

組み込み型カメラによる把持動作時の人体手形状 3D 復元
(3D Reconstruction of Grasp Posture Using an Embedded Camera)

柏木直諒† 杉浦裕太† 宮田なつき‡ 多田充徳‡ 杉本麻樹† 斎藤英雄†
†慶應義塾大学 ‡産業技術総合研究所

あらし

本研究では、物体に対する人間の把持姿勢を 3D 復元するシステムを提案する。ペットボトルやビンといった筒状の物体の蓋の上面に魚眼レンズを装着したカメラを付与し、肌色抽出やセグメンテーションといった画像処理を加えて指を認識する。取得した指位置をデジタルハンドモデルと組み合わせることで手全体の位置姿勢を復元する。本システムは、日用品の利用状況の計測に基づく製品改良や、スポーツのトレーニングに活用できる。

1. まえがき

人間が物体をつかむ際の手の位置姿勢を計測して 3D 復元をする技術はヒューマンコンピュータインタラクションや人間工学などの様々な分野で求められている。物体をつかむ際の手の把持動作を計測し、それを 3D 表示することで、例えば人間が日常生活でどのようにものを持ち扱うかが理解でき、製品やサービスのデザインに役立つと考えられる。さらに日常環境下で計測できれば、製品デザインの妥当性などを理解するためのデータを取得できると考えられる。また、スポーツにおける器具の把持状態を 3D 復元することで熟練者と初心者の比較ができ、スキル向上に寄与する。本論文では、特にペットボトルやビンといった円筒状の物体の蓋をつかむ動作に注目し計測を試みる。

物体の把持動作を計測する手法には様々なものが存在する。そのうちの一つに環境側にカメラを設置して手の動作を取得する方法がある。その代表的なものとして、赤外線 LED で照射した手や指を赤外線カメラで位置姿勢推定する LeapMotion¹⁾や、ユーザの手に再帰性反射材マーカを設置し赤外線の反射光からモーションをキャプチャする Vicon²⁾がある。一方で、このような装置では手が把持物体や人間の他の身体部位で隠れてしまうことがあり、物体を把持している手や指の位置姿勢を推定することが困難な状況が発生する。また、データグローブのような特殊な手袋をユーザが装着することで手の位置姿勢を計測する手法があるが³⁾⁴⁾、手が手袋に覆われるなど普段日用品を扱っている状態とは異なった状況になるため、動作を阻害してしまい、日常と同一の動作を計測できなくなってしまう可能性がある。

そこで本研究では、筒状物体の蓋の上面に魚眼レンズを装着したカメラを設置し、把持した手の内側から撮影した画像を用いて蓋を開ける際の手の動作を 3D 復元するシステムを提案する (図 1)。これは、データグローブと比較して手の動作を阻害することなく、また外部設置カメラと比較すると遮蔽による影響が少ない手法である。



図 1 把持推定結果 (動画)。動画は J-Stage の電子付録として閲覧可能である。

2. 把持推定手法

図 2 に本研究の把持動作復元のための提案フローを示す。本研究では缶やペットボトル、ドアノブといった円筒状の物体の蓋の上端面に魚眼レンズを設置したカメラを組み込む (1)。カメラはユーザが蓋を開ける際の手のひらを撮影できる。この画像に各種処理を加えることで蓋を把持している手の指を画像上で検出する (2)~(5)。物体形状が既知で把持の種類が決まっていることから画像上での指の 2 次元座標を元に、指と物体の接触位置を 3 次元座標で算出する (6)。デジタルハンドモデルと組み合わせることで、計算機上で手全体の把持姿勢を推定する (7)。

(1) 手の領域の抽出

手の把持姿勢を推定するためには把持している際の手の指の 3 次元座標を導出しなければならない。本研究では指の 3 次元座標導出にあたり、魚眼カメラから撮影された画像に対しての画像処理を行う。まず円柱物体の蓋につけられた魚眼レンズつきカメラから蓋を把持している手の画像を取得する。

