

ベルト搭載グリッパによる画像を使った物体のつまみ上げ制御

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}

Vision-based Picking-Up Control by Robotic Grippers with Belts

Yuzuka Isoe^{*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}

This paper presents a vision-based control to pick up an object by a robotic hand. In-hand manipulation, i.e., changing the position and orientation of the grasped object without dropping it, is a challenging task. It is important and necessary for tasks like achieving a stable grasp by translating or rotating the grasped object even though only a part of the object is grasped. However, it is difficult for soft objects like food, because the grasping force needs to be just enough to hold and manipulate the object without crushing it. To tackle this problem, we propose a system which integrates the control of the hand and object detection via a camera. The target robotic hand is configured by two parallel grippers with conveyor belts for manipulation, and is equipped only with a stereo camera as a sensor. From the camera image frames, the three-dimensional position, orientation, and size of the object are calculated. While controlling the grippers and belts, the slippage between belts and the object is estimated based on the difference between their displacements. The validity of the proposed system is verified through the experiments wherein the hand is controlled to pick up objects of varying size and softness. By experimentally evaluating whether the objects have slipped, been crushed, or been manipulated to the target position, it was confirmed that all objects could be picked up with the appropriate force without dropping or crushing them.

Key Words: Vision-based Control, In-hand Manipulation, Robotic Hand, Grasping

1. 序 論

1.1 研究背景

ロボットによる自動化の範囲を拡大するうえで必須となるスキルの一つに、ロボットハンドによるインハンドマニピュレーションが挙げられる。インハンドマニピュレーションとは、ロボットハンドで物体を把持したまま、ハンド内で物体の位置姿勢を変える動作を指す[1]。この動作の代表的な応用先として、工場や店舗作業などにおける物体のピックアンドブレース作業が挙げられる。対象とするピックアンドブレース作業の一例をFig. 1に示す。図のようにばら積みされている物体をピッキング

する場合、物体に対してハンドで掴める領域が制限されることがある。ゆえに、Fig. 1 (a) のように把持開始時には、ハンドの先端で物体をつまむ把持形態 (precision grasp) となることが考えられる。この把持形態のままロボットアームを動かして物体

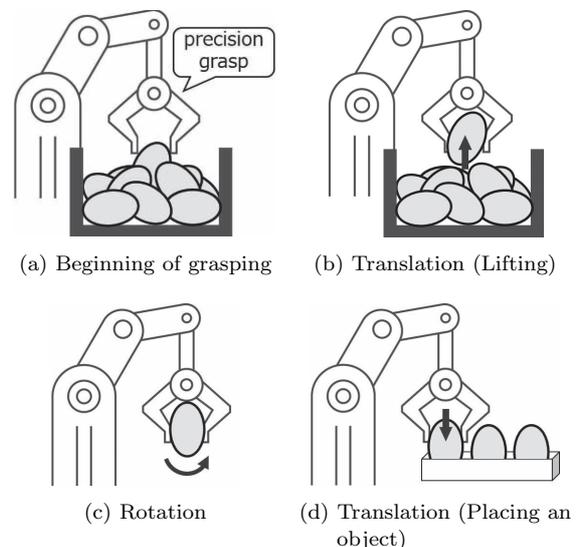


Fig. 1 Sequence of a pick-and-place motion with in-hand manipulation

原稿受付 2022年3月31日

^{*1}中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻

^{*2}中央大学理工学部精密機械工学科

^{*3}パナソニックコネクタ株式会社技術研究開発本部

^{*4}パナソニックホールディングス株式会社マニュファクチャリングイノベーション本部

^{*5}東北大学大学院情報科学研究科応用情報科学専攻

^{*1}Graduate School of Science and Engineering, Chuo University

^{*2}Faculty of Science and Engineering, Chuo University

^{*3}R&D Division, Panasonic Connect Corporation

^{*4}Manufacturing Innovation Division, Panasonic Holdings Corporation

^{*5}Graduate School of Information Sciences Applied Information Sciences, Tohoku University

■ 本論文は新規性(要素分野)で評価されました。

■ J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます。

をプレス位置まで運搬すると、把持状態が不安定で物体を落とす可能性がある。このとき、Fig. 1 (b) に示すようにハンド内に物体を引き込むことができれば、安定して把持可能な位置や姿勢とすることができる。また、パック詰めや部品嵌合など、プレス時の物体姿勢が定められている場合においては、ロボットアーム動作のみではプレス位置やプレス時に求められる姿勢を実現できなかつたり、アーム軌道が複雑になってしまう場合が考えられる。このようなケースにおいても、インハンドマニピュレーションは有効である。把持した物体の姿勢をハンド内に変換 (Fig. 1 (c)) したり、プレスする際には物体を下ろすように位置を変える (Fig. 1 (d)) ことで、アーム動作だけでは困難であった作業や動作を実現することも可能となる。なお、Fig. 1 (b) や Fig. 1 (d) のようにハンド内での物体の位置を変えたり、Fig. 1 (c) のように物体の姿勢を変える動作を総称して、インハンドマニピュレーションとよばれている。

本研究においては一連のピックアンドプレス作業の実現を目指し、その第一段階として Fig. 1 (a) から Fig. 1 (b) までの、物体をピックレハンド内に持ち上げるインハンドマニピュレーションにフォーカスする。本稿では、この動作を「つまみ上げ」とよぶ。

一方、ロボットの適用範囲の拡大のためには、剛体のみならず柔軟物を扱えることも求められる。柔軟物を扱う現場として、食品加工の現場や青果場、店舗作業などが挙げられる。これらの現場で扱う惣菜や野菜、果物などの食品をロボットで把持するためには、潰しすぎたり壊したりすることなくつかめるように把持力を調節する必要がある。また、食品の特徴として、同種の物体であってもサイズや形状が同一でない異形の物体であり、質量や硬さにも個体差があることが挙げられる。ゆえに、物体ごとに適応的に把持力を変えるロボットハンド制御が必要となる。

インハンドマニピュレーションにおいては、物体を落とさずに、任意の位置姿勢に操ることが求められる [2]。同時に、食品などの「異形」かつ「柔軟な」物体を扱う場合には、潰しすぎない力を物体ごとに適応的に加える必要がある。ゆえに、食品などの物体に対してインハンドマニピュレーションを実行するためには、下記の三つの要件を実現できる制御が必要となる。

- 要件 1 物体を落とさないこと
- 要件 2 物体を潰しすぎないこと
- 要件 3 ハンド内で物体を任意の位置姿勢に操ること

1.2 関連研究

インハンドマニピュレーションの研究においては、要件 1 および 3 にフォーカスした研究が多い。両者を実現するため、機構的に工夫したロボットハンドを用いた研究が提案されている。特に、把持物体と接触するハンド表面の形状や性状が可変な機構を用いた手法が多い。Chavan-Daffle ら [3] は操作時と安定把持時でグリッパ表面の形状を変化させるロボットハンド機構を提案している。Spiers ら [4] はグリッパ表面の性状を切り替える構造を提案し、操作状態に応じて物体とグリッパ表面との摩擦状態を変化させることで、物体操作と安定把持を両方の実現を図っている。これらの研究においては、物体操作をするのか安定把持をするのかによって、物体とハンドとの接触面積や摩擦係数を変えることでインハンドマニピュレーションを達成している。しかしながら、この機構だけでは、物体のサイズや形状に合わせて接触状態を変えることは難しい。これに対して、グリッパ先端やグリッパ全体をソフトハンド機構としたロボット

