

透明柔軟樹脂を用いた光学式触覚センサの開発

行平 将望* 伍賀 正典*

Development of optical tactile sensor using transparent flexible resin

Masami YUKIHIRA*, Masanori GOKA*

ABSTRACT

In recent years, robots have been introduced into various aspects of society. When robots are asked to perform a wide variety of tasks, it is necessary to know what kind of object they are touching by means of sensors in order to prevent the destruction of their own hands and objects. However, such tactile and force sensors are expensive. To solve this problem, we have been developing inexpensive optical tactile sensors that reproduce the higher-order functions and flexibility of human hands and skin. This paper describes the improvements of the optical tactile sensor and the development of an application that visualizes the amount of change in the sensor.

キーワード：触覚センサ，力覚センサ，光学デバイス，透明樹脂，可視化アプリケーション

Keywords: Tactile sensor, Force sensor, Optical device, Transparent polymer, Visualization application,

1. はじめに

近年、産業分野・家庭などの様々なシーンへ、人間の代替として熟練を要する仕事から日常の家事までロボットによる多種多様な作業の実現が求められている。ロボットに多種多様な作業を行わせるために、人間の皮膚のような柔軟性を備えた触覚センサが注目されている。また、人間の多種多様な作業をロボットに代替させる場合、自身の手や対象物体の破壊を防ぐために、センサによってどのようなもの

に触れているのかを把握する必要性が生じる。しかし、そのような触覚・力覚センサは高価かつ構造やシステムが複雑であり、小型化が困難であるといった問題が見られる[5][6][7]。このような問題を解決するために、先行研究で柔軟樹脂を用いた磁気触覚センサの開発を行ってきた[1][2]。しかし、この開発したセンサは地磁気という背景磁場の影響を完全に除去することができない問題点があった。これを解決するために、柔軟樹脂を用いた磁気とは異なる

る物理量を利用した光学式触覚センサを提案する。光学式触覚センサは透明柔軟樹脂とフォトリフレクタで構成しており、人間の手が備える高次機能の実現を目指す。本稿では透明柔軟樹脂を用いた光学式触覚センサの開発・改良と、それを用いてセンサの状態を可視化したアプリケーション開発・評価実験を示す。

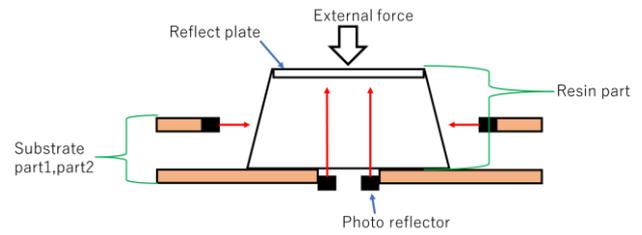


図1 光学式触覚センサの構造

Fig. 1 Structure of optical tactile sensor.

2. 光学式触覚センサの提案

先行研究で提案してきた磁気式触覚センサは、従来の触覚センサに比べて全体の小型化・コストの削減に成功している。しかし、GMR素子の単価が高価であるため、センサを多用する場合、コストをさらに削減して出来る限り安価にする必要がある。また、このセンサは、地磁気や周りのモーターの影響を受けてしまうため、取り扱い、特に、空間中で姿勢が短時間で様々に変化するロボットに磁気式触覚センサを搭載する場合、正確な計測が困難となっている。背景磁場の影響を軽減するために、磁気抵抗素子を複数個使って回路等を試作したが、影響を完全に除去するにはいたらなかった。これらを踏まえ本研究では、赤外線を発射し、その反射を感知する光学素子・フォトリフレクタを用いる[3][4]。フォトリフレクタは、ロボット分野においてタイヤの回転量を計測する光学式ロータリーエンコーダとして一般的に用いられている。人間の目では判断できないタイヤの高速回転を計測可能なほど高い応答速度であり、磁気抵抗素子と比較して微弱な信号を増幅する必要もなく、入手しやすく、価格は非常に安価である。したがって、透明・反射層で構成されている樹脂部に加えられた力による変形をフォトリフレクタから発せられる赤外線光線の反射に伴う受光量の変化により検出する光学式触覚センサを提案する。

2.1 センサ構造

本研究で提案する触覚センサの構造を図1に示す。このセンサは、透明色のポリウレタン樹脂を用いた樹脂部とバックライト基板を用いた基板部の単純な構造を持ち、両者の間に配線はない。人間の皮膚と同様に対象との柔軟な接触を可能とし、たとえ摩擦しても交