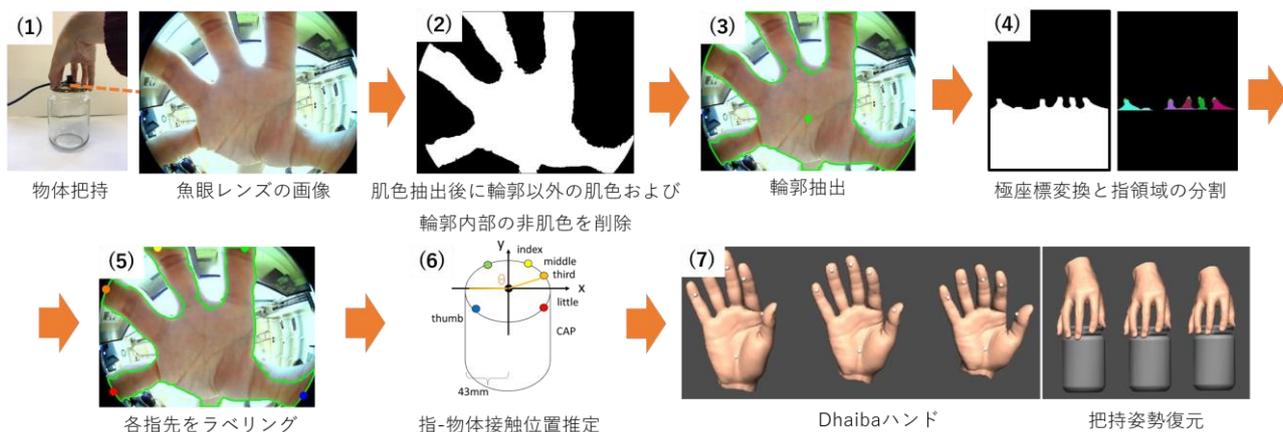


図 2 物体へのカメラ付与から把持形状復元までのフロー

(2) 肌色抽出

得られた画像に対して肌色検出を行い、カラー濃淡画像を肌色の画素と肌色でない画素に2値化処理する。しかし顔や天井などのノイズ成分のために、手以外の部分も肌色と検出される。そこで距離変換を行い、画像上で最も肌色の面積が大きいと思われる箇所を抽出し、それ以外を除去する。距離変換とは0と1の2つの値のみで構成される2値画像に対して、1の画素値をその画素から最も近い0の画素までの距離に置き換える変換のことである。

(3) 手の輪郭抽出

抽出された手の輪郭内の範囲に対して再度距離変換をする。このとき変換後の画像の画素の中で最も大きな距離を持った点を手のひらの中心とする。距離変換を再度行ったのは手の中央のしわや陰影が肌色と判定されない可能性があるからである。図には求めた輪郭と手のひらの中心(距離変換で得た距離が最も大きい点)を示す。

(4) 指位置検出

(3)で抽出した手の輪郭から指の2次元位置を算出する。求めた手のひらの中心点をもとに極座標変換を行う。極座標変換によって抽出された手の輪郭の画像は各指が縦軸方向に向かって展開される。このとき、画像の横軸は角度で、縦軸は中心から輪郭までの距離である。この画像に対してラスタスキャンする。横軸の列において連続した白い点を見つけると連続箇所に接触する前の列をチェックし、前の列に白い点がない場合は新しい領域としてIDを割り振る。一方前の列に白い点があった場合は前の白い点が割り振られたIDと同じIDを割り振る。セグメンテーションされた各領域のうち最初にIDを割り振られた連続した点の中央にある点を指の候補の

点とし、各領域の候補の点のうち縦軸方向に上にある点から順に5つまでを指とした。

(5) 各指のラベリング

極座標変換した画像にて5つの点を抽出した後、元の画像に変換し、指の点を画像上で計測した。5つの指の点の重心位置を算出し、重心から最も遠い点を親指とした。親指を決定後に順に人差し指、中指、薬指、小指を決定する。

本研究の指のラベリング手法は小指と親指の位置が離れていてかつ片方の手で把持することを前提とした際に成立するものであり、これが成立しない場合は誤認識の可能性があり本手法の制約である。近年では、機械学習による推定手法が数多く提案されており、本研究においてもコンピュータ上で様々な姿勢を生成できるデジタルハンドのシルエット画像を学習させることによって、様々なケースに対応できると考える。

