

重畳関係と随伴性を用いた作用推定に基づく ヒューマノイドの道具操作

A Study on Function Estimation Using Superposition of Objects for Humanoids Manipulating Daily Objects

長濱 虎太郎 (東大) 西野 友博 (東大)
正 山崎 公俊 (東大) 岡田 慧 (東大)
正 稲葉 雅幸 (東大)

Kotaro NAGAHAMA, The University of Tokyo, nagahama@jsk.t.u-tokyo.ac.jp
Tomohiro NISHINO, The University of Tokyo
Kimitoshi YAMAZAKI, The University of Tokyo
Kei OKADA, The University of Tokyo
Masayuki INABA, The University of Tokyo

For a daily assistive robot, it is important to recognize its task succeeds or not especially when it is manipulating flexible objects. This paper describes a method to recognize the state of planate objects and to manipulate them. In our approach, states of superposition of two objects are calculated and used to track and estimate the function of them. This method can track objects which are overlapping one another. Because this method can also recognize inserting function, it is useful to observe tasks using a flexible planate objects. We tested this system by an experiment of tracking a file and a folder, and estimating the hierarchy of them while a humanoid robot was putting the file to the folder. This result showed the effectiveness of our approach.

Key Words: Daily assistive robots, Tool-use, Function estimation

1 緒言

家庭内で作業を行うロボットは、特に柔軟物を扱うタスクを行うに当たって、自らの物体操作の成功や失敗を認識し操作をやり直す能力が必要となる。そのため、布や紐についての状態認識及び記述法、そして失敗復帰法の研究が行われている [1][2][3]。

本稿で取り上げるのは、オフィスで見受けられる紙やフォルダなど薄く柔軟性のある道具や対象を扱う作業 (図 1) である。例えばペーパーナイフを用いて封筒を開けるとき (図 1,A) は、刃が封筒の前面と背面の間に入っている必要がある。紙を封筒から出すとき (図 1,B) は、封筒の中に手を入れて紙をつかむ。同様に、紙をフォルダに入れるとき (図 1,C) は、紙がフォルダの開口部へ導入される必要がある。これらの作業が正しく行われているか否かを判定するためには、操作対象同士の上下関係を用いることが考えられる。しかし対象の面同士を比較しようとした場合、それらの位置の差はわずかであり、距離センサを用いても観測することは難しい。

著者らはロボットによる人の作業観察において、道具と操作対象の重畳関係や速度の随伴性を用いて作用の種類を推定する手法を提案した [4]。この手法では、単眼カメラの投

影面上における追跡対象同士の重なり領域について、入力画像と追跡対象の見た目を比較することで前方にある対象を決定する。本稿では、この作用推定法を用いたヒューマノイドの作業成功・失敗の判定手法を提案する。また、ヒューマノイドで柔軟性のある面状対象物の操作を行い、有用性を評価する。

2 タスク設定とアプローチ

2.1 柔軟物同士の挿入タスク

本稿で取り上げるのは、ヒューマノイドがファイルをフォルダに入れるタスクである。実験環境を図 1,A に示す。ヒューマノイドは右手にファイル (赤色)、左手にフォルダ (緑色)



Fig. 1: Examples of tasks of handling papers. A) Cutting and opening an envelope, B) getting a document out of an envelope, and C) putting a document in a file.

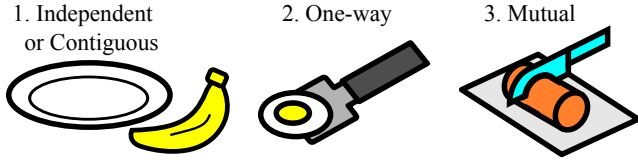


Fig. 4: Species of the state of superposition

そして相互重畳関係は，対象同士に突入関係が存在する場合，つまり切断や挿入のような作用が行われている場合に限られることを指摘した．本稿のタスクにおいても，挿入作用の可否はこの相互重畳関係を認識することで判定することが可能であると考え，タスク状態“s”，“u”及び“d”の状態を視覚における重畳関係から計算するものとした．

