

事象関連脱同期を用いたブレインマシンインターフェースの提案

Proposal of a Brain Machine Interface using the Event Related Desynchronization

原 崇輔†
Shusuke Hara

曾我 真人†
Masato Soga

1. はじめに

近年、脳活動によって機械を操作する技術であるBMI(Brain Machine Interface)が注目されており、その研究が盛んにおこなわれている。

BMIは、脳活動を計測することができれば使用することが可能なので、通常のインターフェースを使うことができない、体が不自由な人でも、健常者と同じように利用することができるバリアフリーなインターフェースの実現につながる。

このような理由もあり、BMIは主に医療分野や身障者を対象とした研究として盛んに研究されているが、日常使用や健常者を対象としたBMI研究はあまり見られない。

そこで私たちは現状の技術で可能な限り実用化に近いBMIを提案する。ここで、実用化に近いBMIとは健常者、身障者を問わず広く普及させることができる日常使用を目的としたBMIのことであると定義する

2. 実用化の条件

実用化のために必要な条件について検討をおこなう。

まず、使用する際の手軽さについて検討する。BMIはこれまでに様々な研究がされており、その中には外科的手術を行い大脳皮質に直接電極を設置することで計測精度を向上させ高い性能を持ったBMIを作製することに成功している例もある。しかし、これらのBMIは、BMIを広く普及させるという観点からすると不適である。BMIを広く普及させるためには不特定多数の人間が使用することを前提としなくてはならず、使用者一人一人に手術をおこなわなければならないBMIは不都合である。このことからBMI普及のためには、使用するのに特別な労力や環境を必要とせず、簡単に使用できる手軽なBMIを製作しなければならないことが分かる。

次に、BMIの応答速度の速さについて検討する。インターフェースの重要な要素のひとつとして、命令を発信してからその命令が実行されるまでの時間が挙げられる。例えば、時速60キロ(秒速約17メートル)で走行する車を操作する場合について考えてみる。命令から実行までのタイムラグが1秒である場合、操縦者の命令が実行されるまでに車は17メートルもの距離を走行することになる。これは利便性の上でも安全性の上でも大きな問題である。このように、操作対象にもよるが、インターフェースとしての実用性を考えるとBMI実用化のためにはある程度のレスポンスの速さは必須である。

さらに、コスト及び入手性について検討する。BMIを広く普及させるためにはBMIの入手性を高める必要がある。そのため、できる限り低コストでBMIを製作しなければならない。

上述より、BMIを実用化するためには手軽さ、レスポンス

スの速さ、低コストという条件を満たさなければならないということが分かった。次に、使用する計測手法や脳活動、脳波計について検討する。

3 使用する計測手法について

BMIは脳活動を用いて機械を操作する技術だが、脳活動の計測には様々な手法がある。それらの計測手法のなかでも、どの計測手法がBMIの実用化に適しているのか、上述の条件を踏まえて検討していく。

3.1 NIRS

近赤外分光計測(Near Infrared Spectroscopy :

NIRS)は近赤外光を用いて脳活動に伴う脳の血流変化を計測する手法である。光ファイバを頭部に直接装着して脳活動を計測するため頭部の動きにある程度寛容である。また、近赤外線を用いて計測を行っているため蛍光灯や無線通信機器などの周囲の電磁波の影響を受けず、計測する環境を選ばない。

しかし、この計測手法は空間分解能が低い。また血流の変化を測定の対象とする計測手法は、脳の電気活動を測定の対象とする計測手法に比べ、被験者の意思が脳活動として現れるまでに時間がかかる。よってBMIとして応用すると命令から実行までのタイムラグが大きくなってしまいうで不適である。

3.2 fMRI

機能的磁気共鳴画像(functional Magnetic Resonance Imaging : fMRI)は核磁気共鳴現象を用いて血流変化に基づく脳活動を計測する手法である。この手法は大脳皮質のみならず脳幹を含む脳全域の活動を計測することができ、空間分解能が高い。

しかし、磁気共鳴画像装置は大変高価であり、また大規模な設備が必要なため持ち運ぶことができない。また、NIRS同様BMIとして応用すると命令から実行までのタイムラグが大きくなってしまふ。さらに、計測中は体を動かすことができない。そのため手軽に計測をおこなうことができず実用化には不向きである。

