

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時の負荷を反映する生体指標の解析をすることにより、人の特性に適応し人の機能を補填する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、「残存肢への負荷を低減可能な電動義手使用時のゲイン調整手法の確立」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。

切断部位や切断時の処置に関わらず、上肢の一部を欠損した患者は、切断前の上肢の機能を再び獲得したいという気持ちを持つことが多い。上肢切断者の義手に対するニーズを満足するためには、義手により切断前の四肢の外見と機能を補填する必要がある。本研究で対象とする前腕切断の場合、肘手首間の切断により、上肢による日常生活動作 (Activities of daily living, 以下, ADL と記す。) のうち、把握動作・食事動作・洗顔動作・トイレ動作などに障害が生じる。一方で、片側上肢切断者の場合、これらの ADL の約 90% は健側手のみで遂行可能であるため片手動作を行う事ができる義手の普及率が低い。つまり、日本国内では健側手と義手を同時に使う両手動作の際に必要な動作を補うことが必要とされる。両手動作を行う際、義手が行う主な動作として、物体を押さえる、把持するといった動作が挙げられる。

アクチュエータを搭載した電動義手を用いることで、上肢切断者の切断肢の機能を補填できる。電動義手を意図通りに操作するためには、生体指標から人の意図を推定技術が必要である。そのため、入力信号に表面筋電位を用いた多自由度パターン制御や、筋隆起を用いた手関節角度制御など、義手の操作自由度を増加させる研究が進んでいる。一方で、前腕電動義手のうち、一般的に普及する義手の多くは、手を開く、閉じるという 1 自由度のみを有している。手関節や指の自由度など、前腕切断者が失った手関節以遠の関節のうち、義手が補うことのできない関節の動作は、残存する肩関節や肘関節で代償する必要がある。代償運動は残存する関節に負荷がかかり、痛みや使い過ぎ症候群を引き起こす。

切断者が義手を扱えるようになるために、「物体に手を伸ばし取りに行く」「物体を把持する」「物体を運ぶ」「手を放す」という、Pick and Place の訓練を行う必要がある。Pick and Place 訓練時において、生体信号の入力量に対する義手の動作量の度合い (以下, ゲインとする) が個人にとって適切に調整された値であれば、自由度が増加した際、義手使用者の意図通りに義手を使用することが可能となり、代償運動による負荷が軽減される。しかし、ゲインが適切な値より高く設定された場合、誤作動が起きる可能性が増加する。Pick and Place 訓練時の誤作動が多いということは、動作の習熟度が低いことに繋がる。そして、習熟度の低さは、義手使用の断念に繋がるため、ゲインが高く設定されることは問題である。逆に、比例ゲインが適切な値より低い場合、義手が使用者の意図に反し動作しない可能性が増加する。義手の自由度を増加させた際に、意図通りに義手が動か

ない場合、動作達成のために義手自由度ではなく残存肢の自由度を利用し、代償運動による負荷が増加することで、使い過ぎ症候群のリスクが増加する。そのため、Pick and Place 訓練時において、代償運動による負荷の軽減を目指した定量的なゲイン調整手法が必要である。

本研究の目的は、前腕電動義手において、Pick and Place 訓練時に残存肢への負荷の少ない義手のゲイン調整方法を提案することである。本研究により、義手使用者それぞれの体格に合わせた負荷の少ない感度調整の値を提案することにより、義手使用者の負荷の低減を目指す。手関節角度制御時のゲインを調整する際の代償運動として、肩関節内外転のトルクに着目し、肩関節トルクによる代償運動の評価により手関節角度制御時のゲインを決定可能であると仮説を立てた。

2. 主な研究成果

非切断者 4 名を被験者とした Pick and Place 実験において、手関節角度制御ゲインを変更した際の代償運動を評価した。また、肩内外転の関節トルクに基づき、代償運動が最小となるゲインを個人ごとに決定可能であるかどうか検証した。