3 重畳関係と随伴性を用いた対象追跡と状態判定

人の道具利用観察のための，操作対象の追跡及び重畳関係の推定法 [4] をロボット自身の操作確認用へ拡張する．以下，追跡・推定法の概要と拡張法を述べる．

3.1 平面对象の追跡法

この追跡手法では，初期時刻 $t = 0$ における領域 $R(0) \subset \mathbb{N}^2$ と座標 ${}^C H_0$ が指定されている対象を粒子フィルタ [6] を用いて対象を追跡する．粒子フィルタの状態変数 x_t は，対象のカメラ座標系での三次元位置とロール・ピッチ・ヨー角度， $x_t = [x_t \ y_t \ z_t \ \alpha_t \ \beta_t \ \gamma_t]^T$ とする．[4] における動作モデル $p(X_t|X_{t-1})$ は，以下のようなものである．

$$x_{t|t-1}^{(k)} = x_{t-1}^{(k)} \quad (1)$$

である．しかしヒューマノイド自身が対象を操作している場合には，自らのエンドエフェクタの移動量 dx_t が既知である．対象がエンドエフェクタに固定されており同時に動く仮定すると，動作モデルは以下のように変更できる（随伴性）．

$$x_{t|t-1}^{(k)} = x_{t-1}^{(k)} + dx_t \quad (2)$$

粒子フィルタの尤度計算では，各粒子が表現する座標における追跡対象と入力画像の類似度を計算する．類似度は，1) chamfer score [7] を用いたエッジ位置の類似度評価，2) 対象の内部色を用いた評価の二つを統合して計算する．さらに，時刻 T [frame] において遮蔽されていた部分を除いた領域（非遮蔽領域）のみを用いて，時刻 $T + 1$ [frame] の尤度計算を行う．これにより，対象の一部が遮蔽されている場合でも追跡が可能となる．

3.2 重畳関係の推定法

重畳関係を評価するにあたってはまず，時刻 t [frame] において，対象領域 $R_A(t), R_B(t) \subset \mathbb{N}^2$ 同士の重なり領域 $R_{A,B}(t) = R_A(t) \cap R_B(t) \subset \mathbb{N}^2$ を求める．その後， $R_{A,B}$ 内部の各画素について入力画像 $I(t)$ が各対象の状態 x_t における画像 $I_A(t), I_B(t)$ のいずれに近いかを計算し，ラベリングする．ラベリングおよび重畳関係の決定法を，式 (3) に示す．

$$S_s(t) = \begin{cases} \text{“Initial State”}, & \text{if } R_{A,B} = \emptyset. \\ \text{“State u”}, & \text{if } \forall p \in R_{A,B}; s(p, A, B). \\ \text{“State d”}, & \text{if } \forall p \in R_{A,B}; s(p, B, A). \\ \text{“State s”}, & \text{if} \\ & (\exists p \in R_{A,B}; s(p, A, B)) \wedge (\exists p \in R_{A,B}; s(p, B, A)). \end{cases} \quad (3)$$

$$s(p, X, Y) \triangleq \|I(p) - I_X(p)\| \geq \|I(p) - I_Y(p)\|$$

ただし本稿のタスクにおいて，A がフォルダ，B がファイルをそれぞれ表すものとする． $I(p) \in [0, 255]^3$ は，入力画像 I の位置 p における輝度値 (R,G,B) とし，記号 $\|x - y\|$ は，輝度値 x, y 同士の距離を表す．本稿の実験では，マンハッタン距離を用いた．記号 \forall 及び \exists の計算には，ノイズ対策のため閾値処理を行った．つまりピクセル集合 $\{p | p \in R_{A,B} \wedge s(p, B, A)\}$ の要素数を N_A とした場合， N_A が定数 N_0 を上回った場合に \exists が成立するものとする．同様に， N_A が相手の集合の要素数を N_0 以上下回らない場合に \forall が成り立つものとする．図 3 の左には，フォルダが手前だと計算されているピクセル数 N_T 及び，ファイルが手前だと計算されているピクセル数 N_O を示した．

3.3 フォルダ操作における状態推定実験

実際のフォルダ操作タスクにおいて，ファイル及びフォルダの追跡を行った結果を図 3 の右に示す．特に状態“u”や状態“d”において，ファイルやフォルダの半分程度が遮蔽されているが，追跡は適切に行われている．また N_T 及び N_O は各状態で大きく異なることから，閾値処理を行うことで状態を分類できることが分かる．

さらに表 1 に示した予備実験においても，各試行の後に状態推定を行った．その結果，52 回の試行で全て正しく状態が推定された．

4 ヒューマノイドによるフォルダ操作実験

提案手法と，次項で述べる状態推定結果を用いた操作戦略を用い，ロボットにファイルをフォルダへ挿入するタスクを行わせた．実験には高視力ヒューマノイド HRP-2VZ [8] を用い，タスクは Folder 1, Folder 2 各々五回ずつ行わせた．



