

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330306

研究課題名(和文) 把持の中間表現と自律視触覚フィードバック制御を用いた物体操作の教示法

研究課題名(英文) Teaching method for object manipulation using intermediate grasp representation and autonomous visual tactile feedback

研究代表者

小川原 光一 (OGAWARA, Koichi)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：70452810

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：手指を使った物体の器用な操りをロボットに教示するために、視覚センサによって教示者が行う物体操作を観察し把持形状の遷移を認識する方法を開発した。また、認識された把持形状の遷移を元に、把持形状が変化する場合と変化しない場合のそれぞれについて、与えられた物体の運動を実現する多指ハンドの運動を自動生成する方法を開発した。さらに、ロボットの運動計画を教示者に提示し、必要に応じて随時動作の中断や再計画を指示するためのインターフェースを開発した。

研究成果の概要(英文)：To teach dexterous object manipulation to a robot, a method for hand shape recognition by visually observing object manipulation demonstrated by a human operator has been developed. A method for generating the motion of a multi-finger hand based on the sequence of recognized hand shapes has been also developed where the desired trajectory of a manipulated object is realized. Furthermore, an interface has been developed to show the planned motion of a robot to a human operator so that the human operator can safely reject the generated motions.

研究分野：ロボティクス

キーワード：遠隔操作 作業教示 手形状認識

## 1. 研究開始当初の背景

生活空間にロボット技術を導入し、生活支援の手段として活用することを目的とした研究開発が盛んに行われている。その中でも、人間のために整備されたインフラを使用して種々の作業を人間に代わって実行するためのロボット技術は、家庭における軽作業の代行や危険な場所における作業の代行など様々な場面において利用されることが期待できる。

このロボット技術は、大きく分けてロボットを遠隔操作する技術と自律ロボットを用いる技術の2つに分類される。遠隔操作のうち、手術支援ロボット「ダ・ヴィンチ」のように鉗子などロボットに接続された機器を直接操作する方式は既に実用化されている。一方、位置センサやマスターアームとデータグローブを併用してロボットアームと多指ハンドを遠隔操作し、ロボットハンドを介して物体を操作する研究が、NASAのグループやDLRのグループなどによってなされている。しかし、人間の手指と多指ハンドは機構が異なるため、人間の手指の動きを多指ハンドに直接伝達して任意の物体を器用に操ることは困難である。

自律ロボットを用いる例では、視覚と多指ハンドの協調に基いて物体操作を実現する研究が、CMUのグループやJPLのグループなどによってなされている。これらの研究では、物体の情報や作業内容は既知として事前に動作戦略をプログラマーが用意しているが、物体の器用な操りや持ち替えを含む複雑な物体操作を簡単にロボットに実装する方法は確立されていない。

研究代表者はこれまでに、人間型ロボットを対象とした実演に基づく物体操作の教法について研究を進めてきた。その過程で、物体を安定的に保持するためには握力把握を用い、物体を器用に操るためには精密把握を用いるなど、操作物体の使用目的に即した適切な把持の形態があることに着目し、人間が日常の道具を操る際に現れる把持の形態を網羅した分類分けを把持の中間表現と定義して、この中間表現を介して機構が異なる人間の手指とロボットハンドの間で把持を伝達する方法を提案した。この方法では、まずデータグローブに圧力センサを分布した計測装置と隠れマルコフモデルに基づく認識法を用いて、教示者の手指の運動から把持の中間表現が並んだ記号列を生成する。次に、連続する2つの中間表現の組み合わせの数が有限であることを利用し、あらかじめ組み合わせごとに視触覚フィードバックを用いた把持・持ち替え戦略を用意しておくことによって、記号列から多指ハンドによる物体操作を再現する。

本研究課題では、ロボットの遠隔操作や自律ロボットのための簡単な動作実装に利用できるように、上で述べた「人間の手指の運動から記号列を生成する処理」と「記号列からロボットハンドの運動を生成する処理」を統合し、把持の中間表現を介して2つの処理が同時に実行されるように拡張する。また、経路探索によって、適切な把持の形態を維持したまま人間の手指から多指ハンドへ器用な操りを安定に伝達する手法の確立を目指す。さらに、本手法を応用することによって、上で述べた遠隔操作や自律ロボットの動作獲得に関する問題を解決することを検討する。

## 2. 研究の目的

本研究では、教示者の手指の運動に連動するようにロボットの多指ハンドを制御し、ロボットの身体を利用して物体操作の教示を行う方法を開発する。特に、物体の使用目的に即した適切な把持の形態を維持した上で、器用な操りや持ち替えを含む複雑な物体操作を多指ハンドによって安定的に実現することを目的とする。そのために、本研究期間では以下の3つの課題に取り組む。