ハンドも開発されている [5] [6]。グリッパ自体を変形させて物体形状に倣うことで安定的に把持したり、逆にグリッパをあまり変形させずに把持することで位置姿勢を操りやすくしている。しかしながら、これらの機構では、操れる自由度やレンジが小さい課題がある。Tahara ら [7] はソフト材料で製作されたグリッパ先端部に対して、先端部とリンクとの関節に回転軸を設けることで自由度の高い機構構成を提案している。物体形状に合わせてグリッパを接触させることで安定把持を実現し、各グリッパの回転軸の回転方向を変えることで複数方向への位置姿勢変換を行う。ハンド先端部が回転したり、先端部にローラを搭載した手法は、Rahman ら [8] や Yuan ら [9] によっても提案されている。回転機構を用いることで高自由度かつ操作レンジの広いマニピュレーションを実現可能な構成となっている。ただし、より複雑な形状に対応するためには、Tincani ら [10] や Ma ら [11]、Kakogawa ら [12] が提案するグリッパ表面をベルトが循環する構成であったり、Morino ら [13] の開発したグリッパ表面にシート材を巻き付けた構成が有効である。これらの構成においては、グリッパ先端からグリッパ内部までベルトやシートが張り巡らされている。よって、各ベルトやシートを同一方向に動かすことで、Fig. 1 (a) から Fig. 1 (b) のようにグリッパ先端で物体をつまんで持ち上げる動作や、Fig. 1 (d) のように持ち上げた物体を下ろす動作が可能である。一方で、各ベルトやシートを逆方向に動かすことで、Fig. 1 (c) に示すように物体を回転させることも可能である。したがって、本稿でフォーカスしているつまみ上げ動作のみならず、一連のピックアンドプレス動作を行ううえで好適な構成といえる。また、これらのハンドにおいては、把持安定性を担保するために劣駆動機構を採用している。劣駆動機構では、物体の外形に沿うように受動的にハンド動作が変わるため、安定した把持を実現できる。ゆえに、青果などのサイズや形状に個体差がある物体や形状が未知な物体に対しても適用可能である。しかし、剛性が高い物体に対しては有効であるが、惣菜や柔らかい果物などの変形しやすい物体に対しては、要件 2 に挙げた潰しすぎない弱い把持力に調節することが難しいという課題がある。これは、劣駆動機構であると、把持力はグリッパの駆動源であるモータのトルクや空気圧に依存するためである。

一方で、物体把持を行う研究においては、柔軟物を潰しすぎずに安定して把持するために、表面に触覚センサを搭載したハンドが多く提案されている。触覚センサにより、ハンドの表面と物体の間の滑りを検出することで、滑りが生じない最小の力で把持することが可能となる。ゆえに、物体を落とすことなく把持可能であり、かつ物体の潰れ量は最小となるため、柔軟物把持に適している。Narita ら [14] は、グリッパ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 [15] や Ward-Cherrier ら [16] の提案するシステムにおいても、グリッパ内部のカメラによりグリッパ表面と物体の滑り状態を認識可能である。Stachowsky ら [17] の開発したシステムにおいても、触覚センサにより滑りをセンシングし、潰れやすい物体に対しても適切な力での把持が実現されている。ハンドのリンクを動作させることで把持物体を昇降する動作も行っているが、その最中にも適応的に把持力を調節できている。これらの研究は把持のみにフォーカスしており、ハンド内で物体の位置姿勢を操れるハンド機構ではないと考えられる。ゆえに、1.1 節で挙げた、要件 1 と 2 のみを実現可能な

手法といえる。要件3も実現するためには、前述のとおりベルトやシートを使った機構を用いることが望ましいが、これらの機構に対しては触覚センサを取り付けることが困難である。これは、回転するベルトやシートの全周にわたってセンサを張り巡らす必要があったり、配線が複雑化するためである。

触覚センサを使う研究に対して、カメラ画像を使用して、ロボットハンドでの把持状態を推定する手法も提案されている。Calliら[18]は2指グリッパのハンドでインハンドマニピュレーションを行っている間、物体とグリッパ関節の状態を画像から検出し、適切な把持力がかかっている状態かどうかを推定している。四つの把持状態(Stuck, Drop, Slide, Normal)を定義し、種々の機械学習手法による状態推定結果を比較している。そのほかにも、マニピュレーション中の物体の移動量を画像から算出し滑り状態を認識するシステムも研究されている[19]。このシステムにおいては、物体を把持している最中の重力による滑り状態に応じて2指グリッパの幅を調節する制御を実行している。しかし、これらの手法は、物体を把持している最中のみを想定しているため、本稿でターゲットとしている物体をピックアップする作業への適用は難しいと考えられる。

1.3 研究目的

以上より、本研究では前述の要件1~3すべてを満たすために、カメラ画像を用いてベルトを搭載したロボットハンドを制御し、食品などの異形かつ柔軟物をつまみ上げるシステムを提案する。ロボットハンドとして、グリッパ表面にベルトを巻き付けた構成の2指グリッパを用いる。センサとしてステレオカメラを用い、時系列での三次元の物体情報を取得する。ハンドの各アクチュエータを動かした際の物体情報の変化から、ハンド表面での物体の滑り状態を推定する。推定結果を用いて、落とさず潰しすぎない力で物体を把持する。提案システムの特徴は下記のとおりである。

- ハンド表面での物体の滑りを直接検出するのではなく、ハンドの各アクチュエータ動作とステレオカメラからの画像を組み合わせることで、ハンド表面での物体の滑り状態を検出する
- 滑りが生じなくなるまで把持力を加えるようにハンドを制御することで、落とさず潰しすぎない力でつまみ上げ動作を行う
- 食品など、物体ごとにサイズや形状が異なる「異形」かつ「柔軟な」物体をターゲットとし、物体の物性(サイズ・硬度・質量・摩擦係数)の情報は未知である条件での適用を目指す
- 物体を把持していない状態からつまみ、持ち上げる一連の動作を行う

2. 提案システム

2.1 動作の概要

使用するハンドの概念図をFig. 2に示す。平行2指グリッパで、各グリッパ表面をベルトが動作する構成となっている。

本稿で想定している動作をFig. 3に示す。まず、制御開始前のシーンをFig. 3(a)に示す。初期状態では、物体は山積み状態となっていることを想定する。また、このときロボットハンドは、ロボットアームなどにより物体の山の上方に位置している。なお、ハンドのグリッパは十分に広げられており、物体とハンドは接していない状態とする。ただし、グリッパを狭めることで物体と接することができる高さに位置しているものとす

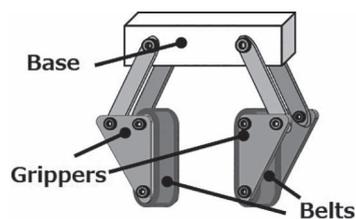


Fig. 2 Conceptual image of the hardware component used in the proposed system. Two-jaw parallel grippers with conveyor-belt surfaces are used

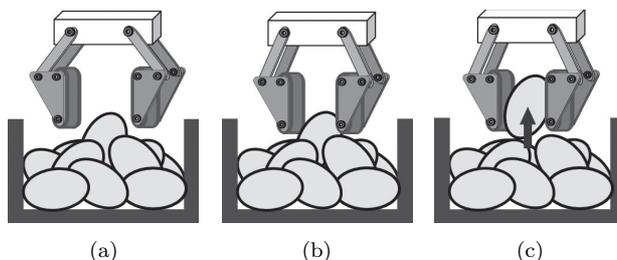


Fig. 3 The sequence of the conceptual motion targeted in this paper. (a) the initial state of the system, (b) pinching one object from a pile without breaking and dropping, (c) lifting up an object by actuating the belts

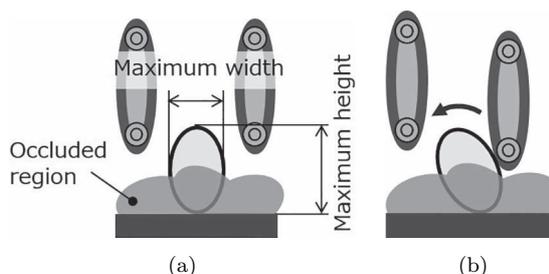


Fig. 4 The assumed condition when the system runs. The figures are illustrated from the front view. (a) initial condition when the object is partially occluded, (b) the rotation of an object when one gripper contacts

