



# 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

Estimation of Rotation Center and Moments for Stable Object Grasping in Tele-robots

街道一翔<sup>1)</sup>, 柚空翔<sup>1)</sup>, 安藤潤人<sup>1)</sup>, 寒川雅之<sup>2)</sup>, 野間春生<sup>1)</sup>

Kazushi KAIDO, Tsubasa YUNOKI, Mitsuhito ANDO, Masayuki SOGAWA, and Haruo NOMA

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

新潟大学工学部 機械システム工学科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050, hpmech@eng.niigata-u.ac.jp)

**概要:** 本研究では、テレロボットの物体把持状態を検出して操作者に伝えることを目的とし、圧力と剪断力を計測可能な MEMS 触覚センサを 4 つ用いたマイクロフォースプレートを開発した。マイクロフォースプレートは、センサの出力から回転中心とモーメントを推定可能である。評価実験では、フォースプレート上のある点を中心に回転をかけ、回転中心を推定した。実験の結果、フォースプレートの中央付近の回転中心において、推定値との誤差は 0.7 cm となり比較的正確に推定することができた。さらに、モーメントの方向についても推定できることが確認された。

**キーワード:** 触覚, テレロボット, モーメント, フォースプレート

## 1. はじめに

ヒトは物体を把持する際、まず目で見て対象物の重心を推定し、その位置で把持を行う。物体の重心で把持すると、把持位置を中心とするモーメントの総和がゼロとなり、力学的に重力に対して水平方向にバランスが保たれる。つまり、ヒトはバランスが崩れたり回転モーメントが生じたりすることを避け、安定した持ち方を自然に行う。また、液体の入ったビンのように対象物の中身が均質でない場合は、見た目の重心位置と実際の重心位置がずれることがある。ヒトがそのような不均一な物体を持ち上げると、指先との接触面に生じる回転モーメントを感じ取り、力学的に正しい重心位置を推定して持ち直すことで安定した把持を実現する。この触覚フィードバックにより、ヒトは物体の形状や硬さ、重さを瞬時に感じ取り、適切な力加減で把持することができる。

一方、触覚フィードバックを有しないテレロボットで遠隔操作を行う場合、操作者は視覚情報のみに依存することになる。その結果、把持物体の状態を正確に把握することが難しく、回転を制御するために必要以上に力が加えられることがある。したがって、ヒトのように作業を行うテレロボットには把持物体の状態を知るための触覚フィードバックが必要である。そのためには、ロボットの指先に取り付けられるほど小型でヒトの触覚のように

圧力、剪断力、モーメントが計測できるようなセンサが不可欠である。本研究では、テレロボットの把持物体の状態を検出することを目的とする。

## 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。例えば、Intuitive Surgical 社の手術支援ロボット「ダヴィンチ」[2]は、遠隔操作による手術を可能にするロボットである。しかし、このロボットには力を検知する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。根岸ら[3]の研究では、テレロボットの指に圧力センサが取り付けられており、遠隔の操作性が向上している。しかし、このセンサでは圧力しか計測できず、対象物を把持した際の滑りや回転を計測できない。即ち、これらのロボットには把持物体の状態を知ることが困難である。

そこで本研究では、小型で圧力と剪断力を計測可能な MEMS 触覚センサ[1]を複数用いて、テレロボットのハンド部に装着するためのマイクロフォースプレートを開発した。マイクロフォースプレートは、センサの出力から回転中心とモーメントを推定可能である。本研究では、開発したフォースプレートの回転中心とモーメントの推定精

度を評価した。

### 3. 提案手法

先行研究[4]では、一枚のプレートに最大で3個の触覚センサを取り付け、プレートに作用した回転モーメントを、個々のセンサで計測した剪断力に垂直な線の交点を求めることで回転モーメントの中心を導出する手法を提案した。しかし、この手法では純粋な回転以外の外力が作用した場合、回転中心の推定が正確に行えないという問題があった。そこで本稿では一般的なフォースプレートで用いられるアルゴリズムに基づき、力学的に回転中心およびモーメントを推定する方式を導入した。この方法により、先行研究ではできなかった回転以外の力が加わった場合でも正確な回転中心の推定を可能にした。以下では本研究で採用した MEMS 触覚センサの仕様とそのセンサの計測値を使って回転中心とモーメントを計測する原理について述べる。

