

ブレイン・コンピュータ・インターフェース概説

有住 なな

私たちの脳は、肉体というインターフェースを介して世界と繋がっている。ブレイン・コンピュータ・インターフェース (BCI) とは、インターフェースとしての肉体を排除し、脳で考えただけで世界と繋がる SF のようなインターフェースである。BCI の起源は 1970 年代にまで遡るが、OR 関連技術も含めた様々な要素技術の進歩に後押しされ、特に今世紀に入ってから急速な発展を見せている。本稿では BCI の構成要素や、それらを支える要素技術を、歴史的発展を交えつつ紹介する。本稿が、様々な専門分野を持つであろう読者の BCI に対する興味を喚起し、それが今後の BCI のさらなる発展の契機となれば幸いである。

キーワード：ブレイン・マシン・インターフェース、ブレイン・コンピュータ・インターフェース、BCI, BMI

1. はじめに

私たちは外界の情報を視覚や聴覚などの感覚器官を使って取得し、得られた情報を脳で処理し、体を使い外界に作用を及ぼすことで、外界と双方向に影響を与えあっている。例えば、視覚を用いて映像を取得し、言葉を発したり、足を使って移動するなどして外界に作用を与えている。言い換えれば、私たちは、体という通信経路を用い、外部と情報の入出力を行い、脳を使い、その情報の処理を行い、そこから新しく情報を生み出しているとも言える。図 1 に示すとおり、人間から外界への情報の伝達は、脳から出た命令が、筋肉を動かす、腕や足、あるいはキーボードなどのエフェクターに作用することで行われる。このとき、脳から出た命令を筋肉を介さずに直接コンピュータで読み取り、義手を動かしたり、各種機器を操作する試みが行われている。また、これとは逆に外界から脳への情報の入力に関しても、聴覚の役割をする機器である人工内耳や、通称バイオニック・アイと呼ばれる眼に代わる機械をエフェクターとして用い脳に直接入力する試みもなされている。これらを総称してブレイン・コンピュータ・インターフェース (BCI: Brain Computer Interface)、もしくは、ブレイン・マシン・インターフェース (BMI: Brain Machine Interface) と呼び、国内外で研究が盛んに行われている。つまり、BCI とは、通信経路の隘路としての肉体を排除し、感覚器官を介さずに脳に直接情報を入力したり、脳から出力される

信号を直接機械で読み解き、機械を用い外部との通信を行うことを目指す研究分野と言える。例えば、BCI を用いれば脳で考えるだけで義手や義足を意のままに操ることも可能であり、体の不自由な人に特に役に立つ技術であると言える。また、BCI を使い、体の動きをアシストすることでリハビリテーションを効率的に行うことも可能である。現在、数多くの研究がなされているパワードスーツと通称される外骨格のように体の一部が不自由になった人をサポートするシステムにおいても、一部の神経や筋肉の動きを感知して機器を動かすだけでなく、脳からの命令を直接読み解くことで動きをよりスムーズなものにすることができる。さらに、この技術が発達することで、健康者であっても個々人が筋肉を使って外界に作用を及ぼすよりもはるかに高速に情報伝達をすることも可能となる。例えばゲームのコントローラーなどに応用する試みや [1]、ホングのアシモを考えるだけで操作することにも成功しており [2]、BCI によってまったく新しい技術革新が引き起こされる可能性もあるだろう。初期の BCI の研究は、1970 年代からアメリカの国防高等研究計画局 (DARPA) により進められた [3, 4]。その後、脳の電気活動を読み取る様々な脳イメージング技術の発展に伴い、1990 年代中頃より開発は大きく加速され [5]、現在でも多くのプロジェクトが行われており、これから先、さらなる発展が期待される。本稿では外部機器の操作を中心として、BCI について解説する。筆者は国内外の複数の研究機関において研究活動をした経験があり、それには海外での BCI に関する研究や、応用数学やグラフ理論などのオペレーションズ・リサーチに関連する研究も含まれている。本稿では、その経験をもとに BCI の概要を解説し、またオペレーションズ・

