基本把持機能を有する 簡易型筋電義手の開発と評価[†]

星川 英^{*1}・迫田 辰太郎^{*1}・山野井 佑介^{*1}・加藤 龍^{*2}・森下 壮一郎^{*3}
中村 達弘^{*1}・關 達也^{*1}・姜 銀来^{*3}・横井 浩史^{*1}

筋電義手は上肢機能を再建するものとして、必要な生活動作を実現できることと、軽量で装着者への負担が少ないことと、耐故障性が高いことが要求される。そのため、義手の把持機能を維持しつつ、システム全体を簡素化する必要がある。我々は、示指と中指のMP関節と、母指CM関節との2自由度で、日常生活動作(ADL)で使用頻度の高い把持姿勢(握力把握、精密把握、側面把握)を可能とする義手を開発している。手指の形状が、把持可能な物体の形状や把持力などの把持機能に影響を及ぼすため、モデル化と実験による最適化を行うことで、日常生活に必要な把持姿勢に適した手指形状の探索が必要である。本研究は、2自由度義手のモデル化を行い、7種類の手指形状を持つ義手のPick-and-Place実験を行い、対応分析により把持機能の高い手指形状を決定した。さらに、上肢切断者による実験で、手指形状の妥当性と軽量化の効果を検証した。

キーワード：筋電義手、モデル化、把持機能、対応分析

1. 緒言

厚生労働省の2006年の調査によると、日本国内の上肢欠損患者は約8万2千人である[1]。欠損した上肢の機能を代替する技術の1つとして義手が挙げられる。義手には、ヒトの手の外観の再現のみを目的としている装飾義手と、ハーネスなどを介して装着者の身体運動を動力として動作する能動義手と、特定の作業を行うことに特化し作業によって付け替えが可能な作業用義手と、モータなどを動力として能動的に働く電動義手がある。近年ロボット技術の進歩により電動義手の研究開発が盛んに行われている。特に筋肉が収縮する際に生じる電気信号を制御信号として制御するこ

とで筋電義手は、直感的操作で運動機能を代替でき、患者のQOL(Quality of Life)を向上させる装置として期待が高まっている。

ヒトの手は手首の動作を含めて25の運動自由度を持っており、取り得る姿勢も多種多様である。これらを電動義手で実現するにはヒトの手と同様な自由度が必要になる。電動義手についての研究の多くは、多自由度化することでより複雑な動きを実現してヒトの手の動きや機能に近づけることを目的としている[2]。市販されているものとしては、Touch Bionics社のi-limb ultra[3]、RSL Steeper社のBebionic3[4]などが挙げられる。また、研究されているものとしてはGifu Hand[5]やFive-Finger Multi-DoF Myoelectric Hands[6]などが挙げられる。これらの義手は5指をそれぞれ独立させて動かすことが可能な義手であり、様々な把持姿勢をとることが出来る。

一方、OttoBock社のSensorhand[7]やMichelangelo[8]、対向3指義手[9]などの指同士が連動して動く義手もある。これらの義手は、取り得る把持姿勢が制限されるが、実用的な需要がある。その理由としては、多自由度で複雑な把持姿勢を行う義手と比べて、サイズや重量、コスト、システムの容易さという面で優れているからである。多くの把持姿勢をとるには、自由度に応じた数のアクチュエータや部品点数が必要にな

[†] Development and Evaluation of a Simplified Myoelectric Prosthetic Hand Realizing Basic Grasp Function in ADL

Suguru HOSHIKAWA, Shintaro SAKODA, Yusuke YAMANOL, Ryu KATO, Soichiro MORISHITA, Tatsuhiro NAKAMURA, Tatsuya SEKI, Yinlai JIANG and Hiroshi YOKOI

^{*1} 電気通信大学 大学院情報理工学研究所

Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

^{*2} 横浜国立大学 大学院工学研究院

Faculty of Engineering, Yokohama National University

^{*3} 電気通信大学 脳科学ライフサポート研究センター

Brain Science Inspired Life Support Research Center, The University of Electro-Communications

るので、電動義手の多自由度化は重量や利便性、耐故障性とトレードオフの関係にあり、コストは増加する傾向にある。

また、筋電図で制御される場合、筋電より動作意図を識別する必要がある、制御可能な動作数つまり筋電パターン数は、筋電式識別の正解率とトレードオフの関係にある。多くの自由度を活かせるために必要な筋電パターン数が多く、誤識別率が大きくなり安定的制御が難しくなる。病院や研究施設などの整った実験環境下で表面筋電図より多数のパターンを識別できる論文が多く報告されている[10]が、利用者の日常生活における使用においては、電磁ノイズや安定性等の制約で、筋電信号は殆どON/OFFスイッチとしてしか利用されていない。現状では、多自由度の義手は低自由度のものに比べて、筋電のみによる操作が困難になってしまう。

C. Ciprianiによると、人が必要とする最低限の日常生活動作(ADL: Activities of Daily Living)を行うには、握力把握、精密把握、側面把握、鉤握り、三面把握、指差し、ジェスチャー(図1)が可能であればよい[11]。ヒトが行い得る全ての動作が実現できなくとも、必要な機能を最低限の自由度で満たしている電動義手は、それだけ軽量かつ簡便で耐故障性の向上になるので日常生活で使用するには適している。このような考え方に基づき本研究では、低自由度でありながら最低限のADLを満たす筋電義手の開発を目的とする。具体的には、母指の対立運動と4指の伸展/屈曲との2自由度で3種の基本的な把持姿勢が取れる電動義手を考案して実装する。次に、この義手の設計パラメータについて検討しモデル化することで、要求する把持機能に応じた設計の実現を目指す。最後に、上肢欠損者により設計した義手の評価実験を行う。

