

# 未知物体把持のための動的重心推定制御

○末藤幹淑 (立命館大学) 植村充典 (立命館大学)

## 1. 緒言

ロボティクスや AI の進展にも関わらず、産業界で人手に頼っている作業は膨大に残されている。この問題を解決するため、我々は不確定な環境でも作業できるロボットのハードウェア、環境認識、制御を統合した枠組みである「接触を用いた不確定物体操作」を提案している。その中で、我々は物との接触が可能なロボットアームを提案した [1][2][3][4]。新しい素材のワイヤーや多連プリー機構、金属 3D プリンター、ジェネレーティブデザイン等を利用した軽量の高逆可動なロボットアームで、ワイヤー機構により、アーム部分が軽量化され、ワイヤー駆動の欠点であったワイヤーの劣化も、先端化学繊維を用いることにより解決している。軽量化と高逆可動性により、ロボットと未知物体との不意の接触で、ロボットと物体は破損する可能性は低い。

不確定性の高いロボット作業として、食品のハンドリングが挙げられる。食品は形状や硬さなどに個体差があり、食器には、使用後に汚れが付着しており、現状のロボットでは認識して把持することは容易ではない。物体の把持においては、物体の重心位置が重要である。重心位置を挟み込む様に把持すれば、対象物にはモーメントが発生せず、安定した把持が可能になる。それとは逆に、重心から離れた位置を把持すれば、物体を持ち上げた後に物体が回転して転落する危険性があつたり、食品等の柔軟物であれば物体を破壊する可能性がある。

未知物体認識する方法として、三次元距離画像センサを用いて面検出により未知物体を認識する方法 [5]、一般物体認識を使った手法 [6] 等があるが、これらはカメラの視覚情報のみで認識しており、重心位置を推定することは難しい。重心位置推定方法として、複数回の摂動を与えた物体の回転角度から重心位置を推測する方法が天野らによって提案された [7]。この方法は重心位置を推定できるが、複数回押す必要があるため重心位置推定に時間がかかることや、物体形状を正確に認識する必要がある点が不確定な物体操作において問題となる。

そこで本研究では、ロボットと対象物の接触を利用し、リアルタイムで未知情報を含む物体の重心方向推定方法と、把持方法を提案する。物体を動かすことによりリアルタイムで重心方向を推定し、それに基づいて重心を挟み込むように物体を把持する。物体把持動作の後は、把持の成否を、物体の動きから判別する。本手法は、一連の動作をリアルタイムで行うため時間短縮も期待できる。提案手法の有効性は、シミュレーションにより確認する。

## 2. 問題設定

本論文の目的は未知物体の把持である。例えば汚れの付着による未知情報を含んだ食器をロボットアームで食洗器等に移動させる場合である。

## 2.1 システムの概要

システムの概要図を図 1 に示す。対象物の重心位置を  $x_o, y_o, z_o$ 、円柱の指の位置を  $x_f, y_f, z_f$ 、対象物の  $z$  軸回りの回転を  $\theta_o$  とする。

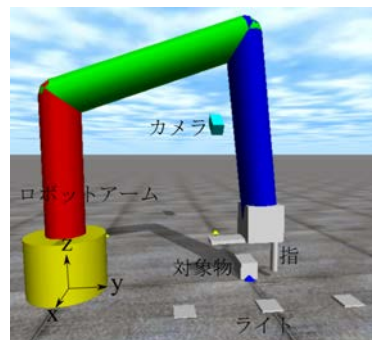


図 1 システムの概要図

## 2.2 前提条件

重心位置推定において、前提条件を以下に示す。

- 対象物の速度、角速度は既知である。
- 対象物の形状、質量、重心位置は未知である。
- 対象物の大まかな位置は既知であり、初期動作で対象物に接触可能とする。
- 地面は既知の水平面とする。

我々は、カメラを用いて未知物体の移動情報を取得する研究を行っており、対象物の速度、角速度は認識可能とする。対象物の大まかな位置は、カメラで認識可能であるため、既知とする。本論文では第一段階として水平面上に未知物体が 1 つ置いてある状況で考える。

