

配列された物品把持における手指の運動解析

千葉 貴文 (都市大), 永田 和之 (産総研), 多田 充徳 (産総研), 朝岡 忠 (産総研)
西 卓郎 (産総研), 佐藤 大祐 (都市大), 金宮 好和 (都市大)

Hand Motion Analysis for Picking Stacked Objects

Takafumi CHIBA (TCU), Kazuyuki NAGATA (AIST), Mitsunori TADA (AIST),
Tadashi ASAOKA (AIST), Takao NISHI (AIST), Daisuke SATO (TCU)
and Yoshikazu KANAMIYA (TCU)

Abstract: For storage efficiency in a warehouse or home, daily objects are often stacked vertically or horizontally. To fetch an object in this case, graspless manipulation is used. Our group's aim is to find relationships between grasp strategies and object arrangement patterns. This is done by hand motion analysis during grasping. In this paper, we report results from the analysis for a few specific cases.

1. 緒言

物流倉庫や家庭内に収納されている物品は、収納効率を上げるために積み重ねられたり、並べられたりして特定の配置パターンで収納されている。配列された物品は、把持面が他の物体により隠蔽されている場合が多く、物品を把持するためには、物品を手前に引き出したり、回転させたりして把持面を表出させるグラスプレス・マニピュレーションが必要となる¹⁾。本研究は、グラスプレス・マニピュレーションを伴う配列物品の把持について、把持計測を行い、手指の運動解析を行うことにより、配列パターンに対する把持戦略の関係を明らかにすることを目的とする。

本稿では、物品配列パターンとして代表的な平積みと棚差しについて、ピッキングにおける手指の運動を計測し、解析を行ったので報告する。

2. 配列された物品の把持計測

2.1 把持対象物品について

本稿で扱う物品と配列パターンは、Fig. 1 に示す 3 種類の物品 (本, CD, 皿) と 2 種類の配列パターン (平積み, 棚差し) の 5 通りの組み合わせとする。尚, これらの物品は同程度のサイズのものを用意した。

2.2 計測方法

計測方法として、まず被験者の利き手に CyberGlove Systems 社製 CyberGlove を装着し、キャリブレーションを行った。その後、物品が配置された机の前に立ち、右手を机の上にかざし、伸展位をとった状態を初期状態として物品を取り上げてもらった。このときの手指の関節角データ

を CyberGlove で、物品把持の映像をビデオカメラで記録した。一回の計測時間は 5 sec であり、それぞれの物品配列パターンについて 5 つの物品の把持を 5 回計測した。被験者一名につき、5 パターン × 5 個 × 5 回 = 125 個のデータを取得した。CyberGlove のサンプリング周期は 10 msec、取得するデータは 20 関節角であり、被験者は 30 代から 50 代の成人 6 名である。物品を把持する際、本・棚差しでは Fig. 1 (b) の左側から、CD・棚差しでは Fig. 1 (d) の右側から把持するものとした。

尚、本把持計測実験は、産総研内にて設けられた人間工学実験委員会において実験内容を審議し、承認を得ている。

3. カメラ映像による物品把持観察

まず、ビデオカメラで撮影した物品把持の映像を観察した。今回の実験では、全ての物品の最終的な把持形態は、親指とその他の指を対向させて把持する prismatic precision であった²⁾。把持形態が prismatic precision の場合、

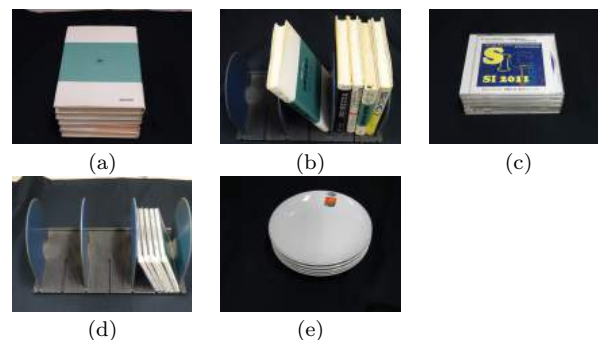


Fig. 1: Arranged objects: (a) vertical stacked books, (b) horizontal stacked books, (c) vertical stacked CD, (d) horizontal stacked CD and (e) vertical stacked plates.

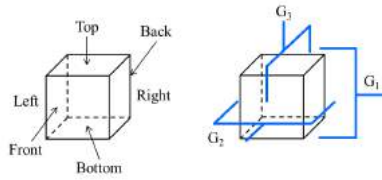


Fig. 2: Object model for prismatic precision.

