

平成 27 年 3 月 31 日

プログラム名：脳情報の可視化と制御による活力溢れる生活の実現

PM 名：山川義徳

プロジェクト名：脳ロボティクス

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 26 年度

研究開発課題名：

アンドロイドフィードバック

研究開発機関名：

国際電気通信基礎技術研究所

研究開発責任者

西尾修一

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

従来研究から、ブレイン・マシン・インタフェース（BMI）によりアンドロイドの遠隔操作を行う際、フィードバックの与え方を工夫することで、脳活動の反応パターンを変化させられることがわかっている。H27年度までのステージIでは、まずこの現象の詳細な検証を行い、フィードバック効果の性質を明らかにする。この性質を元に、脳活動パターンを効果的に訓練できる脳波トレーニングの手法を開発する。具体的には、アンドロイド遠隔操作時の脳活動反応の変化について、脳波トレーニングを行う上で必要な時間的・空間的特性の検証を行い、フィードバック効果の性質を明らかにする。また、この知見から、初期的な脳波トレーニング手法を開発する。

本年度は、研究開始にあたっての環境整備を行うとともに、文献や過去の計測データの再解析を通じた実施方針の確定を行う。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

研究計画について、PM・研究総括と議論を定期的に行うとともに、研究員雇用、機器選定・購入、機器操作の基盤ソフトウェアの製作など、研究に必要な準備を進めた。また訓練手法について文献調査を行うとともに、過去の計測データの再解析を行った。更に、操作対象のアンドロイドへの身体感覚転移の基本的な性質に関する実験を行った。

以上の結果から、本年度は当初目標通り順調な進捗を達成している。

2-2 成果

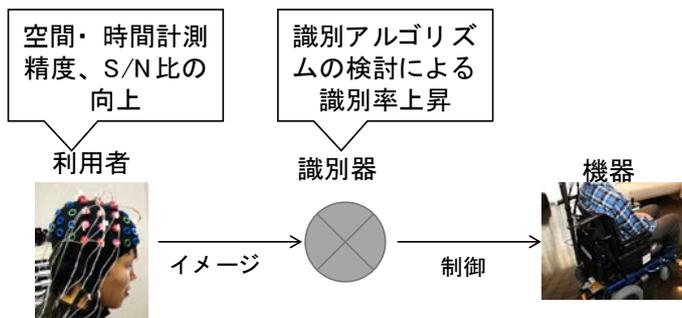
本年度の具体的な成果は以下の2点である：

- 1) アンドロイドのBMI操作のフィードバックによる脳活動の変化は、アンドロイドを操作している時に特有であり、アンドロイド以外のロボットを操作しているときには生じないことを発見した。
- 2) BMIにより操作しているアンドロイドを自分の身体の一部と感じる「身体感覚転移（BOT）」現象の強さは、モーションキャプチャにより遠隔操作をしている時より強くなることを発見した。

以上の実験は、本研究のベースとなっている科研費研究のスタッフと共に実施した。以下、成果の概要を説明する。

BMIは「思っただけで何かを操作する」、すなわち、利用者の脳活動を計測し、そのパターンを識別することで、義手やリモコン、車いすなど外部の機器を操作しようとするものである。脳活動の計測を行うには、神経細胞に直接電極を挿入して計測することが最も効率的であるが、一般の利用者にはこのような侵襲的な手段は難しいため、外科的な処置を行わず、脳の外部から活動を計測し、利用者の意図を推測することになる。このような計測対象の一例が脳波である。脳波は、脳の神経活動の結果、漏れだす電磁波を頭蓋骨の外側から測るものなので、脳の様々な部位での活動が

混ざっており、またノイズも大きく信号自体も弱い。そのため、信号処理やパターン認識処理を行って、得られる信号に含まれるかすかな特徴を抽出しなければならない。また、運動をどの程度「きれい」にイメージできるかも、個人差がかなり大きい。そのため、脳波による BMI システムでの識別率は一般に低く、高い人で 8 割程度、低い人だと 2,3 割しかない（右左の 2 択なのに半分に満たない）。このため、従来の BMI の研究では、計測精度の向上と、計測結果の識別方法の改善、の 2 点が主に研究の焦点となってきた（下図）。