#### 3.1 MEMS 触覚センサ

本研究で使用している MEMS 触覚センサを図1に示す。MEMS 触覚センサは1辺が5mmのシリコン基板の上に3つのマイクロカンチレバーがあり、これらをエラストマで覆っている。このエラストマに垂直力および剪断力が加わると、エラストマ内部にあるそれぞれのカンチレバーが図3のように独立に変形することで、カンチレバーの根元のひずみ抵抗値が変動する。その抵抗値ごとの電圧を読み取ることによって垂直力と剪断力を計測できる[5]。

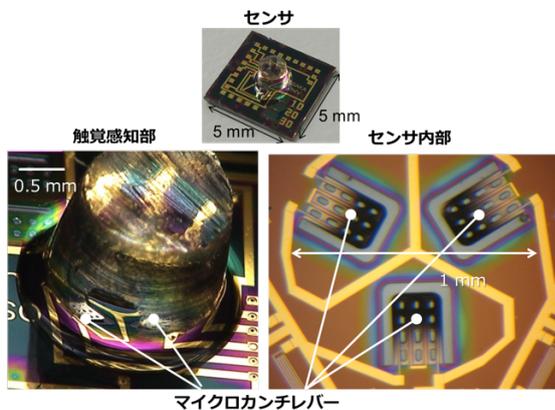


図 1: MEMS 触覚センサ

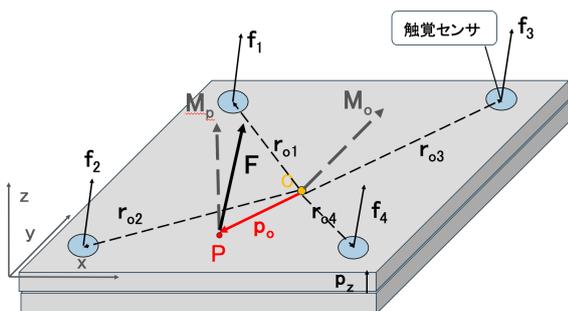


図 2: マイクロフォースプレートの原理

#### 3.2 回転モーメントの導出アルゴリズム

この MEMS 触覚センサでモーメントを導出するアルゴリズムを、典型的なフォースプレートのアルゴリズム[6]に基づいて述べる。まず、ロボットハンドに装着することを想定した四つの触覚センサを配置した盤面を図2に示す。この盤面において、回転中心  $\mathbf{P}$  では盤面上に作用する力がつくる力のモーメントの水平軸の力のモーメントが  $0$  となる点であるため、回転中心  $\mathbf{P}$  周りのモーメントが  $\mathbf{M}_p = [0, 0, M_{pz}]$  となる。この  $M_{pz}$  を求めるために、まず回転中心  $\mathbf{P}$  の位置を求める。そのあとで  $M_{pz}$  を導出する。

回転中心の位置を求める原理について述べる。まずこの盤面上のある点を原点  $\mathbf{O}$  とし、 $\mathbf{r}_{oi}$  は原点  $\mathbf{O}$  から各センサへの位置ベクトル、 $\mathbf{f}_i$  は各センサから出力されたベクトルとする。これらのことから盤面上に作用された力を  $\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z]$ 、原点周りのモーメントを  $\mathbf{M}_o = [M_{ox}, M_{oy}, M_{oz}]$  は以下のような式になる。

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^4 \mathbf{f}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_o = \sum_{i=1}^4 \mathbf{r}_{oi} \times \mathbf{f}_i \quad (2)$$

回転中心  $\mathbf{P}$  では盤面上に作用する力がつくる力のモーメントの水平軸の力のモーメントが  $0$  となる点であるため、回転中心  $\mathbf{P}$  周りのモーメントが  $\mathbf{M}_p = [0, 0, M_{pz}]$  となる。  $M_{pz}$  とは回転中心における  $z$  軸周りのモーメントである。次に原点から回転中心までの位置ベクトル  $\mathbf{p}_o = [p_x, p_y, p_z]$  とセンサから出力された全ての力を  $\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z]$  の外積を考える。  $p_z$  は原点  $\mathbf{O}$  と回転させた平面までの鉛直方向の距離パラメータであり、定数である。  $\mathbf{p}_o$  とは原点  $\mathbf{O}$  から回転中心  $\mathbf{P}$  までの位置ベクトルなので式(3)のように変形することができ、これは回転中心  $\mathbf{P}$  周りのモーメント  $\mathbf{M}_p$  から原点周りのモーメント  $\mathbf{M}_o$  を引いた式と同じである。

