

インダクタを二次元に配列させた磁気式触覚センサ

青野哲典* 武縄悟**

A Magnetic Type Tactile Sensor with a Two-Dimensional Array of Inductors

Tetsunori AONO* Satoru TAKENAWA**

ABSTRACT

In this paper, a novel tactile sensor is developed and evaluated with a two-fingered hand. One of the features of the developed sensor is that it can not only extract force vectors but also detect the onset of slippage simultaneously. The sensor structure is simple, and the sensor, which is essentially a displacement gauge, consists of two-dimensional array of inductors and elastic body in which a permanent magnet is inserted. In our experiment, a high induction voltage is observed at the onset of slip between the sensor surface and a grasped object, and the dependence of the material and shape of the object are revealed. The contributions of inductors to sensor output are observed experimentally to be in agreement with analytical prediction. Experiment results show that the proposed tactile sensor is useful for three-axis force measurement and slip detection.

Keywords : tactile sensor, robot hand, slip detection, force vector measurement

1. はじめに

ロボットの研究は急速に発展しており、そのなかでロボットハンドの研究もハンドの目的に合わせて種々の原理のものが研究・開発されていると⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾が、その多くは人間の手と比較すると器用さの点で大きく劣っている。その理由の一つとして、人間が視覚や触覚から様々な情報を得ているのに対し、ロボットハンドはそれらの情報を得るために搭載しているセンサの数が少ないことが挙げられる。これは従来のロボットハンドに対しては、あらかじめ定められた対象物を把持し、所定の位置へ移動させる機能のみが求められていたためであり、そのような状況下では少ないセンサでも十分に活動ができた。しかし、人間と同等、もしくはそれ以上に器用に物体把持動作を行うためには、対象物の重量・摩擦係数などの情報が未知の場合でも、対象物を落とさず、かつ壊さないような適切な把持力を設定できる機能を有していなければならない。そのため、ロボットハンドの研究に共通する課題の一つとして、

ハンドが把持する対象物の様々な情報を正確に計測するための触覚センサの開発が挙げられる。

人間が物体を持ち上げ、器用に操ることが可能なのは、人間に力の大きさや表面状態などを知覚するための触覚が備わっているからである。物体を器用に把持するためには、物体から受ける接触力ベクトルを知ること、接触表面に働くすべりをとらえること、この2つが重要である。これまでこれらのセンサは別々のセンサとして開発されていた⁽⁶⁾⁻⁽¹⁴⁾。しかし、それではロボットハンドの構成が複雑化してしまうという問題がある。

そこで我々は、ロボットハンドの指腹部や手のひらに適用が可能で、接触力ベクトルの計測に加えてすべりのような急激な接触状態の変化を検出することができる磁気式の触覚センサを開発した。開発したセンサは、永久磁石と一般の回路素子として知られているインダクタを検出素子として用いているパッシブ型の触覚センサである。このため、すべり発生の瞬間に大きな出力電圧が取り出せる特徴を有している。

本研究では、開発した触覚センサの特性を調べるた

* 筑波大学 システム情報工学研究科 知能機能システム専攻

** 機械工学科 准教授

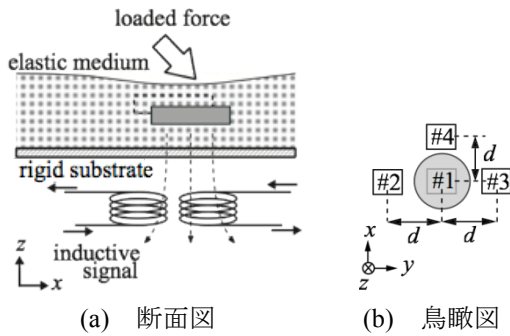


図1 開発した触覚センサ

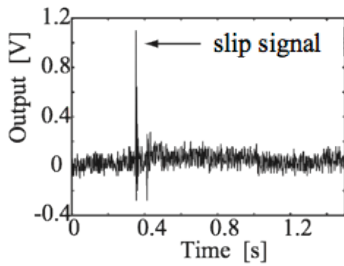


図2 すべり信号

めのプラットホームとして、ロボットハンドを製作した。このロボットハンドに開発した触覚センサを搭載し、すべり検出性能の評価と接触力ベクトルの計測機能の評価を行った。さらに、センサからの出力信号を用いた把持力制御実験を行った。開発した触覚センサからの出力信号は、すべり発生時を除いては微小であるため、信号増幅回路、およびノイズとオフセットを除去するためのフィルタを組み込んだ信号処理回路の製作も行い、それぞれのフィルタの効果を検証した。本稿ではそれらの結果について報告する。