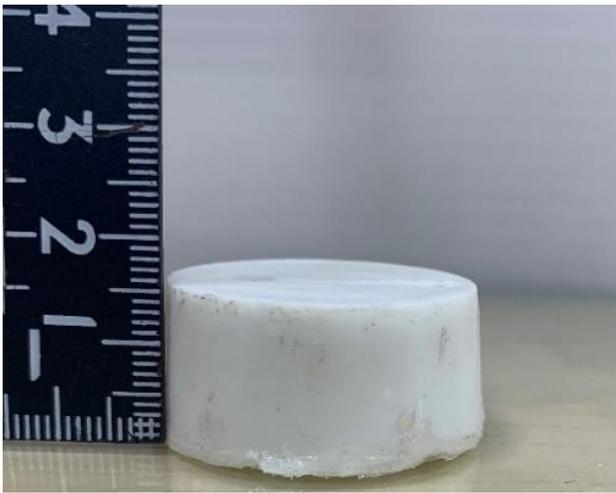
換が容易な構造であることが特徴である。基板部の表面は電子部品などを全く実装せず平面であり、計8つのフォトリフレクタを実装する。

図2(a)(b)に本研究で用いている光学式触覚センサの基板と柔軟樹脂の大きさを示す。基板に実装しているフォトリフレクタ素子の配置を図2(a)に示すように、この基板部は樹脂が設置させる第一層(図2(a)・左)と光学素子が樹脂を囲むように設置される第二層(図2(a)・右)から構成されている。第一層の基板は、4つの光学素子が全て中心を向くように実装され、これらは透明柔軟樹脂内部の反射板に対する赤外線の反射をセンシングする。第二層の基板は柔軟樹脂を囲むように4つのフォトリフレクタが実装され、これらは柔軟樹脂の表面に対する赤外線の反射をセンシングする。この構造は、柔軟樹脂のxyz方向のせん断方向に対する変位を第二層の基板の光学素子で捉え、z方向の変位とxy軸に対する回転を第一層の基板の光学素子で捉えることを目的としている。z軸方向に対する回転以外の5つの量を捉えることを想定している。50mmの周囲1mmを切削した直径48mmとした。

試作した触覚センサを図3に示す。第一、第二層基板には、5Vの電圧が供給され、それぞれのセンサは樹脂の変形に応じた電圧を信号として返す。この試作では、各基盤に実装された光学素子は変形量に応じて、値を返すことを確認した。これを踏まえて、樹脂の変形と各々のセンサの値の関連性を繰り返し試験することにより、センサの値から樹脂の変形の具合を検出することが可能である。



(a)



(b)

図2 基盤層および透明柔軟樹脂
Fig.2 Substrates and flexible resins

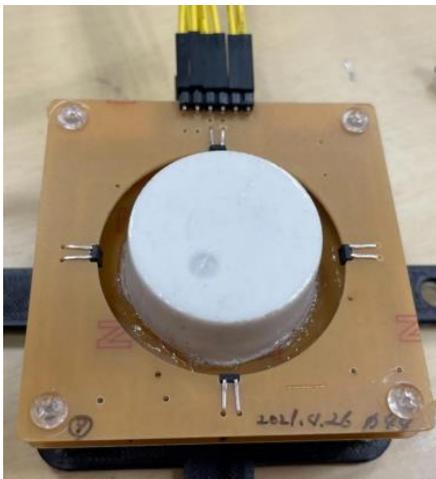


図3 光学式触覚センサの概観
Fig.3 Optical Tactile Sensors

2.2 フォトリフレクタ素子

ここで、本研究で用いるフォトリフレクタ素子 (TPR-105) についての説明を述べる。フォトリフレクタ素子の実寸図を図4に示す。フォトリフレクタ素子とは、赤外線LEDから放出された光を物体に反射させ、フォトトランジスタで受光する。その受光量によって出力電圧が変化するセンサである。素子1つの大きさが非常に小さく、そのため、回路の小型化に適している。この素子を使用した予備実験では、背景磁気の影響を全く無く、約10mmまでの距離に応じた電圧を返すことが明らかになった(図5)。出力電圧は受光量が増加すると減少する。

