

接触点の予測に基づく画像を用いた In-Hand Manipulation

○磯邊 柚香（中央大学） 姜 淳熙 島本 武史 松山 吉成（パナソニックコネクト）
Pathak Sarthak 梅田 和昇（中央大学）

1. 序論

近年、ロボットハンドによる In-hand manipulation (IHM) が注目されている。IHM とは、把持した物体の位置や姿勢をハンド内で変更する動作を指す [1]。この動作は、工場や物流、流通現場におけるピックアンドプレース作業への応用が期待されている。

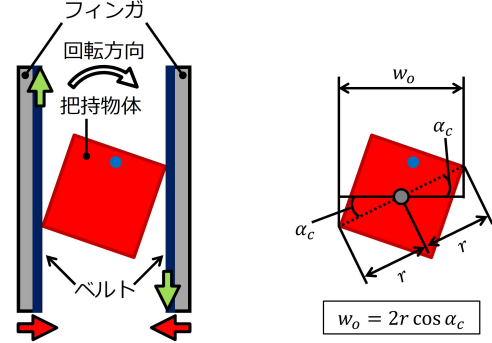
IHM においては、物体を落とさずに把持することと任意の位置姿勢に変更することの2点が要求される [2]。前者の実現のために、劣駆動機構やソフトフィンガを用いて物体を操作する手法が提案されている [3]。これらの機構によりハンドが物体形状に倣えるため、把持し続けることが可能となる。しかし、各指の可動範囲により物体の操作範囲が制限されるため、特に1回転以上の大きな回転を行うことは難しい。対して、指の本数を増やして持ち替え動作を行うことで、操作範囲の拡大を図る手法も提案されている [4]。持ち替え動作とは、一部の指を一旦物体から離し、別の部位へと接触位置を変える動作のことを指す。ただし、持ち替え動作を行うために、動作計画や制御システムが複雑化する。一方で、ベルトやローラ等の回転機構を設けたハンドを用いて、陽に持ち替え動作を行わずに IHM を実現する研究も広く行われている [5, 6, 7]。物体と接触するハンド表面が動くため、これらの構成は *Active surface* と呼ばれる。Active surface により物体を並進および回転させることが可能となるため、大きな操作範囲に対しても連続的な操作を実現できる。しかしながら、落としやすい形状や姿勢が存在するため、物体によっては操作範囲が制限されるという課題がある。

本稿では、画像から検出した物体情報を基にフィンガやベルトを制御することで、種々の物体形状に対して1回転以上の操作を可能とする IHM 手法を提案する。ロボットハンドとして、各フィンガにベルトを備えた平行2指グリップを使用し、ハンド内を撮影できる位置にステレオカメラを設置する。まず、カメラ画像から把持物体の外形を検出し凸包を算出する。次に、得られた凸包より、物体とベルトの接触点の切り替わりを予測し、次の時刻までの物体の回転角目標値を設定する。加えて、現在の物体形状および姿勢から、次の時刻での接触点位置を推定する。設定された角度分だけ物体が回転するようにベルトを、推定した接触点位置に倣えるようにフィンガを、それぞれ制御する。22種類の物体（形状11種、サイズ2種）をそれぞれ1回転させる実験を行い、提案手法の有用性を確認する。