る。次に、グリッパを狭めていき、物体を落とさず潰しすぎない力でつまむ(Fig. 3(b))。最後に、Fig. 3(c)に示すように、ベルト動作により物体をハンド内まで持ち上げる。

上述の状況を想定し、本稿において、つまみ上げ動作を実施するうえでの前提条件を下記に示す。

- ロボットハンドは物体の上方に位置している状態(Fig. 3(a))とし、ロボットアームなどによりハンドを移動させる制御は本稿のスコープ外とする
- 初期状態において、周囲のほかの物体により、ターゲットとする物体が一部遮蔽されている状態も考慮する(Fig. 4(a)参照)
- ただし、初期状態において物体の最大幅は遮蔽されずに検出でき(Fig. 4(a))、持ち上げることで物体が遮蔽されなくなっても画像に写る物体幅は変化しないものとする
- 片側のグリッパのみが物体に接触した場合、周囲のほかの物体とのインタラクションにより、物体は傾くものとする(Fig. 4(b)参照)

2.2 提案システムの概要

本稿においては、1.3節で挙げたように、物体の物性情報は未知であることを前提として、制御システムの構築を行う。提案システムにおいては、画像により物体の位置姿勢を認識する

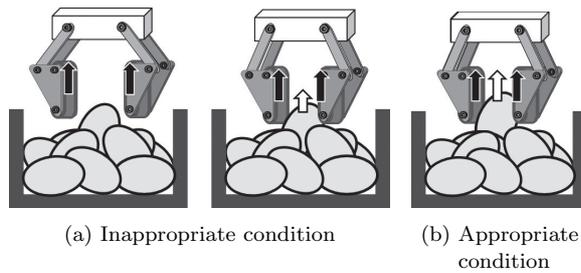


Fig. 5 The conceptual images to explain the proposed method which detects whether appropriate force is applied. Each black and white arrow show the displacement of a belt and a grasped object. The difference in the lengths of both arrows represents the slippage

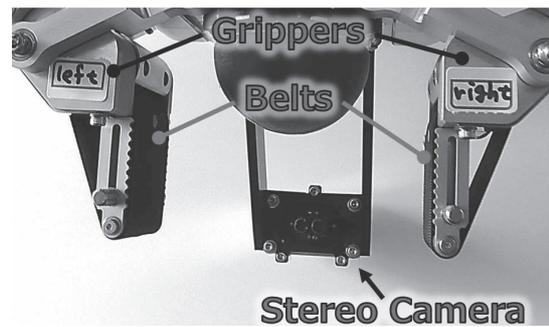
ことで、任意の位置への物体の持ち上げ動作を実現する。また、ロボットハンド表面と物体の間の滑り状態を検出することで、物体ごとに落とさず潰しすぎない適切な力での把持を行う。従来研究との差分は、触覚センサなどにより滑りを直接センシングするのではなく、ロボットハンドの各アクチュエータの動作と画像処理を組み合わせることで滑り状態を認識する点である。提案システムにおける滑り検出の概念図を **Fig. 5** に示す。Fig. 5 において、黒い矢印はベルト移動量を、白い矢印は把持物体の移動量を表している。使用するロボットハンドにおいては、グリップと物体が接触していない場合には、ベルトを巻き上げても物体は動かない (Fig. 5 (a) 左図)。また、接触していても把持力が弱すぎる場合、ベルトと物体の間には滑りが生じるため、ベルトの巻き上げ量よりも物体の移動量は小さくなる (Fig. 5 (a) 右図)。一方、Fig. 5 (b) のように滑らずに物体を持ち上げている状態であると、ベルトと物体の移動量は同等の値となることが考えられる。ゆえに、提案システムにおいては、この両者の値を比較することで滑り状態の推定を行う。ベルトと物体の間に隙間がある状態から動作を開始し、徐々にグリップを狭めていったときの滑り状態の変化を検出する。滑りが生じなくなる最初のタイミングにおいて、落とさず潰しすぎない力が加わっている状態になると仮定し、その状態となるようにグリップ位置を調節する。なお、ベルトの移動量はモータのエンコーダ値より算出し、物体の移動量はカメラ画像により取得する。

2.3 ハードウェア構成

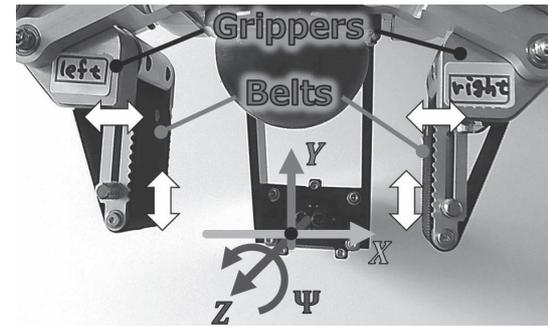
本研究において製作したロボットハンドを **Fig. 6 (a)** に示す。ロボットハンドは平行リンク機構からなる2指グリップで構成される。各グリップ表面にはコンベアベルトを巻き付けている。ベルトは、モータによりグリップ表面を滑りながら移動する構成である。なお、各グリップ、各ベルトはそれぞれ独立したモータにより動作する。また、**Fig. 6 (b)** は提案システムで用いるロボット座標系を示す。図中の白の矢印はそれぞれ、各グリップおよび各ベルトの動作方向を表す。グリップは X 軸方向に、ベルトは Y 軸方向に動作する。このハンドにより把持された物体は、図の X 、 Y 軸方向、および Ψ 方向 (Z 軸回り) に動かすことができる。

また、提案システムにおいては、ステレオカメラを使用する。カメラはハンドと正対し、ハンドの手中を撮影可能な位置に設置する。2.4 節で後述する物体検出処理により、カメラ画像から下記の物体情報を取得する。

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

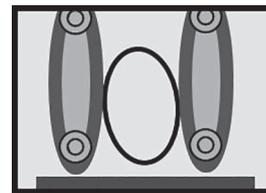


(a) The robotic hand used in the proposed system

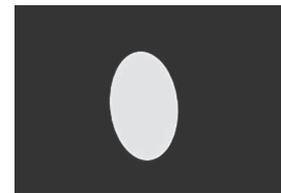


(b) The coordinate system. The white arrows show the degrees of freedom of grippers and belts respectively

Fig. 6 The robotic hand used in this system and coordinate system for control



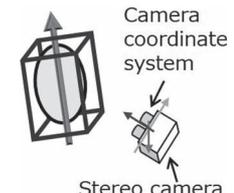
(a) Captured image



(b) Extraction of the object region



(c) Result of PCA



(d) Calculation of 3D information on the camera coordinate system

Fig. 7 The procedure from capturing an image to calculate 3D information of an object. The three arrows in (c) indicate the first, second, and third directions of the PCA result. The bounding box of the object is described as a cuboid

2.4 物体検出を行う画像処理

提案システムでは、ステレオカメラを用いて、物体の三次元情報を算出する。

画像からの物体検出および三次元情報の算出について、**Fig. 7** に図示する。まず取得されたカメラ画像 (Fig. 7) に対して、HSV 色情報を使ってしきい値処理を行い、物体の候補となる領域を抽出する。このとき、画像中で最大の大きさを持つ領域を物体領域とする。物体領域の抽出結果、**Fig. 7 (b)** に示す画像が取得される。物体領域に対して、ステレオカメラから得られる三次元情

報を用いて、ポイントクラウドを作成する。処理の高速化とノイズ除去のために、ポイントクラウドをボクセル化する。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 (Principal component analysis, PCA) を行う。PCA の結果、Fig. 7(c) のように、第1~第3主成分を抽出する。各方向に対するボクセル群の広がりをもとに1辺の長さとしたバウンディングボックスを作成し、下記の値を算出する (Fig. 7(d)).

