
電動義手における入力装置の多様化に関する研究

Development of a System for Improving Usability of an Electrically-Powered Prosthetic Hand

原 良昭 赤澤康史 中村俊哉 松原裕幸

HARA Yoshiaki, AKAZAWA Yasushi, NAKAMURA Toshiya, MATSUBARA Hiroyuki

陳 隆明 柴田八衣子 溝部二十四 深澤喜啓 岡本規子 (兵庫県立総合リハビリテーションセンター)

CHIN Takaaki, SHIBATA Yaiko, MIZOBE Futoshi, FUKAZAWA Yoshihiro, OKAMOTO Noriko
(Hyogo Rehabilitation Center)

キーワード:

電動ハンド、入力装置、習熟度、評価手法

Keywords:

Electrically-powered prosthetic hand, Input device, Controlling skill, Evaluation method

Abstract:

The aim of this study is to develop a system for improving usability of an electrically-powered prosthetic hand (EPH). This study is composed two subjects.

One of these subjects has been development of an input device for a congenital forearm deficiency person who could push a switch by using a stump of forearm. This device has been made from a pressure conductive rubber. Because the rubber varies the rubber's resistance depending on force which pushed the rubber, this device is suitable for a control system of EPH which varies open-close speed of the hand by depending on input voltage.

Another subject has been development of a quantitative evaluation method of controlling skill on the EPH. The EPH needs two signals (Sig1, Sig2) to control motion of EPH. Sig1 and Sig2 are assigned average rectified electromyogram of forearm extensors and flexors respectively. An aim of therapy for EPH users is to improve ability to contract the two muscles separately. We defined this ability as the skill. We developed a quantitative evaluation method of the skill.

1 はじめに

本研究では電動義手の使いやすさの向上を目的とし、以下の2つの事柄を行った。

- 比例制御式電動ハンド用入力装置の開発
- 筋電義手制御能力の評価手法の開発

2 比例制御式電動義手用入力装置の開発

2.1 背景

電動義手とは手先具に電動ハンドを用いた義手である。電動ハンドは、通常、2つの独立した信号の振幅により、その開閉動作が制御されている(図1)。

電動ハンドの制御方式には、信号の振幅値に応じてその開閉速度が変化する比例制御方式と開閉速度が一定のOn-Off制御方式がある。

電動ハンドの開閉を制御する信号(制御信号)は筋の活動電位(筋電位)が用いられる。したがって、電動ハンドの開閉を制御するために、筋電位を随意に発生させる能力が重要となり、その能力を訓練によって獲得する必要がある。

しかし、図2に示すような手指等の可動部位が残存している上肢欠損者は、その可動部位で押すことができるスイッチを使用することで、筋電位を用いことなく電動ハンドの開閉が可能となると考えられる。

我々は、電動ハンド用のスイッチを作成しその有用性について2003年度の当研究所の報告集で報告した¹⁾。

図3に2003年度報告したスイッチの回路図を示す。対象となる電動ハンドはOtto Bock社製の電動ハンドである。通常、Otto Bock社製の電動ハンドは2つの筋電位によって制御されることを想定している

ため、筋電位計測用の能動電極に電圧を供給するための電圧源がある。

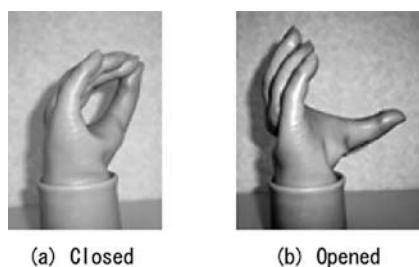


図1 開閉時の電動ハンド

Fig. 1 Typical electrically-powered hand

2003年度に作成したOn-Offスイッチでは能動電極用の電圧源を2つの抵抗で分圧した電圧を筋電位の代わりに電動ハンドに入力している。従って、電動ハンドに入力される信号値は、2つの抵抗の値を変化させない限り一定の値となる。そのためOn-Off制御方式の電動ハンドの制御には適しているが、入力信号の値に応じて開閉速度が変化する比例制御方式の電動ハンドを制御するには適していない。

