

不確定物体把持のための近接覚センサを用いた重心推定制御

○辻川翔大 (立命館大学) 有田輝 (立命館大学) 植村充典 (立命館大学)

1. 緒言

AI やロボティクスの進展にも関わらず、人手に頼っている作業は膨大に残されている。その原因は、現在のロボットシステムでは不確定物体の操作が困難なことにある。不確定物体の認識手法として、深層学習によるアプローチが多く存在する [1]。しかし、静止画像を用いた認識では、未知物体どうしが重なっていると認識が困難になったり、物体操作に有用な物理パラメータを推定することが困難である等の問題があり、十分な成果は得られていない。このような問題を解決するため、我々は物体に接触できる軽量かつ逆可動性の高いロボットアームを実現 [2][3] し、物体との接触を用いた物体認識や物体操作を実現する枠組みである「接触を用いた不確定物体操作」を提案している。

天野ら [4] は接触による物体の移動情報をカメラと触覚センサを用いて検出し、物体重心を推定する手法を提案した。しかし、この手法は複数回の接触が必要であり、物体重心推定までの行程が多いことから、高速なロボット作業には不向きである。

そこで、本研究では接触を用いた不確定物体操作への新しいアプローチとして、近接覚センサを搭載したロボットハンドの対象物との接触時における対象物の移動情報から重心位置を動的に推定しつつ物体を把持する制御手法を提案し、その有効性をシミュレーションにより確認する。

2. 問題設定

本研究では、形状や重心位置が不確定な物体をロボットが把持することを目的とし、以下の問題を設定する。

2.1 対象とするロボットシステム

図 1 のようなロボットシステムを対象とする。

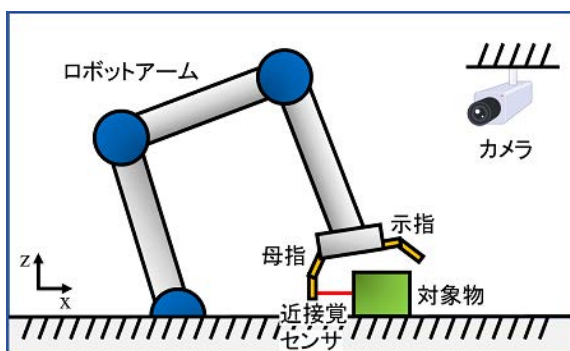


図 1 ロボットシステム全体

ロボットハンドの母指は近接覚センサを搭載し、指と対象物との間の距離を計測できる。ロボットは対象物との大まかな位置をカメラによって認識しているものとし、母指を対象物方向に移動出来るとする。ただ

し、物体の形状や重さ、重心位置は未知とする。本研究では問題を簡単化するため、図 2 のようにロボットの母指と対象物を地面と平行な水平面を用いて近似する。

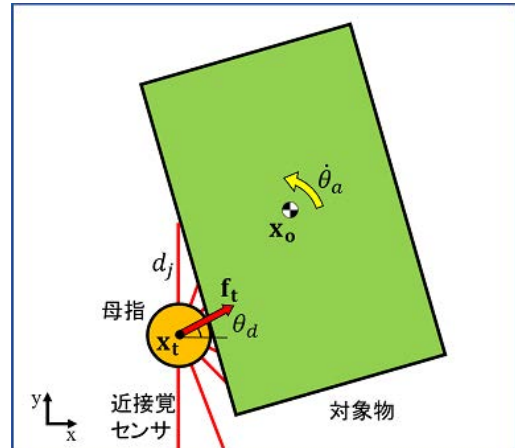


図 2 簡略化された母指と対象物の上面図

ロボットは搭載されたアクチュエータによって母指に $\mathbf{f}_t = (f_{tx}, f_{ty})^T$ の力を加える。母指の位置を $\mathbf{x}_t = (x_t, y_t)^T$ 、対象物の重心位置を $\mathbf{x}_o = (x_o, y_o)^T$ 、対象物の角速度を $\dot{\theta}_a$ 、各近接覚センサで検出した距離を d_j とする。ロボットは地面の高さを予め認識しているものとする。また、対象物は地面と垂直な軸周り以外に回転しないものとし、地面は摩擦特性が一般的な平面であり、指と対象物の間には滑りが生じないものとする。より複雑なモデルへの対応は、今後の予定とする。