2.1 実験装置

実験に使用する義手に関して述べる。本研究で用いる自由度は手関節掌背屈の角度制御および手先開閉の 2 自由度である。本実験では、前腕部の筋隆起分布を用いた手関節角度推定手法を用いた。筋隆起分布の計測には、距離を計測可能な接触センサショックキューブ(株式会社タッチエンス)を使用した。スポンジ内部に計 16 個の距離センサを搭載しており、物体への接触によりスポンジが変形することでスポンジの充填率が変化し、距離センサの計測値が変化してスポンジ表面の変位量を計測可能である。ショックキューブは 1 つで 32[mm]×32[mm]の範囲の計測が可能であり、本センサを用いて手関節角度変化時の筋隆起の計測を行う。筋隆起変化量に対応した手関節角度の計測を行う。計測される手関節角度と皮膚表面上の 16 点の筋隆起位置変化の時系列データをもとに手関節角度の推定を行う。出力データは手関節角度 1 次元のスカラー量であり、右辺の入力データは 16 点のスポンジ変位量を使用し、線形重回帰分析を用いて決定する。推定した角度を OpenCM を通してサーボモータ AX-18A(DYNAMIXEL 社)に送ることで手関節角度を制御する。手先開閉には Hackberry(exiii 株式会社)を用いた。Hackberry の外観を Fig. 1 に示す。Hackberry は 1 つの距離センサの押し込み量により示指の角度を調整可能である。また、拇指を内転させた状態で固定することにより、拇指および示指での物体の把持が可能となる。

2.2 実験手法

実験タスクは、1 辺 1.5cm の小立方体の Pick and Place 動作とした(Fig. 2)。小立方体を選択したのは、簡易上肢機能検査 STEF において、修正運動の生じやすいサイズの小さな把持対象のうち、把持面が平面であり義手習熟度の低い健常者でも把持しやすいと考えたためである。STEF のフィールドには物体設置の基準とする段差があることから、今回使用した義手の指先がフィールドに引っ掛かり物体把持が非常に困難となる恐れがあったため、STEF を模擬したフィールドを用意した。実験用のフィールドを Fig. 4.6 に示す。フィールドは、厚さ 5[mm]の SR スポンジにより作成した。STEF において中立立方体の x 方向の把持範囲が 30[cm]であることから、x 軸方向に計 30[cm]となるよう立方体を設置するため、スポンジに均一に 3[cm]の穴をあけ設置位置を統一した。また、STEF の小立方体の y 軸移動距離は 40[cm]のため、立方体の設置位置から y 軸方向に 40[cm]の位置に Place 位置の目印を設置した。

作成したフィールドにおける立方体の Pick and Place を Fig. 3 に示す。手は被験者から見て左奥の目印からスタートし、被験者に対し奥の立方体から 5 つ順番に Pick and Place 動作を行った。

修正運動中にスポンジの穴から立方体が出た場合、実験者が立方体を元の位置に戻し、被験者は手を最初の位置に戻し、その立方体から再スタートとした。実験は以下の(1)～(5)の手順に従って行われた。

- (1) インフォームドコンセントを得る。
- (2) 実験実施者が、被験者の体格に合わせてセンサの位置、机と椅子の高さおよび位置、ソケットの取り付け位置を調整する。
- (3) 実験実施者が実験タスクの説明を行い、被験者は実験タスクの練習を行う。
- (4) 開始の合図の後、被験者は手関節が動かない状態で義手により立方体を右から左へ5つ移動させる。
- (5) 手関節動作のためのセンサの取り付けおよびキャリブレーションを行う。
- (6) 開始の合図の後、被験者は手関節が動作する状態で義手により立方体を右から左へ5つ移動させる。
- (7) 手関節角度制御ゲインを変更し、(6)を行う。

ゲインの値については、一般的に普及している Ottobock のゲイン調整段階を参考にした(4-6)。Ottobock のゲインと今回用いた筋隆起でのゲインとの対応を Fig. 4.10 に示す。Ottobock では、筋電を増幅するゲインとして7段階のゲインが設けられており、その増幅率は2000～100,000倍である。この調整を筋隆起に当てはめた場合、中間位の4段階目がキャリブレーションしたゲイン、すなわちゲイン1倍となる。ここから等間隔に値を振っていくと、1段階目、2段階目においては出力角度がキャリブレーションした際の半分以下になってしまうため、タスクの遂行が困難であると考え除外した。また、ゲインを高く調整すると義手使用者の筋力を落としてしまう恐れがあることから、6段階目、7段階目の条件は除外した。そのため、本実験で調整するゲインは0.75, 1.0, 1.25とした。



