

# 把持物体姿勢の画像認識に基づくインハンドマニピュレーション技術の開発

## Vision-based in-hand manipulation by pose detection of a grasped object

精密工学専攻 磯邊 柚香  
Yuzuka Isobe

### 1. 序論

近年、人に代わって作業を行うロボットの現場導入が期待されている。特に、物体を把持し決められた位置に配置するピックアンドプレース作業へのニーズが高まると考えられている [1]。この市場ニーズに応えたり、さらに市場を拡大するための技術として、ロボットハンドによるインハンドマニピュレーション (IHM) が注目されている。IHM とは、ハンド内で物体の位置や姿勢を任意に変更する動作を指す [2]。既往のロボットでは、これらの動作のために、治具が必要であったりロボットアームを大きく動かす必要があったが、IHM ではハンド内で行えるため、省スペース化やタクトの改善が図れる。IHM により実現される作業例として、Fig. 1 に示すピックアンドプレース作業が挙げられる。作業開始時 (Fig. 1(a)) には、物体の一部を掴む把持形態 (precision grasp) となり物体が落下しやすい状態であっても、Fig. 1(b) に示すように、把持を安定化させるためにハンド内に物体を引き込むことが可能となる。また、ハンド内で物体の姿勢を変えることで (Fig. 1(c))、安定把持できる姿勢へと物体を動かしたり、プレース時に求められる姿勢とすることもできる。さらに、Fig. 1(d) のように物体をハンド内で移動させることで、ロボットが周囲の物体や環境に干渉することなくプレース動作を行えるようになる。本研究では、中でも Fig. 1(a) から Fig. 1(b) に示す「つまみ上げ操作」と Fig. 1(c) に示す「回転操作」に着目した。

IHM によりこれらの操作を実現するために、表面にベルト等の回転機構 (Active surface [3]) を設けたロボットハンドが開発されている。物体を把持した状態で Active surface を動かすことで、連続的に物体を並進および回転させることが可能となる。ゆえに、大きな操作範囲に対しても安定的なマニピュレーションを実現できる。また、劣駆動機構 [3] や柔らかい素材の Active surface [4] を用いることで、様々な物体形状に合わせた把持が可能となる。一方で、つまみ上げ操作においては、物体とハンド表面の間の滑り状態を検出し、物体を把持する際の力を調整する必要もある。しかしながら、Active surface の表面に滑りを検出するセンサを搭載することは困難である。また、ハンド外部にカメラを設置し滑り状態を推定する既存研究 [5] においても、一度物体と接触し把持力を調整した後の状態から滑り状態推定および力調整の処理を行っており、物体と接触する前からの処理は想定されていなかった。また、回転操作については、Active surface を用いる場合 [3, 4] でも、物体形状や姿勢に応じた制御を行わないと、物体によっては姿勢変更の範囲が制限さ

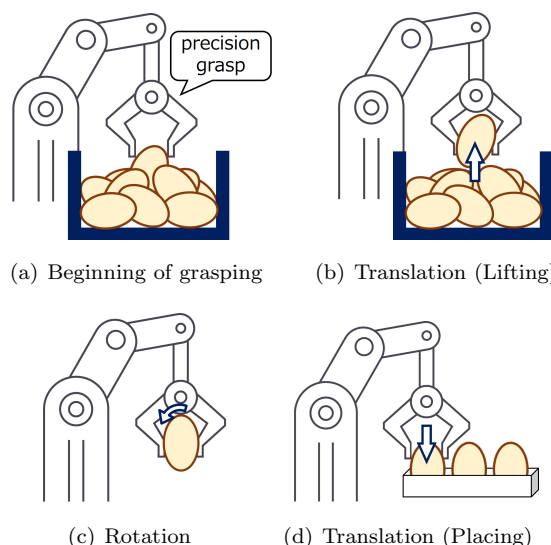


Fig. 1 Pick-and-place motion with IHM

れるという課題があった。

そこで、本研究においては、両操作それぞれに対し下記を実現することを目的とし、手法の提案を行った。

- つまみ上げ操作
  - ロボットハンド外部に設置したセンサより物体とハンド間の滑り状態を推定
  - 物体と接触する前からハンド内に引き込むまでの一連の操作
- 回転操作
  - カメラ画像から検出した把持物体の形状や姿勢に応じた制御
  - 様々な形状の物体に対して大きな操作範囲で姿勢変更

