

MEMS フォースセンサを用いた ソフトフィンガ型触覚デバイスの開発と接触実験

藤井 郁夫 井上 貴浩 Dzung Viet Dao 杉山 進 平井 慎一 (立命館大学)

Development of Soft Fingertip with MEMS Force Sensor and Its Static Contact Experiments

Ikuo Fujii, Takahiro Inoue, Dzung Viet Dao, Susumu Sugiyama, and Shinichi Hirai
Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.,
1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan
E-mail: rr010015@se.ritsume.ac.jp

Abstract—In this paper, we propose a hemispherical soft fingertip with Micro-Force/Moment Sensor(MFMS), which is applicable to object manipulation using a robotic hand. This sensor is fabricated by MEMS technology and designed to detect three components of force (F_z) and moment (M_x, M_y). We explain the sensor's structure, and the detection principle. Finally, we show the availability of the sensor by conducting the compression test for the hemispherical soft fingertip.

Key Words: Micro-Force/Moment Sensor , Soft Fingertip , Manipulation

1. はじめに

従来のロボットハンドの多くは剛体指を用いている。これは、剛体指の場合、物体に対して点接触が生じ、対象物の位置、姿勢などの情報が得やすく位置制御が容易になるためである。しかし、人間のような安定した物体の把持、操作を実現するためには、指先は剛体ではなく物体に対して面接触が生じる柔軟物であることが好ましい。このように、形状の変形により位置情報検出が困難なソフトフィンガを有するロボットハンドを制御するためには、指先の力覚情報は最も重要な情報の一つと考えられる。このような指先の力覚情報を得る手段としては、柔軟指内部に力センサを直接埋め込む方法が考えられるが、従来の歪ゲージなどを利用したのでは指先形状の大型化、複雑化などの問題が発生する。多田ら [1] はセンサ素子として内部に多数の PVD フイルムと歪ゲージを埋め込んだ柔軟指を開発し、指先部分に高いセンシング能力を実現している。しかし、この方法ではセンサ素子の配置が一様でないため、再現性が低く、指ごとにキャリブレーションを行う必要がある。

本稿では、指先のセンシングの手段として、MEMS 技術で製作されたマイクロフォース・モーメントセンサ [2] (以下 MFMS) を用いる。このセンサは、超小型 ($3 \times 3 \text{mm}^2$) で 3 軸の力とモーメント (F_z, M_x, M_y) が検出可能で、これらにより単独で指先の微小な押し込み量や接触方向を検出することが可能である。本稿では、MFMS を埋め込んだ半球型ソフトフィンガの接触実験を行い、内部の力とモーメントを計測し、本ソフトフィンガの高いセンシング能力を示す。

2. ソフトフィンガの構造・検出原理

MFMS 内蔵半球型ソフトフィンガの構造を Fig.1 に示す。ソフトフィンガはセンサチップ、チップ用ベース、力伝達用ピラー、半球型ポリウレタンゴム (指先・接触部)、ハウジング部 (配線付きベース、カバー) で構成

されている。物体の保持や接触によって半球型ゴムに力やモーメントが加わると、これらの負荷はゴムの変形と共にピラーに伝達され、さらにピラーと一体化したセンサチップまで伝えられる。これらの負荷をセンサチップがセンシングすることで、本センサは力とモーメントを知覚する。今回用いた半球の直径は 8.2mm、ピラーの長さ 1.5mm、断面積 $0.54 \times 0.54 \text{mm}^2$ である。次に、今回用いたセンサチップとソフトフィンガを Fig.2 に示す。本センサは、検出素子として p 型の Si 拡散ピエゾ抵抗素子を用いており、それらがクロスビーム型の各ビーム上に配置されている。そして、上記のようにセンサに加わった負荷がピラーに伝達されると、ピラーと一体化したビーム部が歪むことにより、各ピエゾ抵抗素子の抵抗値が変化する。さらにこの抵抗値の変化は、ブリッジ回路を構成することによって電位差として出力される。Table1 に入力電圧が 5V の場合のセンサチップ各要素 (M_x, M_y, F_z) の感度 [2] を示す。

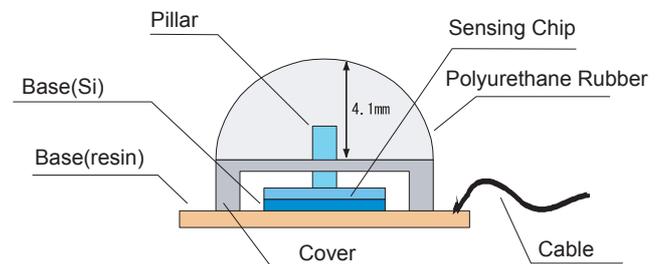
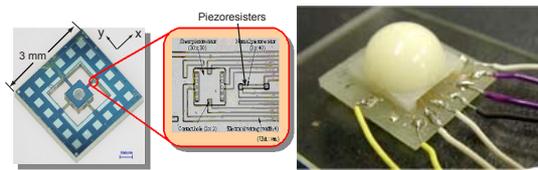


