

令和 2 年 11 月 11 日現在

機関番号：11601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02760

研究課題名(和文) 信号の時間遅延現象を用いるコーティング式触覚センサ

研究課題名(英文) Spray-coated tactile sensor using signal phase delay

研究代表者

高橋 隆行 (TAKAHASHI, Takayuki)

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号：70197151

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：複数の出力信号間の時間位相差を使って接触位置を検出可能な、ペンキのように塗布することにより形成できる全く新しい接触センサを新たに提案した。本センサは、直線状や円環状(ループ状)を含むさまざまな形態で接触位置検出が可能であることを実験により明らかにした。また、一次元ならびに二次元のシミュレーション・モデルを提案し、実験結果と良い一致を示すことを確認した。また、本センサの基礎特性について詳細に調査を行い、十分に実応用が可能であるとの結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本センサは、塗布により接触センサを形成するため、さまざまな表面形状をもつ物体に容易に装着可能である。また、センサ自身は極めて薄くシンプルな構造であり、かつ柔軟性に富むので、例えばロボット表面のさまざまな場所へ接触を検出可能なセンサが形成できるなど、これまで不可能であった計測が可能となる可能性がある。加えて、本センサは自身が発電するため、それを利用して微弱電波通信を併用するなどにより完全な無給電運用ができる可能性もある。このように、本センサの応用は、これまでの面的センサを大きく変える可能性があり、人支援ロボットやさまざまなメカトロニクス機器の機能や安全性を大幅に高めることが可能となる。

研究成果の概要(英文)：A novel tactile sensor that can be formed by spray coating like paint, and can detect the touch position using the time phase delay between multiple output signals is proposed. It has been clarified by experiments that this sensor can detect the touch position in various forms including linear and annular (loop). Additionally, one-dimensional and two-dimensional simulation models are proposed and confirmed to show good agreement with experiments. In addition, the basic characteristics of this sensor were investigated in detail, and it can be said that the practical application of this sensor was sufficiently possible.

研究分野：ロボット工学・制御工学

キーワード：接触センサ 時間遅延 圧電素子 コーティング 塗布 ロボット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

さまざまな形状の物体表面に装着でき、加圧点の位置を面的に計測可能なセンサに関して、これまで多くの提案・開発が行われてきた。例えば、感圧導電性ゴム、圧電効果を持つ PVDF フィルム、導電性繊維、超音波、機械的構造の変位・変形、静電容量の変化を利用したものなどがある。しかしながら、これまで提案された面的なセンサはいずれも複雑に入り組んだ凹凸面を持つ形状に、密着しつつ適用するのは容易ではなく、また一般に、複雑な形状へ貼り付ける工夫によってセンサ自身の構造が複雑化してしまう傾向にあった。特に、小さな触覚素子を面的に分布させる形式のセンサの場合にこの傾向が顕著であり、なかでも大量の配線を処理する課題は解決が難しい。このことから、例えばロボットハンドのような小型で複雑な表面を面的にカバーできる接触センサは、これまで十分なものは無かった。

2. 研究の目的

信号の時間遅延を用いるというこれまでに無い新しい原理に基づき、加圧点の位置を面的に検出可能なセンサを開発することが本研究の目的である。本センサは、塗布型の樹脂系圧電素子を用いており、塗布という工程により接触センサを形成するため、複雑な凹凸を持つ形状にも極めて容易に装着可能である。また、センサ自身は極めて薄くシンプルな構造であり、かつ柔軟性に富むので様々な表面に適用できる。例えばロボット表面のあらゆる場所へ、表面の形状に関わらず接触を検知可能なセンサが実現できるなど、これまで不可能であった計測が可能となる可能性がある。また、大量の配線が不要であるという特長も有する。

加えて、本研究で開発するセンサは自身が発電するため、それを利用して微弱電波通信を併用するなどにより完全な無給電運用ができる可能性もある。これは深海等での応用も可能とする特長となり得る。また、電気的ノイズ耐性が高く精密計測が容易な時間を利用するセンサであり、位置検出の高精度化が期待できる。これらのことから、例えば車輪の外周部に塗布して車輪と段差の接触を直接検出できる可能性など、これまで検出が困難であった箇所への装着も考えられる。このように、本センサの応用は、これまでの面的センサを大きく変える可能性があり、人支援ロボットやさまざまなメカトロニクス機器の機能や安全性を大幅に高めることが可能となる。また工法もシンプルでコスト的にも優位性を持っている。さらに、本センサの基本原理は、必ずしも塗布型の圧電材のみに限定されるものではなく、それ以外のさまざまな材料での実現が可能であると考えられ、さらに広い学術的・産業的な広がりも期待できる。