しかし、道具を使い始めたときにはうまく使えなくとも、次第にうまくなっていくことはよくある。では、うまくなるとはどういうことかと考えると、ここでは BMI システムを介して操作を行っているので、脳波が BMI システムにうまく認識されるように変化していく、すなわち、操作する人の脳波の発生パターンが、操作を行うに連れて変わっていくということになる。脳波が変わる、ということは、脳の活動する部位が変わったり、活動量が変わるということである。直感的にはそんなに簡単に脳が変わるわけがないと思える。しかし近年の動物や人の実験で、脳は意外と短時間で変わり得ることがわかってきている。例えば Shibata et al., 2011 は、被験者（人）の視覚野（後頭部にある、目から入ってきた情報を処理する脳の部位）の活動に応じた図形を見せ、被験者に何とかしてその図形を大きくするように、と指示すると、実際に大きくできる、つまり脳活動を変えられることを示している。このような、脳活動に応じた刺激を本人に与えることで、脳の活動を制御しようとする方法は「ニューロフィードバック」と呼ばれ、近年治療などへの応用可能性も含めて研究が始まっている。しかしこのようなニューロフィードバックは、BMI の練習期間も含め、数週間かけてやるのが普通であり、そもそも MRI など精密に脳活動を計測できる装置を使うことが前提である。そのため、ノイズの多い脳波を使って、短時間の練習で脳の活動パターンを変化させ、BMI の性能を向上させられるかが問題となる。

Shibata, Watanabe, Sasaki, and Kawato, Perceptual learning incepted by decoded fMRI neurofeedback without stimulus presentation, Science, 2011, 334(6061):1413-1415.

一般に BMI 研究では、事故などで欠損した腕などの部位を代替する義手を動かすなど、本来の身体動作を代替する機器の動作を目的とすることが多い。この場合、本来の身体の動きを想像し、その想像している脳活動を捉えることが重要となる。しかし、本研究の最終的な目的である、人には本来備わっていない三本目の腕を動かすことを考えると、日常的に行っている身体部位を動かすことを想像するだけでなく、より積極的に、架空の身体部位も含めた動きを強く想像し、意図的に脳

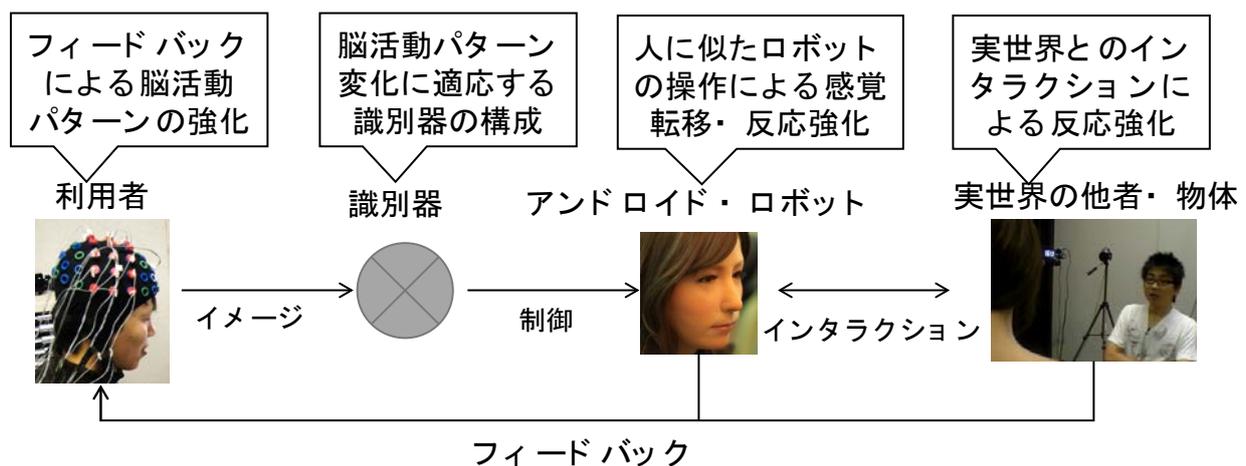
活動を強めることが必要である。すなわち、脳波の発生パターンを自らの意思で制御できることが重要であり、その意味でもフィードバックに基づく訓練が重要となる。