2. 触覚センサの原理

開発した触覚センサの構造を図1に示す。センサは永久磁石が埋め込まれた弾性体と、パッシブ素子として電子回路に用いられるインダクタを複数配列した基板で構成されている。人間に例えると、弾性体が皮膚、インダクタが神経の部分に相当する。図1(a)に示すように、外部から加わる力により弾性体が変形すると、インダクタに対する磁石の位置も変化する。インダクタには、単位時間あたりの磁束密度の変化量に比例した誘導電圧が発生するため、これを用いてすべりの検出や接触力ベクトルの計測を行う。図1(b)は触覚センサを上から見た図である。#1～#4はインダクタであり、永久磁石との位置関係を示している。

インダクタ表面における磁束密度の垂直成分を B_z とすると、インダクタに発生する誘導電圧 V_{out} から B_z を以下の式で計算できる。 N はインダクタの巻き数、 S は断面積である。

$$B_z = \frac{1}{NS} \int V_{out} dt \quad (1)$$

4つのインダクタから B_z を得ることで、磁石の三次元変位量が一意に求まる。各インダクタが検出する B_z をそれぞれ $B_{z1} \sim B_{z4}$ とすると、磁石の変位量 Δx , Δy , Δz は以下の式で表される。この変位量と弾性体の弾性率から、弾性体に加わる接触力ベクトルを計算することができる。ただし、 b_0 と b_1 は弾性体と基板の厚さによって決まる定数である。

$$\Delta y = \frac{-d \cdot \ln(B_{z3}/B_{z2})}{4 \ln(B_{z3}/B_{z1}) - 2 \ln(B_{z3}/B_{z2})} \quad (2)$$

$$b_g = \frac{\ln(B_{z3}/B_{z1})}{2d \cdot \Delta y - d^2} \quad (3)$$

$$\Delta z = \frac{b_g - b_0}{b_1} \quad (4)$$

$$\Delta x = \frac{\ln(B_{z4}/B_{z1})}{2d \cdot b_g} + \frac{d}{2} \quad (5)$$

物体がセンサ表面に接触してせん断力が増大し、接触面ですべりが発生した場合は、磁石が急激に変位する。センサの出力電圧は、式(1)からわかるように磁束密度 B_z の時間微分値に比例する。そのため、磁石の急激な変位が生じると、各インダクタには通常の変位時とは全く異なる図2のようなインパルス状の誘導電圧が発生する。この信号がすべり検出に有効であると考えられるため、本稿ではこの信号をすべり信号と呼ぶこととする。

3. 評価実験用ロボットハンドの製作

開発した触覚センサの有効性を検証するためには、すべり検出性能と接触力ベクトル計測機能を評価する必要がある。定量的な評価を行うためには、単純な動作のもとで実験を行うことが望ましい。そこで、触覚センサの各種評価実験用のプラットホームとして、構成が単純で、動作の自由度が限られたロボットハンドの製作を行った。

図3に製作したロボットハンドの図を示す。ハンド

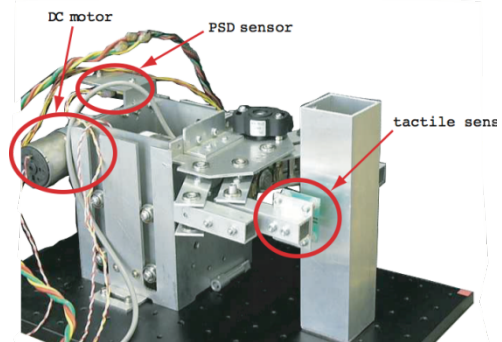


図3 製作したロボットハンド

本体は、触覚センサのマウンタ、フィンガー、アーム、DC モータ、減速装置、光学式ロータリーエンコーダ、可変抵抗器で構成されている。センサマウンタ、フィンガー、およびアームには、非磁性体であるアルミニウムを使用することで、弾性体内の磁石と磁気干渉を起ささないよう配慮している。光学式ロータリーエンコーダと可変抵抗器を用いたフィンガーの位置決め制御により、フィンガーの把持力を制御している。定盤に取り付けた角柱を土台にして、2 個目の DC モータで垂直方向の昇降運動を可能にしている。昇降運動に関するパラメータは、赤外線距離センサ(PSD)によって計測している。開発した触覚センサは、フィンガー先端のセンサマウンタに搭載し、そこで物体を把持する。