3. 研究の方法

福島県福島市に本社を置くムネカタ株式会社(以下、ムネカタ)は、独自技術である「スプレーコーティング」工法による樹脂系圧電性溶液の塗布技術を開発し、複雑な表面形状であっても圧電機能を付加できる新しい技術を開発していた(図1)。これにより基材が金属のような導電体であれば直接、プラスチックのような不導体であれば導電性の薄膜電極を形成した後に塗布することで、あらゆる基材に圧電機能を付加することができる。

ムネカタでは、それまで本技術を専ら発電用途として製品化を目指した開発を行っていたが、センサ用途へと応用範囲を広げることを目的として、研究代表者らと共同でその可能性を探ってきた。研究代

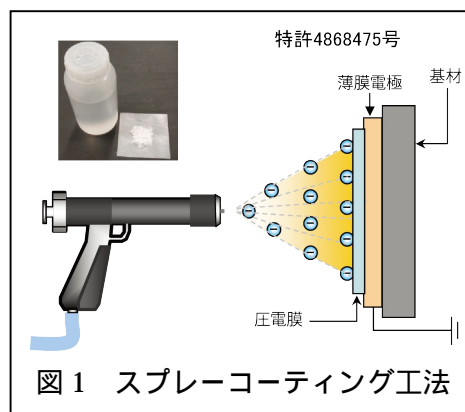


図1 スプレーコーティング工法

表者らは当初、図2のように、圧電膜の上に抵抗体を塗布することで、その加圧位置に応じた抵抗比による分圧電圧を出力端子から取り出すことで、加圧位置を検出することを想定した実験を行っていた。しかし、さまざまな条件による実験を繰り返す内に、出力端子 A、B で計測される信号に加圧位置と出力端子間の距離に対応した時間遅延が発生することを発見した。また、さらに予備実験を進めた結果、この信号遅延は、導電膜、圧電膜、抵抗膜からなる RC 分布定数遅延回路によるものであるとの確認を得た。すなわち、導電膜と抵抗膜の間に挟まれる圧電膜厚が数 $10\mu\text{m}$ であること、また使用している抵抗膜が比較的高抵抗であることで有効な RC 遅延回路が形成されており、このことにより信号遅延が発生している。実際、抵抗膜の抵抗値をゼロとしたサンプルを試作して計測したところ、上記のような信号遅延は発生しなかった。

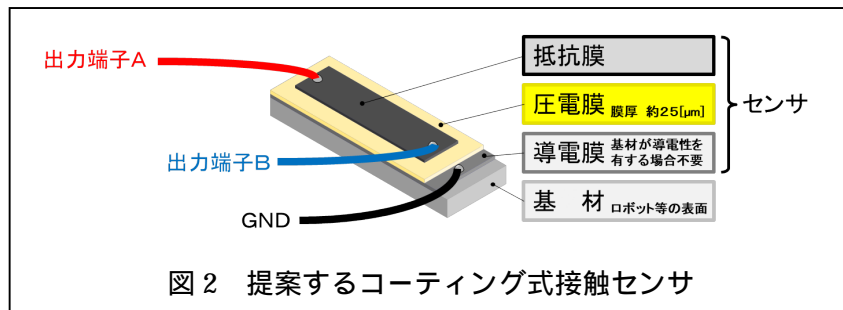


図2 提案するコーティング式接触センサ

以上の予備的な知見に基づき、本研究では、提案するコーティング式接触センサに関して、

以下の点について検討を行った。

(1) 膜厚均一化のための手法の開発

本センサの位置検出精度は、塗布する膜厚の均一度に依存する。特に、圧電膜厚は静電容量の大きさを決定し、抵抗膜厚は RC 遅延回路を構成する抵抗値を決定する。そこでまず、均一な膜厚を形成する手法について検討を行った。

(2) 一次元センサモデルの開発

本センサのさまざまな特性について理論的な検討を効率よく行うために、センサのモデル化を試みた。本センサは基本的に分布定数の RC 回路であり、ローパス特性や時間遅延特性などを有する。本研究では、直列集中定数による近似を行ったうえで、RC が直列的に接続された一次元モデルを構築し、実験とシミュレーションによる比較検討を行った。なお、モデルのシミュレーションには LTSpice を用いた。

