

健常手の運動機能に近い前腕筋電義手開発の為に機能探索に関する実験的研究

Functional Needs for the Development of Myoelectric Trans-radial Prosthetic Hand with Normal Motor Function

樋口 凱* 昆 恵介** 野坂 利也** 早川 康之**
敦賀 建志** 白井 允基*** 松原 裕幸**

Gai Higuchi, Keisuke Kon, Toshiya Nosaka,
Yasuyuki Hayakawa, Takeshi Tsuruga, Masaki Shirai,
and Hiroyuki Matsubara

あらまし

【背景】近年、高機能な筋電義手の開発は進んでいるが、これらの研究開発の指針となる、実際の一日の中で必要な手指動作は明確になっていない。また、筋電義手電動ハンドはいくつかのメーカーから販売されているが、手関節の機能は乏しく、製作の際に参考とする手関節の適格なアライメント設定の情報は存在しないため、義肢装具士が経験によって適合を行っているのが現状である。

【目的】本研究では、健常者の日常で使用する手関節および前腕の動作を分析することで、使用する頻度の高い動作を明確にし、機能開発の優先順位を明確にすることを目的とした。

【方法】対象者は健常成人男性1名、身長(170±5 cm)、体重(65±5 kg)とした。計測方法は、対象者の起床から就寝までの一日の手の動作に着目した動画撮影である。動画の動作を機能別に分類し、動作が行われた総時間数に対する割合を求めた。また、得られた割合情報から開発優先度を考察した。

【結果】日常生活動作を考慮して筋電義手の機能を抽出した結果、手関節の動きと連動した前腕回内外機能に特化した筋電義手の開発を優先すべきであることが明らかになった。

1 はじめに

厚生労働者によると、国内における上肢切断者は82千人おり、全切断者の84%を占めることが報告⁽¹⁾されている。多くの上肢切断者では日常生活動作で重要な上肢を失ったことにより、就労継続が困難となり、離職するケースがある。

一般的に就労継続を考えると図1-Aのような能動義手が処方される⁽²⁾。しかしながら、物を掴むといった機能に特化している反面、外観性に乏しく、切断者が選択的に能動義手を好まない傾向⁽³⁾

にあるとされる。

一方で図1-Bのような筋電義手は、能動義手と比較して、実物の手のような外観性を持ち、電極センサから得られる筋電信号を用いることで、握るといった動作を自分の意思で行うことが可能である。しかしながら、日常生活動作の中では思うように制御がいかず、能動義手のほうが機能的にすぐれている⁽⁴⁾とされている。

また、筋電義手はいくつかのメーカーから販売されているが、機能的には、把持動作(物を掴む)、前腕回旋機能(腕を回す)の2自由度をもった筋電義手が一般的で、義手操作にあたっての機能は非常に乏しい。切断者に対しての適合を検討する際の、角度設定などの製作条件もメーカーから提示されておらず、製作者の経験則によって行われているのが実態である。

このような現状の中で、最近では3Dプリンタに



A: 能動義手

B 筋電義手

図1 義手のタイプの違い

* 北海道科学大学大学院工学研究科医療工学専攻

** 北海道科学大学保健医療学部義肢装具学科

*** 東名ブレース株式会社

よる筋電義手の開発⁽⁵⁻⁶⁾や、高機能化を狙った義手の開発は散見⁽⁷⁻¹¹⁾されるが、これらの研究開発の指針となる、実際の一日の中で必要な手指動作は明確になっていない。そのため、エンジニアのアイデア優位の研究が先行しており、シーズとニーズがマッチしていない状況にある。

本研究グループは、過年度研究⁽¹²⁾により手指動作に関する一日のデータを抽出してきた。しかし、手関節および前腕に関するデータを取得しておらず、日常生活動作における義手の機能を検討するにあたり、開発優先度を決定できていない。

これに対し、手指と手関節および前腕の動作を分類し、一日の出現割合をグラフ化することにより、手関節および前腕の機能の開発優先順位に関するデータを抽出することができると考えた。また、抽出した動作のデータをもとに動作検証を行うことにより、現在、明確になっていない筋電義手ハンドの機能開発に関するデータを抽出することができると考えた。

本研究では、健常者の日常で使用する手関節および前腕の動作を分析することで、使用する頻度の高い動作を明確にし、開発機能の優先順位を明確にし、筋電義手のパーツ選択および研究開発に有意義なデータ提供を行うことを目的とした。