Fig. 5: Result of the experiment of putting a file into a folder

4.1 フォルダ操作における戦略

このタスクにおいて、ヒューマノイドは手首の回転角度 dr を変化させながら、ファイルを正しくフォルダへ挿入する試行を成功するまで行う。 dr を変化させるための戦略を擬似コードとしたものを Alg.1 に示す。始めの試行では $dr = dr_0$ とし、動作後にフォルダの状態 S を推定する。推定された状態が $S = "u"$ 、つまりファイルが上側にずれて失敗した場合、次の試行では θ_0 だけ手首を下へ大きく回す。一方で $S = "d"$ 、つまりファイルが下側にずれた場合は、 θ_0 だけ手首の回転角度を小さくする。二回目以降の試行では θ を徐々に小さくしていく。これを $S = "s"$ 、つまりフォルダへの挿入が終わるまで続ける。なお、本稿の実験では $dr_0 = -6$ 、 $\theta_0 = 3$ とした。

Algorithm 1 Algorithm of moving an end effector during the task of putting a file into a folder

```

 $dr \leftarrow dr_0$ 
 $\theta \leftarrow \theta_0$ 
while 1 do
  if  $S = "s"$  then
    return
  else if  $S = "d"$  then
     $dr \leftarrow dr + \theta$ 
  else if  $S = "u"$  then
     $dr \leftarrow dr - \theta$ 
  end if
   $\theta \leftarrow \max(\theta_{min}, \theta \times 0.5)$ 
end while

```

4.2 実験結果

全ての実験において、重畳関係を用いたファイルとフォルダの状態推定は正しく行われた。Folder 1 を用いた実験では、五回の実験全てで試行一回目にファイル挿入タスクが成功し、状態 "s" となった。一方、Folder 2 を用いた実験では五回の実験全てで、試行一回目には状態 "d" となった。試行二回目ではいずれの実験でもタスクが成功し、状態 "s" となった。Folder 2 を用いた実験の様子を図 5 に示す。フォルダへのファイル挿入タスクにおける平均試行回

数は 1.5 回、成功率は 100% となった。

5 結言

本稿では、柔軟性のある平面状の対象を操作するタスクを取り上げ、重畳関係と随伴性を用いた作用推定法がヒューマノイドの物体操作においても有用であることを示した。

野菜を切断する、楔を打つなどの作業でも相互重畳関係は発生する。従って本稿で取り上げたタスクと同様、重畳関係が成功・失敗を判定する手段となり得ると考えられる。重畳関係を用いた手法が、幅広いタスクへ共通して用いることのできる視覚認識法として発展していくことが期待される。

文献

- [1] K. Yamazaki, R. Ueda, S. Nozawa, Y. Mori, T. Maki, N. Hatao, K. Okada, and M. Inaba, "System Integration of a Daily Assistive Robot and its Application to Tidying and Cleaning Rooms", Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robots and Systems, pp. 1365–1371, 2010.
- [2] 小野栄一, 喜多伸之, 坂根茂幸, "視触覚を用いた輪郭情報に基づく折れ重なった布生地を展開", 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.2, pp. 275–283, 1997.
- [3] 高松淳, 森田拓磨, 小川原光一, 木村浩, 池内 克史, "ロボットによる実行を目的とした紐結び作業の記述", 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.5, pp. 572–582, 2005.
- [4] 長濱 虎太郎, 山崎 公俊, 岡田 慧, 稲葉 雅幸: "人の道具操作観察における複数領域追跡による重畳・随伴関係推定と操作機能分類", 第 17 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 534–540, 2012 (to be appeared).
- [5] 田中健太, 木原康之, 横小路泰義, "人間の直接教示動作の統計的性質に基づいた折り紙ロボットの目標軌道とセンサフィードバック則生成法", 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.6, pp. 685–695, 2009.
- [6] M. Isard and A. Blake, "CONDENSATION – conditional density propagation for visual tracking", International Journal on Computer Vision, Vol. 28, No. 1, pp. 5–28, 1998.
- [7] D. M. Gavrila, "Multi-feature Hierarchical Template matching Using Distance Transforms", Proceedings of the 14th International Conference on Pattern Recognition, pp. 439–444, 1998.
- [8] K. Nagahama, T. Nishino, M. Kojima, K. Yamazaki, K. Okada, M. Inaba: "End Point Tracking for a Moving Object with Several Attention Regions by Composite Vision System", Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 590–596, 2011.