



# 安定把持を実現するための テレロボット用マイクロフォースプレートの開発

Development of a Micro Force Plate for Stable Grasping in Tele-robots

柚 空翔<sup>1)</sup>, 街道 一翔<sup>1)</sup>, 安藤 潤人<sup>1)</sup> 野間 春生<sup>1)</sup>

Tsubasa YUNOKI, Kazushi KAIDO, Mitsuhiro ANDO, and Haruo NOMA

1) 立命館大学 情報理工学研究科 (〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150, ise26@st.ritsumei.ac.jp)

**概要：**人は物体を把持する際に、指先の接触面で感じる力覚から多くの情報を得ることで器用に対象を持ち上げている。ロボットにも同様の感覚を与えることを目指し、ハンドの指先に取り付け可能で 3 軸の力が計測可能な機器として、4 つの超小型 MEMS 触覚センサで構成した 10mm×9mm のマイクロフォースプレートを開発した。これにより、接触面に加わる圧力や剪断力、回転モーメントの計測精度を評価し、テレロボットにおける安定把持への発展性を確認した。

**キーワード：**触覚, フォースプレート, テレロボット

## 1. はじめに

人は物体を把持する際、最初に視覚で対象物を捉え、指先の触覚で安定した把持を実現している。まず見た目に対象物の形状を認識し重心を推定する。そして、重心付近を把持し、接触点に作用する回転モーメントの総和が 0 となるように、指先の位置や加える力を調整している。さらに、対象物の性質に応じて優しく把持したり、力のかけ方や接触の仕方を変えたりすることが可能であり、これによって安定した把持が実現されている。このように把持動作は、視覚情報に加えて、指先の触覚情報に基づいて行われている。

一方で人のような触覚センシング機構を持たないテレロボットにおいては、操作者は視覚情報のみに依存した操作を行うことになる。その結果、安定した把持を行うことが難しくなる。テレロボットで安定した物体把持を実現するためには、ロボットに人と同じような触覚を付与し、それを人に伝える必要がある。そのためには、ロボットの指先に取り付け可能なサイズであり、かつ人の触覚のように圧力や剪断力、回転モーメントを計測可能なセンサが必要である。本研究では、これらの要件を満たす計測機器を開発し、テレロボットに人のような触覚を与える。

## 2. 関連研究

テレロボット技術における触覚フィードバックは、遠隔操作の精度を大幅に向上させる重要な要素である。これまでの手術用ロボット[1]は触覚センサが搭載されておらず、

医者が手術を行う際に力加減を厳密に把握できない問題があったが、2025 年になって力覚センサを搭載した手術用ロボットが登場し、力覚フィードバック可能なロボット手術が可能となった。他にもテレロボットに圧力センサを搭載してフィードバックすることで遠隔操作の向上を図る研究が行われている[2]。しかしながら、これらの取り組みでは回転モーメントを計測できず、把持状態を触覚情報から取得するのが困難である。

そこで我々はテレロボットに触覚フィードバック機能を付与するために、先行研究[3,4]では、マイクロフォースプレートを開発してきた。指先サイズの 1 cm 角の大きさで実現した。しかしながら、せん断荷重が加わったときの接触点や回転モーメントの精度に課題があった。本研究ではセンサ接合部の構造を改良し、先行研究での課題を解決した。

## 3. 提案手法

超小型の MEMS 触覚センサ[5]を利用したマイクロフォースプレートを開発した。図 1 に開発したマイクロフォースプレートの写真を示す。この MEMS 触覚センサは 3 軸荷重が計測可能なセンサである。図 2(a)に先行研究[3][4]のフォースプレートの構造(従来型)、図 2(b)に本研究で開発したフォースプレート(新型)の構造を示す。図 2(a)では、プレートに空けた穴に MEMS 触覚センサの検知部の頂部をはめ込み、簡易に固定する手法で構成されていた。提案手法の図 2(b)では、MEMS 触覚センサの検知部とプレート

部分を改良した。図3に本研究で開発した MEMS 触覚センサとレセプターを示す。従来の MEMS 触覚センサでは、半球型の検知部であったが、本研究で開発した MEMS 触覚センサでは円柱型の検知部を実装した。またプレートには MEMS 触覚センサの検知部が差し込めるようなシリコン製のレセプターを作製した。これらを組み合わせて、MEMS 触覚センサとプレートが一体となるような構造を実装した。

#### 4. 重心計測と回転モーメントの精度検証

提案手法の改良構造の効果を示すために、新型フォースプレート上をなぞったときの接触点の推定と、テレロボット用のマイクロフォースプレートをを用いて接触点と回転モーメントの推定の検証をした。

##### 4.1 摩擦力印加時の接触位置の検証

従来型の構造では、プレートを指でなぞった際の推定接触位置の誤差が大きかった。従来型と新型での検証結果を図4に示す。赤線は実際に指でなぞった軌跡、青線は取得したなぞりの軌跡である。ここでは検証用に、なぞり動作を行うことが可能な大きさとして 15cm 角のフォースプレートを使用した。プレート中央の下部から上部を指で1往復なぞる試行を実施した。プレート上に定規を設置し、定規に沿ってなぞる動作を従来型と新型の双方で実施し、取得

