVII)、2013 年 6 月 18 日、

Barcelona (Spain)
Kosuke Watanabe, Masayuki Sohgawa,
Takeshi Kanashima, Masanori Okuyama,
Haruo Noma, Identification of Various
Kinds of Papers Using Multi-axial
Tactile Sensor with Micro-cantilevers,
The IEEE World Haptics Conference 2013,
2013年4月15日、Daejeon (Korea)
〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計1件)

名称: MEMS センサ
発明者: 寒川 雅之、奥山 雅則、野間 春生
権利者: 新潟大学、立命館大学
種類: 特許
番号: 特願 2013-223626
出願年月日: 2013年10月28日
国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

・報道、アウトリーチ関連

MEMS 微細加工技術と多機能小型触覚セン
サ、新潟大学地域懇談会(佐渡会場)・第
5回佐渡産業創造塾、2014年12月12日
<http://www.ircp.niigata-u.ac.jp/866>
半導体・MEMS を用いた近接覚・触覚コン
ポセンサ、国立六大学連携コンソーシア
ム新技術説明会、2014年11月14日
<http://shingi.jst.go.jp/abst/2014/6-univ/program.html>
触覚と近接覚を測れるセンサー開発 - ロ
ボット向けに提案へ、日刊工業新聞、
2014年10月10日
<http://www.nikkan.co.jp/news/nkx0720141010eaaa.html>
人並みの触覚を実現する MEMS 触覚セン
サ、イノベーション・ジャパン 2014、2014
年9月11日~12日
ナノ薄膜技術を応用したロボットのため
の集積多軸触覚センサの開発(技術展示)
第13回国際ナノテクノロジー総合展・技
術会議、2014年1月29日~30日

・ホームページ

http://researchers.adm.niigata-u.ac.jp/html/100000736_ja.html

6. 研究組織

(1)研究代表者
寒川 雅之(SOHGAWA, Masayuki)
新潟大学・自然科学系・助教
研究者番号: 70403128

(2)研究分担者
()

研究者番号:

(3)連携研究者
野間 春生(NOMA, Haruo)
立命館大学・情報理工学部・教授
研究者番号: 00374108

奥山 雅則(OKUYAMA, Masanori)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・名誉教
授
研究者番号: 60029569