

ブレイン・マシン・ インターフェイスによる 操作脳科学

川人光男 (株) 国際電気通信基礎技術研究所 脳情報研究所

この数年の技術発展により、脳と機械の距離は近づいている。
脳で考えるだけでコンピュータを操作することも可能となりつつある。
非侵襲的かつリアルタイムに脳を読みとく技術も大きな進展を遂げている。
やがては、脳とロボットとの距離も接近してくるであろう。

従来の脳科学は、基礎研究分野であったといっただけであろう。その応用例は、脳にかかわる病気を治す、人工網膜チップや人工内耳といったデバイス開発など、比較的限られていた。

しかし近年の進歩とともに、一般の人々の生活に影響を与える応用科学の側面が現れはじめています。

たとえば、脳科学の視点で人間の社会活動の生物学的基盤を理解し、場合によってはその応用をも視野にいられた研究分野が発達しつつある。このなかには、ニューロゲノミクス、ニューロエコノミクス、ニューロマーケティング、ニューロポリティクスなど、刺激的かつ目新しい分野が続々と現れている(コラム参照)。

また、お年寄りや体の不自由な人でも脳で考えるだけで直接コンピュータやロボットを通信制御できるような、革新的なユーザーインターフェイスが開発できないかという研究も進みつつある。SFの世界では何十年も前から語られてきたことだが、実際にいまおこりつつあるのだということをこれから紹介していきたい。

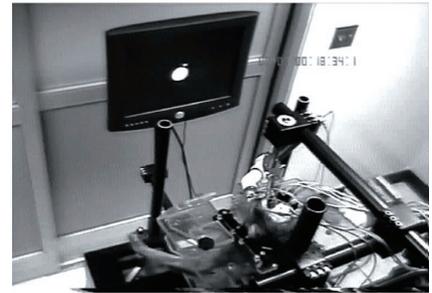
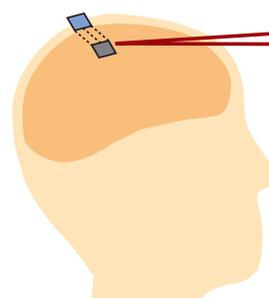
脳情報でコンピュータの カーソルを操作する

図1は、デューク大学のミゲル・ニコレリスが2000年にサルでおこなった実験だ。このサ

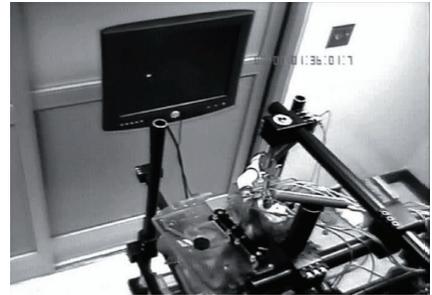
ルは、左手でレバーを動かして画面上のカーソルを操作し、カーソルがターゲットの位置にくるとジュースがもらえるように訓練されている。サルの脳には多重電極が埋め込まれ、レバーを操作しているときに、大脳皮質第1次運動野にある約100個の神経細胞の発火パターンが記録された。そのデータが解析され、画面上のカーソルの位置に反映された。するとこのサルはある時期から、左手を動かさずに、自分の脳活動だけでカーソルを操作し、ターゲットを射止め



カーソルを左上に動かすように念じる



a 腕を使ってカーソルを操作



b 脳に埋め込んだ電極から得られる神経活動でカーソルを操作

図1

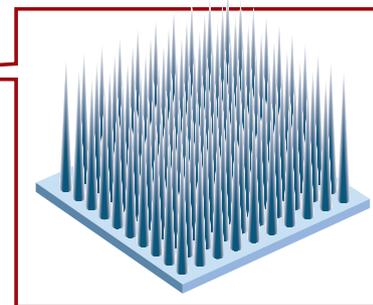
脳活動でカーソルを操作するサル

大脳皮質第1次運動野の100個ほどのニューロンが発火する頻度から、簡単な線形の重ね合わせでカーソルのxy位置が推定された。サルはある時期から、自分の脳活動でカーソルを制御し、ジュースをもらうことができるようになった。(Miguel Nicolelis教授より提供)