2 対象者

対象者は既往歴のない健常成人男性 1 名、身長(170±5 cm)、体重(60±5kg)とした。拘束時間が長く、プライバシー保護の倫理的配慮から女性を対象外とした。なお、本研究は北海道科学大学倫理(申請番号第 120 号)を受けてから実施した。

3 動作分析方法

3.1 計測方法

計測に際しては、SONY 社製のビデオカメラ(HDR-PJ540)を 2 台用いて、計測対象者の起床から就寝までの一日を、利き手動作に着目し、動画撮影を行った。撮影は夏の 2 日間で行い、撮影者は 24 時間行動を共にした。また、研究対象者に対しての行動制限は特に設けず、自由に普段通りの生活を行うよう指示した。

3.2 動作の評価方法

撮影記録された動画の分析にあたり、上肢作業能力評価法⁽¹³⁾やサーブリック分析や PTS 分析に代

表 1 手指部の動作分析

分類	特性	動作例
粗大型	握り系	ペットボトルを握る、携帯電話を保持する等
	平面系	布巾で机を拭く、扉を押す等
巧緻型	つまみ系	紙をつまむ、箸・ペンの使用等
	突起形成系	スイッチを押す、キーボードの使用等

表される作業分析法⁽¹⁴⁻¹⁷⁾を参考に、手の動作を表 1 に示すように粗大型と巧緻型の 2 つに分類した。

データの整理にあたっては、手関節および前腕の機能として 3 自由度を持つ各関節の動きを 3 動作(回内外、掌背屈、橈尺屈)として扱い、各動作方向(回内一回外、掌屈一背屈、橈屈一尺屈)から 6 種類(3 自由度×2 方向)に区分した。なお、本稿では、運動は運動機能を表し、動作は実際の動き、肢位は動作の開始地点及び終着点を表す。

各動作および肢位において、自動運動での最大可動域から-10°の範囲に動いている動作を「重度」、それ以外の動作を「軽度」として 2 群に分け、計 12 種(6 種類動作×2 群)に分類した。この範囲の肢位も同様の分類名とし、12 肢位として扱った。なお、基準である 0°はニュートラルとし、アライメントの考察の際に考慮することとした。

記録された動画に対しては、対象者が行った前腕より遠位の動作を、分類表に従って割り付けた。また、割り付けた動作分類ごとに、手指部の動作が行われた動作時間と回数、その際の手関節および前腕の動作の時間と回数をそれぞれ算出した。

4 動作分析結果

図 2 は粗大型動作、図 3 は巧緻型動作を示し、それぞれの動作の分析結果である。横軸は全動作を 100%とした時の、各動作が占める割合を示し、数値が大きいほど開発優先度が高い運動と考えた。また、縦軸は動作により到達した肢位を示し、各肢位におけるニュートラルポジションを「N」、運動範囲が大きいものを「重」、運動範囲の小さいものを「軽」と表現した。

図 2 の粗大型に着目すると、橈尺屈動作では尺屈動作、掌背屈動作では軽度背屈動作が多かった。また回内外動作では軽度の回外動作と運動範囲の広い重度の回内動作が多かった。

図 3 の巧緻動作に着目すると、橈尺屈動作ではニュートラルポジションの占める割合が多く、掌背屈動作では軽度背屈動作が多かった。また、回内外動作では軽度の回内動作が多かった。