## 2.3 ロボットアーム仕様

本研究では、図 2 と図 3 のようなグリップを搭載した 7 関節のロボットアームを対象とする。

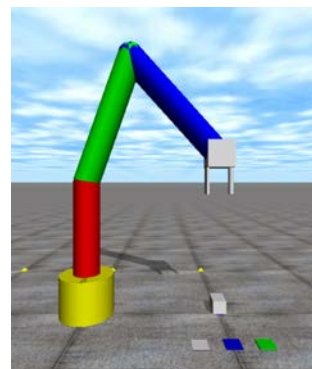


図 2 ロボットアーム

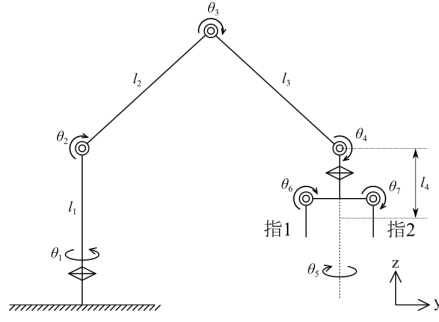


図3 内部構造

各関節角度は  $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7]^T$ , 各関節トルクは  $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6, \tau_7]^T$ , 各関節の目標角度は  $\theta_d = [\theta_{d1}, \theta_{d2}, \theta_{d3}, \theta_{d4}, \theta_{d5}, \theta_{d6}, \theta_{d7}]^T$  で、各アームの長さは  $l_1, l_2, l_3, l_4$  とする。

## 2.4 指と物体との接触と重心位置

図1において、対象物とロボットハンドの接触部分を上から見た様子を図4に示す。

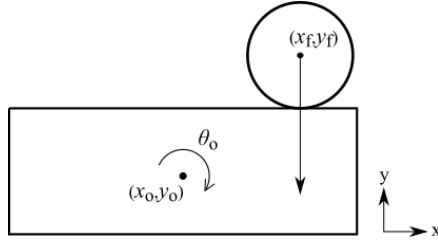


図4 ロボットの指と対象物の平面図

ハンド矢印の方向に動かした時、対象物には  $\theta_o$  の角速度が発生する。図2の様に指が真下に進む時に、対象物とロボットハンドの接触点が重心位置より右側であれば  $\theta_o > 0$ 、逆に接触点が重心位置より左側であれば  $\theta_o < 0$  となる。つまり、対象物の角速度の正負により、接触点から重心がどちら側にあるのかが分かる。また、接触点から重心方向に押ししており、対象物が回転方向に加速せず  $\theta_o = 0$  となる場合、物体の重心は接触力の作用線上に位置する。この原理を用いると、物体が回転しないように指で対象物を押すことで、重心の方向が推定可能となる。重心の方向を推定した後、反対側の指をその方向に移動させることで重心を挟み込み、物体を把持することが可能である。

## 2.5 制御目的

以上より、本研究の制御目的は対象物と指を接触させ、対象物の角速度に応じて指を動かす、対象物の回転を抑制する。抑制後、接触力の作用線を見ることで重心方向を推定し、片方の指を重心方向に移動させ把持を行う。また、接触判別と把持判別も行う。

## 3. 重心方向の推定

本研究で提案する重心方向推定制御方法について説明する。

### 3.1 重心推定制御

前章で定義した制御目的を実現するため、物体の角速度  $\dot{\theta}_o$  に応じて指を動かす、物体の回転を抑制した後のハンドの進行方向により、重心方向を推定する。そのため、リアルタイムで物体の角速度から指の進行方向  $\theta_z$  を更新する。具体的には図5の様に対象物と物体を接触させ、対象物の角速度を認識し、式(1)により指の進行方向  $\theta_z$  を更新する。

$$\theta_z = \int_0^t A \dot{\theta}_o dt \quad (1)$$

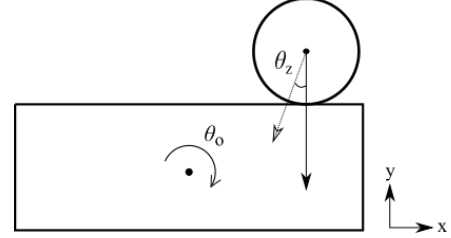


図5 接触した時の状態

A は定数である。A によってハンドの傾き具合が変わる。

### 3.2 指の進行方向から各関節の目標角度の導出

指の進行方向  $\theta_z$  からハンド部分の中心の目標座標  $x_{hg}, y_{hg}, z_{hg}$  を式(2), (3), (4)により求める。