(6) 物体上の指の接触位置推定

画像上で求めた5つの指の点の画像の中心点に対してそれぞれの角度を算出した。魚眼レンズ付きカメラは筒状物体の蓋の中心に装着した。そのため蓋の半径が既知であれば画像から検出した指の2次元座標の角度を求めることで、指と物体の接触位置の3次元位置を求めることが可能である。なお、本研究では魚眼カメラの中心から指の角度を求めることで指が蓋の周囲のエッジと接触している位置を推定しているため、指の先端位置がカメラに映っている必要性はない。

また、手の輪郭を求めた際の距離変換により、輪郭に内接する円の半径を求めることができる。そこで、円の半径と缶から手のひらまでの距離の相関関係をあらかじめ実験的に求め、内接円半径を使って手から缶までの距

離を算出した。

(7) デジタルハンドによる把持姿勢復元

5つの指の点と手のひらまでの距離と、デジタルハンドモデルを使って手の姿勢を復元する。モデルとして、筆者らの開発する Dhaiba ハンドを用いる⁹⁾。19関節のリンク構造と表皮形状から成り、姿勢に応じて形状が変化する。また成人日本人500人以上の寸法データベースを利用して、個人のモデルを少数の寸法から推定することが可能である。ここでは、手の長さ、手の幅、中指の近位指節間関節の幅および厚みの4つの寸法を使ってユーザの手モデルを生成した。

手モデルには図に示すように指に5つと手のひらに1つの特徴点を設定した。指の特徴点の位置は、指の第一関節付近の皮膚表面に設定した。この理由として予備観察から蓋を把持する際に、多くの被験者は第一関節付近が蓋のエッジ部分に接触していたためである。手のひらに設けられた1つの特徴点は、(6)で算出した手のひらまでの距離と対応をつけた。この特徴点の対応する計測点との位置誤差が最小となるような姿勢を最適化計算により求めた。図1に把持姿勢を再現した様子を示す。

3. 実験

提案システムとモーションキャプチャ Vicon によって復元されたデジタルハンドモデルにおいて指の座標を比較し、提案システムの再現精度を確認した。モーションキャプチャにおける指の座標は、Vicon のデータより復元したデジタルハンドモデルに対して、提案手法で割り当てた特徴点と同じ位置に特徴点を配置して、指位置を蓋上の2次元座標で表した。提案システムにおける指の座標として、魚眼カメラから得られた画像上の指位置から算出される缶の蓋の平面上にある物体上の指の接触位置を2次元座標で表した。

モーションキャプチャと提案システムにおいて算出したデジタルハンドモデルの指位置にどれほどの差があるのか、指の座標間の距離を計算した。それぞれ5つの指について比較を行い、実験参加者ごとに5つの指の平均値を算出した。5つの指の平均値を比較した理由は各被験者によってばらつきがあるか確かめるためである。実験参加者1に関しては $4.46\text{mm} \pm 2.54$ (平均±標準偏差)、実験参加者2に関しては $5.65\text{mm} \pm 3.00$ 、実験参加者3に関しては $9.73\text{mm} \pm 6.09$ であった。実験参加者1と実験参加者2に関しては比較的少ない距離の差であったが、実験参加者3に関しては大きな距離ができた。これは実験参加者によって手の大きさが異なり、特に実験参加者3に関しては手の大きさが小さかったため、魚眼カメラ

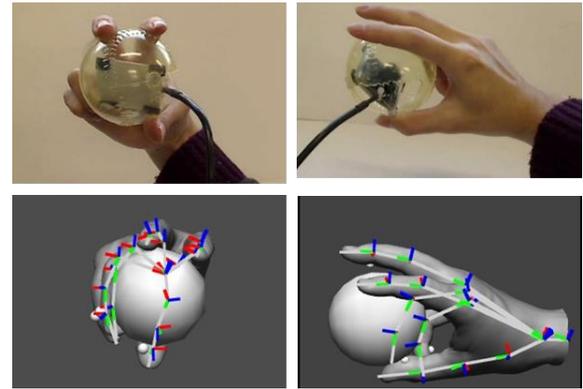


図3 ボールの把持状態の推定

に映る指の範囲が短く、魚眼カメラの範囲外で指が屈曲していたことが原因だと考えられる。より広角なレンズを導入するなどカメラに映る実験参加者の指の範囲を大きくすることが今後必要である。