図1 ADLに必要な手の動作

2. 基本3種の把持姿勢をとる2自由度電動義手

ヒトの手には多くの関節が存在し(図2)、それらの関節を独立あるいは連動させて動かすことで多様な手の形状を実現させている。一方、C. Ciprianiによると、ADLのうち握力把握が35%、精密把握が30%、側面把握が20%を占めており、これらの3種の把持姿勢でADLの85%が可能となる[11]。このことに着目して、我々は図3に示すように連動した4指のMP関節(meta phalangeal)と母指のCM関節(carpometacarpal)の2自由度で基本3種の把持姿勢を可能とすることを明らかにした。義手の指の形状を、母指CM関節を対立させた状態で示指と中指を屈曲させたときに指先が合うように設計する。母指を対立させてから示指と中指を屈曲すると、握力把握や精密把握の把持姿勢をとれる。逆に示指と中指を屈曲させてから母指の対立運動を行うと側面把握の姿勢をとれる。このように指を動かす順番によって義手がとる姿勢が変化し、2自由度で3種の把持姿勢を可能としている。

義手を製作するにあたり、必要な把持機能に応じてそれを満たすような設計が求められる。モータで駆動する4指のMP関節と母指のCM関節のほか、手指の形状やサイズなどの設計パラメータをモデル化する必要がある。

義手構造のモデル化の制約条件として、下記のことが考えられる。

- ① MP関節の曲げ角度と示指と母指のなす角度が可変で、基本3種の把持姿勢をとることが可能である。
- ② 指節の寸法は利用者に合わせて設定する。

図2 ヒトの手の関節(数字は、日本人の手の平均寸法[mm]である[12])

(a) 示指と中指のMP関節

(b) 母指のCM関節

図3 基本3種の把持姿勢を実現させる2自由度

③ 関節の曲げ角度はヒトの関節可動域に収まる。

要件①では、握力把握、精密把握、側面把握を可能とする形状にする必要がある。握力把握は、母指と他の4指が対立位置にあることが必要となる。精密把握は、母指と他の4指が対立位置にあり、4指が屈曲したときに母指と示指の指先が接触することが必要となる。側面把握は、4指を屈曲させた状態で母指を対立させ、母指の指先と示指の側面が接触する必要がある。

筋電義手は運動機能を再建すると同時に、外見を再現することも目的とするので、要件②と③を設けている。義手の設計パラメータとして指の長さや太さ、関節角などが挙げられるが、長さや太さは利用者の身体特徴、また義手の外に付けるグローブの制約により決められる。図2に日本人の手の平均寸法を示している。

以上のことによって、要件①～③を満たすようなモデルにおいて、主な設計パラメータは関節角となる。つまり、次の4関節角パラメータで、手指の形状が決められる(図4)。

- θ_a : 手を閉じたときのMP関節の曲げ角度、
- θ_b : PIP関節の曲げ角度、
- θ_c : DIP関節の曲げ角度、
- θ_d : 母指の指先と示指の指先のなす角度。

この4関節角が互いに独立に動けるなら4自由度となるが、本研究は次の制約条件により2自由度まで抑える。1つ目の制約条件としては、把持動作を行う時、DIP関節の曲げ角度 θ_c とPIP関節の曲げ角度 θ_b の

図4 手指のモデル化

比率が約1:2.8である[13]。本研究では θ_c と θ_b がこの比率を取るように手指の形状を設計する。また、日本整形外科学会・日本リハビリテーション医学会が平成7年に定めた関節可動域によると、ヒトのDIP関節とPIP関節の曲げ角度の可動域が $0 \sim 90 \text{ deg}$ であるため、この角度に収まるように義手の角度を設定する。2つ目の制約条件としては、要件①の把持姿勢を確保するため、対立状態で親指の先端と示指の先端が同じ位置にある。この2つの制約条件で、手指形状を決めるパラメータは、 θ_a と θ_d の2関節角に絞られる。

2自由度に決められる手指形状は、把持性能に影響を及ぼすため、手指形状に大きく寄与するMP関節の曲げ角度 θ_a と母指と示指のなす角度 θ_d を変数として最適化する必要がある。指の把持姿勢についての先行研究として、田原らは2本および3本指ロボットによる物体把持時のモデル化を行った[14, 15]。指先で物体を把持するときの数学モデルを構築し安定把持の条件を与えたが、限定された場合に有用であるが、日常生活における全ての把持姿勢に適用できない。本研究では、握力把握などの把持姿勢を用いるため、把持物体に接触する部分が指先だけに限定されていない。把持対象の物体は多種多様である。更に、把持しやすさはアプローチ姿勢など使用者に大きく依存する要素の影響が大きいため、運動学と動力学によるモデル化が困難である。以上のことから、本研究は、指の形状の異なる義手を複数作成し、日常生活で使用する物品を用いた測定実験の結果から評価を行う。

θ_a と θ_d が異なる義手 7 種類を制作し、それぞれの形状は図 5 に示している. 義手のパラメータは 表 1 に記す. 指節の寸法は日本人の手の寸法データを参考にした(図 2). アクチュエータにはサーボモータを使用しており、4 指の MP 関節の屈曲伸展方向の軸と母指の CM 関節の回転方向の軸にあたる部分にモータの軸を配置した(図 6). コストを抑えるため、義手の骨組みはすべて CAD で設計し、3D プリンタで造形した.