4. 信号処理回路の製作

接触力ベクトルの計測を行う際には、触覚センサからの出力信号を適切に処理する必要がある。そこで、信号処理のための回路を新たに製作した。

4.1 回路の構成 開発した触覚センサに用いたインダクタは電子部品用であるため、インダクタンスは $4.7 \mu\text{H}$ と小さく、得られる誘導電圧も微小である。そこで信号を増幅するためにオペアンプを用いた信号増幅回路を製作した。計測可能なオーダーまで信号を増幅するためには、増幅率を 10 万以上にする必要がある。しかし増幅率を大きくすると不要なノイズまで増幅される。そこでこれを除去するためにローパスフィルタ(LPF)を組み込んだ。また、回路に用いたオペアンプは周囲の温度によって変化するオフセットを有している。これを除去するためにハイパスフィルタ(HPF)を組み込んだ。また、回路自体に存在するオフセットを除去するために、オフセットの特性の検証を行った。

製作した信号処理回路を図 4 に示す。触覚センサからの出力信号を Amp1 で増幅する。増幅された信号を LPF に通してノイズを低減させ、Amp2 に入力する。HPF では直流を遮断することで、オフセットの調整およびドリフトの低減を行っている。

4.3 LPF によるノイズの低減 LPF を使用していない触覚センサの出力信号波形と、LPF を用いた触覚センサからの出力信号波形を比較することにより、LPF を用いることでノイズが低減されていることが確認できた。

4.3 HPF によるオフセットの低減 HPF を使用していない触覚センサの出力波形と、HPF を用いた触覚センサからの出力波形を比較することにより、HPF を用いることでオフセットが低減されていることが確認できた。

4.4 ソフトウェアによるオフセットの補償 製作した信号処理回路が有するオフセットを図 5 示す。HPF を構成するコンデンサと抵抗の値を変え、4 種類の異なるカットオフ周波数 f_c で検証を行ったところ、図 5 示すように、どれもほぼ一次的に値が上昇していることがわ

かった。よって、上昇分をソフトウェア上で差し引くことで、オフセットの補償を行うことが可能であると考えられる。このオフセットをソフトウェア上で補償し、補償前と比較したものを図 6 示す。補償を行ったことで、オフセットによる波形の上昇を抑えられたことが確かめられた。