- ・位置: バウンディングボックスの中心座標
- ・姿勢: 各主成分がカメラ座標系各軸となす角
- ・サイズ: バウンディングボックスの各辺の長さ

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 (Fig. 6(b)) に変換し出力する。また、ロボット座標系 X 軸となす角度の絶対値が最も小さくなる主成分を、物体の幅方向を示す成分として定義し、その成分に関する姿勢情報が出力される。なお、物体情報は三次元で算出されるため、それぞれ三つの値が出力されるが、本稿で用いるのは 2.3 節で前述したとおり、位置 x および y 、姿勢 ψ 、サイズ w 、 h のみである。また、上記の処理は、制御フェーズによらず毎フレーム実行する。

2.5 物体のつまみ上げ制御

提案システムの処理フローを Fig. 8 に示す。提案システムは、アプローチ (Approach)、つまみ (Pinch)、補正 (Correct)、持ち上げ (Lift) の4フェーズからなる。Fig. 8 中で、各フェーズに対応する処理を点線で囲っている。まず、アプローチフェーズにおいては、グリッパを物体に接触しない程度に近づける。次に、つまみフェーズにおいて、ハンドの各アクチュエータを動かしながら、画像により物体とハンドの間の滑りを検出する。滑りが検出されなくなる最初の瞬間を、物体を落とさず潰しすぎない適切な力で把持できている状態と仮定し、全アクチュエータを停止する。その後、補正フェーズにおいて、再度ベルトを動かし、画像から得られる物体情報を基に、滑りや傾きが生じて

いないか把持状態を確認する。適切な把持状態となったら、持ち上げフェーズに移行する。持ち上げフェーズにおいては、物体を目標位置まで持ち上げる制御を行う。持ち上げ中にも滑りや傾きを検出し、都度補正処理を行う。画像中で物体が目標位置まで到達したことが確認されたら、つまみ上げ完了とする。各フェーズにおける処理について詳述する。

2.5.1 アプローチフェーズ

アプローチフェーズにおいては、グリッパを物体に近づける処理を行う。

画像から得られる物体の位置、姿勢、サイズの情報に基づき、各グリッパを物体の近くまで移動させる。左右のグリッパ目標位置 g_{left} 、 g_{right} をそれぞれ次式により算出する。

$$g_{left} = x - \frac{1}{2}(|w \cos \psi| + |h \sin \psi|) - \alpha$$

$$g_{right} = x + \frac{1}{2}(|w \cos \psi| + |h \sin \psi|) + \alpha$$
(1)

ここで、 x は物体の X 軸方向の位置、 w および h は物体サイズ (幅、高さ)、 ψ は物体の姿勢 (Ψ 方向) を表し、これらの値はすべて画像処理により算出される (2.3 節および 2.4 節参照)。また、 α は固定値であり、グリッパと物体の間のクリアランス量を示す正の実数である。この α により、アプローチフェーズ完了時には、ベルトと物体は接触せず隙間があいている状態となる。

2.5.2 つまみフェーズ

つまみフェーズにおいては、落とさず潰しすぎない適切な力での物体の把持を行う。

まず、ベルトを一定速度 v_t で巻き上げる。上述のとおり、本フェーズ開始時には、ベルトと物体は接触していないため、ベルトを巻き上げても物体位置は変わらない。その状態から、時間 Δ_t ごとに、グリッパを $\delta_{gripper}$ 分だけ段階的に狭めていく。このとき、 Δ_t の間のベルト移動量 d_{belt} と物体移動量 d_{object} を算出する。

$$d_{belt} = v_t \Delta_t,$$
(2)

$$d_{object} = y_t - y_{t-\Delta_t} + \frac{1}{2}(h_t \cos \psi_t - h_{t-\Delta_t} \cos \psi_{t-\Delta_t}).$$
(3)

ここで、 y_t および $y_{t-\Delta_t}$ 、 h_t および $h_{t-\Delta_t}$ 、 ψ_t および $\psi_{t-\Delta_t}$ は、それぞれ各時刻における物体の Y 軸方向の位置 y 、物体の高さ h 、 Ψ 方向の物体姿勢 ψ を表しており、これらの値はすべて画像処理により算出される (2.3 節および 2.4 節参照)。なお、物体移動量 d_{object} の算出においては、式中に物体の高さ情報 h_t および $h_{t-\Delta_t}$ が含まれる。これは、Fig. 4(a) で示したように、物体が遮蔽される状況を想定しているためである。物体を持ち上げることで遮蔽領域が変わり、検出される物体高さが変化することを考慮し、時間 Δ_t の前後での高さ情報を式に入れている。また、物体が傾くことも想定し、姿勢 ψ_t および $\psi_{t-\Delta_t}$ も用いて、物体移動量 d_{object} を算出している。

ここで、ベルトは常に一定速度で巻き上げ続けているため、グリッパと物体が接触すると物体位置は変化する。ベルトと物体の間に滑りが生じていれば、ベルト移動量 d_{belt} は物体移動量 d_{object} よりも大きくなり、滑りが生じなくなる状態では、両者は同等の値となると考えられる。そこで、両者の差分をベルトと物体の間の滑り量 δ_{slip} と定義する。

$$\delta_{slip} = d_{belt} - d_{object}$$
(4)

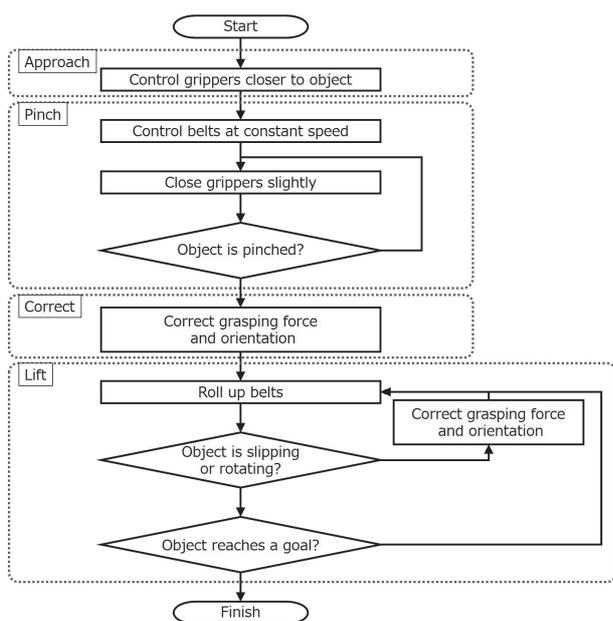


Fig. 8 The flow chart of the system. The flow is divided by dotted lines into four phases; Approach, Pinch, Correct and Lift

Δ_t ごとに δ_{slip} を算出し、各グリッパ位置での滑り状態を推定する。 δ_{slip} の値が大きい場合は、グリッパを $\Delta_{gripper}$ 分だけ狭める制御を行う。グリッパを狭めたら、再度時間 Δ_t での滑り状態を推定する。このように、グリッパ幅の制御と滑り状態の推定を交互に繰り返すことで、段階的にグリッパを狭めていく。 δ_{slip} があらかじめ設定したしきい値以下となった最初のタイミングにおいて、落とさず潰しすぎない力で把持できていると仮定する。そのタイミングにおいて、すべてのアクチュエータの制御を一旦停止し、本フェーズ完了とする。

ただし、グリッパを狭めている間に、片側のグリッパのみが先に物体に接触することも考えられる (Fig. 4 (b) 参照)。そこで、本フェーズ開始時からの物体姿勢 ψ の変化も算出する。姿勢変化量が大きい場合には、いったん全アクチュエータを停止し、接触しているほうのグリッパのみを開いていき、姿勢を元の状態に戻す。元の姿勢に戻ったら、ベルトとグリッパの動作および滑り状態の推定を再開するが、その際傾きを生じさせないために、接触していない側のグリッパのみを狭めていく処理を行う。

