解　説

筋電制御型の義手

横井浩史[1†]，矢吹佳子[1]，關　達也[1]，中村達弘[1]，森下壮一郎[1]，加藤　龍[1]，
高木岳彦[2]，高山真一郎[2]
[1]電気通信大学，[2]国立成育医療研究センター

要旨：筋電は，筋収縮を促す神経信号の一種であり，筋膜上を伝搬する電位の波である．近年，筋電を用いてロボットを制御するような応用研究が盛んに行われるようになってきており，電気・電子工学や情報・通信工学，機械・ロボット工学などの分野で大きな進歩を見せている．また，医学と工学の連携も進みつつあり，運動と感覚の機能再建に向けた最先端技術の応用研究も現実味を帯びてきた．本論は，筋電位を入力信号として用いた義手開発の現状について，多自由度の制御に関するトピックスを中心として最新の研究成果をまとめた．

キーワード：個性適応型制御，筋電制御，義手，五本指のロボットハンド

1. はじめに

筋電位は，筋膜表面に生じる筋放電現象を電圧として計測したものであり，筋活動と関係性の強い電気的活動である．この性質を用いて，身体の運動状態を電気生理的信号として取り出す多くの方法が開発されてきており，運動意図を伝達することのできる機械と人のインターフェースとして注目されている．その応用範囲は多岐にわたり，筋電義手から始まり，今や車椅子やパワースーツなど，様々な外部の動力機器の制御信号として研究が進みつつある．

筋電義手が研究対象として重要な位置づけとなる主たる理由は，上肢機能が脳機能の主要な表出手段であり，知的作業のほぼすべてを担うため，この機能を人工物で代用する技術を確立することに，科学技術としての興味とともに，知能化技術分野の社会貢献としての最大の意義があるからである．

筋電位を用いた制御（以降，筋電制御）の方式は，その応用によって閾値判別（筋電スイッチ），比例制御，特長パターン識別など，3 種類程度に分類される．本論では，これら 3 種に分類して詳述するとともに，筋電義手開発に関する最新の研究動向について述べる．

2. 知能と手指機能

上肢は，脳機能の主要な表出手段であり，人の知能活動のほとんどを実現しており，生活を行うための重要な器官である．この節では，知能と手指の関係について述べる．Rolf Pfeifer がその著書「How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence[1)]」において述べているように，知能は「定義できない」．その主たる理由は，知能の発現が，その実施主体によって，知的に見えたり見えなかったりすることに起因する．これは，例えば全く同じ作業を行ったとしても，乳幼児が行っているか，それとも，大人が行っているかによって，見え方が異なるところにある．すなわち，その行為そのものが知的であるか否かは，その行為を見ている観察者の主観に依存して変わるところに難しさがある．しかしながら，工学的には，実施主体を健康で一般的な成人という仮想的な存在を造りだすことによって，無理やり基準を作りながら行為の知性を階層的に並べる努力を行ってきた．ここでは，上肢を人工的なロボットにより造りだすことを想定して，上肢機能に求められる機能について整理してみる．

上肢機能をロボットで実現する研究はその難しさを如実に表す一例であるが，上肢ロボットは，最も知的な作業を必要とされるロボットであり，非常に大きな自由度を有するハンド部と，体を支えることのできる強靭なアーム，精密な位置・速度のコントロールや物体の操りができる制御系，鋭敏な感覚・認識能力を持つ感覚系，これらを統括する意思決定系により構成され，これらを用いて，知的活動を支えている．

人の上肢の役割を階層的に表現すると，A）日常生活機能，B）専門的技能，C）コミュニケーション能力，D）芸術性の発露の大まかに 4 段階があり，表 1 にまとめる．

A）日常生活動作（Activity of daily living/ ADL）

日常生活動作は，人間の生活行為を構成する最も基礎的な要素であり，ADL 評価法を用いて人の日常的な活動能力を客観的に評価される．ADL には，食事，更衣，整容，移動，排泄，入浴が属し，さらにその上位機能として，拡大 ADL として，食事の支度，洗濯，掃除，電話対応，家計管理，留守番，買い物，交通手段の利用，自動車の運転，生き甲斐，社会生活活動（趣味，気晴らし，仕事）などが位置づけられている．

2013 年 9 月 30 日受付
† 〒 182-8585　東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
国立大学法人電気通信大学
横井 浩史
Tel: 042-443-5403　Fax: 042-443-5913
E-mail: yokoi@mce.uec.ac.jp

医療現場で用いられる ADL 評価方法には，Barthel Index（B.I.）と日常生活機能評価表，Functional Independence Measure（FIM）があり，また，介護現場で用いられる ADL 評価方法には，要介護認定調査項目分類（動作関連，食事関連，排泄関連，IADL）などとして定義されている．

B）技能

技能とは，経済活動を支える専門的な技術を実践する能力を意味し，社会的活動の中で競争的に獲得される能力である．その能力を客観的に評価する指標としては，厚生労働省が主管する技能検定が用意されており，技能検定とは，技能の習得レベルを評価する国家資格であり，技能検定職種（職業能力開発促進法施行令）として定義されている．その範囲は，園芸，金属加工，電子・電気，など 114 職種に分類されている．技能を実践するためには，特殊な工具や道具などを巧みに用いる知能が必要であり，道具との一体化（身体の延長）を行う Body Image と道具と身体の運動と感覚フィードバックを統括する Body Schema を獲得する必要がある．

