

劣駆動ハンドによる画像フィードバック制御を用いた 崩れやすい／潰れやすい食品の把持

Grasping of Brittle/Deformable Food Using Image Feedback Control with an Underactuated Hand

○ 甲斐 亮吾 (中央大学) 正 磯邊 柚香 (中央大学)
Sarthak Pathak (中央大学) 正 梅田 和昇 (中央大学)

Ryogo KAI, Chuo University, kai@sensor.chuo-u.ac.jp

Yuzuka ISOBE, Chuo University

Sarthak PATHAK, Chuo University

Kazunori UMEDA, Chuo University

In this paper, we propose an image feedback control for an underactuated hand to grasp brittle/deformable food without damaging it. Automation using robots in food factories are being promoted to compensate labor shortages and improve productivity. Since food products vary in shape and hardness and are difficult to be grasped by conventional robots, robot hands that conform to the shape of the object have been developed. In this research, we aimed to control an underactuated hand by using a monocular camera, without sensor or marker. In our method, we detect the deformation of the object using optical flow, adjust appropriate grasping force using area information of robot hand, and detect the grasping state using the relative displacement of the object and the hand. Through the experiments, twelve types of real foods were successfully grasped without dropping and without damaging expect two foods.

Key Words: Robot vision, Robot hand, Manipulation, Food grasping

1 序論

近年、食品工場における労働力不足や生産性の向上が課題になっている。この解決策として、ロボットを用いた自動化が進んでいる。ロボットに求められるタスクの1つに、ピックアンドブレース作業がある。この作業では、物体を落とす、また様々な硬さや形状の食品を傷つけずに把持することが要求される。

食品の把持を行うために、物体になじんで変形するロボットハンドが開発されている。その1つに劣駆動ハンドがある。しかし劣駆動ハンドは物体になじむために、モデル化や把持状態のセンシングが困難になるという課題がある。劣駆動ハンドの把持状態のセンシングの研究として、Azulay ら [1] はロボットハンド内に圧力センサを用いることで、把持状態の推定を行っている。しかし内界センサを使用する場合、センサの取り付けが困難になったり、センサを複数使うことでシステムが複雑になるといった課題がある。また、Morgan ら [2] は、外界センサとしてカメラを用いた把持状態認識の研究を行っている。しかし、実際の食品にはマーカを取り付けることができず、実作業への展開が困難になるという課題がある。そこで我々は先行研究 [3] において、劣駆動ハンドによる物体把持のために、マーカを必要としない画像フィードバック制御手法を提案している。しかしこの手法では、ロボットハンドの指先が物体領域に隠れる程に過度な力で把持していても、物体の変形を正しく検出することができず、物体を傷つけてしまう事例があった。

本論文では、単眼カメラを用いることで、劣駆動ハンドの画像フィードバック制御手法を提案する。過度な力での物体把持を防ぐために、ロボットハンドと物体の面積情報や、画像中の物体の移動情報を活用する。提案手法の有用性を示すため、過度な力で把持すると崩れやすい／潰れやすい食品を用いた実験を行う。

2 先行研究の課題

先行研究 [3] では、物体把持を行うために物体の輪郭情報を用いて変形の検出を行うことで、物体を傷つけず把持する手法を提案していた。ここで、先行研究における変形検出後の様子を図1に示す。図1(a)Boiled egg では、ロボットハンドと物体の接触箇所がカメラから見えるため、変形の検出が正しく行っていた。しかし図1(b)に示す豆腐の把持実験では、豆腐に傷をつけてし

