

[研究助成 (C)]

距離センサアレイを用いた前腕形状計測に基づく手の動作推定

Estimation of Hand Motion Based on Forearm Deformation Measured with a Distance Sensor Array

2187007



研究代表者

奈良先端科学技術大学院大学 助教 趙 崇 貴
 先端科学技術研究科 情報科学領域
 (助成受領時：奈良先端科学技術大学院大学 博士後期課程)

[研究の目的]

手の動作と我々の日常生活は密接に関係している。我々は手を用いることにより、日常生活における器用な物体の操作や把持を実現している。この手の動作を解析すべく、多くの動作推定手法が開発されており、Virtual Realityや電動義手、外骨格デバイスの入力インタフェースのみではなく、医療福祉、スポーツ分野における動作計測などに応用されている。

手の動作推定においては、カメラから取得される画像情報や、手や指に装着されたInertial Measurement Unitから取得される慣性情報が広く用いられている。これらの入力情報では手の外観や姿勢を取得することができる反面、隠れ領域や自然な把持阻害が課題として挙げられる。

手指以外の身体部位に装着可能なウェアラブルセンサによって環境・条件の影響を受けずに計測可能な入力情報として生体信号が挙げられる。生体信号に基づく手法においては手の動作に関与する体組織の活動から手の動作を推定する。特に、生体信号のなかでも筋肉の活動を非侵襲に計測可能な表面筋電位は広く用いられている。一方、表面筋電位には周囲の筋肉や皮下組織の影響により深層部に位置する筋肉である深層筋の活動を取得することが原理的に困難といった制約がある。深層筋の活動は前腕の回内外のような器用な物体の操作に関与している。

このような動作についてもロバストに推定するには、深層筋の活動についても取得可能な入力情報を利用する必要がある。

そこで、筆者は皮膚形状に着目した動作推定手法を提案する。皮膚形状は一種の機械的な生体信号であり、計測部位下の筋肉の活動のみではなく、骨の変位や腱の変形によっても変化する。前腕の回内外動作の際には、深層筋の活動によって橈骨と尺骨が大きく変位する。そのため、骨の変位によっても変化する皮膚形状を用いることにより、前腕の回内外動作についてもロバストな推定が可能になる。本研究では皮膚形状に基づき、機械学習によってモデルを作成することにより、動作を連続的に推定する手法を提案する。

[研究の内容、成果]

I. 距離センサアレイ

本研究では、前腕の回内外の際に顕著に変化が生じる前腕における皮膚形状（前腕形状）を、図1に示す距離センサアレイを用いて計測する。距離センサアレイは10チャンネルの距離センサユニット、調整機構から構成される。

距離センサユニットは下部の距離センサから上部のプレートまでの距離を電圧に変換して出力する。プレートと距離センサの間には低圧縮残留歪の特性を持つスポンジが配置されており、形状の変化によって上下に変位する。距離セン

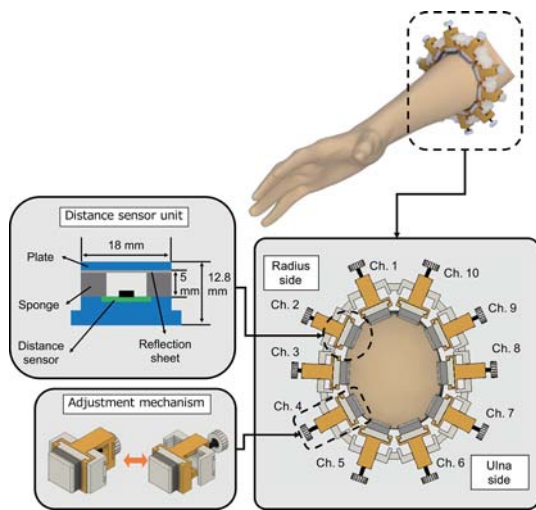


図1 距離センサアレイ

サユニットの出力は、フィルタやアンプを用いずに A/D 変換器のみで取得可能なシンプルな信号である。

10チャンネルの距離センサユニットを上下が非対称な楕円の形状に沿って配置した。前腕においては尺骨側に太い屈筋が位置していることを考慮し、橈骨側に比べ尺骨側が大きくなるようデザインした。

調整機構は、様々なユーザの前腕サイズに適合可能なよう搭載した。各チャンネルの台座に配置されたダイヤル式の機構により、サイズを調整できるようになっている。

II. 動作推定手法

距離センサアレイによって計測された前腕形状に基づいて動作を推定する。本手法では動作のクラスではなく、関節角度を推定することにより、連続的に手の動作を推定する。

推定の流れを図2に示す。初めに距離センサアレイによって計測された前腕形状から特徴を抽出する。本手法では各チャンネルのフレーム平均を特徴として用いる。距離センサアレイの各チャンネルの出力は2000Hzで計測され、フレーム長128サンプル、フレームシフト32サンプルで、各フレームごとに10次元の特徴からなる特徴ベクトルを算出する。