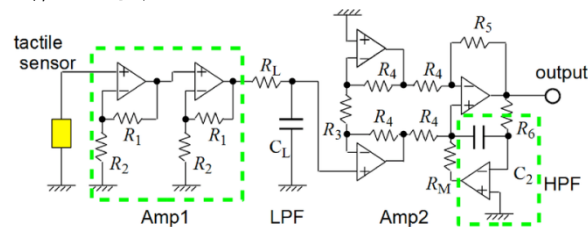


図4 信号処理回路

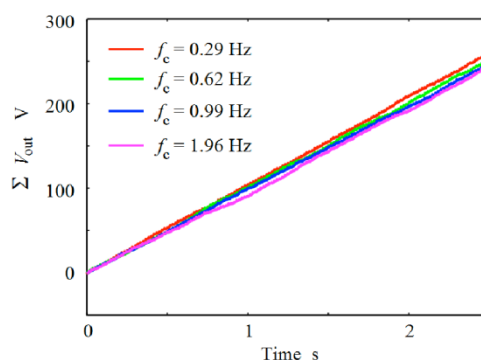


図5 回路の有するオフセット

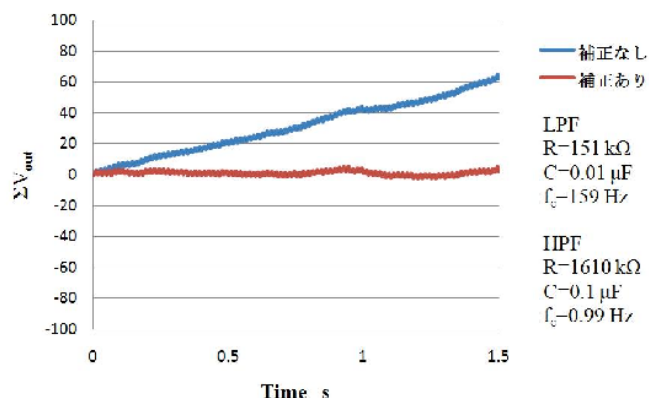


図6 ソフトウェアによるオフセットの補償

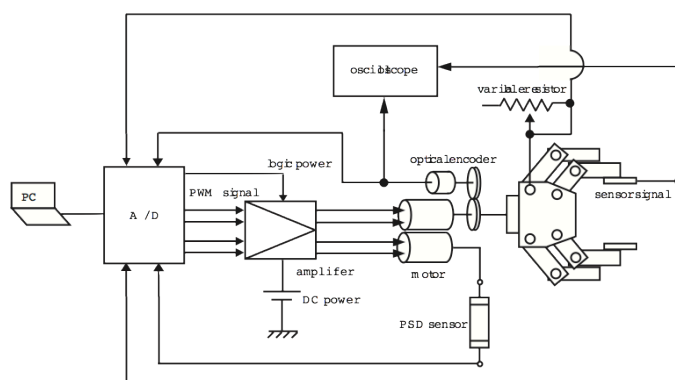


図7 実験装置の構成図

5. すべり検出性能の評価実験

開発した触覚センサのすべり検出性能を評価するために、すべり信号 V_{slip} の測定と、すべり信号を利用した把持力制御実験を行う。

5.1 実験方法 実験装置の構成図を図7示す。本実験では、可変抵抗器と光学式ロータリーエンコーダの出力をPCに取り込み、P制御によりフィンガーの位置制御を行うことで、把持力の制御を実現している。触覚センサからの出力は、リアルタイムですべりの発生を確認するために、PCとオシロスコープに取り込んでいる。

図7のA/D変換器は、ハンドの開閉用と昇降用のモータドライバへ指令値を出力する。それぞれ、ロボットハンドの開閉および昇降のためのモータ用である。また、モータドライバのICに供給するための電源も1系統出力する。ロボットハンドの可変抵抗器とエンコーダの出力とともに、触覚センサの出力も同時に記録するために、PCからA/D変換器を介してオシロスコープへトリガ信号を出力する。A/D変換器の入力には、触覚センサ、可変抵抗器、エンコーダ、赤外距離センサ(PSD)の4出力が取り込まれている。

すべり信号の測定は以下の手順で行う。

- 1) フィンガーの位置決めにより、一定の把持力で容器を把持し、垂直に持ち上げる。
- 2) 容器に水を注ぎ、重量を増やす。
- 3) 物体がすべり落ちる際のセンサからの出力電圧を記録する。

センサが接触する容器側面に様々な材質を貼ることで、材質によるすべり信号の違いを調べる。材質は、アルミニウム、銅、ガラスエポキシ、ポリプロピレン、紙の5種類を用意した。いずれも非磁性体材料であるため、触覚センサと磁気干渉する恐れはない。また、形状によるすべり信号の違いを調べるために、アルミ製の角柱形の容器と円柱形の容器を用意した。

把持力制御実験も同様の手順で行うが、予め信号に適切な閾値を設け、すべり信号がその閾値を越えた際にハンドの把持力を1N強めるという制御を行い、物体をすべり落とさず把持し続けることが可能か調べる。

5.2 実験結果 図8に、各材質および形状で測定したすべり信号 V_{slip} の平均値と標準偏差を示す。実験は各材質および形状ごとに10回ずつ行った。材質を変えて行った実験についてはアルミニウムが一番大きなすべり信号となり、銅が一番小さなすべり信号となった。また、今回実験を行った全ての材質において、0.4Vを超えるすべり信号が得られた。形状を変えて行った実験については、円柱形の容器よりも四角形の容器の方が大きなすべり信号が得られた。

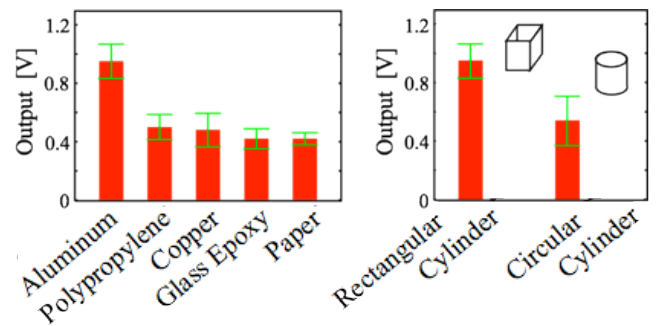
図9に、すべり信号 V_{slip} を利用した把持力制御の実験結果を示す。グラフには、触覚センサの出力信号、ハンドの開閉動作を記録する光学式ロータリーエン