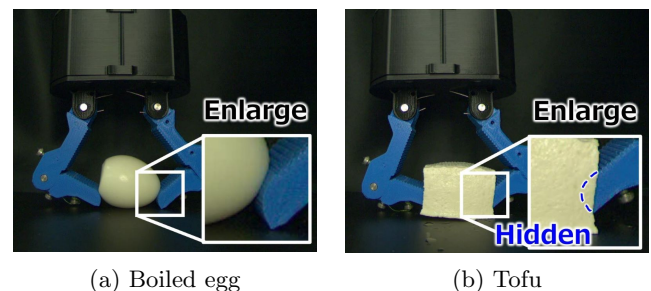


Fig.1 State after grasping

まった。このとき、ロボットハンドの指先部分が同図中の点線部分のように物体領域に隠れてしまい、カメラから撮影できない領域で変形が生じていた。そのため、取得画像から検出される物体の変形量に比べ、カメラから撮影できない領域での物体の変形量の方が大きくなっており、過度な力で把持したために豆腐を傷つけてしまった。これは豆腐に限らず、ロボットハンドの奥行き方向の幅よりも幅が大きい柔軟物体において、同様の現象が起これと考えられる。そこで本論文では、過度な力がかかる状況において、ロボットハンドの指先部分が物体領域に遮蔽される点に着目する。ロボットハンドの面積変化を算出することで遮蔽を検出し、過度な力での物体把持を防ぐことで、物体を傷つけない把持を実現する。

3 提案手法

3.1 概要

単眼カメラから取得した画像をもとに、劣駆動ハンドのフィードバック制御を行う。劣駆動ハンドは2指であり、内界センサは搭載していないものを用いる。劣駆動ハンドの制御を行うにあたり、単眼カメラによりロボットハンドと物体を撮影する。ここで把持状況に合わせた制御を行うために、判定手法を切り替える。本手法のフローを図2に示す。本論文では、接触判定、把持判定、アーム動作中の把持判定の3つの判定を用いる。まずロボットハ

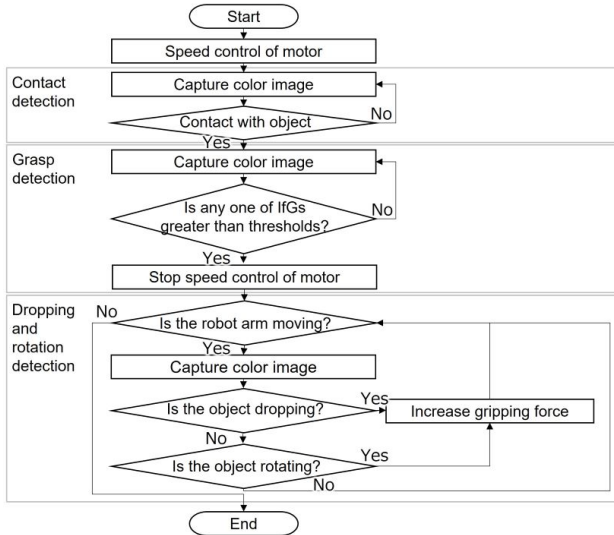


Fig.2 Flow chart of the proposed method

ンドに搭載しているモータの速度制御を行い、ロボットハンドを閉じる方向に動かす。次に、物体とロボットハンドの輪郭情報を用いて両者の接触を判定する。その後、ロボットハンドの速度変化、物体の移動や変形を算出することで物体の把持が完了したかを判定する、把持判定を行う。把持判定後、ロボットアームを動かす。ロボットアームの動作中に、物体の落下および回転を検出する、アーム動作中の把持判定を行う。落下や回転が検出されたら、物体をそれ以上落下させないために、ロボットハンドを閉じて把持力を大きくする。以上の一連の動作を行うことで、様々な硬さや大きさの物体を落とさず、傷つけずに把持する。

3.2 接触判定

接触判定は、物体とロボットハンドの接触を検出するための判定である。入力画像を図3に示す。まず、入力画像をHSV画像に変換し、閾値処理を行うことで物体とロボットハンドの領域をそれぞれ抽出する。その後、抽出した領域から輪郭情報をそれぞれ取得し、図4のように異なる色で描画する。図4では、物体の輪郭を赤色、ロボットハンドの輪郭を青色の線で示している。物体とロボットハンドが接触する際、輪郭線を太く描くことによって、図4のマゼンタ色で示すピクセルのように輪郭線を重ねることができる。そこで、左右それぞれの指において、図4のマゼンタ色で示される、輪郭の重なりを示すピクセル数を検出することで接触を判定する。

