

プリミティブ形状による円筒面を含む日用品の点群データの領域分割と知識モデルによる把持可能領域の決定

加藤龍一（都市大） 永田和之（産総研） 佐藤大祐 金宮好和（都市大）
原田研介 山野辺夏樹 中村晃（産総研） 辻徳生（九大）

1. 緒言

ロボットによる朝食などの後片付けを望む家庭は多いが、そのためには調味料や食器を含む日用品の扱い方を考慮する必要がある。そのため、ロボットも日用品を正しく扱うための把持方法を知るべきである。ロボットが物体を把持するために必要な物体モデルの作成にはレンジセンサがよく用いられる。レンジセンサによるモデル化の例としては、得られた点群を二次曲面の集合で近似して階層グラフ構造として表現する手法 [1] がある。近年では安価なレンジセンサが登場したため、Point Cloud Library (PCL) と併用した把持モデルの作成も容易になってきた。また、より高精度な把持モデルを作成するために、点群データと CAD モデルのフィッティングを用いた手法 [2] や複数のセンサによる高精度なモデル作成の手法 [3] も提案されている。しかし、日用品は同じような形状でも用途が異なれば扱い方も異なるため、形状に注目した把持の安定性 [4] ばかりでなく、用途に応じた日用品特有の扱い方を考慮した把持モデルが必要である。

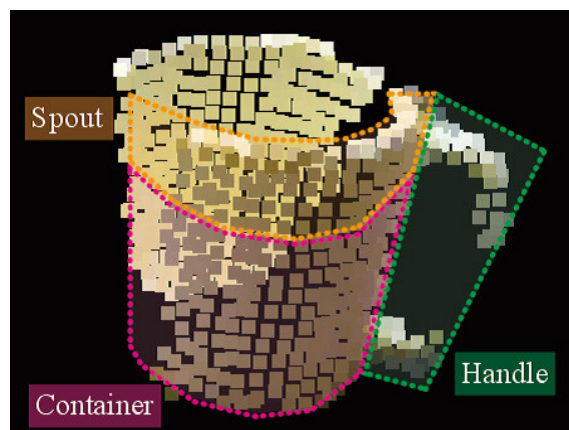
本研究では、日用品の扱い方の観点から対象物を機能単位のパーツに分割し、把持領域を抽出する手法 [5] を用いる。対象物はコップとペットボトルとし、対象物を構成するパーツを単純なプリミティブ形状で記述することで物体モデルを作成する。また作成された把持モデルを Choreonoid [6] に組み込み、把持を検証する。

2. 把持可能領域の決定

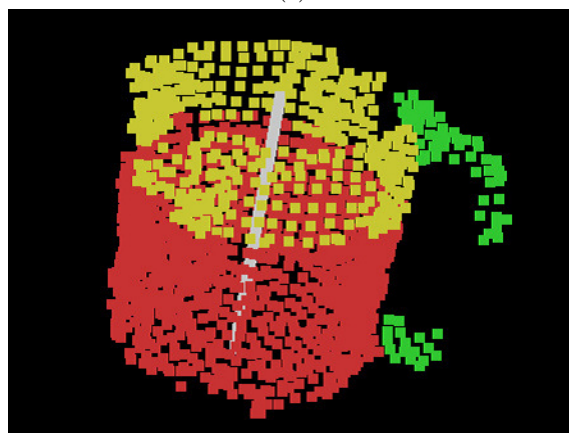
物体モデルの作成にあたり、物体の三次元点群データを、物体の扱い方の観点から把持可能領域と把持禁止領域に分割する。また物体から日用品を識別することで、日用品特有の把持領域も分割する。我々は三次元点群データから対象物の物体モデルを作成するために、日用品のデータベースと知識モデルを用意する。日用品のデータベースには、個々の日用品を構成するパーツのプリミティブ形状と寸法が含まれる。一方で知識モデルには、日用品を構成するパーツとパーツ間の継続関係、各パーツの扱い方の知識が記述されている。

2.1 日用品のデータベースと知識モデルの作成

日用品は飲み口や取っ手のように、日用品の扱い方の観点から機能単位のパーツに分割できる。このように機能単位で分割された日用品の各パーツを機能パーツと呼ぶ。ここではレンジセンサから取得した点群を機能パーツに領域分割し、把持可能領域を決定することを目的とする。点群を機能パーツに領域分割するためには、点群に含まれるプリミティブ形状とその大きさを日用品のデータベースと照合し、対象物の識別を



(a)



(b)

