

個性適応技術を用いたマンマシンインターフェースの開発と実用化に向けたアプローチ

— 身体的なバリアのない世界の実現を目指して —

A novel approach to the development of a man-machine interface

using a cloud-based bio-signal database

- Towards the realization of a world without physical barriers -

○ 粕谷昌宏（株式会社メルティン MMI） 關達也（株式会社メルティン MMI，電気通信大学）

Masahiro KASUYA, Meltin MMI Co., Ltd.

Tatsuya SEKI, Meltin MMI Co., Ltd., The University of Electro-Communications

Abstract: This paper describes a novel approach to a practical realization of a man-machine interface, which eliminates physical barriers for the user. We believe the interface is key when we control machines. Operator error or physical limitations can occur with a poorly designed interface. The problem becomes serious if the machine is used to substitute a physical body function, thereby directly affecting the quality of life of the user. We developed a wearable, cloud-based, bio-signal sensor to gather usage data. An original decoding algorithm was then developed through analysis of big data from the gathered bio-signals. In addition, this technology also enables humans to expand physical body functions. When this technology is used by either challenged people or able-bodied people, the physical boundaries which separate them will be blurred.

Key Words: human interface, electromyography (EMG), wearable, big data, physical expansion

1. 背景

1.1 機械とインターフェース

人類は機械を発明したことにより、多様な仕事を早く正確にこなすことができるようになった。機械は単純なリンク機構などから始まり、ギアなど様々な機構を経て、今日では電子制御も加わり自律動作を行う複雑なものへと進化してきた。そして機械を扱うことを考えた時に議論しなければならないのが、人と機械をつなぐインターフェースである。

1.2 インターフェースの操作性と限界

例えば車のインターフェースは主にペダルやレバー、ハンドルから構成される。ここで、車を前進させる際に限らず、車を後退させる際にもアクセルを踏み込むという同様の操作がなされる。また、方向指示器においても、方向指示器は左右であるのに対し、上下に動くレバーを操作する必要があるなど、実際の運動の方向とは一致していない。そのため、これらの操作方法を習得するためには、多くの時間をかけなければならない。このようなインターフェースの操作性の問題は、その機械の構造に由来するものや、単にインターフェースの設計によるものがある。

特にインターフェースの設計による場合、その設計を使用者の視点から見直すことで大幅な操作性の向上が期待できる。例えば車の手動運転装置がある。手動装置は、身体障害などの理由により足でアクセルやブレーキペダルを操作できない使用者に対し、ハンドル付近に設置されたレバーによりアクセルとブレーキの操作を可能とするものである。これにより、下半身に不自由を抱える使用者でも自動車の運転が可能となる。このように、インターフェースは使用者に適した設計を行うことで、操作性に関する問題を解決することができる。

しかしながら、このインターフェースの設計変更により、

他の操作を阻害する可能性があることに注意しなければならない。先に挙げた手動運転装置の例では、左手はアクセルとブレーキの操作、右手はハンドルの操作となり、運転には常時両手を要する。そのため、エアコンなどの操作は停車中に限られる。このように、人の運動器に対して操作対象の機械が運動器の数や機能を超えた操作入力を要求する場合、その他の操作を制限せざるを得ない。つまり、いかにインターフェースを設計しようとも、そこには身体という壁により限界が存在することとなる。

1.3 身体を代替する機械とそのインターフェース

機械は様々なものが存在するが、とりわけ義肢のように身体の機能を代替する機械の場合、身体によるインターフェースの限界による機械の動作の制限は、生活の質に大きく関わることとなる。例えば手を失った場合、義手がこれに当てはまる。義手にも様々なものがあるが、動作を行うことができる最も基本的な義手は能動義手と呼ばれ、義手の開閉を制御するワイヤーが肩に伸びており、肩の動きを使って義手の開閉を行う⁽¹⁾⁽²⁾。そのため、車の例とは異なり、義手の開閉にあたり上肢の運動が制限されるため、生活の質そのものが大きく損なわれてしまう。