C）コミュニケーション

コミュニケーションとは，辞書的な意味づけとしては，知覚・感情・思考の伝達とされており，主に，「情報の伝達」と「情動や思考の伝達」をその目的とする．情報の伝達には，手旗信号，ジェスチャー，野球のサインなど，いわゆる身振り手振りが用いられ，一方，情動や思考の伝達には，握手，手をつなぐ，ハグなど意思の疎通と信頼感の伝達を行う手段として用いられる．また，ビジネスにおいては，営利目的で動く複数のグループ間において，互いの交渉を有利に進める手段として用いられる．

D）芸術性（楽器演奏，感性の表出）

文部科学省の分類では，「芸術」，「デザイン」，「音楽」の 3 種類に分類され，料理，習字，絵画，陶芸，音楽，着付けなど，およそ人が感じるすべての「美しさ」「醜さ」「楽しさ」「悲しさ」の極限的な情動を表現することに対応する．

3．人の手指機能の発達

義手の必要性については，前述の機能分類に基づいて，福祉行政の範囲内で取り扱われており，日常生活動作と技能の範囲において，その必要性が論じられてきた．これは，これまでの筋電義手が機能的に大きく制限されており，物を押さえるための補助手としての機能が中心であり，主なる手としての機能が評価されてこなかった．しかしながら，芸術のレベルまでを対象とすると，義手に求められる手の本来の機能にまで範囲を広げて考慮する必要がある．

手の制御を獲得する年齢は，2 歳から 6 歳と言われており，物体操り時の握力と加速度を計測したデータにも，その結果が表れている．Forssberg, H. らの調査[2]によれば，上肢の筋力は年齢に準じて単調に増加するのに対して，手先の加速度は，6 歳から 8 歳を境に大きく減弱されている．これは，6 歳ぐらいの年齢において，人は手先を制御する能力を獲得し，手先の加速度を目的に応じて調整することが可能になっていることが推定される．すなわち，手の機能を獲得する年齢には制限が有り，適切な年齢にトレーニングを行う必要がある．

また，上肢欠損の乳幼児に対する筋電義手の処方，製作，および訓練システムの研究生活についての実用的な調査結果が，兵庫県立総合リハビリテーションセンターの報告[3]としてまとめられている．筋電義手は，ドイツオットーボック社の小児用筋電義手部品を用いて製作していること，最軽量の手先部品は，86[g] であること，および，ソケット部

表 1　手指機能の分類と階層性

種類	内容	資格・評価法	ロボットの分類
芸術	**美術，デザイン，音楽**	**文部科学省　学科系統分類**	未開発
コミュニケーション（Communication）	**知覚・感情・思考の伝達** 情報の伝達（手旗信号，ジェスチャー） 情動・思考の伝達（握手，ハグ） ビジネス：交渉を有利に進める手段	**文部科学省　学科系統分類**	**コミュニケーションロボット** **エンターテイメントロボット**
技能（Skill）	**技能検定：** 園芸，金属加工，電子・電気，製造・整備，縫製，木工・陶器，食品，建築・土木，分析，彫金・装飾	**厚生労働省　技能検定職種**（職業能力開発促進法施令）	**産業用ロボット**（溶接，塗装，研磨，入出荷，作業支援，組み立て，多目的） **非産業用ロボット**（警備，掃除，災害対応，探査，海洋，原子力，宇宙，建設）
日常生活動作（Activities of daily living）	ADL：食事，更衣，整容，移動，排泄，入浴 **拡大ADL**：食事の支度，洗濯，掃除，電話対応，家計管理，留守番，買い物，交通手段の利用，自動車の運転，生き甲斐，社会生活活動（趣味，気晴らし，仕事）	**医療現場のADL評価法** （Barthel Index，日常生活機能評価表（回復期リハビリテーション），Functional Independence Measure FIM） **介護現場のADL評価法**（要介護認定調査項目分類（認定調査員）動作関連，食事関連，排泄関連，IADL など）	**医療・福祉ロボット**

に引き布用の穴や汗吸収用のパッドの採用，肘部の完全屈曲や過伸展を防止する措置などを施したことなど，筋電制御のための電極は 1[ch]，随意開き（自動閉じ式）を採用したことなどが述べられている．また，訓練（遊び方）に高度な工夫を施すことにより，1 か月に及ぶ長期の訓練を可能とし，両手動作を習得したり，物体を握ったり離したりすることを随意で実現できるようになることなどが述べられている．

しかしながら，手先を失う事故には，年齢の別はなく，様々な年齢層の方が筋電義手を利用できるような技術環境を整備する必要がある．一方，感覚の適応には年齢制限がない．これまでの我々の行った触覚フィードバック付の筋電義手開発の研究において，触覚の感覚は，必ずしも手指や腕の位置にフィードバックする必要はなく，腹部の表面にフィードバックしたとしても，数分のトレーニングにより，腹部の感覚を手指の感覚として代用できること，脳の感覚野の反応としても手先の位置に対応する部位の賦活として計測されることを明らかにしてきた[4]．