ありずみ なな

株式会社東芝 半導体研究開発センター

〒212-8520 神奈川県川崎市幸区堀川町 580-1

nanal.arizumi@toshiba.co.jp

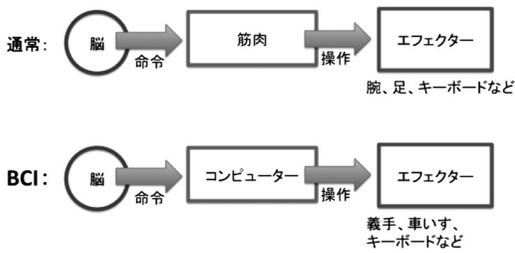


図1 脳からの命令の伝達経路

りサーチでもなじみの深い技術がどのようにBCIの分野で活用されているかについても紹介する。まず2節では、BCIの主要な構成要素を概観し、各要素について簡単に説明する。次に、BCIにおいて最重要な構成要素でありバリエーションも多い脳信号の読み取り方式についての研究を3節で詳しく説明する。

2. BCIの構成要素と脳信号の処理手順

脳は神経細胞のネットワークからなっている。このネットワークは化学物質を用いた電気信号でコミュニケーションを行っている。脳の神経細胞ネットワークは、さらに神経を通し体中に繋がり、筋肉や感覚器官に電気信号が伝達される。ここで、脳から出力される電気信号を直接データとして読み取ることで、筋肉や感覚器官に送られる情報を読み解くことが原理的には可能である。図2に標準的なBCIの構成要素を示す。BCIを実現するには、神経工学、電気工学、信号処理、機械学習、ロボット工学など非常に多くの分野の技術が必要となる。特に信号処理や機械学習においては、オペレーションズ・リサーチ分野でもなじみの深い要素技術が活用されBCIの実現に貢献している。以下、BCIのそれぞれの構成要素を簡単に説明する。

2.1 レコーディング

最初に脳信号を読み取る必要がある。読み取る方法にはいくつかの種類があるが、大まかに分けて頭蓋骨の上から計測する非侵略式、頭蓋骨と脳の間で計測する低侵略式、脳に直接電極を刺して、局所的な活動電位を計測する侵略式に分けられる。これらの各種方式には情報の正確性と計測の安全性のトレードオフがあり、求められる精度などを考慮し、正確性と安全性を天秤にかけて計測手法を選ぶことになる。レコーディングは様々な種類や実装方法があるため、次節において、計測手法ごとに実例をあげて現在の研究成果を紹介する。

2.2 信号処理・特徴量抽出

次に、読み取ったデータを信号処理の手法を用いノイズを除去し、増幅し、そこから時系列、周波数など



図2 BCIの主な構成要素

の特徴量を抽出する。周波数の調整により有益な情報が得られることがわかっている[6, 7]。しかし、被験者により周波数域は変動する[8]ため、周波数解析の高い精度が求められる[9]。また、脳信号は非定常であるので、時系列解析が重要となる。実際、フーリエ変換による周波数解析に比べ、時間周波数解析を用いたBCIは高性能であると[10, 11]に示されている。時間周波数解析のためには、一般的に離散ウェーブレット変換(DWT)か連続ウェーブレット変換(CWT)が用いられる[12]。

2.3 ディコーディング

次に、これから情報を機械学習の手法で読み解く必要がある。一般的に回帰分析[13]もしくは統計分類[14]手法が取られる[15]。例えば、線形分類器[16, 17]、サポートベクターマシーン[18, 19]、ニューラルネットワーク[20]、回帰ニューラルネットワーク[21]が使われ、[12, 15]に詳しい。

2.4 エフェクター

最後に、機械学習で読み解かれたデータを、カーソル[22, 23]、キーボード[24]、車いす[25, 26]、義肢の神経(neural prosthetics)[24, 25, 27~29]にあたる機械(エフェクター)に繋ぐことで、脳の意思が外部に伝わることとなる。脳への入力の場合はこの逆の処理を行う。

3. 脳信号の読み取り手法

脳信号を読み取る手法としては、どれだけ局所的に調べるかが重要になる。 α 波や β 波などの脳波は、神経細胞のネットワークから作られる電気信号の波で計測は比較的簡単であるが、得られる情報量は少ない。反対に、もっと局所的なデータであれば、脳は部位ごとに違う機能を持っているため、それらの事前知識を用いることでより多くの情報を得ることができる。例えば、腕を動かそうと考えることで、実際に腕を動かさなくても、脳にある腕の運動を制御する部位が反応する。動かそうという意思を司る脳の機能は脳の深部にあり直接計測することは難しいが、感覚皮質という

