

解説

# 福祉機器のブレイン・マシン・ インタフェース

## Brain-Machine Interfaces for Assistive Products

### 執筆者プロフィール



神作 憲司  
Kenji KANSAKU

- 千葉大学医学部卒業。脳神経外科医師として勤務後、同大学院医学研究科（博士課程）修了、博士（医学）。アメリカ国立衛生研究所上級客員研究員などを経て2006年より現職
- 研究・専門テーマは、システム神経科学、神経画像
- 国立障害者リハビリテーションセンター研究所 感覚機能系障害研究部感覚認知障害研究室  
(〒359-8555 所沢市並木4-1 国立障害者リハビリテーションセンター研究所 感覚機能系障害研究部 感覚認知障害研究室/  
E-mail: kansakuk@rehab.go.jp)

## 1. はじめに

脳からの信号を計測し、それを利用して機器操作を行い、運動やコミュニケーションの補助、生活環境の制御などを行うおうとする新たなヒューマンインタフェース技術が注目されている。

ブレイン・マシン・インタフェース (Brain-Machine Interface: 以下、BMI) もしくはブレイン・コンピュータ・インタフェース (Brain-Computer Interface: BCI) と呼ばれるこれらの新技術が注目されている背景には、昨今の脳信号を計測・解析する技術の進歩や、脳をシステムとして理解することを目的とするシステム神経科学の発展等がある。これらをもととして、近年 BMI が現実味を帯びてきたが、これまでも BMI 関連技術は生み出されてきた。たとえば、成功した BMI 関連技術として、人工内耳が挙げられる。また、脳神経外科にて行われてきた脳深部刺激といった治療法も、BMI 関連技術として挙げられるだろう。

こうしたこれまでの取り組みに加えて、近年注目されている BMI では、より積極的に脳からの信号を利用して、義手、電動車いす、コンピュータ、ロボットなどの機器を

操作し、運動やコミュニケーションの補助、生活環境の制御などを行うおうとする。さらに、機器から脳へ信号をフィードバックさせ、脳と機器との間で相互作用させる将来技術も提唱されている (図1)。

本稿では、BMI に関するこれまでの研究と最新の動向を俯瞰することで、BMI を用いた新たな福祉機器が、医療・福祉に貢献する可能性について論じていきたい。

## 2. 侵襲型 BMI

とくに手術が必要な BMI 技術は、侵襲型 BMI と呼ばれている。脳の神経細胞から侵襲的に計測された信号を用いて外部の機器を操作しようとするアイデアは1980年代からあったが<sup>(1)</sup>、研究の展開には科学技術の発展を待たねばならなかった。今日 BMI 技術が着目される端緒の一つとなったのは、1990年代に行われたデューク大学の Nicoletis らの研究である。ラットの一次運動野から多数の単一神経細胞活動を記録してその信号をロボットアームに送ると、ラットがそのロボットアームを、単純な動きではあるものの制御できるようになることを示したのである<sup>(2)</sup>。その後、慢性埋込み電極の工夫などを積み重ね、実用化に向けての基礎技術開発が進められている<sup>(3)</sup>。

これら今日の BMI 研究を支えているのが、Hubel と Wiesel<sup>(4)</sup> や Everts<sup>(5)</sup> の研究などを起源とする、サルなどの動物の脳に電極を刺して神経細胞活動を記録する研究であり、これらの研究で、脳の中で神経細胞の発火パターンがどのような情報をコードしているのかということが地道に調べられてきた。運動制御に関する研究では、たとえば Fetzer らは、一次運動野の神経細胞の発火確率と筋張力との間で相関があることを報告している<sup>(6)</sup>。また、画期的であったのは、Georgopoulos らの研究だろう<sup>(7)</sup>。この研究では、一次運動野の神経細胞活動の記録から、神経細胞の発火パターンが運動の方向をコードしていることを示した。こうした基礎研究の積み重ねを背景として、近年は、より BMI への将来応用を期待させる研究もみられ、たとえば記録された単一神経細胞の発火パターンから、より複雑な腕の動きを再現するために有用な情報を引き出す研究も行