図1 コップのモデルマッピング: (a) 入力点群データ (b) 円筒面（赤）、取っ手（緑）、飲み口（黄）、円筒中心軸（白）の検出。

行う。識別された対象物の知識モデルによって点群を扱い方の観点から領域分割し、把持可能領域を決定する。

図1は(a)レンジセンサから取得した点群データからプリミティブ形状の寸法を求め、日用品のデータベースとの照合により取っ手付きのコップと識別され、(b)コップの知識モデルによって領域分割した結果である。コップは、コンテナ部、取っ手から構成される。コンテナ部は把持可能な機能パーツであるが、コンテナ部の上縁近傍の飲み口部は衛生の観点から把持禁止領域とし、コンテナ部とは分離している。図の領域分割では飲み口を黄色、飲み口を除いたコンテナ部を赤色、取っ手を緑色として可視化している。白線は、コンテナ部を円筒でモデル化したときの円筒中心軸を表わす。

表 1 PCL による円筒面の半径推定の精度検証 [mm] .

名称		コップ	スプレー	ペン	ペットボトル	ビニールテープ	ティッシュボトル
実測値	半径/高さ	41/80	18/112	10.5/145	33/150	23/20	57/165
計算値	最大値	42.6	19.9	16.6	35.3	26.0	58.8
	最小値	38.1	12.8	9.2	29.5	11.1	55.2
	平均値	39.6	16.3	11.6	33.0	19.1	56.7
	標準偏差	1.5	1.9	2.3	1.8	4.4	1.0

これらの領域分割を行うための日用品の識別には、物体の高さや半径といった寸法を用いている。点群に含まれるプリミティブ形状に加え、これらの寸法データを利用することで、識別の精度が向上する。もしも物体に円筒面が含まれている場合、その円筒面から推測される円筒中心軸から円筒面の高さと半径以外に、物体全体の高さと半径も導出できる。以上の理由から、日用品のデータベースには物体と円筒面の半径や高さといった寸法データを含む。日用品のデータベースと、点群データから得られるデータを照合することで、日用品を識別する。

次に対象物の知識モデルを用いることで、点群データを機能パーツで領域分割し、把持可能領域が求められる。また、知識モデルに記述されたパーツ接続の関係から、未検出のパーツを探索することもできる。接続関係の記述により各プリミティブ形状が把持可能か判定できる。以下に、コップの日用品のデータベースと知識モデルの例を示す。

● 日用品のデータベース

プリミティブ形状 円筒面・リング

物体の寸法（半径/高さ）52.5 mm / 105 mm

円筒の寸法（半径/高さ）40 mm / 75 mm

● 知識モデル

構成パーツ コンテナ・取っ手

把持可能領域 コンテナ外部・取っ手

把持禁止領域 飲み口・コンテナ内部

接続関係 コンテナ（固定接続）取っ手

把持可能領域を決定するには日用品の識別が重要であるため、点群データからのプリミティブ形状の分類や円筒形パラメータの計算精度が重要となる。

2.2 円筒形パラメータの取得

日用品の寸法を測定するため、ここではPCLを用いた円筒形パラメータを取得する流れを説明する。入力点群データに対してVoxel Gridフィルタリングと各点間の距離によるクラスタリングを行ったものを図2 (a)、さらにコンテナ部を円筒形状でモデル化し、円筒面とそれ以外の点群に分離したものを図2 (b) に示す。PCLでは円筒面を構成する中心軸と半径のパラメータが取得できる。ここでは、PCLから得られる円筒半径と実測値を比較し精度評価を行った。半径の精度評価は、それぞれの物体について10回計測し、データを比較して行った。精度検証の結果を表1に示す。円筒半径または高さが小さい物体は十分な点群が得られない。結果

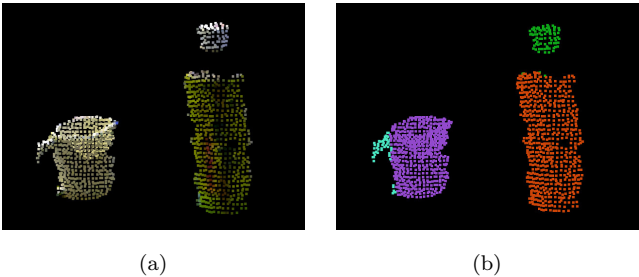


図 2 点群データのクラスタリングと各パーツの検出: (a) クラスタリング結果 (b) クラスタを円筒面とそれ以外の点群に分割した結果。

としてビニールテープの標準偏差は 4.4 mm と大きなばらつきが発生した。一方で今回利用するペットボトルやコップについては、実測値と平均値の差が 1.4 mm 以内、標準偏差が 1.8 mm 以内という結果であった。

