

電動義手 日本元年を迎えて
5 指駆動型筋電義手と筋シナジーモデルに基づく制御法

辻 敏 夫 芝 軒 太 郎 島 圭 介 高 木 健
大 塚 彰 陳 隆 明

電動義手 日本元年を迎えて

5 指駆動型筋電義手と筋シナジーモデルに基づく制御法

辻 敏 夫¹⁾ 芝 軒 太 郎¹⁾ 島 圭 介¹⁾ 高 木 健¹⁾
大 塚 彰²⁾ 陳 隆 明³⁾

キーワード 電動義手, 筋電制御, 筋シナジー

1. はじめに

電動義手の登場とともに、体内力源式の能動義手に比べて機能性が高く、また直感的な操作が可能な筋電義手の実用化が期待され、現在までさまざまな研究開発が行われてきた。しかしながら、人腕に匹敵するような筋電義手を開発するためには、装飾性、操作性、機能性、保守性、安全性といった多く要件を同時に満足する必要があり、現在の工学技術を駆使しても、これらのすべてを備えた筋電義手を実現することは容易ではない。

一方、家庭や職場での日常的な使用を考えると、機能性よりも耐久性が高く、保守性に優れた義手が要望されることが多い。これは義手を補助肢として用いることを想定し、機能性よりも耐久性・保守性を重視する傾向が強いためであるが、別の見方をすれば、実現可能な動作や作業が限定されてしまい、随意運動に必要な機能性が犠牲になっているということでもある。切断者のQOL (Quality of life) やADL (Activities of daily living) をより向上するためには、実用性や安全性、装飾性に関する研究に加えて、新しい機能や制御法などを組み込んだ高機能筋電義手に関する基礎研究を十分に推進しておく必要がある。

本稿では、筋電義手の高機能化を目指したこれまでの研究を簡単に紹介するとともに、著者らの研究グループで現在開発中の5指駆動型筋電義手とその制御法について概説する。そして、高い機能性と操作性を実現するには、ハードウェアとソフトウェアによる相補的な工夫が重要であることを示す。

2. 高機能化を志向した筋電義手

筋電義手に関する研究は、加藤らのワセダハンド¹⁾、MITのボストンアーム²⁾、ユタ州立大学のユタアーム³⁾などによってその基礎技術が確立され、近年ではロボット技術の発展に伴い、より高い機能性を追求した多機能義手の研究開発が盛んに行われている⁴⁻¹³⁾。

たとえば、Takedaらの空気圧アクチュエータを用いた義手⁴⁾や、Yamanoらの超音波モータを用いた義手⁵⁾、CarrozzaらのCyberHand⁶⁾は多指を独立して制御することが可能である。また、Kamikawaらの義手はピンボールからペットボトルまでさまざまな物体の形状に合わせた把持を可能としている⁷⁾。Kamikawaらの義手では劣駆動機構を導入することで、少ないアクチュエータ

A novel five-fingered myoelectric prosthetic hand and its muscle synergy-based control

1) 広島大学大学院工学研究科 〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1

Graduate School of Engineering, Hiroshima University

1-4-1 Kagamiyama, Higashi-hiroshima-shi, Hiroshima, 739-8527 Japan

Toshio TSUJI (研究職), Taro SHIBANOKI (研究職), Keisuke SHIMA (研究職), Takeshi TAKAKI (研究職)

2) 県立広島大学保健福祉学部

Akira OTSUKA (理学療法士)

3) 兵庫県立総合リハビリテーションセンター

Takaaki CHIN (医師)

で5指を駆動し、物体に合わせた把持と素早い動作、力強さの両立を目指している。このほかにも同様の機構を用いた義手がいくつか開発されている⁶⁻¹²⁾。

一方、義手のハードウェアが高機能化するにつれて、筋電位によって義手を随意的に操作することが困難となり、筋電制御に関するソフトウェア研究の重要性が高まっている。たとえばYangらは親指、示指、中指の屈曲・伸展動作をSVMを用いて識別し、開発した義手の制御を行った¹¹⁾。またZhaoら、加藤らは、筋電位信号から周波数成分を抽出し、指の屈曲・伸展動作を含む手の動作を識別し、5指ハンドを制御している^{12,13)}。しかしながら、これらの方法では操作対象とするすべての動作を事前に学習しておく必要があり、義手が高機能化するにつれて学習しておかなければならない動作数が増加し、学習の負担が増大してしまう。また、切断者の意図した動作が識別できずとも、その動作を自らの手のように滑らかに操作できなければ違和感を生じてしまう。