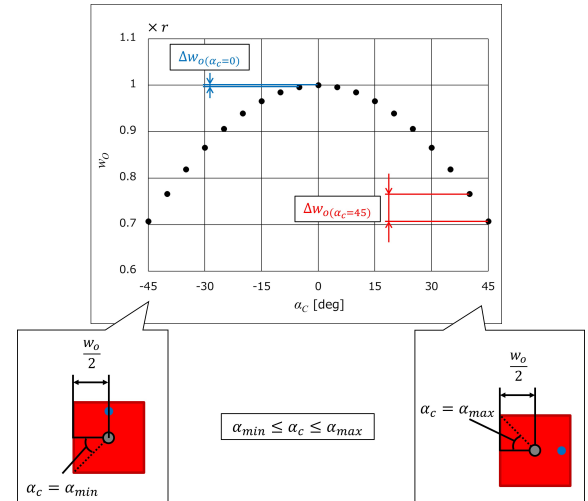
2. 課題と戦略

Active surface を用いたハンドによる IHM において、物体を落としやすい状況について詳述する。

図1(a)は物体操作の一例を表す。図中では把持物体



(a) 操作の一例と物体端点の水平距離 w_o の算出



(b) 等速回転中の物体姿勢に対する w_o

図1 回転操作時の物体端点の水平距離 w_o の変化

を時計回りに回転させるときのベルトの動作方向を緑色の矢印で、物体を落とさないためにフィンガが動作すべき方向を赤色の矢印で表している。このとき、物体端点の水平方向の距離 w_o に合わせてフィンガ幅が設定されることで、物体を落とさずに把持できる。物体中の灰色の円は回転中心を表す。 w_o は、回転中心と端点を結んだ線分の長さにより表される回転半径 r 、およびその線分が水平軸となす角 α_c により算出できる。

また、物体が等速で回転したときの w_o の変化を図1(b)に示す。図中では、物体とベルトとの接触点が切り替わった直後から次の接触点に切り替わるまでの間の角度を横軸に、 w_o の大きさを縦軸に示している。図より、等速回転により角度変化は一定であっても、 w_o の変化量 Δw_o は物体姿勢によって変化することがわか

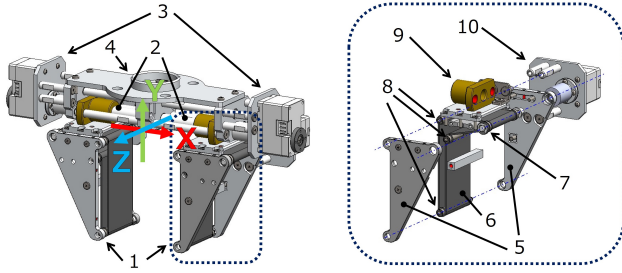


図2 ロボットハンドのハードウェア構成

る．一方で、フィンガがある時間内に動作可能な量は、フィンガを駆動させるアクチュエータの動特性に依存する．ゆえに、 Δw_o がフィンガが追従できないくらい大きくなると、物体を落としやすくなると考えられる．従って、IHMを実現するためには、フィンガが追従できるように物体の回転速度を調節する必要がある．

また、同図において、接触点が切り替わる直前である α_{max} 付近で Δw_o が最も大きくなることがわかる．加えて、物体形状によっては、接触点が切り替わることで回転半径 r の値が変化することもある．回転半径 r により w_o の値が算出されるため、 r の値が変化すると物体を落としやすくなる．そこで、接触点の切替に合わせて物体の回転を遅くすることで、物体姿勢および回転半径が変化する場合でも、フィンガの物体への追従が可能となると考えられる．

本研究においては、現在の接触点および次にベルトに接触すると予測される物体上の点を画像から検出し、接触点が切り替わる直前において最も物体の回転速度が遅くなるようにベルト制御を行っていく．

3. 提案手法

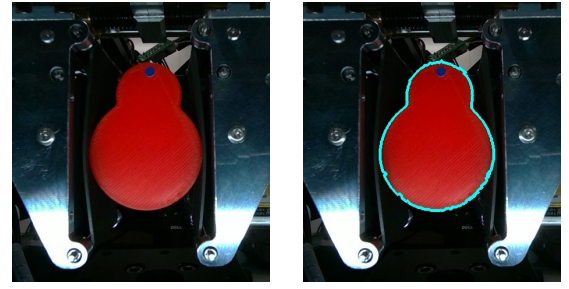
3.1 ハードウェア構成

使用するロボットハンドのハードウェア構成とロボット座標系を図2に示す．ハンドは、従来研究[8]と同様に、物体を3自由度（並進2自由度、回転1自由度）で操作可能な構成としている．各フィンガ(1)は、送りネジ(2)を介して各モータ(3)によりX軸方向に動作する．各フィンガはベルト(6)を備えており、Active surfaceの構成としている．ベルトは駆動軸(7)を介してモータ(10)によりフィンガ表面を循環する．駆動時にベルトが緩んだりフィンガ外にはみ出したりしないように、フレーム(5)や従動軸(8)を設けている．なお、本ハンドはベース部(4)によりロボットアーム（図示せず）に接続可能である．