2.2.1 ニュートン法による中心軸の推定

PCL により円筒中心軸が得られるが、目視でもわかるほどずれる場合があり、精度が悪い。そこで対象物は床面に対して垂直に置かれているものとし、床面の法線ベクトルと円筒半径を用いて点群から円筒中心軸を推定する。円筒中心軸は対象物の m 個の点データを床面に投影し、水平面上の円弧 $p_i = (x_i, y_i)^T$ ($i = 1, 2, \dots, m$) にフィッティングさせる。中心軸の位置 $p_0 = (x_0, y_0)^T$ を導出する拘束条件は (1) となる。

$$(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 - r^2 = 0 \tag{1}$$

点群の誤差 e を考慮し、(2) を満たす解をニュートン法により導出する。

$$e = \sum_{k=1}^m \left[(x_0 - x_k)^2 + (y_0 - y_k)^2 - r^2 \right] \rightarrow \min \tag{2}$$

ここで、 m 個の点データをまとめると

$$\delta = -J^+ f \tag{3}$$

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 - r^2 \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 - r^2 \\ \vdots \\ (x_0 - x_m)^2 + (y_0 - y_m)^2 - r^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{5}$$

となる． J^+ は J の擬似逆行列であり，円筒中心軸の開始点 p_0 は以下の手順で導出する．今回の初期値は PCL によって導出された円筒中心軸の開始点とする．

1. 初期値を p_0 に代入する．
2. (4)，(5) より f と J を導出する．
3. (3) により δ を導出する．
4. δ が十分小さければ推定を終了し，そうでなければ δ を p_0 に加え，2 に戻る．

2.3 周辺パーツの判定

本研究では，コップとペットボトルを対象としており，対象物を構成するパーツはコンテナ，取っ手，フタとなる．まず，PCL を用いて点群データからコンテナ部の円筒が取得される．次に，コンテナ部の周辺にある点群データから，他のパーツを取得する．コンテナ周辺の点群がどのパーツであるかは，点群と円筒中心軸の距離から判定する．図 3 (a) に示すように，センサ座標系から見た点群のある点の位置ベクトルを p_i ，円筒中心軸の開始点と終点を p_b, p_t ，コンテナ部の円筒半径を r とすると，その点から中心軸までの距離 r_i は次式により得られる．

$$r_i = |p_i - h_i| \quad (6)$$

$$h_i = k p_t + (1 - k) p_b \quad (7)$$

$$k = \frac{(p_t - p_b) \cdot (p_i - p_b)}{|p_t - p_b|^2} \quad (8)$$

ここで， $r_i < r - \Delta r$ ならば（図 3 (b) 青色領域）その点はフタに属するものと判定し， $r_i > r + \Delta r$ ならば（図 3 (b) 緑色領域）その点は取っ手に属するものと判定する． Δr は，半径 r の許容誤差の値である．

点群から得られたパーツと，パーツのパラメータを日用品のデータベースと照合することで，対象物の識別を行う．次に，識別された対象物の知識モデルを用いて，対象物の点群データを物体の扱い方の観点から領域分割する．図 4 に，ペットボトルとコップの点群データを領域分割した結果を示す．(a) はレンジセンサにより取得した点群データであり，(b) は日用品の扱い方の観点で対象物を領域分割した結果である．

3. シミュレータによる検証

対象物の点群データを領域分割して把持領域を求め，そのデータを用いてシミュレータ上で把持実験を行った．

3.1 シミュレーション条件

シミュレータには Choreonoid [6] を用いた．対象物としてコップをテーブルの上に置き，ASUS 社製の Xtion Pro Live を用いてコップの点群データを取得した．次に日用品のデータベースと知識モデルを用いて，取得した点群データを領域分割して把持領域を求めた．今回の実験では，把持禁止領域を取っ手と飲み口とし，その他の領域を把持可能領域とした．取っ手を把持禁止領域とした理由は，Xtion Pro Live で取っ手のような細いパーツの点群データを十分に取得できなかったからである．シミュレーションに用いるマニピュレータモデルは三菱重工業社製の PA-10 である．以下にシミュレーションの一連の流れを示す．