脳の外側にある計測が比較的容易な部位が体の動きと関連していることが知られており、この部位を計測することで脳が腕の運動を行おうとしていることを検知することができる。体のどの部分と脳のどの部位が関連するかは知られており、これをホムンクルスと呼び、ペンフィールドの地図に詳しい。つまり、脳の局所的な部位を計測することで、脳が体へ出しているコマンドを読み取ることが可能になる。体に障害があり、動かなくなる、もしくは体の一部がなくなった場合でも感覚皮質の機能はその後長く残っているため、体の不自由な人の脳でも同じように観測される。同じように、健常者の場合は、実際に体を動かさなくとも、動かすことを仮想すれば脳の活動は同じになる。また、神経は外部の刺激から新しく学び、その構造を変える可塑性という性質を持っている。したがって、BCIを介して新しい機械を繋ぐことで、脳はそれをあたかも自身の手足のように動かすことを学習することができる。例えば、Ottobock社などが開発している筋電義手などのように切断した部分の神経を義肢に繋ぐ技術では、使えるようになるまで習得に時間がかかるものの、通常のリハビリテーションと同じように学習することが可能である。

前節で述べたように、脳信号の読み取り手法によって、方法論は大きく変わる。例えば、安全性を重視した非侵略式では、得られる情報量は少なくなるが、一般に実験の承認は速やかに行われ、より多くの実験が行うことができ、新しい知見が多く生み出されることが多い。ここでは、読み取り手法に着目し、現在、どのような研究がなされているかを紹介する。

3.1 侵略式 (Invasive BCI)

脳の表面部分の神経細胞が集まっている灰白質と呼ばれる部位に外科的手術で電極を直接埋め込む方式を侵略式と呼ぶ。この方式で得られるシグナルは他の方式よりもノイズが少なく質が高いが、脳組織を傷つけるので危険性が高く、また瘢痕組織が作られることで時間の経過とともにシグナルの質が落ちていくという負の側面もある。また、脳が体に出すシグナルは脳の部位によって変わるため、何をデコードしたいかに合わせて、電極を埋める場所を注意して決める必要がある。まず、侵略式 BCI では、運動野に電極を直に刺し、その脳神経の発火パターンと体の動きの関係を調べることで、脳から出るシグナルから体の動きを予測する研究がある。この場合、電極一つでは十分な情報が得られないことがわかっているため、複数の電極から構成される電極アレイと呼ばれる機器を埋めるこ

とになる。1990年代から、サルを被検体とした運動野を読み取る研究が行われ、2000年には Duke 大学の Miguel Nicolelis のグループがサルの動きをリアルタイムに予測することに成功した [30]。のちに、サルに機械の腕を見せることで、それを自分の腕として動かすように学習させる研究も報告されている [31, 32]。Brown 大学の John Donoghue [33] や、Pittsburgh 大学の Andrew Schwartz [34]、Caltech の Richard Andersen のグループ [35] でも、サルを被検体として侵略式 BCI の実験を行っている。Schwartz のグループが行ったサルが機械の腕を用いて食べ物を取る実験は YouTube で公開されている [36]。1998 年に、Emory 大学の Philip Kennedy と Roy Bakay が体の動かせない人間に対しての侵略式 BCI を初めて成功させた。これにより、脳機能自体は正常であるが、体は一切動かさず、また発話によるコミュニケーションもできない、いわゆる“閉じ込め症候群”の患者に神経親和性のある化学物質と一緒に電極を埋めることにより神経と電極をつなげ、オン/オフでコンピュータのカーソルを動かすことを学習させることができるようになった [37]。Kennedy はその後、Neural Signals 社を立ち上げ、現在も臨床試験のための閉じ込め症候群の患者を募集している。Brown 大学の John Donoghue のグループは、2004 年から 2005 年にかけての 9 カ月間行われた人間を被検体にした実験において、初めて四肢麻痺の患者に考えるだけで機械の腕を動かさせることに成功した [38]。同じ技術により、この患者はコンピュータのカーソルも動かすことが可能になり、多くのインターフェースを使うことが可能になった。これに使われたインプラントのシステムは BrainGate と呼ばれ、Brown 大学と Donoghue らにより設立された Cyberkinetics 社により開発された。現在、BrainGate は BrainGate 社が知的財産を持ち、さらなるシステムの開発を行い、大学や病院と臨床試験を行っている。2012 年には、体が麻痺した女性が BrainGate のシステムを使い機械の腕をエフェクターとして飲み物の入ったボトルをつかみ、それを飲むことに成功しており、その様子は YouTube で公開されている [39]。近年、侵略式 BCI を用いての機械の腕のコントロールはさらに発展しており、アメリカ合衆国退役軍人省とともに、Brown 大学の BrainGate グループ [40] や、Pittsburgh 大学の Medical Center [41] などで行われている。