図 5 試作した義手

表 1 試作した義手のパラメータ

義手	θ_a [deg]	θ_b [deg]	θ_c [deg]	θ_d [deg]
No.1	25	65	23	105
No.2	25	78	28	147
No.3	40	56	20	89
No.4	40	65	23	138
No.5	40	78	28	171
No.6	60	28	10	68
No.7	60	48	15	102

図 6 モータの配置

3. 評価実験

物体を把持するときの容易さおよび正確さを評価するために、試作した 7 種類の義手を用いて Pick-and-Place 実験を行った. 試作した義手の把持性能を比較するために、健常者用の義手装置を用いて検証を行った(図 7). この装置は、健常者でも装着できるよう健常の腕に装着するためのソケットが設けられており、健常者でも義手の操作が行うことが可能となっている. 実験中義手に装飾用グローブを付けて、障害者による使用と同じ状況で評価した. 装飾用グローブには、高伸縮性を持つエラストマーゲル製のグローブを用いた(図 8) [16].

今回の実験では、筋電の識別率を評価の要素から除外するために、筋電信号による制御を介さずに、直接的に動作コマンドによる把持姿勢の制御を行った.

把持対象となる物体は、日常生活で把持する頻度が高いと考えられるものを列挙した. 類似した寸法および形状をもつ物について代表的なものをひとつ選定して、図 9 に示した物体を把持対象とした. 同じ対象でも把持方法の違い(例えば、単 4 電池の両端把持と側面把持)により別々のタスクを設けた.

Pick-and-Place 実験では、被験者が手の開いた状態の義手を卓上に設けられた一辺 15 cm の正方形の領

図 7 健常者用の義手装置

図 8 グローブを着けた義手

図9 把持物体

域に置かれた物体に近づけていき、PCから物体に義手を添えて「握る」指令を義手に送ることによって把持する。その後、50 cm離れたもう一方の領域まで運び、領域の上で「開く」指令を送ることによって物体を放し、領域上へ始めに置かれた姿勢と同じ姿勢で置くというタスクを行った。把持物体毎の実験時間を30秒間とし、一方の領域で把持してもう一方の領域まで運んで同じ姿勢で置くことができれば、一回の成功として、成功と失敗を計数することで義手の把持における性能の評価を行った。今回の実験では、義手のみが評価の対象となっている。そのため、個人差については考慮しない。本実験の被験者は、義手の操作経験がないため、把持物体ごとにタスク前に練習時間を設けて、操作者が納得いくまで練習してからタスクを行った。また、途中で落とした場合は、失敗としてカウントを行い、実験補助者が指定された位置に設置しなおした。

Pick-and-Placeの実験結果を表2に記す。この表は、分母がタスクの試行数、分子がタスクの成功数となっている。実験結果より、把持物体と義手別にパフォーマンスに差が大きいことがわかる。例えば、薄い物であるコインと鍵とカードは、すべての義手が把持できなかったが、コップ(淵)と湯呑と湯呑(淵)は、すべての義手がよく把持できた。

表2にて、把持物体ごとに成功率が高い(>80%)義手と低い(<50%)義手の数を示した。この数字から、その把持物体が本研究で試作した7種類の義手で把持しやすいか否かが読み取れる。しかし、それぞれの義手がどの形状の把持物体が把持しやすいかを明らかにして、義手の形状と把持性能の関係性を明らかにする必要があるが、表2からは読み取ることができない。そのため、本研究では対応分析[17]を行い、義手と把

持物体との対応関係を図で表し、可視化を行った。対応分析を行うために、まず表3のようなクロス集計表を作成する。このクロス表は、行を把持物体の種類、列はロボットハンドの種類、要素はPick-and-Place実験での成功率としている。ロボットハンドによる傾向を顕著にするため、全てのロボットハンドで成功率が100%または0%となった把持物体は除外した。

このとき、 f_{ij} ($i=1, 2, \dots, 21$) ($j=1, 2, \dots, 7$) は i 列目にある義手が j 行目にある物体を把持するときの成功率として、各行と各列の総和 x_i , y_j は以下のように表す。(このとき、 n は把持物体の総数、 m は義手の総数を表している。

$$[n=21, m=7]$$

$$x_i = \sum_{k=1}^n f_{ik}, \quad y_j = \sum_{k=1}^m f_{kj} \quad (1)$$

また、全ての要素を足し合わせることで総和 N を算出する。

$$N = \sum_{k=1}^m x_k = \sum_{k=1}^n y_k \quad (2)$$

次に、各要素、各行の総和、各列の総和を総度数 N で割ることで、相対度数 f'_{ij} , x'_i , y'_j を算出する。

$$f'_{ij} = \frac{f_{ij}}{N}, \quad x'_i = \frac{x_i}{N}, \quad y'_j = \frac{y_j}{N} \quad (3)$$

それから、行方向の処理を行う。まず、行方向の基準化を行うために、 i 行に属する相対度数を i 行の行和で割る。

$$r_{ij} = \frac{f'_{ij}}{x'_i} \quad (4)$$

基準化を行ったので、 $r_{i1} + r_{i2} + \dots + r_{i7} = 1$ となる。このような処理で、多次元の平面上に把持物体の種類が布置される。布置した結果は主成分分析を行うことで次元圧縮を行い、第一主成分を横軸、第二主成分を縦軸にとり2次元の平面上にプロットされた図に書き換える。

この処理を列方向も同様に基準化を行い、次元圧縮して2次元平面上に7種類義手がプロットされた図を作成する。この2つの図を重ねることで、義手とその把持しやすい物体との関係を示す対応分析図が作成される。

表3で作成した対応分析図を図10に示す。これは義手と把持物体との相対的な位置関係で把持のしやすさを表すものである。義手を中心に見たときに距離が近い把持物体は、その義手にとって把持しやすい物体

