

知っておきたいキーワード

BMIとBCI

～究極のヒューマンインタフェース～

(正会員) 唐山 英明[†]

[†] 富山県立大学 工学部

"BMI and BCI" by Hideaki Touyama (Toyama Prefectural University, Toyama)

キーワード：ヒューマンインタフェース，ブレインマシンインタフェース，ブレインコンピュータインタフェース，脳機能計測，神経工学，神経デコーディング

まえがき

「心の中で思うだけで，機械を操ることができればなあ…」，そう考えたことがある本誌読者は少なくないのではないか。思考による究極のヒューマンインタフェースは，これまでに架空の物語の中でしばしば描かれてきた。しかしながら，このような新しいインタフェースはすでに一部現実のものとなっており，最近インターネットや新聞などでもその話題をよく見かけるようになっている。すなわち，ブレインマシンインタフェースやブレインコンピュータインタフェースと呼ばれる技術である。英語の頭文字をとって，それぞれBMI (Brain-Machine Interface) やBCI (Brain-Computer Interface) と記されることがある。「なにそれ？ なにがどこまでできているの？」という

疑問に答えるのが本稿の目的である。

BMIやBCIを実現するためには，そのユーザが“なにをを考えているのか”という情報が必要となる。すなわち，なんらかの脳機能計測が不可欠である。そこで，まずはこれまでに実現している主な脳機能計測手法について概観してみよう。表1（本表では特に優れると考えられる箇所に○を付けてある）のように，大きく分けて二つに分

類できる。侵襲的手法と非侵襲的手法である。侵襲的手法は，手術により脳に電極を埋め込むものなど，脳組織や生体にある種の不可逆的なダメージを与えるもので，この手法によるものを指してBMIと呼ぶことがある。逆に，頭皮へ簡便なプローブ（電極などのセンサ類）を装着するものなどは非侵襲的手法であり，これをBCIと呼ぶことが多い。

表1 脳機能計測手法の概要

		安全性	小型可搬	時間分解能	空間分解能
侵襲的	電極埋込法			○	○
	脳皮質電位法			○	
非侵襲的	脳磁図	○		○	
	機能的核磁気共鳴画像法	○			○
	近赤外分光法	○	○		
	脳波計測法	○	○	○	

キーワード募集中

この企画で解説して欲しいキーワードを会員の皆様から募集します。ホームページ (<http://www.ite.or.jp>) の会員の声より入力可能です。また電子メール (ite@ite.or.jp), FAX (03-3432-4675) 等でも受け付けますので、是非、編集部までお寄せください。

(編集委員会)

BMI (Brain-Machine Interface)

BMIについては、まず2002年に発表されたNicolelisとChapinの研究¹⁾について紹介するのがよいであろう(図1)。彼らはまず、サルの脳の1次運動野に電極を埋め込み、エサを取って食べるための動作をしている時のニューロン活動と手首の動きを同時に記録した。これにより、ニューロン活動と手首の運動の対応関係を知ることができ、この“対応表”をソフトウェアに内蔵したロボットアームのインタフェースを開発した。最終的にこのシステムによって、サルのニューロン活動だけでロボットアームを動かすことに成功した

のである。

また2008年には、BMIを利用した日本-米国という長距離間での遠隔ロボット制御に関する報告があった。ここでは、2足歩行時のサルのニューロン活動のみによって、遠隔のヒト型ロボットの2足歩行動作が実現した²⁾。

以上のようなBMIは、考えるだけ、もしくはニューロン活動だけで機械を操作するというまさにその目的を達成するものであったが、ラットやサルの研究に続き、これをヒトに適用した例もある。Donoghueらは、サイバーネティクス社などとともに、ヒトのBMIの臨床試験を行った。四肢が麻痺した患者の脳の1次運動野に約100本の微小電極が埋め込まれ、これにより、