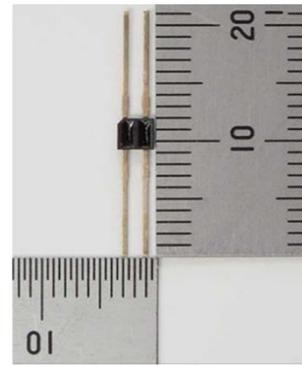


図4 フォトリフレクタ TPR-105

Fig. 4 Actual size of photo reflector

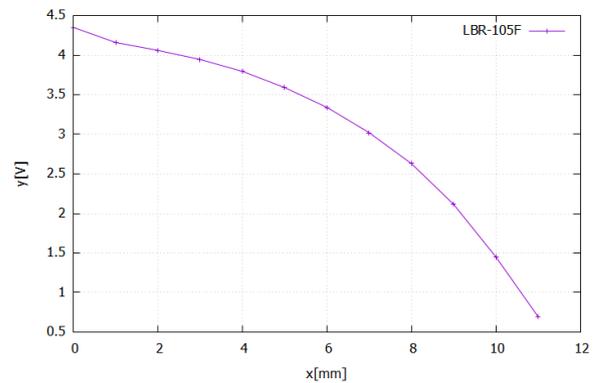


図5 フォトリフレクタ出力特性

Fig. 5 Photo reflector distance and voltage variation

2.3 材料と作成方法

透明柔軟樹脂の材料として図6の株式会社エクシールの人肌ゲル透明硬度7と日新レジン株式会社のグミ

一キャスト透明を用いた。先行研究によりこれら材料で生成されたものは、押下の繰り返しによる劣化やへたりがなく、適度な柔らかさがあり、造形用の形状に速やかに回復する特性があると確かめられている。人肌ゲルで作成した樹脂の外側にグミーキャストを覆う2層構造となっている。反射板はアクリル板を用い、3DCADで設計、レーザ加工機を用いて円盤型に加工している。図7に3DCADによる樹脂型、CNCにより製作した型を示す。型はアルミ合金板を使用しており、右側の円形の窪みが人肌ゲル原液用、左側の切り欠きがある窪みがグミーキャスト用である。1つの型で人肌ゲルによる成型とグミーキャストによる成型ができるように設計を行っており、以下に透明柔軟樹脂の製造過程を示す。

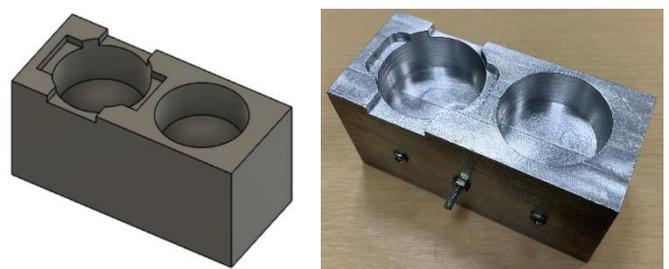
1. 図7の金型内部にバリアーコート塗布して、透明柔軟樹脂を剥離する準備を行う。
2. 電子秤を用いて、計量カップで人肌ゲル硬度7の配合を行う。配合量の誤差は1%以内に収める。
3. 1.で生成した人肌ゲルに反射板を入れて主剤と硬化剤を混ぜる。
4. 2.で生成したものを真空ポンプで脱泡する。繰り返し行うことで内部の気泡が取り除かれる。数回ほど脱泡を行った後に内部の反射板を裏返してさらに脱泡を行う。
5. 反射板付近の気泡がなくなったことを確認する。反射板を人肌ゲルの液体ができるだけ付着しないように取り出し、金型の内部にセットする。底部に空気が入らないように押し込んだ後に、約60℃の恒温槽で反射板と金型をなじませる。
6. 人肌ゲルの脱泡を行う。
7. 脱泡が完了したら、先ほど反射板を入れた金型に流し込む。ピンセットを用いて反射板を押さえて脱泡を行い、残りの気泡を取り除く。
8. 恒温槽内を約60℃に設定し硬化させる。硬化した樹脂はゴミが付着しないようにアクリル板に乗せ、ナイロンで覆って保護する。
9. 電子秤を用いて、計量カップでグミーキャストの配合を行う。配合量の誤差は1%以内に収める。

10. 9.で生成したグミーキャストに図8(a)の白色顔料を入れてA液とB液を混ぜる。硬化するのが速いため10.以降の作業は急いで行う。
11. 10.で生成したものを金型に底から1/3の高さまで投入する。
12. 金型は8.までに生成した樹脂より均一に1mm厚くなっている。8.までに生成した樹脂を外側に層を形成できるように図8(b)の樹脂成型器具を装着し、金型にセットする。溢れた液は取り除く。
13. 約60℃の恒温槽で硬化させる。外側の層がはがれないようにPVC型を取り除いて表面コート剤を塗布して完成する。



図6 透明柔軟樹脂（日新レジン グミーキャスト）

Fig.6 Transparent flexible resin material



(a)

(b)