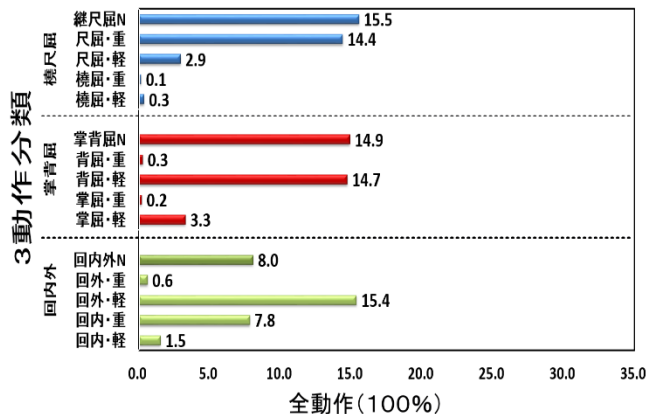


図2 粗大型動作分析結果

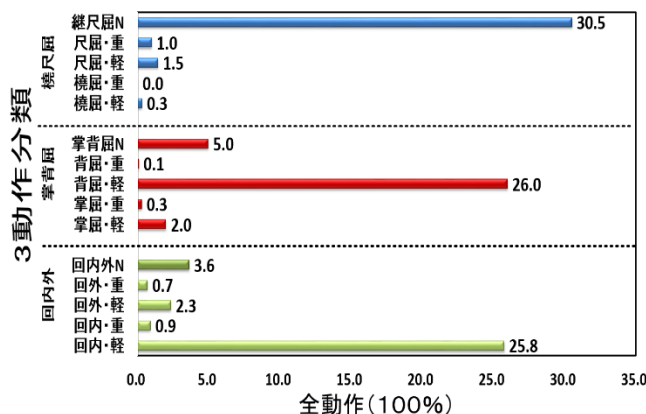


図3 巧緻型動作分析結果

5 考察

本研究は前腕および手関節の動作を解析対象としたため、手指を使った巧緻な動作による代償は対象となっていない。そのうえで結果を解釈した結果、巧緻動作の際の前腕および手関節の動作は、運動範囲の小さいものであったことから、動作頻度の高い肢位での固定機能を持たせることが望ましいと考察した。スマートフォン操作やキーボードタッチなどの巧緻動作は手指動作が主体であり、義手での再現を試みると微細な動作を制御するシステムを構築するために回路系・アクチュエータを増やす必要がある。更なる運動機能の付加は、容積増大と質量の増加が懸念されるため、巧緻動作を目的とする筋電義手開発にあたっては、前腕および手関節部の運動機能は優先度が低い。以上より、図3に示す巧緻型動作の分析結果から、橈尺屈肢位はニュートラルポジション、掌背屈肢位は軽度背屈位、回内外肢位は軽度回内位を基本とした固定アライメントで筋電義手の開発を行うことが望ましいと考えた。

一方で粗大型動作は、手指の動作だけでは補えない運動範囲の動作であるため、前腕及び手関節

が機能的に働かない場合は、肩関節による代償動作が生じる。よって、つまむ、握るといった手指の1自由度動作に加え、前腕および手関節の動作が加わった複合自由度による動作が必要であると考へた。図2の粗大型動作の分析結果から、橈尺屈動作では尺屈動作、掌背屈動作では軽度背屈動作、回内外動作では軽度の回外動作と可動範囲の広い回内動作をもつことが必要であると考察した。

筋電義手による運動機能再建評価について、加藤ら⁽¹⁸⁾は、fMRIを用いて評価し、手指と手首動作に自由度が多い筋電義手が、健常者がもつ実際の運動・感覚により近くなり、脳機能的にも健常者に近い形で運動機能再建が可能と報告している。

したがって、健常者の動作感覚に近づけるためには、手指機能の自由度を高めることに加え、前述の考察を統合すると、橈尺屈運動はニュートラルポジションの初期アライメントから、尺屈方向に制御する機能が必要であり、掌背屈運動は軽度背屈の初期アライメントから、粗大動作をする手指の動きと連動して、運動を制御する必要があると考へた。また、回内外運動は軽度回内を肢位初期アライメントとし、回内方向に運動範囲を広くした制御システムを構築することが必要と考へた。

筋電義手の運動機能開発の優先度は、運動範囲の割合が比較的分散した前腕回内外の優先度が高く、手指動作と連動して制御するシステムの構築が必要と考へた。

次に、尺屈動作の開発優先度が高い。尺屈重度の割合が高いため、運動機能もしくはアライメント変更機能が必要であると考察した。

優先度が低いと考へたのは、運動範囲の狭い掌背屈運動の制御である。

背屈軽度とニュートラルポジションの占める割合が高く、掌屈方向への運動範囲も狭いことから、軽度背屈位を初期アライメントとした固定機能で十分であると考察した。

6 動作分析小括

本研究では、健常者の日常で使用する手関節および前腕の動作を分析し、頻度の高い動作を明確にすることで、開発機能の優先順位について検討することを目的とした。

結果として開発優先度が最も高いのは、手指動作と連動した前腕回内外の機能の制御であり、次に尺屈動作の制御が高いことを明らかにした。

7 前腕筋電義手模擬装置による検証

7.1 目的

筋電義手の肢位が日常動作に及ぼす影響を実際に動作で検証することにより、初期アライメントおよび運動機能によるアライメント変更結果を、代償動作を考慮して評価できると考えた。この結果を含め、筋電義手に必要な機能の優先順位を再度考察することとした。