本ハンドを用いることで、把持物体はフィンガ動作によりX軸方向に並進移動でき、ベルトによりY軸方向への並進とZ軸回りの回転が可能となる．なお、ハンドには触覚センサや力覚センサは搭載しておらず、センサとしてはハンドに正対する位置に設置したステレオカメラを用いる．

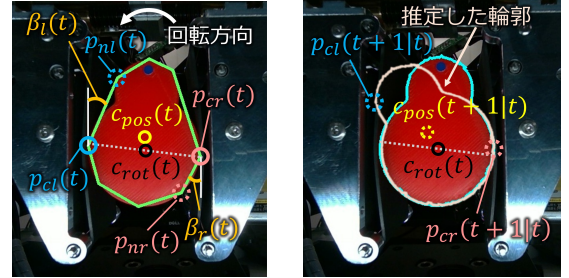
3.2 接触点検出

物体とベルトの現在の接触点および次にベルトに接触すると予測される物体上の点（次の接触点）の検出処理について詳述する．



(a) 入力画像

(b) 輪郭抽出



(c) 接触点情報の算出

(d) 回転後の輪郭推定

図3 画像からの接触点の予測

ハンドに正対する位置に設置したステレオカメラ上の左カメラから得られるRGB画像を図3(a)に示す．まず、この画像より色情報に基づき物体の輪郭を抽出する（図3(b)）．図中で水色の線は抽出された輪郭を表す．次に、この輪郭に対してDouglas-Peucker algorithmを用いて多角形近似を行い、近似多角形に対してQuickhull法により凸包を算出する．算出された凸包を図3(c)中の緑色の図形で表す．この凸包の頂点のうち、画像中の最も左および右に位置する点を、物体とベルトとの現在の接触点とする．図中では、青色および桃色の円で示した頂点が、それぞれ時刻 t における左右の接触点 $p_{cl}(t)$, $p_{cr}(t)$ である．さらに、物体の回転方向を考慮して、現在の接触点と隣り合う頂点を、次にベルトに接触すると予測される物体上の点（次の接触点）と定義する．図においては、白色の矢印で示される回転方向に対して、青色と桃色の点線で描かれた円により、左右それぞれの次の接触点 $p_{nl}(t)$, $p_{nr}(t)$ が示されている．

ここで、現在の接触点と次の接触点を結んだ線分が鉛直軸となす角をそれぞれ $\beta_l(t)$, $\beta_r(t)$ とし、図内で橙色の円弧で示している．これらは、接触点が切り替わるまでに要する回転量を表す．この角度が小さくなるにつれて物体の回転速度が遅くなるように操作することで、物体を落としづらくなると考えられる．そこで、この角度に基づいて、次の時刻までの回転角目標値 $\Delta\hat{\theta}(t)$ を設定する．

$$\Delta\hat{\theta}(t) = K_{\theta} \cdot \min(\beta_l(t), \beta_r(t), \theta_{goal} - \theta(t)). \quad (1)$$

ここで、 K_{θ} はゲインを、 θ_{goal} および $\theta(t)$ は物体の目標姿勢と現在の姿勢を表す．

また、図3(b)において水色の輪郭で囲った物体領域に対する図心位置を、図3(c)中で黄色の円 $c_{pos}(t)$ により示している．提案手法においては、 $c_{pos}(t)$ を基準と