これに対して、使用者の前腕の残存筋を用いて制御することのできる筋電義手が開発された。筋電義手では、切断された手の残存筋を操作に用いるため、制限される動作が発生しない。先に述べた能動義手と比較すると、能動義手では義手の開閉量と開閉力はワイヤーを引く量と強さに依存するが、筋電義手ではモーターにより義手が駆動されるため、筋肉を随意的に動かし筋電を發揮することができれば、義手の開閉量と開閉力は筋肉自体の動く量や強さには依存しない。筋電義手は、機械の制御方式を変えることで、構造に由来するインターフェースの問題を解決した例である。

2. 本項について

これまでに論じられてきたように、インタフェースには人を構成する運動器の数と機能により限界が存在することになるが、この限界を突破することができれば、生活はより豊かになるはずである。そこで MELTIN MMI では、身体的なバリアのない世界を作るべく、身体に縛られることのないマンマシンインタフェースの開発を目標に研究開発を行っている。本稿では、その実現に向けたアプローチについて紹介する。

3. 研究アプローチ

理想的には、脳と機械を接続し、思考で機械を直接操作するインタフェースが存在すれば、身体的なバリアのない世界を実現できると考えられる。この考えは Brain Machine Interface (BMI) と呼ばれ、研究が盛んに行われている。具体的には、脳活動を計測し、その信号を各種識別器でデコーディングすることで、機械への動作指令に変換するインタフェースである。しかしながら、脳活動は非常に微弱な電気信号であるためにノイズが混入しやすく、さらに個人個人で異なる性質を持つことなど不確定要素を多数含む。そのため、その活動を瞬時に完璧にデコードすることは困難を極める。すなわち、理想的な BMI を達成するためには、微弱な脳活動を正確に計測可能なセンサと、計測された複雑な信号を解析し機械への動作司令に変換するアルゴリズムの両方の技術革新が必要となる。

そこで、生体信号の中でも比較的信号強度が高く、計測することが容易な筋電信号に注目した。そして制御対象の機械として、人の体の中でも最も複雑な動きを要求される器官の1つである手を代替する義手を題材とし、生体信号の解析アルゴリズムの開発を行う。

4. 手の物理的特性を考慮したシステム構成

本稿では、身体に縛られることのないマンマシンインタフェースの開発という目標に向けて、まずは筋電信号と義手を題材とする。筋電義手は50年ほど前から存在するが、筋電もそのほかの生体信号同様、複雑かつ個人差も大きい信号である。そのため従来の筋電義手は手指の開閉程度が限界であった。筋電は脳から神経を通り筋肉へ入力された神経パルスが筋繊維上を伝播する際の信号であり、その計測には筋肉へ針電極を直接刺入する方法や、筋肉の近傍の皮膚に電極を貼り付ける方法が用いられる。針電極を刺入すると空間分解能の非常に高い筋電が得られるが、刺入に際しては医師の立ち会いが必要であるため、本研究では実用化を考慮し皮膚への電極貼り付けにより筋電を計測する。また、筋電義手を開発する上で最も重要な要素は、筋電から動作指令得るための識別アルゴリズムと、手の物理的特性を考慮したハードウェアの2つである。本項では、そのシステム構成について詳細に解説する。

4.1 個性適応技術を用いた筋電パターン識別

本研究では皮膚表面から筋電信号を計測するため、複数の筋肉の筋電信号が混じって計測される。筋電信号は皮膚を通過するにあたり、その経路や距離により振幅の減衰や周波数の変化などが起こる。したがって、筋電信号は手の動作ごとに異なる波形となる。この波形形状を本研究では筋電パターンと呼び、その筋電パターンを識別することにより、筋電義手を制御する方法論を取る。ここで、筋配置は人それぞれで異なるため、筋電パターンも人それぞれ異なることになる。そこで本研究では、個性適応技術⁽³⁾を用