図7 レジンモールド3DCAD及びアルミ製金型

Fig.7 Resin mold by 3DCAD and CNC

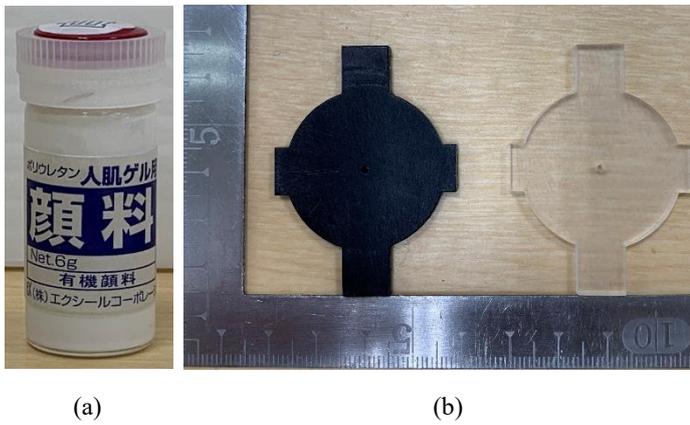


図8 白色顔料 及び樹脂成型用治具

Fig.8 White pigments and Resin molding equipment

3. 光学式触覚センサの改良

これまで開発された光学式触覚センサは、測定範囲が狭く、樹脂部を押し込んだ瞬間に返してくる電圧値の挙動に不確かさがあつた。また、基板部の修理作業に手間が掛かり、誤作動、破損の原因が見られた。これらを踏まえて、光学式触覚センサの基本構成を再検討した。光学式触覚センサの基礎構成を改良し直すことで、性能、運用性、及び、精度の向上を目指す。

3.1 樹脂部

樹脂部は、二層目のグミーキャスト透明がグミーキャストゼロの製造に伴い販売終了しており、入手困難のため、グミーキャストゼロとグミーキャストハードで試作を行った。結果、図9のように(b)グミーキャストハードでは、(a)グミーキャスト透明の状態に非常に近い樹脂が得られたが、(c)グミーキャストゼロでは気泡ができ、表面性状が悪く破れることが明らかとなった。よって、グミーキャストハードを使用する。

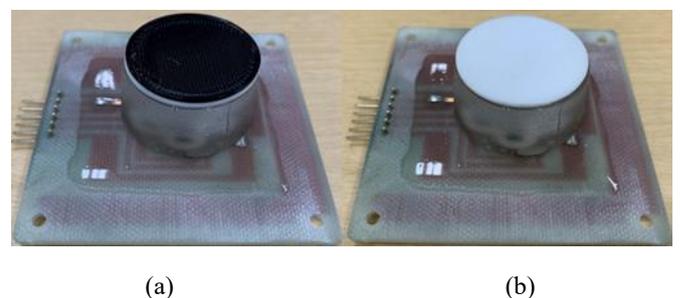
図10に改良を行った反射板について示す。(b)が改良前の白色反射板、(a)が改良後の白黒反射板である。樹脂を押し込む過程で、手の指などの影が生成される。この影がフォトリフレクタからの赤外線の反射に影響を与えていた。白い紙を上部から徐々に反射板に近づけ、反射板に触れる前に徐々に離し電圧の変化を観察する。図10(a)に示す白黒反射板の場合を図11(a)、図10(b)に示す白色反射板の場合を図11(b)に示す。図11(a)の電圧の変化はごくわず

かであるのに対して、図11(b)は約300mV低下している。よって、図10(a)の反射板は影の影響を最小限に抑えることが確かめられた。また、樹脂部は二層構造で構成されているため、今回の試作実験よりも影の影響が少ないと考えられるため、図11(a)で見られる電圧低下を0mVにすることができると考える。よって白黒反射板を採用する。



図9 グミーキャスト透明・ハード・ゼロ

Fig.9 Gummy cast: Transparent, Hard and Zero



(a) (b)

図10 白黒及び白色反射板 光学式触覚センサ

Fig.10 Black and white reflector and white reflector



(a)



(b)

図 11 反射板の違いによる電圧の変化

Fig.11 Voltage change between black and white reflectors

3.2 基板部

改良前後の回路基板は片面基板を採用しており、一層目、二層目のどちらにもジャンパー線を使用せざるを得ず、ジャンパー線によるショートや修理作業がジャンパー線を避けながらの作業になるため、時間が掛かっていた。しかし、改良後は両面基板を採用したことにより、改良前の問題を解決することができた。しかし、両面基板を採用したことで、樹脂部と基板部が接する表基板面に凹凸が生じてしまった。これを解決するために、UV レジンで塗装することで凹凸を無くし、樹脂部と基板部が接する面が平滑になるように加工した。