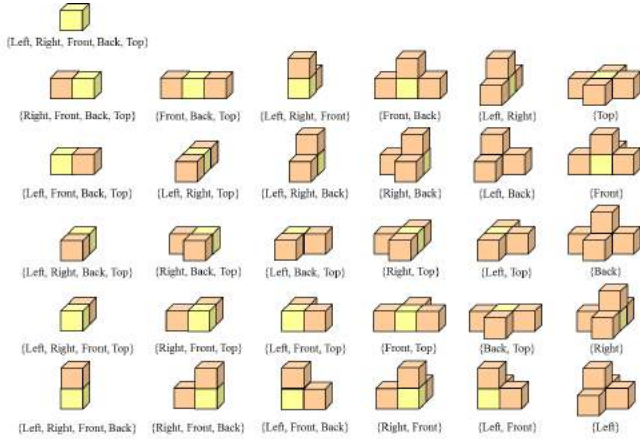


Fig. 3: Object arrangement model for prismatic precision.

我々は把持物品を直方体でモデル化し，物品配列モデルを定義している³⁾．物品配列モデルは，直方体で表した物品モデルの各面を Fig. 2 のように表記し，どの面に指が自由にアクセスできるのかに応じて配列パターンを定義した (Fig. 3)⁴⁾．

把持面が隣接物体により隠蔽されているとき，指が自由にアクセスできる面に指操作を加えて把持面を表出し，物品把持が行われる．今回の把持計測実験では，Fig. 4 に示す 4 つの指操作が観察された．ここで Fig. 4 (a) pushing は，物品のサイド面を指で押して物品を並進または回転させる操作，(b) sliding は，物品の Top 面を押しながら物品を並進または回転させる操作，(c) rolling は，物品の Top 面を押えながら物品底面のエッジを中心に回転させる操作，(d) raising は，物品の Top 面とサイド面に指を置き，物品を回転させて起こす操作である．

今回扱う物品配列パターンは平積みと棚差しである．平積み物品は，主に Top と Bottom が把持面となり，棚差しの物品は Left と Right が把持面となる．平積みの場合には Bottom の把持面が隠蔽されており，棚差しの場合には Left と Right の両方，もしくは片方の把持面が隠蔽されている．これらの隠蔽された把持面を表出するために，平積みでは，pushing (Fig. 5 (a), (b))，sliding (Fig. 5 (c))，raising (Fig. 5 (f)) が，棚差しでは rolling (Fig. 5 (d), (e)) が観察された．

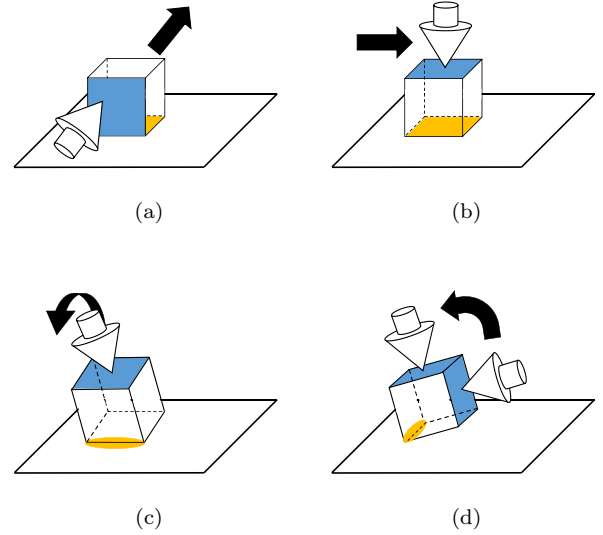


Fig. 4: Graspsless manipulation: (a) pushing, (b) sliding, (c) rolling and (d) raising.

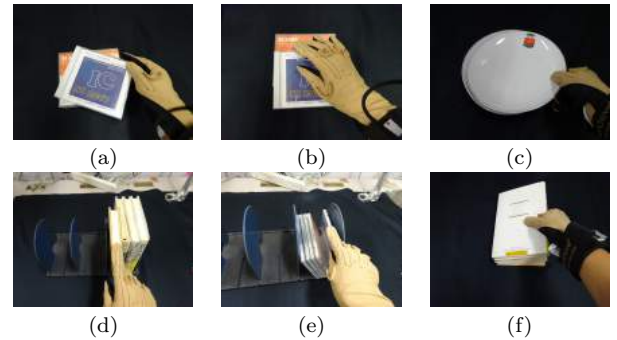


Fig. 5: Examples of exposing surface: (a) pushing a CD for rotation, (b) pushing a CD for translation, (c) sliding a plate, (d) rolling a book, (e) rolling a CD and (f) raising a book.