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_p &= \mathbf{M}_o + (\mathbf{P} - \mathbf{O}) \times \mathbf{F} \\ &= \begin{bmatrix} M_{ox} + p_y F_z - p_z F_y \\ M_{oy} + p_z F_x - p_x F_z \\ M_{oz} + p_x F_y - p_y F_x \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式の左辺は  $\mathbf{M}_p = [0, 0, M_{pz}]$  より、左辺と右辺の各列をそれぞれ比較すると、以下の(4),(5),(6)式のように  $p_x$ ,  $p_y$ ,  $M_{pz}$  を求めることができる

$$p_x = \frac{-M_{oy} + p_z F_y}{F_z} \quad (4)$$

$$p_y = \frac{M_{ox} + p_z F_x}{F_z} \quad (5)$$

$$M_{pz} = M_{oz} + p_x F_y - p_y F_x \quad (6)$$

この方法によって先行研究ではできなかった回転以外の力が加わった場合でも正確に回転中心を推定できると考える。4章では以上のアルゴリズムを試作したマイクロ

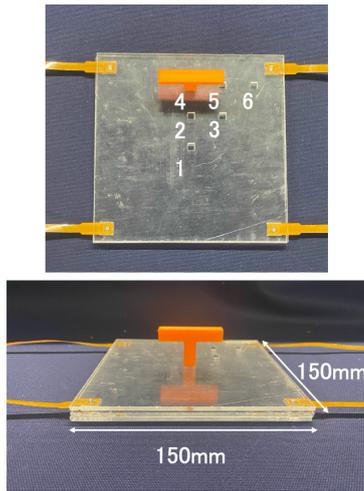


図 3: 計測器具(上: 上から撮影したもの, 下: 横から撮影したもの)

オースプレートに組み込んで、回転中心とモーメントを評価する。

#### 4. モーメント計測の検証実験

3章で述べたアルゴリズムの検証を目的として、MEMS 触覚センサを用いて回転中心とモーメントの向きを推定する二つの実験を行った。実験に使用した装置を図3に示す。この装置は、1辺が150mmで厚さが5mmの正方形のアクリル板2枚と回転ノブから構成されている。図3の下のアクリル板(下板)はMEMS 触覚センサを実装するための四つの穴が隅に配置されており、上のアクリル板(上板)は回転モーメントを与える場所を六箇所設け、その場所に四角い穴を開けている。図3の上板の上にあるオレンジ色の回転ノブは上板の四角い穴に合わせてはめ込むことができ、指定された位置で回転させることができる。

回転中心の推定評価では、回転ノブの位置を変化させて回転中心の推定を行った。ノブの位置が回転中心となり、その位置と推定値との誤差を評価した。それぞれ3回ずつ推定を行った。

モーメントの方向の推定評価では、1の位置にノブを設置し、それぞれ時計回りと反時計回りに回転させた。それぞれ5回推定し、モーメントの向きを評価した。

#### 5. 計測結果

まず、回転位置の推定評価について述べる。図4はそれぞれの回転位置での誤差の平均を示したグラフである。グラフの縦軸は図3の位置1~6であり、横軸は回転中心の推定結果との実際との距離の誤差の平均である。図4からすべての場所においてそれぞれの距離の平均誤差が0.7cmから2.0cm以内に収まっている。具体的には上板の中心付近では平均して0.7cmの誤差があるのに対しセンサの近傍では平均して2.0cm誤差があった。