2.5.3 補正フェーズ

補正フェーズにおいては、滑りや傾きが生じていないか把持状態の確認を行う。

まず、つまみフェーズ完了後の状態から、ベルトを一定量 Δ_{belt} だけ動かす。ベルト動作前後での物体の位置変化 $\delta_{position}$ と姿勢変化 $\delta_{orientation}$ を画像処理結果より算出する。

$$\delta_{position} = y_t - y_{t-1} + \frac{1}{2}(h_t \cos \psi_t - h_{t-1} \cos \psi_{t-1}) \quad (5)$$

$$\delta_{orientation} = \psi_t - \psi_{t-1} \quad (6)$$

ここで、 y_t および y_{t-1} 、 h_t および h_{t-1} 、 ψ_t および ψ_{t-1} は、それぞれ各時刻における物体の Y 軸方向の位置 y 、物体高さ h 、 Ψ 方向の物体姿勢 ψ を表しており、これらの値はすべて画像処理により算出される (2.3 節および 2.4 節参照)。

算出した結果、ベルト移動量 Δ_{belt} と物体移動量 $\delta_{position}$ の差分が大きいき、把持力が弱く物体が滑っている状態と判断できる。そこで、グリッパ幅を再度微量 $\Delta_{gripper}$ だけ狭める制御を行い、把持力を強める。

また、ベルト動作前後での物体の姿勢変化 $\delta_{orientation}$ が大きいきには、左右のベルトを逆方向に動かすことで姿勢を補正する。姿勢補正のための左右のベルトの制御量 b_{left} および b_{right} は次式により計算する。

$$\begin{aligned} b_{left} &= \beta(g_{right} - g_{left})|\tan \psi_t - \tan \psi_{t-1}| \\ b_{right} &= -b_{left} \\ \beta &= \begin{cases} 1 & (\delta_{orientation} \geq 0) \\ -1 & (\delta_{orientation} < 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 g_{left} および g_{right} は現在のグリッパ位置であり、モータのエンコーダ値から算出される。 ψ_t と ψ_{t-1} はベルト動作前後での Ψ 方向の物体の姿勢 ψ であり、画像処理により取得される。各種補正の実施後は再度ベルトを一定量 Δ_{belt} だけ動かす。ベルト移動量 Δ_{belt} と物体移動量 $\delta_{position}$ の差分とベルト動作前後での物体の姿勢変化 $\delta_{orientation}$ がしきい値以下となったら、補正フェーズ完了とする。

2.5.4 持ち上げフェーズ

持ち上げフェーズにおいては、任意の目標位置まで物体を持ち上げる制御を行う。

現在の物体位置とあらかじめ与えられた目標位置の差分により、P 制御を用いてベルトの速度制御を実行する。左右のベルトの速度 v_{left} および v_{right} は下記の式により算出する。

$$v_{left} = v_{right} = K_p \left\{ y_{goal} - \left(y_t - \frac{h_t}{2} \right) \right\} \quad (8)$$

ここで、 K_p は P ゲインであり、 y_{goal} は物体の目標位置である。また、 y_t と h_t は、それぞれ Y 軸方向の物体位置と物体の高さを示しており、画像処理結果から取得される。なお、本稿における持ち上げ制御では、物体の底面の目標位置を与えている。ゆえに、物体サイズによらず物体底面が、ロボット座標系 Y 軸上で同じ位置となるように制御を実行するため、物体の高さ h_t が式中に含まれる。

ベルト制御により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。滑りや傾きが生じている場合は、ベルトを一旦停止し、補正フェーズの処理を行う。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。

3. 提案システムの評価

3.1 評価値

本章で行う実験の評価方法を詳述する。実験においては、ターゲットの物体や実現したい動作を考慮し、下記の観点でシステムの妥当性を評価する。

- 物体を滑り落とすことなく把持する
- 物体を潰しすぎることなく把持する
- 物体を目標位置まで持ち上げる

上記三つの観点に対して、それぞれ以下に示す方法で評価値 $err_{velocity}$ 、 ϵ 、 $err_{position}$ を取得し評価を行う。

3.1.1 評価値 $err_{velocity}$

提案システムによる制御中に、物体がハンド上を滑り落ちていないかを判断するための指標として、評価値 $err_{velocity}$ を用いる。 $err_{velocity}$ は、補正フェーズ完了後から持ち上げフェーズ完了時までの、ベルト速度 v_{belt} と物体速度 v_{object} の差として下記の式で定義する。

$$err_{velocity} = v_{object} - v_{belt} \quad (9)$$

ここで、 v_{belt} はモータのエンコーダ値から算出する。また、実際の物体速度 v_{object} を取得する方法について詳述する。物体速度の取得のために、Fig. 9 に示すように、レーザ変位計 (HL-G112-S-J, パナソニック) を使用する。なお、Fig. 9 は、ロボットハンドにより物体をつまんでいる状態を下方から撮影した図である。ロボットハンドの下方に、レーザ変位計を設置し、ハンドが把持する物体の距離を時系列で測定する。取得した距離データと変位計のサンプリングレートから物体速度 v_{object} を算出する。なお、持ち上げフェーズにおいて、補正処理をしている間は、速度算出の対象から除外する。

3.1.2 評価値 ϵ

提案手法において、物体を必要以上に潰してしまっていないかを判定するために評価値 ϵ を定義する。 ϵ は、物体の幅 W_{object} と持ち上げ制御完了後の左右のグリッパ位置 g_{left} 、 g_{right} を用いて、圧縮ひずみとして次式により算出される。



Fig. 9 The setup used for data collection to evaluate metrics. The laser displacement sensor measures the position of a grasped object from below

$$\epsilon = 1 - \frac{g_{right} - g_{left}}{W_{object}} \quad (10)$$

なお、 W_{object} は実験前にノギスにより物体の幅を実測した値を使用し、各グリッパ位置はモータ搭載のエンコーダから取得した値を基に算出する。

3.1.3 評価値 $err_{position}$

任意の位置への持ち上げ動作が実現されているかを判断するために評価値 $err_{position}$ を算出する。 $err_{position}$ は、あらかじめ与えられる物体の目標位置 y_{goal} とつまみ上げ完了後の物体位置 y_{object} の差分として表される。

$$err_{position} = y_{goal} - y_{object} \quad (11)$$

なお、物体位置 y_{object} は、持ち上げフェーズ完了後に 3.1.1 項と同様にロボットハンド下方からレーザ変位計を用いて測定する。

3.2 評価値 ϵ の基準値取得

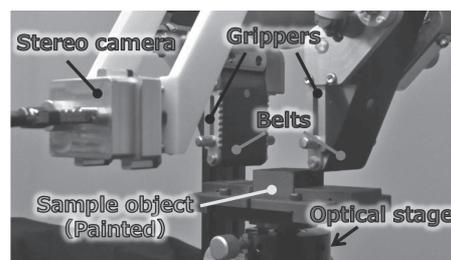
評価値 ϵ の妥当性を確認するために、落とさず潰しすぎない力で把持しているときのひずみ値との比較を行いたい。ただし、本研究で使用するロボットハンド (Fig. 6) はグリッパ表面をベルトが滑りながら移動する構成であるため、実験用途であったとしても接触センサ等をベルト表面に搭載することが難しい。そこで、把持した物体を滑り落とす直前でのひずみ値を、落とさず潰しすぎない力で把持しているときのひずみ値として算出する。このひずみ値を評価値 ϵ の基準値とよび、実験時の評価値 ϵ と基準値を比較し、提案システムの妥当性を検証する。