(1) 視覚による手の位置・姿勢・把持形状の連続認識手法の開発

教示者が行う物体操作を視覚センサによって観測し、手指と物体が相互に隠蔽し合う状況下で、手の位置、姿勢、および手形状（“把持の中間表現”）を連続認識する方法を開発する。

(2) 教示に基づくロボットによる物体操作法の開発

あらかじめ“把持の中間表現”の組み合わせごとに、その遷移を実現するロボットの把持・持ち替え戦略を用意しておき、教示者による物体操作の認識結果から、多指ハンドによる物体操作を自動的に生成する方法を開発する。

(3) ロボットの動作計画を教示者が確認できる手段の開発

ロボットによって計画された運動を教示者に提示し、教示者がロボットの動作計画を確認して、必要に応じて動作の中断や再計画を指示できるシステムを開発する。

## 3. 研究の方法

(1) 視覚による手の位置・姿勢・把持形状の連続認識手法の開発

作業療法士の知見に基づき、日常の把持を握力把握系・中間把握系・精密把握系の3つの大項目に分類し、それらをさらに細かく分類した計14種類の把持形態からなる分類分

けが提案されている．これに非把持を加えた計 15 種類を“把持の中間表現”と定義し，これを視覚によって連続認識する方法を開発する．

物体を把持した状態では，手指と物体の間に相互隠蔽が生じるため，画像から手指と物体を独立に精度よく認識することは困難である．そこで，手指の形状と物体の種類の間には相関があることに着目し，画像を背景と手指と物体の 3 領域に分割して，手指領域画像と物体領域画像の組と“把持の中間表現”の対応を学習することによって，把持形状と物体の種類を同時に認識する方法を開発する．

学習時には，把持形状と物体の組ごとに，多数の角度から撮影した大量の学習用 RGB-D データを用意し，距離と肌色の情報を使って画像を手指領域と物体領域に分割して，それぞれの Hu モーメント不変量を連結した画像特徴量を定義する．この特徴量に対して Support Vector Machine(SVM)を用いて把持形状と物体の組を識別する 2 クラス識別器を学習する．

認識時には，クエリ画像から同様にして特徴量を算出し，学習した 2 クラス識別器を用いて把持形状と物体の組に対する投票を行う．得られた投票結果を用いて時刻ごとの各組み合わせの評価値を計算し，動的計画法によって時系列全体にわたって最適な把持形状の遷移と物体の種類を推定する．

#### (2) 教示に基づくロボットによる物体操作法の開発

教示動作の認識結果を元に多指ハンドによる物体操作を生成するために，物体操作を“把持の中間表現”が変化しない物体の操りと，“把持の中間表現”が変化する物体の持ち替えの 2 種類に分類し，それぞれについて生成法を開発する．

典型的な“把持の中間表現”が変化しない物体の操りに，精密把握系の把持を行いながら，指先を使って物体の姿勢を変化させる操りがある．そこで，物体の任意の 2 次元運動が与えられたときに，それを実現する多指ハンドの指先による操りを，動的計画法を利用して物体の運動軌跡長に比例した計算量で計算する方法を開発する．

“把持の中間表現”が変化する物体の持ち替えについては，非把持，精密把握，中間把握の 3 状態を順に遷移することが可能な，決定論的な持ち替えと RRT(Rapidly-exploring Random Trees)法を利用した経路探索を組み

合わせた持ち替え戦略を設計し，長さや厚さが異なる様々な物体に対して持ち替え戦略の有効性を検証する．

また，詳細な形状が未知の物体を安定に操作するために，RGB-D カメラによる計測と多指ハンドによる操りを併用して，Structure from Motion(SFM)法に基づき物体の詳細な 3 次元形状を計測する方法を開発する．

#### (3) ロボットの動作計画を教示者が確認できる手段の開発

ロボットによって計画された運動，すなわち将来の運動軌跡や予定された把持位置を CG を使用して教示者に提示する．これを教示者が随時確認し，教示者の意図と異なる動作が計画された場合には，動作の中断や再計画を指示する手段を開発する．

### 4. 研究成果

#### (1) 視覚による手の位置・姿勢・把持形状の連続認識手法の開発

実験の結果，SVM と動的計画法を組み合わせることによって，SVM のみの場合と比較して識別率が向上することが確認できたが，識別率が低下した例も存在した．識別率が低下した原因としては，Hu モーメント不変量が持つ物体の大きさ，回転，平行移動に不変という特徴では，手指と物体の位置関係を考慮できていないことと，手指による隠蔽によって引き起こされる物体の見えの変化に正しく対応できていないことが挙げられる．また，クエリ画像とデータベースの不一致なども考えられる．