表2 Pick-and-Place実験結果

把持物体	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	計
ビー玉	7/7 ○	6/7 ○	5/6 ○	5/5 ○	4/6	7/7 ○	7/7 ○	○6. *:0
積み木玉	5/7	6/7 ○	6/7 ○	6/7 ○	5/7	6/7 ○	6/9	○4. *:0
スポンジボール	8/8 ○	8/8 ○	8/8 ○	7/8 ○	7/7 ○	9/9 ○	8/9 ○	○7. *:0
ボトルキャップ	7/7 ○	7/7 ○	7/7 ○	5/7	7/7 ○	7/8 ○	6/7 ○	○6. *:0
単4電池(側面)	6/7 ○	6/6 ○	5/7	3/6 *	0/10 *	5/6 ○	3/7 *	○3. *:3
単4電池(両端)	4/5 ○	4/5 ○	3/7 *	2/6 *	3/4	2/7 *	3/5	○2. *:3
単3電池(側面)	8/8 ○	7/7 ○	7/7 ○	3/7 *	5/6 ○	8/8 ○	8/8 ○	○6. *:0
単3電池(両端)	5/6 ○	4/6	5/7	6/6 ○	4/6	4/7	6/7 ○	○3. *:0
単1電池(側面)	7/7 ○	7/7 ○	7/7 ○	6/6 ○	6/6 ○	7/7 ○	7/7 ○	○7. *:0
単1電池(両端)	6/6 ○	6/6 ○	7/7 ○	6/6 ○	6/6 ○	8/8 ○	7/7 ○	○7. *:0
コイン	0/12 *	0/12 *	0/10 *	0/9 *	0/12 *	0/12 *	0/12 *	○0. *:7
鍵	0/12 *	0/12 *	0/10 *	0/9 *	0/10 *	0/12 *	0/12 *	○0. *:7
カードキー	0/10 *	0/11 *	0/10 *	0/10 *	0/10 *	0/11 *	0/11 *	○0. *:7
USB メモリ	6/6 ○	5/7	5/6 ○	3/6 *	0/9 *	5/7	5/8	○2. *:2
消しゴム	8/8 ○	8/8 ○	6/6 ○	5/7	6/7 ○	8/8 ○	7/7 ○	○6. *:0
デジタルカメラ	5/6 ○	5/6 ○	5/6 ○	5/5 ○	4/5 ○	5/6 ○	6/7 ○	○7. *:0
文庫本	0/11 *	0/11 *	0/9 *	0/9 *	0/10 *	0/10 *	0/11 *	○0. *:7
大学ノート	0/12 *	0/11 *	0/9 *	0/10 *	0/10 *	0/11 *	0/11 *	○0. *:7
歯ブラシ	8/8 ○	6/6 ○	5/8	3/6 *	2/6 *	7/7 ○	8/8 ○	○4. *:2
ボールペン	6/7 ○	5/6 ○	5/6 ○	4/7	5/6 ○	8/8 ○	6/7 ○	○6. *:0
マジックペン	7/7 ○	6/6 ○	7/7 ○	6/6 ○	5/6 ○	7/7 ○	7/7 ○	○7. *:0
果物ナイフ	4/5 ○	3/6 *	3/6 *	1/6 *	2/6 *	2/8 *	2/5 *	○1. *:6
茶碗(把持のみ)	8/8 ○	8/8 ○	8/8 ○	7/7 ○	7/7 ○	8/8 ○	8/8 ○	○7. *:0
茶碗	7/7 ○	7/7 ○	7/7 ○	6/6 ○	6/7 ○	7/7 ○	7/7 ○	○7. *:0
皿(把持のみ)	6/6 ○	6/6 ○	6/6 ○	6/6 ○	4/6	6/6 ○	7/7 ○	○6. *:0
皿	0/8 *	0/7 *	0/7 *	0/6 *	0/8 *	0/7 *	0/7 *	○0. *:7
コップ(側面)	7/8 ○	4/7	7/7 ○	6/7 ○	4/7	8/8 ○	7/8 ○	○5. *:0
コップ(淵)	8/8 ○	8/8 ○	7/7 ○	7/7 ○	8/8 ○	7/7 ○	8/8 ○	○7. *:0
湯呑	7/7 ○	7/7 ○	7/7 ○	8/8 ○	7/7 ○	7/7 ○	7/8 ○	○7. *:0
湯呑(淵)	8/8 ○	7/7 ○	5/6 ○	8/8 ○	6/7 ○	7/7 ○	8/8 ○	○7. *:0
ボトル(側面)	6/6 ○	6/6 ○	7/7 ○	5/5 ○	6/6 ○	6/6 ○	7/7 ○	○7. *:0
ボトル(引掻け)	5/5 ○	0/6 *	6/6 ○	0/7 *	0/6 *	5/5 ○	0/8 *	○3. *:4
紙バック(側面)	5/6 ○	6/6 ○	6/6 ○	6/6 ○	5/5 ○	5/5 ○	7/7 ○	○7. *:0
紙バック(上部)	6/6 ○	6/6 ○	6/6 ○	6/6 ○	5/5 ○	6/6 ○	6/6 ○	○7. *:0

○: 成功率>80% *: 成功率<50%

であり、遠いものは把持しづらい物体であることを示している。特に把持のしやすさに偏りがない義手は、グラフの中心付近に位置しており、No. 3とNo. 7の義手がそれに相当する。一方No. 4やNo. 5などの義手は周縁部に位置していることから把持しやすさに偏りがあり、特に対極にある物体の把持は困難であることが分かる。また、把持物体に着目すると、湯呑、スポンジボール、ペットボトルなどの握力把握で把持する物体は義手の群の中心付近にあることから、握力把握の姿勢で把持できる物体は今回作成したどの義手でも把持しやすいことがわかる。精密把握姿勢での把持性能が、握力把握姿勢での把持性能より指形状に大き