以下の方法にて、評価値 ϵ の基準値を取得する。まず、手入力でグリッパを制御し、物体を把持させる。このとき、物体が落ちない状態とするために、目視で物体の潰れ具合を確認し、潰しすぎる程度までグリッパを狭める。次に、把持している状態から各グリッパを 0.01 [mm] ずつ開く。物体を落とすまでグリッパを開いていき、物体が落ちる直前のグリッパ位置からグリッパ幅 W_{std} を算出する。実験結果の評価値 ϵ に対する基準値として、下記の値 ϵ_{std} を計算する。

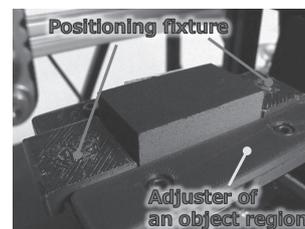
$$\epsilon_{std} = 1 - \frac{W_{std}}{W_{object}} \quad (12)$$

4. 実験

提案システムを用いて、サイズや硬さが異なる物体をつまみ



(a) External appearance



(b) The fixture and adjuster. These can position a sample object and adjust the height of its region in an image

Fig. 10 Experimental setup

Table 1 The specification of the stereo camera

Camera dimensions (width × height × depth)	53 × 44 × 45 [mm]
FOV (Horizontal × Vertical)	57.0 × 46.1°
Sensor resolution	1,255 × 986 [pixel]
Minimum depth distance	50 [mm]

上げる実験を行い、妥当性を評価した。

4.1 実験条件

実験環境を Fig. 10 に示す。ステレオカメラとして、Table 1 に示す仕様のカメラを製作した。なお、平行リンク機構のハンドであるため、グリッパ幅によってグリッパ先端の高さ（ロボット座標系 Y 軸方向）が異なる。試験片の幅によらず、試験片とハンドの高さ関係を一致させるために、ステージを使用し試験片の初期位置を調節した。また、試験片の初期位置は、試験片上面とグリッパ先端が接触する程度の高さとした。ただし、ステージ高さを変更することで、カメラ画像中での試験片の高さ方向の見え方が異なってしまう。そこで治具により試験片を遮蔽することで、制御開始前に試験片が画像に写る高さを統一した。高さ方向以外の試験片位置も、治具により位置決めを行った (Fig. 10 (b))。また、評価値 $err_{velocity}$ や $err_{position}$ を取得するために、補正フェーズ完了後にステージを移動し、把持している試験片の下方にレーザ変位計を設置した。把持物体として用いた試験片のサイズと材質、および硬度の種類を Table 2 に示す。なお、硬度は、ショア硬さ (HS) により表している。表中の上三つの材料は柔らかいスポンジ材料であり、食品把持への適用を鑑みて選定した。また、最下部の材料は、硬度の高い樹脂ブロックとした。これは、惣菜や果実などの柔らかい物体のみならず、硬い青果などの把持を考慮し選定を行った。また、各試験片の質量を Table 3 に示す。それぞれのサイズ、硬度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。試験片は、測距しやすいようにカメラと正対する面を塗装した。

また、実験において設定した、各パラメータ値を Table 4 に示す。このパラメータを用いて提案システムを実行し、各試験

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

Table 3 Mass [g] of tested objects

	A	B	C	D	E
Polyurethane sponge	0.4	0.7	0.7	0.7	1.6
EPDM sponge	2.0	3.1	3.2	3.3	7.8
Chloroprene rubber sponge	3.7	5.5	6.7	6.4	14.7
Ethereal polyurethane	20.6	30.7	34.3	34.3	82.0

Table 4 The values of the parameters used in the proposed system

Parameters	value
α	0.75 [mm]
Δt	1.0 [s]
$\Delta_{gripper}$	0.1 [mm]
v_t	1.0 [mm/s]
Δ_{belt}	2.0 [mm]
K_p	0.25
y_{goal}	27.1 [mm]

片に対して、5回ずつ試行を行った。

4.2 提案手法による実験結果

実験結果を **Fig. 11** に示す。なお、評価値 ϵ については基準値 ϵ_{std} もプロットしている。

また、提案システムによる制御の様子を **Fig. 12** に示す。Fig. 12 (a)~12 (c) は初期状態、Fig. 12 (d)~12 (f) は補正フェーズ完了時、Fig. 12 (g)~12 (i) は持ち上げフェーズ完了時の状態を撮影した。結果より、全試験片、全試行を通して、評価値 $err_{velocity}$ は ± 0.19 [mm/s] 以内、 ϵ は 0.085 [mm/mm] 未満、 $err_{position}$ は ± 1.9 [mm] 以内であった。

4.3 考察

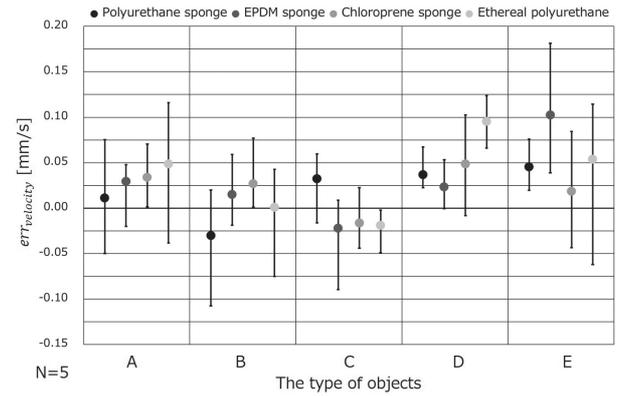
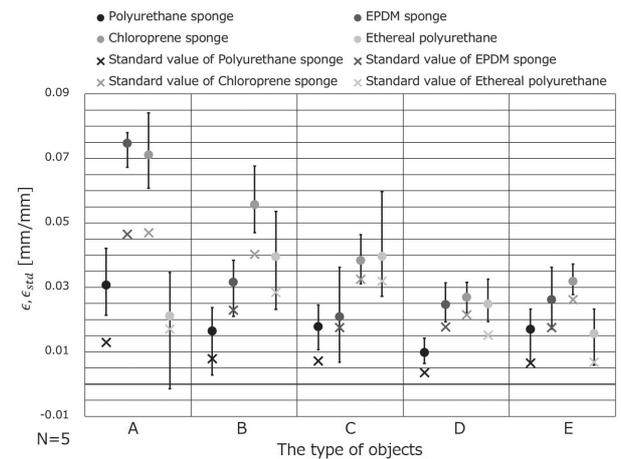
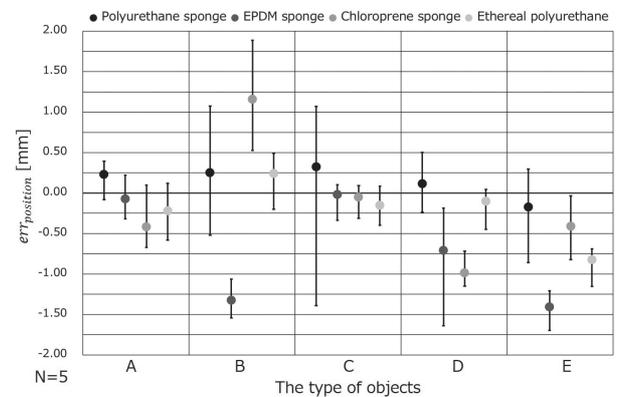
各評価値に対して考察を行う。

まず、評価値 $err_{velocity}$ について考察する。この評価値については、値が 0 に近いほど滑りが生じていない状態を示している。Fig. 11 (a) より、提案システムを用いて、滑り落とすことなく把持できたと判断できる。値のばらつきは、黒色のスポンジ材料や透明がかった樹脂ブロックを用いたことによるレーザー変位計の測定誤差や、ベルト速度を取得するタイミングによって生じる誤差によるものと考えられる。