いることで、人それぞれ異なる筋電パターンを高い精度で識別する。従来は、筋電信号があるかないかの2状態しか識別できなかったが、個性適応技術では握り・開き・手首の動きなど、様々な手の動作を識別可能となった。結果として、7動作(握り・開き・親指曲げ・4, 5指曲げ・手首掌屈・手首背屈・脱力)を93%の精度で識別可能なアルゴリズムを開発することに成功した⁽⁴⁾。

4.2 ハードウェア操作への応用

4.2.1 筋電義手のデザイン

筋電義手では日常生活動作(Activities of Daily Living: ADL)の実現が重要である。ADL に要される人の手の機能を補える義手を実現するためには、各指と手首の運動自由度⁽⁵⁾と物体を把持するための力強さを持つロボットハンドが必要となる。

しかし、限られたスペースに多数の関節を配置し、力強さを両立させることが大きな課題となる。また、個性適応技術で得られる制御入力も手の自由度すべてを自在に操作するには不十分であり、これを如何に補うかも大きな課題である。

4.2.2 ロボットハンドの機構

手という限られたスペースに多数の関節を配置し、力強さを両立させるため、ロボットハンドの駆動にはワイヤー駆動を採用した。ワイヤー駆動では、小型かつ軽量の機構で大きな駆動力を伝達できるため、小型・軽量化および多自由度化・高出力化の両立が可能である。また、ワイヤー駆動を採用することでアクチュエータの外部化が可能となるため、手先重量を大幅に削減し、義手装着者への負担を軽減することが可能である。

4.2.3 把持物体適応機能

4.1で述べられたように、個性適応技術によって筋電信号から多様な手の動作が得られるようになった。しかしながら、得られる動作はあくまで握り・開き・手首の動きなど抽象化されたものであり、細かな手指の角度を推定するものではない。実際に物体を把持する場合、手の動作は把持対象物に一致する必要があるため、抽象化された動作の制御入力に対し、対象物の形状に適応する機能が必要となる。そこで、アクチュエータ群の協調動作を用いたワイヤー干渉駆動⁽⁶⁾⁽⁷⁾による劣駆動を利用し、物体形状に合わせてロボットハンドの把持動作が自動的に適応していく機構を手指のDIP関節およびPIP関節に設けた。これにより、ロボットハンドの制御に必要な情報量が大幅に削減され、操作者は単に手指の開閉のみを入力するだけで、形状や大きさの違う様々な物体の安定した把持が可能となった。

このロボットハンドはヒトの手と同サイズながらも、各指関節の大部分と手首関節の計14の運動自由度(Fig. 1)を持つ。また、500mlのペットボトル飲料を離さずに振り回すことが可能なほどの安定性と力強さを実現している。

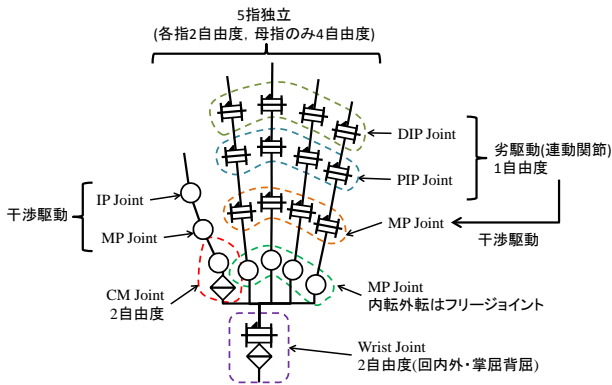


Fig. 1 Robot hand for EMG prosthetic hand

4.2.4 筋電義手としての評価

実際に、前腕切断者(20代男性，右手切断，長断端)にご協力いただき，簡易上肢機能検査(Simple Test for Evaluating Hand Function : STEF)を試した。個性適応術による筋電制御にてロボットハンドを操作し，すべてのタスクが可能であることを確認した(Fig. 2)。特に，操作者は筋電からロボットハンドの手指開閉を入力するのみであるが，直方体から球体まで大小様々な物体を安定して把持できることが確認された。

