

人間特性計測に関する研究

研究代表者 菅野 重樹
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

本研究では人間特性計測システムを用いて、人の動作状態の計測や人の動作意図を反映する生体指標の解析をすることにより、人の機能を補填し、人が自由に操作可能なロボット技術の開発を目指す。本研究室では人間特性計測について、「電動義手制御のための手関節角度推定」の研究があり、本年度の研究成果を次節より報告する。本項では、その研究の社会背景、特徴、及び課題点を下記に述べる。

上肢切断者の生活支援を目的に、アクチュエータを搭載した電動義手が研究開発されている。2013年の調査では、身体に障害を有する人が393万人おり、そのうち四肢の一部を自由に動かすことができない肢体不自由の人が176万人、事故や病気で上肢の一部を欠損している上肢切断者は約一万人いる。電動義手は、ハードウェアとしての機能性やソフトウェアとしての操作性を持ち、将来的に上肢切断者の切断肢を代替する可能性を有する。現在市販されている電動義手は、手部を開閉するだけの低自由度のものから手首や指の関節の動作が可能な多自由度のものが実現されている。しかし、市販されている義手の多自由度化が進む一方で、各関節自由度の角度を意図どおりに操作する技術は搭載されていない。したがって、切断者が意図どおりに関節の角度を操作可能な電動義手を開発するために、生体信号から筋活動状態を推定することで動作意図を精確に抽出する技術が必要である。

人の身体から計測される生体信号から操作者の動作意図を抽出する技術は、大きく動作パターンを推定するものと、動作量を推定するものに分けられる。前者の動作パターンを推定する方法は、おもに動作に応じて変化する生体信号の特徴的なパターンを見つけ出すパターン識別手法である。パターン識別に使用される生体信号として最も多く使用されているものは筋電である。筋電は、人が動作を生成する際に筋に与えられる指令信号を、皮膚表面において電気信号として捉えるものである。複数の筋から発せられる電気信号を皮膚表面で計測するため、操作者が意図する各関節自由度の動作に対応する特徴量を抽出することによるパターン識別手法が研究されている。一方で、生体信号から意図する動作量を推定する手法として、筋電だけでなくさまざまな生体信号が使用されている。まず、筋電を利用した関節動作量推定手法として、筋骨格モデルを使用した動力学計算などを用いる研究がなされている。また、体内の筋の変形量を捉えるために、超音波を使用する研究やひずみゲージ等を利用した皮膚表面形状の変化に着目した研究がある。しかし、筋電や超音波を利用する方法はセンサと皮膚の位置関係の変化により計測値が大きく変化し、誤差が増大してしまう。皮膚表面形状の変化では、操作者の意図した動作に対応した筋の収縮を捉えることが難しい。切断者が意図どおりに関節角度を操作するためには、意図した動作に直接的に対応する生体信号を使用したうえで高精度な角度推定を実現することが必要である。そこで、筋収縮状態に基づく筋形状の変化による皮膚表面の隆起位置が意図する関節角度に直接対応すると仮説を立てた。

2. 主な研究成果

手関節角度推定における筋隆起位置の有用性検証として、非切断者5名において手関節屈伸動作時の関節角度に対する筋隆起位置の信号特性を明らかにし、手関節角度の推定を行った。

2.1 計測装置

図1に実験装置の構成を示す。手関節角度の計測にはゴニオメータ (SG 150, Biometrics Ltd., Newport, UK) を使用し、8 ch アナログ出力アンプ (K800, Biometrics Ltd., Newport, UK) を経由し、筋隆起計測デバイスとともにマイクロコントローラ ArduinoUNO (ARDUINO, Ivrea, Italy) に接続した。ゴニオメータの計測誤差は ± 2 [°]、中継用アナログ入出力アンプの分解能は13 [bit]、計測精度が0.5%以上である。筋隆起計測デバイスに搭載される12個の距離センサの値はArduinoにアナログ入力されており、ゴニオメータも同様にアナログ入力することで、手関節角度と筋隆起位置の同時計測を行った。Arduinoの分解能は10 [bit]であり、サンプリング周期は50 [ms]とした。

