

物体ハンドリング作業ロボットにおけるビジョン

喜多伸之

産業技術総合研究所 知能システム研究部門

あらまし：ロボットが物体に力学的作用を加えて位置・姿勢および形状などの状態を変化させることを物体ハンドリングと定義する。ここでのロボットは目と腕と手を備えていることを想定し、物体ハンドリングにより物体を所望の状態に変化させるために目が果たす役割について考察する。

Robot Vision for Objects Handling

Nobuyuki KITA

Intelligent Systems Research Institute
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Abstract : We define that the term “object handling” means the physical control of position, pose and shape and so on of target objects by the robot operation. In this paper, the role of eyes for the objects handling is considered for the robot which has eyes, arms and hands.

1. まえがき

ロボット技術に関連した視覚情報処理の研究について、やや古いですが、2002年のロボット学会学術講演会での発表を調べたことがある[1]。研究総数は590件で、視覚に関連した研究数は116件であった。視覚の利用目的で分類した結果では、移動に深く関係する自己位置推定、障害物検知への利用が32件、作業対象の認識など物体の認識と追跡への利用が24件であるとした。ただし、物体ハンドリングを応用目的としたものに限れば12件のみ(1A25、1B25、1A34、1A35、1D34、3E11、3M23、3M25、3E37、3M31、3M32、3M34、3M36)であった。物体ハンドリングにとって視覚は貴重な情報を与えると思えるにもかかわらず、研究数が少ない理由はなんだろうか。実は物体ハンドリングにとって視覚情報は重要ではないのか、あるいは、現状の計算機視覚で事足りておりあえて研究の必要がないのか。はたまた、視覚処理研究にとって物体ハンドリングは魅力的な応用対象とはなりえないのか。これらの疑問に答えるべく、まず、第2章では物体ハンドリングそのものについて技術の発展を眺める。第3章では物体ハンドリングにとっての視覚の役割を整理したのち、衣類ハンドリングへの視覚情報の利用例を紹介する。第4章では、今後の物体ハンドリングと視覚の研究のあり方について述べ、最後に今後の課題などまとめた。

2. 物体ハンドリング技術の進展

産業用ロボットでは組み立てに代表されるように、対象物体の位置や姿勢を変化させることが作業の大部分であった。したがって、その能力(精度、スピード、信頼性など)は極めて高いレベルに到達している。一方、研究室レベルでは、工場のラインのように完全に整備された環境から、徐々に適用範囲を未整備環境に広げるべく様々な取り組みがなされてきている。

トルク制御により卵をつかんだり、微い動作を実現したりは数十年前にすでに実現されているが、その後もインピーダンス制御やハイブリッド制御それにアクチュエータの形状自身の発展は続き、対象物体の位置が多少ずれた状態でのペグインホールを可能にしたり[2]、果実などのように形状にばらつきがあっても安定な把持を実現したりしている[3]。近年は接触センサや力センサの重要性の認識のもと、それらのセンサの開発や、開発したセンサを利用した操作性・適応性の向上の研究が多く進められている。力センサ出力から把持している物体と他の物体の接触情報を抽出することにより印鑑の捺印動作を実現したり[4]、接触センサや力センサの情報を利用して対

象の形状をある程度推測することも可能になっている[5]。汎用的な物体ハンドリングを実現している人間の手を模範にした多指ハンドの研究も盛んに行われ、グリッパーでは行えない器用な操り動作なども実現している[6]。制御側、アクチュエータ、センサの工夫は今も続いており、実現できる物体ハンドリングはさらに広がりつつある。

このように物体ハンドリングの研究では、物体を操作するにとどまらず、操作することで対象の状態をセンシングすることも追求されている。物体ハンドリング研究者にとっては、視覚を利用するよりも、視覚を必要としない物体ハンドリングの研究が意欲をそそるのではなからうかと思えてしまう。果たして一端接触状態を得てしまえば、物体ハンドリングにとって視覚は不要なのであろうか。

3. 物体ハンドリング作業における視覚情報の利用

視覚情報を利用して、対象物体の位置、姿勢情報を獲得して把持する研究がハンドアイ研究としてかなり盛んに行われていた。これは対象の形状モデルを利用した方法が主流であり、当初扱える形状や環境条件にはかなり制約を必要としていたが、現在では自由形状物体や照明変動も許容し、ロボストに対象物体の位置、姿勢を獲得（対象が移動している場合には追跡）できる視覚システムが開発されており[7]、産業界での実用に供されている。これら主流とはアプローチを異にする研究も多く存在する。視覚情報から抽出した2次元情報のみ利用して運動する多面体を捕捉する研究[8]や、ステレオ視差を利用して運動物体を追跡しつつ計測した位置・運動予測を使ってハンドで捕捉する研究[9]などは視覚情報のみによる研究であるが、他のセンサ情報との融合により把持物体と対象物体の接触位置を推定する研究[10]もあった。また、柔軟物体であるワイヤを穴に挿入するために視覚情報により形状情報を獲得する研究もある[11]。