Fig.1 Outside appearance of Hackberry⁽⁴⁻⁴⁾

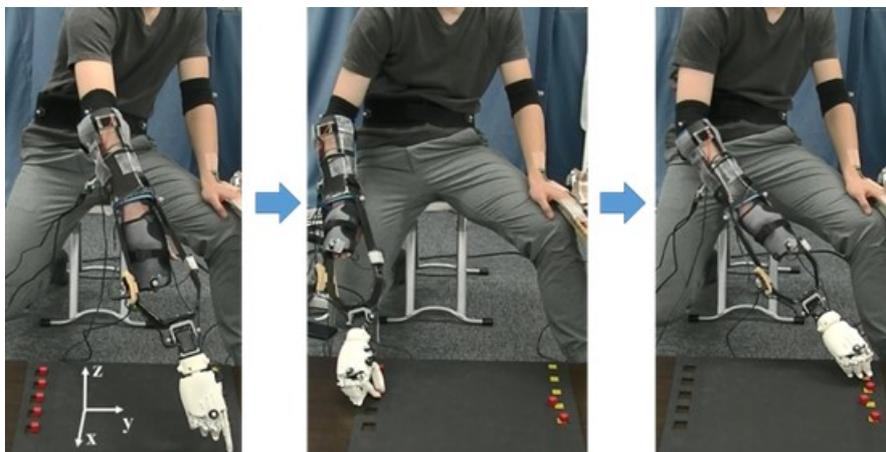


Fig. 2 Experimental task of picking and placing five small cubes with the powered prosthesis.

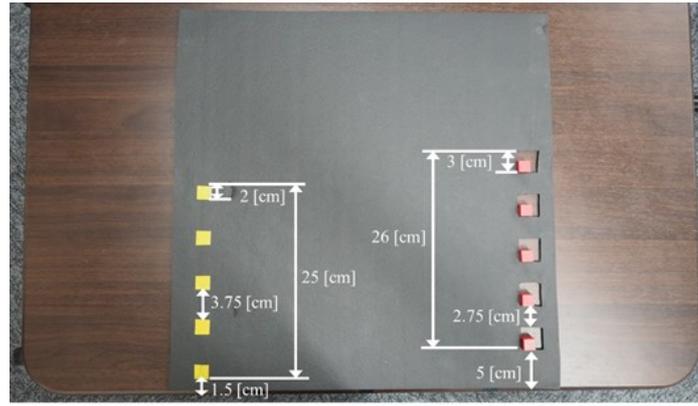


Fig. 3 Experimental field

2.3 解析手法

上体の特徴点である肩，肘，手首，腰にマーカーを貼り付け，上体の動きを光学式モーションキャプチャシステム（Rapter-E, Motion Analysis, USA）により計測した．タスク中に計測した関節位置から修正運動の分離および肩関節トルクの算出，そして試行に慣れた試行後半の関節トルクより個人に適したゲインの決定を行った．関節トルクは，筋骨格モデル動作解析ソフト nMotion muscular (NAC, Japan) を用い，逆運動学によって算出した．算出した関節トルク τ を，1 試行における各立方体の Pick and Place 時の修正運動時間で個別に算出した値 T を評価基準とする． T の計算式を次の式に示す．

$$T = \int_{t_i}^{t_N} \tau dt \quad (1)$$

t_n は n 試行目の修正運動時間である．試行を前半 5 試行，後半 5 試行に分け，操作に慣れた後半 5 試行において各ゲイン間の比較を行い，最もトルクの値が小さくなったゲインを個人に適したゲインとして決定する．

2.4 実験結果

1～5 試行目を前半，6～10 試行目を後半とし，各立方体に関し修正運動時の関節トルクを積分した値を前半部と後半部に分け，ゲインごとに比較した．被験者 A～D に対するグラフを Fig. 4 に示す．白の箱ひげは前半 1～5 試行，灰色の箱ひげは後半 6～10 試行をまとめたものである．被験者毎の手関節動作時の条件(ゲイン 0.75, 1.0, 1.25)に対するトルクを示している．義手操作に慣れた後半の試行の中央値を各条件間で比較すると，被験者 A はゲイン 0.75 および 1.0 の中央値が小さい結果となった．被験者 B はゲイン 0.75 が，被験者 C はゲイン 1.0, 被験者 D はゲイン 1.0 の中央値が小さい結果となった．全被験者において，手関節動作時の関節トルクが手関節非動作時の関節トルクと比較して小さくなるゲインが存在することが明らかとなった．また，全被験者において，手関節動作時の各条件を比較した場合，関節トルクが小さくなるゲインが存在することが明らかとなった．