本研究では、圧に応じてその抵抗値が変化する感圧導電性ゴムを用いて比例制御方式に適したスイッチの開発を行った。



図2 可動部位が残存している断端部

Fig. 2 A example of stump which has movable parts

2.2 結果

図4に感圧導電性ゴムを用いたスイッチの回路図を示す。作成したスイッチでは2003年度に作成した

スイッチ同様に能動電極用の電圧源を感圧導電性ゴムと抵抗で分圧した電圧を電動ハンドへの入力としている。

感圧導電性ゴムは圧に応じてその抵抗値が変化する。従って、作成したスイッチでは感圧性導電ゴムを押す力を調節することで電動ハンドへの入力信号の値を調整することができ、比例制御方式の電動ハンドの開閉速度の制御が可能となる。

作成したスイッチは3名が使用しており（2007年3月現在）、そのうち2名が比例制御方式の電動ハンドを使用している。

スイッチ使用者からは、「On-Off制御方式よりも比例制御方式の電動ハンドのほうが便利である」、「これからも感圧導電性ゴム製スイッチを使い続けたい」との意見が得られた。

3 筋電義手制御能力の評価手法の開発²⁾

3.1 背景

電動ハンドの開閉を筋電位によって制御している義手を筋電義手という。現在、臨床現場で使用されている筋電義手の大部分は前腕筋電義手である³⁾⁴⁾。以下の文中において筋電義手は前腕筋電義手を示すとする。

本章では、2つの独立した信号（以下、信号1、信号2）によりその開閉が制御されている電動ハンド（信号1の振幅が閾値を越えると開く動作を、信号2では閉じる動作を、両方の信号が越えた場合は先に越えた信号の動作を始める⁵⁾。

電動ハンドは開閉ができるので筋電義手の使用者は“手先具を把持する対象にどのように近づければいいかを判断する能力（以下、“状態判断能力”）”と“電動ハンドを随意に開閉するために電動ハンドの制御信号である筋電位の発生を制御できる技術（以下、“筋電位制御能力”）”が必要となる⁶⁾。

筋電義手では前腕断端部に残存する手関節背屈筋群（以下、背屈筋群）と手関節掌屈筋群（以下、掌屈筋群）の全波整流平滑化処理がされた筋電位（Average rectified value：ARV）を信号1と信号2に用いる。

背屈筋群と掌屈筋群は拮抗筋群である。そのため、片方の収縮時には他方も収縮することがあり、両方の信号がほぼ同時に閾値を越えることがある。両方の信号が閾値を越えると、電動ハンドは先に越えた信号の動作を行うため、電動ハンドは使用者の意図しない動作を行うことがある。また、筋の収縮強度に応じてAVRは変化し、筋はその収縮強度に応じて疲労する。そのため、筋電義手の使用による筋疲

労を抑えるには、一方の信号が閾値を越えているときの他方の信号は小さい値である方が良い。

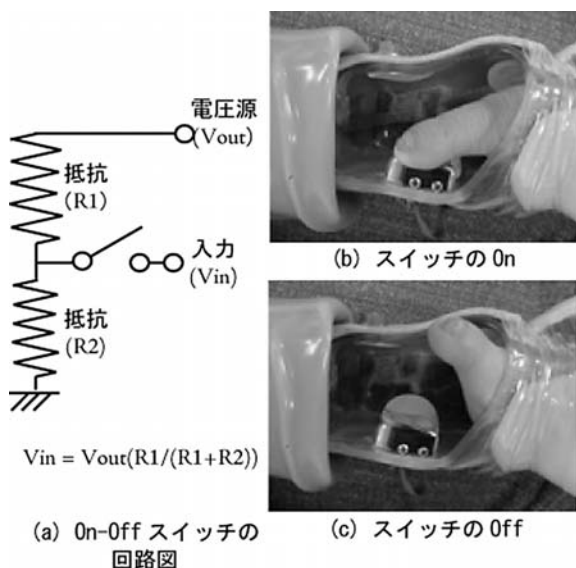


図3 On-Offスイッチ
Fig. 3 On-Off switch

両抵抗R1とR2の値が固定であるため電動ハンドへの入力Vinの値も固定となる。そのため、入力に応じてハンドの開閉速度が変化する比例制御式の電動ハンドの制御を行うのは困難である。