我々のこれまでの研究から、アンドロイドの遠隔操作を行う際に、実際にこのような急速な脳活動パターンの変化が生じることがわかってきた(Alimardani, et al., 2014)。被験者に脳波によるBMIシステムを用いてアンドロイドを操作してもらい、操作中の脳波を計測し、特徴空間上での分離性の変化を求めると、徐々にBMIの正答率が高くなる方向に変化していることがわかった。また別の研究から、BMIの識別率と、アンドロイドへの身体感覚転移(BOT)の強さは相関があることもわかっている(Alimardani, et al., 2013)。このことから、操作対象へのBOTの強さが、BMIの識別率に関連しているのではないかと推測される。すなわち、操作対象を自らの一部のように感じるBOTを強化できれば、BMIの操作性を向上できる可能性がある。

Alimardani, Nishio, Ishiguro, "Effect of biased feedback on motor imagery learning in BCI-teleoperation system", *Frontiers in Systems Neuroscience*, vol. 8, no. 52, April, 2014.

Alimardani, Nishio, Ishiguro, "Humanlike robot hands controlled by brain activity arouse illusion of ownership in operators", *Scientific Reports*, vol. 3, no. 2396, August, 2013.

従来のBMIの研究方法とは異なり、BOTを強化する条件を明確にすることで、BMIシステム自身の性能向上に加えて、システム利用者の「性能」も向上させることで、従来不可能であったり、長い訓練が必要だった高いBMI識別率、すなわち思い通りにロボットなどを動かせるBMIシステムを実現できると考えられる(次図)。人は汎化性に優れているので、一旦BMIを使う能力を確立できれば、他の対象の操作にも高いパフォーマンスを発揮できる可能性がある。つまり、最初はBOTを高く感じられる対象で訓練を行うことで、それ以外の対象の操作もうまくできるようになると考えられる。



しかし、BMIの訓練としてどのような事が行われてきたかを調査すると、従来、訓練の重要性は言われていても、訓練手法自体はほとんど研究されてきていないことがわかる。これまでのBMI研究においても、初見でBMIタスクを行うか、単に同一タスクを長期間くりかえし行うだけのものが

多い。Lotte らは BMI 性能が低いままで留まっている原因として、BMI の訓練方法の欠如を上げ、今後 BMI スキルの向上に向けた研究が必要であると提案している。

Lotte, Larrue and Mühl (2013) Flaws in current human training protocols for spontaneous Brain-Computer Interfaces: lessons learned from instructional design. *Front. Hum. Neurosci.* 7:568. doi: 10.3389/fnhum.2013.00568

このような訓練の強化要因の一つとして、前述のように、操作対象への BOT が有効ではないかと考えられる。このためには、操作者に強く BOT を感じさせるような仕組みを実現する必要がある。これまでは、アンドロイド・ロボットという人に似た外観を持つロボットを操作対象とすることで、BOT を生じさせてきた。これまでの研究から、操作対象のアンドロイドへの BOT を強くするための条件として、操作遅延が小さいこと、操作内容に目的を持たせること。すなわち単に腕を動かすことを目的とするのではなく、何かを行うために腕を動かす、といったようにタスクを設定すること、実世界の人や物体とのインタラクションがあることなどがわかっている。しかし、BOT を強化するために、どのような対象を操作するのがよいのか、またどのような方法で操作することが最も有効なのかは分かっていない。対象に関しては、これまでの実験では人に似た外観を持つアンドロイド・ロボットを用いてきた。また、操作方法については、BMI 以外にも、センサにより操作者の動きを取得し、それをアンドロイドに反映させる方法も行っているが、脳波パターンに変化が生じるかどうかは検証できていない。そこで本年度はまずこれらの基本的な要因を明らかにすることを目的として、実験を行った。