4. 計測した関節角データの解析

4.1 α - β フィルタによる把持動作区間の抽出

計測した関節角データには，把持動作前後の静止状態の区間が含まれる．この区間は，後述の関数主成分分析に影響を与えるため，削除することとした．

静止状態の区間のデータを削除するため，カルマンフィルタの一つである α - β フィルタを用いた．これは関節角度の目標速度成分の平滑値を求め，その平滑値に対し閾値を設けることで静止状態を検出し，把持動作区間を切り出した．尚，目標速度成分の平滑値は，速度ベクトルのノルムを用いた．

Fig. 6 は，計測データから把持動作区間を切り出した例である．

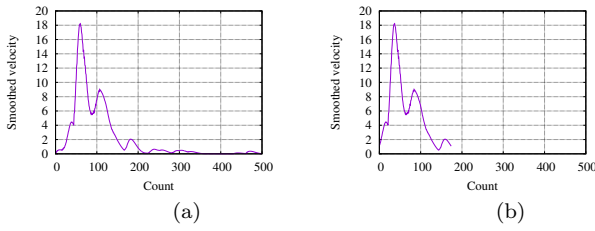


Fig. 6: Extract a grasping section: (a) original data and (b) extracted data.

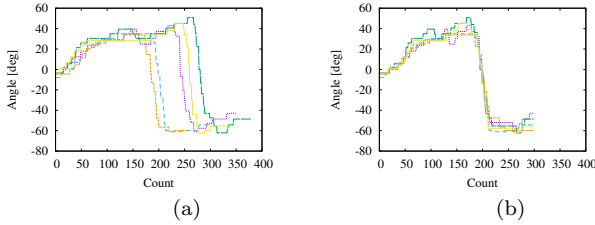


Fig. 7: DTW results: (a) original data and (b) sorted data.

4.2 Dynamic Time Warping による時間幅の伸縮

α - β フィルタにより動作区間を切り出した関節角データは、それぞれ動作の実行時間が異なる。そこで、動作の実行時間を合わせるため、Dynamic Time Warping (DTW) により動作時間の伸縮を行った⁵⁾。

Fig. 7 に、ある被験者における DTW による動作時間幅の伸縮を行う前後の、一つの関節の関節角データの 5 回分の結果を示す。これより、関節角データの動作時間幅が統一されていることが分かる。尚、全ての関節角データの時間長は 300 カウントとした。

4.3 主成分分析による解析

α - β フィルタおよび DTW により、動作区間を切り出し、動作時間を統一した関節角データを用いて、主成分分析による次元の縮約を行った。主成分分析とは、多次元データが持つ情報の損失を防ぎつつ、低次元空間に縮約する手法である。今回の解析では、第二主成分まで求めた。第二主成分までの累積寄与率は約 75% である。

Fig. 8 に、前記 5 パターンの物品と配列パターンの組合わせにおいて、横軸に第 1 主成分、縦軸に第 2 主成分をとった主成分スコアを示す。Fig. 8 において、灰色の線は 5 パターンにおける全被験者のデータを表し、着色した線は、代表的なデータを表す。また、時系列の手指の姿勢を、産総研で開発した DhaibaWorks を用い描画した。

