

サイバネティックハンド*

—筋電位信号を用いた義手の開発—

Cybernetic Hand

—Development of Prosthetic Hands Controlled by EMG Signals—

辻 敏夫** 福田 修*** 大賀 誠****

Toshio TSUJI, Osamu FUKUDA and Makoto OHGA

Key words

amputees, electromyographic (EMG) signals, powered prosthetic hands, cybernetics, practical applications

1. 切断者と義手

厚生労働省の平成13年度身体障害児・者実態調査の結果によると、我が国には、不幸にして上肢を切断された方が約10万人存在すると報告されている¹⁾。切断の主な要因は、交通事故や労働災害などであるが、動脈硬化症や糖尿病などに起因した血行障害により切断を余儀なくされるケースも多数ある。義手開発への切断者の期待は高く、過去から現在に至るまで数多くの研究が行われている。

図1に、代表的な義手のイラストを示す。義手はその機能と形態から、装飾義手、作業義手、能動義手の3つに分類することができる。装飾義手は、主に外観を手に似せることを目的としたもので、積極的な機能は持たない。逆に作業義手は外観よりも、特定の作業にできるだけ適するように工夫されたものである。能動義手には、操作者の身体の動きを利用した体内力源型と電力や油圧などを利用した体外力源型がある。図に示すように、体内力源型の義手

では、肩などの動作をワイヤでハンドに伝達しその開閉を行うことができるが、その身体動作には不自然さがともなう。一方、体外力源型の義手は、制御に操作者の身体動作を必要としないというメリットを有する。

体外力源型の義手には、切断者の残存筋から検出した筋電位を制御に利用する筋電義手がある²⁾。この筋電義手の代表は、ドイツのオットボック社の製品であろう³⁾。オットボック社の筋電義手は、大きな把持力を発揮し、ある程度の生活作業を行うことが可能であるが、一方では、関節自由度が少ない、大型で形状が不自然な印象を与えるなどの欠点も残されている。

2. 筋電義手開発の歴史

日本国内の代表的な義肢装具製作所36ヶ所において1年間に作製された義手の種類を分類すると、最も使用されているのは装飾義手であり、切断者の約87%はこのタイプを使用している。その傾向はここ数十年変わっていない。逆に最も使用される割合が少ないのは、体外力源型の筋電義手であり、その割合は1%程度しかない。しかし、興味深いことに、筋電義手を使用してみたいと希望する切断者は76%と比較的多数であり、実用化への強い期待が伺える⁴⁾。このニーズを満たす研究開発は、義手開発に関わる技術者に課せられた責務であると言えよう⁵⁾。



*原稿受付 平成18年12月25日
 **広島大学大学院工学研究科 (広島県東広島市鏡山1-4-1)
 *** (独)産業技術総合研究所 (佐賀県鳥栖市宿町807-1)
 ****広島県立東部工業技術センター (広島県福山市深津町3-2-39)
 辻 敏夫

1985年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年広島大学工学部助手。1994年同助教授を経て、2002年より同大学大学院工学研究科教授。現在に至る。工学博士。人間とロボットの運動制御、生体信号解析、ニューラルネット、ヒューマン・マシン・システムなどに関する研究に従事。日本義肢装具学会論文賞(2000)、計測自動制御学会論文賞(2002)、IEEE 2003 King-Sun Fu Memorial Best Transactions Paper Award(2004)、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門学術業績賞(2004)などを受賞。

福田 修
 2000年広島大学大学院工学研究科博士課程後期修了。博士(工学)。2000年通産省工業技術院機械技術研究所入所。2001年(独)産業技術総合研究所へ転任。2004年広島大学大学院客員助教授。現在に至る。健康福祉機器などの研究に従事。

大賀 誠
 1986年神奈川大学工学部電気工学科卒業。1989年広島県立東部工業技術センター入所。現在に至る。生体信号解析、生体信号を利用したシステム開発などの研究に従事。バイオメカニクス学会、計測自動制御学会、電子情報通信学会などの会員。