2.2 実験手法

被験者は前腕を前腕用手台と手首用金属棒の上に置き、ペットボトルを把持した状態で手関節を屈曲・伸展する動作を行う。被験者ごとの前腕長に応じ、手首用金属棒をx軸ステージにより調節した。前腕を設置する位置は、計測対象筋の収縮によるセンサ-皮膚間の距離変化を阻害しないよう、短橈側手根伸筋の起始である上腕骨外側上顆を前腕用手台の最前部に設置し、さらに手首部で突起をもつ尺骨茎状突起が手首用金属棒に一致するよう指示した。指示動作は水平位置を0 [°]とし60 [°]まで手関節を伸展し、そのあとに0 [°]まで屈曲する動作とし、80 [bpm]のメトロノームに合わせ等速で行うよう指示した。メトロノームによって角度を調整する速度を規定することで、手関節屈曲動作時において、脱力により重力のみを使用した非随意的な運動ではなく、随意的に角度を調整する運動とした。ここで、60 [°]とは手関節の最大伸展角度である。この動作を1回とし、5回屈伸するタスクを試行とし、各被験者2試行ずつ行った。さらに、手関節にかかる負荷を変化させるため、片手のみで把持する物体として500 [ml]ペットボトルを選定した。ペットボトルの重さの設定は容器の重さをのぞき、空の状態を0 [g]とし、すべて満たした500 [g]を含め、0, 200, 400, 500 [g]と変化させた。ペットボトルの重さによる筋への疲労の影響を排除するため、各試行におけるペットボトルの重さの条件を、試行目は軽い条件から重い条件の順番で行い、一度前腕を計測装置から外し、5分間の休憩のあと、2試行目は重い条件から軽い条件となるよう設定し、全8試行とした。

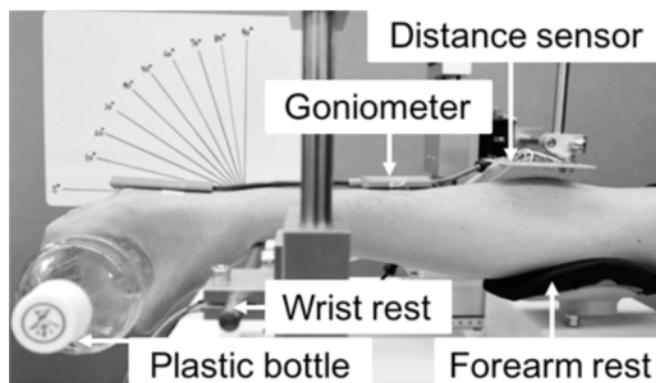


図1 実験装置の構成

2.3 解析手法

計測した各条件における手関節角度と筋隆起位置の値を用いて信号特性を明らかにするための解析手順を以下に示す. 12 個の距離センサの値から得た筋隆起位置を, 試行ごとに正規化した. 被験者ごとの全試行における筋隆起位置の最大値 X_{Cmax} [mm] を 100% と設定し, 最小値 X_{Cmin} [mm] を 0% として計算することで正規化筋隆起位置 $X_{CN}\%$ とした (図 2). つぎに正規化した X_{CN} の値と, 計測した. 手関節角度 θ_M の関係を示す関数を導出する. 筋隆起位置を手関節角度の推定に用いることの有用性を明らかにするため, 手関節角度の推定による誤差を算出する. 筋隆起位置により手関節角度を導出する関数を用いて推定した手関節角度 θ_E と, 計測した角度 θ_M との二乗平均平方根誤差 (以下, RMSE) を算出した.

2.4 実験結果

5 名の被験者のうち, 近似式の決定係数が最も大きくなった被験者 D における結果を代表例として, 1 試行の手関節角度と正規化後の筋隆起位置をプロットしたものを図 3 に示す. また, 表 1~3 に, 各条件における手関節角度推定の RMSE と関節にかかる負荷の条件ごとの平均値を示す. これらすべての RMSE のなかで最も誤差が小さくなった試行は 2.57 ± 2.56 [°], 最も誤差が大きくなった試行は 31.9 ± 12.7 [°] であり, 全試行における平均の角度推定誤差は 8.05 [°] であった. 各試行における標準偏差の値は角度と推定角度の誤差のばらつきを表す. また, RMSE のうち収縮過程のみの平均値は 7.84 [°], 弛緩過程のみの平均値は 8.27 [°] となり, 収縮弛緩過程それぞれにおいて推定に使用する関数を区別したことによる特定の傾向は認められなかった. また, Fig. 9 に最も誤差が小さくなった試行の計測および推定した手関節角度の時系列変化を示す.

Table 4 は, 各被験者が行った同一の負荷条件の 2 試行のうち 1 つの試行を関数算出のための教師データに利用し, もう 1 つの試行をテストデータに用いて RMSE を算出した結果の条件ごとの平均値である. 各負荷条件において推定誤差に大きな違いは認められなかった. Table 5 と 6 は, 異なる負荷条件の試行から算出した関数を用いた際の RMSE を負荷条件ごとにまとめた結果である. つまり, 0 [g] の条件を教師データに用いた場合, 200, 400, 500 [g] の各条件の 2 試行ずつ計 6 試行をテストデータとして角度の推定を行った結果である. Table 5 は教師データが 0, 200 [g] の場合, Table 6 は教師データが 400, 500 [g] の場合の角度推定結果を示している. 結果として, 異なる負荷条件を用いて算出した関数を利用した角度推定においても, 負荷条件による違いはなく, RMSE の平均値は 7.00~9.00 [°] を得た. したがって, 関節にかかる負荷は筋隆起位置を用いた手関節角度の推定に影響を与えないことが分かった.