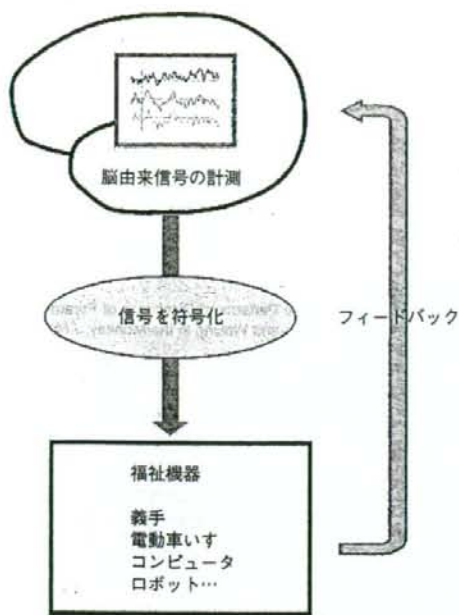


図1 BMIについて、脳と機器との相互作用をもとに概念図として示している。

われている<sup>(9)-(10)</sup>。また最近では、デューク大学で計測した歩行中のサルからの信号をATR脳情報研究所に送り、人型ロボットの下肢を制御する実験も成功している。

1960年代、70年代に行われていたFetzらの研究は時代を先取りしたものとして名高い<sup>(11)(12)</sup>。この一連の研究では、サルが随意運動を行っている際に大脳皮質から単一神経細胞活動の記録を行い、その発火頻度を感覚刺激に変換してフィードバック刺激として提示すると、サルが発火頻度を変化させることができるようになることを報告した。またFetzらは近年、これまでの一連の研究を進展させ、一次運動野の単一神経細胞活動の記録を行い、さらにその信号をフィードバックさせて今度は脳の別領域の刺激を行ったところ、記録していた神経細胞の特性が変化した、という画期的な研究を行った<sup>(13)</sup>。脳からの信号を取り出して機器につなぎ、さらに同機器からの信号を脳にフィードバックするといった閉回路を作成することで、脳の可塑性を誘発する、つまり脳そのものを再構成させ失われた機能を復活させていくことが期待されている。

このほか、脳神経外科手術中に人間の脳表(硬膜下)に留置した電極を利用し、脳からの信号を計測してBMIに将来応用できる情報を取り出すとする基礎研究も行われている。

ここで紹介した研究は、直接的な医療・福祉への応用へはまだ距離があると考えられるが、すでにアメリカでは、こうした侵襲的な方法を用いた臨床研究も始まっている。いまだ技術的に解決すべき問題を多く残すため、早期の実用化は困難と考えられるが、これらの技術を発展させていくことで、より細かな運動の補助が行える自由度の高い義手が作成される、といったことが期待されている。

### 3. 非侵襲型BMI

脳に電極を差し込むなど、手術を行う必要のある侵襲型BMIに対して、手術を行う必要のないものを、非侵襲型BMIと呼ぶ。計測方法としては、頭皮に電極を貼り付け電位を記録する脳波(Electroencephalography: EEG)が比較的簡便であり歴史も古い。Fetzらが単一神経細胞活動を記録してBMIの先駆的研究を行っていたころ、脳波を用いて同様の先駆的研究も行われていた。その研究では、脳波信号を計測してこれを感覚刺激に変換しフィードバックすることで、被験者が $\alpha$ 波のリズムを制御できるようになったとしている<sup>(14)</sup>。そしてこうした技術は、単純な一次元の情報を引き出すBMI技術へと応用されていった<sup>(15)</sup>。

近年、非侵襲脳機能計測が人間の脳の機能を評価する方法として脚光を浴びていたが、BMIの計測法としては、侵襲型のものでなければより複雑な(多次元・多段階の)情報を引き出すことができないと考えられていた。こうした状況を一変させたのが、Wolpawらによる研究である<sup>(16)</sup>。この研究では、脳波を用いたBMIにより、二次元のカーソル制御に成功している。脳波の周波数成分に着目し、 $\beta$ 帯域(24Hz)のパワーを垂直成分の移動に、 $\mu$ 帯域(12Hz)のパワーを水平成分の移動に用いるなどした。時には何週間ものトレーニングが必要であるものの、1~2秒程度で90%程度の正確さで二次元のカーソル制御を成し遂げた。

感覚運動の変換過程における脳波の周波数特性については、感覚運動リズム(Sensorimotor Rhythm: SMR)とも呼ばれ、BMI関連の研究で注目を集めている。Pfurtschellerらは運動関連課題を行う際に計測したデータを多く扱ってきており<sup>(17)</sup>、運動イメージを反映する事象関連成分を解析し、 $\beta$ 帯域の同期<sup>(18)</sup>や、 $\mu$ 波の脱同期<sup>(19)</sup>が起こることを報告した。著者らもこの脳波の周波数特性に着目した研究を行い、手首の運動イメージを行う課題を用いると、頸髄損傷者と健常者がともに、 $\mu$ 帯域のパワーが感覚運動領域で抑制され、後頭領域で促進されるという結果を得てきている<sup>(20)</sup>。