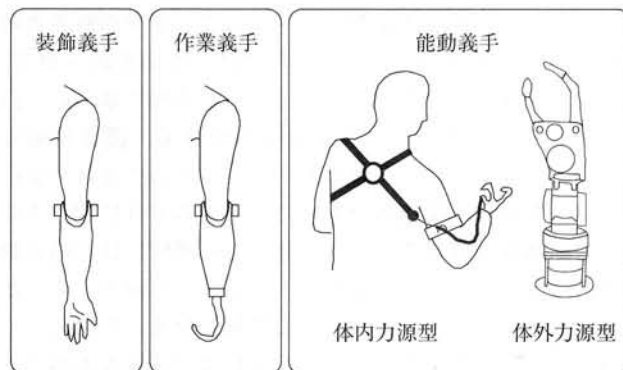


図1 代表的な義手の種類

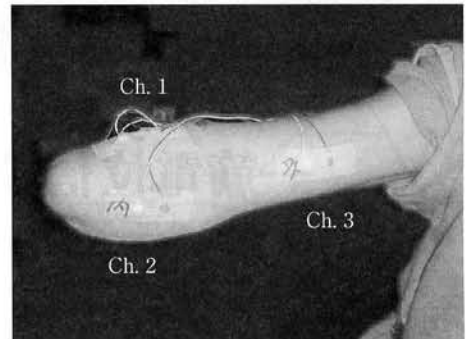
国内における筋電義手の研究開発は、1970年代の後半頃より開始されている。早稲田大学の加藤らは、皮膚表面からの筋電位をパターン識別して、マイクロコンピュータによる制御を行う5指の前腕義手を開発した⁶⁾。西岡は、加藤らが考案した「ワセダハンド」を基本形とし、わが国で初めての前腕用筋電義手「WIMEハンド」を商品化した⁷⁾。このハンドには5指駆動型と3指駆動型が存在し、コスメティックグローブが装着可能であった。また、伊藤らはアクチュエータに静粛性が高く、低速高トルク特性を有する超音波モータを用いた前腕義手を開発した⁸⁾。この義手は手首の回転（回内、回外）、屈伸（掌屈、背屈）、手先の開閉（握り、開き）の6動作が実現可能であった。最近では、奥野らが人の手の運動制御機構を模擬したアナログ制御の義手を試作し⁹⁾、原田らが、5指で23自由度を持つハンドの開発を行っている¹⁰⁾。海外でも、MITのポストンアーム¹¹⁾、ユタ州立大学のユタアーム¹²⁾などの先駆的な試みをはじめ数多くの研究が行われてきた。中国でも各種の筋電義手が実用化されている¹³⁾。

筋電義手の制御には、ニューラルネットワーク¹⁴⁾がよく用いられる。Kellyらは、2種類のニューラルネットワーク（Hopfield Network と Multilayer Perceptron）を用いて、筋電位信号からの動作識別を行った¹⁵⁾。平岩らは、バックプロパゲーション型ニューラルネットワークを用いて、筋電位のスペクトル信号から指の動作や関節角度の識別法を提案した¹⁶⁾。しかしながら、非線形・非定常な筋電位信号をこれらのニューラルネットワークでモデル化するには、大規模なネットワーク構造が必要になったり、学習がローカルミニマムに頻繁に陥ったりするため、実際の制御システムに組み込むことは困難であった。