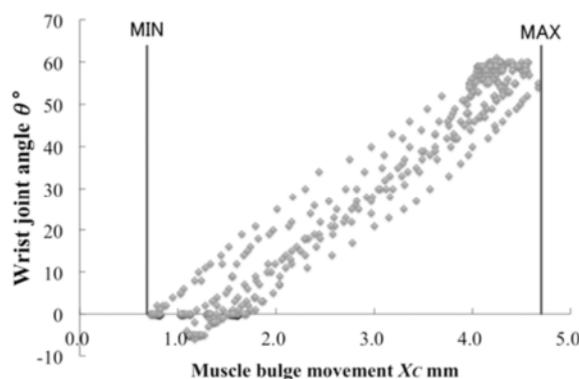


図 2 筋隆起の正規化方法

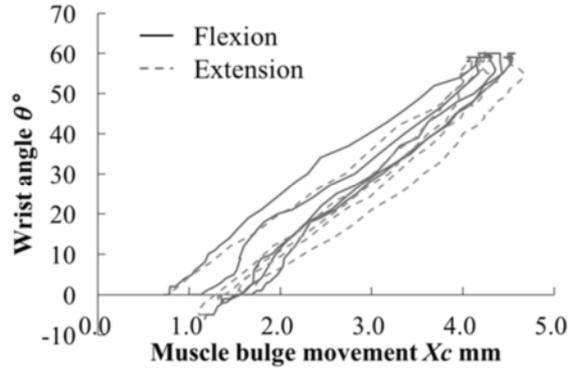


図3 筋隆起移動量と関節角度の関係

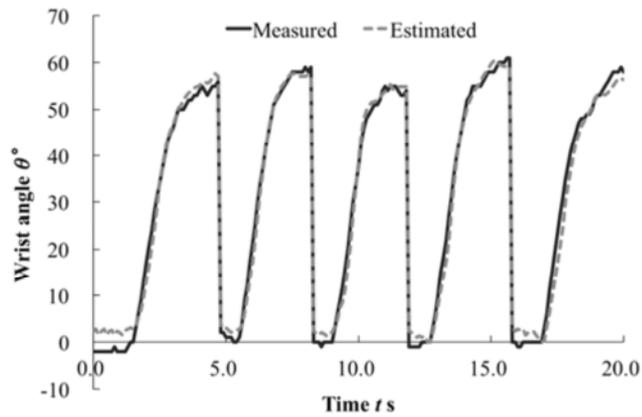


図4 推定した関節角度の時系列データ

表1 二乗平均平方根誤差の平均

RMSE	Load g			
	0	200	400	530
Extension	9.14	8.03	8.77	6.63
Flexion	9.94	6.41	10.2	7.84
Average	9.58	7.22	9.52	7.23

表2 各負荷における二乗平均平方根誤差 (0, 200)

RMSE	Load condition of teaching data g					
	0			200		
Test data g	200	400	530	0	400	530
Extension	8.27	10.3	7.24	7.03	7.44	6.97
Flexion	9.32	9.64	8.41	7.48	8.09	8.03
Average	8.86			7.51		

表3 各負荷における二乗平均平方根誤差 (400, 520)

RMSE	Load condition of teaching data g					
	400			530		
Test data g	0	200	530	0	200	400
Extension	8.95	7.91	6.93	7.33	8.29	7.44
Flexion	8.88	8.33	7.50	7.56	8.40	7.60
Average	8.08			7.77		