3.3 MEG

脳磁図(Magnetoencephalography : MEG)は脳の大脳皮質錐体細胞の細胞内電流から僅かに発生する磁気を計測する手法であり、後述のEEGよりも正確に電流源の位置を特定することができる。

しかし磁束密度は距離の二乗に比例して減衰するためMEGでは脳深部の活動を測定することは困難である。またMEGで検出する脳活動は地磁気の一億分の一と非常に微弱であるため計測の際には電磁気ノイズを減衰させる高価な磁気シールドルームや振動対策が必要となる。そのため専用の部屋でしか計測をおこなうことができず、手軽に使用することができない。よってBMIの実用化には向いていないと考えられる。

3.4 ECoG

皮質脳波(Electrocorticography : ECoG)はノイズが少ない

† 和歌山大学システム工学部

† Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

く判別が容易な脳波であり、BMI に応用することで性能の高い BMI を製作することが可能になる。近年この ECoG を用いた BMI の研究が増加している。しかし、この ECoG という脳波を測定するためには外科的手術をおこない、大脳皮質部分に直接電極を設置しなくてはならない。この脳波を用いて製作した BMI は、使用者一人一人に手術をおこなわなければならないため、手軽に使用することができない。よってこの脳波は BMI の普及には不適である。

3.5 EEG

脳電図 (Electroencephalography : EEG) は主に大脳皮質錐体細胞の細胞外帰還電流によって生じる頭皮上における電位差を、頭皮上に設置した電極によって計測する手法である。比較的安価で計測時の拘束性も低いので基礎研究として盛んに実験がおこなわれている。また、時間分解能も高い。

EEG は細胞外電流を測定しているが、脳は脳脊髄液、髄膜、頭蓋骨、皮膚など導電率の異なる組織によって何重にも被われており、さらに頭蓋骨は部位によって厚さが異なる。そのため、脳内の局所的な電気活動の頭皮上での電位分布は大きくゆがむ。また EEG が測定している電位は計測対象の電極と基準電極との相対的な電位差であるため、基準電極の活性化などにより正確な測定結果を得ることができない可能性がある。よって BMI に応用すると誤作動を引き起こす可能性がある。

しかし、他の計測手法の問題点は仕様上どうしても回避できない問題であるのに対し、EEG の問題点は脳波の判別アルゴリズムの改良や使用する脳波を工夫するなどの改良の余地がある。よって BMI を実用化するためには EEG を用いた BMI が適していると考えられる。

では次に具体的に代表的な EEG からどの脳波を用いるか検討していく。

3.4.1 P300 について

P300 はオドボール課題と呼ばれる課題を被験者に課した際に観測される脳波である。オドボール課題とは、一定の感覚刺激を与え続け、その最中にランダムに低頻度で、別の種類の刺激を与える課題である。この脳波を用いた BCI も存在している。しかし、P300 はオドボール課題に集中しているほど大きな振幅を得ることができるため、計測の際にはオドボール課題以外のことを考慮することが難しくなる。そのため、自分の周囲の状況など、オドボール課題以外のことを考慮しづらくなるため、操作性に問題が生じる。また、この脳波は常に外部の刺激を受け続けなければならないので、五感の一部が制限されてしまう。上述の理由より、BMI の実用化のためには不適であると考えられる。

3.4.2 SSVEP について

定常状態視覚誘発電位 (SSVEP) とは一定の周波数帯域で点滅する視覚刺激によって誘発される脳波である。例えば、10Hz で点滅する光を視認している間は 10Hz の脳波が計測される。この脳波は判別が容易であるため実際に BMI に応用されている例もある。

しかし、この点滅する光はてんかん発作を引き起こす可能性がある。SSVEP が誘発される視覚刺激の周波数とてんかん発作を引き起こす可能性がある光の周波数が近いためである。BMI を広く普及させることを考えるならば、てんかん発作の危険性も視野に入れるべきであり、この脳波は使用するべきでないと考えられる。