### 2. 研究方針

2章では、本研究の目的を達成するための方針を定めた。

#### 2.1 目標

まず、各操作について本研究における目標を定めた。

- つまみ上げ操作
  - 種々の質量、表面状態および硬度の物体を、滑らずにかつ潰しすぎずに把持
  - 操作開始時には把持していない物体を、ハンド内の決められた位置に移動
- 回転操作
  - ステレオカメラより得られる物体情報に基づ

きハンドを制御

- 操作可能な物体形状の種類および角度を増大

## 2.2 条件

本研究においては、Active surfaceとしてベルトを用いた、平行2指グリップを使用した。ベルトは各フィンガ表面を循環する構成とし、物体形状に倣えるように柔軟な素材を用いて製作した。また、ハンドの各フィンガ、各ベルトはそれぞれ独立したモータによって駆動する構成とし、計4つのモータを制御対象とした。把持した物体に対して、フィンガ動作により並進1自由度、ベルト動作により並進1自由度と回転1自由度の計3自由度の操作を行った。なお、ベルト表面に滑りや力を計測するセンサを搭載することが難しいため、力の計測や推定は行わず、ハンドに正対する位置に設置したステレオカメラから得られる物体情報に基づいて制御を行った。カメラ画像中の物体領域を抽出するために、色情報のみ既知であるものとした。また、フィンガやベルトの位置や速度を計測するために、各モータのエンコーダ値も取得した。

## 2.3 戦略

つまみ上げ操作においては、Active surface 動作中の物体の移動をカメラ画像から検出することで、滑り検出と操作を同時に行うこととした。物体に接触する前からActive surfaceを動かし続け、フィンガを徐々に閉じたとき、物体とActive surfaceの移動量が同等となるタイミングにおいて、滑らずにかつ潰しすぎずに把持できていると考えた。また、その状態で、画像情報を基に、ハンド内の任意の位置まで物体を引き込むことでつまみ上げ操作を行うこととした。

回転操作においては、物体形状や姿勢によって適切に回転しづらくなる状況として、物体とハンド間の接触点が回転操作中に移動したり切り替わる点と、Active surface以外の要素によっても回転が生じ得る点に着目した。そこで、カメラから得られる情報を基に、接触点の移動および切り替わりの予測や、Active surface以外による回転に関するパラメータの導入を行った。その予測結果やパラメータに基づいてフィンガやベルトを制御することで、操作できる物体形状の種類および操作可能な角度を増大させるための回転操作を行うこととした。

## 3. つまみ上げ操作手法

3章では、物体のつまみ上げ操作手法を提案した。使用するロボットハンドの概略図をFig. 2に示す。まず、ハンドとしては、Fig. 2左に示すように、Active surfaceとしてベルトを搭載した2指グリップを用いた。各フィンガは、Fig. 2右のX軸方向に、ベルトはY軸方向に動くものとした。Fig. 3は、このハンドを用いて緑色の矢印の方向にベルトを動かした様子を表している。図中の白色の矢印は、その際の物体の移動を示している。同図左に示すように、物体とベルトが接触していない状態では、ベルトを動かしても物体は動かない。また、接触し

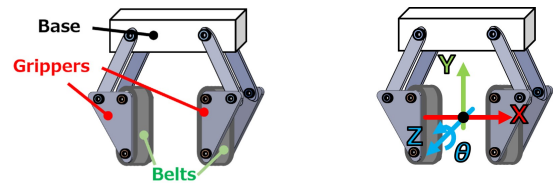


Fig. 2 Abstract of robotic hand and coordinates

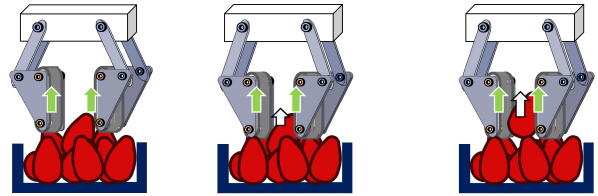
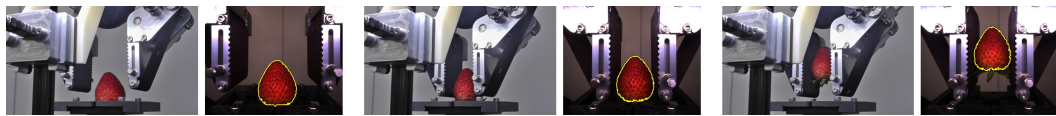