図 12 に改良前後のフォトリフレクタの位置を示す。改良前は樹脂部と基板部が接する面から約 1mm 下に設置してあり、(前)に示すように、フォトリフレクタと樹脂部の間に隙間ができていた。この隙間により、フォトリフレクタからの赤外線が二重反射を起こしていた。これを解決するために、(後)に示すようにフォトリフレクタを樹脂部に密着させた。その時の樹脂の変形による電圧変化を図 13 に示す。

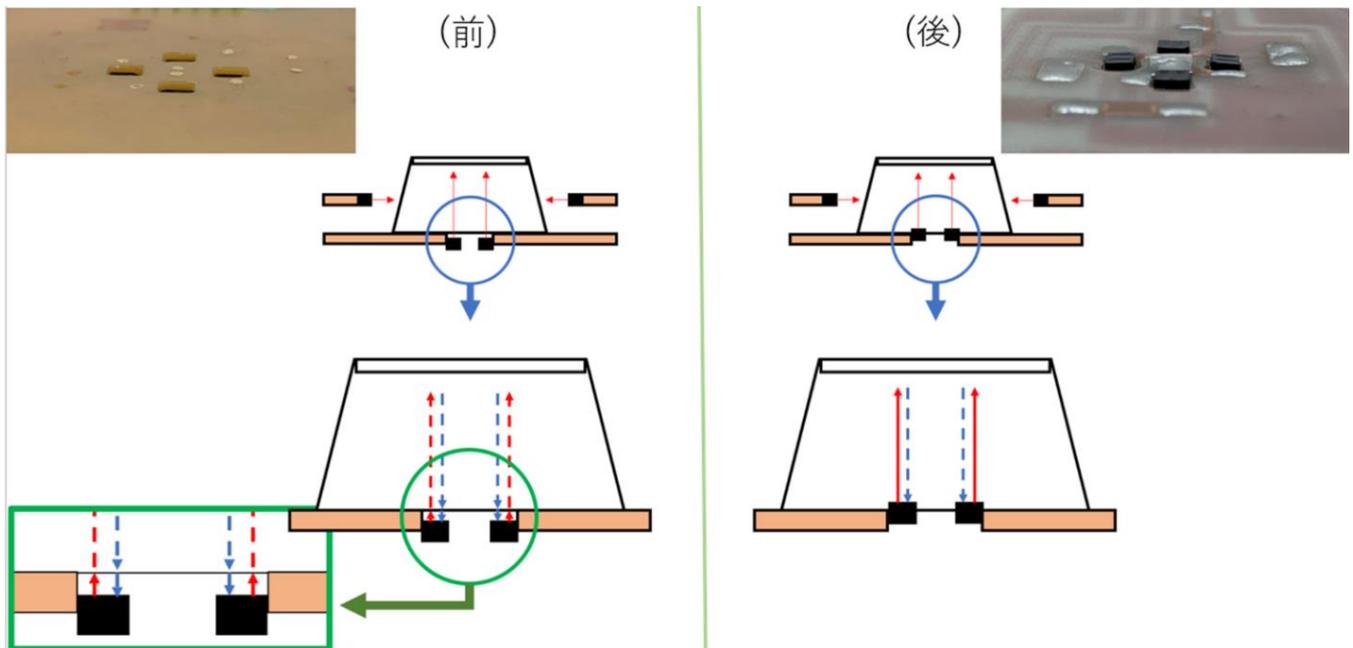


図 12 フォトリフレクタ設置位置による反射状態の改善

Fig.12 Photo reflector positioning

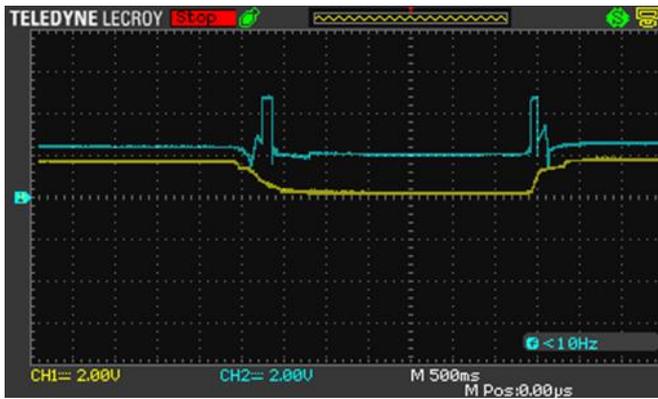


図 13 フォトリフレクタ設置位置による電圧の変化

Fig.13 Photo reflector position versus voltage

反射板に白色反射板，樹脂部を一層目の人肌ゲルで構成し，指で押し込み，離れた時の電圧変化を測定した．黄色線が改良後，青線が改良前の電圧変化である．改良後は，押し込んだ時，離れた時どちらも，なだらかに変化しているのに対して，改良前は，押し込んだ時，離れた時どちらも約 500ms 間，5V まで近づき，