く影響されることがわかった。

図10の対応分析図で把持物体との位置関係から、7つの義手を次の3つのグループに分けることができる。

- ・ 物体の群から外れている義手(グループA)
- ・ 物体の群の中心から外れているが特定の物体に近い義手(グループB)
- ・ 物体の群や図の中心付近に位置する義手(グループC)

これらの3グループはそれぞれ、物体の把持が苦手である義手、特定の形状の物体を把持することに特化した義手、形状によらず汎用的把持機能を持つ義手と

表3 クロス集計表

把持物体	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
ビー玉	100	85.7	83.3	100	66.7	100	100
積み木玉	71.4	85.7	85.7	85.7	71.4	85.7	66.7
スポンジボール	100	100	100	87.5	100	100	88.9
ボトルキャップ	100	100	100	71.4	100	87.5	85.7
単4電池(側面)	85.7	100	71.4	50	0	83.3	42.9
単4電池(両端)	80	80	42.9	33.3	75	28.6	60
単3電池(側面)	100	100	100	42.9	83.3	100	100
単3電池(両端)	83.3	66.7	71.4	100	66.7	57.1	85.7
USBメモリ	100	71.4	83.3	50	0	71.4	62.5
消しゴム	100	100	100	71.4	85.7	100	100
デジタルカメラ	83.3	83.3	83.3	100	80	83.3	85.7
歯ブラシ	100	100	62.5	50	33.3	100	100
ボールペン	85.7	83.3	83.3	57.1	83.3	100	85.7
マジックペン	100	100	100	100	83.3	100	100
果物ナイフ	80	50	50	16.7	33.3	25	40
茶碗	100	100	100	100	85.7	100	100
皿(把持のみ)	100	100	100	100	66.7	100	100
コップ(側面)	87.5	57.1	100	85.7	57.1	100	87.5
湯呑	100	100	100	100	100	100	87.5
湯呑(淵)	100	100	83.3	100	85.7	100	100
紙パック(側面)	83.3	100	100	100	100	100	100

図10 対応分析結果の図

なっている。グループAにはNo. 4とNo. 5の義手があてはまり、これらの義手は物体を把持することが苦手であると言える。グループBにはNo. 1とNo. 2の義手があてはまり、歯ブラシや単三電池などの細い物体を把持することに特化している。グループCにはNo. 3, No. 6, No. 7の義手があてはまり、形状にかかわらず把持することが得意と言える。

4. 上肢切断患者による検証

前節では、健常の被験者による実験で物体把持に適する義手の形状について検討した。Pick-and-Place実験で良い成績が得られた義手は、障害者による筋電制御で動作する時も同様のパフォーマンスが得られるかを検証するため、本節では上肢切断者による実験を行う。被験者は30代男性で、右前腕部の短断端(肘から約10 cm)患者である。被験者には、あらかじめ実験の趣旨、内容について十分な説明を行い、本人から実験参加の同意を得た。この実験は、電気通信大学倫理委員会の承認を得て実施されている。

今回の実験では、Pick-and-Place実験で成功率が高い、かつ、対応分析図でグループCに所属しているNo. 6の義手を使用した。検証に用いた義手と装着のための前腕ソケットおよび上腕カフを図11に示す。Pick-and-Placeの成績が良く汎用性が高い義手を作るために、被験者用義手のパラメータは表2と図10の結果を参考しながら、被験者の健常の左手に合わせて作成した。ソケットは、軽量性と耐故障性の両立を図るためにカーボン繊維製の材料を使用している。ハンド部の重量は190 gとなり、義手全体の重量は650 gとなった。バンドの締め付けで断端部に固定しているため、片手での簡易装着が可能となっており、利便性を高めている。

筋電義手を制御するためには、被験者の右前腕の断端部に筋電電極を装着し、筋収縮時に生じる筋電信号を計測することで把持動作の意図を検出する。計測したEMGを高速フーリエ変換し、周波数の特徴ベクトルの抽出を行う。抽出した特徴ベクトルに基づいて、ニューラルネットワーク(ANN)による識別を行った。事前に、誤差逆伝播法を用いたラベリング学習を行い、義手の動作と特徴ベクトルとの対応をとらせる。これにより、入力されたEMGに対して動作の識別を行い、それに応じた動作コマンドを義手に送ることで、操作者の意図に合わせて義手を動かす(図12) [18, 19]。筋電信号解析およびモータ制御のためのコントローラは、SH72544R ((株)ルネサス エレクトロニクス製)を使用した。筋電位を計測する電極には、腕を通すだけで計測が可能なバンド型乾式電極を使用した。

検証として、図13のように義手により物体を把持し落とさずに移動するPick-and-Place実験を行った。把持物体毎の実験時間は30秒間で、物体を往復に移動した回数をパフォーマンスとした。ただし、予め把持できないと被験者が判断した場合、試行しなくてもよいとした。実験後に、アンケートによる主観評価を行ってもらった。

実験における成功と失敗の例を図13に示す。図13aでは、被験者が指定した領域に置かれたボールとペットボトルを義手で把持してもう一方の領域に落とさずに運び、置かれていたときと同じ姿勢に物体を置くことを成功した。図13bでは、物体を持ち上げるときや運ぶとき、物体をすべり落とし失敗した。統計結果は表4に記す。ここに記入されていない物品は、被験者が練習時に把持できないと判断したものである。