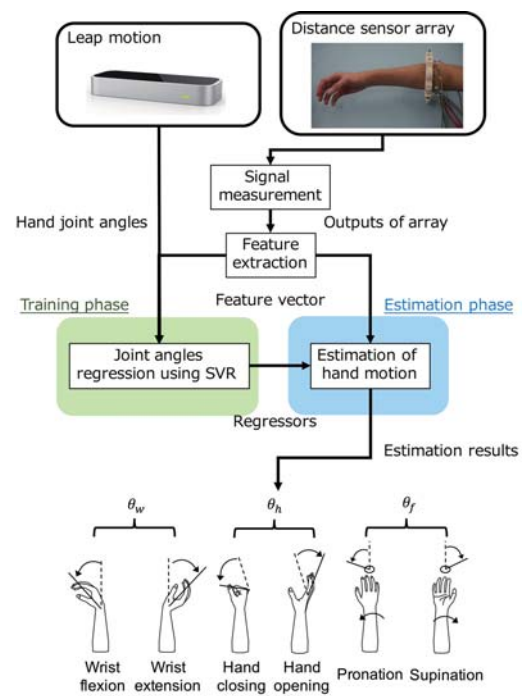


図2 動作推定の流れ

特徴抽出の後、学習フェイズにおいては、前腕形状から抽出された特徴ベクトルと同時に取得した手の動作を用いて回帰器を作成する。本手法では手の動作を手の屈曲・伸展に関与する関節 (θ_w)、手を閉じる・開くに関与する関節 (θ_h)、前腕の回内外に関与する関節 (θ_f) の3種類の関節で表現する。手の動作の取得には、赤外線ステレオカメラベースのハンドトラッキングデバイスである Leap Motion (Leap Motion Inc.)を用いる。学習には Support Vector Regression (SVR)を用いて、各関節ごとに回帰器を作成する。SVRのカーネル関数には Radial Basis Function (RBF) カーネルを用いる。

その後、推定フェイズでは学習された回帰器を用いて特徴ベクトルから手の動作を推定する。

III. 検証実験

・条件

5名の参加者(20代, 男性)を対象として実験を行った。参加者は動作の間に中立位を挟みつつ、手首の屈曲・伸展, 手を閉じる・開く,

前腕の回内・回外の順で手を動作させた。この6動作を1セットとし、同様の動作を1分間で5セット行った。計5試行のデータを参加者ごとに計測した。

5試行分のデータに対して、5分割交差検定を実施し、性能を評価した。回帰モデルは参加者ごとに学習し、RBFカーネルのパラメータは $\gamma=2$ 、SVRのコストパラメータは $C=256$ とした。この値は実験的に決定した。評価指標にはRoot Mean Squared Error (RMSE)を用いて、Leap Motionにより計測された実測値と提案手法による推定値間の誤差を求めた。

・結果

参加者ごとの誤差と全体での誤差を表1に示す。各関節における誤差は手の屈曲・伸展に関与する関節 (θ_w) で 4.6° 、手を閉じる・開くに関与する関節 (θ_h) で 6.6° 、前腕の回内外に関

表1 推定結果のRMSE [$^\circ$]

ID	θ_w	θ_h	θ_f
A	4.0	4.9	5.3
B	5.7	6.7	5.1
C	4.6	7.6	5.2
D	4.6	7.8	4.8
E	4.0	5.7	5.9
Total	4.6	6.6	5.3

与する関節 (θ_f) で 5.3° となった。

図3に推定結果の一例を示す。赤い実線が推定値であり、青い破線が実測値である。推定値が実測値に追従しており、大きな時間的な遅れもないことが確認できる。特に、深層筋の活動に関与する前腕の回内外に関する関節 (θ_f) についても連続的に推定可能であることが確認できる。

これらの実験結果から、手の動作を深層筋の活動が関与する関節を含めた3種類の関節から連続的に推定可能なことを確認し、動作推定における皮膚形状の有用性を確認した。

[今後の研究の方向, 課題]

手法の拡張

これまでの研究結果から、前腕の回内外に関与する関節を含む3種類の関節角度を前腕形状によって推定可能なことを確認している。そこで手法を拡張し、手指・前腕の3次元姿勢を前腕形状のみから推定する手法を開発している。この手法では、より多くの自由度によって表現される手の動作を深層学習によって推定している。各関節を独立で動作させる単一動作のみではな