“手を動かすことを想像する”という“運動想起”の際のニューロン活動を記録し、患者は意図通りにテレビのチャンネルやパソコンの電子メール操作が可能であった。

以上のようなBMIや脳皮質電位計測とよばれる侵襲的手法によれば、後述の非侵襲的手法に比べて明瞭で豊富な脳活動情報を得られるという利点があり、四肢が麻痺した患者などの意思疎通ツールとして注目される。しかしながら、手術が必要であることや感染症の問題などもあり、現時点では一般大衆への普及は難しい、と考えるのが自然であろう。

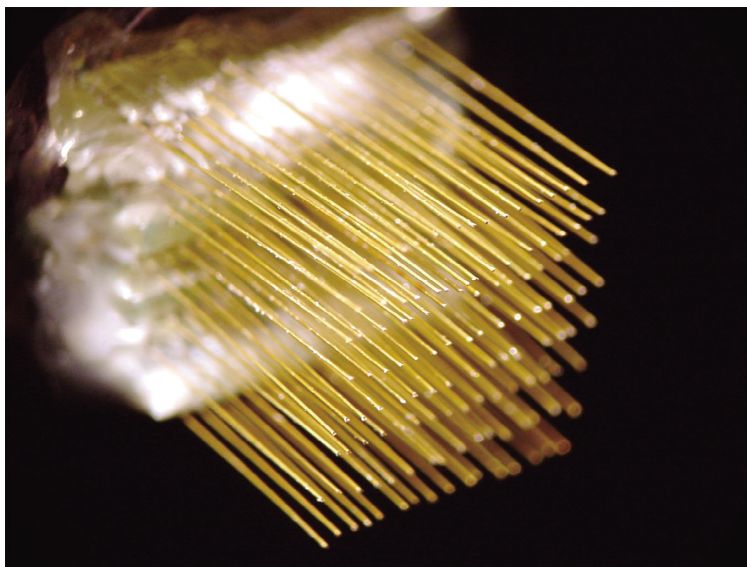


図1 脳に埋め込まれる電極(左)とロボットアームを操るサル(右)

BCI (Brain-Computer Interface)

次に、非侵襲的手法によるインタフェースの研究について紹介していこう。当然のことながら、非侵襲であることによりユーザの身体が確保されるといえる。表1に示したように、脳磁図、機能的核磁気共鳴画像法 (fMRI: functional Magnetic Resonance Imaging)、近赤外分光法、脳波計測などがある。脳磁図やfMRIは現状では装置が大きく、比べて近赤外分光法や脳波計測は小型化が容易である。

中でも、近年最も注目されている技術が、神谷らのfMRIによる脳デコーディングであろう^{3)~4)}。すなわち、MRI (核磁気共鳴) を利用して、脳血流中の還元ヘモグロビンの変化から脳の活動箇所を推定する手法である。その検出原理から、現時点では時間分解能は低く、数秒程度以上の計測時間が必要とされている。しかしながら、特に空間分解能に優れており、最近の装置では約1mmの精度 (もしくはそれ以下) で活動している脳部位が分かるとされ、極めて有用なツールとして基礎研究を中心に多く利用されている。この脳デコーディングの研究では、例えば、fMRIデータからヒトがジャンケンのグー・チョキ・パーのうちのどの動作について考えているかを推定できるという。さらに、ヒトが観察している点滅視覚刺激の形状 (任意でよい) をfMRIデータから推定し (図2)、その形状をオンラインで再構成可能であることも実証され、脳科学の分野において大きなブレークスルーをもたらしている⁵⁾。

また、脳の血流量変化の情報から脳活動信号を取出す手法として、近赤外分光法がある。いわゆる、NIRS (Near Infrared Spectroscopy “ニルス” と発音する) と呼ばれるものである⁶⁾。原理は近赤外線を頭皮上から頭内部に照射し、大脳で反射したものを