また，筋電義手を用いたキャッチボールの実験では，感覚フォードバックに伴う運動と感覚の認識に関する性質が明らかとなっている．実験では，キャッチボールによりボールを把握したことにより生じる感覚フィードバックを，表面電気刺激を用いて，ボールと義手の接触状態をフィードバックした．ボールと義手が接触した時刻をゼロとして，電気刺激タイミングを数百ミリ秒ずつ遅らせて提示した．その結果，500[ms] の時間遅れを境として，自己の運動と感覚の関係性の有無に対する判断が分かれることが明らかとなっている．すなわち，500[ms] 以下の時間遅れでは，健常手によりボールをキャッチした時と同様に，運動野と感覚野のみに賦活がみられるのに対して，500[ms] を超える時間遅れでは，運動野と感覚野以外にも頭頂連合野，前頭前野など様々な部分で不安定な賦活がみられることが明らかとなった．これらの結果から，運動に伴う感覚フィードバックのタイミングをコントロールすることにより，自己所有感（オーナーシップ）を制御することが可能であり，運動系の適応年齢を引き上げる可能性が残されていると考えられる．

また，筋電義手を用いたキャッチボールの実験において，明らかとなった性質感覚フィードバックは，500[ms] の時間遅れを境にして，自己の運動とこれに伴って発生する感覚の関係性の有無を判断することが明らかとなっている．

4. 筋電制御とセンサー

筋電位を用いた制御（以降，筋電制御）の方式は，その応用によって 3 種類程度に分類される（図 1）．この節では，これら 3 種に分類して，現状の研究動向について述べる．

A）閾値判別と符号化

筋電位を閾値処理することによって，入力の有無を判別するスイッチとしての機能を持たせたもの．リアルタイム性はないが，簡単な電子回路により，非常に多くの種類を判別できる機能を有する．代表的な研究としては，筋電スイッチ，筋電キーボードなどがある．

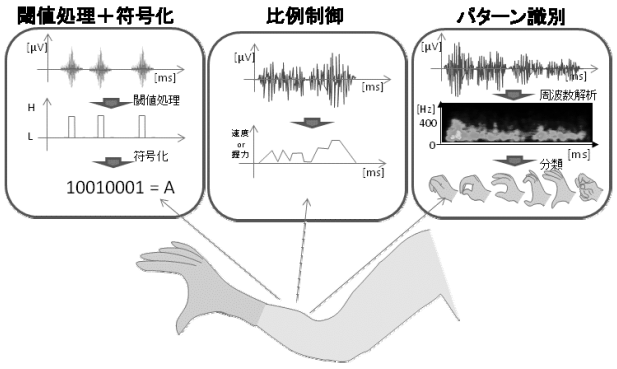


図 1　筋電制御の種類

筋電スイッチは，伝統的な筋電義手の開閉動作を制御することに用いられており，伸筋群と屈筋群の差を閾値処理して，義手先端の開動作または閉動作を決定する．この他，近年では，MIT 出身のベンチャー企業 Thalmic 社の MYO が興味深い．この製品は，2014 年度に販売開始予定の製品であるが，ホームページ上でインベンターを募集している．製品の性能は，9[ch] 筋電センサシステム，6 種類の前腕のジェスチャを識別可能，価格も 149 ドルと安価であり，筋電義手への応用可能性が高い．

筋電キーボード[5]は，筋電位を用いて，キーボードの役割を代用することを目指した研究である．筋電キーボードでは，筋電位信号の有無の（0/1）列を用いてモールス信号に類似した時間的なオンオフのパターンを造りだし，そのパターンをキーの配置に割り当てることにより，キーの選択を可能とする方法である．一般のキーボードは，100 個程度のキーがあるため，これを筋電位信号の 0/1 列のビット長で表現するには，7 ビット以上が必要となる．すなわち，この方法の問題点は，一つのキーを指定するためには，7 回以上の筋の収縮と弛緩を繰り返す必要があり，2 秒程度の時間が必要となるため，リアルタイム制御には向かない．

B）比例制御

比例制御とは，筋電位信号の振幅に比例して速度や力を対応させる方法であり，運動意図を直接反映するため，リアルタイム制御を可能とし，さらに，もっとも直感的な制御方法である．筋電義手の手先具の開閉スピードの調整に応用した事例があり，筋電位信号の振幅強度と義手手先具のモータ回転速度を対応づけている．筋電位信号は，解剖学的に知られている伸筋群および屈筋群の直上付近から，2 個の筋電位センサーにより取得し，それらの信号の差分をとることにより取得している．この方法を拡張することにより，複数の筋群の活動を個別に計測して，手指の関節運動に関連付ける研究なども行われている．この方法の問題