Fig.1 Structure of soft fingertip



(a) sensing chip (b) soft fingertip

Fig.2 Sensing device

Table 1 Sensitivity of a sensing chip

Load	Sensitivity
My	3.08mV/ μ Nm
Mx	4.00mV/ μ Nm
Fz	1.32mV/mN

3. 実験

3.1 実験方法

前章に示した MFMS 内蔵半球型ソフトフィンガの接触実験を行った。実験に用いた圧縮試験機を Fig.3 に示す。この試験機を用いて、半球型ソフトフィンガへ垂直方向に 50mN ごと 500mN までの荷重を印加していき、各荷重における出力電圧を計測した。試験機の下部にロードセルを設置し、半球を圧縮すると同時に半球下面全体に加わる力 (以下 Total Force) が計測できる。ソフトフィンガに加える 50mN から 500mN までの荷重は、この Total Force のことを示す。また、今回は、センサの出力特性を正確に計測するために一定の荷重までの出力電圧を一度に検出するのではなく、所定の荷重ごとの出力電圧結果を取得する動作を繰り返す静的な実験を行った。まず、接触角 0, 10, 20deg での接触実験を行い、各荷重における F_z 出力電圧を計測した。次に、Table1 に示したセンサの感度から、各接触角における半球の最大変形量 (deformation) とセンサ単体の垂直方向へ加わる力 (以下 F_z) の関係を求めた。次に、接触角 10 deg, 20 deg での接触実験を行い M_x の出力電圧を計測し、同様にセンサの感度から、各接触角における半球の最大変形量とセンサ単体へ加わるモーメント (以下 M_x) を求めた。これらの実験結果から MFMS 内蔵半球型ソフトフィンガのセンシング能力を検証する。また今回の実験ではセンサへの入力電圧は 1.5 V とした。

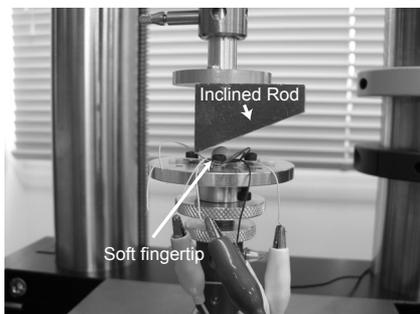
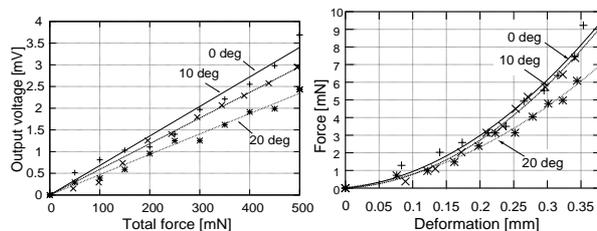
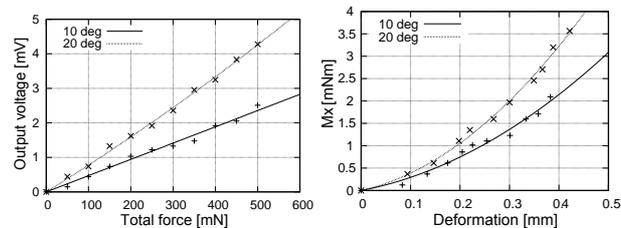


Fig.3 Experimental setup



(a) output voltage (b) force by sensor

Fig.4 Results of F_z at 0 deg



(a) output voltage (b) moment by sensor

Fig.5 Results of M_x at 10 and 20 deg

3.2 実験結果

Fig.4-(a) に接触角 0, 10, 20deg の Total Force と F_z の出力電圧の関係を示す。出力電圧はピラーを通してセンサに加わる力 F_z に相当する。各荷重で 2 回ずつ実験を行い、平均値をプロットした。この結果を最小 2 乗法を用いて、平均 14.5 % の誤差を持つ線形に近似できた。このグラフではゴムの変位は用いず、静的な接触時の出力電圧と荷重の関係を示しているためゴム自身が持つ特性に影響はないため、今回の実験結果に線形性が得られたと考える。次に接触角 0, 10, 20deg における出力電圧を比較すると、接触角が大きくなると出力電圧が小さくなっていることが分かる。このことから、垂直方向からの静的な接触において、半球下面全体に加わる力が同じでも、接触角によって F_z が異なることが分かる。これは接触角を大きくすると、弾性力が横方向へ分散し垂直方向へ伝わる力が小さくなっているためと考えられる。これらの結果から F_z の出力電圧を用いて 50 m N ごとの荷重の変化、10 deg 刻みの接触角の変化を正確に検出できていることが確認できた。また、今回の印加荷重と出力電圧の関係では、荷重の大きさや試験回数も変化しても変わることなく、常に線形性が保持された。このことから F_z を安定して計測できていることが分かる。