結果では、健常者と同様に皿やノートなどの薄いものは把持することが出来なかった。一方、ボールペンとマジックペンにおける成績が異なる結果となった。置かれている物体を把持するときに、指が卓上に接触して反力が義手の持ち上がる方向に生じる。健常者実験よりも切断者実験の方が、義手は外力の影響を受けやすく、物体を狙ったポイントで把持することが出来なかったのだと考えられる。ほかの失敗要因としては、狙った場所で把持が出来てもモータのトルク不足で物体を落とす、2自由度ハンドの構造的に物体を支える力が足りず物体を落とすことなどが挙げられる。

上肢切断者による実験の結果は、欠損者が装着して筋電を用いて操作を行っていることから、装着性や筋電信号の識別率などの形状以外のタスクの成績が悪化する要素も含まれており、予想通り3章で行ったタスクの成績を大きく下回る結果となった。

日本では筋電義手を使用する前に最大10週間の装着訓練期間と6ヵ月間の試用装着期間が設定されている。本研究の被験者は初めてこの義手を使って表4の成績が得られたので、慣れるにつれ成績が良くなると考えられる。

アンケートによる主観評価の項目とその結果を下にまとめる。

質問1：ハンドの動きは？

回答1：

(速すぎる/少し速い/普通/少し遅い/遅すぎる)

質問2：思い通りに動かない？

回答2：

(不快/感じる/感じるが気にならない/全く感じない)

質問3：義手が重い？

回答3：

(不快/感じる/感じるが気にならない/全く感じない)

質問4：動かしにくい？

回答4：

(不快/感じる/感じるが気にならない/全く感じない)

質問5：疲れる？

回答5：

(不快/感じる/感じるが気にならない/全く感じない)

質問6：その他感じたことがあれば教えてください。

回答6：

今回の実験では、結構難しく細い、薄い物を掴む時は、握る事が出来ない。重い物、掴む握ると、手首が回転してしまっって残念でした。

図11 前腕切断者用筋電義手

図12 被験者用筋電義手のシステム構成図

a. 成功例

b. 失敗例

図13 切断者によるPick-and-Place実験の様子

本研究は、低自由度でありながら最低限のADLを満たす筋電義手の開発を行い、軽量性や簡便性の向上を目的とした。軽量性においては、重量や疲労は全く感じないという結果から向上されたと言える。義手を自力で装着することが可能であるため、簡便性が向上したと言える。

「ハンドが思い通り動かないか?」という項目に対し

表4 被験者実験の結果

スポンジボール	5/6	デジタルカメラ	6/6
積み木玉	3/6	紙パック(側面)	1/3
単1電池(側面)	3/6	ボトル(側面)	2/4
茶碗(把持のみ)	3/4	歯ブラシ	1/5
コップ(淵)	5/5	単3電池(両端)	3/4
湯呑(淵)	2/6	湯呑	3/4
消しゴム	1/5	マジックペン	0/5
茶碗	2/4	単1電池(両端)	5/6
コップ(側面)	2/5	ボールペン	0/7
ボトル(引掻け)	2/4		

て「感じるが気にならない」と答えた。これは、義手の自由度とアクチュエータの配置が寄与しており、指が動くときの軌道が健常の手と異なることが要因と考えられる。また、義手が思い通りに動かないと感じた理由は、義手の挙動は健常の手の動作と異なることにもあると考えられる。実験に使用した義手は、開く動作を行うときに4指が伸展した後に母指が並立位置に移動する。握る動作を行うときに、母指が対立位置に移動してから4指が屈曲する。今回の被験者は後天性の切断であるため、健常の手のイメージで義手を動かすので、健常の手の動作と義手の動作の差に違和感を抱き、これがアンケートで義手が思い通りに動かないと感じた理由であると考えられる。

重量について、被験者は、筆者らの先行研究で開発したアクチュエータ数が13個の多自由度義手を操作した経験があり、多自由度義手の重量感と比較した。多自由度義手は、サーボモータを使用してワイヤー牽引機構で動力をハンドに伝達している。この義手の全体重量は、1450g程度である。同程度の市販の義手として、Ottobock社のSensorHandがある。SensorHandはアクチュエータ数が1つで手の開閉動作のみが可能となっており、ハンド部の重量は350-500gとなっている。一方、本研究で開発した義手は、アクチュエータ数が2つで、4指の屈曲動作と母指の対立動作が可能となっており、ハンド部の重量は190g程度となっている。

Pick-and-Place実験で成績の低かった細かい物や薄い物の把持が難しいなどの意見があり、作成した義手では細かい物や薄い物の把持が苦手であることが分かった。その理由として、前述した指が動く軌道の差異のほかに、義手装置の重量物が断端部から離れていることが挙げられる。小さいものや細かいものは、把持する位置が少しでもずれると把持状態に大きな影

響を及ぼすため、義手が安定した状態で維持できないと把持することが困難である。義手システムの重量をバランスよく配置することで、より使い易くなると考えられる。また、義手に伸縮性の高いグローブを着けており、小さい物を掴むときに指先のグローブが押されてずれることも、1つの原因となっている。その改善策として、硬い爪を設けることでグローブを指先に固定する。Jingらの研究[20]によると、ハンドに爪を設けることで、コインのような薄いものを把持可能にしており、装飾性も向上された。

質問6で重い物を把持したとき手首が回転してしまうという回答があった。義手の手首関節にアクチュエータを設けておらず、操作者が把持する物体に応じて手首の角度を健常の左手で調節するようにしたため、重い物を把持する場合、手首関節が重力の影響で回転してしまう。ロック機構を加えることで改善できると考える。

5. 結言

本研究では、ADLの85%を占めている基本3種の把持姿勢をとる2自由度筋電義手を開発し、指の関節角度を設計パラメータとしてモデル化し、指の形状に応じた義手の把持機能を評価した。また、上肢切断患者による評価実験を行い、次のような結果が得られた。