点は，筋電位信号の振幅と筋の収縮強度には，相応の関係があることが知られているが，筋疲労やセンサと筋の接触状態によって，様々に変化するところにある．すなわち，筋疲労の影響を受けやすいため，長時間にわたり筋を収縮させているような筋電義手の利用には不向きである．

C）波形特徴パターン識別

筋電位信号は，振幅強度とともに，空間周波数を特徴量として含んでおり，手指の動作ごとの波形特徴が異なっている．そこで，周波数解析と学習情報処理を組み合わせて，手指の動作を識別することが可能となる．この原理を利用して開発された方法は，個性適応型制御法と名付けられ，3つの筋電センサ信号から 15 種類の運動意図を取り出すことに成功している（図 2）．15 種類の運動意図は，様々な手指の運動に割り当てられるが，例えば，日常的に利用頻度の高い動作としては，拇指の屈伸，尖指摘みと開き，全指握り開き，環指小指の握り開き，手首回内外，手首掌背屈，手首橈尺屈，脱力，または，各指の屈伸や MP 関節の屈伸や PIP 関節の屈伸などへの適用も可能である．また，個性適応型制御法では，利用者個々人の筋電位信号の様々なパターンを機械学習的に獲得し，これを義手の手先運動に変換する機能を有しているため，初心者であってもこれを使いこなすことは容易である．十分な識別性能を得るためには，筋電位の計測時間が 250[ms] 程度必要となるため，少々の遅れは存在するが，疑似的なリアルタイム制御が可能である．

一方，King's College London の Emanuele Secco の研究成果[7-9]では，EMG を用いた 24 種類の手指の姿勢の識別に成功している．この研究では，手指の動作に含まれる特徴的なパターンを，PCA を用いた特徴空間の次元圧縮を提案しており，手指姿勢の関係性に着目して 2 次元の空間へ圧縮することに成功し，24 種類の動作判別を 90[%] 以上の非常に高い識別率で実現している．

D）筋電センサ

筋電センサとは，計測対象の筋の直上の体表面に接触させることによって，筋放電の電位信号を筋肉の活動量波形として計測する装置であり，筋電義手の入力信号を得るために不可欠な部品である． 市販されている高性能な製品としては，追坂電子株式会社の乾式筋電センサ[注1]と ATR-Promotion 社 TS-EMG01[注2]が挙げられる．

追坂電子株式会社の乾式筋電センサでは，導電性ゲルなどの液間電圧を調整するための材料を必要とせず，この製品単体で計測が可能であるとともに，計測部位の低周波振動を計測し，センサノイズをキャンセルする機能を有する．これらの機能により，接触圧が低い場合や乾燥皮膚など皮膚インピーダンスが高い場合においても，筋電を安定して計測できる性能を有するため，激しい運動を行う場合や，先天性疾患の乳幼児など皮膚の条件が良好ではない場合に対しても利用価値が高い．

ATR-Promotion 社 TS-EMG01 は，超小型の無線を装備し，表面筋電計測を可能とする筋電アンプであり，2[ch] をボタン電池（CR1220）2 個により駆動する． サイズ 39[mm]（W）× 20[mm]（D）× 12[mm]（H），重さ 約 10[g]（電池含む）ともに十分小さく，計測性能も良好である．上記筋電センサと同様，皮膚条件が良好でない場合に使用する．

5. 筋電義手

近年の筋電義手の研究開発は，ロボット技術の発展共に大きく進歩した分野の一つである．これまでは，手先具の開閉動作のみに限られていた手指機能が，5 指独立動作の機能を有するロボットハンドに加え，前腕表面から多数の運動意図を識別する制御系を持ち[6]（図 3），さらに，未だ研究段階ではあるが指先の触覚をフィードバックする能力を有する義手に進歩し，多くの試作品や製品が開発されつつある（図 4）．

Belter らの調査研究[10]によれば，多関節数多自由度のロボットハンドおよび市販の義手のメカニズムに限定して性能比較を行い，評価項目は駆動系の種類と数，グリップ力，グリップスピード，総重量について，図表を用いて 10 種類の製品を比較し明快に論じている（図 5）．グリップ力においては，60[N] に達する研究中のハンドも存在するが，手先のみでも総重量が 1.2[kg] もあり，成人でも義手としての利用は困難．一方，16 個のモータを使って多自由度制御を可能とするハンドは，グリップ力が 10[N] 以下と非力である．一方，市販のハンドは，100[N] のグリップ力を達成しているが，握り動作のみに限定されていることなどが述べられている．