3. 研究業績

3.1 学術論文

[1] Satoshi Miura, Ryota Fukumoto, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, “Modeling optimizes the effect of the vertical stripe illusion for foot clearance on upstairs,” Journal of Biomechanical Science and Engineering (JBSE), 2019

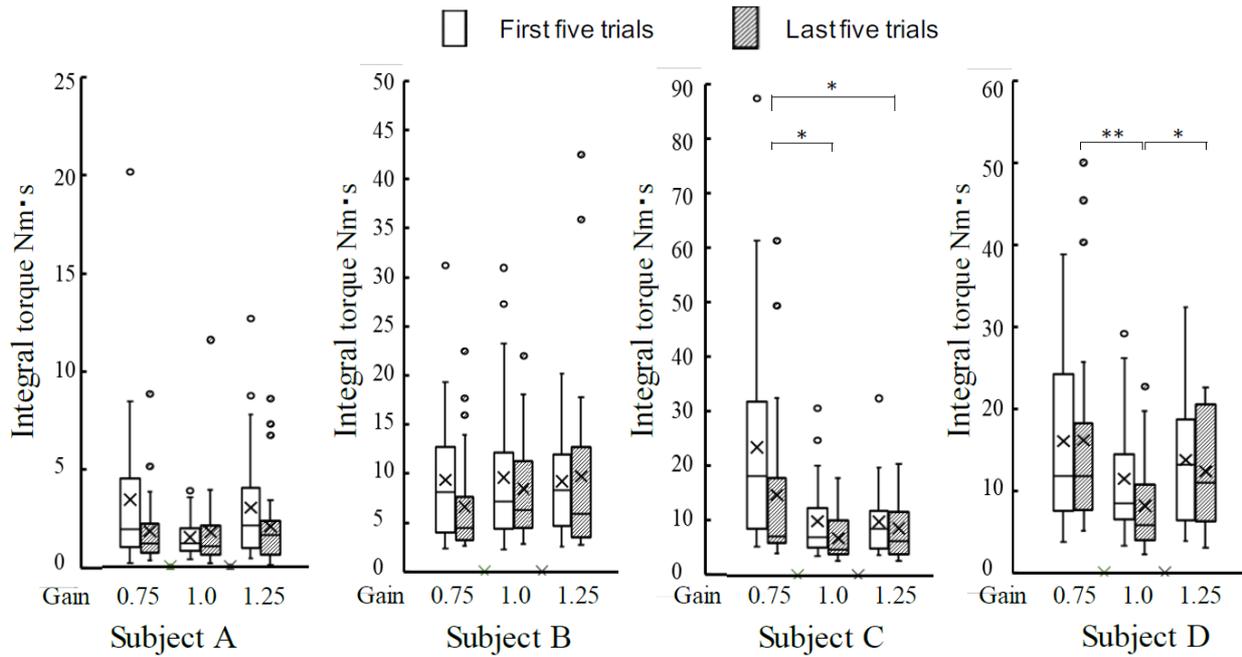


Fig. 4. Box plot of the joint torque in each subject with gain conditions when divided into the first and last five trials. The results with the gain condition of 0 were excluded because the time spent was much longer than that of other gain conditions. From the same reason, outliers due to statistical processing of the box plot are plotted with circles. Significant differences are shown as $* < 0.05$ and $** < 0.01$.

[2] Tamon Miyake, Yo Kobayashi, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "One-DOF Wire-driven Robot Assisting Both Hip and Knee Flexion Motion," *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.31, No.1, pp. 135-142, 2019.

[3] Satoshi Miura, Kazuya Kawamura, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, "Using Brain Activation to Evaluate Arrangements Aiding Hand-Eye Coordination in Surgical Robot Systems," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2018.