2.2 対象物の重心方向の推定

対象物の重心位置を推定するため、母指と対象物の接触点における作用力に着目する。

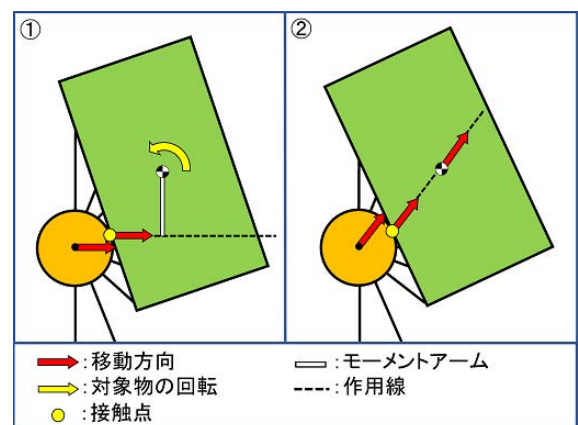


図 3 物体重心と作用力の関係

図 3 を例にする。作用力が対象物の重心に向いていない時、図 3 の ① のように重心周りのモーメントが発

生し、対象物は回転方向に加速する．よって、母指の制御を通して物体の回転が制御出来る．また、図3の②のように作用力の方向が対象物の重心に向いている場合、モーメントアームが0となる．物体の回転を抑制しつつ作用力が対象物の重心に向いている場合、対象物は母指と同じ向きで移動する．このとき、図3の②のように母指と対象物の接触点における作用力の方向に対象物の重心が存在すると推定出来る．

2.3 把持点と重心の関係

対象物の把持と重心の関係を考察するため、図4を考える．

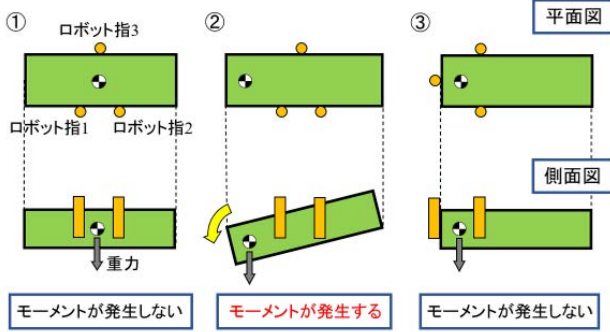


図4 物体重心と把持位置の関係

図4の①のように把持点に対象物の重心付近にあると持ち上げたときに発生するモーメントは小さくなる．図4の②では把持点が物体重心から遠いため、持ち上げる時に大きなモーメントが発生する．この状態では、物体の操作中に物体が落下する危険性が生じる．また、食品のような柔軟物では、大きなモーメントによって物体が破壊される場合もある．そこで、図4の③のように重心位置を認識して、重心を挟み込むように物体を把持する事で余計なモーメントを発生させずに安定した把持が可能となる．

このように重心を挟み込むように対象物を把持するためには、対象物を押している母指から見た重心の方向が推定できればよい．

2.4 制御目的

以上より、本研究での制御目的は、母指によって対象物を押しながら対象物の角速度 $\dot{\theta}_a$ を0へと収束させることで、接触点からみた対象物の重心方向を推定することである．