以降は，筋電義手に関する特筆すべき成果を列挙する．

A）5 指独立可動型の筋電義手

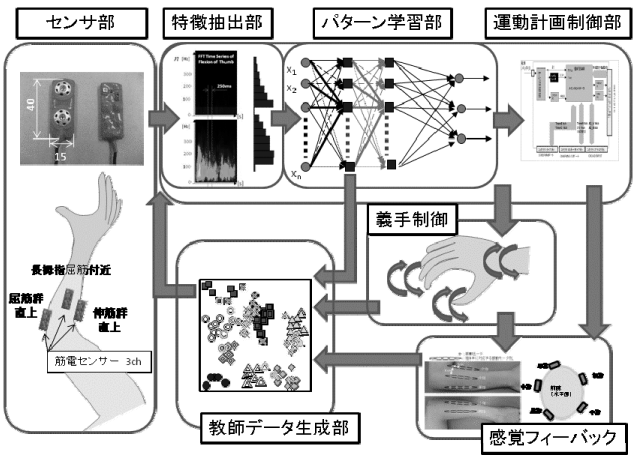


図 2　個性適応型制御法

注1 有限会社 追坂電子機器 , http://www.oisaka.co.jp/id2padoutline.html（2013/9/24 確認）

注2 株 式 会 社 ATR-Promotions, http://www.atr-p.com/TS-EMG01.html（2013/9/24 確認）

Vincent systems 社の開発者 Stefan Schulz が開発した 5 指型のロボットハンドは，小さめの女性の手のサイズと同等の小型軽量多自由度であり，現有の開発品の中で，最も優れた製品となっている．このハンドの特筆すべき性能は，各指の中に MP 関節と PIP 関節を駆動するためのモータとリンク機構が組み込まれており，手掌部を必要としないため，指切断の掌部に設置することが可能であり，これらを筋電制御により駆動することができるところにある．

B）乳幼児用ロボットハンド部

小型の筋電義手については，手先重量の制限が大きいため，尖指摘み 1 動作の製品を Liberating　Technologies 社[注3]が販売している．この製品では，指先への過大な負荷がかかる場合に備えて，剛性の高い骨格を有しており，体重を乗せても破損しないようにできている．

一方，大人用ロボットハンド部については，5 指動作を可能とするロボットハンドの開発が盛んに行われており，一部には，筋電義手への応用も始められている．ロボットハンドの性能は，モータ数 2 台から 6 台とリンクメカニズムを用いて，手先の様々な姿勢を造りだすことを実現しており，最近の 5 年間で非常に大きく進歩した研究領域である．この研究の優れた点は，手掌部にすべてのモータとメカニズムをコンパクトに収納しているため，すっきりとした外観を得ることに成功している点であるが，その分，握力は非常に弱く，また，機構的に脆弱であるため，体重を乗せたり，重量物を把持すると破損するなどの問題点を抱えている．さらに，価格的に 500 万円～ 1000 万円と高価である上に，筋電信号による制御は，開閉 2 動作に限られているため，手先の複雑な姿勢を利用するためには，外部スイッチによってモードを切り替える必要がある．

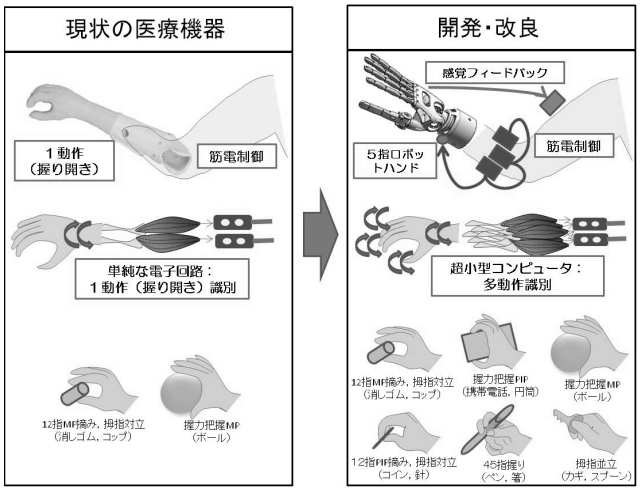


図 3　筋電義手研究の進歩

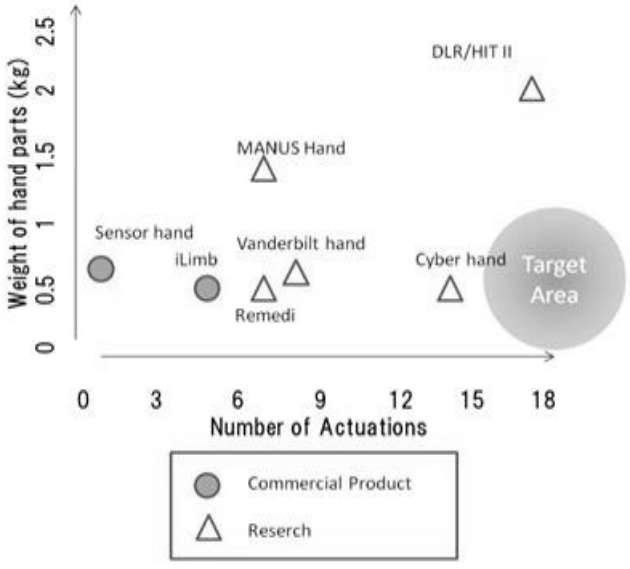


図 4　筋電義手の研究開発の現状

C）オットボック社のミケランジェロハンド[注4 13,14)]