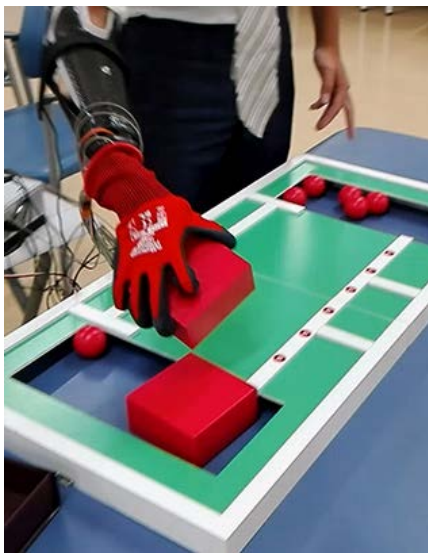


Fig. 2 STEF evaluation of developed EMG prosthetic hand

5. 実用化に向けたアプローチ

これまでの成果として，7動作を93%の精度で識別し，把持物体に適応する筋電義手が開発された⁴⁾が，人の手の機能，ひいては脳波を用いてあらゆる身体部位の代替を目指すには程遠いのが現状である。この課題を解決するためには多くの時間と人手を費やし，膨大な生体信号のデータと技術の蓄積が必要である。

MELTIN MMIでは，生体信号のビッグデータ解析を行うことで，次世代の解析アルゴリズムの開発を目指す。筋電をはじめとした生体信号インタフェースの利用者から膨大な生体信号を取得しビッグデータ解析を行うことができれば，万人共通の生体信号の特徴を見つけ出すことによる識別精度の向上や，より繊細な動作のデコーディングができる可能性がある。

現在，生体信号から機械を実用的に操作できるインタフェースは乏しく，ビッグデータ解析に必要な膨大な量のデ

ータを得ることは困難である。そこで，MELTIN MMIでは Fig. 3に示す1円玉大の乾式筋電センサと，Fig. 4に示すようなクラウドベースの筋電センサを開発した。この筋電センサは，Wi-Fi ルーターに接続することによりクラウドへ筋電データをアップロードすることができるため，利用者数と使用量が増加することで，識別アルゴリズムが自己成長するシステムを構築する。



Fig. 3 Small dry-electrode EMG sensor



Fig. 4 Cloud-based EMG sensor

Table 1 Specification of cloud-based EMG sensor

Function	Value	Unit
Notch frequency	50	Hz
Band frequency	10-500	Hz
Sampling rate	1,600	Hz
Resolution	12	bit
Channels	8	
Radio type	IEEE 802.11b	
Protocol	UDP	

6. 身体拡張としての考え方

クラウド技術を基盤とし，データを集めることで自己成長する生体信号解析システムは，性能の向上に伴い利便性が向上し，普及が促進されることが考えられる。一方で，筋電義手は高価で機能が少なかったなど様々な理由により，使用者はさほど多くないことが現状である。つまり，利用者からのデータ提供により筋電義手の性能が向上し，利便性の向上と普及が促進されるが，そのためのデータ提供者が少ない，というジレンマに陥る。

ここで，義手というものの本質について今一度考えてみたい。義手は，病気や怪我などにより手を持たない特徴を有する人に，新たな手という器官を付け加えるものである。つまり，手がない体を持つ人の体を拡張したと捉えることもできる。義手を身体の拡張と捉えると，その技術は身体を持つすべての人に適用可能であることがわかる。身体的なバリアというものは，身体を持つ限り誰にも共通して存