3.3 把持判定

把持判定では物体を傷つけずに把持するために、物体の変形および移動を検出している。食品の中には、ポテトチップスのように表面が硬くて崩れやすいものと、豆腐のように表面が柔らかくて潰れやすいものがある。そこで、物体の硬さに依存せず、傷つけずに把持するために4つの指標を用いる。この4つの指標をIfGs(Index for Grasping)と総称する。後述する3.3.1項、3.3.2項は崩れやすい食品を把持するための、3.3.3項、3.3.4項は潰れやすい食品を把持するための指標となっている。

3.3.1 ロボットハンドの重心移動量

1つ目の指標IfG₁は、ロボットハンドの重心移動量である。表面が硬い物体を把持した際、物体との接触後にロボットハンドは動かなくなる。そこでロボットハンドの移動を検出するために、ロボットハンドの重心情報を用いる。図5(a)では、ロボットハンドの重心を青点で示している。重心位置をフレーム間で比較することで、ロボットハンドの重心移動量を算出する。

3.3.2 物体の画像座標系のv方向の移動量

2つ目の指標IfG₂は、物体の画像座標系のv方向の移動量である。ここでv方向とは図5(a)の左上に示す方向を指す。表面が柔らかくて潰れやすい物体を把持した場合は、把持力が物体側に逃げるために物体が変形する。

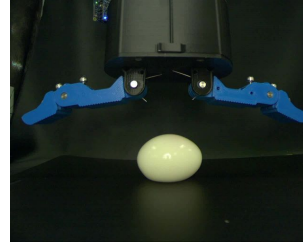


Fig.3 Input image

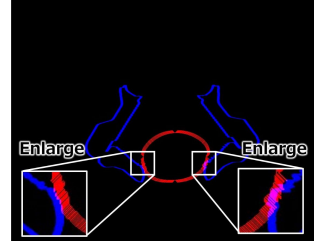
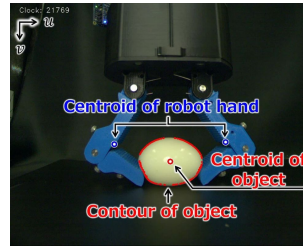
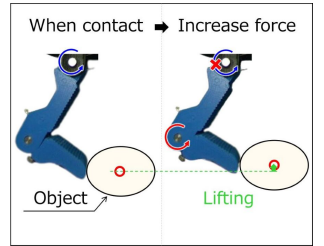


Fig.4 Contact detection



(a) Centroid and contour



(b) Lifting in v direction

Fig.5 Grasp Detection

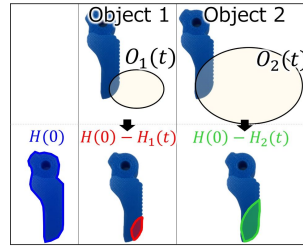


Fig.6 Relation between

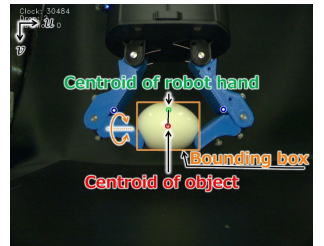


Fig.7 Dropping and rotation grasping force and occluded detection ratio

しかし表面が硬くて崩れやすい物体を把持した場合は、図5(b)の赤線で示すように、劣駆動ハンドの受動関節から力が逃げる。そのため、図5(b)の緑線のように劣駆動ハンドの指先リンクが物体を持ち上げる方向に移動し、物体が画像座標系のv軸の負の方向に移動する。そこで図5の赤点で示す物体の重心位置をフレーム間で比較することで、物体重心のv方向の移動量を算出する。