いずれも対象物体の位置、姿勢、さらには形状情報の取得を目的とした視覚処理である。そこでまず、物体ハンドリングにおいてこれらの情報獲得に影響を及ぼす要因を整理する。そのあと、視覚が提供できるのは対象物体の位置、姿勢、形状情報のみなのか、他にも有用な情報を提供できるのかについて述べる。さらに、物体ハンドリングにおける視覚情報の利用の例を最近の研究からひとつ紹介する。

3. 1 対象の位置、姿勢、形状情報の獲得

対象物体の位置、姿勢、形状獲得処理に影響を及ぼすであろう要因を列挙する。

(1) 対象物体の変形の有無

剛体か関節物体か柔軟物体か。剛体の場合、一旦接触状態を得れば後は見なくてよい。剛体以外はハンドリング中に変形の監視が必要。一般に関節物体のほうが変形の予測（変形のモデル化）が容易。変形の要因がハンドリング自身にあるか否かでも予測の容易さが変わる。

(2) 対象物体の移動の有無

移動している場合、視覚により追跡する必要があるが、その困難さは移動の予測の困難さに応じて変わる。

(3) 対象物体の個数

複数の場合、オクルージョンの問題が生じやすい。多数の場合、群としての扱いが必要となる場合もある。

(4) 対象物体の大きさ

大きい場合、視線の移動が必要。あるいは、あらかじめ広い視野の画像を入力とする。

(5) 作業対象以外の物体の状態

オクルージョンなどの考慮が必要。視点の移動が必要な場合も生じる。

(6) 作業空間の大きさ

大きい場合、視線の移動、あるいは、広い視野が必要。

(7) 照明の状態

制御できない場合、カメラ側で調整、あるいは、画像処理で吸収する必要あり。

上記のように数多くの要因が存在する上に、これらは独立しているわけではなく、複雑に絡み合っただけでなく、複雑に絡み合っただけでなく、処理に影響を及ぼす。さらに、特殊な状況まで含めると、例えば作業自体のリスクなども処理の仕様への考慮の対象となり得る。個々の応用において、アルゴリズムの新規開発、あるいは、既存手法のチューニングが必要となる所以

である。

さて、産業用ロボットでは扱う対象は限られ、環境はコントロールできるため、上記要因それぞれについて処理の前提条件を設定することができた。しかし、町工場、各種サービス現場、オフィス、一般家庭などと広げて行くと、作業の多様性は増し、環境はアンコントロールラブルとなっていく。つまりは上記要因のいくつか、あるいはすべてについて、前提条件の設定が困難になる。いわゆる汎用ビジョンが期待される所以である。

ところで上記は、物体をハンドリングの基本単位と見なして要因を整理したが、ハンドリングにおいて直接作用を及ぼす部位を基本単位として整理すると以下ようになる。

- (1) 作用部位間の位置関係が変わるか否か
- (2) 作用部位が移動するか否か
- (3) 作用部位の個数
- (4) 作用部位の移動範囲
- (5) 作用部位以外の物体の状態
- (6) 照明の状態

このような整理が適切であったならば、対象物体や環境に依存する多くの要因の考慮は、各作用部位を追跡するトラッカーの設計あるいは実装に封じ込めることができ、汎用的な視覚処理を実現する近道となりえるかもしれない。

3. 2 物体ハンドリングに有用な位置、姿勢、形状以外の情報

物体ハンドリングにおいて対象物体の位置、姿勢、形状以外に、重量、表面の摩擦係数、弾性、壊れやすさ（塑性限界）などの情報が重要である。いずれの計測にも、接触センサや力センサが必要であるが、視覚情報の利用により効果的にそれらの情報を獲得する試み[12]がある。

適用範囲を未整備環境に広げるためには、対象物体をとりまく環境の認識が重要であり、視覚情報が本領を発揮する場である。ただし、ハンドリングにおける制約条件となる情報の獲得が重要な点で、一般的な環境認識問題とは異なる取り組みが可能であろう。例えば、対象物体がコップの場合、水が入っているか否か、テーブルであれば、上に物が乗っているかいないか、あるいは、対象物体が何であれ、現在の状態が安定か不安定化など、ハンドリング対象に直接関係した情報の獲得が重要である。さらには、ハンドリング対象ではないが、アームと接触の可能性のある物体がある場合、その情報も獲得が必要である。これらについては、物体ハンドリングの切り口で整理したいところであるが、それは今後の課題としたい。

さらに、作業の目的は対象物体の位置、姿勢の変更にとどまらず、例えば衣類たたみや着衣補助のためには対象物体の形状の変更が目的となり、皿洗いでは対象物体表面の性情の変化が作業目的であるので、それらの評価も視覚処理に期待される課題である。

上記はいずれも物体ハンドリングに有用な情報獲得のために視覚を利用したが、視覚情報フィードバックにより仮想の壁を設定することにより、物体ハンドリングの制御を拘束する試み[13]もあり、異なる発想の展開として興味深い。