#### (2) 教示に基づくロボットによる物体操作法の開発



図 1：精密把握を維持した物体の操り例

“把持の中間表現”が変化しない物体の操りについては，多角柱物体の任意の 2 次元運動が与えられたときに，精密把握を維持したままその物体運動を実現する多指ハンドの運動を自動生成する方法を開発した．図 1 に，3 指 10 自由度ハンドにおける動作生成例を示す．この例では，直方体が 1 回転する運動が与えられたときに，指の接触状態が変化する持ち替えを伴う操り動作が生成された．

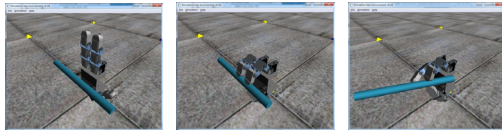
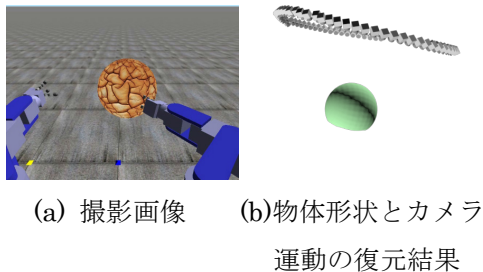


図2：把持形状が変化する物体の操り例

把持の中間表現”が変化する物体の持ち替えについては、3指10自由度ハンドを想定して、非把持から精密把握への持ち替えはRRT法に基づく経路探索法によって実現し、精密把握から中間把握への持ち替えは2接触点を結ぶ軸回りの回転によって実現する持ち替え戦略を開発した。また、長さや厚さが異なる様々な棒状物体に対して開発した持ち替え戦略を適用し、戦略が有効に機能する範囲を調べた。図2に操り例を示す。



(a) 撮影画像 (b) 物体形状とカメラ運動の復元結果

図3：小物体の3次元計測例

物体の詳細な3次元形状を計測するために、ロボットアームと画像特徴点を同時に用いて、SFM法に基づき未知物体の全周3次元形状を推定する方法を提案した。提案方法では、まずロボットアームで対象物体を把持しRGB-Dカメラの前で回転させ撮影を行い、その際に画像特徴点と順運動学からロボットアームの軌跡情報の取得を行う。次に得られたロボットアームの軌跡情報をSFM法のカメラ運動の初期値として使用し、物体の3次元位置についてはRGB-Dカメラから得られる距離データを初期値として用いることで、画像特徴点の乏しい物体でも一連のカメラ運動と3次元形状を復元することが可能であることを示した。また、従来のバンドル調整では、画像投影点における2次元再投影誤差を最小化用していたが、距離データと3次元位置の誤差を含む3次元再投影誤差を最小化することによって、3次元復元精度がよくなることを示した。図3に、球状の物体を3次元復元した結果を示す。

(3) ロボットの動作計画を教示者が確認できる手段の開発

物体操作を伴う作業を対象に、ロボットの動作計画を可視化して教示者に提示することによって、教示動作がロボットによって正しく解釈されたことを事前に確認し、さらにロボットの動作計画の事後的な修正を可能にする方法の開発を進めた。

ロボットの動作を計画するために、まず教示者の腕の運動を計測し、教示者の手指の把持形態(把持・非把持)が変化する時刻を始点もしくは終点とする手の運動軌跡を得る。次に、ロボットに搭載されたRGB-Dカメラから得られる距離情報を利用して環境の3次元計測を行い、障害物に衝突せず、かつ教示者の手の運動軌跡と同じ始点と終点を接続するロボットの多指ハンドの運動軌跡を、RRT法に基づく経路探索法によって計算した。

計算されたロボットの運動軌跡を3次元計測データとともに可視化して教示者に提示し、教示者がロボットの運動軌跡を確認した上で確定することによって、RRT法のようなサンプリングに基づく経路探索法でしばしば問題となる想定外の経路を棄却することが可能になり、安全に教示を進めることが可能になった。

また、多指ハンドによって物体を把握するためには、mm単位オーダの正確な位置合わせが必要になるが、教示者の腕の大域的な運動と手指の精密な位置合わせを同時に計測することは難しい。そこで、運動計画時に手指(多指ハンド)と物体の距離が閾値以内となった場合に、物体に応じた最適な把持位置に多指ハンドの位置を自動的に修正するスナップ機能を実装した。これによって、教示者は作業計画や環境認識などの高次の作業に集中することが可能になり、効率よく教示を進めることが可能になった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計13件)