4. 応用例

本論文では、ボトルやキャップの把持姿勢の復元以外に、野球ボールの把持姿勢を表示するアプリケーションを開発した(図3)。これは表面が透明なボールの内部に魚眼カメラを埋め込んでいる。熟練者の把持姿勢を記録して、初心者の把持状態との比較が3Dで視覚化された手モデルを見ながらできれば正しいボールの持ち方などのトレーニング利用として期待ができる。

また製品の試作時に、表面が透明で内部が中空の物体を3Dプリントできれば、その物体の内部にカメラを組み込んで把持姿勢を3D復元できる。姿勢が復元できれば把握安定性や快適性などの解析が可能となり、その結果から、製品の改良が可能になると考える。

5. むすび

本研究では、円筒状の物体の蓋に魚眼レンズ付きのカメラを設置することで、人間の把持姿勢を計測して3D復元するシステムを提案した。その結果、本システムを用いた場合、実験条件において平均で、 $6.61\text{mm} \pm 3.88\text{mm}$ の誤差で指を推定可能であった。

今後の課題としては、指が3、4本といった5本より少ない数で物体を把持した際の推定、また魚眼カメラに指が認識できない範囲でしか映らないような様々な把持姿勢の推定などが考えられる。本研究では魚眼カメラに映る指から蓋に触れる角度を算出し、そこから蓋との接触位置を計算している。そのため蓋に触れる手が蓋の中心部から大きくずれた位置にある場合や、手が小さく魚眼カメラに極度に接近する場合に各指と各指の股が映らないため認識ができない。今後はより広角なレンズの利

用やより小型のカメラを利用するなど、カメラに指が映るようなシステムを構築する。さらに今後の課題として復元した手全体の精度検証を実施する。

本研究は JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research(S) (課題番号 24220004) の助成を受けたものである。

6. Reference

- [1] Leap-Motion. <https://www.leapmotion.com/>, accessed Jan 2017.
- [2] Vicon. <http://www.vicon.com/>, accessed Jan 2017.
- [3] M. Marsico, S. Levialdi, M. Nappi, and S. Ricciardi. Figi: Floating Interface for Gesture-based Interaction. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* (2012), 1–14.
- [4] R. Y. Wang, and J. Popovic. Real-time Hand-tracking with a Color Glove. *ACM Transactions on Graphics*, 28: 3 (2009).
- [5] 宮田なつき, 製品設計のためのデジタルハンド, バイオメカニズム学会誌, Vol. 38, No.1, 2014.



柏木直誠, 2017 年慶應義塾大学大学院博士前期課程開放環境科学専攻修了。現在は、キャノン株式会社 コンピュータビジョンやバーチャルリアリティの研究に従事。



杉浦裕太, 2013 年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科博士後期課程修了。博士 (メディアデザイン学)。慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科特任助教, 産業技術総合研究所特別研究員を経て 2016 年 4 月より慶應義塾大学情報工学科助教。ヒューマンコンピュータインタラクションに関する研究に従事。



宮田 なつき, 2000 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。2000 年工業技術院機械技術研究所。改組により 2001 年産業技術総合研究所。デジタルヒューマンモデリングの研究に従事。



多田 充徳, 2002 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報システム学専攻修了。博士 (工学)。2002 年産業技術総合研究所 CREST 研究員。2004 年同研究所研究員。2015 年同研究所研究グループ長。身体機能のモデル化に関する研究に従事。



杉本 麻樹, 2006 年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻修了。博士 (工学)。電気通信大学電気通信学部知能機械工学科特任助教, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科特別研究講師などを経て, 現在, 慶應義塾大学理工学部情報工学科准教授。インタラクティブシステムのための光センサを用いた計測技術の研究に従事。



斎藤英雄, 1992 年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程電気工学専攻修了。同年同大学理工学部助手, 2006 年より同大学理工学部情報工学科教授。コンピュータビジョンとその VR およびその応用の研究に従事。