図2

ヒトで実現したBMI

首から下が麻痺した被験者(C4レベル脊損患者)に対して、世界で初めてBMIによる慢性臨床試験がおこなわれた。(ブラウン大学のJohn Donoghueらの研究にもとづくベンチャー企業Cyberkinetics社のホームページ <http://www.cyberkineticsinc.com/content/index.jsp>では、クビから下の動かない患者がコンピュータのカーソルや義手を自由に操るムービーが閲覧できる)



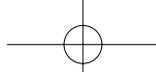


図 3

脳画像から縞の傾きを予測する

縞パターンをみせられた被験者の大脳皮質第1次視覚野の脳活動を計測し、実際に与えられた縞の傾きを高い精度で当てることができた。(神谷之康, 「科学」^[3]より引用)

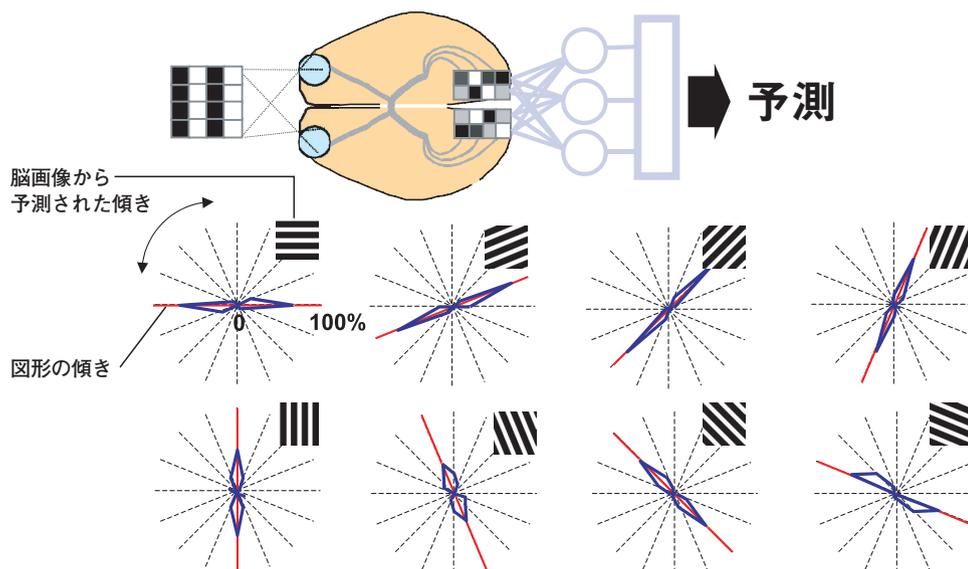
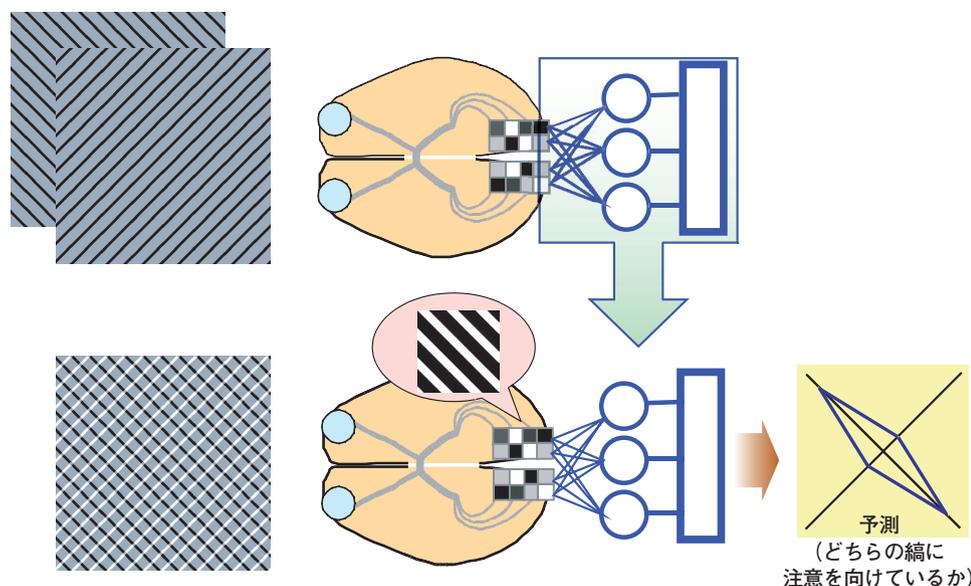