これらの問題に対して著者らの研究グループでは、5指を独立して制御することが可能で俊敏さと力強さを兼ね備えた義手のハードウェアを開発するとともに、筋電位による新しい制御ソフトウェアの研究を進めてきた^{14,15)}。次節では、開発した義手の機構と筋シナジー、筋インピーダンスの概念を応用した筋電制御法について説明する。

3. 5指駆動型筋電義手^{14,15)}

図1に開発した義手の外観を示す。義手のサイ

ズは成人男性の手と比較してわずかに小さい程度で、約398gと軽量である。示指から小指までの4指に張られたワイヤを引っ張ることで各指を独立に駆動でき、対象物の形状に応じた把持が可能である。母指は4指に対向するように配置しており、指の位置を調整することも可能である。また本義手では、この原理を応用した把持力増大機構(図2)を屈曲機構とは独立に構成することで、指の素早い屈曲と力強い把持を同時に実現している¹⁴⁾。さらに、義手手首部に備えられたモータにより、掌背屈動作を指動作と並列的に実行することも可能である。

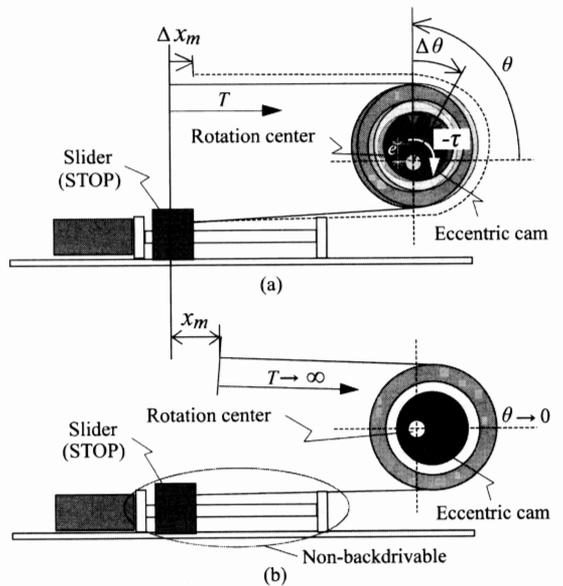


図2 把持力増大機構¹⁴⁾

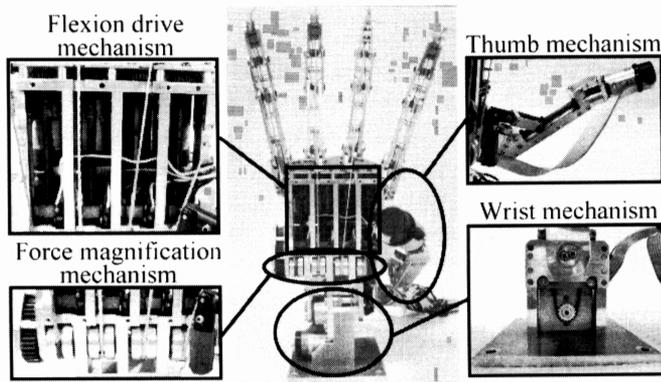


図1 5指駆動型筋電義手

4. 筋シナジーモデルに基づく5指駆動型筋電義手制御法^{15,16)}

高機能な5指義手を表面筋電位によって制御するためには、計測した筋電位から操作者の意図した動作を正確に推定し、駆動力を比例的に制御する必要がある。しかしながら、5指全体の動作数はかなりの数となるため、すべての動作に対応した筋電位を事前に計測し、学習的に識別・制御を行うことは容易ではない。

そこで、著者らは5指動作を構成する基本動作を筋シナジー（筋の活動を調整する構成単位¹⁷⁾）として捉え、筋シナジーの組み合わせにより多様な5指の複合動作の制御を行うことが可能な新しい筋電制御法を提案している¹⁶⁾。

図3に制御システムの構成を示す。以下、このシステムの詳細について説明する¹⁵⁾。

4-1 特徴抽出部

まず L 対の電極から測定した筋電位信号をチャンネル毎に全波整流し、2次デジタルパワースフィルタにより平滑化する。このとき得られる時系列信号を $E_l(t)$ ($l=1, 2, \dots, L$)とする。そして $E_l(t)$ に対して全 L チャンネルの和が1となるよう正規化を行い、動作識別に用いる時系列筋電パターン $\mathbf{u}(t)=[u_1(t), u_2(t), \dots, u_L(t)]^T \in \mathbb{R}^L$ を求める。また $E_l(t)$ の全チャンネルの平均値を筋力情報 $F_{EMG}(t)$ と定義し、動作発生判定と関節トルク制御に用いる。