3. 研究業績

3.1 学術論文

- [1] 加藤陽, 松本侑也, 小林洋, 藤江正克, 菅野重樹, 電動義手制御に向けた前腕皮膚表面における長軸方向の筋隆起位置変化に基づく意図する手関節角度の推定, 看護理工学会誌, 5 巻, 1 号, pp. 12-21, 2017.
- [2] 三浦智, 鈴木智裕, 小林洋, 藤江正克, "タイピング支援装置の開発のための動作速度と筋疲労度の最適化問題", 日本機械学会論文集, Vol.83, No.850, 2017.
- [3] Yang Cao, Satoshi Miura, Quanquan Liu, Yo Kobayashi, Shigeki Sugano and Masakatsu G. Fujie, "Probabilistic neural network applied to eye tracking control to alter the direction of an endoscopic manipulator", Mechanical Engineering Journal, Vol.4, No.4, pp. 15, 2017.
- [4] Satoshi Miura, Junichi Takazawa, Yo Kobayashi, Masakatsu Fujie, "Accuracy to Detection Timing for Assisting Repetitive Facilitation Exercise System Using MRCP and SVM", Robotics and Biomimetics Journal, Vol.4, No.12, 2017.
- [5] Naomi Okamura, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, Shigeki Sugano, "Evaluation of Multiple Muscles Hardness Change due to Static Stretching Using Wearable Indentation Testers: A Pilot Study," Proc. of IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS2017).
- [6] Naomi Okamura, Yo Kobayashi, Shigeki Sugano, Masakatsu G. Fujie, "Change Detection Technique for Muscle Tone during Static Stretching by Continuous Muscle Viscoelasticity Monitoring using Wearable Indentation Tester," Proc. of IEEE 15th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR2017), London, UK, July 17-20, pp. 1686-1691, 2017.
- [7] Tamon Miyake, Yo Kobayashi, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "Timing of Intermittent Torque Control with Wire-driven Gait Training Robot Lifting Toe Trajectory for Trip Avoidance," Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR 2017), London, UK, July 17-20, 2017.
- [8] Satoshi Miura, Junichi Takazawa, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, "Motor Command Detection for a Repetitive Facilitation Exercise Assistance System", Proceedings of the IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR'17), Okinawa, July 14-18, 2017.
- [9] Jing-Chen Hong, Yuta Fukushima, Shigeru Suzuki, Kazuhiro Yasuda, Hiroki Ohashi, Hiroyasu Iwata, "Estimation of Ankle Dorsiflexion Ankle during Loading Response Phase for Spring Coefficient Identification," Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics 2017 (ROBIO2017), Macau, China, Dec. 5-8 2017.

3.2 学会および社会的活動

- [10] Naomi Okamura, Massimiliano Zecca, Matthew T.G. Pain, Masakatsu G. Fujie, Shigeki Sugano, "Muscle hardness measurement during stretching exercise: An easy way to sense relaxation of your muscle," The 1st ECSS Science Slam at the 22th Annual Congress of the European College of Sport Science (ECSS2017).
- [11] Tamon Miyake, Yo Kobayashi, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "Wire-Driven Gait Training Robot Assisting Both Hip and Knee Motion with One-DOF Intermittent Force

Control", IROS 2018 workshop on Adaptive Control Methods in Assistive Technologies, Sep. 28, 2017.

[12] Akira Kato, Masato Hirabayashi, Yuya Matsumoto, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie and Shigeki Sugano, "Continuous Wrist Joint Control Muscle Deformation on Forearm Skin," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2017).

[13] 三宅 太文, 小林 洋, 菅野 重樹, 藤江 正克, "つまずき予防のためのワイヤ駆動型歩行訓練ロボットによる短期的トルク印加手法の構築", 第 56 回日本生体医工学会大会, 仙台, 2017 年.

[14] 杉原壮一郎, 三浦智, 宮下朋之, "痙縮の発症した片麻痺患者用の円筒型タイピング支援装置の開発", 生活生命支援工学系学会連合大会 (LIFE2017), お茶の水女子大学, Sep. 15-17, 2017.

[15] 岩木将一郎, 齋地健太, 安田和弘, 岩田浩康, "急性期片麻痺患者の下肢リハビリにおける随意機能の誘発を目的としたマスタスレーブ式両足協調デバイスの開発", 第 35 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ,17) Sep. 11-14, 2017.

4. 研究活動の課題と展望

本研究により, 筋収縮時の筋肉の機械的な変形を捉える皮膚表面上の筋隆起位置を用い, 精確かつ簡易的な関節角度推定を可能とした. 筋隆起位置は手関節角度に対する 1 次近似により 0.94 と高い決定係数を示したことから, 両者の関係は直線による近似が可能であることが分かった. さらに 1 次近似により得た関数を用いて手関節角度を推定した結果, 全体の手関節角度推定誤差は平均 8.05 [°] となり, 表面筋電位を用いる手法と同程度の推定誤差を得た. この結果を用いて, 今後は, 上肢切断者において, 関節角度を意図どおりに操作可能な電動義手を実現するために, 筋隆起位置に基づく手関節角度推定手法を用いた電動義手制御手法を検討する. そして, 介護支援を期待される装着型ロボットや, 看護分野における非侵襲治療のための身体計測技術に対しても本手法の適用を提案する.