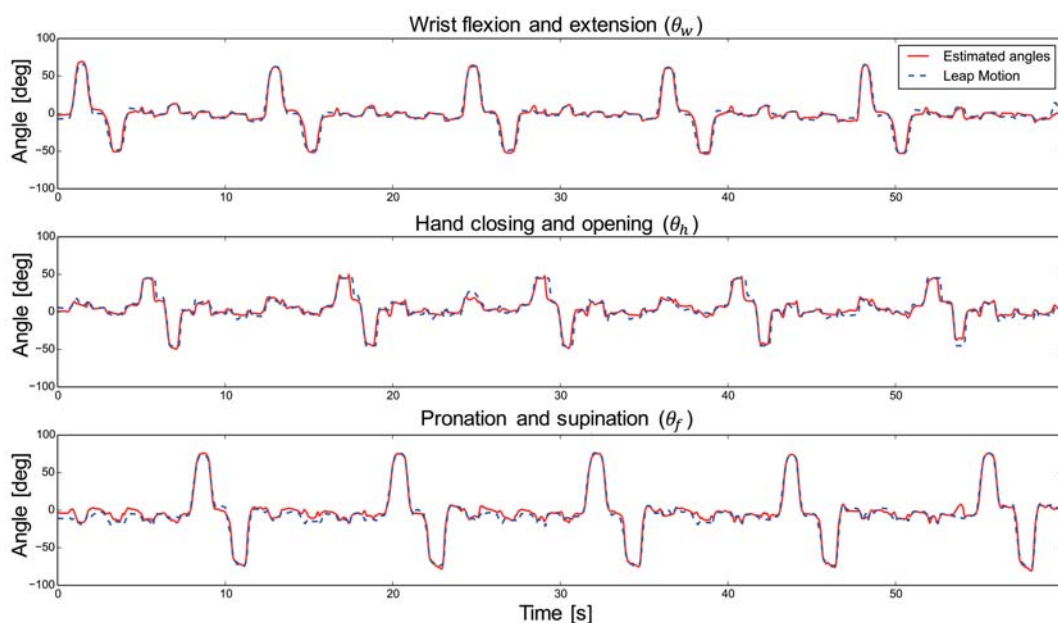


図3 動作推定の一例

く複合動作である日常生活動作についても対象とし、動作を連続的に推定可能なことを事前実験により確認している。前腕形状のみからより遠位の身体部位の動作を推定することができれば、様々な計測環境・条件での利用が可能になる。

また、本研究では前腕における皮膚形状に着目したが、前腕のみではなく上腕における形状変化にも動作推定に有用な情報が付与されていることを確認している。そのため、今後は様々な計測位置における皮膚形状を密に計測し、より複雑な動作の推定を目指す。

運動機能評価への応用

これまでは動作推定の入力情報としての皮膚形状の有用性に着目してきたが、今後はリハビリテーション・スポーツ分野への応用についても着手していく。動作推定の研究を通じて皮膚形状には様々な体組織活動が付与されていることを確認しており、運動機能評価への利用可能性についても実験的に確認している。得られた皮膚形状への理解と知見をもって、体組織の活動の推定による運動機能評価などへの応用を目指す。

[成果の発表, 論文等]

論文誌

Sung-Gwi Cho, Masahiro Yoshikawa, Ming Ding, Jun Takamatsu, and Tsukasa Ogasawara, "Machine-learning-based Hand Motion Recognition System by Measuring Forearm Deformation with a Distance Sensor Array," *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, vol. 3, no. 4, pp. 418-429, Nov, 2019.

国際学会

Sung-Gwi Cho, Tetsuya Kurasumi, Masahiro Yoshikawa, Ming Ding, Jun Takamatsu, and Tsukasa Ogasawara, "Estimation of Forearm Pose Based on Upper Arm Deformation Using a Deep Neural Network," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2018)*, pp. 1245-1250, 2019.

Tetsuya Kurasumi, Sung-Gwi Cho, Ming Ding, Gustavo Alfonso Garcia Ricardez, Jun Takamatsu, and Tsukasa Ogasawara, "Simultaneous Estimation of Elbow Joint Angle and Load Based on Upper Arm Deformation", in *Proceedings of the IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS)*, pp. 136-141, 2019.

Sung-Gwi Cho, Masahiro Yoshikawa, Ming Ding, Jun Takamatsu, and Tsukasa Ogasawara, "Estimation of Hand Motion Based on Forearm Deformation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2018)*, pp. 2291-2296, 2018.

国内学会

倉角哲也, 趙崇貴, 石倉智貴, 丁明, 高松淳, 小笠原司, 横田千晶: "他動運動時の上腕形状変化に基づく上肢リハビリテーションシステムの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2A2-E08, 2020

趙崇貴, 倉角哲也, 吉川雅博, 丁明, 高松淳, 小笠原司: "深層学習を用いた上腕形状変化に基づく肘と前腕の関節角度推定", 第37回日本ロボット学会学術講演会, 1N2-02, 2019.

倉角哲也, 趙崇貴, 丁明, Garcia Ricardez Gustavo Alfonso, 高松淳, 小笠原司: "上肢動作推定のための上腕形状計測可能な距離センサアレイの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 2P1-N06, 2019.

趙崇貴, 吉川雅博, 丁明, 高松淳, 小笠原司: "距離センサアレイを用いた上腕形状計測に基づく肘関節角度の推定", 第36回日本ロボット学会学術講演会, 3A1-05, 2018.