コーダからの出力、そしてPCからのトリガ信号を重ねて表示している。すべりを判別するための閾値は0.5Vとしている。

5.3 考察 図8(a)から、すべり信号の平均値が大きいほど最大値と最小値に幅があることがわかる。これは摩擦が大きい材質ほど大きな出力信号が得られるが、ウレタンゲルと基板との剥離も起きやすくなり、信号のばらつきにつながったと考えられる。

図8(b)からは、角柱形よりも円柱形の容器ほうが信号が小さいことがわかる。円柱形の容器は、角柱形の容器に比べてセンサとの接触面積が少ないために、摩擦力が小さくなり、弾性体および磁石が十分に変位する前にすべりが生じたことが原因と考えられる。

図9から、すべり信号を検出した後、ハンドが動作して把持力を強めていることがわかる。把持力を強めた後も触覚センサの出力電圧はゆっくりとした振動を続けているが、これは二本のフィンガーで把持した際に、接触位置が物体の重心と一致していなかったためと考えられる。すべり信号を検出してからハンドが動き始めるまでの時間は約12.5msであることも読み取れた。すべり信号のパルス幅は約3.8msであり、高い応答性を有していることがわかった。これは開発した触覚センサが、インダクタを用いた微分型であるためである。



(a) 材質 (b) 形状
図8 すべり信号の計測結果

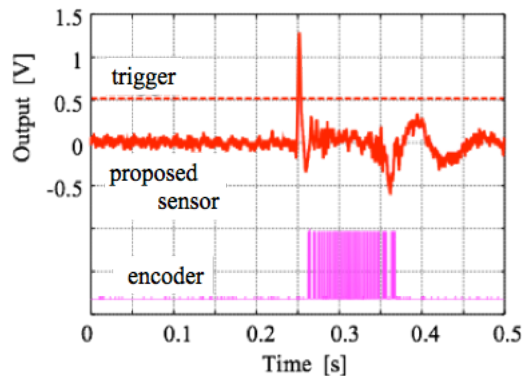


図9 すべり信号とエンコーダの出力

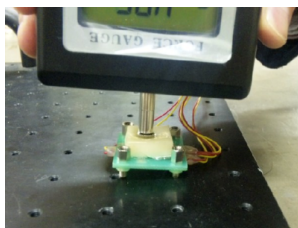


図10 実験の様子

6. 接触力ベクトル計測機能の評価実験

開発したセンサが有するもう一つの機能である、接触力ベクトル計測機能の評価を行う。また、接触力ベクトル計測時において、前章で述べた信号処理回路のフィルタの有効性を確認する。

6.1 実験方法 触覚センサで計測した接触力と、ひずみゲージを用いた引張試験器で計測した接触力を比較することで、開発した触覚センサの接触力ベクトル計測機能の評価する。実験の様子を図10に示す。実験は次の手順で行った。

- 1) 引張試験器を、触覚センサ表面に垂直に押し当てる。
- 2) 触覚センサの出力信号と、引張試験器の出力信号をオシロスコープに取り込む。
- 3) 式(1)~(5)および弾性体の弾性率を用いて触覚センサの出力信号を接触力に変換し、引張試験器の値と比較する。

本実験では、図1(b)に示す#1~#4の各インダクタのうち垂直方向の変化を最も敏感に捉えることのできる#1のインダクタの出力信号のみを記録し、引張試験器の値と比較を行った。さらに、同様の実験をフィルタ無し、LPFのみ、HPFのみ、LPFとHPFの4つの条件で行い、それぞれの出力信号を比較することで、信号処理回路に組み込んだフィルタの有効性を検証した。