して物体の並進移動を行う。加えて、現在の接触点同士を結んだ線分の中点を黒色の円で表している。この点をこの物体の回転中心 $c_{rot}(t)$ とする。

3.3 回転後の接触点推定

提案手法においては、物体を落とさずに把持するために、次の時刻での接触点の位置に基づきフィンガをフィードフォワード制御する。本節では、1フレーム間の接触点の移動を推定する処理について詳述する。

3.2 節において抽出した物体輪郭を、目標の角度分だけ回転させることで、次の時刻での輪郭を推定する。次式に従って、輪郭上の各点 $p_i(t) = (u_i(t), v_i(t))^T$ を、点 $c_{rot}(t) = (u_{rot}(t), v_{rot}(t))^T$ を中心に角度 $\Delta\theta(t)$ だけ回転させ、次の時刻での推定位置 $p_i(t+1|t)$ を算出する。

$$l_i = \|p_i(t) - c_{rot}(t)\|_2,$$

$$\alpha_i(t+1|t) = \tan^{-1} \left(\frac{v_i(t) - v_{rot}(t)}{u_i(t) - u_{rot}(t)} \right) + \Delta\theta(t), \quad (2)$$

$$p_i(t+1|t) = l_i \begin{pmatrix} \cos \alpha_i(t+1|t) \\ \sin \alpha_i(t+1|t) \end{pmatrix} + c_{rot}(t).$$

ここで、 l_i は点 $p_i(t)$ と回転中心 $c_{rot}(t)$ を結んだ線分の長さを表し、次の時刻においてその線分と水平軸がなす角を $\alpha_i(t+1|t)$ としている。

図 3(d) では、輪郭推定結果を薄桃色でプロットしている。推定した輪郭に対して、3.2 節と同様に、最も左および右に位置する点を検出する。これらの点を次の時刻での接触点推定位置とし、左右それぞれ $p_{cl}(t+1|t)$, $p_{cr}(t+1|t)$ と表す。また、推定した輪郭で囲われる領域に対しても同様に図心を算出し、次の時刻での図心推定位置 $c_{pos}(t+1|t)$ とする。

3.4 制御指令値算出

3.2 節および 3.3 節の処理により得られた値に従って、ベルトとフィンガの制御指令値を算出する。ベルトに対しては、左右それぞれ Y 軸方向の速度指令値 $\hat{b}_l(t)$ および $\hat{b}_r(t)$ を与える。フィンガについては、左右それぞれ X 軸方向の速度指令値 $\hat{f}_l(t)$ および $\hat{f}_r(t)$ を入力する。

なお、前節まででは、2次元の画像座標上で各処理を実施していたが、本節においては、3次元のロボット座標系で計算を行う。以下、大文字で示しているパラメータは全て、前節までにおいて小文字で示していた値をロボット座標系に変換したものである。ただし、角度や姿勢の値は小文字のまま使用する。加えて、各パラメータの上付き文字は、座標軸を示している。例えば、 C_{pos}^X は、点 C_{pos} の X 座標を表す。

まず、ベルトに関して、次の時刻までの移動量を左右それぞれ $\Delta\hat{b}_l(t)$, $\Delta\hat{b}_r(t)$ とし、次式により算出する。

$$\begin{pmatrix} \Delta\hat{b}_l(t) \\ \Delta\hat{b}_r(t) \end{pmatrix} = K_{b,pos} (Y_{goal} - C_{pos}^Y(t+1|t)) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + R(t)\Delta\hat{\theta}(t) \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

ここで、 $K_{b,pos}$ は制御ゲイン、 Y_{goal} は物体の Y 軸方向の目標位置、 $C_{pos}^Y(t+1|t)$ は推定した図心位置 $c_{pos}(t+1|t)$