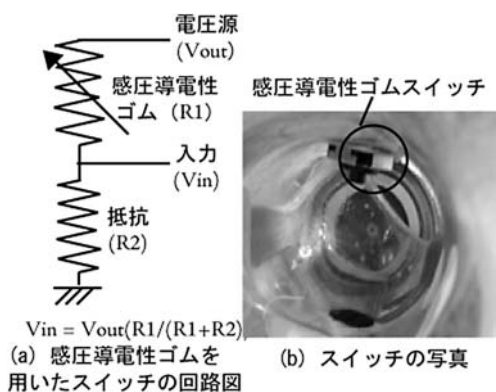


図4 感圧導電性ゴムを用いたスイッチ
Fig. 4 developed switch which was made from pressure conductive rubber

感圧導電性ゴムの抵抗R1が感圧導電性ゴムを押す圧に応じて変化するため電動ハンドへの入力Vinの値も圧に応じて変化する。

筋電義手の使用者は2つの信号をモニタし視覚によるフィードバックを受けながら“一方の信号が閾値を越えているときに他方の信号を小さく保つ能力”、すなわち、“筋電位制御能力”を習熟させる練習を医療スタッフと行う⁶⁾。しかし、臨床現場における練習成果は“「ある動作ができるかどうか」と「できる動作の個数はいくつつか」”で評価されており⁷⁾、

その評価結果は“動作ができたかどうか”を判断する医療スタッフの主観による影響を受ける。この手法では“状態判断能力”と“筋電位制御能力”を個別かつ定量的・客観的に評価することは困難である。また、筋電義手の練習システムの研究は行われているが⁸⁾⁹⁾、臨床現場で使用されている市販の電動ハンドを対象とした“筋電位制御能力”の評価手法に関する研究はない。

“筋電位制御能力”を定量的・客観的な評価ができれば、筋電義手の使用者の“筋電位制御能力”に応じた練習内容を構築できると考えられる。

本論文では、“筋電位制御能力”の習熟度を筋電義手の習熟度とし、それを定量的に評価する手法を提案し、その手法により筋電義手の使用者の習熟度を評価した。

3.2 定量的評価手法

本研究で提案する“筋電位制御能力”の定量的評価手法は、電動ハンドの動作を開く動作（以下、“開動作”）と閉じる動作（以下、“閉動作”）の2つの動作にわけ、各“動作”における“筋電位制御能力”を個別に評価する。信号1が閾値以上かつ信号2が閾値未満を“開動作”、信号1が閾値未満かつ信号2が閾値以上を“閉動作”とする。

提案する手法では“筋電位制御能力”を、閾値を越えている信号を説明変数、他方を目的変数とした切片が0である回帰直線の傾きにより評価する。すなわち、“開動作”では信号1を説明変数、信号2を目的変数、“閉動作”では信号2を説明変数、信号1を目的変数とした回帰直線の傾きを最小二乗法により求め、その値を用いて各“動作”の“筋電位制御能力”を評価する。

“一方の信号が閾値を越えているときに他方の信号を小さく保つ能力”を“筋電位制御能力”と定義したので、回帰直線の傾きが小さい方が“筋電位制御能力”が優れている。すなわち、筋電義手の習熟が進んでいることを示す。

3.3 測定内容

我々は、肢位を固定し電動ハンドの開閉を試みたときの信号1と信号2を測定した。肢位は立位かつ筋電義手側上肢は肩関節屈曲0度・外転0度、肘関節90度屈曲、前腕回内外中間位である。

被験者は筋電義手を常用している2名(A、B)であり、測定は被験者に研究の目的を説明し同意を得てから行った。

Aは信号の値に応じて電動ハンドの開閉速度が変化する比例制御方式の電動ハンド(8E38=6、Otto

Bock社)を、Bは開閉速度が一定のOn-Off制御方式の電動ハンド(8E38=7、Otto Bock社)を使用している。両名とも信号1は背屈筋群のAVRを、信号2は掌屈筋群のAVRを使用している。測定時における両被験者の筋電義手の使用期間は、Aは80ヶ月、Bは1ヶ月であった。