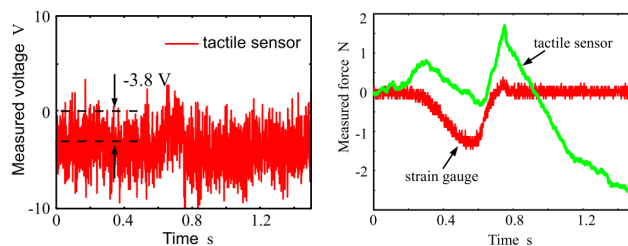
6.2 実験結果 実験結果を図11~図14に示す。各図の左側は触覚センサの出力信号の元波形である。右側はそれを接触力に変換したものと、引張試験器の出力波形を比較したものである。ただし、接触力に変換したものは、後処理としてソフトウェア上でオフセットを除去している。

6.3 考察 図11(a)から、触覚センサの出力信号はオフセットとノイズを多く含んでいることがわかる。そのため、図11(b)に示すように接触力に変換した波形と、引張試験器の波形に大きなずれが生じたと考えられる。一方、各フィルタを実装した図12~図14では、力を加えている間の波形が引張試験器の波形とよく一致している。

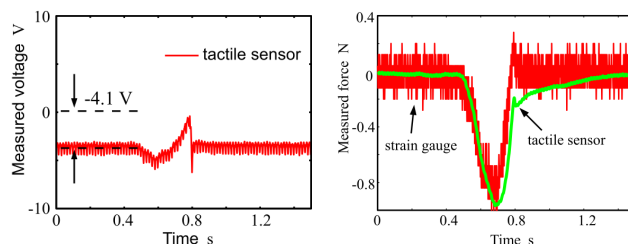
図11(a)と図12(a)を比較すると、LPFによってノイズが低減されていることがわかる。しかしHPFを組み込んでいないため、オフセットの低減は確認できない。接触力に変換後の図12(b)においては、引張試験器の波形とよく一致しているように見える。しかし、前述したように、図12(b)の触覚センサの波形はソ

フトウェア上でオフセットを予め除去したものであるため、実際は時間が経つにつれて引張試験器の波形との差が増大している。よって、LPFのみでは正確な接触力ベクトルの計測には不十分であるといえる。

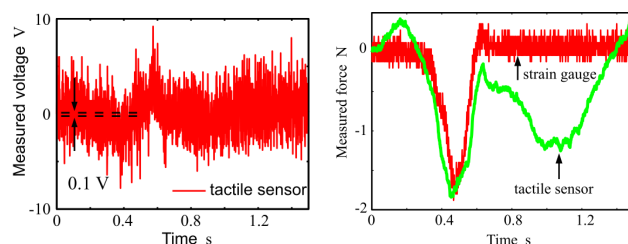
図11(a)と図13(a)を比較すると、HPFによってオフセットが低減されていることがわかる。しかしLPFを組み込んでいないためノイズの低減は見られない。図13(b)も、他の波形と同様にソフトウェア上でオフセットの除去を行ったが、その大きさはLPFのみの時よりも小さかった。これはHPFによってオフセットが大幅に低減させたためであると考えられる。



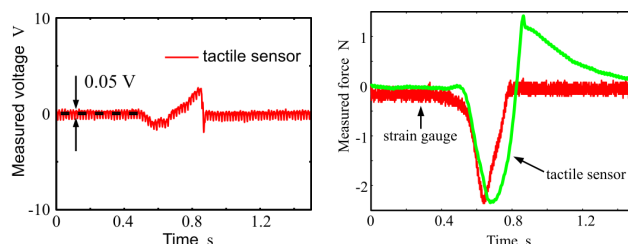
(a) センサの出力信号 (b) センサと荷重計の比較
図11 接触力の計測結果(フィルタ無し)



(a) センサの出力信号 (b) センサと荷重計の比較
図12 接触力の計測結果(LP Fのみ)



(a) センサの出力信号 (b) センサと荷重計の比較
図13 接触力の計測結果(HP Fのみ)



(a) センサの出力信号 (b) センサと荷重計の比較
図14 接触力の計測結果(LP F, HP Fあり)

図1 4は、LPFとHPFの両フィルタを実装した状態で行った実験結果である。力を加えている間は、触覚センサと引張試験器の波形がよく一致しているが、力の解放後に波形の上昇が見られる。これはHPFのみの実験結果である図1 3 (b)にも見られる現象であるが、図1 3 (b)ではオフセットをソフトウェア上で除去しているため、結果的に力の解放後の波形の上昇が抑えられているように見える。この波形の上昇はLPFのみの実験結果である図1 2 (b)では見られないため、HPFに原因があると考えられる。本実験で実装したHPFは一次フィルタであるため、位相特性に直線性がない。そのため波形が歪められ、図1 4 (b)のような力の解放後の波形の上昇に繋がったと考えられる。LPFは、入力周波数が低域の部分では直線性に近い位相特性が見られる。本実験を行った際の触覚センサに対する接触動作が、ちょうどこの低域部分に相当していたため、LPFのみの場合では波形が歪まずに、図1 2 (b)のように波形の上昇が見られなかったものと考えられる。