図 4

主観的な知覚を解読する(心を読む)

被験者にどちらか一つの縞だけに、視覚的に注意しもらう。すでに単一の縞だけからなる視覚刺激についてトレーニングしてあったリニアサポートベクターマシンを使って、被験者の脳活動を解析すると、被験者が注意している縞の方向をかなりの確率で当てることができる。ATR脳情報研究所の神谷之康さんは、この研究でScientific American 50 (2004-2005) を受賞している。(Kamitani Y, Tong F: Nature Neuroscience 8 (2005) 679-685 より)



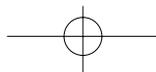
てジュースをもらうことができるようになった。

つぎに、ブラウン大学のジョン・ドナヒューが2004年に発表した研究成果を紹介する(図2)。写真の男性は、首の後ろをナイフで刺されて頸椎を損傷している。この男性の大脳皮質第1次運動野に多重電極を埋め込み、十数時間の訓練をすると、コンピュータのカーソルを動かし、かつ、マウスのクリックができるようになった。この男性は、メールを読んだり、テレビのスイッチを入れたり、チャンネルを変えたり、円を描いたり、さまざまなことをこのブレイン・マシン・インターフェイス (BMI) を介しておこなっている。彼は、言葉で説明しな

がらカーソルを操作することができる。私たちがしゃべりながらポインタを使うように、BMIが自然な道具として使用されていることがわかる。アメリカではすでに、10人近くの患者がこういったBMIの研究に協力している。

BMIは強力なインターフェイスとなる可能性があるが、電極を脳に埋め込むことでさまざまな危険もともなう。そこでBMIと同様のことを、非侵襲的におこなうための研究が進みはじめた。

ジョナサン・ウォルポーとデニス・マクファーランドのグループは2004年、コンピュータ上のカーソルの動きを脳波で高精度に制御す





ることに成功した。かなり実験的
した被験者を選び、何十日にもわた
る訓練を要したが、脳波でもこの程
度のコンピュータ制御が可能である
ことが示された実験だ。

脳情報のデコーディング

私たちは、非侵襲的で、被験者
を選ばず、訓練も必要のないかたち
で脳の特定位点から脳活動を取り出し、
脳情報を利用することのできるイン
ターフェイスがつかれないかと考え
た。私たちはそれを、ブレイン・ネッ
トワーク・インターフェイス (BNI)
と呼んでいる。

脳活動では、刺激が与えられたと
きにそれが符号化(エンコード)され、
脳のなかにある種のコードができると
考えられる。であれば逆に、脳のなか
にある符号から、その刺激が何であっ
たのかと推測すること(デコーディン
グ)ができないだろうか。

国際電気通信基礎技術研究所
(ATR) 脳情報研究所の神谷之康さ
んは、fMRIを使うことで高精度なデ
コーディングができることを示して
いる。ある傾きをもった視覚刺激の
縞パターンを被験者にみせ、大脳皮
質第1次視覚野の脳活動を計測する。
その計測された脳情報だけから、被
験者にはどんな視覚刺激パターンがみせられた
のか当てることができるだろうか、という問題
を神谷さんは設定した。

しかし、傾きに特有な方位選択性コラムの幅
は約100 μ mで、fMRIの分解能は2~3mmの
オーダーと10倍以上ちがう。100 μ mオーダー
の神経活動など見分けられるわけがないと思
われていた。そこで神谷さんは、100~200の
ボクセルを集めてきて、かつリニアサポートベ
クターマシンという機械学習の手法を使うこと

COLUMN

脳を読む

社会活動や生物学的基盤から 脳を理解する

ニューロゲノミクス

神経疾患にかかわる遺伝子の同定に始
まった分野だが、近年では、健康な人のな
かにも遺伝子多型によって脳活動パター
ンにちがいが存在するということがわ
かってきた。最近になってこの分野での
論文が多く提出されている。

ハリリ(Hariri)らが2002年に発表した
「遺伝子多型と脳活動の個人差に関する
研究」は、その典型的な研究例である。セ
ロトニンのトランスポーターに関する遺
伝子多型では、s(ショート)型をもつ人
はl(ロング)型をもつ人より、恐怖、不安
を抱きやすいということが、以前からの
行動観察でわかっていた。そこでハリリ
らは、s型とl型の人たちの脳活動の違
いをfMRIで計測しs型の人では恐怖に
関連する偏頭体がより強く活動している
ことをみいだした。