3.4.3 ERD について

事象関連脱同期 (ERD) とは特定の運動をおこなうまたは想起する際に、頭部の特定の部分で脳波の振幅の減衰が

みられる現象である。振幅の減衰がみられる場所は、運動をおこなう又は想起する体の部位によって異なる。例えば右手の運動の場合、頭頂部の左側で振幅の減衰がみられる。この脳波は特定の波形ではなく振幅の減衰を計測するものであるため、計測が容易である。そのため、加算平均などの脳波データからノイズを除去するための処理をおこなうことなく脳波を判別することが可能である。よって、脳波データの処理にかかる時間が少ない分、命令から実行までのタイムラグの小さい BMI を実現することができる。

また、ERD は右手の運動、左手の運動など脳波を発生させる条件そのものに方向の概念を含んでいるものがある。そのため、物を動かす、移動するといった動作を、方向の概念を含む ERD を利用した BMI でおこなう場合は直感的な操作をおこなうことができる。このように物体の「移動」をおこなうような機械を作製する場合には ERD が適している。よって本論文は ERD を用いた「移動」をおこなう BMI を提案する。

4 脳波計について

本稿では、BMI に使用する脳波計について検討する。

BMI を普及させるためには多くの人に脳波計を購入してもらう必要がある。しかし、数千万する研究用の脳波計を用いて BMI を製作してしまうと、その BMI を個人で購入することができる人は必然的に少なくなってしまう。安価な脳波計を使用して BMI を製作することは必須事項である。同時に、BMI を普及させるためには、大量生産可能な BMI でなくてはならない。

BMI を普及させるためには誰にでも簡単に使えるものでなければならない。使用する際に専門知識を必要とする仕組みでは、ほとんどの人が BMI を使用することができなくなってしまう。可能ならば、製作する BMI は使用する際に使い方を勉強する必要が少なくらいに簡単なものが好ましい。

EEG は非常に微弱であるため、計測する際には導電性ペーストを用いることが多い。しかし、実用化という観点から考えると、使用するたびに頭部を洗浄する必要がある導電性ペーストを用いることは好ましくない。計測の前後に頭部の洗浄を必要としない脳波計及び計測手法

性能が高い脳波計ほど電極数が多くなる傾向がある。しかし、専門知識のない人が脳波計を使用することを考えると、関係のない大量の電極は混乱を招くだけであり、コストの無駄である。BMI に使用する必要最低限の電極だけを持った脳波計を使用すべきである。

BMI の利点の一つとして、手を使用しないインターフェースであるという点が挙げられる。この利点を活かすためには BMI を使用している最中でも、他の行動をおこなうことができるようにしなければならない。しかし、従来の EEG の測定装置では、被験者は大量の有線ケーブルに繋がれた状態で計測をおこなわなければならないので行動が制限されてしまう。できる限り手軽な拘束性の低い脳波計を使用する必要がある。

これらの条件を踏まえて我々は、Polymate Mini AP108 という脳波計に注目した。この脳波計は計測の際に導電性ペーストを頭部に塗布する必要がない。よって、使用する際に頭部を洗浄する必要がない。計測データを無線で送信できるので計測の際にコードで動作が制限されることがなく、手軽に使用することができる。

また、この AP108 は正しくは生体計測装置というものであり、脳波計のみではなく様々な用途で用いることができ

る。そのため、純粋な脳波計に比べると比較的需要が高く、低価格で生産性が高い。また電極の位置や数を自分で調節できるため、BMIに必要な分の電極だけを持たせた脳波計を作製することができる。

5 BMI の構想

ERD を用いた BMI の先行研究では、右手、左手、両足の ERD を移用して車椅子を制御する BMI が研究されていた。この BMI は右手の ERD を検知した場合は右へ、左手の ERD を検知した場合は左へ方向転換をおこなう。両足の ERD を検知した際は前進し、非常ブレーキとしてあごの筋電を使用している。脳波計は車椅子に搭載したノートパソコンに有線ケーブルで接続される。この研究では独自の判別アルゴリズムや被験者の訓練により、信頼度 95%以上、0.125 秒での ERD 判別を可能にしていた。

本論文は、上述の実用化のために必要な条件を踏まえこの先行研究を改良し可能な限り実用化に近い BMI を提案する。

まず、今回提案する BMI は何らかの物体（車いすや VR アバターなど）を二次元方向に制御する BMI を想定する。

Polymate Mini AP108 を用いて事象関連脱同期 (ERD) を計測し、それを利用する BMI を作製する。この BMI は右手の ERD を検知したとき右へ、左手の ERD を検知したときは左へ方向転換し、右手と左手の両方の ERD を同時に検知した際は前進、両足の ERD を検知した際は後退する。また、3D プリンターを用いて電極と AP108 が埋め込まれたヘッドギアを作製する。使用する電極数は 3 種類の ERD を計測するのに必要な最低限の数だけを使用する。

