

マイクロフォース・モーメントセンサを内蔵した ソフトフィンガの静的接触実験

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

Static Contact Experiments of Hemispherical Soft Fingertip subsuming Micro-Force/Moment Sensor

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.ritsumei.ac.jp

Abstract— In this paper, we propose a hemispherical soft fingertip subsuming micro-force/moment sensor, which is applicable to object manipulation using a robotic hand. This sensor is fabricated by using MEMS technology and designed to independently detect three components of force (F_z) and moment (M_x, M_y). First, we explain the high performance of the sensor, its structure, and the detection principle. Second, we shortly describe our proposed theoretical contact model of the soft fingertip. Finally, we address the availability of the sensor by conducting the compression test for the hemispherical soft fingertip.

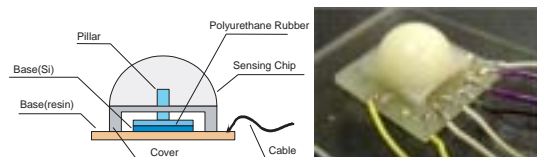
Key Words: Micro-Force/Moment Sensor, Soft Fingertip, Manipulation

1. はじめに

ロボットハンドによる物体操作に関する研究は、近年様々な手法により行われている。安定して物体を把持するためには、指先は剛体ではなく人間のように柔らかい物質であることが好ましい。また、物体の把持・操作において指先の力覚は、最も重要な情報の一つと考えられ、特に柔軟指においては指先のセンシング能力が重要である。

本稿では、指先のセンシングの手段として、柔軟指に直接力覚センサを埋め込む方法を用いる。これは、直接力覚センサを埋め込むことによって、視覚などを用いて間接的にセンシングを行うのに比べて精度の高いセンシングが可能であると考えたためである。柔軟指に埋め込むセンサとして新たにMEMS技術をにより製作されたマイクロフォース・モーメントセンサ¹⁾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、これらにより指先の押し込み量や接触方向を検出することが可能である。

このセンサを半球型柔軟指に埋め込んだ触覚デバイスを用いて接触実験を行い、半球型ソフトフィンガに加わる力とモーメントを計測する。さらに、この結果について指先の押し込み量 F_z を柔軟指の接触変形モデル²⁾と比較することにより、触覚デバイスの有用性を確認する。



(a) structure

(b) phototype

Fig.1 Tactile device

2. センサの構造と検出原理

触覚デバイスを Fig.1 に示す。本センサは、センサチップ、チップ用ベース、力伝達用ピラー、直径 8.2mm の半球型ポリ

ウレタンゴム、ハウジング部で形成されている。物体の接触によって半球型ポリウレタン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、さらにピラーを通して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。

次に、センサに用いたセンサチップを Fig.2 に示す。本センサは、検出素子として p 型の Si 拡散ビ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このビーム部が歪むことにより、各ビ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¹⁾を示す。

Table 1 Sensitivity of a sensing chip

Load	Sensitivity
M_y	3.08mV/ μNm
M_x	4.00mV/ μNm
F_z	1.32mV/mN

3. 実験

3.1 実験方法

前章に示した、マイクロフォース・モーメントセンサを埋め込んだ半球型触覚デバイスを用いて、接触実験を行った。実験の様子を Fig.3 に示す。圧縮試験機を用いて、半球に対して垂直方向に 50mN ごと 500mN まで静的に荷重を加えて出力電圧を計測する。試験機の下部にロードセルが設置されていて、そこから半球全体に加わる力 (Total Force) が計測できる。まず、半球全体に加わる力と出力電圧の関係を示す。次に、出力電圧とセンサの感度から、センサ単体の垂直方向へ加わる力 F_z を求めた。また、接触部の角度を 0 deg とした。

さらに、本実験の結果を接触変形モデルと比較した。次に、接触部の角度が 10 deg, 20 deg での実験を同様に行い、各角度における M_x の出力電圧を計測し、出力電圧とセンサの感度から、接触によりセンサ単体のへ加わるモーメント M_x を計測する。今回は全ての実験においてセンサへの入力電圧は 1.5 V とした。