- 本論では、4指MP関節と母指CM関節の2自由度を有する筋電義手のモデル化を行うことで、パラメータを設定し、 θ_a と θ_d の2関節角による把持性能の傾向を実験で調べた。
- 対応分析の結果から、指先を合わせたときに示指と母指の末節がなす角が大きい場合は物体へのアプローチは難しくなる。一方、示指と母指の末節がなす角度が小さい場合は物体へのアプローチは正確かつ容易になることが明らかとなった。
- 被験者による評価実験では本論で開発した義手が、手の動きに不自然さを感じるが、動かし難さや使用することでの疲労感ではなく、物体を把持可能であることが示された。

また、本論ではPick-and-Place実験の結果が全体的に良かったNo.6のハンドで切断者用の義手を作って検証を行ったが、他のハンドにもそれぞれ長所と短所がある。異なる形状の義手の着脱を容易に作成することで、状況に応じて付け替えることができれば、日常生活に必要な機能をカバーすることができると考えられる。今後は、被験者に自宅まで義手を持ち帰ってもらい、日常生活内での検証を行ってもらう予定である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費(No.25249025)、文部科学省脳科学研究戦略推進プログラムにより実施された(BMI技術を用いた自立支援、精神・神経疾患等の克服に向けた研究開発)、及び独立行政法人科学技術振興機構 研究成果展開事業 A-STEP (AS2524107P) による成果である。

参 考 文 献

- [1] 厚生労働省社会・援護局障害保健福祉部企画課, 平成18年度身体障害者児・実態調査結果, (2008).
- [2] J.T. Belter, J.L. Segi, A.M. Dollar, R.F. Weir, "Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review," *Journal of Rehabilitation Research & Development*, vol.50, no.5, pp.599-618 (2013).
- [3] i-limb ultra, Touch bionics, [Online]
<http://www.touchbionics.com/products/active-prostheses/i-limb-ultra/>.
- [4] Bebionic3, RSL Steeper, [Online]
http://bebionic.com/the_hand.
- [5] H. Kawasaki, T. Komatsu, and K. Uchiyama: Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.7, no.3, (2002).
- [6] T. Seki, T. Nakamura, R. Kato, S. Morishita and H. Yokoi, "Development of five-finger multi-DoF myoelectric hands with a power allocation mechanism, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2046-2051, (2013).
- [7] Sensorhand, Ottobock, [Online]
http://www.ottobock.com/cps/rde/xchg/ob_com_en/hs.xsl/3652.html, (2015).
- [8] Michelangelo, Ottobock, [Online]
<http://www.living-with-michelangelo.com/>.
- [9] 吉川雅博, 田口裕也, 阪本真, 山中俊治, 松本吉央, 小笠原司, 河島則天: 機能性とデザイン性を考慮した軽量・低コストの対向3指義手, *日本ロボット学会誌*, Vol.32, No.5, pp.456-463, 2014.
- [10] A.J. Young, L.H. Smith, E. J. Rouse, L. J. Hargrove, "Classification of simultaneous movements using surface EMG pattern recognition." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol.60, no.5, pp.1250-1258 (2013).
- [11] C. Cipriani, M. Controzzi, and M. C. Carrozza: Objectives, criteria and methods for the design of the SmartHand transradial prosthesis, *Robotica* 2010, vol. 28 pp.919-927 (2010).
- [12] 人間生活工学研究センター: 日本人の手の寸法データ集2010, (2010).
- [13] A. Nimbarde, R. Kaz, and Z. Li: Index finger joint motion generated by individual extrinsic muscles: A cadaveric study, *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, vol.3, no. 27 (2008).
- [14] 田原健二, 有本卓, 吉田守夫: 最小自由度をもつ柔軟2本指ロボットによる安定把持および姿勢制御のためのセンソリーフィードバック, *日本ロボット学会誌*, vol.21, no.7, p.68-73, 2003.
- [15] 田原健二, 有本卓, 吉田守夫: 柔軟3本指ロボットハンドによる仮想フレームを用いた対象物体の位置・姿勢制御, 第27回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2009AC3A1-05, 2009.
- [16] 矢吹佳子, 星川英, 雍旭, 景暁バイ, 中村達弘, 棚橋一将, 石原正博, 關達也, 加藤龍, 横井浩史: エラストマーを用いた筋電義手のための装飾用グローブの開発, 第30回日本義肢装具学会学術大会講演集, p.151 (2014).
- [17] M. Greenacre, *Correspondence Analysis in Practice*, Second Edition. London: Chapman & Hall/CRC, (2007).
- [18] R. Kato, D. Nishikawa, W. Yu, H. Yokoi, and Y. Kakazu: Evaluation of biosignal processing method for welfare assisting devices evaluation of EMG information extraction processing using entropy, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.14, no.6, pp.573-580 (2002).
- [19] 溝部二十四, 陳隆明, 柴田八衣子, 大庭潤平, 義手の訓練方法のポイントと指導のコツ: 筋電電動義手, *日本義肢装具学会誌*, vol.29, no.4, pp.240-245, 2013.
- [20] X. Jing, X. Yong, Y. Jiang, H. Yokoi, and R. Kato: A low-degree of freedom EMG prosthetic hand with nails and springs to improve grasp ability, *Proc. 2014 7th International Conference on BioMedical Engineering and Informatics*, pp.466-471 (2014).