電動ハンドの開閉の指示は被験者の目前に設置したモニターを通じて行った。モニターの中央には円が表示されており、その円の色は1秒ごとに赤と緑に変化している。被験者は、円が緑であれば、電動ハンドを開くように、赤であれば閉じるように努力する。このように開閉を試みる努力を連続的に行ったときの信号を測定し、筋電義手の習熟度の評価は初めの開閉を除いた連続した5回の開閉動作時の信号から行った。また、測定において円の色が変化する前に電動ハンドが開ききったもしくは閉じきった場合には、電動ハンドの損傷を防ぐために円の色が変化するまで電動ハンドを開閉させる試みを停止させるように被験者に指示した。なお、電動ハンドが開ききったかもしくは閉じきったかの判断は被験者がしている。

信号1と信号2はOtto Bock社製筋電義手用電極(13E200、Otto Bock社)と電動ハンドを繋ぐケーブルから分岐させたケーブルを介してサンプリング周波数100Hz、A/D分解能16bitで測定した。また、同時に円の色を制御する信号も測定した。

13E200には、全波整流平滑化回路と増幅回路が内蔵されており、その増幅率は2,000から100,000倍まで調節が可能である。増幅率は作業療法士や義肢装具士などの医療スタッフによって電極ごとに調整

されており、今回の測定において、増幅率は各個人電極ごとに異なっている。

3.4 結果

被験者が使用している電動ハンドの閾値は0.6Vである²⁾。したがって、信号1が0.6V以上かつ信号2が0.6V未満のデータを“開動作”、信号1が0.6V未満かつ信号2が0.6V以上のデータを“閉動作”とした。

図5に評価を行った各信号とモニターに示された円の色の時間変化を示す。

図6は信号1を横軸に、信号2を縦軸にとった散布図ある。横軸が0.6V以上かつ縦軸が0.6V未満の領域にある点が“開動作”時の、横軸が0.6V未満かつ縦軸が0.6V以上の領域にある点が“閉動作”時のデータを示す。

表1に各“動作”時の“筋電位制御能力”である回帰直線の傾きを示す。“開動作”時の“筋電位制御能力”は信号1を説明変数、信号2を目的変数として、“閉動作”時の“筋電位制御能力”は信号1が目的変数、信号2は説明変数とした切片を0とした最小二乗法により求めた。

表1の“筋電位制御能力”はその値が小さいほど“一方の信号が閾値を越えているときに他方の信号を低く保つ能力”がその動作において優れていることを示している。ただし、電極の増幅率や位置、また測定を行った肢位を変更すると回帰直線の傾きも変化する可能性がある。そのため、表1が示しているのは、測定時の状況における“筋電位制御能力”である。