6の位置が最もセンサに近い位置である。裏を返せば、他のセンサとの距離が遠ざかる位置である。回転中心がセ

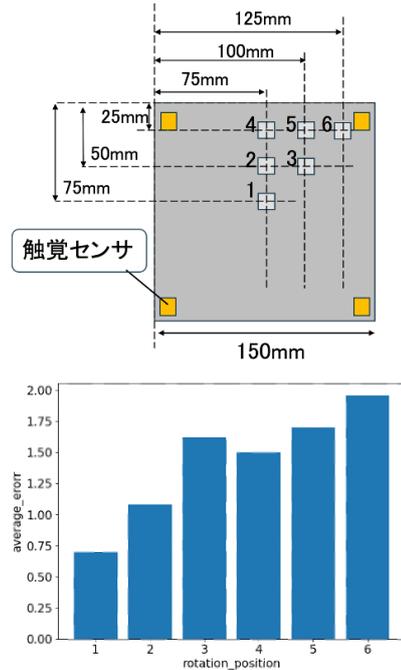


図 4: 上: 実際の回転位置, 下: 実際の回転中心から推定した回転中心までの平均誤差

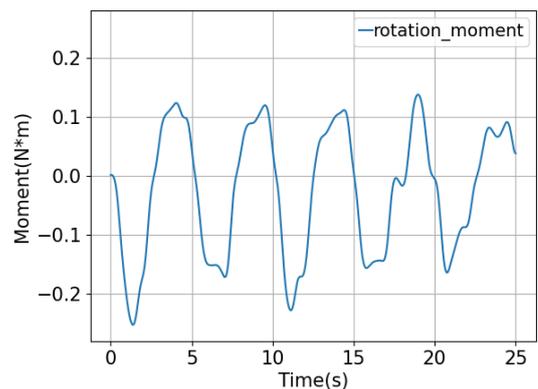


図 5: 計測されたモーメント結果

ンサから遠ざかると、センサの出力が減少し、ノイズに埋もれてしまう。したがって、ノイズの影響により誤差が増大し、回転中心の推定精度が低下する。

次にモーメントの方向の推定評価について述べる。図5は計測されたモーメントの結果を示す。このグラフは上板の中心で2.5秒ごとに時計回りと反時計回りを交互に5回行った結果であり、縦軸が時間、横軸が推定された回転中心回りのモーメントである。この結果から2.5秒毎にモーメントの正負の値が反転していることがわかる。今回は手動でモーメントをかけたために、正確なモーメント値の評価には至っていないが、モーメントの変動が推定できている。

#### 6. おわりに

本研究は、圧力と剪断力を計測可能なMEMS 触覚センサを複数用いて、テロロボットのハンドの指先に装着する

ことを想定したマイクロフォースプレートの試作機を開発した。本稿ではその前段階として1辺150mmの原理検証試作機を開発し、回転中心とモーメントの向きを推定した。結果として回転中心に関して中央付近では回転中心の推定誤差については0.7cmとなり比較的正確に推定することができた。しかし、センサの近傍では平均の誤差が2.0cm程度となり、今後精度への影響の原因を探り、改善が必要である。また、厳密な計測には至っていないが、モーメントの方向も推定できることが確認された。

本手法で採用している触覚センサは、その検知部分は直径1mm程度の大きさであり、原理的には1cm平方のロボットハンドの指先の接触面に同様の仕組みのマイクロフォースプレートを実装することは困難ではない。今後は、装置の小型化を図り、ロボットハンドと把持物体の接触面におけるモーメントの推定と、その結果を把持物体の状況としてユーザに詳細に提示する手段の開発を進める。

**謝辞** 本研究の一部は、JSPS 科研費 22H00542 の助成を受けたものです

#### 参考文献

- [1] M. Sohgawa, 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.

- [2] Intuitive Surgical: Da Vinci Vision, Intuitive, <https://www.intuitive.com/en-gb>, (accessed July 22, 2024).
- [3] 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 悌三, 藤森 秀雄, 正 舘暉: 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.
- [4] 河内彪博, 安藤潤人, 野間春生, 寒川雅之: MEMS 触覚センサの校正処理手法の実装と評価, 電気学会研究会資料, pp. 13-16, 2021.
- [5] 街道一翔, 船橋 佑, 安藤 潤人, 寒川 雅之, 野間 春生: ロボットハンドのための MEMS 触覚センサによる接触面のモーメント計測, 計測自動制御学会予稿集, 2023
- [6] SPORTS SENSING スポーツ科学研究室: フォースプレートによる床反力計測 # 2 ~ フォースプレートの力学 ~ , note, [https://note.com/ss\\_sports\\_lab/n/n49f956012556?magazine\\_key=m768c1675f2de](https://note.com/ss_sports_lab/n/n49f956012556?magazine_key=m768c1675f2de), (accessed July 22, 2024).