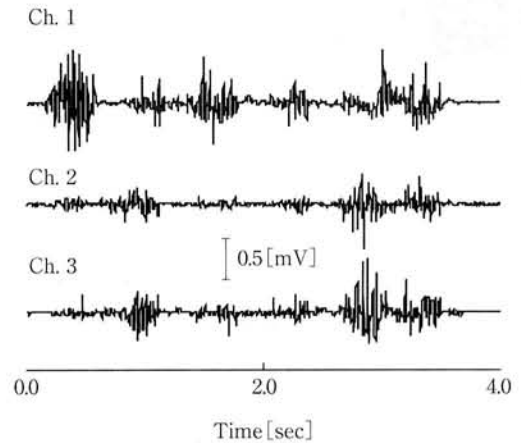
3. サイバネティックインタフェース

切断者が自身の手を動かすような感覚で自由自在に筋電義手を操ることができたら、極めて軽快な操作感が得られるに違いない。著者らの研究グループでは、このような操作感覚の実現を目指し、サイバネティックインタフェースの研究開発をこれまでに進めてきた¹⁷⁾。サイバネティックとは米国の数学者であるN. Wienerが1948年に提唱したサイバネティクス（副題：動物と機械における制御と通信）に由来する¹⁸⁾。

サイバネティックインタフェースでは、まず切断者の残存筋から筋活動を捉え、そこから運動の意図を読み取る。そして、読み取った意図とその時の筋力情報に基づいて自然な動作となるように制御命令を構成する。図2に前腕切断者に電極を装着した様子と、そこから計測された筋電位の一例を示す。切断者の場合でも、このように残存筋における筋活動を捉えることができる。筋電位には、筋活動の量、バランス、タイミング、あるいは筋の硬さ、柔らかさ（機械インピーダンス）などの情報が含まれており、これらを精度良く推定することができれば、筋電義手のインタフェースとして利用することが可能となる。



(a) 前腕切断者に装着した電極



(b) EMGの生波形状

図2 切断者の残存筋から捉えた筋活動

筋電位から切断者の運動の意図を精度良く読み取るために、我々は、筋電位のモデル化に適した既知構造をニューラルネットワークにあらかじめ内包することを提案してきた¹⁹⁾⁻²³⁾。この手法を用いることにより、ニューラルネットワークの学習能力を改善でき、またネットワークの構造決定を容易に行うことが可能となる。独自に構築したニューラルネットワークには、Log-Linearized Gaussian Mixture Network (LLGMN)¹⁹⁾、およびそのリカレントタイプであるRecurrent-LLGMN (R-LLGMN)²⁰⁾がある。LLGMNは統計モデルの一つである混合正規分布モデルを、R-LLGMNは時系列信号のモデル化に有効なHidden Markov Model (HMM)を導入したことにそれぞれ相当する。さらに、LLGMNについては、多変量のデータから主成分を抽出してモデルを行うReduced-Dimension-LLGMN (RD-LLGMN)²¹⁾、LLGMNを階層的に構成し効率よくモデル化を行うHierarchical-LLGMN (H-LLGMN)も開発した²²⁾。LLGMNは時間変化の少ない定常パターンのモデル化に適し、R-LLGMNはダイナミックに時間変化する非定常パターンのモデル化に適する。図3は、これらのニューラルネットワークを利用して筋電位で義手を制御する際の概略図である。ただし、この図の動作識別処理にはR-LLGMNを用いており、筋電位の前処理をせずに、生信号の直接識別を実現している²³⁾。