在する問題であることが見えてくるのである。人の運動器の数や機能を超えた要求を持つタスクを行う場合に、この身体的なバリアを垣間見ることができる。

例えば、ハンダ付けを行う時に、第3の手があればどれほど便利かと考えた工学者は多いはずである。ハンダ付けは片手でハンダごてを、もう片方の手でハンダを持つが、さらに基板や素子などハンダ付けの対象物を同時に支えなければならないことも多く、両手10本の指を駆使しても作業が困難となることが多い。Fig. 4はその問題に対する解決策の一例として、健常者の腰部に固定したロボットアームによる第3の腕を用いてハンダ付けの実証実験を行ったものである⁽⁸⁾。この例では、首と口の動きに関連した筋肉に筋電センサを貼り付け、口の開閉を第3の手の開閉に、首の曲げを第3の手の手首の動きに割り当てた。この制御方法により、作業に直接関係のない部位の筋電を用いてロボットハンドの手指と手首の運動を操作することで、作業を妨げることなく第3の腕を動かし、作業をスムーズに行うことができる。このように、個性適応技術を用いることで、により身体のバリアにとらわれることなく、使用者の動きを自由に機械の動きとして直感的にマッピングすることが可能となった。以上のように、個性適応技術を持つクラウドベースの筋電センサは、欠損部を補うという目的であった義手を、より広義なマンマシンインタフェースとして再定義する可能性を秘めている。



Fig. 5 Third hand

7. まとめ

これまでの筋電義手は事故や病気などで失った手を代替する物であり、それを装着している人は障害者である、というイメージがあった。しかし、その本質をマンマシンインタフェースとして捉え、個性適応アルゴリズムやクラウド、多自由度ロボットハンドといった技術を用いて拡張することで、身体拡張という新しい分野への発展が期待されることを示した。この身体拡張という捉え方により、これまで欠損部を補うという目的で用いられてきた機械が、健常者と障害者の垣根なく一般に使用される機器と認識されれば、真に両者の垣根を取り除くことができると考えている。

8. 展望

今回開発された筋電センサは、微弱でも筋電信号が計測できれば機械操作が可能となることから、ALSなど筋力が低下した方でも、電動ベッドの昇降やテレビのチャンネル

の切替、照明の操作など、これまで介助者に依存していた作業を自立して行うことができるようになる。また、これまで数値化が困難であった筋力や筋疲労をモニターする活動量計として用いることができるため、フィットネスやヘルスケア分野といった幅広い利用が期待される。

個性適応技術は、実環境で実用的に用いることができる筋電識別アルゴリズムとしては世界トップクラスである。そのため、世界の生体信号データベースを構築し更なる機能向上を行うことで、最終的な目標である身体に縛られることのないマンマシンインタフェースの実用化を進めていく。

参考文献

- (1). 高橋功次, 須田裕紀, 東江由起夫. チャプター3「能動義手」. 日本義肢装具学会誌. **30**(4), pp.200-4, 2014;
- (2). 高橋功次. 能動義手の仕組みと製作・適合時のチェックポイント. 日本義肢装具学会誌. **23**(3), pp.200-4, 2007;
- (3). 加藤龍, 横井浩史. 個性適応機能を有する筋電義手の開発 -fMRIを用いた義手適用効果の検証-. 医器学. **77**(11), pp.767-75, 2007;
- (4). 粕谷昌宏, 加藤龍, 横井浩史. 時系列情報を用いた筋電パターン識別精度向上フィルタの提案. 生体医工学. **53**(4), pp.217-24, 2015;
- (5). Christian Cipriani MC and MCC. Objectives, criteria and methods for the design of the SmartHand transradial prosthesis. Robotica 2010. **28**, pp.919-27, 2010;
- (6). Kato R, Yokoi H. Evaluation of Motor Recovery by Using Adaptive Myoelectric Hand. **27**(8), pp.926-32, 2009;
- (7). Tatsuya Seki, Yinlai Jiang HY. Approximate model for interactive-tendon driven mechanism of a multiple-DoFs myoelectric prosthetic hand. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). pp.999-1004, 2014;
- (8). Masahiro Kasuya, Ryu Kato, Takehiko Takagi, Sumio Ito, Shinichiro Takayama HY. 身体を拡張する筋電義手 -“障害”を再定義するテクノロジーの実現を目指して-. Journal of Information Processing and Management. **58**(12), pp.887-99, 2016;