Fig. 8 (a) において、赤色と青色の線は、pushing により対象物を回転させて Bottom の把持面を表出し、Top 面

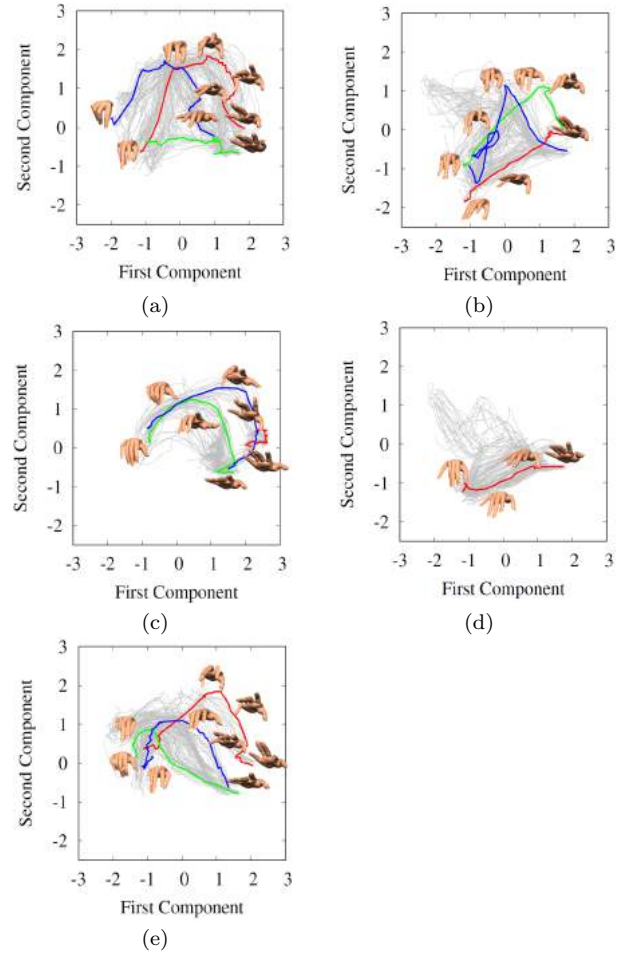


Fig. 8: PCA results: (a) vertical stacked books, (b) horizontal stacked books, (c) vertical stacked CD, (d) horizontal stacked CD and (e) vertical stacked plates.

と Bottom 面を把持したもので、緑色の線は pushing により対象物を並進させて Bottom の把持面を表出させ、Top 面と Bottom 面を把持したものである。

Fig. 8 (b) において、青色と緑色の線は rolling により側面にある把持面を表出させて Left 面と Right 面を把持したもので、赤色の線は直接 Left 面と Right 面を把持したものである。

Fig. 8 (c) において、緑色の線は pushing により、青色の線は raising により Bottom の把持面を表出した後に Top 面と Bottom 面を把持したもので、赤色の線は直接 CD の側面を把持したものである。

Fig. 8 (d) において、赤色の線は rolling により把持面を表出し、Left 面と Right 面を把持したものである。

Fig. 8 (e) において、赤、青、緑色の線はすべて sliding により Bottom の把持面を表出した後、Top 面と Bottom 面を把持したものである。

4.4 関数主成分分析による解析

主成分分析により $6,000(=20 \times 300)$ 次元から $600(=2 \times 300)$ 次元に縮約したデータに対し、関数主成分分析によりさらに次元の縮約を行った⁶⁾⁷⁾⁸⁾。主成分分析において得られたそれぞれの主成分データに対して、関数主成分分析では2主成分求めた。つまり、 $600(=2 \times 300)$ 次元のデータを $4(=2 \times 2)$ 次元に圧縮した。関数主成分分析を行うため時系列データを曲線に近似する際、4 次の B-Spline 関数により近似した。尚、knots 数は 150 である。

Fig. 9 に、5 パターンの組み合わせにおける関数主成分分析の結果を示す。Fig. 9 (a) は主成分分析の第一主成分、Fig. 9 (b) は第二主成分に対する関数主成分分析の結果である。Fig. 9 は、物品配列パターンごとに色分けしており、赤は本・平積み、緑は本・棚差し、青は CD・平積み、黄は CD・棚差し、紫色は皿・平積みを表している。

4.5 KKZ 法によるクラスタリング

関数主成分分析により得た 4 次元データに対し、クラスタリングによる分類を行った。これにより、配列パターンに対する把持戦略の分類を試みる。クラスタリングには KKZ 法を使用し、分割クラスタ数は 8 とした⁹⁾。

Fig. 10 に、関数主成分分析で得た主成分を KKZ 法により分類し、クラスタごとに着色した結果を示す。Fig. 10 において、黒色の三角形は各クラスタの重心を表す。以下に、各クラスタに所属する物品配列パターンと把持戦略について述べる。

赤色クラスタおよび茶色クラスタは共に、CD・平積みにおいて直接 CD の側面を把持したものである。把持面は Front-Back、または Left-Right である。

青色クラスタおよび水色クラスタは共に、本・棚差しと CD・棚差しのデータが多く含まれた。把持は共に、Left と Right 面を直接把持するものと、rolling により把持面を表出した後に、Left と Right 面を把持するタイプが含まれた。