(3) 二次元モデルへの拡張

センサの幅が広がると、直列型の一次元モデルでは不適切となり、二次元への拡張が必要となると示唆される実験結果を得た。そこで、新たに幅の広いセンサを試作し、RC が網目状に接続された二次元モデルの検討を行った。

(4) 曲面への応用

ロボットハンドの指など、細長い物体に本センサを適用すると、センサは円環状（ループ状）となる。そこで、そのような形態でもセンサとして機能するか確認するために、新たにセンサを試作して実験による検証を行った。また、このような形態のセンサに対するモデルの検討も併せて実施した。

(5) 加圧の仕方に関する検討

接触センサは、実際の応用ではさまざまな接触を受ける。そこで、単点接触、多点接触のそれぞれについて、さらには加圧速度の影響について、主として LTSpice を用いたシミュレーションにより検討した。

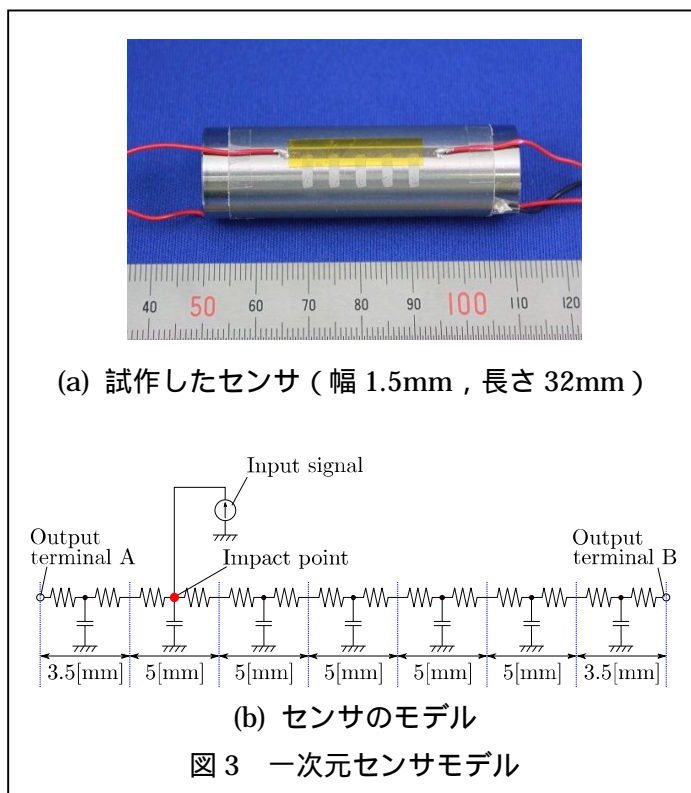
4. 研究成果

(1) 膜厚均一化のための手法の開発

均一な厚さの膜を塗布するために、いくつかの方法を試みた。具体的には、(a)スクレーパ、(b)スプレーガン、(c)スパッタリング、である。まず、スクレーパ方式ではさまざまな条件での実験を行ったが、均一な厚さの膜を生成することはできなかった。続いて、スプレーガンで均一に塗布するためにコーティング装置を作成し、スプレーガンを一定速度で動かせるようにした。本装置を用いて塗布時に基材の配置を工夫することで、膜厚の均一性を向上させることができた。続いて、様々な塗布方法の中でも均一な膜厚を得やすいとされるスパッタリングで抵抗膜の塗布を試みた。しかし、抵抗分布のバラつきがスプレーガンで塗布した場合よりも大きく、期待する結果を得ることができなかった。結果として、(b)のスプレーガンによる方法が適当であるとの結論を得た。

(2) 一次元センサモデルの開発

RC 分布定数回路から T 型の RC 集中定数回路へ近似し、センサの一次元モデルを構築した。はじめに、抵抗膜の幅が 6mm のセンサでモデル化を試み、シミュレーションを行ったところ、遅延時間が実験結果と大きく異なっていた。そこで、抵抗膜の幅を 1.5mm にしたセンサ（図 3(a)）を用いて再度モデル化を試みたところ、遅延時間の実験値との誤差が小さくなった。このことにより、センサ幅が大きくなると一次元的なモデルでは誤差が大きくなることが示唆された。さらに、信号の計測に用いたオシロスコプの等価回路をセンサのモデルに加えることで、シミュレーション結果が実験結果にさらに近づくことがわかった。これら一連の検討により、最終的に、図 3(b)のような一次元の基本的な回路モデルを構築することができた。