まず、アンドロイド以外の対象を操作した際に、アンドロイドの時のように脳波に変化が見られるかの実験を行った。次図のように、アンドロイドと、機械的な外観のロボットとを同じ BMI システムで操作し、脳波パターンの変化を検証した。その結果、アンドロイドでは性能が向上する方向の変化が見られたが、ロボットではそのような変化は見られなかった (Alimardani, et al., 投稿中)。BOT に類似した、ラバーハンド錯覚と呼ばれる、ゴム製の義手を自らの腕と感じる錯覚では、形状が人の腕に近いほど、強い錯覚を得られることがわかっている。今回の実験の結果でも人に近い外観で強く効果が得られたことから、アンドロイド操作中の脳波変化は、アンドロイドを自身の一部と感じる BOT の関与が大きいと考えられる。



次に、体にマーカーを付けて動きを計測するモーションキャプチャ装置を用い、体の動きに合わせてアンドロイドが動く操作システムを作成し、アンドロイドを1) 体の動きにより操作した場合と、2) BMI で操作した場合、とを比較した。

従来研究から、BOT は遅延が少ないほうが強く感じられることがわかっている。しかし、BMI では一般に反応遅延が大きく、精度を高めようとする場合、10 数秒の遅延が生じることもある。これは脳活動パターンを周波数領域で識別することが多いため、ある程度の時間幅で処理する必要があることや、計測対象によっては反応が現れるまでの遅延が本質的に生じてしまうことなどが原因である。例えば、脳血流の変化を見る MRI や NIRS の場合、脳の特定部位で反応が生じ、酸素消費量の増大に対応するため血流量が増えるが、この血流量の量を計測することで間接的に脳活動の増減を見ているため、血流量が増加し、当該部位に到達するまでの遅延が生じる。脳波の場合はこのような遅延はないが、即時の反応は頭蓋外からの計測が困難な高周波成分でのみ見られることが多いため、低周波成分での強い反応が表れるのを待つ必要があり、遅延が生じる原因となっている。

これに比べて、身体動作の計測は数ミリ～数10ミリ程度の遅延で行うことができるため、遅延だけを考慮すると、モーションキャプチャによる操作が BOT を高める点で有利である。一方、自らの身体を動かす場合、身体動作に伴う体性感覚が生じるため、自身の運動部位がより強く感じられることになり、アンドロイドへの BOT の妨げになるとも考えられる。すなわち、体性感覚の生じない、BMI による遠隔操作が BOT を高める上で有利と考えられる。

これらの影響を調べるため、運動による操作と、BMI による操作を行った際の BOT の度合いを比較した。その結果、BMI による操作の方で、アンドロイドをより強く自身の一部と感じられることがわかった (Alimardani, et al., 投稿中)。この結果から、BMI によるある程度の遅延があったとしても、体性感覚による BOT 抑制効果を上回る効果が得られることがわかるとともに、身体運動による操作に対して、BMI による操作が一定の優位性を有することがわかる。

2-3 新たな課題など

本年度の検討をもとに、次年度から訓練手法の開発を行っていくが、過去の実験データ（脳波データ）の再検討の結果、いくつかの新たな課題があることもわかってきた。中でも、脳波の変化傾向の個人差の問題がある。これまでのデータを解析していくと、被験者の脳波変化がいくつかのパターンにわかれていることがわかってきた。これらのパターンがどのような個人差に依存するのか、またそれぞれのパターンに合わせた最適な訓練方法があるか、などの点を含め、次年度は検討を進める。

3. アウトリーチ活動報告

2015年2月4日のImPACT山川プログラムのキックオフシンポジウムにて、研究計画を発表した。