ミケランジェロハンドは，拇指関節とそれ以外の指の関節を独立に制御できるように 2 つのモーターを組み込んだメカニズムを採用しており，4 種類の手先の姿勢モードを実現している．4 種類のモードは，拇指対立モード，拇指並立モード，拇指対立＋並立モード，脱力自然位モードであり，これらを外部スイッチによって切り替えて利用する．それぞれのモードにおいて，筋電信号の 2 動作識別（握りと開き）を適用することができ，拇指側方握りと尖指摘みの 2 種類の動作を筋電信号から識別し制御する機能を有している．薬指と小指は他の指の動作に従って受動的に動くように設定されている．

D）英 Touch Bionics 社の iLIMB[注5]

iLIMB は，5 指の独立動作を行うために，拇指に 2 台のモータと示指から小指に各 1 台ずつ，合計 6 台のモータが配置されている．拇指と示指の側方摘み（ラテラルピンチ）を用いた名刺などの把持，拇指と示指の対立摘み，三面対立握りによるボールペンの把持など複雑な精密握りを実現するとともに，4 指を用いたひっかけ握り，球面把持，円筒把持など，握力握りなど多くの把持姿勢をとることが可能である．この製品についても，把持姿勢の切り替えは，外部スイッチを用いて行い，その後に，拇指とそれ以外の指の開閉動作を筋電信号の識別を利用して，制御することが可能である．

E）米シカゴ・リハビリテーション研究所 Bionic Arm[15)]

Dr. Todd Kuiken が処方した Bionic Arm は，肩離断の重度切断者向けの筋電義手の適応方法の研究開発の成果であり，

[注3] Liberating Technologies. http://www.liberatingtech.com/products（2013/9/24 確認）

[注4] Advanced Arm Dynamics, Local Man Gets First-of-Its-Kind Prosthetic Hand, http://armdynamics.com/pages/media-coverage/abc-minneapolislocal-man-gets-first-of-its-kind-prosthetic-hand（2013/9/24 確認）

[注5] Touch Bionics, http://www.touchbionics.com/products/active-prostheses/i-limb-ultra（2013/9/24 確認）

もともと手指の動きを司っていた神経を手術により大胸筋の支配神経に埋め込むことにより移行し，手指運動に起因する筋活動を大胸筋の随意収縮を用いて取り出すことを可能とした．この随意収縮が可能となった大胸筋から信号計測を行うことにより，拇指，示指，手首，肘の筋活動をそれぞれ異なる部位の大胸筋から取り出すことに成功した．これにより，胸部に張り付けた筋電位センサの信号を用いて，肘，手首，手先の握りの 3 種類の動作を 0.3 秒以内に識別し筋電義手を制御することを可能とした．識別の成功率は，96.7[%] 以上である．

F）DEKA Research 社の Luke Arm

Dean Kamen の開発した Luke Arm では，上記の Bionic arm の外科手術の代わりに，足の指で圧力センサを操作するシステムを採用することによりハンドの手先を制御するとともに，上腕ロボットアームの操作は大胸筋，広背筋群近傍の表面筋電位を用いることで，義手全体の制御を可能としている．

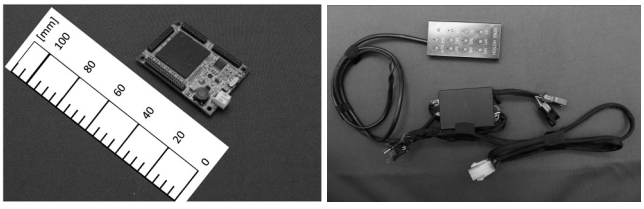
G）BeBionic Hand[注6]

Advanced Arm Dynamics 社の BeBionic Hand は，手指の全ての関節自由度を可動とし，16 自由度の動作を可能としている．モータ数は合計 6 台により全指を駆動しており，各々，拇指 CM 関節，拇指 MCP 関節に 1 台ずつ配置し，さらに，示指，中指，環指，小指に 1 台ずつ配置されている．示指から小指までの 4 指は，MP-PIP-DIP の関節が比例的に屈曲するようにリンクメカニズムにより結合され，1 台のモータで屈曲動作が制御されている．

H）電通大の筋電義手

我々の研究グループでは，特に，運動意図を識別するコントローラ部と，電動義手の機構・制御部に関して研究開発に成功している．

個性適応型制御を用いた筋電義手のコントローラは，利用者の筋電信号のパターンを学習して，義手の動作を制御するため，利用者を選ばず，筋電義手を操作することを可能としている．この機能は，後天的な切断，先天的な欠損，上肢以外の筋活動を用いても，義手の手先の運動を造りだせることであり，筋電義手を使うために特別な訓練を要しないことが確かめられている．さらに，この機能を搭載したコントローラを小型化することに成功し，マッチ箱程度の大きさで，20 個のサーボモータを独立に制御できる機能を付与した（図 5）．これらの機能を用いて，後天的な切断の方はもとより，小児の先天的な欠損に対しても適用し，物体の把持操りはもとより，文字を書きや縄跳びを行うなど，自由に筋電義手を使えることと，これにより生活や教育の質と範囲が広がることを確かめた．