4-2 筋シナジー抽出部

ここでは「人間の複雑な動作は複数の基本動作

（筋シナジー）の組み合わせによって表現できる」という考えに基づき、時系列筋電パターン $\mathbf{u}(t)$ に含まれる筋シナジーを抽出する。操作者の意図した動作に対応する筋シナジーパターン $\hat{\mathbf{u}}(t) \in \mathbb{C}$ (C :基本動作数)は、その動作に各基本動作がどのような割合で含まれているかという情報を表現しており、基本動作時の時系列筋電パターンを正規直交変換する関数 $F(\cdot)$ により抽出可能である¹⁶⁾。正規直交変換関数にはTsujiらによって提案されたリカレントニューラルネットワーク (Recurrent Log-Linearized Gaussian Mixture Network: R-LLGMN)¹⁸⁾を用いる。R-LLGMNは混合正規分布モデルと隠れマルコフモデルを内包しており、操作者の動作の時系列特性を考慮した学習が可能である。R-LLGMNを利用して操作者の筋電位と基本動作（筋シナジー）の関係を事前に学習しておくことで、操作者の筋電位からその運動に含まれるすべての基本動作を抽出することが可能となり、基本動作を組み合わせたさまざまな複合動作を識別することが可能となる¹⁶⁾。

4-3 動作発生モデル部

操作者の動作は複数の基本動作が時系列的に折り重なって発生することによって表現されるが、動作間の遷移可能性を事前にモデル化しておくことで動作識別の安定性を向上させることができる。ここでは、動作間の遷移を事象駆動型モデル¹⁹⁾で表現し、現在の動作 m から次に遷移するであろう動作 $1, 2, \dots, G$ (G :識別対象とする全動作数)への事前遷移確率ベクトル $\boldsymbol{\gamma}_m=[\gamma_{m1}, \gamma_{m2}, \dots, \gamma_{mG}]^T$ を動作決定部へ出力する。

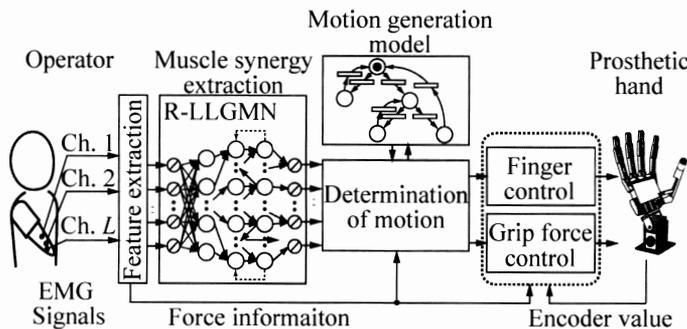


図3 5指駆動型筋電義手システム¹⁵⁾

4-4 動作決定部

動作決定部では、筋シナジーパターン $\hat{\mathbf{u}}(t)$ 、および事前遷移確率ベクトル γ_m により操作者が意図した動作を決定する。まず、操作者の筋電位から求めた筋シナジーパターン $\hat{\mathbf{u}}(t)$ と事前に設定した動作 g に対する基準パターン $\hat{\mathbf{u}}^{(g)}$ との類似度 $S_g(t)$ を求める。この $S_g(t)$ と事前遷移確率 γ_{mg} を掛け合わせた修正後の類似度が最も高くなる動作を操作者の動作として決定する。以上より、筋シナジーと動作間の推移可能性を考慮した識別が可能となる。

4-5 義手制御部

筋電位信号から操作者が意図した動作を正確に推定できたとしても、義手を自らの手のように滑らかに制御できなければ違和感を生じてしまう。そこで、義手の制御には人腕のインピーダンスモ

デル²⁰⁾を導入したバイオミメティック制御を採用することで人間に近い滑らかな運動を可能としている。自由運動中はこのバイオミメティック制御法により屈曲機構を制御し各指を開閉する。義手に取り付けたエンコーダによって物体把持を検知した後は、把持力増大機構の制御に切り替える。把持力増大機構は筋電位から算出した筋収縮レベルに応じた把持力を発生することができ、操作者の力の入れ具合に応じて義手の把持力を直感的に制御することができる。

5. 制御例

図4に開発した5指駆動型筋電義手の制御風景を示す。被験者は筋電位による機器操作経験のある健常男子大学生で、右前腕部に8対の電極を装着した。事前学習が必要な基本動作は各指の屈曲(薬指と小指は同時に屈曲するものとした)、およ