7.2 対象者

検証実験の対象者は、本実験の対象者と同人物とした。これは、今回の動作検証の実験プロトコルは動作分析の結果をもとに作成したためである。

7.3 方法

国際的に最も流通している筋電義手は、アウトボックス製の筋電義手⁽¹⁹⁻²¹⁾の3指つまみハンドである。本研究では、同製品と同等の条件、かつ手関節および前腕のアライメントを変更可能な、図4に示す前腕筋電義手模擬装置を製作し、対象者の利き手に装着させて、評価を行った。

7.3.1 前腕筋電義手模擬装置について

製作した模擬装置は、母指CM関節を短対立装具で対立位に固定、母指IP関節はプラスチックギプスで30°屈曲位に固定、同じく第1、2指のPIP関節およびDIP関節もそれぞれ、30°、20°屈曲位に固定した。

肢位の固定は、手部の対立装具とソケットを、各肢位を再現する金属支柱で留めることで可能とした。

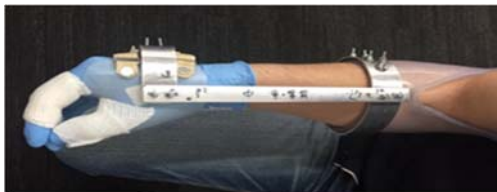


図4 前腕筋電義手

7.3.2 実験肢位設定について

手関節および前腕部のアライメント条件として、図5に示すように、ニュートラルと回内外4種で固定した条件と、図6に示すようにニュートラルと掌背屈4種でそれぞれ固定した条件と、図7に示すようにニュートラルと橈尺屈4種で固定した合計13種の肢位を実験条件とした。

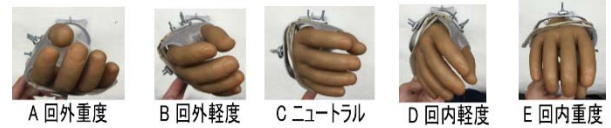


図5 回内外の設定



図6 掌背屈の設定



図7 橈尺屈の設定

7.3.3 実験動作の設定について

動作分析で分類した表1の粗大型運動(握り系-平面系)、巧緻型運動(つまみ系-突起形成系)から、動作出現時間の多かった動作と特徴のある動作を抽出し、表2に示した9種の動作を前腕筋電義手模擬装置での実験動作とした。

表2 実験プロトコル

手指系統	手指動作	肢位	模擬筋電動作
握り系	ペットボトル	立位	机上のペットボトル(500ml)を持ち上げ、飲む
	マウス	座位	マウスを使い、PCの画面上でカーソルを横一往復
	スマホ①	座位	机上のスマホを目線と画面が直角になるように持つ
つまみ系	紙	立位	机上の紙を胸元まで持ち上げる
	ペン	座位	机上のペンを持ち、自分の名前を書く
	箸	座位	箸を用いてブロックを口元まで運ぶ
突起形成系	ボタン	立位	壁にある室内灯の押しボタン式スイッチを押す
	スマホ②	座位	非利き手でスマホを持ち、利き手で画面を3回押す
平面系	タオル	立位	机に垂らした水をタオルで拭く

7.3.4 評価方法

表2の実験動作プロトコルに従い図5~7の肢位ごとに行った実験の動画を、表3に示すような4段階尺度を用いて採点した。

表3 評価表

1	代償動作を必要とせず、動作は可能
2	代償動作を伴うが、動作は可能
3	定義の動作とは異なるが、動作は可能
4	代償動作に関わらず、動作は不可能

3.2.2で説明した分類方法に従って、粗大型動作と巧緻型動作にわけ、それぞれ3動作「回内外グループ」、「掌背屈グループ」、「橈尺屈グループ」の3動作に分け機能の開発優先順位を検討した。



図8 回内重度動作における評価の範囲

回内重度で固定した場合、粗大動作では、室内灯のスイッチをつける際には問題ないが、ペットボトルで飲料水を飲もうとしたときには、代償動作をしても動作完了せず、評価が低い

開発優先度の評価には、図8のような実験動作の違いによる同一肢位内の評価点の差を用いるため、各肢位による実験3回ずつの結果から平均値を算出し、各肢位で得られる平均評価点の範囲を求め、点数として表した。