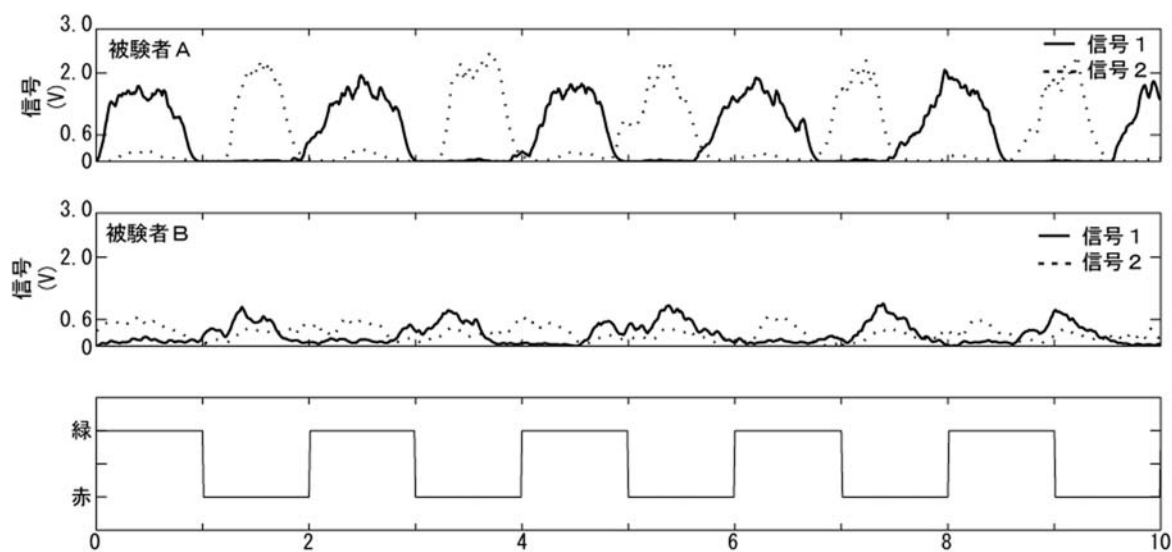


図5 測定結果

Fig. 5 Log of measurement

3.5 考察

13E200に内蔵されている増幅回路の増幅率はS/N比や電力消費量の関係から低く設定することが推奨されている³⁾。しかし、増幅率を低くすると電動ハンドの開閉に必要な筋の収縮強度が増し、それに伴って拮抗筋の活動も活発となり、筋の疲労を早めてしまう。また、弱い筋の収縮強度で電動ハンドの開閉を行うには増幅率を高くする必要がある。

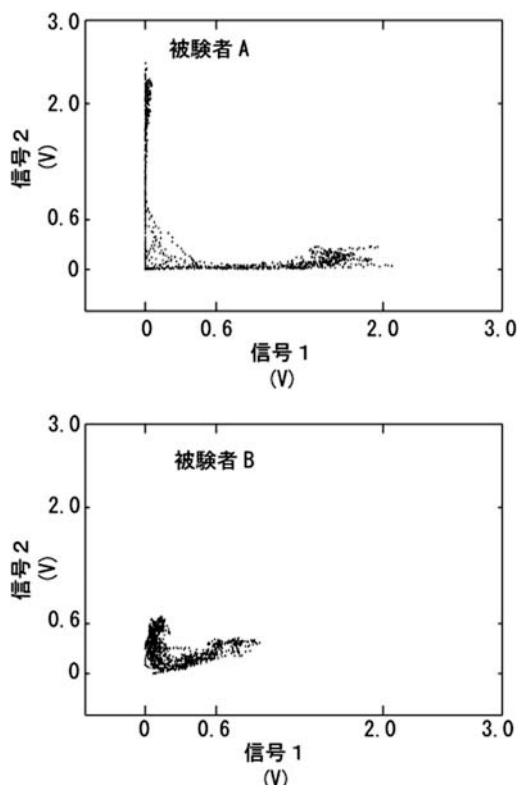


図6 信号1と信号2の関係

Fig. 6 Relationships between of two signals

Motion Control社製筋電義手には信号の増幅率を自動調整する仕組みが組み込まれているが²⁾、日本でよく使用されているOtto Bock社製筋電義手³⁾には信号の増幅率を自動的に調整する機構はない。現在、Otto Bock社製筋電義手における信号の増幅率は、開閉動作時の信号のモニタなどはされているが、基本的には医療スタッフの臨床経験に基づく主観によって決定されている。

“筋電位制御能力”は、信号の増幅率を決定するときの定量的指標になると考えられる。例えば、信号2の増幅率を変化させずに、信号1の増幅率を低下させると、信号1の振幅は小さくなると同時に“開動作”時の回帰直線の傾きは増加する。そのため、提案する評価手法を用いれば、電動ハンドの動作に必要な振幅を維持したまま、“筋電位制御能力”を高くできる増幅率を選択することが可能となる。

表1 各動作時における回帰直線の傾き
Table.1 Regression coefficients based on two signals at each motion

被験者	開動作時の回帰直線の傾き	閉動作時の回帰直線の傾き
A	0.07	0.01
B	0.45	0.18

電極の増幅率と同様に、電極の位置も医療スタッフの臨床経験に基づき決定されている。電極の位置によって同じ筋であっても得られる筋電位の振幅は異なるため、電極の位置によって“筋電位制御能力”も異なると考えられる¹⁰⁾。そのため、増幅率と同じく電極の位置決めにおいても“筋電位制御能力”は定量的評価指標になると考えられる。

また、欠損肢の状態や筋電義手装着それ自身の影響などによって掌屈筋群や背屈筋群が不随意に収縮することや弛緩しにくいことが肢位によっては生じることが知られている。したがって、“筋電位制御能力”は評価を行う肢位によって異なることがある。今回は1つの肢位による“筋電位制御能力”の評価であったが、今後はどのような肢位における“筋電位制御能力”が必要であるかを医療スタッフと協議する必要がある。