次に、評価値 ϵ に関しては、基準値 ϵ_{std} との比較を行う。各試験片に対する評価値 ϵ と基準値 ϵ_{std} の差分である Δ_ϵ を算出した結果 (平均値) を **Table 5** に示す。

$$\Delta_\epsilon = \epsilon - \epsilon_{std} \quad (13)$$

Table 5 より、基準値に対して提案システムでは $0.3\sim 2.8\%$ 程度、試験片を潰しすぎている結果となっていた。特に、スポンジ材料であるポリウレタンスポンジ、EPDM スポンジ、クロロプ

(a) The result of $err_{velocity}$ (b) The result of ϵ (c) The result of $err_{position}$ **Fig. 11** The experimental results

レンゴムスポンジにおいては、最もサイズの小さい試験片 (タイプ A) に対して、 $1.8\sim 2.8\%$ 程度ひずみが超過していた。タイプ A の試験片は、試験片の幅が 30 [mm] であるため (Table 2 参照)、上記の試験片に対しては $0.55\sim 0.85$ [mm] 程度潰しすぎていることが分かる。潰し量としては十分小さい値であるといえるが、より弱い力で把持するために、この結果に対して考察を行う。要因として、下記の二つが考えられる。

要因 1 つまみフェーズにおいてグリッパを段階的に狭める量 $\Delta_{gripper}$ が大きすぎた

要因 2 サイズが小さいため、画像中での物体領域が小さく、取得された 3D 情報の精度が低かった

まず、提案手法においては、把持力を上げるための動作として

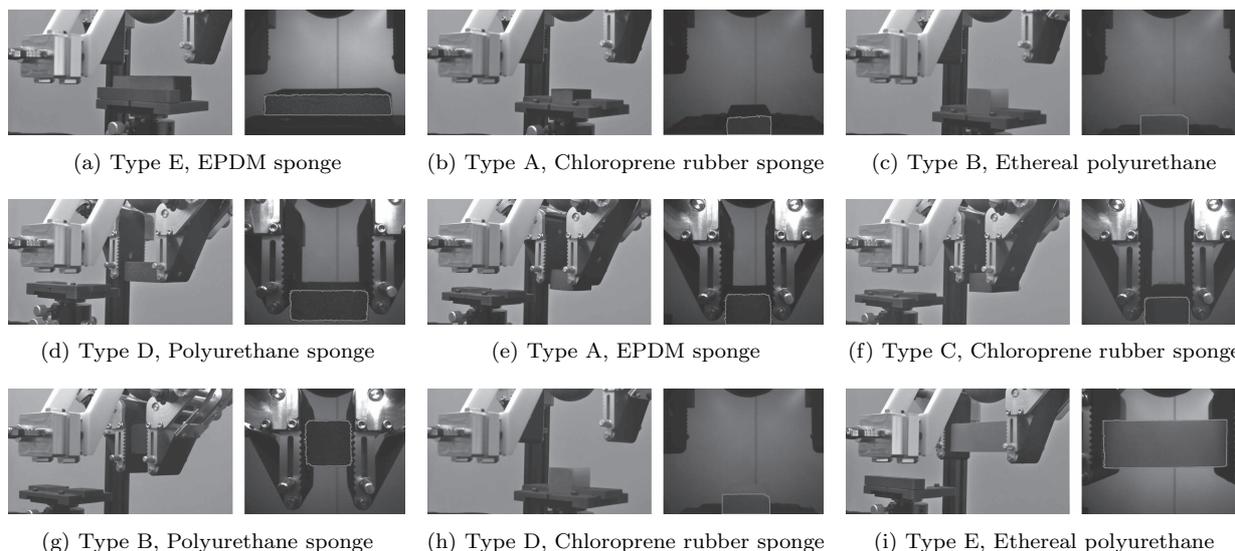


Fig. 12 The experimental results. Each left-side image shows external appearance, and in right-side one, a line enclosing the contour of a tested sample depicts the result of object detection. Figures on each row were captured before *Approach* phase or after *Correct* or *Lift* phase, respectively

Table 5 The result of $\Delta\epsilon$; comparison of the result of ϵ with that of ϵ_{std}

	A	B	C	D	E
Polyurethane sponge	0.018	0.009	0.012	0.006	0.012
EPDM sponge	0.028	0.009	0.003	0.007	0.009
Chloroprene rubber sponge	0.024	0.015	0.006	0.005	0.006
Ethereal polyurethane	0.004	0.011	0.006	0.01	0.009

一定量 $\Delta_{gripper}$ ずつ段階的に各グリッパを狭めている。実験において、 $\Delta_{gripper}$ の値が大きすぎたことが、上記の試験片を潰しすぎた原因として考えられる。 $\Delta_{gripper}$ が大きい場合、たとえ狭める処理が数回しか行われていなくても、大きな把持力が生じてしまうことが考えられる。タイプ A の試験片は同じ材料のほかの試験片に対して軽い (Table 3 参照) ため、大きな把持力をかける必要はない。しかし、試験片サイズが小さいため画像処理の誤差が大きく、グリッパを狭める回数が必要以上に多くなってしまったことが考えられる。そこで、より弱い力で把持するために、グリッパを位置制御により段階的に狭めるのではなく、速度制御にすることを検討する。また、画像処理の誤差を考慮し、つまみフェーズ完了後に少し持ち上げることで画像中の物体領域を大きくした後に、グリッパ幅を広げる制御を追加することで、より弱い力での把持を実現することを検討している。

また評価値 $err_{position}$ については、ばらつきが大きい結果となった。これは、主にステレオカメラによる 3D 計測誤差が原因である。用いた試験片においては、カメラと正対する面を塗装したが、塗装面はテクスチャの少ない状態となっていた。ただ、食品などの現物は、実験における試験片よりもテクスチャのある物体が多いと考えられる。今後は現物での実験を行うことで、現在のステレオカメラや計測手法が妥当であるかを判断していきたい。また、本実験においては、持ち上げる目標位置は、あらかじめ与えられた固定の位置としていた。今後は、物体のサイズや形状に対して、どの位置まで持ち上げれば安定した把持となるか、また今回扱わなかった物体の姿勢を変える制御のためにはどこまで持ち上げる必要があるか等を考慮して、目標位

置の決め方を検討していく。

5. 結論と今後の展望

本稿では、ベルトを搭載したロボットハンドをカメラ画像を用いて制御し、食品などの異形かつ柔軟物をつまみ上げるシステムを提案した。ロボットハンドとして、グリッパ表面にベルトを巻き付けた構成の平行 2 指グリッパを使用した。センサとしてステレオカメラを用い、三次元の物体情報 (位置・姿勢・サイズ) を取得した。ベルト移動量と物体移動量を比較し、ハンド表面での物体の滑り状態を推定した。推定結果を用いて、滑りが生じなくなるまで把持力を加えるようにロボットハンドを制御することで、落とさず潰しすぎない状態での把持を実現した。また、取得した物体情報を用いて各グリッパを物体に近づけるアプローチフェーズ、滑り状態を推定することで把持力を調節するつまみフェーズ、滑りや物体の傾きを補正する補正フェーズ、および目標位置まで物体を移動させる持ち上げフェーズからなる制御システムを構築した。実験により、5 種類のサイズ、4 種類の硬度の物体に対して、落とさず潰しすぎない力でつまみ、目標位置まで持ち上げる動作を行えたことを確認した。

今後は、より弱い力での把持を実現するために、把持力調整制御の修正や、つまんだ後にグリッパを開いて把持力を微調整する処理の追加を検討している。また、食品などの崩れやすい現物に対しての実験も実施していきたい。さらに、ピックアンドプレースの一連動作の実現のために、把持した物体の姿勢を変える制御や物体をプレースする制御についても検討していく。

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] A. Bicchi: "Hands for Dexterous Manipulation and Robust Grasping: A Difficult Road Toward Simplicity," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.16, no.6, pp.652-662, 2000.
 [2] A.M. Okamura, N. Smaby and M.R. Cutkosky: "An Overview of Dexterous Manipulation," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.255-262, 2000.