$$x_{hg} = x_f + 0.25 \sin \theta_{zd} \quad (2)$$

$$y_{hg} = y_f - 0.25 \cos \theta_{zd} \quad (3)$$

$$z_{hg} = z_f \quad (4)$$

求めた目標座標から、逆運動学を用いて式(5), (6), (7), (8), (9)により  $\theta_{d1}, \theta_{d2}, \theta_{d3}, \theta_{d4}, \theta_{d5}$  を求める。 $\theta_{d6}, \theta_{d7}$  はハンドの開閉角度で決める。

$$\theta_{d1} = \tan^{-1} \left( \frac{x_{hg}}{y_{hg}} \right) \quad (5)$$

$$\theta_{d2} = -\cos^{-1} \left\{ \frac{l_2^2 - l_3^2 - x_{hg}^2 - y_{hg}^2 - (z_{hg} + l_4 - l_1)^2}{-2l_2 \sqrt{x_{hg}^2 + y_{hg}^2 + (z_{hg} + l_4 - l_1)^2}} \right\} + \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{x_{hg}^2 + y_{hg}^2}}{z_{hg} + l_4 - l_1} \right) \quad (6)$$

$$\theta_{d3} = \cos^{-1} \left\{ \frac{x_{hg}^2 + y_{hg}^2 + (z_{hg} + l_4 - l_1)^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3} \right\} \quad (7)$$

$$\theta_{d4} = \pi - \theta_{d2} - \theta_{d3} \quad (8)$$

$$\theta_{d5} = \theta_z + \theta_{d1} \quad (9)$$

### 3.3 ロボットアームのトルク制御

ロボットアームの制御方法は、重力補償付き PD 制御である。制御則を式 (10) に示す。ここで、 $\mathbf{K}_p$  は比例ゲイン行列、 $\mathbf{K}_d$  は微分ゲイン行列、 $\mathbf{g}$  は重力補償行列である。重力補償において、ハンドの手先の重さはアームの重さと比べ軽量であるため、ハンド開閉角度を考慮せず、常にハンドとハンドの中心にハンドの重量が掛かっているものとして計算している。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_p(\boldsymbol{\theta}_d - \boldsymbol{\theta}) - \mathbf{K}_d\dot{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{g} \quad (10)$$

## 4. 接触・把持判別アルゴリズム

まず把持判別に必要な接触判別について説明する。ロボットと対象物が接触しているかどうかを判別する方法を提案する。接触判定方法は式 (11) のように対象物の速度が 0 でなく、式 (12) のように指に掛かる外力  $F_a$  がある定数  $B$  以上になれば接触しているとみなす。

$$\sqrt{\dot{x}_o^2 + \dot{y}_o^2 + \dot{z}_o^2} > 0 \quad (11)$$

$$F_a > B \quad (12)$$

外力  $F_a$  は、力覚センサで計測するか、外乱オブザーバにより推定する。本研究では、より実装が容易である外乱オブザーバを用いる手法を採用する。

次にロボットアームが対象物を把持しているかどうかを判別する方法を提案する。把持出来ていれば、対象物とロボットの指の移動速度はほぼ一致する。逆に把持出来ていなければ、指と対象物の移動速度は一致しない。このように、対象物の速度を認識してロボットの速度と比較することで把持判別が出来る。把持判別式を式 (13) に示す。ここで  $C$  は定数である。この式 (13) と接触判別を組み合わせ、把持判別を行う。

$$\frac{\sqrt{(\dot{x}_f - \dot{x}_o)^2 + (\dot{y}_f - \dot{y}_o)^2 + (\dot{z}_f - \dot{z}_o)^2}}{\sqrt{\dot{x}_f^2 + \dot{y}_f^2 + \dot{z}_f^2}} < C \quad (13)$$