初めて侵略式 BCI を商用化したのは、William Dobbelle という研究者で、視力の回復をある程度可能に

するインプラントのシステムを販売した。大人になってから視力が落ちたり失明した場合、脳自体には視覚から得られた情報を処理する機能が確立され、失明後もそれは残っているため、68チャンネルの電極アレイを視覚野に直接入れることで、視力を失った人が光を見る感覚を取り戻すことができたと報告されている。2002年から16人の患者が手術を受け、そのうちの一人は、研究所の駐車場で車を運転するまでに視力が回復した。しかし、2004年に、開発者のDobelleが技術の公開をせずに死亡したため、このプロジェクト自体が終了し、すべての患者の視力も失われることになった。このプロジェクトは、最初の患者 Jens Naumann の本『A Patient's Account of the Artificial Vision Experiment』に詳しい。BCIによる視力の回復は、バイオティク・アイと通称され、現在、関連研究が世界中で続けられている。

3.2 低侵略式 (Partially invasive BCI)

電極を直接灰白質に入れる危険性を排除するため、頭蓋骨の下、脳の上に電極を入れる方法を低侵略式と呼ぶ。皮質脳波検査 (ECoG) という手法は脳の活動を電気信号として計るという点では頭蓋骨の外から計る点と同じだが、侵略式よりも安全でかつ、シグナルのノイズも少なく、神経細胞の発火を一つずつ調べるよりも長期的に使える。また、重症な癲癇の患者に対して行う手術の前に ECoG を用いて問題のある位置を限局化する必要があるため、その際に実験を行うことができる。しかし、実験の難しさのため、この研究は、まだ始められたばかりである。初めて人での ECoG を用いた実験は Washinton 大学の Eric Leuthardt と Daniel Moran によって 2004 年に行われた [42]。この実験で、患者はスペースインベーダーというゲームを BCI を用いて遊ぶことができた。国内では、大阪大学、東京大学、ATR のグループが ECoG を使い人が機械の腕を制御する研究を行っている [43]。また、アメリカ陸軍主導によるテレパシー・コミュニケーション・デバイスの開発において ECoG を用いた発声研究が行われ、顔に關係する運動野において母音や子音の発声についての多くの知見が得られている [44, 55]。

ECoG の電極アレイは脳の表面上に固定して取り付けることとなる。しかし、脳の形状や、各部位が持つ機能には個人差があるため、ECoG の電極を各被験者の脳のどの位置に取り付けると精度の良いシグナルを得られるかは難しい課題の一つである。大阪大学の平田雅之らはこの課題に取り組んでおり、ECoG の電極アレイを一人ずつの脳に合わせて作り出す方法を開発

した [45]。

現在、サルを被検体とした ECoG の研究が盛んである。理研の藤井直孝のグループでは、64チャンネルの ECoG から取得された脳のシグナルデータと、それに対応するサルの腕の位置を表したデータを公開している [46]。このようなデータが公開されることはまれであり、このデータを活用することで、様々な機械学習の手法を用いて、腕の位置を予測する実験をすることが可能である [47, 9]。興味のある読者には、試してみることが推奨する。

3.3 非侵略式 (non-invasive BCI)

外科的手術の危険性をさけて他の神経画像技術を用いた BCI を非侵略式と呼ぶ。侵略式と比べると、シグナルにノイズが多くのもっており、またコントロールは難しく訓練にも時間がかかってしまう。しかし、その一方で、取り付けははるかに簡単であり、また何よりも安全であるため、健常者への BCI としては有力な選択肢であると言える。非侵略式には多くの方法があるが、頭皮につけた電極を用いて脳内の電流を計る、脳波計測 (EEG) と呼ばれる手法が主流である。EEG 自体は古くから知られ、1924 年には人の脳波が測定されたという記録が残っている [48]。EEG で計測される脳波を読み取り、それによりエフェクターを動かすことで BCI を構成することができる。これには、運動から計測される Mu 波や Beta 波といった自分でコントロールできる脳波を使い、エフェクターを操作する手法と人が何かに気づいたときに無意識下で出る P300 波を使った手法がある。例えば、Minnesota 大学の Bin He のグループでは、運動野から観測される脳波を用いて仮想ヘリコプターを 3 次元方向で動かすことに成功している [49]。また、カリフォルニア大学 Irvine 校の Zoran Nenadic のグループでは運動を仮想することでロボットの足をコントロールすることに成功している [50]。この実験映像は YouTube で公開されている [51]。1980 年代より、P300 波を使った研究はなされており [52]、閉じ込め症候群の患者とのコミュニケーションをとる手段として応用された。このような EEG の研究は [7] に詳しい。DARPA による 'Silent Talk' プロジェクトでは EEG を用い言語が発せられる前にその内容を読み取ることを目標に研究が進められている。標準的な EEG においては、電極を頭皮に取り付けるためにジェルを用いる。このため取り付けに時間がかかり、またジェルが乾燥するとデータが採取できなくなる。そのため、ジェルのいらぬ EEG の研究も進められている。その一つに、イリノイ大学