7.4 結果

図9および図10は、検証実験結果から算出した範囲点を示し、点数が高いほど、その肢位での固定によって動作が困難な場合と動作容易な場合の範囲が広いことを示す。評価点の高い実験動作がある肢位条件は、その動作にとって有用であるが、同一肢位内で評価点が低い動作をすることは困難である。したがって、範囲点数が高い項目ほど、制御を検討しなければならない項目であり、開発優先度が高い動作であることを示す。なお、全ての評価点が低いために範囲点が低い条件は、元来、開発優先順位が低いものである。

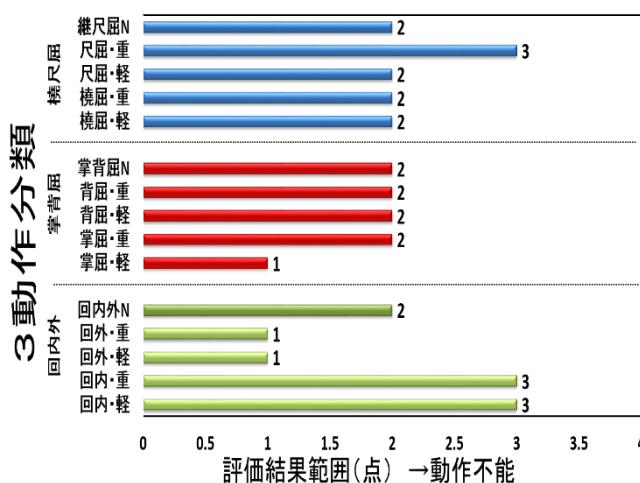


図9 粗大型動作分析結果

結果として、図9に示す粗大型では、回内動作の評価点数の範囲が広く、次に重度の尺屈動作であった。

また、図10に示す巧緻型では、回内外および橈尺屈動作で評価点数の範囲が広がった。

7.5 考察

評価範囲の広い回内動作や尺屈動作では、図10に示すように特定の肢位で固定してしまうと、ある動作は可能だが、ある動作は不可能となりトレードオフの状態となる。

筋電義手開発にあたり、健常者と同様の感覚で義手を操作するためには、代償動作を減らしていく必要があるが、そのためには、トレードオフが生じる動作を減らせる機能を開発する必要がある。

すなわち、回内動作や尺屈動作を筋電義手の筋電センサ信号によって制御することで、代償動作の必要がなくなり、トレードオフが解消することを示唆する。

前段で示した図2および図3は、日常生活動作における動作頻度を示していたが、回内動作と尺屈動作の頻度が高く、今回の動作検証の結果で開発優先順位が高いと考察した機能と整合するものであった。

このことから、筋電義手開発優先度は回内動作および尺屈動作を制御するシステムの開発が必要と考えた。しかしながら、国際的に最も流通しているオットボック社製の筋電義手⁽¹⁹⁻²¹⁾は、前腕回内外を制御できるシステムとして開発・販売されている。そのため、開発優先度としては尺屈動作を制御できるシステムの開発が必要と考察した。

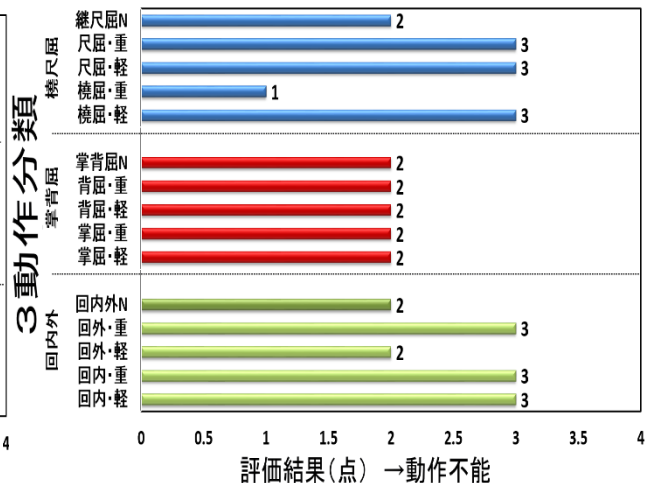


図10 巧緻型動作分析結果

8 結論

本研究では、健常者を対象とした動作分析の結果から、健常者の動作に近づけるための機能の優先順位を検討し、前腕回内外の制御と尺屈動作を手指の動作と連動して行えるシステムの開発を優先すべきであることを明らかにした。