3. 3 衣類ハンドリングにおける視覚の利用

視覚を利用して柔軟物体ハンドリングを実現するための研究が開始されており、衣類をたたむ作業の基本ステップとして、片手で吊り下げた状態から、両手で広げて吊り下げるまでのハンドリングを対象に視覚情報を利用した作業実現を進めている[14]。衣類の近似的な変形モデルを基本として、吊り下げた衣類の状態の推定、次に把持すべき箇所（作用部位）の位置、姿勢推定、さらに、ハンドリング後の変形の検証を視覚情報により実現している。

4. 物体ハンドリングとビジョン研究の協調

先に紹介した衣類ハンドリングにおいて、把持箇所の位置、姿勢は可能な限り精度良く推定することを試みたが、実験してみるとかなりの誤差が許容されることがわかった。ハンドリング側が暗に視覚処理に貢献した例で

ある。また、文献[14]でも今後の課題として触れているように、現状の視覚情報では処理が曖昧であったり、情報が不足している場合に、物体ハンドリングを積極的に活用することが有効であろう。視覚情報の不十分さを補うために視覚情報入力パラメータを能動的にコントロールする研究は多くあるが、ハンドリングを活用する研究は数少ない[15]。これが実現できれば、物体ハンドリングとビジョンの真の協調といえよう。

5. まとめ

物体ハンドリングにおいて対象物体の位置、姿勢情報の獲得は極めて重要であり、産業用ロボットの組み立て作業などで視覚は多くの実績を示している。しかし、ロボットの活用範囲をオフィスや一般家庭などに広げるためには、位置、姿勢推定を多様な条件下で可能とする必要性がある。本論では、まず物体ハンドリングにおいて対象物体の位置、姿勢推定視覚処理に影響を及ぼす要因を整理し、対象物体ではなく作用部位を基礎にすることにより要因を整理する方法を提案した。

次に、対象物体の位置、姿勢情報以外の情報獲得について、視覚情報がどう貢献できるかを検討した。いまだ検討途中ではあるが、環境から物体ハンドリング作業に必要な情報のみ選択的に獲得する視覚処理、物体ハンドリングと視覚センシングの相乗効果活用などが今後の興味深い課題として抽出できたと考えている。

参考文献

- [1] 喜多伸之: ロボットビジョンの現状と将来, OplusE, vol.24, no. 12, 1348-1351 (2002).
- [2] 長谷川 勉, 末広尚士, 高瀬國克: 環境モデルと作業スキルの統合によるロボット作業システム, 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 1, pp.66-74 (1991).
- [3] F. Saito, K. Nagata : A New Exchangeable Hand System for Portable Manipulators, Proc. 2001 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol.2, pp.1043-1048 (2001).
- [4] K. Kitagaki, T. Suehiro, and T. Ogasawara: Monitoring of a Pseudo Contact Point for Fine Manipulation, Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS '96), Vol.2, pp.757-762 (1996).
- [5] 永田和之他: 多指ハンドの物体操作による把持物体形状モデルの獲得, 計測自動制御学会論文集, vol. 34, no. 10, 1487-1493 (1998).
- [6] E. Ono et. al. : Picking Up a Piece of Fabric from Layers with a Hand with 3 Fingers and a Palm, Proc. 2001 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol.2, pp.931-936 (2001).
- [7] 富田文明: 高機能3次元視覚システムVVV, 情処学誌, 42, 4, pp.370-375 (2001).
- [8] N.J. Hollinghurst and R. Cipolla: Uncalibrated stereo hand-eye coordination, Image and Vision Computing, 12(3), 187-192 (1994).
- [9] S. Rougeaux, Y. Kuniyoshi: Robust Tracking by A Humanoid Vision System, Proc. of IARP First International Workshop on Humanoid and Friendly Robotics, Tsukuba, Japan, Oct. 26-27 (1998).
- [10] 坂根茂幸他: 視覚と力覚のセンサフュージョンによる把持物体の接触位置の推定, 電気学会システム・制御研究会資料, SC-92-5, 35-40 (1992).
- [11] 中垣博文, 北垣高成, 築根秀男: 画像トラッキングを用いた線状柔軟物体の先端力推定と挿入作業への適用, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No. 3, pp.422-430 (1997).
- [12] 田中 弘美他: ハプティックインターフェイス実現のための能動触覚, 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア, No.111 - 010, 73-80 (1998).
- [13] H. Onda: "Teaching by Demonstration in Virtual Reality - Specification of Preparation Motion based on a Virtual Small Face and an Artificial Constrained Motion Primitives -," Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.1095-1100 (1999).
- [14] Y. Kita, F. Saito, N. Kita: A deformable model driven method for handling clothes, Proceedings of International Conference on Pattern Recognition (2004).
- [15] 松下 浩一郎他: ハプティックビジョンに基づく物体の機能推定, 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア, No.132 - 015, 103-110 (2002).