Urbana-Champaign 校の John Rogers のグループで 2011 年に開発された小型で頭皮に貼ることができ、タトゥーシールのような弾力性のある形状の Epidermal electronics[53] がある。これは、標準的な EEG と違い、読み取れる情報は少ないが、頭皮に貼り付けるために細胞の代謝が起きるまでデータを採取し続けることができる。このような簡易な EEG は健常者の新しいコントローラーとして期待される。2006 年に初めて Sony が特許を取得してから、多くの製品化が行われている。2007 年には NeuroSky から、初めてのコンシューマーゲーム機用コントローラーとして MindSet が発売された。その後、2009 年に発売された同社の Mindflex は、EEG を用いたゲームとしては最大の売り上げとなっている。2011 年に Neurowear から発売された necomimi は、EEG を用いカチューシャに取り付けた猫耳を動かす玩具であり、Time Magazine でその年の最高の発明品 50 に数えられた。

EEG 以外の非侵略式 BCI の手法としては、fMRI と呼ばれる脳の血流動態反応を計測し視覚化する技術を BCI として応用する例もある [54, 55]。例えば、fMRI をリアルタイムで用いることで Pong という卓球に似せたゲームを 2 人で行うことができる [56]。また、近赤外分光計測 (NIRS) という脳内血流の変化を近赤外光によって計測する方法も近年注目されている。島津製作所がリアルタイムの NIRS の開発、発売をしている [57]。これは従来のものよりもチャンネル数が多く、EEG と組み合わせることでより高精度な非侵略式 BCI が可能になる。例えば、島津製作所、ホンダ、ATR のグループは NIRS と EEG を組み合わせ、人が腕を動かすと考えることで、人型ロボット・アシモの腕を動かすことに成功したと発表した [2]。さらに、NTT、積水ハウス、ATR のグループは体の不自由な人のために生活環境に適した BCI を各種センサーと共に配備した家、BMI ハウスの研究を行っている [58]。他に、脳磁図 (MEG) と呼ばれる脳の電気活動から生じる磁場を計測する方法も非侵略式 BCI で利用することができる [59]。MEG は地磁気などの外部の磁場の影響を排除するために磁気的にシールドされた部屋が必要で多額の費用がかかるが、頭蓋骨の影響を受けずにデータを取得できるという利点がある。

4. まとめ

BCI は多くの分野にまたがる研究である。神経科学で得られる知見を利用し、電気工学の手法で読み取られた脳のデータは信号処理され、機械学習の技術で読

み解かれ、ロボットなどの外部機器にインターフェースされ、リアルタイムに制御される。このような多岐にわたる研究の複雑さを解消するため、BCI2000 という汎用性のあるプラットフォームが開発されている [60] が、多くの研究では、未だに単一の目的のためにシステムが組まれているのが実情である。つまり、オペレーションズ・リサーチを含めた多くのバックグラウンドを持った研究者が共同で研究することで初めて BCI の技術は大きく進歩すると言えるが、それゆえに困難も多い。しかし、BCI はまったく新しい分野であり、肉体という制限を取り除くことで得られる見返りは計り知れない。また、脳は、どのようなコンピュータよりも高度な情報処理ができる器官である。つまり脳を深く理解することは新しい発見に繋がる可能性があり、実際の脳信号を扱う BCI 研究はその観点で特に有望な研究分野であると言える。本稿が、BCI に対する読者の興味や理解を促進する契機となり、さらにそれが将来的な BCI の発展の一助となれば幸甚である。