(3) 二次元モデルへの拡張

上述の一次元モデルの検討過程において、センサの幅が広くなるにつれて、一次元のモデルでは誤差が大きくなることがわかった。そこで、新たに幅 6mm、長さ 36mm の幅広センサを試作し、T 型 RC 回路をさまざまに組み合わせて、二次元モデルの構築を試みた。最終的に、図 4 に示すようにセンサを小さな正方形（ここでは 1mm 角）のブロックで分割して近似したモデルが、実験とのよい一致を与えることが分かった。なお、ブロックの大きさは必ずしも 1mm 角とする必要はなく、最適な大きさはセンサの膜厚等により異なる。

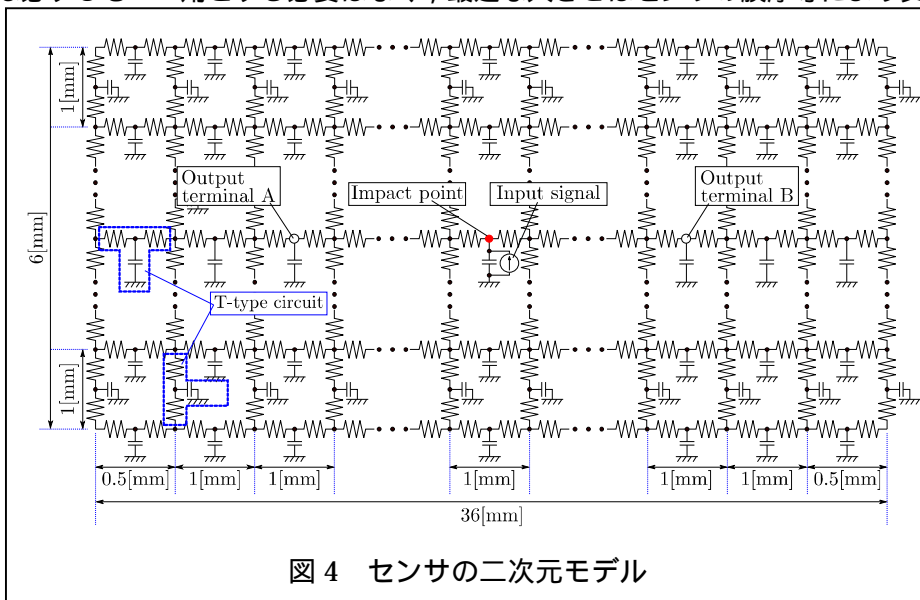
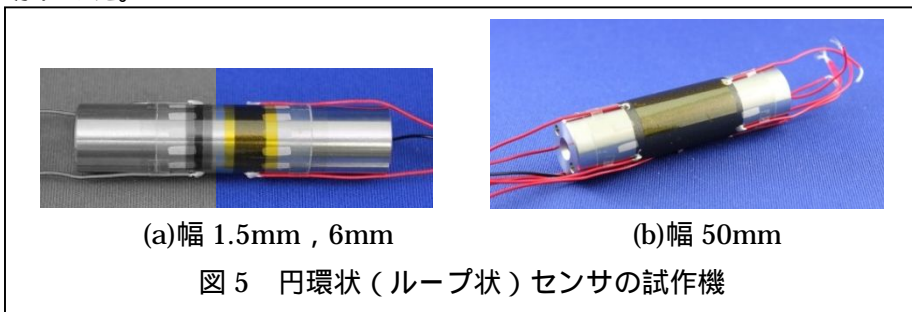


図 4 センサの二次元モデル

(4) 曲面への応用

図 5 に示すような、3 種類の幅を持つ円環状（ループ状）センサを試作し、その特性を計測した。その結果、直線状（ループの無い）センサと同様に、信号の時間遅延による位置計測が問題なく行えることを確認した。また、この形式のセンサのモデルは、これまで検討してきたモデルの両端を接続して、回路的にループ状とすることで記述できることを明らかにした。



(a) 幅 1.5mm, 6mm

(b) 幅 50mm

図 5 円環状（ループ状）センサの試作機

(5) 加圧の仕方に関する検討

まず単点接触時における、接触時の力の大きさと接触速度の影響について検討した。これらは、接触点における発生電流の振幅ならびに周波数として表現可能である。それらに対する位置検出精度への影響をシミュレーションで検討した結果、振幅の影響は全くない一方で、周波数（接触速度）が位置検出結果に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。続いて多点接触では、接触タイミングが完全に同時である場合には位置検出は不可能であるが、現実的な接触を想定して、わずかな時間差（試験で用いた試作センサの場合は数 μs ）を置いて複数点が接触する多点連続接触では位置検出ができることがわかった。