Fig. 3 Motion of the object and belt

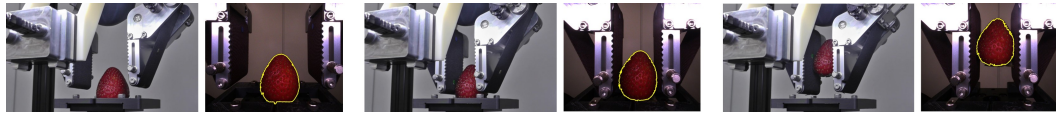
ている状態でも把持力が弱い場合 (Fig. 3 中央)、物体はベルト上を滑り、ベルトの移動量に対して物体の移動量は小さくなる。一方で、Fig. 3 右に示すように、滑らずに把持している場合は、ベルトと物体の移動量は同等となる。そこで、本研究においては、両者の移動量を比較することで、滑り状態を推定できると考えた。カメラ画像から物体の移動量を算出し、モータのエンコーダ値からベルト移動量を取得することとした。

手法においては、物体の移動を検出するために、ステレオカメラを用いた。カメラから物体領域を抽出し、毎フレームで、物体の位置、姿勢、サイズの情報を取得した。また、操作を Approach, Pinch, Correct, Drag の4つのフェーズに分け、順に処理を実行した。Approachでは、画像から取得した物体情報に基づき、ハンドを物体に対して接近させる処理を行った。次に、Pinchでは、把持力の調整を行った。物体の移動を検出し、ベルト移動量と比較することで滑り状態を推定した。Approach後の状態から、滑りが生じなくなるまでフィンガを閉じることで、滑らずにかつ潰しすぎない力となるよう調整した。滑りが生じなくなったタイミングでフィンガ動作を止め、Correctフェーズに移行した。Correctでは、滑りや傾きが生じていないかを確認し、把持力や姿勢を調整する処理を実施した。最後に、Dragでは、物体の位置情報を基に、所望の位置まで物体を引き込む処理を行った。その最中にも、毎フレームで物体情報を検出し、把持力や物体姿勢を調整することで、物体を滑り落とすことなくつまみ上げる操作を実現した。

提案手法により、種々の質量、摩擦係数および硬度の物体と、実物体として生のいちごを用いて、つまみ上げ操作実験を実施した。前者の実験においては、2.1節で示した目標が達成できているかを確認するために、操作終了時の物体の圧縮ひずみと物体位置の計測を行った。その結果、ひずみは平均0.027、物体位置の誤差は平均-0.35 mmであり、両者とも十分に小さい値であった。また、後者の実験結果の一例をFig. 4に示している。生の



(a) Results for Sample A



(b) Results for Sample B

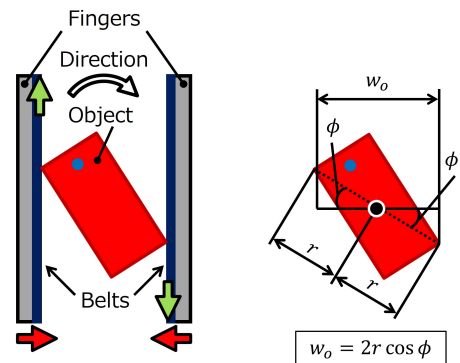
Fig. 4 Examples of picking up strawberries

