

大きさや硬さの異なる物体をつまみ上げ可能な 画像を用いたロボットハンド制御

磯邊 柚香^{*1}, Pathak Sarthak^{*2}, 梅田 和昇^{*2},
橋本 裕介^{*3}, 松山 吉成^{*3}, 松田 卓^{*3},
金田 侑^{*4}, 池内 宏樹^{*4}, 多田 隈 建二郎^{*5}

Visual Feedback Control of a Robotic Hand for Picking Up Objects of Varying Size and Softness

Yuzuka ISOBE^{*1}, Sarthak PATHAK^{*2}, Kazunori UMEDA^{*2},
Yusuke HASHIMOTO^{*3}, Yoshinari MATSUYAMA^{*3}, Taku MATSUDA^{*3},
Yu KANEDA^{*4}, Hiroki IKEUCHI^{*4} and Kenjiro TADAKUMA^{*5}

^{*1} Graduate School of Science and Engineering, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

^{*2} Faculty of Science and Engineering, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

^{*3} Connected Solutions Company, Panasonic Corporation, 3-1-1 Yagumo-naka-machi, Moriguchi-shi, Osaka 570-8501, Japan

^{*4} Manufacturing Innovation Division, Panasonic Corporation, 2-7 Matsuba-cho, Kadoma-shi, Osaka 571-8502, Japan

^{*5} Graduate School of Information Sciences Applied Information Sciences, Tohoku University
6-6-01 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579, Japan

This paper presents a visual-feedback control to pick up an object by a robotic hand. Picking up a desired object from a pile of objects by a robotic hand is an important task in assembly and food factories. In this task, it is necessary to grasp an object without dropping it, even when only a part of the object can be grasped by the tip of the hand, initially. A critical condition is that the grasping force needs to be just enough to hold and manipulate soft objects like food without crushing them. To tackle this problem, we use a robotic hand that has two parallel grippers with conveyor belts for manipulation, and is equipped only with a stereo camera. Stable grasping is achieved by controlling the belts while moving the grasped object towards the palm from the tip of the gripper. For adjusting the grasping force, the slippage and the orientation change of the grasped object is detected by the camera. The validity of the proposed system is verified through experiments wherein the hand is controlled to pick up and move objects of varying size and softness.

Key Words : Visual feedback control, Robotic hand, In-hand manipulation

1. 序 論

近年, 人に代わって作業するロボットアームやロボットハンドが, 組立工場や食品工場などの製造や加工の現場へ広く導入されている. これらの現場におけるタスクの一つに, 山積み状態から特定の物体のみをピックアップする作業が挙げられる. この作業においては,

把持開始時にはロボットハンド先端で物体をつまむ, 不安定で落としやすい方法で把持する状況が想定される. 一方で, 食品工場などにおいては, 同種の物体であってもサイズが異なる「異形」かつ「柔軟」な物体を扱う. 異形物体は物体ごとに掴むために必要な把持力が異なり, 柔軟物の場合は潰しすぎない把持力に調節することも必要である. 以上より, 本稿では, 下記の動作を行えるロボットハンドシステムの実現を目指す.

動作 1 把持開始時に物体をつまんだ状態であっても落とさずに把持し続ける

動作 2 把持物体の物性が未知であっても落とさず潰しすぎない適切な把持力に調節する

1.1 関連研究 動作 1 の実現のために, グリッパ表面にコンベアベルトやローラを取り付けたハンドが

^{*1} 中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻 (〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) isobe@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

^{*2} 中央大学理工学部精密機械工学科 (〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) { pathak, umeda }@mech.chuo-u.ac.jp

^{*3} パナソニック株式会社コネクティッドソリューションズ社 (〒 570-8501 大阪府守口市八雲中町 3-1-1) { hashimoto.yu01, matsuyama.yoshinari, matsuda.taku }@jp.panasonic.com

^{*4} パナソニック株式会社マニュファクチャリングイノベーション本部 (〒 571-8502 大阪府門真市松葉町 2-7) { kaneda.yu, ikeuchi.hiroki }@jp.panasonic.com

^{*5} 東北大学大学院情報科学研究科応用情報科学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01) tadakuma@rm.is.tohoku.ac.jp

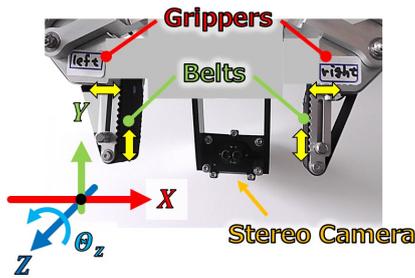


Fig. 1 The robotic hand used in this system and coordination system for control. The yellow arrows show the degrees of freedom.