図5と図6は、Bの両信号の振幅が他の被験者に比べて低いことを示している。その原因の1つは電動ハンドの制御方式の違いであると考えられる。Aは比例制御方式の電動ハンドを使用しているため、電動ハンドの動作を速く行うために筋の収縮強度を調整し大きい値の信号を発生させていると考えられる。一方、Bが使用しているのはOn-Off制御式の電動ハンドであり、大きな信号を発生させる必要がないためAが信号を制御しその振幅を低い値にしていたと考えられる。しかし、単に信号の増幅率が低く大きな値の信号が出せなかったことも考えられ、本論文の結果だけではBの信号が他の被験者と比べて低かった原因は確定できない。

3.6 まとめ

本章では筋電義手の習熟度の定量的評価手法を提案し、提案した筋電義手の習熟度の定量的評価手法を用いて2名の被験者の習熟度を評価した。提案した手法では、筋電義手を開く動作と閉じる動作を行っているときの“筋電位制御能力”を個別に評価することができる。本手法を用いることで、どちらの“動作”が習熟しているかの定量的評価が可能である。今後の課題として、評価結果の再現性の確認や練

習によって“筋電位制御能力”がどのように変化していくかを明らかにすることが挙げられる。

4 まとめ

本研究では電動義手の使いやすさの向上を目的とし、“比例制御式電動ハンド用入力装置の開発”と“筋電義手制御能力の評価手法の開発”を行った。

比例制御式電動ハンド用入力装置の開発では、スイッチの材料に感圧導電性ゴムを用いることで電動ハンドへの入力電圧を随意に変化させることが可能なスイッチを作成した。2007年3月現在で3名が今回作成したスイッチを使用しており、今後も使用者の意見を参考に開発を行う予定である。

筋電義手制御能力の評価手法の開発では、筋電義手の制御能力を定量的に評価する手法を開発した。また、その手法を用いて筋電義手使用者2名の筋電義手制御能力の評価を行った。

謝辞

本研究を遂行するにあたって、大阪電気通信大学医療福祉工学部理学療法学科 吉田正樹 教授および奈良先端大学大学院情報科学研究科 湊小太郎教授 には研究に関して多大なるご意見を承りました。ここに謝意を示します。

参考文献

- 1) 松原裕幸・中川昭夫・陳隆明・中村春基・柴田八衣子・大庭潤平・山下英俊・溝部二十四・深澤喜啓・古川宏：「小児切断リハビリテーションにおける筋電義手処方システムの確立に関する研究」平成15年度福祉のまちづくり工学研究所報告集、pp.2004
- 2) 日本整形外科学会・日本リハビリテーション医学会：「義肢装具のチェックポイント第6版」、医学書院、2005
- 3) 赤澤堅造・奥野竜平・菊谷功：「動力義手・装具の研究開発の現状と未来」、日本ME学会雑誌、Vol.13、No. 2 p.35、1999
- 4) 川村次郎・青山孝・古川宏：「動力義手の最近の進歩と臨床応用—筋電義手を中心に—」、リハビリテーション医学、Vol.34、 No.1 pp.70-76、1997
- 5) 陳隆明：「筋電義手訓練マニュアル」、全日本病院出版会 p.44、2006
- 6) 柴田八衣子・大塚博・澤村誠志・陳隆明・中川昭夫・中村春基・大庭潤平・溝部二十四・山下英俊・深澤喜啓：「筋電義手の装着訓練とメンテナンス—実際の症例—」、日本義肢装具学会誌、Vol.17、No.4 pp.249-256、2001
- 7) 陳隆明：「筋電義手処方の判断基準」、日本義肢装具学会誌、Vol.21、No.3 pp.166-170、2005
- 8) 辻敏夫・福田修・大塚彰・金子真：「義手制御を目的とした筋電操作トレーニングシステム」、信学論 (D-II)、Vol.J83-D-II、No.10、pp.2030-2039、2000
- 9) A. C. Dipont and E. L. Morin: “A Myoelectric Control Evaluation and Trainer System”、IEEE Trans. Rehabilitation Engineering、Vo2、No.2 pp.100-107、1994
- 10) 木塚朝博・増田正・木竜徹・佐渡山亜兵：「表面筋電図」、東京電機大学出版局、2006