筋電位から運動の意図が正確に読み取れたとしても、制

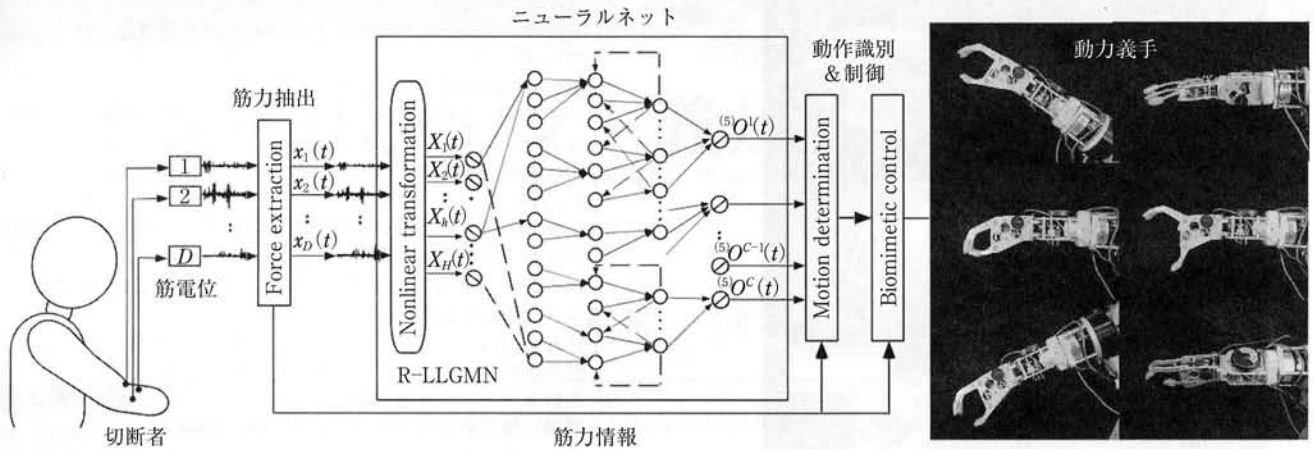


図3 サイバネティックインタフェース

御対象を生物のように滑らかに制御できなければ、操作者の感覚にはある種の違和感が生じるであろう。そこで、対象を制御するには、生体の運動を模倣したバイオメタリック制御を導入する²⁴⁾。人間の巧みな運動の鍵を握るのは関節の機械インピーダンス特性であり、辻らはこれまでに、実際の人間の手首関節のインピーダンス特性を推定することに成功している²⁵⁾。この特性を電動義手の制御に導入したところ、非常に滑らかな制御感覚が得られた。

4. サイバネティックハンドの実用化を目指して

前章で述べたとおり、我々はこれまでに、前腕動作の高精度識別や、人腕を模擬した自然な義手制御について研究してきた。これらは、人の手の優れた機能を、一つひとつ工学的に実現していこうというボトムアップ的なアプローチであった。究極的には人の手の運動をロボットハンドで再現しようという挑戦とも言える。

一方で、筋電義手が人の使う道具である以上、その設計には、デザイン、操作感、耐久性、コストなどといった複雑で複合的な観点に基づいて検討を深めることも重要である。完全なる「人の手」を再現せずとも、切断者の環境条件や嗜好に適合していれば、優れた道具として十分に受け入れられる可能性がある。重要なのは、真に切断者のためとなる実用化、製品化には、ボトムアップとトップダウンの両アプローチが不可欠ということである。我々は、このような考えに基づいて、筋電義手（サイバネティックハンド）の実用化を目指している²⁶⁾。

サイバネティックハンドの機構を検討するに際し、既存の筋電義手に対しての聞き取り調査を国内の医療機関等で実施した。調査は筋電義手の処方実績がある5つの医療機関（リハビリテーションセンター、病院等）および1つの義肢開発メーカーにて実施し、ディスカッション形式で意見を抽出した。そして、この調査の結果を基に、サイバネティックハンドの対象ユーザーを最も割合の高い片側の前腕切断者に絞ることにした。また、ハンド部の設計コンセプトを以下のように決定した。