- [3] N. Chavan-Dafle, K. Lee and A. Rodriguez: "Pneumatic Shape-shifting Fingers to Reorient and Grasp," Proc. of Int. Conf. on Automation Science and Engineering, pp.988–993, 2018.
- [4] A.J. Spiers, B. Calli and A.M. Dollar: "Variable-Friction Finger Surfaces to Enable Within-Hand Manipulation via Gripping and Sliding," IEEE Robotics and Automation Letters, vol.3, no.4, pp.4116–4123, 2018.
- [5] J. Amend and H. Lipson: "The JamHand: Dexterous Manipulation with Minimal Actuation," J. of Soft Robotics, vol.4, no.1, pp.70–80, 2017.
- [6] J. Zhou, J. Yi, X. Chen, Z. Liu and Z. Wang: "BCL-13: A 13-DOF Soft Robotic Hand for Dexterous Grasping and In-Hand Manipulation," IEEE Robotics and Automation Letters, vol.3, no.4, pp.3379–3386, 2018.
- [7] K. Tahara, K. Maruta and M. Yamamoto: "External Sensor-less Dynamic Object Manipulation by a Dual Soft-Fingered Robotic Hand with Torsional Fingertip Motion," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4309–4314, 2010.
- [8] N. Rahman, L. Carbonari, M. D'Imperio, C. Canali, D.G. Caldwell and F. Cannella: "A Dexterous Gripper For In-Hand Manipulation," Proc. of IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.377–382, 2016.
- [9] S. Yuan, A.D. Epps, J.B. Nowak and J.K. Salisbury: "Design of a Roller-Based Dexterous Hand for Object Grasping and Within-Hand Manipulation," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.8870–8876, 2020.
- [10] V. Tinca, G. Grioli, M.G. Catalano, M. Garabini, S. Grechi, G. Fantoni and A. Bicchi: "Implementation and Control of the Velvet Fingers: a Dexterous Gripper with Active Surfaces," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2744–2750, 2013.
- [11] R.R. Ma and A.M. Dollar: "In-Hand Manipulation Primitives for a Minimal, Underactuated Gripper with Active Surfaces," Proc. of ASME Int. Design Engineering Technical Conf. and Computers and Information in Engineering Conf., pp.1–7, 2016.
- [12] A. Kakogawa, Y. Kaizu and S. Ma: "Sensor-Less and Control-Less Underactuated Grippers with Pull-In Mechanisms for Grasping Various Objects," Frontiers in Robotics and AI, vol.8, pp.1–11, 2021.
- [13] K. Morino, S. Kikuchi, S. Chikagawa, M. Izumi and T. Watanabe: "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, no.2, pp.2007–2014, 2020.
- [14] T. Narita, S. Nagakari, W. Conus, T. Tsuboi and K. Nagasaka: "Theoretical Derivation and Realization of Adaptive Grasping Based on Rotational Incipient Slip Detection," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.531–537, 2020.
- [15] A. Yamaguchi and C.G. Atkeson: "Tactile Behaviors with The Vision-based Tactile Sensor FingerVision," J. of the Humanoid Robotics, vol.16, no.3, pp.1940002-1–1940002-40, 2019.
- [16] B. Ward-Cherrier, N. Rojas and N.F. Lepora: "Model-Free Precise in-Hand Manipulation with a 3D-Printed Tactile Gripper," IEEE Robotics and Automation Letters, vol.2, no.2, pp.2056–2063, 2017.
- [17] M. Stachowsky, T. Hummel, M. Moussa and H.A. Abdullah: "A Slip Detection and Correction Strategy for Precision Robot Grasping," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.21, no.5, pp.2214–2226, 2016.
- [18] B. Calli, K. Srinivasan, A. Morgan and A.M. Dollar: "Learning Modes of Within-hand Manipulation," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3145–3151, 2018.
- [19] F.E. Vina B., Y. Karayiannidis, K. Pauwels, C. Smith and D. Kragic: "In-hand manipulation using gravity and controlled slip," Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.5636–5641, 2015.



磯邊柚香 (Yuzuka Isobe)

2016年中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年パナソニック株式会社入社。2021年中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻博士課程入学。2022年よりパナソニックコネクスト株式会社に転籍。画像認識を使ったロボットアームやロボットハンド制御の研究開発に従事。

(日本ロボット学会正会員)



梅田和昇 (Kazunori Umeda)

1989年東京大学工学部精密機械工学科卒, 1994年同博士課程修了。同年中央大学理工学部精密機械工学科専任講師, 1998年より同助教授, 2006年より同教授, 現在に至る。2003~2004年カナダNRC Visiting Worker, 2007~2009年文部科学省学術調査官。ロボットビジョン, 画像処理の研究に従事。画像の認識・理解シンポジウム 2004 MIRU 長尾賞, 画像センシングシンポジウム優秀学術賞など受賞。博士(工学)。精密工学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEE等の会員。

(日本ロボット学会正会員)



松山吉成 (Yoshinari Matsuyama)

2008年立命館大学理工学研究科修士課程情報システム学専攻修了。同年パナソニック株式会社に入社。2022年よりパナソニックコネクスト株式会社に転籍。水中ロボット, 吸着走行ロボットの研究開発, EVバイクのバッテリー交換ステーションの開発および海外での事業実証立上げに従事。



Sarthak Pathak

2014年9月にDepartment of Engineering Design, Indian Institute of Technology Madrasで学士・修士を取得。2017年9月東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻で博士(工学)を取得。学位取得後, 同専攻で特任研究員, 日本学術振興会特別研究員, 特任助教として勤め, 2021年4月より中央大学理工学部精密機械工学科助教。ロボットのため広視野カメラの画像処理や知的センサ情報処理による位置姿勢推定および環境の3次元測定の研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)



橋本裕介 (Yusuke Hashimoto)

2002年岡山大学大学院自然科学研究科機械システム工学専攻修士課程修了。同年に三洋電機株式会社に入社。2015年よりパナソニック株式会社に転籍し, スピーカ設計開発や生産技術系業務を経て, 2020年よりロボットビジョン用の小型カメラの開発に従事。現在はパナソニックコネクスト株式会社に所属し, ピッキングロボットに関する開発に従事。



松田 卓 (Taku Matsuda)

1991年関西大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年パナソニック株式会社に入社。2022年よりパナソニックコネクスト株式会社に転籍。IP高速通信技術研究開発, デジタルテレビのネットワーク開発, 有機ELパネルのTCO開発, およびロボットの制御開発に従事。



金田 侑 (Yu Kaneda)

2017年大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻博士前期課程修了。同年パナソニック株式会社入社。2022年よりパナソニックホールディングス株式会社に転籍。ロボットハンドの研究開発に従事。
(日本ロボット学会正会員)



池内宏樹 (Hiroki Ikeuchi)

2007年豊橋技術科学大学大学院生産システム工学専攻前期博士課程修了。同年パナソニック株式会社に入社。2022年よりパナソニックホールディングス株式会社に転籍。半導体生産プロセス、ロボットハンド、ロボットアームの技術開発に従事。



多田隙建二郎 (Kenjiro Tadakuma)

2007年東京工業大学大学院機械宇宙システム専攻博士課程修了。博士(工学)。2007年より Massachusetts Institute of Technology Postdoctoral Associate, 2008年東北大学産学官連携研究員, 電気通信大学助教, 大阪大学大学院助教, 2015年より東北大学大学院情報科学研究科准教授, 2019年より同タフ・サイバーフィジカル AI 研究センター准教授兼任, 現在に至る。全方向移動・駆動機構, 分割球殻飛行メカニズム・吊下げ式ドローンボート機構, 柔剛切替グリッパ機構をはじめとするロボット機構の創案・具現化を含めた研究開発に一貫して従事。
(日本ロボット学会正会員)