続いて、上の検討で問題となった本センサの周波数依存性を改善するために、センサの構造を変えることを前提に、検出位置の補正法の検討を行った。具体的には、センサの端子数を増やした 3 端子センサと、センサ自体を 2 層に重ねた多層センサについて検討を行った。3 端子センサとは、図 2 の出力端子 A, B 間に、もう一つの出力端子 C を設けたものである。この形にすることにより、例えば、出力端子 A, C 間で接触が生じた場合には、出力端子 B, C 間は既知の距離であるので、その信号伝搬速度を指標として、遅延時間の補正が可能である。多層センサでは、まず下層のセンサの抵抗膜を導電膜に変更して、遅延が生じないようにした。そして、この下層のセンサの出力で入力周波数を推定し、位置算出に用いる近似直線の傾きを推定し、補正を試みた。シミュレーションにてその効果を検証した結果、3 端子センサでは \pm 数 mm 程度、多層センサでは $\pm 0.5\text{mm}$ 以内に接触位置検出誤差を抑えられることを示した。

次に、逆伝達関数による位置推定法を提案した。この方法は、センサの構造を変えることなく適用できるメリットがある。ここで逆伝達関数は、加圧点からセンサ出力までの

伝達関数の逆関数であり、その求め方としてラプラス変換を用いる方法とz変換を用いる方法の2つについて検討した。その結果、z変換を用いた逆伝達関数が位置推定に有効であることを示した。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 8 件)

佐藤弘基・Luis CANETE・高橋隆行，コーティング式触覚センサの開発～接触位置信号の再構成とそれに基づく位置推定法の提案～，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019，1P1-U05 (CDROM)，2019.5

佐藤弘基・Luis CANETE・高橋隆行，コーティング式触覚センサの開発～多点接触時の位置検出～，第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，1B5-10(CDROM)，2018.12

佐藤弘基・Luis CANETE・高橋隆行，コーティング式触覚センサの開発～2次元センサへの拡張に向けた検討～，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018，1P1-M15，2018.6

北島諒一・Luis CANETE・高橋隆行，コーティング式触覚センサの開発～円筒曲面塗布型センサ実現可能性の検討～，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017，1A1-N01 (CDROM)，2017.5

北島諒一・Luis CANETE・高橋隆行，コーティング式触覚センサの開発～センサモデルの改良～，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017，1P1-N01 (CDROM)，2017.5

北島諒一・高橋隆行，コーティング式触覚センサの開発～センサのモデリングの基礎的検討～，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016，1P1-18b2 (CDROM)，2016.6

北島諒一・高橋隆行，コーティング式触覚センサの試作と時間遅延を用いた位置検出原理，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015，2A1-A02 (CDROM)，2015.5

北島諒一，高橋隆行，コーティング式触覚センサを用いた信号遅延による位置検出～試作と原理の確認～，計測自動制御学会東北支部50周年記念学術講演会，A303，2014.12

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：位置検出システム

発明者：高橋隆行・佐藤弘基，ルイス カニエテ

権利者：福島大学

種類：特許

番号：特願 2019-104113

出願年：2019

国内外の別：国内

取得状況(計 1 件)

名称：センサ、位置検出システムおよびセンサの製造方法

発明者：高橋隆行・北島諒一・海野雄士・金澤彰裕・桑田拓弥

権利者：福島大学，ムネカタインダストリアルマシナリー株式会社

種類：特許

番号：6448084

取得年：2018

国内外の別：国内

〔その他〕

【受賞】(計 3 件)

佐藤弘基・Luis CANETE・高橋隆行，一般社団法人 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門，ROBOMECH 表彰(学術研究分野)，2019.6

佐藤弘基，一般社団法人 日本機械学会，若手優秀講演フェロー賞，2019.6

北島諒一，一般社団法人 日本機械学会，若手優秀講演フェロー賞，2018.6

6. 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名：ルイス カニエテ

ローマ字氏名：Luis Canete

研究協力者氏名：北島 諒一

ローマ字氏名：KITAJIMA, Ryoichi

研究協力者氏名：佐藤 弘基

ローマ字氏名：SATO, Kouki

研究協力者氏名：海野 雄士

ローマ字氏名：UMINO, Uji

研究協力者氏名：金澤 彰裕

ローマ字氏名：KANAZAWA, Akihiro

研究協力者氏名：桑田 拓弥

ローマ字氏名：KUWATA, Takuya

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。