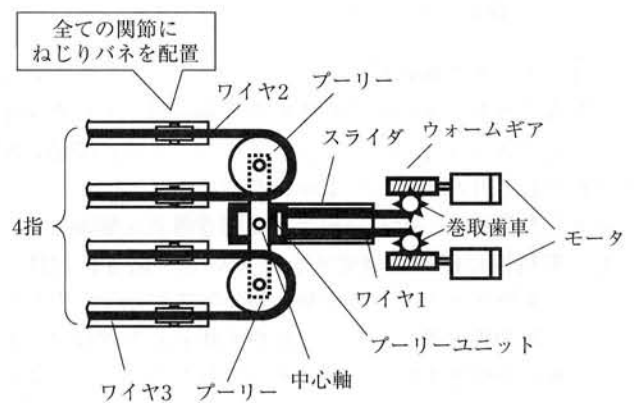


図4 サイバネティックハンドのメカニズム

- 1) 装飾義手と同等な外観
- 2) 人間らしい動作
- 3) 健常手作業を補助する作業性
- 4) 高い耐久性、メンテナンス性

1) の指針から、人間らしい曲線的な外観とするために、市販の装飾義手をベースとした。外観を左右するコスメティックグローブも、意匠性が最も優れている市販のシリコン製カバーを使用した。2)、3) の観点からは、拇指を除く4指のそれぞれに機構的な自由度と柔軟性を持たせた。これにより、対象物を包み込むように安定把握することを可能とした。4) の観点からは、アクチュエータや機構部品を極力排除し、シンプルな構造で耐久性、メンテナンス性の向上を図った。

試作したサイバネティックハンドの指駆動機構を図4に示す。この機構は、拇指以外の4指を動作させるものである。まず、スライダ上に自由に前進後退可能なプーリーユニット（以下ユニット）を配置し、このユニットにワイヤ1をかけて図のように巻取歯車に接続する。4指は、図に示すようにワイヤ2、ワイヤ3を介して接続されており、ワイヤの端は指先に固定されている。2つのプーリーは、ユニット上に配置されており、中心軸の周り（回転方向）でシーソーのように揺動可能である。把持動作を行う



図5 試作したサイバネティックハンド

場合は、モータを駆動し、各ワイヤにテンションをかけて指を屈曲させる。逆に開き動作を行う場合は、モータを逆回転させて各ワイヤのテンションを下げ、4指各関節に配置されたねじりバネの力により指を伸展させる。

提案した機構は、少ない部品と簡単な構造を実現しながらも、実用性に優れた特徴を有している。図5に試作したサイバネティックハンドの動作例を写真で示す。左列の写真は市販の装飾義手に図4の機構を組込んだ試作品、右列の写真は指機構を検証するために試作したマネキン人形の手をベースとした試作品である。サイバネティックハンドは、把持対象物が異径であっても、指が対象物に馴染み確かな把持が可能である(図5②③④)。この動作は、4指間のテンションをうまく調節するワイヤや、揺動可能なユニット上のプーリーにより実現する。ハンドは、把持の完了後にモータが停止しても、巻取歯車がロックして電力を消費することなく把持し続けることが可能である(図5⑤)。この際、各関節のねじりバネの力により安定把握しながらも、ワイヤやプーリーを介して4指のテンションバランスが柔軟に調節される。これにより、外力が加えられてもロバストな把持が実現する。無把持時における指先は、ねじりバネの特性で柔らかい状態となる。障害物に衝突した場合は、ねじりバネが衝撃を吸収し、損傷を回避することができる(図5⑥)。

5. ま と め

本解説では、使用者主体の福祉ロボットを開発するとの観点から、上肢切断者が使用する筋電義手の研究開発について概説した。紙面の都合により表面的な内容となってしまったかもしれないが、多くの参考文献を挙げたので、詳細についてはそちらを参照していただければ幸いである。