参考文献

- [1] A. Nijholt, D. P.-O. Bos and B. Reuderink, "Turning shortcomings into challenges: Braincomputer interfaces for games," *Entertainment Computing*, **1**, pp. 85–94, 2009.
- [2] HONDA. [Honda, ATR, 島津製作所が共同で、考えるだけでロボットを制御する BMI 技術を開発], <http://www.honda.co.jp/news/2009/c090331.html?from=whatsnew> (2015 年 2 月 25 日閲覧)
- [3] J.-J. Vidal, "Toward direct brain-computer communication," *Annual review of Biophysics and Bioengineering*, **2**, pp. 157–180, 1973.
- [4] J. J. Vidal, "Real-time detection of brain events in EEG," In *Proceedings of the IEEE*, **65**, pp. 633–641, 1977.
- [5] M. A. Lebedev and M. A. Nicolelis, "Brain-machine interfaces: Past, present and future," *TRENDS in Neurosciences*, **29**, pp. 536–546, 2006.
- [6] D. Cheyne, S. Bells, P. Ferrari, W. Gaetz and A. C. Bostan, "Self-paced movements induce high-frequency gamma oscillations in primary motor cortex," *Neuroimage*, **42**, pp. 332–342, 2008.
- [7] J. R. Wolpaw, N. Birbaumer, D. J. McFarland, G. Pfurtscheller and T. M. Vaughan, "Braincomputer interfaces for communication and control," *Clinical Neurophysiology*, **113**, pp. 767–791, 2002.
- [8] G. Schalk, K. J. Miller, N. R. Anderson, J. A. Wilson, M. D. Smyth, J. G. Ojemann, D. W. Moran, J. R. Wolpaw and E. C. Leuthardt, "Twodimensional movement control using electrocorticographic signals in humans," *Journal of Neural Engineering*, **5**, p. 75, 2008.
- [9] A. Eliseyev and T. Aksenova, "Recursive N-way partial least squares for brain-computer interface," *PLoS One*, **8**, e69962, 2013.
- [10] B. Bostanov, "BCI competition–Data sets Ib and IIb: Feature extraction from event-related brain po-

tentials with the continuous wavelet transform and the t-value scalogram,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **51**, pp. 1057–1061, 2004.