緑色クラスタは、本・棚差し、CD・棚差し、皿・平積みのデータが多く含まれた。このクラスタには、一人の被験者の結果が多く所属していた。把持戦略は、Left と Right の面を直接把持するものと、rolling を適用した後に Left と Right の面を把持するもの、皿・平積みの場合 sliding を適用した後に Top と Bottom を把持するタイプが含まれた。

橙色クラスタは、本・平積みと CD・平積み、皿・平積みのデータが多く含まれた。把持面の表出方法として、sliding, pushing, raising が観測された。

黄色クラスタには、橙色クラスタと同様に本・平積みと CD・平積み、皿・平積みのデータが多く含まれた。把持

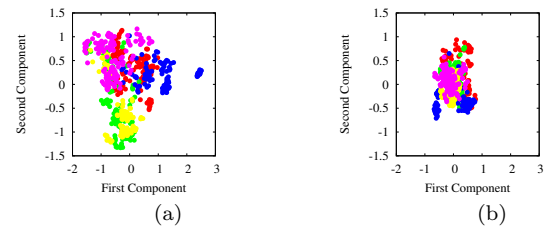


Fig. 9: fPCA results: (a) first component and (b) second component.

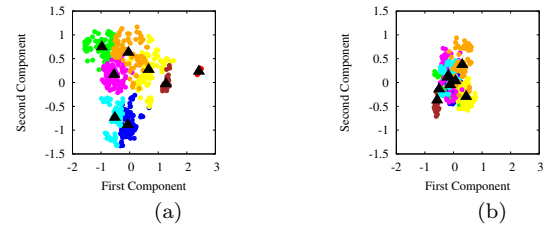


Fig. 10: KKZ results: (a) first component and (b) second component.

面の表出方法として、sliding, pushing, raising が観測された。

紫色クラスタには全てのパターンが含まれた。このクラスタには他クラスタに所属しなかった中間的なデータが含まれていると考えられる。把持面の表出方法については、全てのパターンが含まれていた。

青色、水色クラスタおよび、橙、黄色クラスタの結果より、物品配列パターンが同じならば、同じ把持戦略が適用されることが分かる。

青色クラスタおよび水色クラスタの棚差しの把持において、rolling を適用した後に把持を行う方法と、把持面がすでに表出している物品を直接把持する方法が同一のクラスタに所属することから、この二つの操作は、同一の運動により実現されているものと思われる。

5. 関節角データ解析と把持戦略の関係

隠蔽された把持面表出のためのグラスプレス・マニピュレーションを伴う物品把持を把持戦略と捉え、把持戦略と関節角データの解析の結果の関係について示す。把持戦略は、グラスプレス・マニピュレーションに応じて、pushing, sliding, rolling, raising, そして把持面表出の必要がない direct grasping に分類して考える。Fig. 11 に把持戦略と、主成分分析および関数主成分分析の結果との関係を示す。Fig. 11 では、物品配列パターンごとに色分けしており、赤は本・平積み、緑は本・棚差し、青は CD・平積み、黄は CD・棚差し、紫色は皿・平積みのデータを表す。