a）SH72544R 基盤　　b）全体像
（図 b）の中央の黒い箱に SH72544R 基盤を内蔵
図 5　動作推定コントローラ

電動義手の機構・制御部は，手指の形を造りだす「骨格部」と外皮の「グローブ部」，および，関節運動を生み出す「駆動部」，関節運動の「制御部」に分けられる．骨格部は，滑り関節という新しい関節機構を提案し，無理な荷重が手先に作用するような場合には，関節が脱臼ことによって破損を回避し，後に，自動復帰することを可能とした．駆動部は，ワイヤ干渉駆動法を新しく発明し，複数のモータ動力を相互干渉させることにより，力学的に負荷のかかりやすい部分に多くの動力を集中させながらも，モータ数と同等な制御自由度を保証することに成功した．これにより，5 指と手根関節 16 関節を独立に制御する機能を持ちながら，同時に強力な把握力を得ることと，義手全体を軽量化することに成功した．制御部は，インクリメンタル制御法を新しく提案し，微小な関節駆動を実現することにより，利用者の運動意図に適合する任意の位置で手指の形を位置決めすることに成功した．

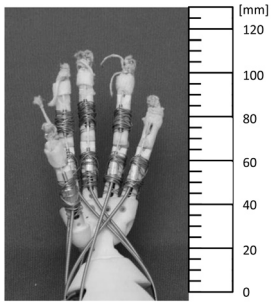
これにより，五指独立制御の可能な電動義手であることと，3D プリンタを用いて，乳幼児・小児から成人までのあらゆるサイズの電動義手を製作可能とした（図 6）．滑り関節機構の効果により，無理な力をかけても義手は脱臼して破壊を回避した後に自動復帰するため，小児の日常生活において故障して動かなくなってしまうようなことはない．素人が複雑な動力機械を使う場面を想定し，安全性とメンテナンスフリーの機能を追加した．

また，軽量な電動義手の設計製作に成功しており，乳幼児用 230[g]，小児用 340[g]，成人用 620[g] を達成するとともに，義手先端の触圧を感覚フィードバックとして利用者の上腕に返す装置の開発にも成功した（図 7）．

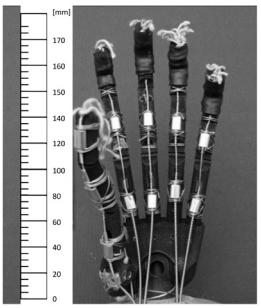
グローブ部については，エラストマーを素材として用いたグローブの開発に成功しており，製造法は，射出成型法を応用した新しい成形法を用いて，伸び率 1000[%] の柔軟性を持つエラストマー系の素材に指紋や皺などのテクスチャを転写しながら，子供から成人までの手指のグローブを量産すること（図 8），関節部の厚みと指腹部や掌部の厚みを制御すること，関節部を薄く成形することにより，モータ動力を消耗しないことと，分厚く成形した指腹部と掌部により，物体を安定的に把持することの相反する要求を満足することに成功した．

応用面では，上記の成果を利用して，物体把持の安定性を増すことによって，ペン握りを達成し，自由に描画することができることや，積み木や消しゴムなどを指先で摘まむこと，ペットボトルや箒の柄などの円筒形をしっかり握

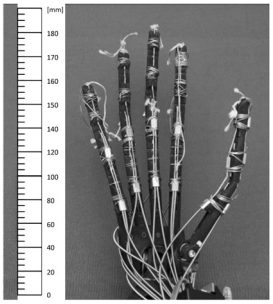
[注6] Advanced Arm Dynamics, BeBionic V2, http://armdynamics.com/pages/bebionic（2013/9/24 確認）



（a）乳児用筋電義手
（制御自由度：2）

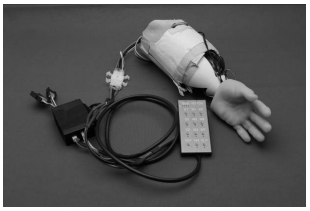


（b）幼児用筋電義手
（制御自由度：5）



（c）成人用筋電義手 （制御自由度：13）

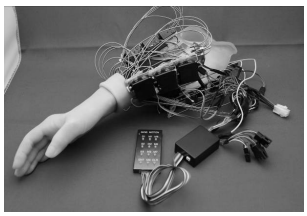
図 6　筋電義手用ロボットハンド骨格



（a）乳児用筋電義手
（DOA ＝ 2）



（b）幼児用筋電義手
（DOA=5）



（c）成人用筋電義手 （DOA=13）

図 7　電通大の筋電義手

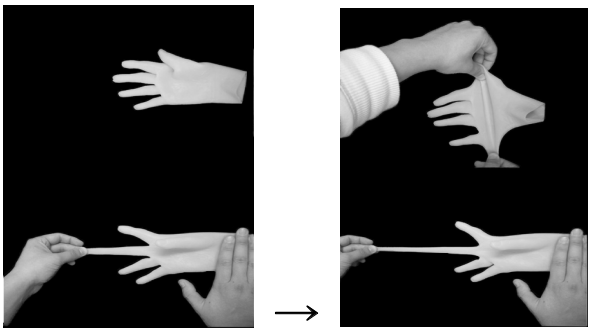


図 8　エラストマーを用いて製作されたグローブ

り込むこと，テニスボールなどの球形を片手で握ること，キャッチボールを行うこと，スプーン，包丁，おたまなどのキッチン調理器具・食器の安定把持と操りを可能とした．さらに，縄跳びを握り込むとともに，上腕を激しく動かしても，筋電識別に誤動作を発生せず安定的な握りを継続させる方法を開発し，縄跳び動作とトレーニングを継続することに成功するなど，スポーツへの応用の道を開いた．