- [11] L. Qin, B. Kamousi, Z. M. Liu, L. Ding and B. He, “Classification of motor imagery tasks by means of time-frequeuncyspatial analysis for braincomputer interface applications,” In *Proceedings of IEEE-EMBS Conference on Neural Engineering*, pp. 374–376, 2005.
- [12] A. Bashashati, M. Fatourech, R. K. Ward and G. E. Birch, “A survey of signal processing algorithms in braincomputer interfaces based on electrical brain signals,” *Journal of Neural Engineering*, **4**, R32–R57, 2007.
- [13] D. J. McFarland and J. R. Wolpaw, “Sensorimotor rhythm-based brain-computer interface (BCI): Feature selection by regression improves performance,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **13**, pp. 372–379, 2005.
- [14] W. D. Penny, S. J. Roberts, E. A. Curran and M. J. Stokes, “EEG-based communication: A pattern recognition approach,” *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, **8**, pp. 214–215, 2000.
- [15] F. Lotte, M. Congedo, A. Lécuyer, F. Lamarche and B. Arnaldi, “A review of classification algorithms for eeg-based braincomputer interfaces,” *Journal of Neural Engineering*, **4**, R1–R13, 2007.
- [16] G. Pfurtscheller and F. H. Lopes da Silva, “Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: Basic principles,” *Clinical Neurophysiology*, **110**, pp. 1842–1857, 1999.
- [17] R. Scherer, G. R. Müller, C. Neuper, B. Graitmann and G. Pfurtscheller, “An asynchronously controlled EEG-based virtual keyboard: Improvement of the spelling rate,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **51**, pp. 979–984, 2004.
- [18] D. Garrett, D. A. Peterson, C. W. Anderson and M. H. Thaut, “Comparison of linear, nonlinear, and feature selection methods for EEG signal classification,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **11**, pp. 141–144, 2003.
- [19] A. Rakotomamonjy, V. Guigue, G. Mallet and V. Alvarado, “Ensemble of SVMs for improving brain computer interface P300 speller performances,” In *Artificial Neural Networks: Biological Inspirations-ICANN 2005*, pp. 45–50, 2005.
- [20] A. Subasi and E. Ercegebi, “Classification of EEG signals using neural network and logistic regression,” *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **78**, pp. 87–99, 2005.
- [21] A. Petrosian, D. Prokhorov, R. Homan, R. Dasheiff and D. Wunsch, “Recurrent neural network based prediction of epileptic seizures in intra- and extracranial EEG,” *Neurocomputing*, **30**, pp. 201–218, 2000.
- [22] J. R. Wolpaw, D. J. McFarland, G. W. Neat and C. A. Forneris, “An EEG-based brain-computer interface for cursor control,” *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, **78**, pp. 252–259, 1991.
- [23] S. P. Kim, J. D. Simeral, L. R. Hochberg, J. P. Donoghue and M. J. Black, “Eural control of computer cursor velocity by decoding motor cortical spiking activity in humans with tetraplegia,” *Journal of Neural Engineering*, **5**, p. 455, 2008.
- [24] N. Birbaumer, N. Ghanayim, T. Hinterberger, I. Iversen, B. Kotchoubey, A. Kübler, J. Perelmouter, E. Taub and H. Flor, “A spelling device for the paralysed,” *Nature*, **398**, pp. 297–298, 1999.
- [25] J. R. Millán, F. Renkens, J. Mourinho and W. Gertner, “Noninvasive brain-actuated control of a mobile robot by human EEG,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **51**, pp. 1026–1033, 2004.
- [26] F. Galán, M. Nuttin, E. Lew, P. W. Ferrez, G. Vanacker, J. Philips and R. Millán Jdel, “A brain-actuated wheelchair: Asynchronous and non-invasive braincomputer interfaces for continuous control of robots,” *Clinical Neurophysiology*, **119**, pp. 2159–2169, 2008.
- [27] B. Obermaier, G. R. Müller and G. Pfurtscheller, “Virtual keyboard’ controlled by spontaneous EEG activity,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **11**, pp. 422–426, 2003.
- [28] J. D. Bayliss, “Use of the evoked potential P3 component for control in a virtual apartment,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **11**, pp. 113–116, 2003.
- [29] M. A. L. Nicolelis and J. K. Chapin, “Controlling robots with the mind,” *Scientific American*, **287**, pp. 46–53, 2002.
- [30] J. Wessberg, C. R. Stambaugh, J. D. Kralik, P. D. Beck, M. Laubach, J. K. Chapin, J. Kim, S. J. Biggs, M. A. Srinivasan and M. A. L. Nicolelis, “Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates,” *Nature*, **408**, pp. 361–365, 2000.
- [31] J. M. Carmena, M. A. Lebedev, R. E. Crist, J. E. O’Doherty, D. M. Santucci, D. F. Dimitrov, P. G. Patil, C. S. Henriquez and M. A. Nicolelis, “Learning to control a brainmachine interface for reaching and grasping by primates,” *PLoS Biology*, **1**, E42, 2003.
- [32] M. A. Lebedev, J. M. Carmena, J. E. O’Doherty, M. Zacksenhouse, C. S. Henriquez, J. C. Principe and M. A. Nicolelis, “Cortical ensemble adaptation to represent velocity of an artificial actuator controlled by a brain-machine interface,” *The Journal of neuroscience*, **25**, pp. 4681–4693, 2005.
- [33] M. D. Serruya, N. G. Hatsopoulos, L. Paninski, M. R. Fellows and J. P. Donoghue, “Brain-machine interface: Instant neural control of a movement signal,” *Nature*, **416**, pp. 141–142, 2002.
- [34] D. M. Taylor, S. I. H. Tillery and A. B. Schwartz, “Direct cortical control of 3D neuroprosthetic devices,” *Science*, **296**, pp. 1829–1832, 2002.
- [35] S. Musallam, B. D. Corneil, B. Greger, H. Scherberger and R. A. Andersen, “Cognitive control signals for neural prosthetics,” *Science*, **305**, pp. 258–262, 2004.
- [36] Monkey controls robotic arm with brain computerinterface, <https://www.youtube.com/watch?v=gnWSah4RD2E> (2015 年 2 月 25 日閲覧)
- [37] P. R. Kennedy and R. A. Bakay, “Restoration of neural output from a paralyzed patient by a direct brain connection,” *Neuroreport*, **9**, pp. 1707–1711, 1998.
- [38] L. R. Hochberg, M. D. Serruya, G. M. Friehs, J. A. Mukand, M. Saleh, A. H. Caplan, A. Branner, D. Chen, R. D. Penn and J. P. Donoghue, “Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia,” *Nature*, **442**, pp. 164–171, 2006.