3.3.3 物体の変形量

3つ目の指標IfG₃は、物体の変形量である。表面が柔らかくて潰れやすい物体では、物体が変形しすぎると傷ついてしまうおそれがある。そのため物体の変形状態をセンシングする必要がある。このときロボットハンドの重心移動量だけでは物体全体の変形を検出することができない。そこで物体の輪郭情報より、輪郭上の全点の画像座標系u方向の移動を毎フレーム算出することで、物体の変形を検出する。なお図5(a)では物体の輪郭を赤色で、またu方向の向きを同図中内の左上に示している。輪郭上の全点の移動を求めるために、Lukas-Kanade法[4]を使ったオプティカルフローを用いる。現在のフレームの画像座標u成分を $u(t)$ 、1フレーム前のu成分を $u(t-1)$ 、輪郭の点の数を N としたとき、物体の変形量IfG₃は次式により求める。

$$\text{IfG}_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |u_i(t) - u_i(t-1)| \quad (1)$$

ここで、 u 方向の移動量を輪郭の点の数 N で除すことにより正規化を行い、同種類であっても異なる大きさの物体の変形を検出している。

3.3.4 ロボットハンドの遮蔽率

4つ目の指標 IfG_4 は、ロボットハンドが物体に遮蔽される割合である。物体を過度な力で把持するとき、2章の図 1(b) で示したように、物体がロボットハンドの領域に隠れることがある。そこで、ロボットハンドの面積の変化を検出することで遮蔽を防ぐ。ここで、物体領域に対するロボットハンドの遮蔽率を示すパラメータ IfG_4 を次式により求める。

$$IfG_4 = \frac{H(0) - H(t)}{O(t)} \quad (2)$$

なお、 $H(0)$ は把持判定前のロボットハンドの総面積、 $H(t)$ は現在のフレームのロボットハンドの総面積、 $O(t)$ は物体の面積である。例えば図 6 においては、 $H(0)$ や $H(t)$ は図中の $H(0)$ で示されるロボットハンドの先端のリンクの領域の面積であり、 $O(t)$ は同図中の $O_1(t)$ や $O_2(t)$ で示される物体領域の面積となる。ここで同一種類の物体の把持に必要な把持力は、物体の大きさに依存する。例えば、図 6 において、同種類であってもサイズの異なる物体を把持する場合を考える。小さい物体を Object1、大きい物体を Object2 とする。このとき、Object1 について、図 6 中の赤色で示すロボットハンドの遮蔽面積が $H(0) - H_1(t)$ となるまでロボットハンドを閉じたとき、必要な把持力がかかっているとする。しかし、同一種類であっても、物体の大きさが異なると質量が変わるため、必要な把持力も変化する。そのため Object2 に対しては、図 6 中の緑色で示すロボットハンドの遮蔽面積が $H(0) - H_2(t)$ となるまでロボットハンドを閉じたとき、必要な把持力がかかった状態となる。このように物体の大きさによって把持に必要な力は異なり、遮蔽面積 $H(0) - H(t)$ のみでは評価できない。そこで、ロボットハンドの面積変化 $H(0) - H(t)$ を物体面積 $O(t)$ で除すことにより正規化を行い、同種類であっても異なる大きさの物体を適切な力で把持する。

以上で詳述した 4 つの指標 $IfGs$ において、いずれか 1 つが閾値を超えた場合は、物体の把持が完了したと判定する (図 2 参照)。判定後、物体を崩したり潰したりしないようにするため、ロボットハンドの速度制御を止める。

3.4 アーム動作中の把持判定

アーム動作中の把持判定は、把持判定完了後にロボットアームを動かす中で、物体の落下や回転を検出するものである。3.4.1 項で落下検出、3.4.2 項で回転検出について述べる。