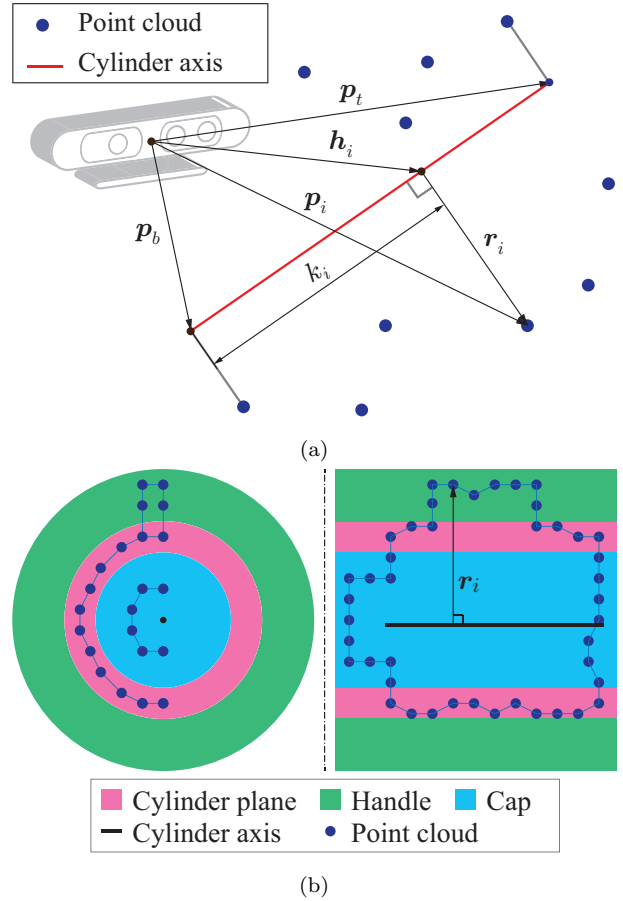
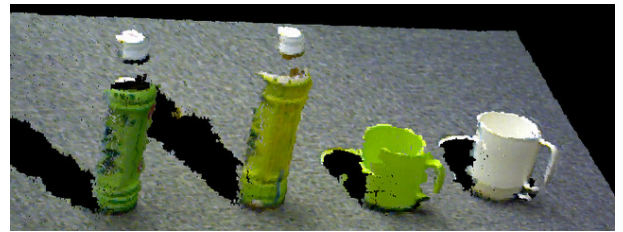
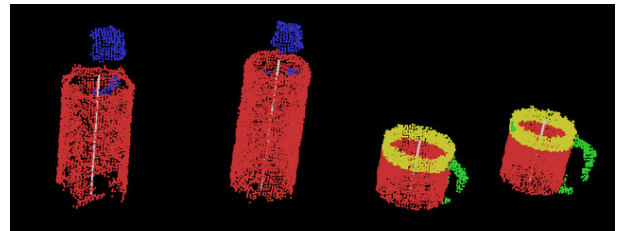


図 3 点群をパーツごとに領域分割する: (a) 点群から中心軸に下ろした垂線の長さの計算 (b) 円筒面（赤）とフタ（青）と取っ手（緑）に分割．



(a)



(b)