次に、Fig.4-(b) に半球の最大変形量 (deformation) と F_z の関係を示す。 F_z は、Fig.4-(a) に示す出力電圧から、Table1 示すセンサチップの感度を用いて導出した。この結果に対して 2 次近似を行い図示している。ここでは、半球の最大変形量が大きくなるほど、 F_z を示す曲線の傾きは大きくなった。これはゴムの変形特性の影響を受けたためと考えられ、結果として妥当である。また、Fig.4 と同様に接触角が大きくなると F_z は小さくなっている。これは半球の最大変形量が同じでも、接触する角度によって弾性力が横方向に分散するため垂直方向に加わる力が減少するためと考えることができる。この結果から、約 0.05m 間隔の非常に微小なソフトフィンガの変形、10 deg 刻みの接触角の変化を F_z に

より検出できていることが確認できた。

次に, Fig.5-(a) に接触角 10 deg, 20 deg の場合の Total force と M_z の出力電圧の関係を示す。Fig.4 と同様に各荷重で 2 回ずつ実験を行い, 平均値をプロットした。この結果を最小 2 乗法を用いて, 平均で 7.2 % の誤差を持つ線形に近似することができた。この結果から, 半球下面全体に加えた荷重と半球内部に発生する回転モーメントが比例の関係を持っていることが分かった。また, 10 deg より 20 deg の接触において, より大きい出力電圧が検出できた。このことから半球下面全体に加わる力が同じでも接触角が大きくなると発生するモーメントが大きくなることが分かる。これは F_z の場合と同様に接触角が大きくなると, 垂直方向への弾性力が減少, 横方向への弾性力が增大して内部で発生するモーメントが大きくなったためと考えることができる。これらの結果から本ソフトフィンガの M_x の出力電圧結果から 50 mN ごとの荷重の変化や 10 deg 刻みの接触角の変化を正確に検出できていることが確認できた。また, 荷重の大きさや試験回数が変化しても, 線形性を維持した。このことから, M_x を安定に計測できていることが分かる。

次に, Fig.5-(b) に半球の最大変形量と M_x との関係を示す。 M_x は Fig.5-(a) に示す出力電圧から, Table1 に示すセンサチップの感度を用いて導出した。各計測値における半球の最大変形量と M_x をプロットして 2 次近似を行った。ここでは, 半球の最大変形量が大きくなるほど M_x 曲線の傾きは大きくなった。これはゴムの変形特性の影響を受け, 横方向への弾性力が半球の変形と共に増大したためと考えられ, 結果として妥当である。また, 10 deg より 20 deg での接触において, M_x は大きい値を検出した。接触角が大きい方が発生するモーメントは大きくなると考えられるため, この結果は妥当であると言える。これらの結果から, 約 0.05mm の非常に微小なソフトフィンガの変形, 10 deg 刻みの接触角の変化を M_x により検出できていることが確認できた。

4. おわりに

本稿では, 柔軟指の力覚を検出する素子として, 9 mm² のマイクロフォース・モーメントセンサ内蔵型半球型ソフトフィンガの接触実験を行いそのセンシング能力を確認した。50mN ごとに荷重を印加したところ, F_z , M_x とともに印加荷重と出力電圧の間にばらつきのない線形性を得ることができた。この線形性は荷重の大きさや試験回数が変化しても維持でき, 本センサが安定して計測できていることが分かる。また, 50mN ずつの荷重の変化や 10 deg ずつの接触角の変位量を F_z , M_x の出力電圧として正確に検出することが出来ていた。さらに半球の最大変形量と F_z , M_x との関係では接触角と同時に 0.05mm 以下の微小な変位量も精密に検出することができた。このことから MFMS 内蔵ソフトフィンガの高いセンシング能力が確認できた。これらの精密なセンシング能力があれば指先の微小な押し込み量や接触方向を検出することが可能であると考えられる。今後は, 動的な接触実験を行っていく。また, 有限要素法による指先内部の力学解析の結果との比較を行いセンサの有効性を確認していく。その後, ロボットハンドに今回のソフトフィンガを装着し, 物体の把持, 操作時の指先の力覚情報を用いたハンドリングの制御を実現したい。

参考文献

- [1] 多田泰徳, 細田耕, 浅田稔: "内部に触覚受容器を持つ人間型柔軟指", 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.4, pp.482-487, 2005.
- [2] Dzung Viet Dao: "Study on Silicon Piezoresistive Six-Degree of Freedom Micro Force-Moment Sensors and Application to Fluid Mechanics", *Doctoral thesis in Ritsumeikan University*, 2003.
- [3] T.Inoue and S.Hirai: "Local Minimum of Elastic Potential Energy on Hemispherical Soft Fingertip", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2319-2324, 2005.
- [4] 井上, 平井: "ロボットハンドによる物体操作のための半球型柔軟指の静的弾性モデル", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, No.715, pp.872-878, 2006.