後に正常な動作を行っている．よって，改良前は，指で押し込んだり，離したりする過程で，隙間に変化が起きることで，このような現象が発生していると考えられる．

3.3 性能評価試験

黒色反射板を使用した試作機を用いて，z 軸方向に-2.0mm 押し込み xy 軸方向に±2.0mm の範囲を 0.5mm ずつ移動させ，センサからの値を測定して性能評価実験を行った．第 1 層基板に実装されたセンサからの値を図 14 に，第 2 層基板に実装されたセンサからの値を図 15 に示す．図中の a~b，a'~b' は図 2(a) で示した基板の各センサに対応している．これらのグラフから，測定された値は線形的に変化しており，良好な結果を示している．これらの値を利用することで樹脂の変形を算出することが可能であり，また樹脂に掛かる力はフックの法則に従って変位量を定数倍することで算出することも可能である．

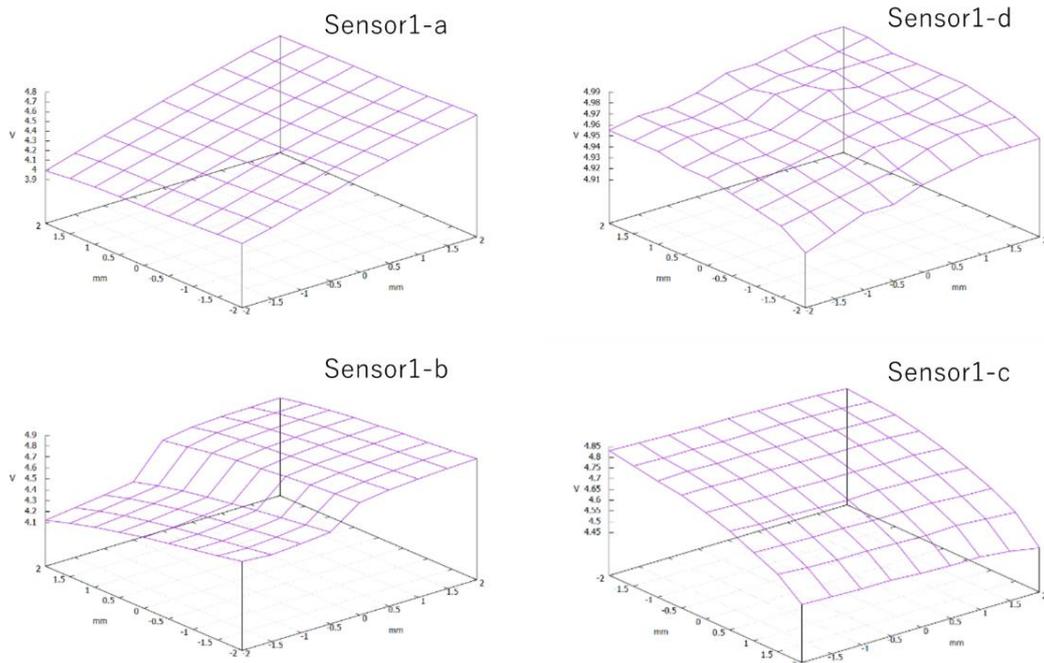


図 14 実験結果 1 : 第 1 層基板センサの出力電圧

Fig.14 Experimental results 1 : 1st layer substrate

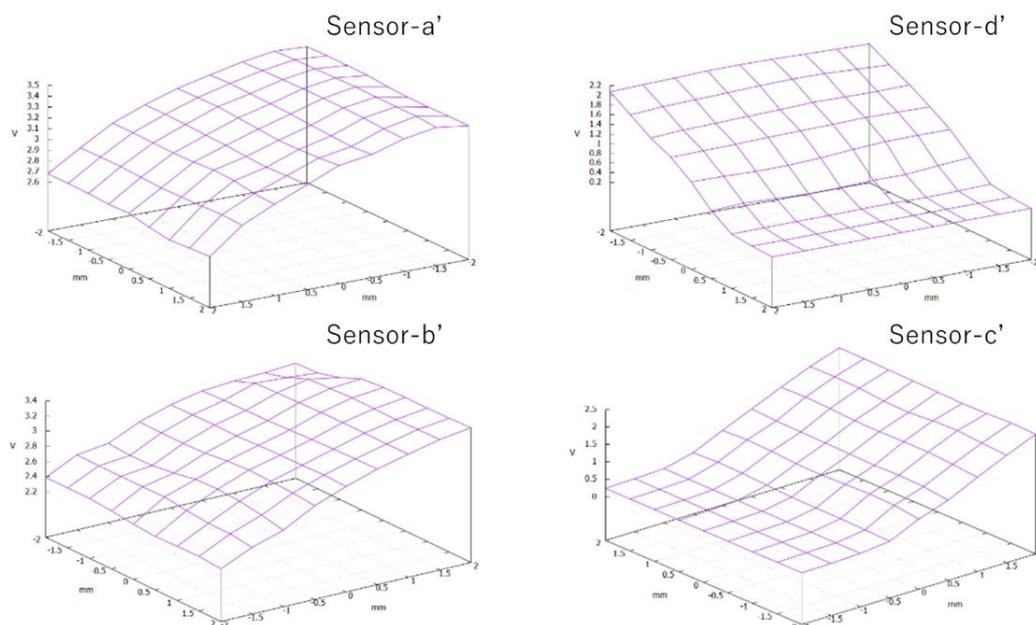


図 15 実験結果 2 : 第 2 層基板センサの出力電圧

Fig.15 Experimental results 2 : 2nd layer substrate

4. アプリケーションの開発