[4] Tamon Miyake, Yo Kobayashi, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "Effect of the Timing of Force Application on the Toe Trajectory in the Swing Phase for a Wire-driven Gait Assistance Robot," *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 5, No. 4, pp. 17-00660, 2018.

3.2 学会および社会的活動

[5] Tamon Miyake, Yo Kobayashi, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "Intermittent Force Application of Wire-driven Gait Training Robot to Encourage User to Learn an Induced Gait," *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*.

[6] Takayuki Nakatsuka, Tamon Miyake, Kotaro Kikuchi, Ayano Kobayashi, Yoshihiko Hayashi, "Analyzing Human Avoidance Behavior in Narrow Passage," *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pp. 3738 - 3743, 2018.

[7] Tamon Miyake, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "Prediction of Minimum Toe Clearance

with a Radial Basis Function Network at the Start of the Swing Phase,” Proceedings of the 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), pp. 1664 - 1667, 2018.

[8] Akira Kato, Haruno Nagumo, Tamon Miyake, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, “Evaluation of Compensatory Movement by Shoulder Joint Torque During Gain Adjustment of a Powered Prosthetic Wrist Joint,” Proceedings of the 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), pp. 1891 - 1894, 2018.

[9] Ayako Torisaka, Kohei Ogawa, Satoshi Miura, Victor Parque, Tomoyuki Miyashita, Hiroshi Yamakawa, “Study on in-plane and out-of-plane deformation considering elastic plasticity of membrane,” Proceedings of The American Institute of Aeronautics and Astronautics Science and Technology Forum and Exposition (AIAA SciTech Forum), 2019

[10] Gakuki Ise, Daiki YODA, Chinami TAKIGUCHI, Naoya SHIGEMATSU, Tomohiro SHIRATORI, Hisami NAKANO, Woojae JEON, Taichi NOZAWA, Kei IWASHIRO, Takumi NISHINO, Toshitatsu MUNAKATA and Takanobu WATANABE, “Controlling The Aerial Posture of a Flapping-wing Micro Air Vehicle by Shifting Its Centre of Gravity,” International Micro-Air Vehicles, Nov. 2018

[11] Takashi Matsuzawa, Takanobu Matsubara, Kenji Hashimoto, Tomotaka Teramachi, Xiao Sun, Shunsuke Kimura, Nobuaki Sakai, Yuki Yoshida, Asaki Imai, Kengo Kumagai, Koki Yamaguchi, Keisuke Namura and Atsuo Takanishi (Waseda University), “Body Mechanism with Linear Spikes for Slippage Reduction of Four-limbed Robot Crawling on Uneven Terrain,” 22nd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control.

[12] 永井 洋輔, 重野 将秀, 打越 力, 川上 泰雄, 上杉 繁, 陸上競技におけるスプリント技能向上支援を目的とした自重免荷・滞空時間調節ツールの開発, 日本機械学会 シンポジウム: スポーツ工学ヒューマンダイナミクス 2018

[13] 江藤孝紘, 亀崎允啓, 佐藤隆哉, 岩田浩康 マスタ・スレーブシステムにおける提示映像スケールリングの有効性検証 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2A2-M04.

[14] 亀崎允啓, 江藤孝紘, 佐藤隆哉, 岩田浩康 災害対応作業の複雑・連続・時限性を考慮したマスタ・スレーブシステムのスケール・ゲイン調整手法の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2A2-M02.

[15] 田郷岡凌, 岩木将一郎, 安田和弘, 岩田浩康, “急性期リハビリにおける麻痺足随意性拡張を目指したアシストシステムの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 , 2A1-F03.

4. 研究活動の課題と展望

非切断者 4 名において, Pick and Place をタスクとして電動義手の手関節角度制御ゲインを変更した際の代償運動を評価した. タスクを行った際の関節トルクの時系列データに対し弾道運動と修正運動を分離した結果, 義手による修正運動時に定常的に関節トルクが大きくなることがわかった. また, 立方体 P&P 時の肩内外転の関節トルクに基づき, 代償運動が最小となるゲインを個人ごとに決定できることを明らかにした. 今後は, 本研究を前腕切断者に適応するため, 前腕切断者を被験者とした関節トルクに基づくゲイン調整実験を行う