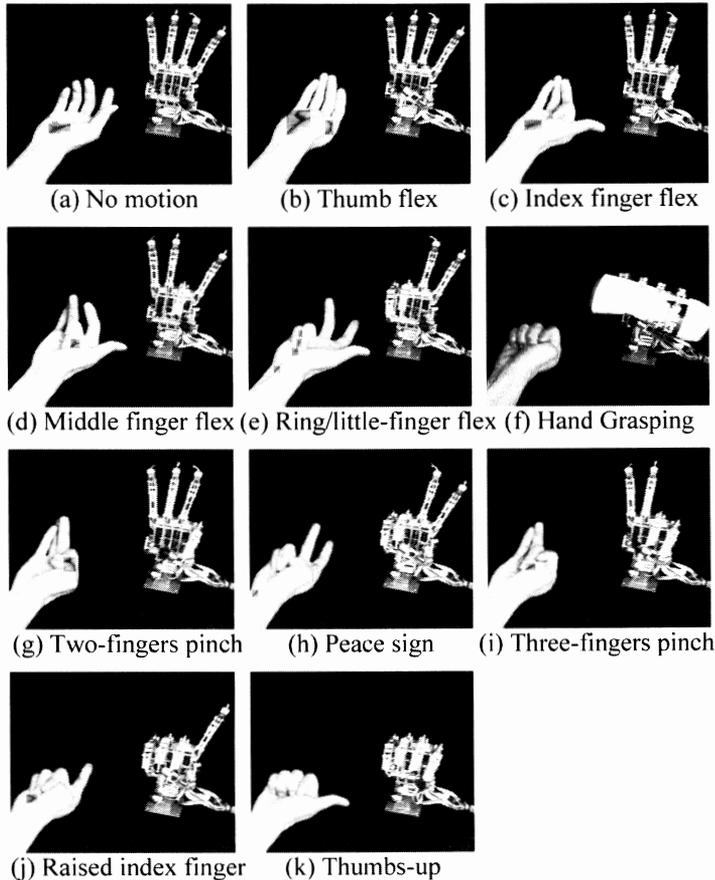


図4 5指駆動型筋電義手の制御風景

び握りの5動作，識別可能な動作は日常生活において使用頻度が高いと考えられる10動作（基本動作5動作，複合動作5動作）とした。識別対象とした複合動作は，2本指，3本指でのつまみ，ピースサイン，示指を立てる動作，グッドサインである。図4より，被験者の各指の運動に応じて義手の各指が動作していることがわかる。また，筋収縮レベルにより把持力を制御することで，アルミニウム缶を握りつぶすことにも成功した（図4(f)）。

図5に制御結果の1例を示す。図は上から筋電位信号，筋力情報，筋収縮レベル，動作識別結果，各モータのエンコーダ値であり，陰影部分は筋力情報から判定した動作発生区間を表す。義手操作開始後約16秒後に缶を手渡された後（破線参照），把持動作を行うことで各指を駆動している。そして，18秒付近でモータが停止しすべての指が缶に接触したことを検知すると把持力制御に切り替え，筋収縮レベルに比例した把持力制御が行われている。本稿で紹介した筋電制御法により，5指

動作を随意的に制御可能であることがわかる。

6. まとめ

本稿では筋電義手の高機能化への試みとして，著者らの研究グループで開発中の俊敏さと力強さを備えた5指駆動型筋電義手と，筋シナジーを利用した筋電制御法について述べた。もちろん，切断者が日常的に使用可能なレベルにまで完成度を高めるためには，機能性・操作性をさらに改善するだけでなく，装飾性や保守性等の実用性を考慮していかなければならない。そのためには療法士や装具士の方々との連携を強化しながら，機能性と実用性の融合をより深く追求していく必要がある。

筋電義手という機械の制御を人間自身が行うことを考えれば，人間と機械の特徴を十分に把握し，先端的な工学技術を活かしたハードウェアと生体が有する優れた機能との親和性を備えたソフトウェアの両面から，機能性・実用性にアプローチしていくことが必要である。そして，ハードウェアとソフトウェアを相補的に活用することで機能性と実用性を同時に実現していくことができれば，人間にとって真に使いやすい筋電義手が実現できるのではないだろうか。

文献

- 1) 加藤一郎ほか：圧力感覚を持つ上腕電子義手；ワセダハンド-5，バイオメカニズム，196-206，1972
- 2) Jerard, R.B., et al. : Practical design of an EMG controlled above elbow prosthesis, Proc. of Conf. Eng. Devices for Rehabilitation, 73-77, 1974
- 3) Jacobson, S.C., et al. : Development of the Utah artificial arm, IEEE Trans. Biomed. Eng., 29 (4) : 249-269, 1982
- 4) Takeda, H., et al. : Development of prosthetic arm with pneumatic prosthetic hand and tendon-driven wrist, Annual Intl. Conf. of the IEEE EMBS, 5048-5051, 2009
- 5) Yamano, I., et al. : Five-fingered robot hand using ultrasonic motors and elastic elements, Proc. Intl. Conf. on Robotics and Automation, 2684-2689, 2005