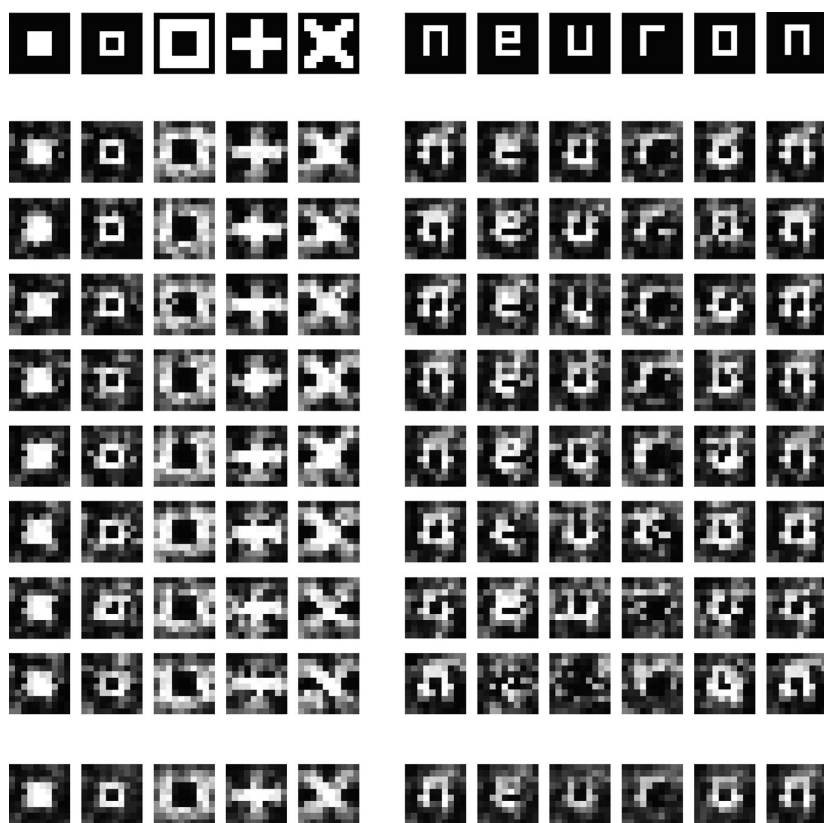


図2 fMRIデータから再構成された図形や“neuron”の文字列 (最上段は、被験者に提示された点滅視覚刺激)

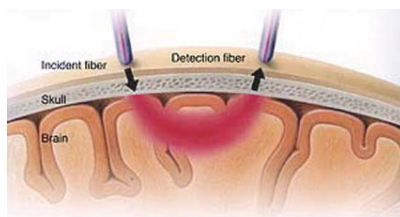


図3 NIRSの計測原理の概念図とプローブを装着した様子

また頭皮上で計測するもので、この際、脳活動に伴う脳血管中のヘモグロビンの情報が計測結果に反映される。図3

のように、複数のプローブ (赤外線照射部・受光部からなる) を頭皮に密着させ、例えば、暗算をしている

☞ ヒトの前頭連合野の活動領域を検出するなどが可能とされている。すでに機械を操作する報告もあり、この手法で模型電車を動かすBCIや、「はい」、「いいえ」などの簡単な意思表示ができる製品が実現している。

しかしながら、一般に、fMRIと同様にNIRSによるBCIはその低時間分解能が一つの課題である。一方で、ペーストなどの皮膚前処理を必要とせずブロープの装着が簡便であること、ユーザの体の動きに比較的影響を受けないこと、さらに一部で小型可搬の計測システムが実現していることなどから、それらの利点を認め、研究を続ける研究者も多い。

小型可搬であり、時間分解能に優れる一つの手法として脳波計測が知られている。脳波によるBCI研究は世界でも広く網羅的に行われており、どのような脳活動でどの程度の性能のインタフェースが実現できるか、といった知見がかなり蓄積されている。この種のBCIは、脳波の種類によりいくつかに分類できる。定常視覚誘発電位、運動想起電位、P300電位などである。

P300電位という脳波を利用するBCIでは、ヒトがなんらかの対象に興味を示す時の脳活動を計測する。例えば、ランダムに提示される数多くの写真の中に興味のある特定の写真を発見した際に、ヒトは「あっ！」と思うことがあるだろう。この時、ヒトの頭頂付近にP300電位が出現することが知られており、これにより、1988年、FarwellとDonchinは考えるだけで入力できるキーボードを開発した⁷⁾。こ