6. まとめ

本論は，筋電位を入力信号として用いた義手開発の現状について，多自由度の制御に関するトピックスを中心として最新の研究成果をまとめた．ロボットハンドの開発は，拇指 CM 関節の内外転を含む 5 指独立制御を実現し，人の手先と同等のサイズと重量を達成している．また，筋電制御による運動意図の識別は，24 種類の手指動作を識別するに至った．現在のところ，未だこれら 2 つの機能を具備する筋電義手は開発されていないが，数年後には実現されることが予想される．

7. 謝辞

本稿で述べたもののうち著者らによる研究成果は，JSPS 科研費基盤研究（A）25249025，22246033，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「ブレイン・マシン・インターフェースの開発」の助成を受けたものです．また，独立行政法人科学技術振興機構研究成果展開事業 A-STEP フィージビリティスタディシーズ顕在化タイプにおける成果の一部です．

参考文献

1) Rolf, P.: How the body shapes the way we think: a new view of intelligence. Cambridge, USA, MIT Press, (2007).
2) Forssberg, H., Kinoshita, H., Eliasson, A. C., Johansson, R. S., Westling, G.: Development of human precision grip. II, Anticipatory control of isometric forces targeted for object's weight, Experimental Brain Research, 90, 393-398, (1992).
3) 小西克浩，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，大塚博：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，兵庫県立福祉のまちづくり工学研究所報告集，151-156.
4) 中村達弘，加藤龍，森下壮一郎，横井浩史：五指ハンド筋電義手のための制御システム，まぐね（日本磁気学会学会誌），(2011).
5) Yu, W., Kato, R., Fukuda, F., Yokoi, H. and Kakazu, Y.: An EMG keyboard for forearm amputees, Applied Bionics and Biomechanics, 1(1), 33-43, (2003).
6) Kato, R., Yokoi, H., Arai, T.: Real-time learning method for adaptable motion-discrimination using surface EMG signal, Proc. of 2006 IEEE/RSJ Intl. conf. on Intelligent Robots and

Systems, (2006).
7) Secco, E. L. and Magenes, G.: Bio-mimetic finger ? Human like morphology, control & motion planning for intelligent robot & prosthesis, Mobile Robotics, Moving Intelligence, (2006).
8) Curone, D., Bertolotti, G., Cristiani, A., Secco, E. L. and Magenes, G.: A real-time and self-calibrating algorithm based on tri-axial accelerometer signals for the detection of human Posture and Activity, IEEE Trans on Information Technology in Biomedicine, 14 (4), 1098-1105, (2010).
9) Matrone, G., Cipriani, C., Secco, E. L., Magenes, G. and Carrozza, M.C.: Principal components analysis based control of a multi-dof underactuated prosthetic hand, Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation, 7(16), (2010).
10) Belter, J. T. and Dollar, A. M.: Performance characteristics of anthropomorphic prosthetic hands, 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics Rehab Week Zurich, ETH Zurich Science City, Switzerland, (2011).
11) Schulz, S., Pylatiuk, C., Reischl, M., Martin, J., Mikut, R. and Bretthauer, G.: A lightweight multifunctional prosthetic hand, Robotica, 23(3), 293-299, ISSN: 0263-5747, (2005).
12) Schulz, S.: First experiences with the vincent hand, Proceedings of the 2011 MyoElectric Controls/Powered Prosthetics Symposium Fredericton, New Brunswick, Canada, (2011).
13) Lorrain, T., Jiang, N. and Farina, D.: Influence of the training set on the accuracy of surface EMG classification in dynamic contractions for the control of multifunction prostheses, J. NeuroEng. & Rehab 8(25), 1-9, (2011).
14) Jiang, N., Falla, D., d´Avella, A., Graimann, B. and Farina, D., Myoelectric control in neurorehabilitation, Crit Rev Biomed Eng. 38, 381-91, (2010).
15) Kuiken, T. A., Li, G., Lock, B. A., Lipschutz, R. D., Miller, L. A., Stubblefield, K. A. and Englehart, K. B.: Targeted muscle reinnervation for real-time myoelectric control of multifunction artificial arms , JAMA. 301(6), 619-628, (2009).



横井浩史（よこい ひろし）
1993 年 3 月北海道大学大学院工学系研究科博士後期課程修了．博士（工学）．通商産業省工業技術院生命工学技術研究所勤務，北海道大学大学院工学研究科助教授，東京大学大学院工学系研究科准教授を経て 2009 年より電気通信大学大学院情報理工学研究科教授．電動義手の開発，福祉機器システムの開発等，主としてリハビリテーション工学，ロボット工学の研究に従事．精密工学会，計測自動制御学会，日本機械学会，日本ロボット学会の会員．