また脳波では、P300等の認知機能を反映する成分への着目も、とくにBMIのコミュニケーションへの応用を視野に置いた研究でなされてきている。たとえば近年、筋萎縮性側索硬化症(Amyotrophic Lateral Sclerosis: ALS)などの患者にて、応用研究が報告された<sup>(21)(22)</sup>。ALS患者への脳波を用いたBMIの適用は、周波数特性に着目した研究でも行われており<sup>(23)</sup>、今後もそれぞれの手法でのさらなる技術開発が進んでいくとともに、実用性の比較検討もなされていくだろう。また、著者らは、視覚刺激に対して誘発される脳波成分に着目したBMI研究を行っており、このなかで、視覚刺激にて提示した記号や文字のうちどれを見ているのかを脳波信号から判別し、この符号化信号をもとにライトの点灯やテレビのチャンネル切り替えといった家電の操作を行うシステムを開発し、頸髄損傷者を被験者としての実験にも成功している<sup>(24)</sup>。

脳波のほか、機能的磁気共鳴画像(functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI)や近赤外分光法(Near Infrared Spectroscopy: NIRS)を用いるBMI研究も行われ始めてい

る。また、fMRIや脳磁図(Magnetoencephalography: MEG)など、それぞれ高い空間分解能や時間分解能にて非侵襲脳機能計測を可能とする装置を組み合わせること、脳からのより多くの情報を取り出しこれを利用して、効率的なBMIの開発を目指す研究の重要性も示唆されている<sup>(24)</sup>



## 4. 福祉機器への展開

先述のように、近年BMIが脚光を浴び、さまざまな研究開発がなされている。しかし、現時点ではいまだ患者・障害者を被験者とした研究や、実用化を直接の視野に入れた研究は多くない。実際にこうしたBMI技術の応用を考えていく場合、より侵襲度が低く、判別までの時間も短い手法の開発が望まれる。また、これまで用いられてきた生体由来信号、たとえば筋電やPHメータなどの有用性の比較検討も必要と考えられる<sup>(24)</sup>。BMIを、2値の符号化信号といった単純な信号を取り出すために用いるのであれば、これらの従来の方式とすぐに置換される場面は限られてくるかもしれない。ユーザからさらにニーズを調査していくことや、ユーザと開発中の技術の評価を積み重ねていくことも必要と考えられる。

もちろん、脳から取り出す符号化信号が複雑(多次元・多段階)であることが望ましく、こうした技術が確立すれば、たとえば自由度の高い義手をBMIで操作することが可能となる。また、機器から信号を脳へフィードバックして脳の可塑性を誘発する技術が実現化されれば、より幅広い応用が可能となっていく。



## 5. おわりに

これまで「脳を知る」といった研究の方向性が中心であったシステム神経科学等の基礎医学分野が、このBMIというテーマで応用への道を見いだしつつある<sup>(24)</sup>。BMI技術の応用・実用化には、基礎医学・臨床医学と工学などの分野間のこれまで以上の連携が不可欠と考えられる。また、応用への取り組みを進めていくためには、倫理的な問題を十分に配慮しながら進めていくことが前提となるだろう。BMI技術をさらに研究開発していくことで、外傷や神経難病などにより四肢の運動麻痺や発話の困難を伴い、日常動作やコミュニケーションに支障をきたしている患者・障害者の自立支援へとつなげたい。

(原稿受付 2008年7月4日)