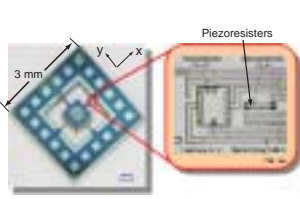


Fig.2 Sensing chip

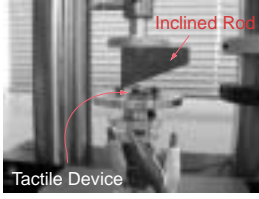


Fig.3 Experimental setup

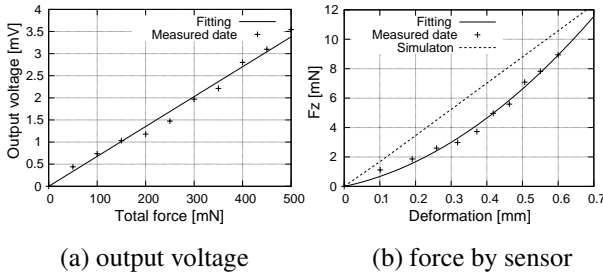


Fig.4 Results of F_z at 0 deg

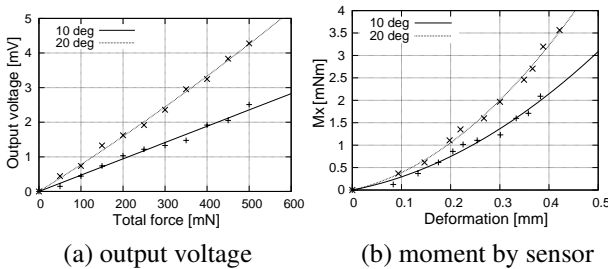


Fig.5 Results of M_x at 10 and 20 deg

3.2 接触変形モデル

本稿では、筆者らが提案している半球型柔軟指の接触弾性モデル^{2,3)}と比較検討を行う。本弾性力モデルは以下の式で表せる。

$$F = \frac{\pi E d^2}{\cos \theta_{obj}} \quad (1)$$

上式において指先の最大変位量を d 、柔軟材料のヤング率を E 、対象物との接触角を θ_p とする。比較のために、(1) 式の弾性力式を指先内部のピラーに加わる力に変換するが、その導出過程は省略する。

3.3 実験結果

Fig.4-(a) では、接触角度が 0 deg の場合の半球全体に加えた各荷重と 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。この結果を最小 2 乗法を用いて線形近似すると、図のような結果が得られた。また、この結果は荷重の大きさや試験回数が増え変化しても変わらず、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。

さらに、Fig.4-(b) に半球の変形量と F_z の関係を示す。センサに加わる力は、Fig.4-(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。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、半球の変形が大きくなるほど、 F_z を示す曲線の傾きは大きくなった。これは半球の変形特性²⁾の影響を受けたためと考えられ、結果として妥当である。

さらに、同じく Fig.4-(b) に実験結果と接触変形モデル (1) 式との比較を示す。本モデルは指先全体での弾性力に相当するため、この比較においてセンサピラーの断面積に加わる荷重値に変換している。また、一般的にエラストマー材料のヤング率は非線形性を示すが、本稿では簡単のためにヤング率一定とし、圧縮実験によって得た $E=0.25$ MPa を採用した。結果において、最大で約 40% の誤差を生じているが、この原因は本モデルの導出にあたってエラストマー材料の非圧縮性を考慮していないためである。つまり、指先が圧縮されることによって、その体積を一定に保ちながら横方向へも変形し、弾性力が横方向に分散するために実験値の方が小さい値となっている。この問題は、指先弾性モデルに非圧縮性を含めることで解決される。

次に、Fig.5-(a) では、接触部の角度が 10 deg, 20 deg の場合の半球全体に加えた圧縮試験機より計測した Total force と M_z のセンサ出力電圧の関係を示す。同様に、各出力電圧値を最小 2 乗法を用いて線形近似を行った。この結果においても、荷重の大きさや試験回数が増え変化しても、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。また、10 deg より 20 deg の接触において、出力電圧が大きいことが分かる。接触部の角度が大きくなるほど、それによって与えられるモーメントも大きくなると考えられるので、これは妥当な結果と言える。

次に、Fig.5-(b) に半球の変形量と 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変形量と M_x をプロットして 2 次近似を行った。半球の変形が大きくなるほど M_x 曲線の傾きは大きくなることが分かった。また、10 deg より 20 deg での接触において、 M_x は増大している。この点においても、以上の結果が妥当であると言える。

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・モーメントセンサを半球型ソフトフィンガに埋め込んだ触覚デバイスを用いて接触実験を行い、センサ部に加わる力とモーメントが安定して検出できることを確認した。一方で、実験結果を接触弾性モデルと比較した大きな誤差が生じた。この問題は、上記したようにすでに提案している接触弾性モデルにエラストマー材料の非圧縮性を導入することで解消される。また、本稿でマイクロセンサを用いて新しく得られたソフトフィンガの接触変形により生じるモーメントの計測値を基に、今後は、柔軟な指先内部でのモーメントモデルを導出し、センサが検出したモーメントとの比較を検討していきたい。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 井上, 平井: "半球型柔軟指の変形に伴う弾性ポテンシャルエネルギーを用いた準静的操り", 日本ロボット学会講演会予稿集, 3C15, 2005.