3. 動的重心推定制御

本章では、前章で定義した制御目的を実現する動的重心推定制御を提案する．

3.1 原理

動的重心推定制御の原理について説明する．ここで制御の過程を図5に示す．

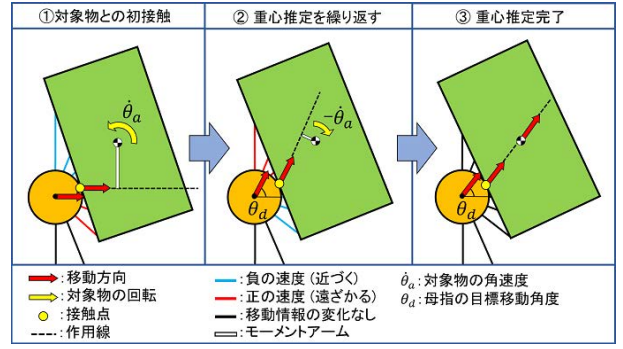


図5 動的重心推定制御の原理

母指が対象物に接触することで図5の①のように接触点に力が作用する．図の例では対象物の重心は接触力の作用線から見て上側にあるため、対象物は反時計回りに加速する．対象物の加速はモーメントアーム(対象物の重心から作用線に伸ばした垂線)の長さに比例する．よって、母指の進行方向をその目標値 θ_d を用いて制御すれば、作用線の向きが調節できるため物体の角速度 $\dot{\theta}_a$ を間接的に制御できる．これを用いて、対象物の角速度 $\dot{\theta}_a$ を0にするように、母指の目標角度 θ_d を更新する．具体的には、対象物の回転 $\dot{\theta}_a$ と同じ方向に母指の移動方向 θ_d を更新することで対象物を逆向きに加速でき、対象物の回転を抑制できる．この制御を動的に繰り返す事で③のように、接触点における作用力が対象物の重心方向に向き、モーメントアームが無くなることで対象物の回転が発生しなくなる．

3.2 制御則

上記の原理を実現する母指の制御則を示す．母指に加える力 \mathbf{f}_t は、母指の目標位置を $\mathbf{x}_{td} = (x_{td}, y_{td})^T$ とした位置に関するPD制御を用いて次式で与える．

$$\mathbf{f}_t = \mathbf{K}_p(\mathbf{x}_{td} - \mathbf{x}_t) - \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{x}}_t \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_d \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ は位置と速度の誤差に関するフィードバックゲインである．

指の目標位置 \mathbf{x}_{td} は、目標とする移動方向を θ_d とし、目標とする一定の移動速度を v_d として

$$\mathbf{x}_{td} = \begin{pmatrix} x_{td} \\ y_{td} \end{pmatrix} = \int_{t_0}^t v_d \begin{pmatrix} \cos \theta_d(s) \\ \sin \theta_d(s) \end{pmatrix} ds \quad (2)$$

で与える．ただし、 t は現在の時刻で t_0 は動作開始時刻とする．

対象物の回転を抑制するため、対象物の回転した方向に目標移動方向 θ_d を設定する．

$$\theta_d(t) = \int_{t_0}^t k_d \dot{\theta}_a(s) ds \quad (3)$$

ただし、 k_d はフィードバックゲインである．

3.3 対象物の角速度 $\dot{\theta}_a$ の推定

本手法の式(3)で用いる対象物の角速度 $\dot{\theta}_a$ を計測するため、近接覚センサと対象物との間の速度を計測し、その速度の分布から対象物の回転速度を求める．第 j

番目の近接覚センサが検出した対象物との距離を d_j とすると、その近接覚センサが検出した速度 v_j は、

$$v_j = \dot{d}_j \quad (4)$$

と表せる。ただし、市販の近接覚センサは計測距離の制限があるため、 $0 < d_j < d_{\max}$ とする。各近接覚センサが検出した速度 v_j の分布を最小二乗法による線形近似を用いて、対象物の角速度 $\dot{\theta}_a$ を推定する。近接覚センサの番号 j 、近接覚センサが検出した対象物の速度 v_j の近似値を \hat{v}_j とすると、1 次の近似モデルは、

$$\hat{v}_j = a j + b \quad (5)$$

である。これを v_j と \hat{v}_j の間の差を最小にするように a について解き、求めた a を用いて角速度 $\dot{\theta}_a$ は、

$$\dot{\theta}_a = \tan^{-1} a \quad (6)$$

と求まる。

3.4 接触判定

提案制御法では、母指が対象物に接触した後に指の進行方向 θ_d を変更するため、母指と対象物の接触を判別する必要がある。この接触判別にも、各近接覚センサが検出した対象物の距離 d_i と速度 v_i を用いる。接触判定の方法は図 6 を用いて説明する。

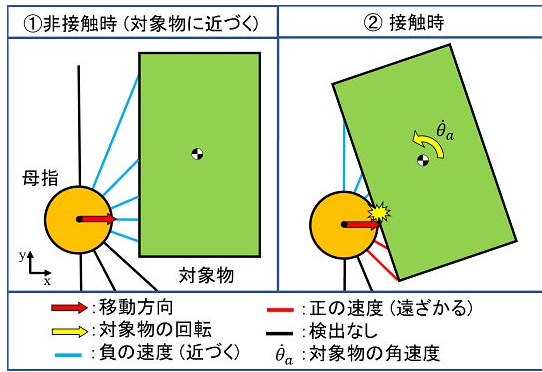


図 6 接触判定方法

図 6 の① では母指が対象物の方向に移動している時の様子であり、対象物を検出した近接センサは近づく方向の速度（負の速度）を検出する。次に図 6 の② は母指と対象物が接触することで対象物が回転し、姿勢が変化した様子である。このとき、対象物を検出した近接センサは対象物の回転によって、遠ざかる方向の速度（正の速度）と近づく方向の速度（負の速度）を検出する。これは接触によって対象物の姿勢を変化させたと判断できる。