3.4.1 落下検出

まず、落下検出について述べる。ここでいう落下とは、物体がロボットハンドのワークスペース外に移動することのみならず、ロボットハンドの中で滑りながら移動している状態を指す。落下するときには、物体とロボットハンドの相対位置関係が変化する。そこで重心情報を活用して落下検出を行う。入力画像から輪郭情報を取得し、物体の重心とロボットハンドの重心を求め、2点間の距離を毎フレーム算出する。図 7 では、ロボットハンドの重心を緑点、物体の重心を赤点、緑点と赤点を結んだ線を黒色で示す。アーム動作前の距離を $l(0)$ 、動作中の距離を $l(t)$ としたとき、これらの差分 l_{diff} は次式により求まる。

$$l_{diff} = l(t) - l(0) \quad (3)$$

式 (3) により求まる l_{diff} が閾値以上となった場合、物体が落下していると判定する。判定後、ロボットハンドを閉じて把持力を大きくすることで、物体がそれ以上落下することを防ぐ。また把持力を大きくした際に $l(t)$ の値を $l(0)$ に代入することで、時間の経過に対して適応的に落下検出を行う。

3.4.2 回転検出

次に、回転検出について述べる。3.3 節の把持判定では、物体を傷つけない程度の力で把持している。そのため、物体を持ち上げた際に、図 7 中の矢印方向への回転することがある。そこで物体の回転を止め、回転しながら滑り落ちるのを防ぐ必要がある。そのために、物体の輪郭情報をもとに外接四角形を作成し、四角

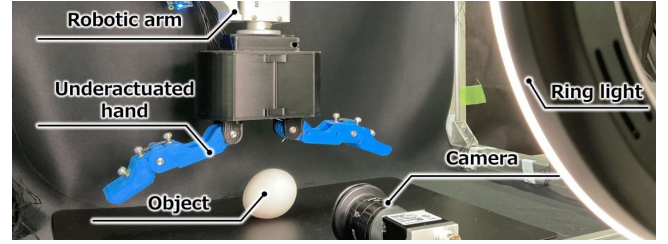


Fig.8 Experimental environment

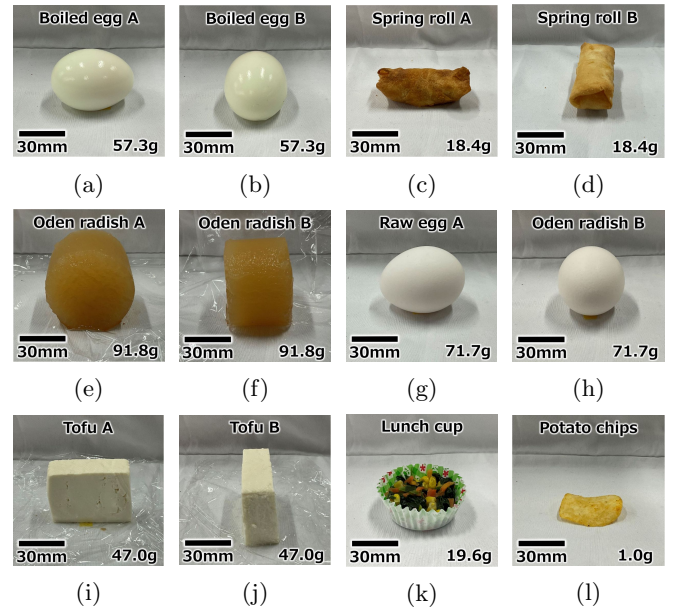


Fig.9 Tested objects of real food

形の高さをフレーム間で比較する。図 7 では、外接四角形を橙色で示している。アーム動作前の高さを $h(0)$ 、アーム動作中の高さを $h(t)$ としたとき、これらの差分 h_{diff} は次式により求まる。

$$h_{diff} = |h(t) - h(0)| \quad (4)$$

式 (4) により求まる h_{diff} が閾値以上となった場合、物体が回転していると判定する。判定後は落下時と同様にロボットハンドを閉じ、把持力を大きくした際に $h(t)$ の値を $h(0)$ に代入することで適応的に回転検出を行う。