参 考 文 献

1) 厚生労働省社会・援護局障害保健福祉部：平成13年度身体障害児・者実態調査結果，<http://www.mhlw.go.jp/houdou/2002/>

08/h0808-2.html.
 2) 東原孝典：今日の筋電義手，日本義肢装具学会誌，17, 4 (2001) 228.
 3) <http://www.ottobock.com>.
 4) 中島咲哉：上肢切断者のリハビリテーションと筋電義手，POアカデミージャーナル，8, 3 (2000).
 5) 川村次郎：筋電義手の普及への展望，日本義肢装具学会誌，17, 4 (2001) 257.
 6) 加藤一郎ほか：電油式多自由度前腕義手(ワセダハンド-9H3)，バイオメカニズム，4 (1978) 139.
 7) 西岡研一：前腕用筋電義手ワイムハンド(WIME HAND)，日本義肢装具学会誌，9, 4 (1993) 347.
 8) 伊藤宏司ほか：超音波モータを用いた3自由度前腕筋電義手，計測自動制御学会論文集，27, 11 (1991) 1281.
 9) 奥野竜平ほか：筋電制御によるバイオミメティック電動義手の開発，電気学会論文集，114, 11 (1994) 1090.
 10) 原田証英ほか：軽量多自由度ロボットハンドの開発，第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集，(1998) 267.
 11) R.B. Jerard, T.W. Willams and C.W. Ohlenbusch: Practical Design of an EMG Controlled Above Elbow Prosthesis, Proc. of Conf. Eng. Devices for Rehabilitation, (1974) 73.
 12) S.C. Jacobson et al.: Development of the Utah Artificial Arm, IEEE Trans. Biomedical Eng., BME-29, 4 (1982) 249.
 13) 鋤園栄一：中国における電動義手の実状，日本義肢装具学会誌，9, 4 (1993) 389.
 14) D.E. Rumelhart, J.L. McClelland and R.J. Williams: Learning Internal Representations by Error propagation, In Parallel Distributed Processing, D.E. Rumelhart, J.L. McClelland and the PDP Research Group (eds), MIT Press, Cambridge, I (1986) 318-362.
 15) M.F. Kelly, P.A. Parker and R.N. Scott: The Application of Neural Network to Myoelectric Signal Analysis: A Preliminary Study, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 37, 3 (1990) 221.
 16) 平岩明, 内田典佳, 下原勝憲, 曽根原登: 筋電操作ハンドの制御のための皮膚表面筋電信号のニューラルネットによる認識, 計測自動制御学会論文集, 30, 2 (1994) 216.
 17) 辻敏夫, 福田修: サイバネティック・インタフェースで人間を支援する, 計測と制御, 45, 5 (2006) 395.
 18) N. Wiener: CYBERNETICS or Control and Communication in the Animal and the Machine, MIT Press, (1948).
 19) T. Tsuji, O. Fukuda, H. Ichinobe and M. Kaneko: A Log-Linearized Gaussian Mixture Network and Its Application to EEG Pattern Classification, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, 29, 1 (1999) 60.
 20) T. Tsuji, N. Bu, M. Kaneko and O. Fukuda: A Recurrent Log-linearized Gaussian Mixture Network, IEEE Transactions on Neural Networks, 14, 2 (2003) 304.
 21) N. Bu and T. Tsuji: Multivariate Pattern Classification Based on Local Discriminant Component Analysis, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, (2004) 290. (CD-ROM)
 22) 岡本勝, 村上樹里, 柴建次, 辻敏夫: 木構造を有する階層型確率ニューラルネットの提案と指形状識別への応用, 計測自動制御学会論文集, 43, 2 (2007) (印刷中).
 23) 福田修, 卜楠, 辻敏夫: 生EMG信号による電動義手の制御, 計測自動制御学会論文集, 40, 11 (2004) 1124.
 24) 辻敏夫, 重吉宏樹, 福田修, 金子真: EMG信号に基づく前腕動力義手のバイオミメチック制御, 日本機械学会論文集, 66, 648, C(2000) 2764.
 25) 辻敏夫, 森谷正三, 金子真, 伊藤宏司: 等尺性筋収縮における人間の手先インピーダンスの解析, 計測自動制御学会論文集, 32, 2 (1996) 271.
 26) 大賀誠, 永田可彦, 大塚彰, 守安浩志, 追坂則弘, 池田喜一, 中川昭夫, 陳隆明, 辻敏夫: 柔らかい指機構を有する能動装飾義手の試作, 第27回バイオメカニズム学術講演会予稿集, (2006) 153.