図 4 ペットボトルとコップの機能パーツによる領域分割: (a) 入力点群データ，(b) 分割結果．

1. ペットボトルとコップの日用品のデータベースを取得する．
2. Xtion Pro Live によって点群データを取得する．

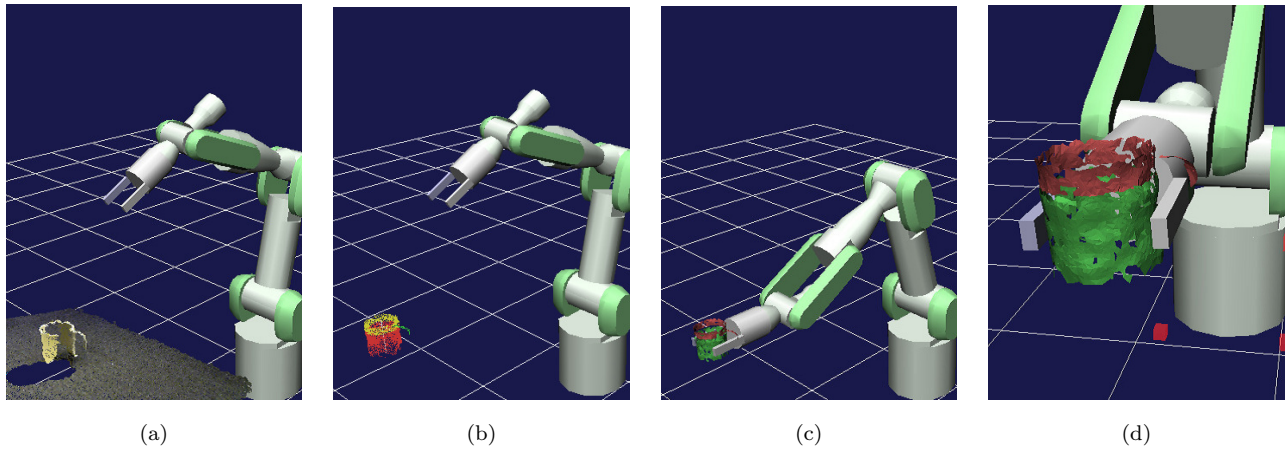


図5 コップの把持実験: (a) 点群の取得, (b) 機能パーツの分類, (c)-(d) 把持可能領域のみで把持した結果 (茶色:把持禁止領域, 緑色:把持可能領域)。

3. 点群に対してフィルタリングとクラスタリングを適用し, 床面の法線ベクトルを導出する。
4. クラスタリングした各点群 (Cluster) を円筒面点群 (Cylinder) とそれ以外の点群 (Other) に分割する。
5. 円筒面の半径と床面の法線ベクトルを用いて Cylinder から円筒中心軸を推定する。
6. 円筒面の各パラメータにより Other からフタと取っ手を検出する。
7. Cluster と Cylinder の高さや半径の計算値と機能パーツを日用品のデータベースと照合し, 日用品の識別を行う。
8. 識別モデルにより照合された日用品の知識モデルを用いて領域分割する。
9. 把持可能領域を決定する (コップの場合はコンテナ部の円筒面から飲み口を除いた部分を示す)。
10. Choreonoid の GraspPlugin によって把持禁止領域を回避し, 把持可能領域を把持する。

3.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図5に示す。(a)は, Xtion Pro Live から取得した点群データをシミュレータに入力したところ, (b)は床面の法線ベクトルと円筒面と取っ手とフタを探索し, 知識モデルによって領域分割した結果である。この結果より, 点群から機能パーツの分類と各パラメータの計算が正しく行われ, コップと識別されたことがわかる。(c)は把持実験の結果である。対象物は, 把持可能領域を緑色に, 把持禁止領域を茶色に色分けして表示している。(d)は(c)を拡大した画像であるが, 把持禁止領域を回避して把持していることがわかる。以上の結果から, Choreonoid 上でコップの点群の把持可能領域のみを PA-10 で把持することに成功したことがわかる。

4. 結言

レンジセンサで取得した対象物の三次元点群データをプリミティブ形状にフィッティングし, 日用品のデータベースと照合することで, 日用品の識別に成功した。また, 識別された対象物の知識モデルを用いて, 対象

物を扱い方の観点から領域分割し, 把持可能領域を決定した。最後にシミュレータを用いて実際に把持が可能かどうかの検証を行い, 把持禁止領域に触れることなく把持を達成できることを確認した。

4.1 今後の課題

今回は, 対象物が床面に対して垂直に置かれている条件で対象物の円筒中心軸の推定を行った。しかし住環境においては対象物が横倒しで置かれている場合や他の物体に寄りかかって置かれている場合も存在する。そのため, 物体の姿勢が変化しても中心軸が推定できる手法が必要である。また, 実機で把持を実現することも重要となる。そのためにはレンジセンサのキャリブレーションなどを行い, 点群データと実際の物体や実機との誤差を減らす手法を検討する必要がある。

参考文献

- [1] 辻徳生, 原田研介, 山野辺夏樹, 永田和之, 中村晃, 長谷川勉: “把持計画のための対象物二次曲面近似のグラフ表現”, 第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集, AC3E1-7, 2011.
- [2] N. Blodow, D. Gossow, S. Gedikli, R. B. Rusu and G. Bradski, “CAD-Model Recognition and 6DOF Pose Estimation Using 3D Cues”, *IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, pp. 585-592, 2012.
- [3] A. Kasper, Z. Xue and R. Dillmann, “The KIT object models database: An object model database for object recognition, localization and manipulation in service robotics”, *The International Journal of Robotics Research*, 2012.
- [4] T. Baier and J. Zhang, “Reusability-based Semantics for Grasp Evaluation in Context of Service Robotics”, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 703-708, 2006.
- [5] 永田和之, 山野辺夏樹, 原田研介, 中村晃, 辻徳生: “物体把持のための日用品のモデル化”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 2A1-H03, 2012.
- [6] T. Tsuji, K. Harada, N. Yamanobe, K. Nagata, A. Nakamura and T. Hasegawa, “Grasp Planning Toolbox in CHoreonoid”, *Robotics Society of Japan, AC2Q2-1*, 2011.