6 期待される BMI の仕様

今回提案する BMI は物体を前後左右の 4 種類の方向に動かすシステムを想定している。理由は、二次元方向上へ何らかの物体を動かすことを想定するならば、操作数が 3 種類以下だと移動をおこなう事すらままならず、インターフェースとしての性能が実用化に足るレベルに達していないと考えられるからである。加えて、前後左右の 4 方向への移動など 4 種類の操作ができることが、BMI を実用化するにあたり最低限必要とされる機能であると考えたからである。今回は二次元上での移動を想定した場合なので、三次元上での移動を想定する場合は、前後左右上下の 6 種類の操作を想定するのが最低限必要な自由度であると考えられる。

他にも、3D プリンターを用いてヘッドギアを製作し、それに Polymate Mini AP108 と使用する電極を埋め込むことで、頭にヘッドギアを装着するだけで専門知識がなくとも誰でも ERD を計測することができる脳波計の製作が期待できる。また、Polymate Mini AP108 は電極部分などを除くと大きさが約 25 cm³、重さが 80g という小型で軽量の生体計測装置である。そのため簡単に持ち運ぶことができ、頭部に装着したままでも軽い運動をおこなうことすら可能である。さらに、この AP108 は Bluetooth を用いて無線で計測データを送信するため、有線ケーブルによって行動が阻害されず、近くに脳波判別をおこなう PC がなくともネットワークを通じてどこからでも BMI を使用することができる。上述のことから、使用する場所や状況、人を選ばない非常に手軽で実用化に近い BMI が期待できる。

しかし、先行研究では 0.125 秒信頼度 95%以上で ERD の判別に成功していたが、今回提案する BMI では計測データを無線で送信し判別をおこなうという手法をとっているた

め、多少のタイムラグが発生すると考えられる。使いやすさや入手のしやすさといった点では実用化に近い BMI を提案することができたが、性能に関しては若干の不安が残る。高速で移動する物体などを操作する BMI には向かないだろう。

7 終わりに

本稿では、様々な脳活動計測手法を概観し、それぞれの計測法が BMI の構築に向いているかどうかについて考察した。そして、特に、ERD を用いた BMI の提案と特徴について述べた。さらに、ERD を用いた BMI を構築するうえで、具体的に適した脳波計の機種 Polymate Mini AP108 についても述べた。Polymate Mini AP108 を用いた BMI は、前述のように、健常者、身障者を問わず広く普及させることができる、日常使用を目的とした BMI、すなわち実用化に近い BMI となりうる。しかし、今回は脳波の判別アルゴリズムや被験者の熟練度の影響については検討していないので、そちらの方も検討し、高速で移動する物体を操作できる BMI について提案していきたい。

8 参考文献

- [1]高橋 光, 郷古 学, 伊藤 宏司 (2009) 「運動想起フィードバック訓練による事象関連脱同期(ERD)出現の検証」『システム制御情報学会論文誌』 pp.199-205. システム制御情報学会
- [2]成瀬 康(2014)『NICT NEWS』独立行政法人情報通信研究機構
- [3]高倉 大匡 (2015) 「近赤外線分光法」『Equilibrium Res Vol. 74』 pp.552-556. 日本めまい平衡医学会
- [4]宮内 哲 (2013) 「ヒトの脳機能の非侵襲的測定」『心理学評論 56 卷 3』 pp.414-454. 心理学評論刊行会
- [5]廣永 成人, 飛松 省三, 重藤 寛史, 萩原 綱一, 緒方 勝也 (2011) 「脳磁図モノグラフ」<https://www.med.kyushu-u.ac.jp/neurophy/monograph.pdf>
- [6]平田 雅之 (2016) 「体内埋込型ブレイン・マシン・インタフェース」『神経治療学, Vol. 33, No. 3,』 pp. 399-404. 日本神経治療学会
- [7] (2017) 「脳波で電動車いすをリアルタイム制御」<http://www.riken.jp/pr/press/2009/20090629/>