開発されている^{(1)~(3)}。これらの構成により、グリップ先端で物体をつまんだ状態からハンド手中まで持ち上げることで安定的な把持が可能となる。本稿では、つまんで持ち上げる一連の動作を「つまみ上げ」と呼ぶ。

動作2に対しては、滑り状態を計測し、物体が滑り落ちない最小の把持力となるように制御するシステムが有効である。Naritaら⁽⁴⁾は、グリップ表面に搭載した滑り覚センサにより、食品などの柔らかい物体などに対して必要な把持力が未知であっても必要最小限の力での把持に成功している。Yamaguchiら⁽⁵⁾の提案するシステムにおいても、グリップ内部のカメラによりグリップ表面と物体の滑り状態を認識可能である。

しかし、両者のアプローチの統合には課題がある。前者のハンド構成では、グリップ表面をベルトが循環したり、グリップ先端のローラが回転する。ゆえに、センサをグリップやベルト、ローラの表面や内部に搭載することは、構造の複雑化やハンドの大型化に繋がる。

そこで、本研究では両者の動作を実現するために、グリップ外に取り付けられたカメラを用いて、大きさや硬さが異なる物体をつまみ上げる制御システムを提案する。前述のようにグリップとコンベアベルトで構成されるハンドを用いることで、物体をつまみ、落とさないようにハンド手中の任意の位置まで持ち上げる動作を実現する。また、ハンドの各アクチュエータを動かした際の物体の滑り状態や姿勢変化を、カメラ画像から検出することで把持力調節を行う。本研究は、ハンド動作と画像処理を組み合わせる点において新規性を有している。

2. 提案システム

2.1 システム構成 本研究において製作したロボットハンドを図1に示す。ロボットハンドは、表面にコンベアベルトを巻き付けた2つの平行グリップで構成される。各グリップ、各ベルトはそれぞれ独立したモータにより動作する。また、センサとしてステレ

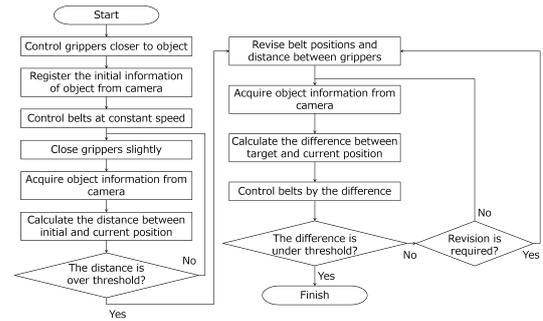


Fig. 2 Flow chart of the proposed system

オカメラのみを使用し、ハンド手中を撮影可能な位置に配置する。制御には図中に示すロボット座標系を用いる。各グリップのロボット座標系 X 軸方向の位置、各ベルトの Y 軸方向の移動量、およびそれぞれの動作速度を制御対象とする。ゆえに、把持物体を X , Y , θ_z 方向に動かすことが可能である。システム全体を通して、画像認識により下記の物体情報を取得する。

- 位置 (X, Y 方向) : x, y
- 姿勢 (θ_z 方向) : θ_z
- サイズ (X, Y 方向) : w, h

なお、物体の Z 方向の位置は固定ではないため、ステレオカメラにより3次元情報を取得し各値を出力する。

本稿では、グリップおよびベルトを駆動した際の物体の滑り状態をカメラ画像から検出する。滑りが生じない最小の把持力となる状態を検出することで、物体を落とさず潰しすぎない適切な把持力を実現する。適切な把持力で物体をつまんだ状態からハンド手中の任意の位置まで持ち上げることで、大きさや硬さが未知の物体をつまみ上げ可能な制御システムを提案する。

2.2 提案システムの概要 提案システムの処理フローを図2に示す。初めに、画像から得られる物体のサイズに合わせて、各グリップを物体の近くまで移動させる。このときの物体情報を初期情報として登録する。次に、ベルトを一定速度で巻き上げ続ける。巻き上げている最中、グリップは微少量ずつ段階的に狭めていく。グリップ制御を行ったらその都度、初期情報と現フレームでの物体位置との変化量を算出する。ここで、ベルトを動かしているため、グリップと物体の間に滑りが生じなくなると物体位置が変化する。また、グリップは微少量ずつ狭めるため、滑りが生じない最小限の力で把持している状態を検出可能と考える。ただし、片側のグリップのみが物体に接触し、物体が傾くことも考えられる。そこで、初期情報と現フレームでの物体姿勢の変化も算出する。姿勢変化量が大きい場合には、接触している方のグリップのみを開いていき、姿勢を元の状態に戻す。物体位置の変化量