4 実験

提案手法の有用性を検証するために、把持実験を行った。実験は図 8 に示す環境で行った。本実験では、劣駆動ハンドに Yale Open-Hand Project の Model T-42[5]、ロボットアームに DOBOT 社の MG400、カメラに Basler 社の acA1300-200uc、レンズに Edmund Optics 社の UC シリーズ固定焦点距離レンズ 4mm を用いた。把持物体には図 9 に示す実際の食品を選定した。同じ種類の物体では、Pose A や Pose B のように物体の置く向きを変えることで、同一種類であっても画像に映る大きさが異なる状態を再現し、実験を行った。各物体に対して 10 回の実験を行い、把持判定後には図 10 に定めた経路に沿ってロボットアームを動かした。

実験結果に対する評価は、最後まで物体を落さず把持に成功した実験の割合として把持成功率 $e_{success}$ 、目視にて確認した傷の数 e_{damage} を用いた。

実験結果を表 1 に示す。(k)(Lunch cup) を除いて 90% 以上の成功率となった。これはアーム動作中の把持判定において、物体の落下や回転時にロボットハンドを閉じることで、落下を防いだためと考える。また、(e)(Oden radish A)、(f)(Oden radish B) を除いて傷をつけずに把持することができた。これは物体の移動

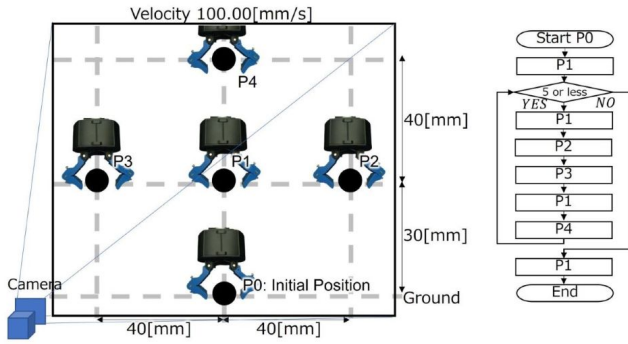


Fig.10 Trajectory of robot arm

Table 1 Experimental results

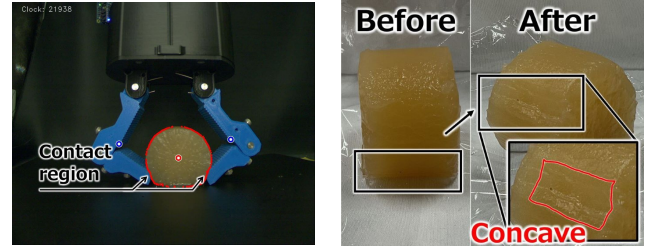
Object	Pose	Evaluation value	
		$e_{success}$	e_{damage}
(a) Boiled egg	A	100	0
(b) Boiled egg	B	100	0
(c) Spring roll	A	100	0
(d) Spring roll	B	100	0
(e) Oden radish	A	100	1
(f) Oden radish	B	100	1
(g) Raw egg	A	90	0
(h) Raw egg	B	100	0
(i) Tofu	A	100	0
(j) Tofu	B	100	0
(k) Lunch cup		10	0
(l) Potato chips		100	0

や変形を検出でき、過度な力での把持を避けることができたためと考えている。

(k)(Lunch cup) では、把持判定はできたものの、アームを図 10 の P0 から P1 に動かした際に、持ち上げに失敗することが多かった。お弁当カップは掴む箇所によって変形のしやすさが異なっており、実験においては変形しづらい箇所を把持位置としていた。しかし、摩擦係数や接触面積が小さく、具材の重量に対して必要な摩擦力が発生しなかったため、物体が滑り落ちた。そこで、ロボットハンドの指の本数を増やし、接触面積を大きくすることで、滑り落さずに把持することを考えている。