(2015年3月9日 受付)
(2015年8月6日 採録)

問い合わせ先

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1
電気通信大学 大学院情報理工学研究科
横井 浩史
TEL: 042-443-5403
E-mail: yokoi@mce.uec.ac.jp

著者紹介

ほしかわ すぐる
星川 英 [非会員]

2014年電気通信大学情報理工学部知能機械工学科卒業。同年電気通信大学大学院情報理工学研究科博士前期課程知能機械工学専攻入学。現在に至る。筋電義手の機構設計やADLに基づく評価法の研究に従事。日本ロボット学会会員。

きこだ しんたろう
迫田 辰太郎 [非会員]

2014年電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業。同年電気通信大学大学院情報理工学研究科博士前期課程知能機械工学専攻入学。現在に至る。筋電義手における情報処理の研究に従事。

やまの いゆう
山野井 佑介 [非会員]

2014年電気通信大学情報理工学部知能機械工学科卒業。現在、電気通信大学大学院情報理工学研究科知能機械工学専攻在学。横浜国立大学工学府特別研究学生。筋電義手における情報処理の研究に従事。日本ロボット学会会員。

かとう りゅう
加藤 龍 [非会員]

2001年北海道大学工学部卒業。2003年同大学院工学研究科博士前期課程修了。2008年東京大学大学院工学系研究科にて博士号取得。同年、同大学院工学系研究科特任助教。2009年電気通信大学大学院情報理工学研究科 助教を経て、2014年電気通信大学 脳科学ライフサポート研究センター客員准教授。横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授となり、現在に至る。博士(工学)。Brain machine interface 及び医用福祉機械に関する研究に従事。日本ロボット学会、精密工学会、IEEEの会員。

もりおか そういちろう
森下 壮一郎 [非会員]

2001年埼玉大学工学部情報システム工学科卒業。2003年埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。2005年埼玉大学大学院理工学研究科博士後期課程中退。同年東京大学人工物工学研究センター寄付部門教員(助手相当)。2008年4月同センター特任助教。2009年埼玉大学大学院理工学研究科にて博士(工学)を授与。2010年東京大学大学院情報学環特任研究員。2012年電気通信大学大学院情報理工学研究科産学官連携研究員。2014年同大学脳科学ライフサポート研究センター特任助教。現在に至る。パターン認識および、その応用としてのブレインマシンインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会、計測自動制御学会、日本神経科学学会などの会員。

なかむら たつひろ
中村 達弘 [非会員]

2008年東京大学大学院修士課程修了。修士(工学)。2011年より電気通信大学研究員および、2014年より国立精神・神経医療センター研究員併任。現在に至る。筋電義手に関する研究およびBMIによるリハビリトレーニングに関する脳可塑性の研究に従事。日本ロボット学会、日本機械学会の会員。

せき たつ や
関 達也 [非会員]

2010年電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業。2012年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻修了。同年電気通信大学大学院情報理工学研究科博士後期課程知能機械工学専攻に在籍。現在に至る。修士(工学)。小型軽量の多自由度ロボットハンドの機構および制御の研究に従事。日本機械学会、日本ロボット学会、IEEEの会員。

じゃん いんらい
姜 銀来 [正会員]

2002年中国東北大学情報工学専攻卒業。2005年同大学大学院修士課程情報工学専攻修了。2008年高知工科大学大学院博士後期課程基盤工学専攻修了。同年高知工科大学助教。2012年同大学特任講師。2014年電気通信大学脳科学ライフサポート研究センター特任准教授。現在に至る。博士(工学)。生体計測、動作解析、生活支援ロボット、ヒューマン・ロボット・インタラクション(HRI)などの研究に従事。IEEE、日本知能情報ファジィ学会、日本ロボット学会、日本生体医工学会の会員。

よこい ひろし
横井 浩史 [非会員]

1993年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了。1993年より通商産業省工業技術院生命研究所研究員、1995年から北海道大学大学院工学研究科助教授、2004年から東京大学大学院工学系研究科准教授、2009年から電気通信大学電気通信学部教授および東京大学大学院情報学環客員教授(併任)、現在に至る。博士(工学)。また、2002年からチューリッヒ大学人工知能研究室シニア研究員、および西イングランド大学知的自動化システム研究室フェロー研究員を兼任。人・機械適応系に関する研究に従事。精密工学会、計測自動制御学会、日本機械学会などの会員。

Development and Evaluation of a Simplified Myoelectric Prosthetic Hand Realizing Basic Grasp Function in ADL

by

Suguru HOSHIKAWA, Shintaro SAKODA, Yusuke YAMANOI, Ryu KATO,
Soichiro MORISHITA, Tatsuhiro NAKAMURA, Tatsuya SEKI, Yinlai JIANG and Hiroshi YOKOI

Abstract :

Myoelectric prosthetic hands are desired by those who have lost their hands not only for decoration but also for the functions to help them with their activities of daily living (ADL). The prosthetic robotic hands for daily use should be little stressful to the user by weight reduction, and be fault-tolerant. It is thus required to simplify the prosthetic robotic hand while maintaining its grasp function. The aim of this study is therefore to develop a simplified prosthetic hand to realize the most important hand motions in ADL by trading off the cost and performance. This paper reports the development of a two degree-of-freedom prosthetic hand with two motors to drive and the carpometacarpal joint of the thumb and the interlocked meta phalangeal joints of the other four fingers. In order to optimize the structure of the fingers, the model of the prosthetic hand was proposed and 7 hands with different structural parameters were manufactured and tested in a pick-and-place experiment with objects of daily use. The proper parameters suggest by correspondence analysis were adopted to design the prosthetic hand for a subject with upper limb amputation. The pick-and-place experiment by the subject showed the applicability of the structure and the effect of weight reduction.

Keywords : myoelectric prosthetic hand, modelling, grasping function, correspondence analysis

Contact Address : **Hiroshi YOKOI**

Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

1-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585, Japan

TEL : 042-443-5403

E-mail : yokoi@mce.uec.ac.jp