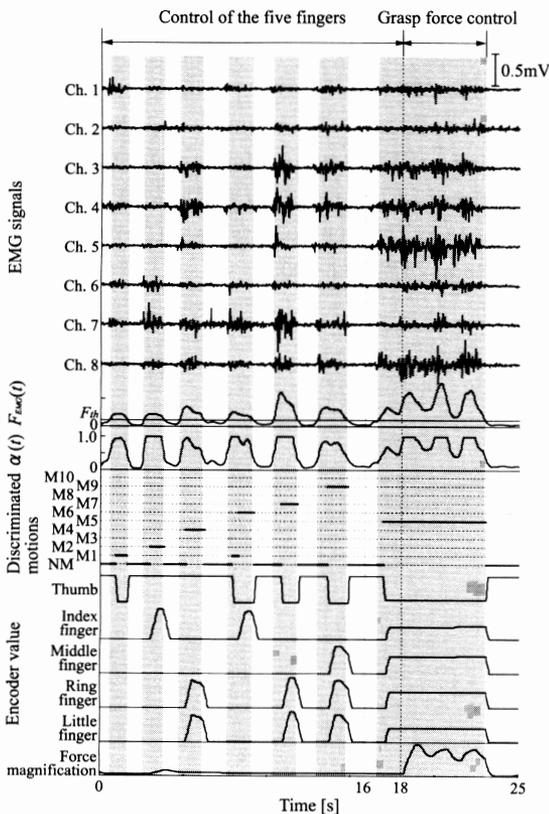


図5 制御結果の1例

- 6) Carrozza, M.C., et al. : Design of a cybernetic hand for perception and action, *Biol. Cybernet.*, 95 (6) : 629-644, 2006
- 7) Kamikawa, Y., et al. : Underactuated five-finger prosthetic hand inspired by grasping force distribution of humans, *Proc. IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 717-722, 2008
- 8) Fite, K.B., et al. : Liquid-fueled actuation for an anthropomorphic upper extremity prosthesis, *Proc. of the 28th IEEE EMBS Annual Intl. Conf.*, 5638-5642, 2006
- 9) Zhao, D.W., et al. : Development of a multi-DOF anthropomorphic prosthetic hand, *Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Biomimetics*, 878-883, 2006
- 10) Wiste, T.E., et al. : Design of a multifunctional anthropomorphic prosthetic hand with extrinsic actuation, *IEEE Intl. Conf. on Rehabilitation Robotics*, 675-681, 2009
- 11) Yang, D., et al. : An anthropomorphic robot hand developed based on underactuated mechanism and controlled by EMG signals, *J. Bionic Eng.*, 6 : 255-263, 2009
- 12) Zhao, J., et al. : A five fingered underactuated prosthetic hand control scheme, *IEEE Intl. Conf. on Mechatronics and Automation*, 1453-1458, 2006
- 13) 加藤 龍ほか：適応機能を有する運動意図推定システム—高機能ロボットハンドと日常生活支援—, *人工知能学会誌*, 23 (3) : 326-333, 2008
- 14) 島 圭介ほか：把持力増大機構を有する5指駆動型義手の筋電制御, 第3回義手を語る会・抄録集, 7-10, 2009
- 15) 辻 敏夫ほか：5指駆動型筋電義手と筋シナジーに基づく新しい制御法, 第25回日本義肢装具学会学術大会講演集, 58, 2009
- 16) 辻 敏夫ほか：筋シナジーに基づく複合動作のパターン識別, *日本ロボット学会誌*, 28 (5), 印刷中
- 17) d'Avella, A., et al. : Combinations of muscle synergies in the construction of a natural motor behavior, *Nat. Neurosci.*, 6 (3) : 300-308, 2003.
- 18) Tsuji, T., et al. : A recurrent log-linearized Gaussian mixture network, *Proc. of the IEEE Trans. on Neural Networks*, 14 (2) : 304-316, 2003
- 19) 辻 敏夫ほか：事象駆動型作業モデルを利用したEMG信号のパターン識別, *日本ロボット学会誌*, 20 (7) : 771-777, 2002
- 20) Tsuji, T., et al. : Bio-mimetic impedance control of an EMG-controlled prosthetic hand, *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 377-382, 2000