透明柔軟樹脂の変形状態をアニメーションで確認できる機能及び、フォトフレクタ各々の電圧値及び、樹脂部の 3 軸移動距離データを収集する機能を持ったアプリケーションの開発を行った。アプリケーションはプログラム環境開発の Processing を用いて作成している。Processing と Arduino でシリアル通信を行うことでセンサ値を Processing に表示することを可能にしている。Processing でプログラムを実行することでアプリケーションが起動する。この状態で SHIFT キーを押すことで図 16 の状態になり、黒円の大きさで z 軸方向の押し込みを表示し、赤丸の移動で xy 軸方向の移動を表示している。

4.1 アプリケーションの評価試験

今回は、黒色反射板を使用した樹脂部を装着し、z 軸方向に-1.5mm 押し込み、一辺 3.0mm の正方形と半径-1.5mm の円を描いてアプリケーションの精度評価実験を行った。アプリケーション上では 1 層目の基板部のフォトフレクタ 4 つの値の平均を z 軸座標、2 層目の基板部の x 軸と y 軸の対になっているフォトフレクタ 2 つの値の平均をそれぞれ x 軸、y 軸座標に代入し、表示を行っている。

図 17 に正方形、図 18 に円の評価実験の結果を示す。どちらも z 軸方向に-1.5mm 押し込む前後で、中心(0,0)から約(0.1,-0.2)、(0.3,-0.2)とずれている。また、全体の一辺の長さや半径、移動距離がアプリケーション上では実際の移動距離の約半分になっていることが見られ、実際の移動距離とアプリケーション上での移動距離に誤差があることが明らかとなった。