がしきい値以上となったら、グリップ先端で物体をつまめている状態と判断しベルトを一旦停止する。

つまんだ後は、物体の位置姿勢に基づき、把持力や物体姿勢の補正を行う。まず、つまんでいる状態での物体情報を登録する。その後、ベルトを一定量 δ_{belt} だけ動作させる。ベルト動作前後での物体位置変化 $\delta_{position}$ 、姿勢変化 $\delta_{orientation}$ を下記の式により算出する。

$$\begin{aligned}\delta_{position} &= y_2 - y_1 \\ \delta_{orientation} &= \theta_{z2} - \theta_{z1}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 y_1 、 θ_{z1} はベルト制御前、 y_2 、 θ_{z2} は制御後の位置と姿勢である。ベルト制御前後での物体の移動量 $\delta_{position}$ がベルト移動量 δ_{belt} よりも小さい場合、把持力が弱く物体が滑り落ちている状態と推察される。そこで、グリップ幅を再度微量狭める制御を行い、把持力を強める。また、ベルト制御前後で物体の姿勢変化 $\delta_{orientation}$ が大きいときは、片方のベルトのみを動かし姿勢を補正する。式(2)において計算される $\tan \delta_{orientation}$ が正のときは左ベルト、負のときは右ベルトを $b_{relative}$ だけ巻き取る。

$$b_{relative} = |(g_{right} - g_{left}) \tan \delta_{orientation}| \quad (2)$$

ここで g_{left} と g_{right} は、ロボット座標系 X 軸方向の左右グリップの位置である。各種補正の実施後は再度ベルトを一定量動かし、式(1)の値がしきい値以下となったら補正完了とする。

その後は、物体を任意の位置まで持ち上げる制御を行う。現フレームでの物体位置と目標位置との差分に基づいてベルトを動かす。物体が目標位置まで到達したら、制御を終了する。なお、持ち上げ中にも、毎フレームで物体の滑り状態および姿勢変化を検出する。滑りや姿勢変化が生じている場合は、ベルトを一旦停止し、先述の補正処理を行う。補正後は再び目標位置との差分を計算し、物体を持ち上げる制御を再開する。

2.3 物体検出 本システムで使用する物体情報(2.1節参照)を取得する画像処理について詳述する。

まず、取得したカメラ画像に対して、HSV色情報を基に物体領域を抽出する。ステレオカメラから得られる3次元情報を用いて、物体領域のポイントクラウドを作成しボクセル化する。各ボクセルに対して、ユークリッド距離を用いた最近傍点探索を行い、ボクセル群をクラスタリングする。要素数が最大となるボクセル群に対して、主成分分析を行う。相関の高い上位3方向(第1～第3主成分)を抽出し、各方向に対するボクセル群の広がりをもとに1辺の長さとした Bounding Box を作成する。最後に、下記の値を算出する。

- **位置:** Bounding Box の中心座標

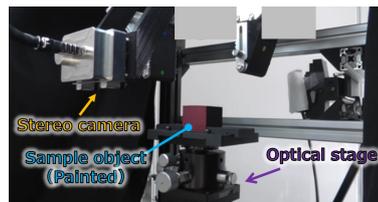


Fig. 3 Experimental environment. Note that the patentable configurations are masked by the gray regions.

- **姿勢:** 第1主成分がカメラ座標系各軸となす角度
- **サイズ:** Bounding Box の各辺の長さ

ただし、算出された値はカメラ座標系で定義されているため、ロボット座標系に変換し出力する。また、上記の処理は、制御内容によらず毎フレーム実行する。

3. 実験

提案システムを用いて、大きさや硬さが異なる物体をつまみ上げる実験を行い、妥当性を評価した。

3.1 評価方法 本実験においては、下記の観点でシステムの妥当性を評価する。

1. 物体を滑り落とすことなく把持し続ける
2. 物体を潰しすぎることなく把持する

それぞれに対応する評価値 R_1 、 R_2 を定義し評価を行う。

評価値 R_1 は、つまんだ後から持ち上げ完了時までの、物体速度 v_{object} とベルト速度 v_{belt} の差とする。

$$R_1 = v_{object} - v_{belt} \quad (3)$$

実験では、ロボットハンドの下方にレーザ変位計 (HL-G112-S-J, パナソニック) を設置し、ハンドが把持する物体の速度 v_{object} を取得する。なお、補正処理中は速度取得の対象から除外する。

評価値 R_2 は、物体の幅 W_{object} (実測値) と制御完了時のグリップ幅 $W_{gripper}$ により、制御時の圧縮ひずみとして式(4)により算出する。

$$R_2 = 1 - \frac{W_{gripper}}{W_{object}} \quad (4)$$

3.2 実験環境・実験条件 実験環境を図3に示す。ステレオカメラとして、表1に示す仕様のカメラを製作した。また、把持開始時に各試験片をグリップ先端でつまめる高さ(ロボット座標系 Y 軸方向)となるように、ステージを使用し調節を行った。把持物体として用いた直方体試験片のサイズと材質、および硬度の種類を表2に示す。それぞれの組み合わせにより、大きさや硬さの異なる20種類の試験片を使用した。また、試験片は、測距しやすいように表面を塗装した。各試験片に対して、3回ずつ試行を行った。