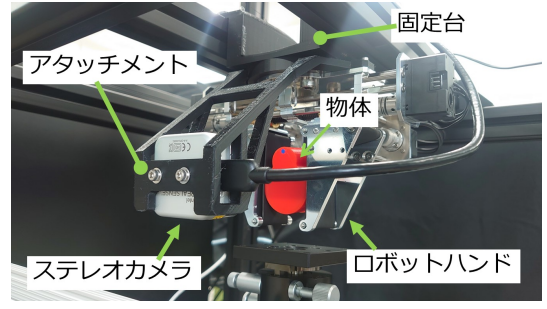


図 4 実験環境

表 1 ハードウェア仕様

フィンガ最大開口幅	60 mm
ベルト材質	CR ゴム (ショア A45)
ベルト厚さ	1 mm
Y 軸方向ベルト長さ	57 mm
Z 軸方向ベルト幅	30 mm
モータ	Dynamixel XL330-M288-T
ステレオカメラ	RealSense D405 (Intel)
解像度	848×480 pixel

表 2 パラメータ設定

$K_\theta / K_{f,pos} / K_{b,pos}$	0.3 / 0.5 / 0.1
$X_{goal} / Y_{goal} / \theta_{goal}$	0.0 mm / -41.0 mm / 360.0 °
X_m	1.25 mm

の Y 座標、 $R(t)$ は回転半径 r をロボット座標系に変換した値を表している。

次に、左右のフィンガに関して、次の時刻までの目標移動量 $\Delta\hat{f}_l(t)$, $\Delta\hat{f}_r(t)$ を次式により算出する。

$$\begin{pmatrix} \Delta\hat{f}_l(t) \\ \Delta\hat{f}_r(t) \end{pmatrix} = K_{f,pos} (X_{goal} - C_{pos}^X(t+1|t)) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P_{cl}^X(t+1|t) - f_l(t) \\ P_{cr}^X(t+1|t) - f_r(t) \end{pmatrix} + X_m \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

ここで、 $K_{f,pos}$ は制御ゲイン、 X_{goal} は物体の X 軸方向の目標位置、 $C_{pos}^X(t+1|t)$ は推定した図心位置 $c_{pos}(t+1|t)$ の X 座標、 $P_{cl}^X(t+1|t)$ および $P_{cr}^X(t+1|t)$ はそれぞれ左右の接触点推定位置 $p_{cl}(t+1|t)$, $p_{cr}(t+1|t)$ の X 座標、 $f_l(t)$ および $f_r(t)$ は現在の左右のフィンガ位置、 X_m は固定値でありベルトのたわみ量を表す。

算出した各移動量はそれぞれで単位時間で除して、速度指令として各モータに入力する。

4. 実験

4.1 実験条件

3.1 節で示したロボットハンドを用いて、種々の形状およびサイズの物体に対して IHM を実施した。

図 4 に実験環境を示す。ロボットハンドは固定台に設置した。ステレオカメラはハンドに正対するように、アタッチメントを介して固定した。その他、ハードウェアの詳細な仕様を表 1 に示す。また、提案手法における各パラメータは表 2 に示す値とした。特に、大きな

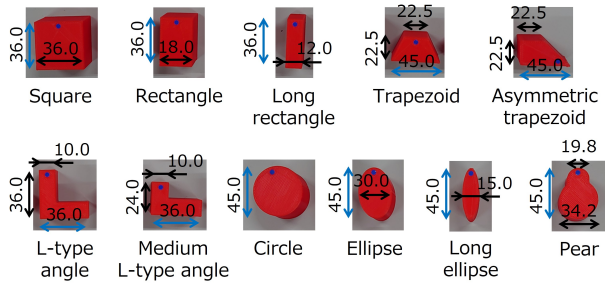


図5 実験サンプル例 (寸法の単位は [mm])

表3 実験結果

ケース	サイズ	提案手法	手法なし
目標に到達 [%]	大	45.5	45.5
	小	60.0	53.6
途中で回転 [%]	大	14.5	0.0
	小	19.1	18.2
途中で落下 [%]	大	40.0	54.5
	小	20.9	28.2