## 5. シミュレーション

重心推定制御と、接触判別、把持判別の有効性をシミュレーションにより確かめる。

### 5.1 環境設定

シミュレーションには物理計算エンジンとして Open Dynamics Engine(ODE) を使用する。重心方向推定に使用する定数  $A$  は  $1.6 \times 10^{-3}[-]$ 、接触判定の基準である定数  $B$  は  $0.005\text{Nm}$ 、把持判定の基準である定数  $C$  は  $0.15[-]$  とする。対象物は縦  $0.15\text{m}$ 、横  $0.1\text{m}$ 、高さ  $0.1\text{m}$  の直方体。重さは  $0.1\text{kg}$  とする。対象物を図 6 に示す。

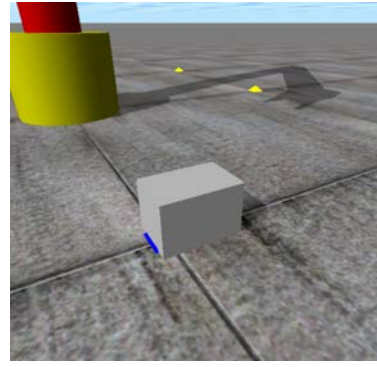


図 6 対象物

### 5.2 方法

シミュレーションの流れを以下に示す。

1. 片方の指を開き、対象物の近くに移動させる。
2. 指を対象物がある方向に近づけていき、接触させる。
3. 接触判別により、接触を認識した後、重心方向推定アルゴリズムを用いて、重心方向推定を行う。
4. 対象物の角速度が 0 になり重心方向を推定した後、重心を挟み込む様に指を閉じる。
5. 把持判別を行いつつ、対象物を持ち上げ移動させる。

図 7 の様に、ロボットがそれぞれ正しく判別出来ているか、目視するため三つのライトを作成した。左のライトは接触判別を示すもので、対象物とロボットの指が接触した時に赤く光る。真ん中のライトは重心位置推定が出来たかどうか示す物で、重心位置を推定に成功すれば青く光る。右のライトは把持判別を示すもので、ロボットアームが対象物を把持した後、動かした際に、把持出来ていれば、緑に光る。

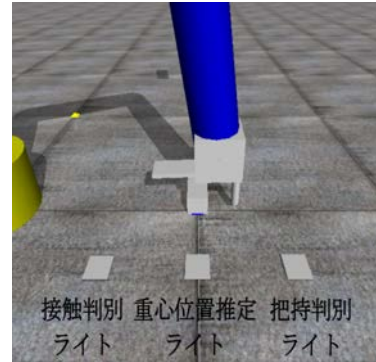


図 7 判定のライト

### 5.3 結果

シミュレーションの様子を図 8 に示す。重心方向特定までの対象物の角速度のグラフを図 9 に示す。対象物の角速度が 0 の時の、対象物と接触している指の位置、進行方向、対象物の重心位置の上面図を図 10 に示す。青色の矢印は指の速度ベクトルである。また速度ベクトル方向の直線と対象物重心座標の距離は  $0.007\text{m}$  であった。