- ① T. Takeno, A. Murakami, H. Peng, K. Ogawara, A. Suzuki, K. Kikuchi, "Development of Power Assist Suit for Supporting and Transporting Heavy Objects with Single Motor", The 34th Chinese Control Conference and SICE Annual Conference, ThC04-4, pp.1-4, 2015年7月28~30日, InterContinental Hangzhou Hotel (Hangzhou, Zhejiang, China 310016).
- ② 村瀬 浩彰, 中村 祐太, 小川原 光一, "上空からの映像を位置合わせに利用した移動ロボットによる広域空間の3次元レーザ計測", 第20回知能メカトロニクスワークショップ予稿集, pp.13-18, 2015年7月11~12日, 東京電機大学(東京都足立区)。
- ③ 韓 鵬, 武野 友哉, 村上 綺乃, 小川原 光一, 鈴木 新, 菊池 邦友, "クレーン型アームを有し1台のモータで重量物の支持運搬を補助するパワーアシストスーツの開発", 第59回システム制御情

- 報学会研究発表講演会 (SCI'15) 予稿集, 341-2, pp.1-4, 2015年5月20~22日, 中央電気倶楽部 (大阪府大阪市北区) .
- ④ 片山 涼平, 小川原 光一, "RGB-D カメラを用いた手と物体の相互隠蔽を考慮した Hu モーメント不変量に基づく手形状推定", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 予稿集, 2A1-S05, pp.1-3, 2015年5月17~19日, 京都市勧業館「みやこめっせ」(京都府京都市) .
- ⑤ 武野 友哉, 村上 綺乃, 韓 鵬, 小川原 光一, 鈴木 新, 菊池 邦友, "装着者と一致する腰と脚の関節軸を有し1台のモータで重量物の支持運搬を補助するパワーアシストスーツの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 予稿集, 2P1-M01, pp.1-3, 2015年5月17~19日, 京都市勧業館「みやこめっせ」(京都府京都市) .
- ⑥ 中川 圭祐, 小川原 光一, "動的計画法を用いた多指ハンドによる物体操作運動の生成とフィードバック制御による運動補償", 第32回ロボット学会学術講演会, pp.1-4, 2014年9月4~6日, 九州産業大学 (福岡県福岡市) .
- ⑦ 中川 圭祐, 小川原 光一, "動的計画法とフィードバック制御を用いた多指ハンドによる持ち替えを伴う物体操作の獲得", 第19回知能メカトロニクスワークショップ, pp.1-4, 2014年7月12~13日, 高野山「宝城院」(和歌山県伊都郡高野町) .
- ⑧ 古川 直人, 小川原 光一, "ロボットによる SFM 法を用いた未知小物体の全周3次元形状推定", 第19回知能メカトロニクスワークショップ, pp.1-5, 2014年7月12~13日, 高野山「宝城院」(和歌山県伊都郡高野町) .
- ⑨ 藤田 雅史, 小川原 光一, "能動的な操作によって得られる連続画像を利用した特徴点に基づく衣類認識法", 第14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(SI) 予稿集, 1K1-6, pp.800-802, 2013年12月18日, 神戸国際会議場 (兵庫県神戸市) .
- ⑩ 横山 翔太, 小川原 光一, "幾何モデルの表面勾配を事前知識として利用したステレオ計測と位置推定の統合に基づく剛体の3次元運動追跡", 第14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(SI) 予稿集, 2A3-5, pp.1071-1075, 2013年12月18日, 神戸国際会議場 (兵庫県神戸市) .
- ⑪ 若松 貴裕, 小川原 光一, "距離センサと高速カメラを併用した逐次推定に基づく高速な人体運動のマーカレスモーションキャプチャ", 第14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(SI) 予稿集, 3K2-6, pp.2608-2611, 2013年12月18日, 神戸

- 国際会議場 (兵庫県神戸市) .
- ⑫ 横山 翔太, 小川原 光一, "ステレオ計測と位置推定の統合に基づく剛体の3次元運動追跡", 第16回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU)予稿集, pp.1-2, 2013年8月1日, 国立情報学研究所(東京都千代田区) .
- ⑬ 若松 貴裕, 小川原 光一, "距離センサと高速カメラを併用した高速運動のマーカレスモーションキャプチャ", 第16回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU)予稿集, pp.1-2, 2013年8月1日, 国立情報学研究所(東京都千代田区) .

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小川原 光一 (OGAWARA, Koichi)  
和歌山大学・システム工学部・准教授  
研究者番号：70452810