回転操作を行えることを確認するために、物体の目標姿勢 θ_{goal} は 360.0° とした。

実験には、22種類の物体サンプル（形状11種、サイズ2種）を用いた。使用したサンプルのうち、サイズが大きい方の11種を図5に示す。全て奥行（把持時のZ軸）方向に一樣な形状とし、奥行寸法は20mmとした。図中には、各サンプルの断面の寸法値を併記している。小さい方のサンプルは、相似形状を保ったまま、青色で示した寸法を22.5mmにサイズダウンした形状とした。また、操作中の各時刻における物体姿勢 $\theta(t)$ を検出するために、断面には青色のマークを貼付した。サンプルは全てPLA材で製作した。

また、比較のために、提案手法を適用しない条件下での実験も実施した。この条件においては、3.3節の処理は行わず全てフィードバック制御とし、かつ物体回転が常に等速となるように式(3)中の $R(t)\Delta\hat{\theta}(t)$ を固定値 (3.3 mm/s) とした。実験は各サンプルに対して各条件下で10回ずつ実施した。

4.2 実験結果

実験結果として、目標位置姿勢まで到達できた試行、落下はしないものの途中でしか回転できなかった試行、途中で落下してしまった試行の割合を表3に示す。サイズが大きい方のサンプルのうち目標まで到達できた割合は、提案手法の有無に関わらず同じ値であったが、小さい方のサンプルに対しては提案手法の方が良い結果を得られた。また、大小ともに途中で落下する試行の割合も低減させることができた。

4.3 考察

途中から回せなくなった試行に関しては、物体の角がベルトに引っかからず、回転に必要なモーメントを発生させられなかったことが原因と考えられる。途中で落下した試行については、アスペクト比が大きい Long rectangle や Long ellipse が大部分を占め、それぞれの長軸が鉛直に近づくときに落下することが多かった。これ

は、把持力によって大きな回転が発生してしまい、フィンガが追従できなくなったことによると考えられる。

対策として、ベルト表面に凹凸を設けることを検討している。前者のケースに対しては、物体の角が凹凸に引っかかることで回転が可能となると推測される。また、凹凸に引っかかることで、物体の囲い込みや摩擦力の増大が期待でき、物体の落下防止にも寄与できると考えられる。

5. 結論

本稿では、種々の物体形状に対して大きな回転を可能とする In-hand manipulation 手法を提案した。手法においては、Active surface の構成としてベルトを有する平行2指グリップを用い、ステレオカメラにより把持中の物体を検出した。カメラ画像から物体外形に対する凸包を算出し、ベルトと物体の現在の接触点および次に接触する点を予測した。予測に基づき、次の時刻までの物体の回転量を調整した。また、現在の物体形状や姿勢を基に、次の時刻までの接触点の移動を推定した。設定した回転量分だけ物体が回るようにベルトを、推定した接触点に追従するようにフィンガを制御した。提案手法を用いて、22種の物体（形状11種、サイズ2種）をそれぞれ1回転させる実験を行い、性能が向上することを確認した。

今後は、ベルトの表面に凹凸をつけることで、物体の落下防止および操作範囲の拡大を図っていく。

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] 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.
- [2] A. M. Okamura *et al.*, “An Overview of Dexterous Manipulation,” in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 255–262, 2000.
- [3] 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.
- [4] A. S. Morgan *et al.*, “Complex In-Hand Manipulation via Compliance-Enabled Finger Gaiting and Multi-Modal Planning,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 2, pp. 4821–4828, 2022.
- [5] S. Yuan *et al.*, “Design of a Roller-Based Dexterous Hand for Object Grasping and Within-Hand Manipulation,” in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 8870–8876, 2020.
- [6] 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.
- [7] N. Govindan and A. Thondiyath, “Design and Analysis of a Multimodal Grasper Having Shape Conformity and Within-Hand Manipulation with Adjustable Contact Forces,” *ASME Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 11, pp. 051012-1–051012-12, 2019.
- [8] 磯邨ら, “ベルト搭載グリップによる画像を使った物体のつまみ上げ制御”, *日本ロボット学会誌*, vol. 41, no. 2, pp.187–197, 2023.