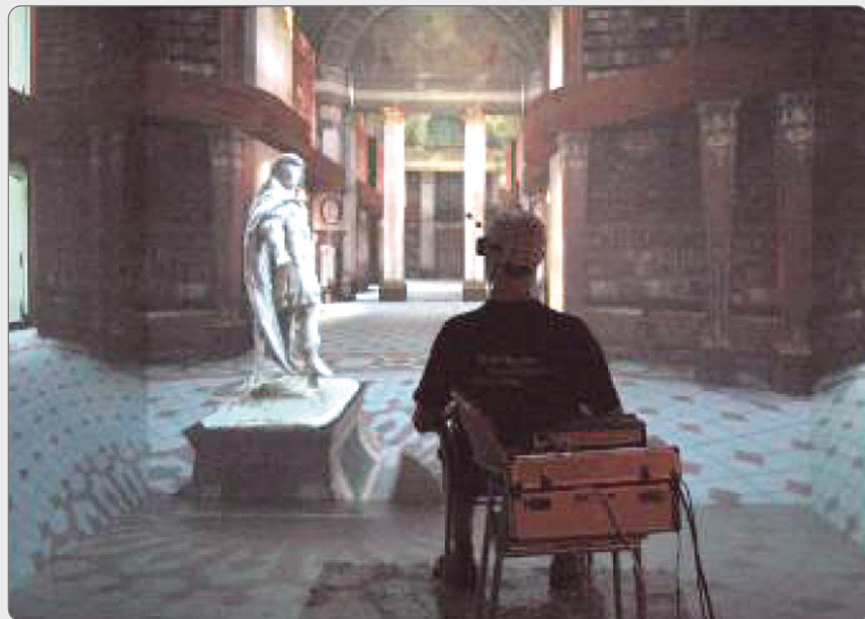


図4 立体映像のバーチャル空間を脳波だけで移動する実験の様子

こでは、行列上に配置されたアルファベットなどが次々にフラッシュし、入力したい特定の文字のフラッシュに対して「あっ！」と思うわけである。このシステムでの文字入力成功率は極めて高く、初心者でも十分に利用可能なシステムが実現している。

また、単なるコンピュータの操作以外に、他の技術と融合した応用例も見られる。例えば、バーチャルリアリティ技術を積極的に活用したものである。近年Pfurtschellerらは、運動想起をしている際の脳波を利用して、立体映像のバーチャル空間の移動やバーチャル人間とのインタラクションを実現した⁸⁾。左右に移動したい場合は、それぞれ“左右手の動きを想像する”な

どである。図4のような実験環境によって、BCIを利用する初心者が、現実環境に近い状態で再現よく安全にインタフェースに慣れるための訓練ができるのである。

以上のように脳波を利用するBCIは知見が豊富に蓄積されており、生体認証などへの応用も検討されている。しかしながら、脳波計測を利用すれば、100msなどといった高い時間分解能を確保できる一方で、低空間分解能（頭皮上で数cm程度）が課題であり、またユーザの瞬きや体の動きにより致命的なノイズの混入が避けられない場合がある、といった欠点もある。

む す び

BMIとBCIについて簡単に紹介してきたが、このような技術がすでに研究室レベルで実現していること、さらに近年も顕著な成果が次々に出ていることについてご理解いただけたと思う。また、各種の脳機能計測手法には一長一短があり、どれが最も優れている、と一概にいけない状況もご理解いただけたのではないだろうか。

特にfMRIの研究についていえば、基礎研究の方面で集中的に成果が出ると考えられる。今後の空間分解能の向上などにより、より精密な脳デコーディングが可能になろう。また、比較的新しい研究対象として、ニューロマーケティングなどもその研究範囲に含まれ、今後の発展が楽しみである。ニューロマーケティングとは、製品購買意欲の度合いなどを曖昧性なく脳活動から判断しようという野心的な試みであり、企業がすでにこのような脳科学の手法を取り入れて販売戦略に反映する