いちごを一度も落としたり傷つけたりすることなく、つまみ上げることができた。以上より、設定した目標を達成し、本論文で目指すつまみ上げ操作を実現できたと結論づけた。

#### 4. 回転操作手法

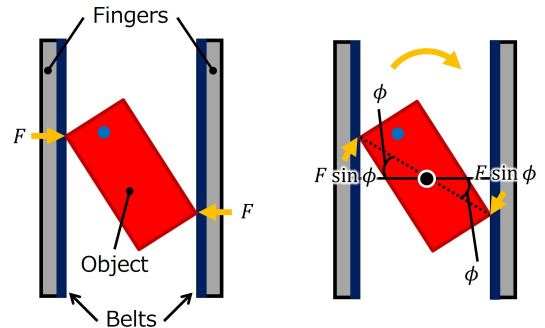
4章では、物体の回転操作手法を提案した。まず、物体姿勢を適切に変更できなくなる状況として、物体が落下する状況と、ある姿勢においてそれ以上回せなくなる状況について考察を行った。回転中に物体が落下する状況として、まず、物体を把持するために必要なフィンガ幅の変化が大きくなる状況に着目した。物体を落とさず操作するためには、操作中の物体の形状や姿勢に合わせて、フィンガを開閉させる必要がある。Fig. 5には、使用するロボットハンドにより物体を把持している様子を示す。Fig. 5(a)のように長方形断面の物体を把持しているとき、Fig. 5(b)に示す幅  $w_o$  に従って必要なフィンガ幅は変化する。 $w_o$  は、物体形状や接触点位置により決まる回転半径  $r$  と、物体姿勢から定まる角度  $\phi$  により算出される。しかしながら、物体とベルトの接触点が移動あるいは別の点に切り替わるとき、 $r$  や  $\phi$  の値によっては  $w_o$  が大きく変化することがある。その際、フィンガが  $w_o$  に追従できずに、物体が落下し得ると考えた。また、次に、ベルトにより物体を回転させようとしたとき、ベルト以外の要素によっても物体が回転し得る点を取り上げた。物体とベルトが接触している状態でベルトを動かすことにより、物体の姿勢を変更できるが、Fig. 6に示すように、姿勢によっては把持力などのベルト以外の要素によっても回転が生じることがある。Fig. 6(a)のように物体を把持したときに生じる把持力を  $F$  としたとき、Fig. 6(b)の橙色の曲線で示すように、力  $F$  と角度  $\phi$  に従った回転が発生する。ベルトとそれ以外の両者により物体が回転することで、姿勢が大きく変化してしまい、フィンガが追従できずに落下に繋がると考えた。また、ベルト以外による回転は、物体がある姿勢以上に回転できなくなる状況についても要因になり得る。ベルト以外から回転が生じることで、ベルトによる回転が打ち消されてしまい、その結果、所望の姿勢変更を行えなくなると考察した。

提案手法においては、これらの要因に基づき、4つの



(a) Manipulation example (b) Calculation of  $w_o$

Fig. 5 Required width of fingers to grasp an object

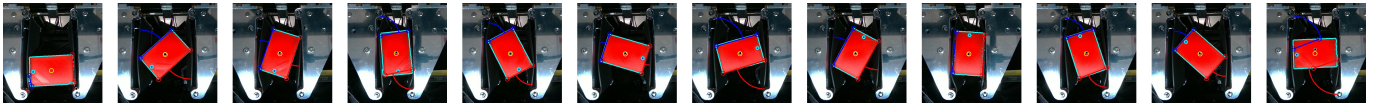


(a) Grasping object with  $F$  (b) Rotation caused by  $F$

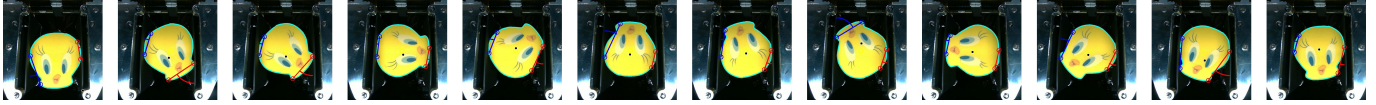
Fig. 6 Rotation caused by the grasping force  $F$

処理を実行した。初めに、カメラ画像から接触点の切り替わりを予測した。切り替わりが近くなるにつれて、必要なフィンガ幅  $w_o$  の変化は大きくなる。そこで、切り替わりが近いときに、物体の回転速度が遅くなるように単位時間あたりの目標回転量を調整した。次に、その角度の分だけ物体が回転したとき、次フレームにおいて接触点がどの位置に移動するかを推定した。画像から得られる物体の輪郭情報に基づき、次フレームでの接触点位置およびあるべきフィンガ位置を算出した。3つ目に行った処理は、ベルト以外による物体の回転量の推定である。所望の回転量と画像から取得した実際の回転量を比較し、その差がベルト以外から生じるものとした。最後に、ベ





(a) Results for Large Rectangle



(b) Results for Sponge

Fig. 7 Examples of manipulating objects.