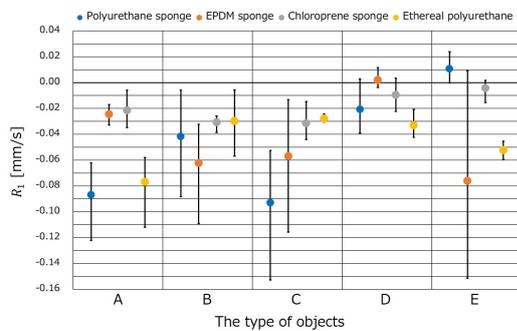
Table 1 The specification of a stereo camera

Camera dimensions (width × height × depth)	53 × 44 × 45 mm
FOV (Horizontal × Vertical)	57.0 × 46.1 deg
Sensor resolution	1255 × 986 pixel
Minimum depth distance	50 mm
Depth accuracy	less than 1 mm

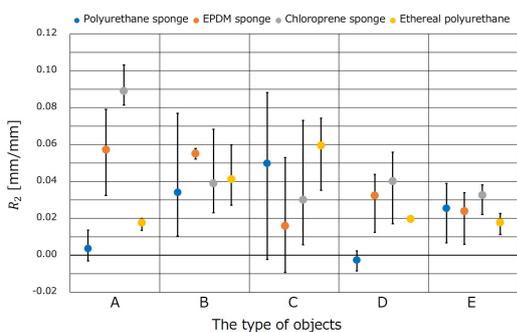
Table 2 Size and hardness of tested objects.

Type	Size [mm]		
	Width (X)	Height (Y)	Depth (Z)
A	30	20	30
B	30	30	30
C	30	20	50
D	50	20	30
E	80	30	30

Material	Hardness (HS)
Polyurethane sponge	Less than C1
EPDM sponge	C8
Chloroprene rubber sponge	C25
Ethereal polyurethane	A95



(a) The result of R_1



(b) The result of R_2

Fig. 4 The experimental results

3.3 実験結果 実験結果を図 4 に示す。結果より、全試行を通して、評価値 R_1 は平均 0.044 mm/s, R_2 は平均 0.034 mm/mm であった。

3.4 考察 各評価値に対して考察を行う。

まず評価値 R_1 に関して、実験結果より、物体を滑り落とすことなく把持し続けることができたといえる。

評価値 R_2 に関して、本実験において用いた試験片に対しては、目的を満たせる結果と考える。ただし、

食品等の崩れやすい現物の把持も考えると、より小さい把持力で掴むための処理が必要となる。実験においては、物体位置が変化してからつまめている状態と判定されるまでに最大 100 フレーム程度要していた。この間にグリッパを狭める制御は約 6 回行われており、1 mm 程度狭めすぎている。よって、より小さい力で把持するために、しきい値の最適化、また狭めすぎる場合にはグリッパ幅を広げる制御の追加を検討していく。

4. 結 論

本稿では、カメラを用いて、大きさや硬さが異なる物体をつまみ上げる制御システムを提案した。ロボットハンドには、平行 2 指グリッパからなり、各グリッパ表面にコンベアベルトを巻き付ける構成を採用した。グリッパから離れた位置にステレオカメラを設置し、把持物体の位置・姿勢・サイズの情報を取得した。ハンド動作中に画像から得られる物体情報より、物体の滑り状態や姿勢変化を検出した。実験により、種々のサイズや硬度の物体に対して、落とさず潰しすぎない適切な把持力でつまみ上げが行えたことを確認した。

今後は、パラメータ最適化やグリッパ幅の調整処理の追加、崩れやすい物体や食品等の現物への適用を検討している。

5. 謝 辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (JPNP20016) の結果得られたものです。

参 考 文 献

- (1) K. Morino *et al.*, “Sheet-based gripper featuring passive pull-in functionality for bin picking and for picking up thin flexible objects”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, Issue 2(2020), pp.2007–2014.
- (2) A. Kakogawa *et al.*, “Sensor-Less and Control-Less Underactuated Grippers With Pull-In Mechanisms for Grasping Various Objects”, *Frontiers in Robotics and AI*, Vo. 8(2021), pp.1–11.
- (3) S. Yuan *et al.*, “Design of a Roller-Based Dexterous Hand for Object Grasping and Within-Hand Manipulation”, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2020), pp.8870–8876.
- (4) T. Narita *et al.*, “Theoretical Derivation and Realization of Adaptive Grasping Based on Rotational Incipient Slip Detection”, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2020), pp.531–537.
- (5) A. Yamaguchi and C. G. Atkeson, “Tactile Behaviors with the Vision-Based Tactile Sensor FingerVision”, *Int. Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 16, No.3(2019), pp.1940002:1–1940002:40.