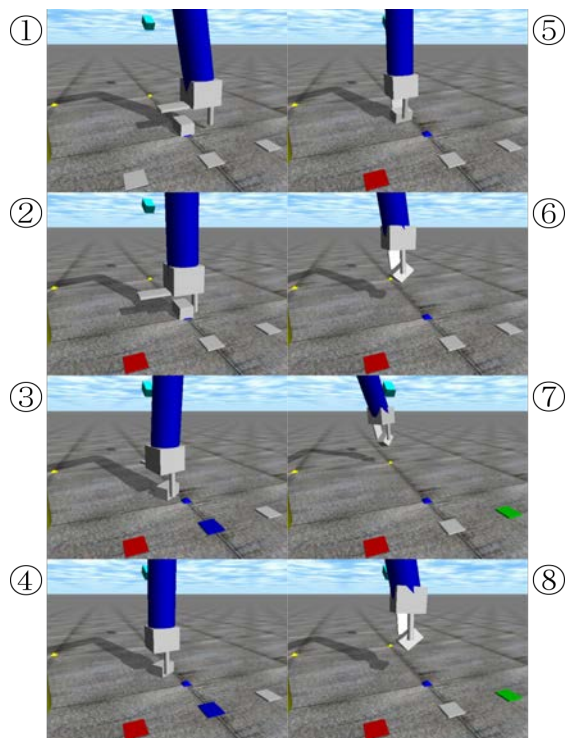


図8 シミュレーションの様子

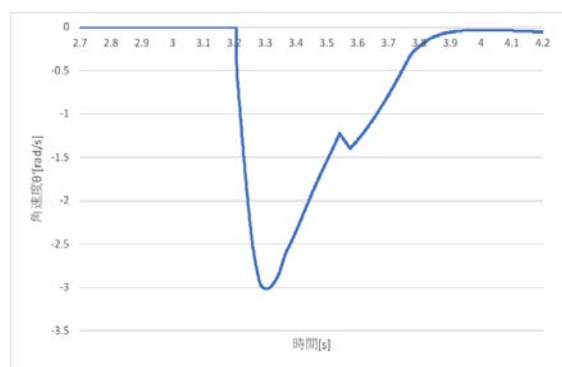


図9 重心位置推定時の角速度  $\theta_c$

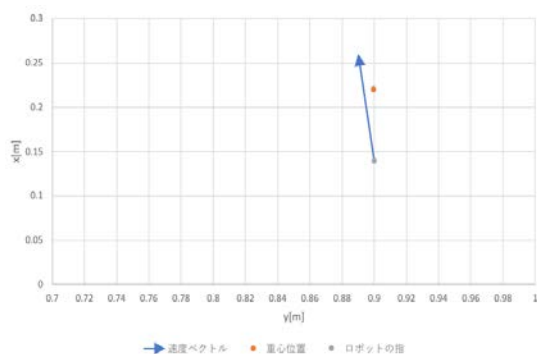


図10 指の座標, 進行方向と対象物の重心座標

## 5.4 考察

図8より, ロボットが未知物体を把持出来ていることが分かる. 図9について, 3.2秒ごろから対象物とロボットハンドの接触により, 角速度が発生し, ロボットハンドの動きに応じて角速度が下がっている. やがて角速度は  $0\text{rad/s}$  に近づいていき, 3.9秒あたりから, ほぼ  $0\text{rad/s}$  となっている. 以上によりロボットの指の移動により回転を抑制していることが分かる. また図10において, 速度ベクトル方向の直線と, 重心座標の距離は  $0.007\text{m}$  であり, 重心方向を推定出来ていることが分かる. 把持を行った際, 重心位置が両指の内側にあるため把持出来ている.

## 6. 結言

本論文では, 未知物体の把持を行う第一段階として, 重心推定制御と把持判定アルゴリズムを提案した. 重心位置は物体の回転を抑制するように指を動かすことにより推定した. 把持判定はロボットの指と対象物の速度差を基準にし判定をした. これらのアルゴリズムを用いて, シミュレーションを行い, その有効性を確かめた. その結果, 重心位置が未知である物体を把持することに成功し, 把持確認も出来た. しかし, まだ対象物が他の形状の場合は, 上手く動作するとは限らないため, 今後形状や重さ等を変えてシミュレーションを行っていききたい. また, シミュレーションで問題なければ, 実際にワイヤ駆動ロボットを利用し, 実験していきたいと考えている.

## 参 考 文 献

- [1] 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).
- [2] 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.
- [3] 笹野誠也, 植村充典: "金属 3D プリンタを利用した軽量・高可逆動なロボットアームの手首機構", 第39回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2021) 予稿集, 2021 (掲載予定).
- [4] 植村充典 野口雅人多連プリーによる小型軽量かつ摺動の少ないワイヤーの関節経路機構第39回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2021) 予稿集 掲載予定
- [5] 増田 寛之, 林 憲玉: "距離画像を用いた未知物体認識のための網膜モデルに基づく面検出", 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 1, pp.64-73, 2014.
- [6] 清水 俊介, 子安 大士, 前川 仁: "一般物体認識を用いた未知物体の3次元姿勢推定 (若葉研究者の集い2, サマーセミナー 2013~画像処理の理論と実際~)", 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 37, No. 36, pp.23-26, 2013.
- [7] 天野 晃, 右田 剛史, 浅田 尚紀: "視覚情報と触覚情報の強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 (CVIM), Vol. 98, No. 103, pp.41-48, 1998.