将来の可能性としては、(1)脳活動、
行動の個体差の遺伝的背景を知ること
によって、脳情報処理の理解が進む(2)脳
疾患の要因遺伝子の特定、医療への応用
(3)個人に応じた能力開発、教育、などが
考えられる。

しかしその一方で、脳活動や遺伝子多
型は、いわばもっともプライベートな情

報であり、プライバシー保護が必要であ
る。また遺伝的背景による差別、選別が
おこる危険性もあるので、十分な議論が
必要である。

ニューロエコノミクス

経済的・社会的行動を生み出す脳のプ
ロセスを解明することで、新しい経済理
論の確立をめざす。たとえば、「株価の
動きをみてA社の株を買う」といった決断
の背景を、脳科学として理解できないか
と探るのがニューロエコノミクスである。

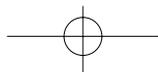
研究例としては、今日もらう1000円と
明日もらう1100円のどちらをとるかを
脳活動から調べることで、将来的な報酬
予測と目先の報酬予測には、脳の異なる
部分に関与していることが解明されてい
る(図)。

ニューロエコノミクスの応用として、
(1)消費者の消費行動が予測できる(2)
投資家の投資行動が予測できる(3)消費
者がどれくらいの金利であれば融資を受
けるかを予測できる、などの可能性があ
ると期待されている。

この分野では、実際に神経科学者と経
済学者が参加する研究会がもたれてい
て、「10年のうちに、この分野からノー
ベル賞受賞者がでるだろう」と予測する

で、実際に与えられた縞の傾きを非常に高い精
度で当てることができるということを発見した
(図3)。

さらに神谷さんは、刺激を再構成するだけで
はなく、主観的知覚内容の解読つまり心を読む
こともできることを発見した(図4)。一人の被
験者が、右上がりの縞と左上がりの縞の重なっ
た格子縞をみている。被験者が右上か左上かど
ちらか一つの縞だけに、視覚的に注意しておく。
この状態で、リニアサポートベクターマシンを





コカコーラ vs ペプシ

ブランド名なし

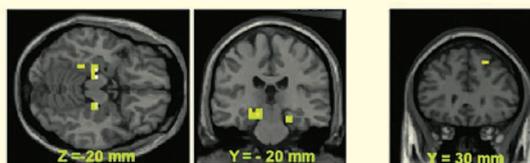


VMPFC

前頭連合野腹内側部

ブランド名あり (コカコーラ)

Coke® Delivery (Brand-cued - Light-cued)



Bilateral Hippocampus

DLPFC

海馬

前頭連合野背外側部

学者もいる。

ニューロポリティクス

ニューロポリティクスは、ニューロゲノミクスと深い関わりのある分野で、脳神経科学的手法を用いて個人の政治的傾向を知り、政治戦略に応用しようという仕事である。なかには冗談めいた仕事もあるが、たとえば2004年のアメリカ大統領選挙直前に、民主党支持者と共和党支持者に対して、ブッシュ大統領とケリー上院議員の写真をみせて、それぞれの脳活動のちがいをイメージング技術で計測するといったことがなされている。

この分野の研究は将来、(1) 政治的意志決定の過程を、従来のグループ討議や世論調査よりも効率的かつ正確に探る、(2) 自分の政治的意志決定過程を客観的

に知ること、自分をより深く理解し、よりよい暮らしにつなげる、などの可能性がある。

しかし、個人の政治的傾向についてのプライバシー保護の問題や、政治的傾向のコントロール、世論操作の可能性といった負の側面もありえる。

ニューロマーケティング

これも刺激的な言葉だが、アンケートやフォーカスグループ（グループで討議させる市場調査法）を用いる従来法に代わり、脳活動から消費者の嗜好を探るというものである。たとえば、ダイムラー・クライスラーは、さまざまな形状の自動車への興味の度合いを脳活動で測定している。カリフォルニア工科大学では、映画の予告編に対する被験者の反応を脳活動で測定している。