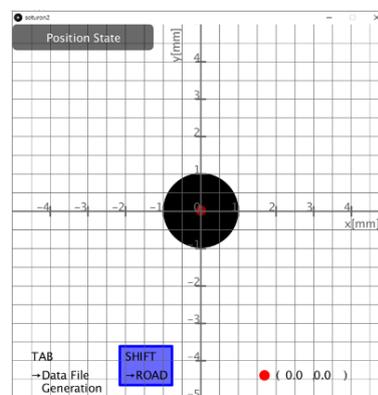


図 16 アプリケーションの概観

Fig.16 Real-time animation screen

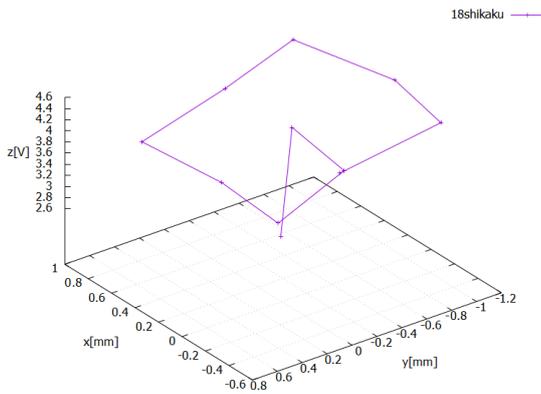


図 17 実験結果 3 : 正方形の変位の提示

Fig.17 Experimental results 3 : square displacement

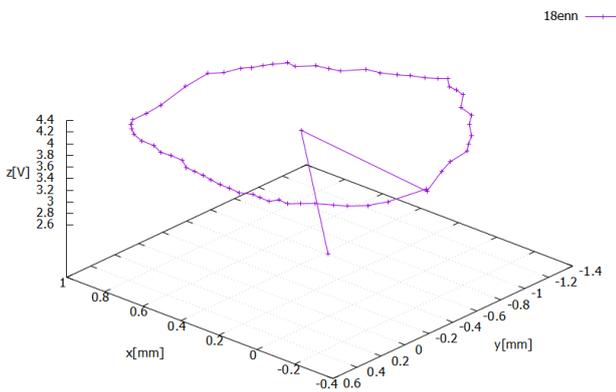


図 18 実験結果 4 : 円形の変位の提示

Fig.18 Experimental results 4 : circular displacement

5. 考察

光学式触覚センサの改良により、性能、精度向上に繋がった。しかし、フォトフレクタからの赤外線量が多いため、測定範囲が狭い問題が残っている。これを解決する案として、赤外線 LED の抵抗値を調整し、樹脂部の二層目のグミーキャストの色を黒色にすることで、樹脂部内の反射光量を減少させることを提案する。これらの提案を採用し、改良、製作を行う。

アプリケーション開発により、光学式触覚センサのリアルタイムアニメーション描画とデータ収集を可能にした。しかし、リアルタイムアニメーション描画は正確ではない。これを解決する案として、データ収集したテキストファイルを読み込んで、指定した行と列に存在する数字を描画させるプログラム

を Processing に用いることで、テキストファイルの数値を参照することができるため、その機能を用いてアルゴリズムを適用することで正確なリアルタイムアニメーション描画を可能にすることができることを考案している。また、光学式触覚センサの個体が異なっても、その個体のデータでキャリブレーションを行えば、同一のプログラムでアプリケーションの正確な動作が可能になるため、この手法が有効性が高いと考えられ、効率化のためにアプリケーションの改良を行う。

6. 結言

本研究では、光学式触覚センサの改良とアプリケーション適用を行ってきた。それによって、光学式触覚センサの性能向上のための改良及び、再度改良点のブラッシュアップ、解決手法の提案を行うことができた。アプリケーション適用でも、センサの 3 軸方向の形状変化の可視化及び、データ収集を可能にした。また、より正確な描画を行うための提案も行っている。

将来展望として、アルゴリズムのブラッシュアップを行い、複数のセンサ状態から xyz の変位と xy 方向に対する回転の 5 つの状態を算出することは理論上可能である。考えられるアルゴリズムとして、連立多項式を解くことでこれらの状態を求めることが可能であると考えられる。もう 1 つのアルゴリズムとして人工神経回路網と機械強化学習を組み合わせるとい手法も考えられる。これらのアプリケーションを活用することでロボットハンドに実装し、ロボットにより精密で柔軟な動作を実現させることが期待できる。

参考文献

- [1] 伍賀正典, 中本裕之, 武縄悟, 貴田恭旭: “磁気抵抗素子とインダクタを用いた磁気式触覚センサ” 日本機械学会論文集 C 偏 Vol.76, No.776 (2010-6), pp.1476-1482.
- [2] 伍賀正典, 中本裕之, 武縄悟, 貴田恭旭: “磁気式触覚センサの小型化と性能評価” 日本機械学会論文集 C 偏 Vol.76, No.772 (2010-12), pp.458-465.
- [3] 伍賀: “これ、プラスチックで作りました「透明で柔らかい樹脂による光学式触覚センサの開発」”, 月刊プラスチック No.2021 年 6

月,(2021),pp.123-127.

- [4] 伍賀正典：“透明柔軟樹脂を用いた光学式触覚センサ”, BIO INDUSTRY, Vol.38, No.6,(2021), pp.24-31.
- [5] 岩崎英丈, 津村稔(ビー・エル・オートテック株)：“6軸力覚センサの原理と応用”<https://www.jstage.jst.go.jp/article/jacc/49/0/49_0_599/_pdf/-char/ja>,(2006), (参照日 2022年4月3日).
- [6] 清水康佑, 金泳佑, 長井力, 大日方五郎：“光学式触覚センサによる物体の形状推定”, 第54回自動制御連合講演会,(2011),pp.1349-1354.
- [7] タッチエンス株式会社：“触覚センサ”, オープンイノベーション推進ポータル | 産学連携 <<https://www.open-innovation-portal.com/corporate/mems.html>>,(2020),(参照日 2022年4月7日).