3.5 物体把持の制御則

物体の重心方向が推定できたら、重心を挟み込むように示指を動かして物体を把持する。そのためにまず、示指は母指が対象物に加える力の作用線上に移動する。ここで、有本ら [5] が提案した物体情報を用いずに物体を把持できる手法を用いて対象物を把持する。示指に加える力を $\mathbf{f}_i = (f_{ix}, f_{iy})^T$ 、示指の位置を $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)^T$ とすると、物体情報を用いない物体把持の制御法は、

$$\mathbf{f}_t = \mathbf{K}_p(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_t) - \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{x}}_t \quad (7)$$

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{K}_p(\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_i) - \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{x}}_i \quad (8)$$

となる。ただし、 $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_d \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ はそれぞれの位置と速度の誤差に関するフィードバックゲインとする。この制御によって指同士は互いの位置を目標にして引きつけられるため、両指の間に位置する対象物が挟み込まれ、物体を把持できる。

以上の一連の制御法により、不確定な物体であっても物体の重心を挟み込む把持が可能となる。

4. シミュレーション

本章では、前章で提案した物体重心を動的に推定する制御手法の有効性をシミュレーションによって確認する。動力学的計算には、Open Dynamics Engine を用いた。

4.1 ロボットの仕様

本シミュレーションでは図 7 のようにロボットの指を設定した。

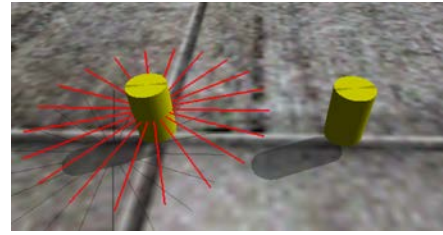


図 7 ロボットの 3D モデル

両指の寸法は半径 0.01 [m]、高さ 0.06 [m] であり、質量は 0.05 [kg] である。また、母指には合計 20 個の近接覚センサを設置間隔 $\theta_p = 18$ [deg] で取り付けている。

4.2 対象物の仕様

対象物には円柱と直方体を用いた。それぞれの 3D モデルを図 8、パラメータを表 1 に示す。



図 8 対象物の 3D モデル

表 1 対象物のパラメータ

物体重心	幾何中心
質量 [kg]	0.2
円柱物体の寸法 [m]	高さ, 0.06 半径, 0.07
直方体の寸法 [m]	高さ, 0.06 幅, 0.08 長さ, 0.15

4.3 評価指標

Open Dynamics Engine における API を用いて、対象物の角速度 $\dot{\theta}_a$ が 0 に収束しているかを確認する。これを確認することに動的重心推定制御によって対象物の回転が抑制できたと判断できる。また、シミュレーションにおいて、母指の中心から伸ばした黒線は母指の移動方向を示す。黒線が対象物の重心方向を向くことで物体重心が推定できたと判断できる。

4.4 円柱物体での結果

円柱物体を対象としたシミュレーションにおいて、対象物の角速度 $\dot{\theta}_a$ を図 9、重心推定の様子を図 10 に示す。

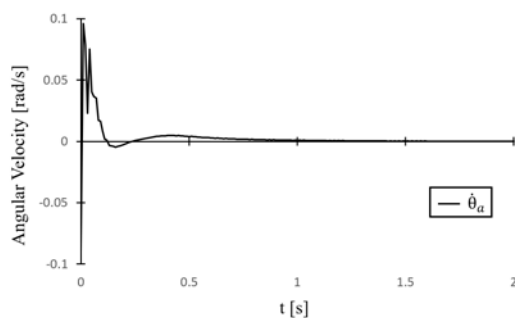


図 9 時間と対象物の角速度 $\dot{\theta}_a$ の関係

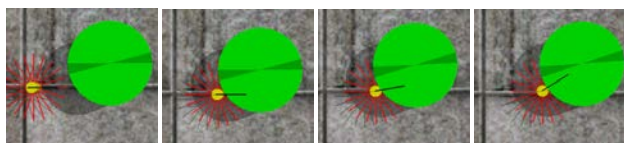


図 10 円柱物体での重心推定の様子

図 9 では対象物の角速度が 0 に収束し、回転が抑制されている。また、図 10 のシミュレーションでは母指の中心から伸びる黒線が対象物の重心方向を向いている。これらのことから、重心方向が推定できたと判断できる。次に、図 11 で推定された物体重心を挟み込むように母指と示指を配置して、物体把持を行う。