しかしながら、本研究は若年健常者を対象とした分析を主体としたため、小児や高齢者といった幅広い年齢層を見た場合は、一般化した情報とはいえない。また、動作検証の評価基準を定量的にするために、主観による分析ではなく、動作解析ソフトの使用を考慮することとする。また、動作検証では、3動作を組み合わせた条件を追加する予定である。年齢層を考慮に入れた動作分析基礎データの構築を増やすとともに、前腕回内外に特化した筋電義手のシステム開発を行うべきであると思われる。

参考文献

- (1) 厚生労働省, "平成 18 年身体障害児・者実態調査結果", 厚生労働省統計情報・白書, 2008, pp3-22.
- (2) 平井正才, 徳弘昭博, 他, "li-K7-3 片側上肢切断者の就労状況", リハビリテーション医学: 日本リハビリテーション医学会誌, Vol.36, No.12, 1999, p916.
- (3) 梶谷勇, 樋口哲也, "筋電義手開発のための義手に対する意識調査", 電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティクス, Vol. 101, No.130, 2001, pp75-82.
- (4) 沢村誠志, "切断と義肢", 総合リハビリテーション, Vol.5, No.2, 1977, pp154-156.
- (5) 吉川雅博, 田口裕也, 他, "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, 2014, pp456-463.
- (6) 木村隼斗, "3D プリンタが生み出す付加価値と 2 つのものづくり", 塑性と加工, Vol.56, No.649, 2015, pp93-96.
- (7) 榊原久司, "筋電制御 2 自由度前腕義手の開発 (第 2 報)", 電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティクス, Vol.107, No. 154, 2007, pp67-70.
- (8) 神川康久, 前野隆司, "ヒトの把持力分布を模倣した 5 指なじみ機構を有する義手の開発", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.746, 2008, pp2542-2548.
- (9) 赤沢堅造, 滝沢文則, 他, "ヒトの運動制御機構を模擬した義手の制御方式および筋電位処理方式の開発(1 部神経・筋・制御)", バイオメカニズム, Vol.9, 1988, pp43-53.
- (10) 赤澤堅造, 奥野竜平, 他, "アシスティブテクノロジーの現状と未来 動力義手・装具の研究開発の現状と将来", BME, Vol.13, No.2, 1999, pp34-41.
- (11) 木下敏治, 高橋慎弥, 他, "高トルク・軽量な Rc サーボモータを用いた 6 自由度肩義手の開発", 詫間電波工業高等専門学校研究紀要第 35 号, 2007.
- (12) 奥谷弦, 水口徹, "電導ハンド開発のためのデータベース構築に関する研究-成人の"手"の使用状況の分類および割合の検討・第一報-", 北海道科学大学医療工学部義肢装具学科卒業論文要旨集, 2014, pp3-6.
- (13) 宮代信夫, 島貢, "上肢作業能力評価法の評価項目に関する一考察", 日本経営工学会誌, Vol. 33, No.2, 1982, pp115-121.
- (14) 岡田良知, "上肢の動作分析", 総合リハビリテーション, Vol.10, No.2, 1982, pp231-237.
- (15) 長尾竜郎, "日常生活動作における障害手指動作の研究", リハビリテーション医学, Vol.10, No. 2, 1973, pp85-96.
- (16) 田中繁, "義肢装具製作に関わる者のための人間工学 4 義肢装具製作室の配置は合理的?", 日本義肢装具学会誌, Vol.10, No.3, 1994, pp221-229.
- (17) 梅村守, 市川博, "動作・時間分析 サブリンク分析及び Pts 分析を中心として", 理学療法のための運動生理, Vol.8, No.3, 1993, pp159-164.
- (18) 加藤龍, 横井浩史, "筋電義手使用による運動機能再建の評価", 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.8, 2009, pp926-932.
- (19) Castellini, C., van der Smagt, P., "Surface Emg in Advanced Hand Prosthetics", Biological cybernetics, Vol.100, No.1, 2009, pp35-47.
- (20) Northmore-Ball, M., Heger, H., 他, "The Below-Elbow Myo-Electric Prosthesis.A Comparison of the OttoBock Myo-Electric Prosthesis with the Hook and Functional Hand", Journal of Bone & Joint Surgery, British Volume, Vol. 62, No.3, 1980, pp363-367.
- (21) Zecca, M., Micera, S., 他, "Control of Multifunctional Prosthetic Hands by Processing the Electromyographic Signal", Critical Reviews™ in Biomedical Engineering, Vol.30, No.4-6, 2002.