## ●文献

- (1) Schmidt, E.M. Single Neuron Recording from Motor Cortex as a Possible Source of Signals for Control of External Devices, *Ann Biomed Eng*, 8 (1980), 339-349.
- (2) Chapin, J.K., Moxon, K.A., Markowitz, R.S. and Nicolelis, M.A., Real-Time Control of a Robot Arm using Simultaneously Recorded Neurons in the Motor Cortex, *Nat Neurosci*, 2 (1999), 664-670.
- (3) Nicolelis, M.A., ほか. Chronic, Multisite, Multielectrode Recordings in Macaque Monkeys. *PNAS*, 100 (2003), 11041-11046.
- (4) Hubel, D.H. and Wiesel, T.N., Receptive Fields of Single Neurons in the Cat's Striate Cortex, *J Physiol*, 148 (1959), 574-591.
- (5) Evarts, E.V., Temporal Patterns of Discharge of Pyramidal Tract Neurons During Sleep and Waking in the Monkey, *J Neurophysiol*, 27 (1964), 152-171.
- (6) Fetz, E.E. and Finocchio, D.V., Correlations Between Activity of Motor Cortex Cells and Arm Muscles during Operantly Conditioned Response Patterns. *Exp Brain Res*, 23 (1975), 217-240.
- (7) Georgopoulos, A.P., Schwartz, A.B. and Kettner, R.E., Neuronal Population Coding of Movement Direction, *Science*, 233 (1986), 1416-1419.
- (8) Wessberg, J., ほか. Real-Time Prediction of Hand Trajectory by Ensembles of Cortical Neurons in Primates, *Nature*, 408 (2000), 361-365.
- (9) Taylor, D.M., Tillery, S.I. and Schwartz, A.B., Direct Cortical Control of 3D Neuroprosthetic Devices, *Science*, 296 (2002), 1829-1832.
- (10) Schwartz, A.B., Moran, D.W. and Reins, G.A., Differential Representation of Perception and Action in the Frontal Cortex, *Science*, 303 (2004), 380-383.
- (11) Fetz, E.E., Operant Conditioning of Cortical Unit Activity, *Science* 163 (1969), 955-958.
- (12) Fetz, E.E. and Baker, M.A., Operantly Conditioned Patterns on Precentral Unit Activity and Correlated Responses in Adjacent Cells and Contralateral Muscles. *J Neurophysiol*, 36 (1973), 179-204.
- (13) Jackson, A., Mavori, J. and Fetz, E.E., Long-Term Motor Cortex Plasticity Induced by an Electronic Neural Implant, *Nature*, 444 (2006), 56-60.
- (14) Nowlis, D.P. and Kamiya, J., The Control of Electroencephalographic Alpha Rhythms through Auditory Feedback and the Associated Mental Activity, *Psychophysiology*, 6 (1970), 476-484.
- (15) Birbaumer, N., ほか. A Spelling Device for the Paralyzed, *Nature*, 398 (1999), 297-298.
- (16) Wolpaw, J.R. and McFarland, D.J., Control of a Two-Dimensional Movement Signal by a Noninvasive Brain-Computer Interface in Humans, *PNAS*, 101 (2004), 17849-17854.
- (17) Pfurtscheller, G. and Lopes da Silva, F.H., Event-Related EEG/MEG Synchronization and Desynchronization: Basic Principles, *Clin Neurophysiol*, 110 (1999), 1842-1857.
- (18) Pfurtscheller, G., Müller, G.R., Pfurtscheller, J., Gerner, H.J. and Rupp, R., "Thought"-Control of Functional Electrical Stimulation to Restore Hand Grasp in a Patient with Tetraplegia, *Neurosci Lett*, 351 (2003), 33-36.
- (19) Pfurtscheller, G., Brunner, C., Schlogl, A. and Lopes da Silva, F.H., Mu Rhythm (de) Synchronization and EEG Single-Trial Classification of Different Motor Imagery Tasks, *NeuroImage*, 31 (2006), 153-159.
- (20) 小松知章・神作憲司・ほか. 頸髄損傷者における脳波を用いた非侵襲型BMIの試み, 電気学会産業応用部門大会論文集II, (2007) 99-102.
- (21) Piccione, F., ほか. P300-Based Brain Computer Interface: Reliability and Performance in Healthy and Paralyzed Participants, *Clin Neurophysiol*, 117 (2006), 531-537.
- (22) Sellers, E.W. and Donchin, E., A P300-Based Brain-computer Interface: Initial Tests by ALS Patients, *Clin Neurophysiol*, 117 (2006), 538-548.
- (23) Kubler, A., ほか. Patients with ALS Can use Sensorimotor Rhythms to Operate a Brain-Computer Interface, *Neurology*, 64 (2005), 1775-1777.
- (24) Komatsu, T., Hata, N., Nakajima, Y. and Kansaku, K., A Non-Training EEG-Based BMI System for Environmental Control, *Neurosci Res Suppl*, (2008), P3-m10.
- (25) 川人光男, ブレイン-ネットワーク-インターフェイスによる操作脳科学. 生体の科学, 57 (2006), 315-322.
- (26) Birbaumer, N., Brain-Computer-Interface Research: Coming of Age. *Clin Neurophysiol*, 117 (2006), 479-483.

平成 20 年度厚生労働科学研究費補助金（活動領域拡張医療機器開発研究事業）  
「ブレイン・マシン・インターフェイス(BMI)による障害者自立支援機器の開発」

総括・分担研究報告書

発行者 中島 八十一（主任研究者：国立障害者リハビリテーションセンター）  
〒359-8555 埼玉県所沢市並木 4-1