動きも見られる。

NIRSや脳波計測では、小型可搬であるといった利点を追及し、各種デバイスを身に付けて情報取得や提示を行うウェアラブルコンピューティングや、身の回りに起こるあらゆる出来事をデジタルデータとして蓄積するライフログ技術との融合領域として発展することも十分にあり得るだろう。近年では、複数の企業が小型可搬で安価なNIRSや脳波計測システムを開発し、一部販売し始めたことからわかるように、今後、ゲームのような娯楽産業からBMIやBCIの概念がますます浸透し、性能や装着技術の改善とともに、より信頼性の高いシステムが広く一般大衆に普及していくというシナリオも考えられる。

ヒトの脳活動情報を読み取って機械を操作するという従来の利用法の一方で、ヒトへの情報入力という観点でも研究、一部実用化が始まっている。特に侵襲的なものとして、人工視覚システムでは視力を失った方々が光を取り

戻すことができるよう研究が進められており、脳深部刺激法はパーキンソン病などの治療に威力を発揮するとの報告がある。

BMIやBCIは、その研究が今後ますます活発化することは間違いなく、まさに、知っておきたいキーワードの一つなのである。脳機能計測を通じて、脳やさらには人間について理解を深めることもでき、学術的に見てほしい重要な研究分野であることを強調して、本稿を締めくくりたい。

最後に、紙面の都合によりキーワードのみを記載した箇所もある。ご容赦いただきたい。また、本原稿の執筆にあたり、すばらしい研究成果の写真や図を快く提供して下さったNicolelis先生、神谷之康先生、小泉英明先生、Pfurtscheller先生、Leeb先生に厚く御礼申し上げます。さらに、私に執筆の機会を与えて下さった相澤清晴先生（編集長）、苗村健先生（編集幹事）に心から感謝いたします。

（2009年2月18日受付）

参 考 文 献

- 1) M.A.L. Nicolelis and J.K. Chapin: "Controlling Robots with the Mind", Scientific American, pp.46-53 (Oct. 2002)
- 2) "世界初、サルの大脳皮質の活動により制御されるヒューマノイドロボットの二足歩行", 科学技術振興機構報, 461 (Jan. 2008), <http://www.jst.go.jp/pr/info/info461/>
- 3) 神谷之康: "非侵襲神経デコーディングとブレイン・マシン・インタフェース", 計測と制御, 47, pp.431-436 (2008)
- 4) Y. Kamitani and F. Tong: "Decoding the Visual and Subjective Contents of the Human Brain", Nature Neuroscience 8, pp.679-685 (2005)
- 5) Y. Miyawaki, H. Uchida, O. Yamashita, M. Sato, Y. Morito, H.C. Tanabe, N. Sadato, Y. Kamitani: "Visual Image Reconstruction from Human Brain Activity Using a Combination of Multi-scale Local Image Decoders", Neuron, 60, 5, pp.915-929 (2008)
- 6) E. Watanabe, A. Maki, Y. Yamashita, H. Koizumi, Y. Ito: "Non-invasive Functional Mapping with Multi-channel Near Infra-red Spectroscopic Topography in Humans", Neurosci Lett, 205, 1, 41-4. PMID: 8867016 (Feb. 1996)
- 7) L.A. Farwell and E. Donchin: "Talking off the Top of Your Head: Toward a Mental Prosthesis Utilizing Event-related Brain Potentials", Clin. Neurophys., 70, pp.510-523 (1988)
- 8) G. Pfurtscheller, R. Leeb, C. Keinrath, D. Friedman, C. Neuper, C. Guger, and M. Slater: "Walking from Thought", Brain Res, 1071, 1, pp.145-52 (2006)



とうやま ひであき
唐山 英明 1999年、大阪大学大学院理学研究科博士課程修了。企業や研究機関研究員などを経て、2008年、東京大学IRT研究機構特任助教。2009年、富山県立大学工学部准教授。脳-コンピュータインタフェースの研究に従事。当会業績賞・藤尾フロンティア賞、船井情報科学奨励賞などを受賞。正会員。唐山生体情報理工学研究室ホームページ (<http://www.pu-toyama.ac.jp/IS/BCI/>)