またペイラー大学では、コカ・コーラとペプシの両者をfMRIのスクナーのなかで飲みわけられるような実験環境をつくって、好みに相関する脳活動部位を調べた。“ブランド名を教えずに”ペプシとコカ・コーラを飲み分けさせたときは、比較的甘いペプシが好まれ、前頭連合野腹内側部 (VMPFC) で脳活動がみられた。しかし、“ブランド名を教えて” 同じ実験をしたところ、ブランド名なしではペプシが好きと反応した人たちがコカ・コーラ好きに変わり、新たに海馬や前頭連合野背外側部 (DLPFC) の活動が付け加わっていた。つまり、好みの決定には複数の神経機構が関与していて、味情報にはVMPFC、ブランド情報には海馬やDLPFCが関与しているものと思われる。この研究論文は、2年前にNeuronに掲載されている。

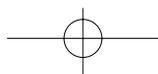
使い被験者の脳活動を調べると、被験者が注意している稿の方向をかなりの確率で当てることができることがわかってきた。

ATR脳情報研究所では、この方法を使って、運動制御の復号化についても試している。たとえば、「ぐー・ちょき・ぱー」のパターン認識は、大脳皮質第1次運動野からの12秒間のデータを使うと、100%の確率で当てることができる。1秒間のデータを使った場合でも、90%ぐらいまで性能が上がってきた。また、音韻のパター

ン認識に関しても、長い時間のデータを使うと100%の精度で脳活動からその人がしゃべっている音韻を当てることができるようになった。

リアルタイムに脳活動を読みとく

fMRIは脳活動にともなう血流を計測するため、実時間性に乏しい。脳活動がおこってから血流が変化し、それを磁場の変化としてとらえるまでに3~4秒はかかる。一方、神経活動にともなう磁場の変化を計測する脳磁計 (MEG)

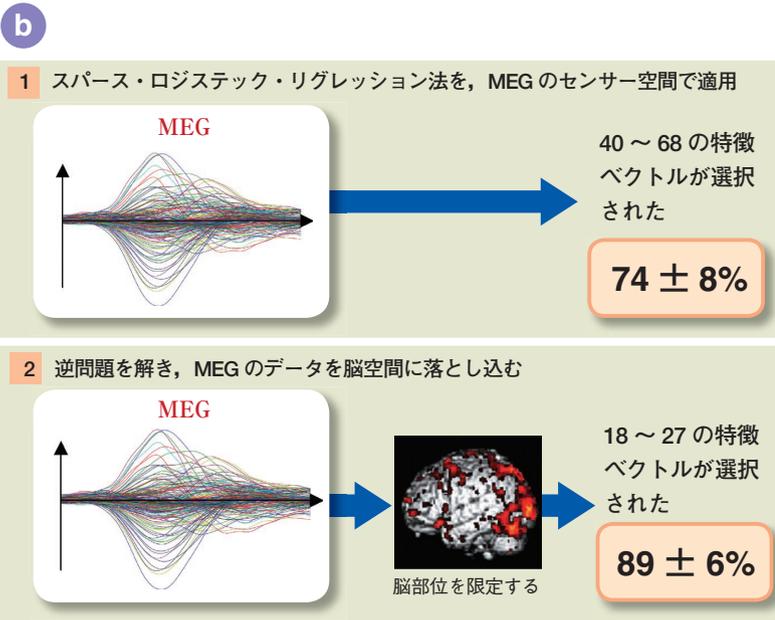
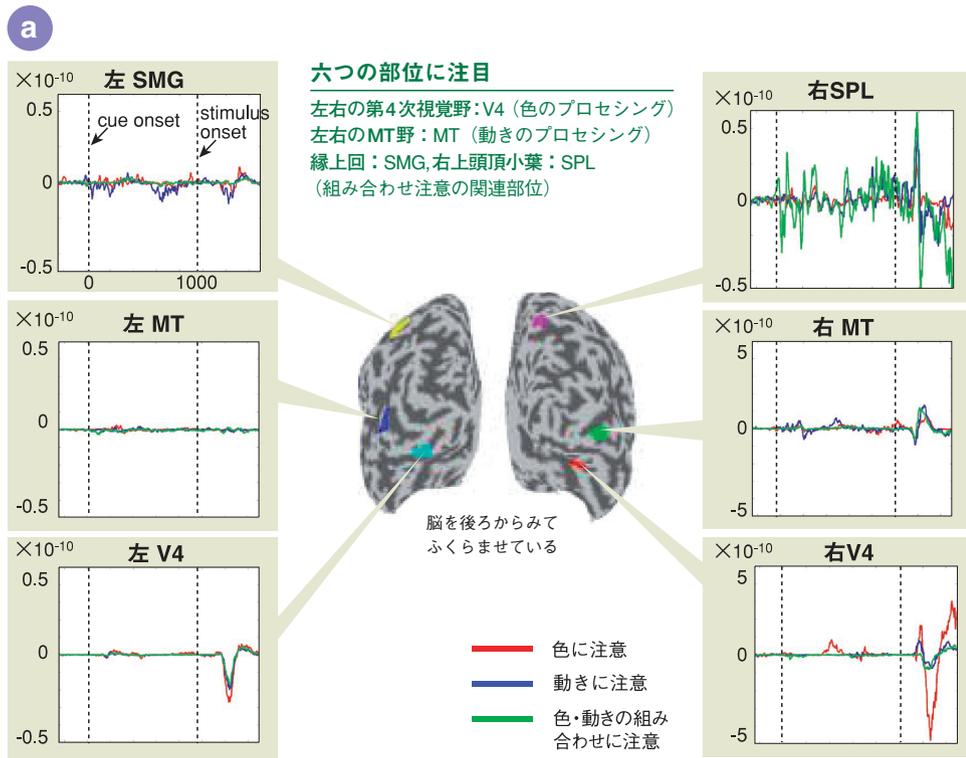