ルト以外の要素による回転の影響を低減させるために、ベルトをたわませる処理を行った。物体形状や姿勢の情報に基づいて、所望の回転が生じづらくなるタイミングを示すパラメータを設定した。その値に基づいて、必要な幅よりも狭くなるようにフィンガ幅を調整することで、たわみを生じさせることとした。これらの処理に基づいて、フィンガやベルトの制御を実施した。フィンガについては、必要な幅やたわみ量に基づき、速度制御を行った。また、ベルト速度を調整することで、目標とする回転の実現を図った。

提案手法を用いて、32種類の柱体（形状16種、サイズ2種）および3次元形状の実物体12点を、1回転させる回転操作実験を実施した。その一例をFig. 7に示す。Fig. 7(a)は前者、Fig. 7(b)は後者の結果である。前者の実験については、提案手法を用いない条件での操作も実施した。その結果、1回転に成功する試行の割合が19.1%、操作範囲が $58.12^\circ$  増大することを確認した。後者の実験については、12点中10点において、100%の成功率となった。以上より、設定した目標を達成し、本論文で目指す回転操作を実現できたと結論づけた。

## 5. 結論と今後の展望

本研究では、ロボットハンドによるIHMの実現に向けて、ステレオカメラから把持物体の姿勢を認識し、ハンドを制御する手法を提案した。IHMにより実現される動作として、ピックアンドプレースにフォーカスした。その中でも、物体をピックレハンド内に引き込む「つまみ上げ操作」と、ハンド内で物体の姿勢を変更する「回転操作」の実現を図った。また、各操作を実現するために、表面にベルトを備えた構成（Active surface）のロボットハンドを使用した。

つまみ上げ操作においては、カメラ画像を用いて、物体とハンドの間の滑りを推定した。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、物体の移動量を算出した。物体移動量とベルト移動量の差分から滑り状態を推定し、把持力を調整する手法を提案した。加えて、物体をハンド内の任意の位置まで引き込む操作手法を構築した。提案手法により、種々の物体を滑らせずにかつ潰しすぎずに把持し、決められた位置まで移動させ

るつまみ上げ操作が実現したことを確認した。

回転操作においては、カメラ画像から物体形状や姿勢に関する情報を取得し、所望の回転を行えるようにハンドを制御した。画像中から接触点の切り替わりや移動を予測し、物体回転量や次フレームでのフィンガ位置の調整を行った。さらに、ベルト以外の要素による回転を打ち消したり、所望の回転を生じさせやすいようにベルトをたわませる対策を講じた。提案手法により、種々の形状の物体および大きな範囲での回転操作が実現したことを確認した。

今後は、ピックアンドプレースの一連作業を実現するために、プレース操作手法の提案や各操作の結合を行うことを検討している。

## 参考文献

- [1] Market Reports World, “Global Pick and Place Robot Industry Research Report 2023, Competitive Landscape, Market Size, Regional Status and Prospect,” 2023.
- [2] I. M. Bullock *et al.*, “A Hand Centric Classification of Human and Robot Dexterous Manipulation,” *IEEE Trans. on Haptics*, Vol. 6, No. 2, pp. 129–144, 2013.
- [3] R. R. Ma and A. M. Dollar, “In-Hand Manipulation Primitives for a Minimal, Underactuated Gripper with Active Surfaces,” in *Proc. of ASME Int. Design Engineering Technical Conf. and Computers and Information in Engineering Conf.*, pp. 1–7, 2016.
- [4] Y. Cai and S. Yuan, “In-Hand Manipulation in Power Grasp: Design of an Adaptive Robot Hand with Active Surfaces,” in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 10296–10302, 2023.
- [5] F. E. Viña B. *et al.*, “In-hand manipulation using gravity and controlled slip,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.5636–5641, 2015.