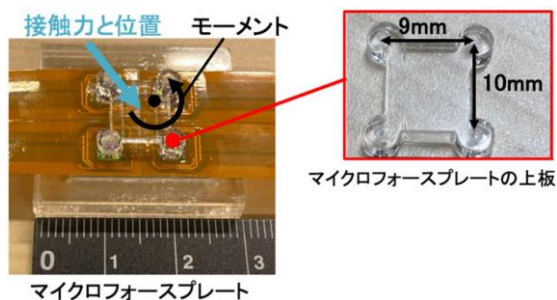


図1: 開発したマイクロフォースプレート

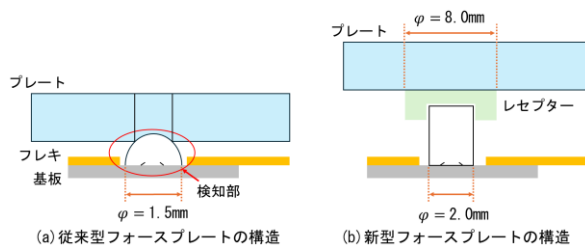


図2: 触覚センサとプレートの接合手法

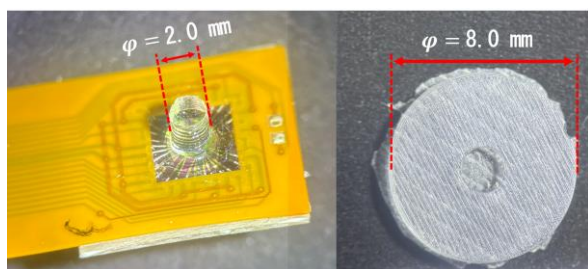


図3: 開発した MEMS 触覚センサ(左)とシリコン製のレセプター(右)

した接触位置の軌跡を確認した。従来型では平均誤差が 1.41 cm であった。この原因について、プレートに摩擦力が加わった際にセンサ接合部がズレてしまっていたことで低い精度になっていた。新型では平均誤差が 0.71 cm であり、従来型に比べて往路と復路の幅が狭まっている。その他の条件でなぞった際の結果を図5に示す。指の他に、上部プレートに紙を敷いて指でなぞったものと上部プレートを消しゴムでなぞったものがある。これら全てにおいて、従来型に比べて新型の平均誤差は約半分ほどにまで低下している。これより、本研究で開発したフォースプレートによって、従来型の課題を大きく緩和できた。

##### 4.2 重心推定位置と回転モーメントの検証

1cm 角のマイクロフォースプレートでも同様の構造を作製した。接触位置(重心位置)と回転モーメントの検証結果について述べる。まず、重心位置の検証について説明する。プレート上の9点をそれぞれ竹串の先端で垂直に押しつけ、そのときの重心位置を取得した。図6にその結果を示す。黒点は実際に押したプレート面上の位置、赤のバツ印は各点における重心位置の平均位置、緑色の円は誤差楕円を表している。平均推定誤差は 0.54 mm、最大推定誤差は 0.87 mm であった。図6の結果より、オフセットの誤差が出ていると考えた。これは、センサの設置位置に微細なズレがあった点や改良したセンサに対する最適な校正手法が取れていなかった点が原因である可能性が高い。