は、空間分解能はある意味ではほとんどないが、時間分解能はミリ秒と高い。そこでATRでは、fMRIとMEGのデータを階層ベイズ法という優れた手法をつかって組み合わせて、高精度に脳活動を推定できることを示している。

このfMRIとMEGを組み合わせた手法を使って、どの程度ヒトの注意の状態をリアルタイムに推定できるかを、ATRの山岸典子さん指導のもと、奈良先端大学の柴田和久君が計測・解析したデータを山下宙人さんが以下のような手順で調べた。

円内に、ある割合で赤と青の点がたくさんちりばめられている。それらの点は、外側へ向かって動いたり、内側へ向かって動いたり、ランダムな動きをする。それらの点を全体としてみると、赤味や青味、内側・外側への動きを感じることができるようになっていく。被験者には、この刺激のなかに含まれている色と動きの属性のどちらか、またはその組み合わせに注意しながらこのモーション画像をみてもらう。たとえば、「C」の文字がでてくるとカラーに注意し、1秒後にランダムドットモーションが現れる、そこで赤なら右、青なら左ボタンを押してもらう。動きに注意する場合も同様の手順をふむ。

私たちが興味をもっているのは、この被験者が色に注意しているか動きに注意しているかを、視覚刺激がでる前の1秒間のデータで当てることができるかどうかにある。一人の被験者でたくさんの試行を平均化したものをみると(図5a)、たとえば、色にかかわっている第4次視覚野では、「C(色)」の文字が出てから、実際の視覚刺激までの間に大きな電流がでていることがわかる。逆に、動きの情報処理を司るMT野では、「M(動き)」の文字がでてから、脳活動がみられる。したがって平均データをみる限り



では、色と動きのどちらに注意しているかを脳磁図で当てることができると考えられる。

しかしむずかしいのは、視覚刺激を与える前の単一試行の脳磁図データから、その被験者が色と動きのどちらに注意しているかを分類できるか、ということにある。そこでスパース・ロジステック・リグレッションという方法を使って、特徴ベクトルを統計的手法で絞り込む方法を選択した。この方法を201チャンネルあるMEGのセンサー空間でおこなうと、40~68の

図5

訓練なしに被験者の心を読む

色の情報処理に関わる第4次視覚野、動きの情報処理に関わるMT野など六つの脳部位(a)に関心領域を区切って、データをいったん脳活動の空間に落とし込むことで、正答率は74±8%から89±6%へと大きく向上した(b)。