(e)(Oden radish A) の把持判定完了後の様子を図 11(a) に示す。このとき、ロボットハンドの指先部分のみで把持しており、接触面積が小さくなっていた。その後のアーム動作中の把持判定において、落下の誤検出が生じ、把持力が大きくなった。そのため、局所的に大きな力が加わるようになった。物体 (e) は表面が水分を多く含んでおり柔軟な状態であったため、傷をつけてしまったと考えられる。そこで今後は、ロボットハンドと物体の輪郭情報から、ロボットハンドのなじみを活かしてフォームクロージャが成立する把持位置を算出したい。これにより、ロボットハンドと物体の接触面積を大きくすることができ、傷がつくのを防げると考えている。

(g)(Raw egg A) の落下時の様子を図 12 に示す。物体 (g) の表面は硬く、滑りやすい状態であった。ロボットハンドで把持しロボットアームを動かした際、画像のノイズの影響により落下の誤検出が生じた。落下の誤検出によってロボットハンドが閉じたことにより、物体 (g) に力が加わった。このとき物体 (g) は変形せず、潰れることもなかった。しかし、滑りやすい状態であるため、アーム動作による外乱によって画面奥行き方向に振動し、落下してしまった。そこで (e)(Oden radish A) と同様に、なじみを活かした把持位置を算出することによって、滑りやすい物体で



(a) Small contact region between the fingertips and the object

(b) Damage

Fig.11 Damage on Oden radish A

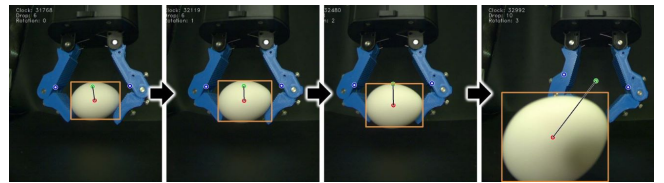


Fig.12 Failure to grasp Raw egg

あっても移動を防ぐことができると考えている。またステレオカメラを用いることで、画像の奥行き方向の移動を検出する対策も考えている。

5 結論

本論文では、単眼カメラを用いた、劣駆動ハンドによる物体把持のための画像フィードバック制御手法を提案した。内界センサやマーカを使わずに、崩れやすい/潰れやすい食品の把持を行った。過度な力での物体把持を防ぐために、ロボットハンドと物体の面積情報や、物体の画像座標系内の v 方向の移動情報を活用した手法を提案した。実験において、把持成功率は (k)(Lunch cup) を除いて 90%以上となった。また (e)(Oden radish A), (f)(Oden radish B) を除いて傷をつけずに把持することに成功した。

今後は、物体とロボットハンドの輪郭情報を用いて、劣駆動ハンドのなじみを活かした把持を目指す。またステレオカメラを用いることで、画面奥行き方向の物体の移動検知に取り組んでいく。

参考文献

- [1] O. Azulay *et al.*, "Learning Haptic-based Object Pose Estimation for In-hand Manipulation with Underactuated Robotic Hands," arXiv:2207.02843, 2022.
- [2] A. S. Morgan *et al.*, "Towards Generalized Manipulation Learning Through Grasp Mechanics-Based Features and Self-Supervision," IEEE Trans. on Robotics, Vol. 37, No. 5, pp. 1553-1569, 2021.
- [3] 甲斐ら, "劣駆動ハンドによる物体把持のための画像フィードバック制御", 第 30 回精密工学会学生会卒業研究発表講演会論文集, J17, pp. 71-72, 2023.
- [4] B. D. Lucas *et al.*, "An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision," Vol. 81, pp.674-679, 1981.
- [5] R.Ma *et al.*, "Yale OpenHand Project: Optimizing Open-Source Hand Designs for Ease of Fabrication and Adoption," IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 24, pp. 32-40, 2017.