ノイズとオフセットの両方を低減するためには、LPFとHPFの両フィルタを実装する必要がある。しかし現状の一次のHPFでは非直線性の位相特性によって波形が歪むため、より高次のフィルタを用いることが必要と考えられる。

7. まとめ

本研究で開発した磁気式触覚センサの有効性を検証するために、センサを実装するためのロボットハンドと、増幅回路およびHPFとLPFを含む信号処理回路の製作を行った。比較実験によって、HPFとLPFの有効性が確かめられた。また、製作した回路が有するオフセットをソフトウェア上で除去することか可能であることも確かめられた。

開発した触覚センサのすべり検出性能の特性を評価するために、材質や形状の異なる物体に対して把持実験を行った。今回の実験に用いたすべての材質および形状の物体において、すべり信号が確認できた。また、信号に適切な閾値を設けることで、物体をすべり落とさず把持し続けることが可能であることを確認した。

触力ベクトル計測機能の検証については、フィルタの条件を変えた4つの実験結果を比較することにより、LPF、HPFそれぞれのフィルタの必要性が確かめられた。また、正確な触力ベクトルの計測を行うためには、より高次のHPFを用いる必要があることも確かめられた。

以上、本研究で得られた成果が、ロボットハンドによる器用な物体把持や自由な操りの実現に役立てれば幸いである。

参考文献

- (1) Jan Jockusch, et.al. “A Tactile Sensor System for a Three-Fingered Robot Manipulator”, Proc. of IEEE ICRA, vol.4, pp.3080-3086, 1997.
- (2) 東森充ほか：“二重旋回機構を備えた4本指ロボットハンドの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.24, no.7, pp.813-819, 2006.
- (3) 大嶋律也ほか：“腹腔内組立式3指5自由度ハンド”, 日本ロボット学会誌, vol.26, no.5, pp.453-461, 2008.
- (4) 金子健二ほか：“等身大ヒューマノイド用多指ハンドの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.26, no.1, pp.98-109, 2008.
- (5) 横小路泰義ほか：“ロボットハンドによる折り紙作業”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.106, no.410, pp.113-118, 2006.
- (6) Makoto Shimojo, et.al. “A Flexible high resolution tactile imager with video signal output”, Proc. of IEEE ICRA, vol.1, pp.384-389, 1991.
- (7) 下条誠, 谷保勇樹：“2次元分布荷重中心位置検出触覚センサ-センサ構成パラメータとセンサ特性について-”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, vol.2005, no.2A1-N-107, pp.156, 2005.
- (8) Ryosuke Tajima, et.al. “Development of soft and distributed tactile sensors and the application to a humanoid robot”, Advanced Robotics, vol.16, no.4, pp.381-397, 2002.
- (9) Jae S.Son, et.al. “A Tactile Sensor for Localizing Transient Events in Manipulation”, Proc. of IEEE ICRA, vol.1, pp.471-476, 1994.
- (10) Yoji Yamada, et.al. “Vibrotactile sensor generating impulsive signals for distinguishing only slipping states”, Proc. of IEEE ICRA, vol.2, pp.844-850, 1999.
- (11) 山田陽滋ほか：“ロボットハンドのための指紋を備えた高周波微振動検出式滑り覚センサ”, 計測自動制御学会論文集, vol.36, pp.473-480, 2000.
- (12) Takashi Maeno, et.al. “Control of grasping force by detecting stick/slip distribution at the curved surface of an elastic finger”, Proc. of IEEE ICRA, pp.3896-3901, 2000.
- (13) Hitoshi Maekawa, et.al. “Development of a finger-shaped tactile sensor and its evaluation by active touch”, Proc. of IEEE ICRA, vol.2, pp.1327-1334, 1992.
- (14) 前川仁ほか：“半球面光導波路を用いた指先搭載型触覚センサの開発”, 計測自動制御学会論文集, vol.30, no.5, pp.499-508, 1994.