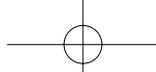


表 “脳をつなぐ” 技術のひろがり

1	計測装置	医療用・脳研究用の脳活動計測装置 安価な携帯型脳活動計測装置
2	リハビリテーション 関連の製品	脳機能モニター装置 →医療機関での脳活動モニターによる回復の診断訓練システム →遠隔脳モニターによる在宅リハビリおよび機能支援
3	エンターテインメント 映像関連の製品	映像操作アプリケーション →ビデオゲーム →アーケードゲーム →スポーツトレーニング
4	ロボット製品	大型ロボット操作におけるブレイン・マシン・インターフェイス →災害救助・介護ロボットなどへの応用 小型ロボット・情報通信端末の高次レベル操作 →ペットロボット →通信端末（ロボット）／PC／情報家電
5	その他の可能性	文字入力装置、外骨格・パワースーツ 脳活動パターン・スクリーニングシステム 機能的電気刺激 (FES) による全身運動再建

特徴ベクトルが選択され、テストデータに対する正答率は $74 \pm 8\%$ となった。しかし、MEGのデータをいったん脳活動の空間のなかに落とし込んでから、特徴ベクトルを絞り込むと、18～27の特徴ベクトルが選択され、正答率は $89 \pm 6\%$ となった(図5b)。

したがって、センサー空間で処理するのではなく、いったん脳空間に落とし込んでから情報処理をすることで、訓練を必要としないBNIが実現する可能性があることが支持された。

ほんの7年前には、ALSの患者さんに対して、わずか2チャンネルの脳波データをとってきてユーザーを50日間訓練しても、75%の正答率しか出せなかった。それでもALSの患者さんが書いた長文の文章がNatureに掲載された。それに比べると、脳をつなぐ技術は実に急激な勢いで進歩しており、その応用の可能性はどんどん広がりつつある(表)。

脳と社会とニューロエシックス (神経倫理)

しかし、これらの技術が現在のペースで進展すると、当然、ニューロエシックス(神経倫理)の問題がでてくる。

たとえば脳計測と脳刺激が進歩すると、さま

ざまな危険性が現実化する可能性がある。脳計測にもとづいた「うそ発見器」がすでに発明されているが、プライバシー侵害の問題が発生するかもしれない。あるいは、脳の形態や活動から潜在的神経病理を予測するだけではなく、それによって保険の料率が変わるようでは問題だ。犯罪の責任を遺伝的要因に転嫁することがおこらないだろうか。アメリカでは、すでにそういった裁判があったと聞いている。脳に病気や障害をもつ人たちのためにBMIを使うのはよいが、正常で健康に生きている人たちの脳機能を特別な方法で高めるのはよいことなのか。ニューロマーケティングやニューロエコノミクスのように、脳情報が経済的に利用されることに制限をかけなくてもよいのか。

この技術が本当にすすめば、社会的問題が山のようにでてくるだろう。アメリカでは、大統領直轄の生命倫理審議委員会で、クローンや臓器移植と並び神経倫理が審議されている。日本でも科学技術振興機構の中に委員会が開かれている。ここでBMIや脳を読むといったテーマが議論されることを期待している。

とはいえ、脳科学の進歩をおそれて負の側面だけを強調するのではなく、日常生活のなかで脳科学の知識が活かされることが、もっとも大事なことではないか。そこにこそ脳科学者たちがもっとも力を入れるべきなのではないかと、私は考えている。

Profile

かわと・みつお

脳の働きを、ロボットの自律学習制御ができる程度に情報処理の立場から明らかにする研究(計算論的神経科学)に取り組んでいる。最近、脳から情報を非侵襲的に取り出し、計算理論に基づいて処理をし、それを視覚フィードバックなどの形で脳に戻すことによって、従来の脳科学よりずっと客観性がある強力な操作脳科学を構築していくことを夢見ている。

参考文献

- [1] 川人光男, 甘利俊一, 外山敬介: 「“脳を活かす”新しい潮流」科学76 (2006) 426-432
- [2] 坂井克之: 「ヒト認知機能と遺伝子解析の統合へ向けた脳画像研究」生体の科学57 (2006) 22-29
- [3] 神谷之康: 「マインド・リーディングは可能か」科学76 (2006) 269-272
- [4] マイケル・S・ガザニガ, 梶山あゆみ訳: 「脳のなかの倫理」(2006) 紀伊国屋書店
- [5] Nicolelis M A L: “Actions from thoughts” Nature 49 (2001) 403-407