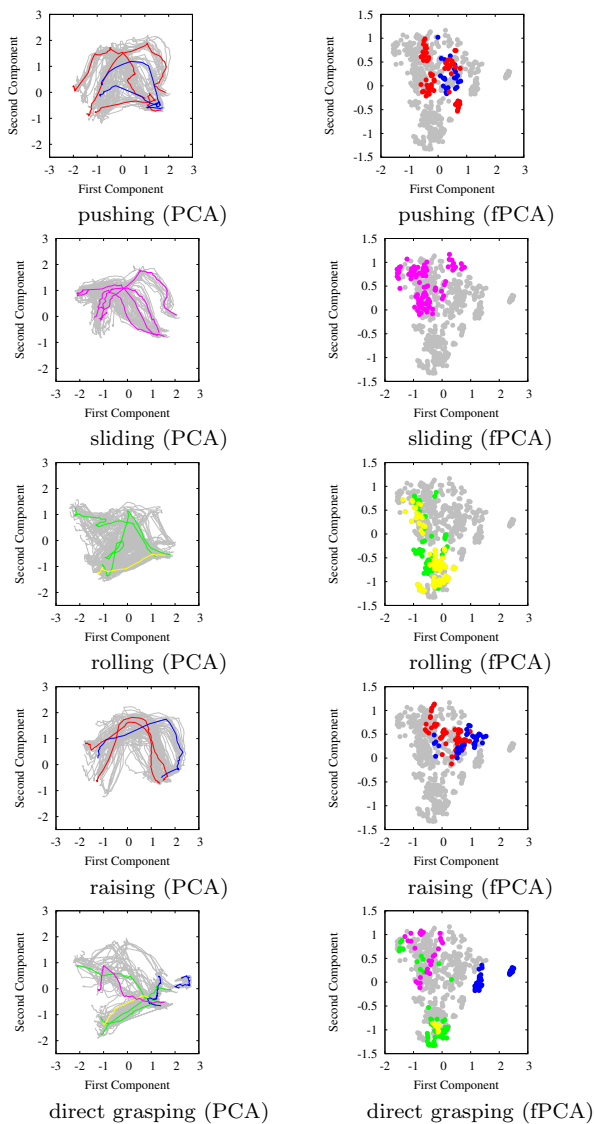


Fig. 11: Grasping strategy and PCA, fPCA results: (a) pushing, (b) sliding, (c) rolling (d) raising and (e) direct grasping.

Fig. 11 の関数主成分分析の結果に着目すると、物品配列パターンが棚差しの場合、把持面の表出なしに直接把持した場合と、rolling を適用した場合の主成分の値が近いことが分かる。これより、KKZ 法による分類の結果と同様に、この二つの棚差して置かれた物品に対する把持動作は同一の運動パターンで実現されているものと考えられる。また同様に、平積みで置かれた物品に pushing と raising を適用した場合の主成分の値が近いことが分かる。これより、平積み物品に pushing と raising を適用した把持も同一の運動パターンで実現されているものと考えられる。

6. 結言

本稿は、把持戦略と物品配列パターンの関係を調べるため、代表的な配列パターンである平積みと棚差しについて、

グラスプレス・マニピュレーションを伴う物品把持における手指の運動計測を行い、その解析結果を示した。解析結果より、同じ配列パターンの物品には、同様の把持戦略が適用されると考えられる。

把持戦略と運動解析の結果の関係から、棚差しの物品把持において、rolling により把持面を表出して把持する場合と、物品の両側面を直接対向把持する動作は、同じ運動で実現されるものと考えられる。また、平積みの物品把持において、pushing と raising により把持面を表出する操作も、同じ運動で実現されるものと考えられる。

今後の課題として、被験者をさらに増やし、解析を行っていく。また、今回関節角度に着目して解析を行ったが、今後は指先の位置関係を調査することにより、配列された物品を把持する際に手指が有する内的運動の解析を行っていく予定である。これにより、配列された物品の把持に必要な指の本数と自由度構成について調査する。

最後に、本研究は JSPS 科研費 JP17H01805 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 相山康道, 稲葉雅幸, 井上博允, “グラスプレス・マニピュレーションの研究: 操作形態の分類とピボット動作の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 1, pp.114-121, 1996.
- [2] M. Cutkosky, “On grasp choice, grasp models and the design of hands for manufacturing tasks,” in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.5, No. 3 pp. 269-279, 1989.
- [3] 永田和之, 原田研介, 辻徳生, 山野辺夏樹, 中村晃, “オブジェクトピッキングのための物体配置モデル”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 講演論文集, 1A1-I01, 2011.
- [4] 永田和之, 西卓郎, 山野辺夏樹, 原田研介, “深層学習によるピッキングのための環境認識”, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2016) 講演論文集, 3N2-1, 2016.
- [5] E. Keogh, C. A. Ratanamahatana, “Exact indexing of dynamic time warping,” in *Knowledge and Information Systems*, Vol. 7 (3), pp.358-386, 2005.
- [6] 木村加奈子, 有木由香, 多田充徳, 梅田和昇, “把握データベースの構築と把握解析への応用”, 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, 2P1-N08, 2012.
- [7] Wei Dai, Yu Sun, and Xiaoning Qian, “Functional data analysis in grasping motion,” in *Proc. of 2013 IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3507-3513, 2013.
- [8] Ramsay, J. O., Giles Hooker and Spencer Graves, “Functional data analysis with R and MATLAB,” Springer, 2009.
- [9] 小野寺崇, 坂井美帆, 山田誠二, “k-means 法のような初期設定によるクラスタリング結果の実験的比較”, 2011 年度人工知能学会全国大会, 1J1-OS9-1, 2011.