次に回転モーメントの検証について述べる。マイクロフォースプレートの中央にロードセル(ミネアミツミ、MMS101)を取り付けて一体化し、両者を指で回転させるこ

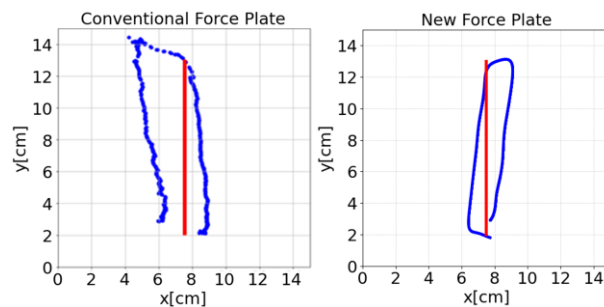


図4: プレート上を指でなぞった際の軌跡

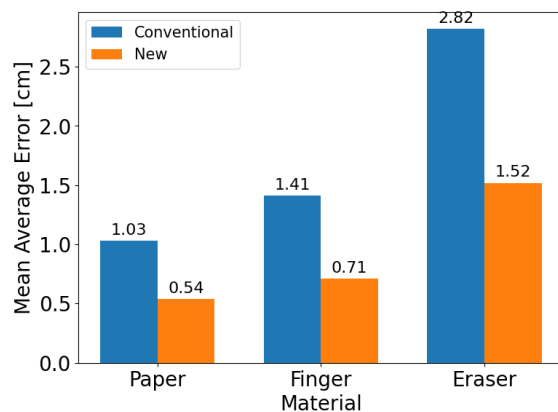


図5: 3種類の条件での平均誤差の比較

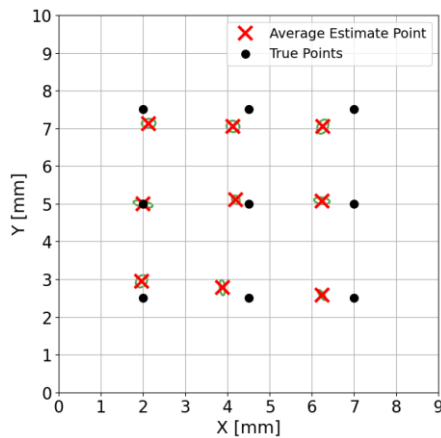


図 6: 重心推定位置の検証結果

とでモーメントを発生させた。ここでは一体化した両者を時計回り、反時計回りの回転を 2 秒間ごとに交互に回転させた。このときにロードセルの計測値とマイクロフォースプレートで推定される回転モーメントを比較した。その結果を図 7 に示す。ロードセルの出力に対して、フォースプレートの出力が微細なズレはあるものの、しっかりと追従できている。また RMS は  $2.01 \text{ N}\cdot\text{mm}$  であり、全体の最大出力である約  $20 \text{ N}\cdot\text{mm}$  に対して 1 割程度の誤差に収まっている。これらの検証結果より、開発したマイクロフォースプレートで接触位置と回転モーメントが取得できることを示した。生じている誤差については、センサの設置位置や校正手法を改善することで、十分に小さくすることは可能である。

## 5. おわりに

本研究では、テレロボットの安定した物体把持を目指し、ロボットへの人のような触覚の付与のためにマイクロフォースプレートを開発した。従来型フォースプレートの構造では、プレート面に摩擦力が加わった場合に正確な接触位置や回転モーメントが取得できなかった。接合部を改良した新型フォースプレートでは、接触位置の検証では  $1 \text{ cm}$  角の検知面に対して最大誤差は  $0.87 \text{ mm}$ 、回転モーメントの検証では  $20 \text{ N}\cdot\text{mm}$  のモーメント出力に対して RMS は  $2.01 \text{ N}\cdot\text{mm}$  であり、1 割程度の誤差に収まっていた。これらの誤差は、センサの設置位置や校正手法を改善することで十分に小さくすることが可能である。これより、提案手法の改良構造が有用であり、テレロボットにマイクロフォースプレートを取り付けた際に、把持物体の状態を取得で

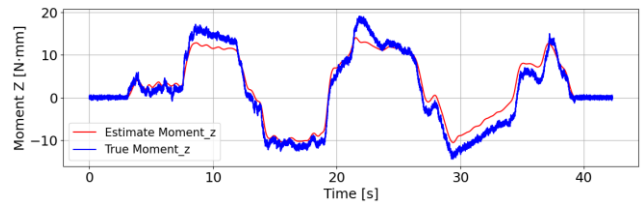


図 7: 回転モーメントの検証結果

きと考えた。

今後は、更なるフォースプレートの小型化や上部プレートの曲面化を進めていく。センサ素子が直径  $1 \text{ mm}$  の大きさであるため、さらにフォースプレートを小型化することが可能である。上部プレートの曲面化については、上部プレートを指の表面のような曲面で構成し、3 次元フォースプレートをテレロボットの指先に組み込む。これにより、指面のどこにどのような力が作用しているかが分かるようになる。これらを実現し、更なるテレロボットの安定した物体把持の実現を目指す。

## 参考文献

- [1] Intuitive Surgical: Da Vinci Vision, Intuitive, <https://www.intuitive.com/en-gb>, (accessed July 16, 2025).
- [2] 根岸 健多, 伊藤 直樹, 並木 明夫, 田中 徹, 上田, 明寿, 村上 慶典, 池田 真也, 和田 貴志, 守本 梯三, 藤森 秀雄, 正 舘暲: i-MarioNET: Telexistence FST を用いた遠隔操縦型ヒューマノイドロボットシステム, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2013.
- [3] 街道 一翔, 柚 空翔, 安藤 潤人, 寒川 雅之, 野間 春生: テレロボットにおける安定した物体把持のための回転中心とモーメントの推定, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2024.
- [4] T. Yunoki, K. Kaido, M. Ando, H. Noma, “Development of a Micro Force Plate for Artificial Tactile Sensing,” Proc. of the IEEE World Haptics Conference (WHC), p886, July 2025.
- [5] M. Sohagawa, A. Nozawa, H. Yokoyama, T. Kanashima, M.Okuyama, T. Abe, H. Noma, and T. Azuma: Multimodal Measurement of Proximity and Touch Force by Light-and Strain-sensitive Multifunctional Mems Sensor, IEEE Sensors 2014, pp. 1749-1752, 2014.