- [39] Thought control of robotic arms using the brain-gatesystem, <https://www.youtube.com/watch?v=QRt8QCx3BCo> (2015年2月25日閲覧)
- [40] L. R. Hochberg, D. Bacher, B. Jarosiewicz, N. Y. Masse, J. D. Simeral, J. Vogel, S. Haddadin, J. Liu, S. S. Cash, P. van der Smagt, et al., “Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm,” *Nature*, **485**, pp. 372–375, 2012.
- [41] J. L. Collinger, B. Wodlinger, J. E. Downey, W. Wang, E. C. Tyler-Kabara, D. J. Weber, A. J. McMorland, M. Velliste, M. L. Boninger and A. B. Schwartz, “High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia,” *The Lancet*, **381**, pp. 557–564, 2013.
- [42] E. C. Leuthardt, G. Schalk, J. R. Wolpaw, J. G. Ojemann and D. W. Moran, “A braincomputer interface using electrocorticographic signals in humans,” *Journal of Neural Engineering*, **1**, p. 63, 2004.
- [43] T. Yanagisawa, M. Hirata, Y. Saitoh, H. Kishima, K. Matsushita, T. Goto, R. Fukuma, H. Yokoi, Y. Kamitani and T. Yoshimine, “Electrocorticographic control of a prosthetic arm in paralyzed patients,” *Annals of Neurology*, **71**, pp. 353–361, 2012.
- [44] S. Kellis, K. Miller, K. Thomson, R. Brown, P. House and B. Greger, “Decoding spoken words using local field potentials recorded from the cortical surface,” *Journal of Neural Engineering*, **7**, 056007, 2010.
- [45] X. Pei, D. L. Barbour, E. C. Leuthardt and G. Schalk, “Decoding vowels and consonants in spoken and imagined words using electrocorticographic signals in humans,” *Journal of Neural Engineering*, **8**, 046028, 2011.
- [46] Food-Tracking Task, <http://neurotycho.org/epidural-ecog-food-tracking-task>, <http://neurotycho.org/food-tracking-task> (2015年2月25日閲覧)
- [47] K. Shimoda, Y. Nagasaka Z. C. Chao and N. Fujii, “Decoding continuous three-dimensional hand trajectories from epidural electrocorticographic signals in japanese macaques,” *Journal of Neural Engineering*, **9**, 036015, 2012.
- [48] L. F. Haas, “Hans Berger (1873–1941), Richard Caton (1842–1926), and electroencephalography,” *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, **74**, p. 9, 2003.
- [49] A. J. Doud, J. P. Lucas, M. T. Pisansky and B. He, “Continuous three-dimensional control of a virtual helicopter using a motor imagery based brain-computer interface,” *PLoS One*, **6**, e26322, 2011.
- [50] A. H. Do, P. T. Wang, C. E. King, S. N. Chun and Z. Nenadic, “Brain-computer interface controlled robotic gait orthosis,” *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, **10**, p. 111, 2013.
- [51] Person with paraplegia uses a brain-controlled orthosis to regain walking (4x), <https://www.youtube.com/watch?v=HXNCwonhjG8> (2015年2月25日閲覧)
- [52] L. A. Farwell and E. Donchin, “Talking off the top of your head: Toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials,” *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **70**, pp. 510–523, 1988.
- [53] D. H. Kim, N. Lu, R. Ma, Y. S. Kim, R. H. Kim, S. Wang, J. Wu, S. M. Won, H. Tao, A. Islam, et al., “Epidermal electronics,” *Science*, **333**, pp. 838–843, 2011.
- [54] R. Sitaram, A. Caria, R. Veit, T. Gaber, G. Rota, A. Kuebler and N. Birbaumer, “fMRI brain-computer interface: A tool for neuroscientific research and treatment,” *Computational Intelligence and Neuroscience*, **2007**, Article ID 25487, 2007.
- [55] R. Christopher deCharms, “Applications of real-time fMRI,” *Nature Reviews Neuroscience*, **9**, pp. 720–729, 2008.
- [56] M. Peplow, “Mental ping-pong could aid paraplegics,” *Nature News*, Published online 27 August 2004.
- [57] 株式会社島津製作所, 近赤外光脳機能イメージング装置, http://www.an.shimadzu.co.jp/bio/nirs/nirs_top.htm (2015年2月25日閲覧)
- [58] 国際電気通信基礎技術研究所 (ATR), 日常生活の支援を可能とするネットワーク型ブレイン・マシン・インタフェース (BMI) の技術開発に成功, http://www.atr.jp/topics/press_141204_j.html (2015年2月25日閲覧)
- [59] J. Mellinger, G. Schalk, C. Braun, H. Preissl, W. Rosenstiel, N. Birbaumer and A. Kübler, “An meg-based braincomputer interface (BCI),” *Neuroimage*, **36**, pp. 581–593, 2007.
- [60] G. Schalk, D. J. McFarland, T. Hinterberger, N. Birbaumer and J. R. Wolpaw, “BCI2000: A general-purpose brain-computer interface (BCI) system,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **51**, pp. 1034–1043, 2004.