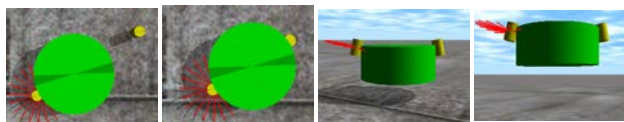


図 11 円柱物体の把持行動

図 11 のように推定された物体重心を挟み込むような把持行動を確認できた。

4.5 直方体での結果

直方体を対象としたシミュレーションにおいて、対象物の角速度 $\dot{\theta}_a$ を図 12、重心推定の様子を図 13、把持行動の様子を図 14 に示す。

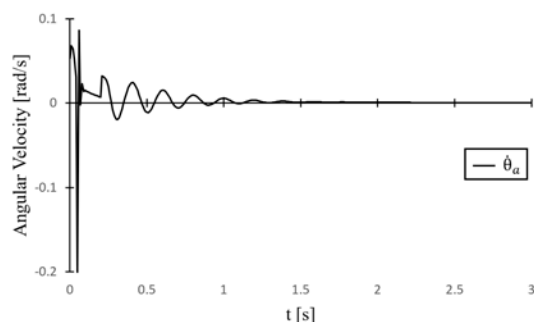


図 12 時間と対象物の角速度 $\dot{\theta}_a$ の関係

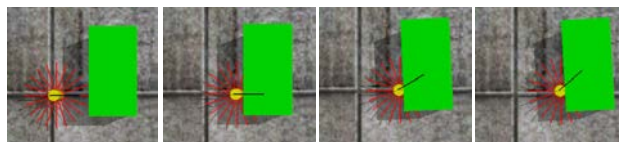


図 13 直方体での重心推定の様子

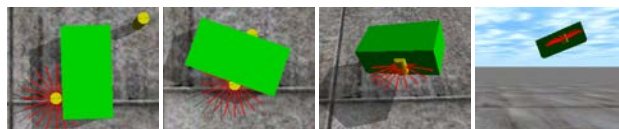


図 14 直方体の把持行動

円柱物体でのシミュレーション時と同様に、対象物の回転を抑制し、物体重心の方向を推定出来たと図 12 と図 13 から確認できた。また、図 14 のように推定された物体重心を挟み込むような把持行動を確認できた。

その他の物体形状や異なる重心位置を用いたシミュレーションを行ったが、物体形状が非常に複雑な場合を除いて上記の場合と同様に重心方向の推定と重心を挟み込む物体把持が可能であった。

5. 結言

本研究では、近接覚センサで取得した不確定物体の移動情報を利用する動的重心推定制御の構築とそれを用いた物体把持のシミュレーションを行った。異なる形状でも対象物の重心方向が推定でき、物体重心を挟み込むような把持行動を確認できた。今後は物体の三次元運動に対応できる手法を実現することや、複数物体や柔軟物への対応、実機実験を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は、内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期／フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人：NEDO) によって実施されました。

参 考 文 献

- [1] Ross, Girshick : “Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation”. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (IEEE), pp.580–587, 2014.
- [2] 植村充典, 八木聡明, 平井宏明, 宮崎文夫, 川村貞夫 : “先端化学繊維ロープを用いた軽量脚・腕ロボット”, . 第 35 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2017) 予稿集, RSJ2017AC2K2-06
- [3] Mitsunori Uemura, Yuki Mitabe, Sadao Kawamura: “Simultaneous gravity and gripping force compensation mechanism for lightweight hand-arm robot with low-reduction reducer”, Robotica, Volume 37, Issue 6, pp. 1090-1103, 2019.
- [4] 天野晃, 右田剛史, 浅田尚紀 : “視覚情報と触覚情報の協調による重心位置推定”, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 1998, No. 103, pp. 41-48, 1998.
- [5] S. Arimoto, R. Ozawa, M. Yoshida : “Two-Dimensional Stable Blind Grasping under the Gravity Effect”, in Proc. IEEE Conf. Robot. Autom., 2005, pp. 1196–1202.