

特集 ■ 心と脳、リアリティと身体

攻殻機動隊の世界は可能か？



藤井直敬

理化学研究所

FUJII NAOTAKA

1. はじめに

Brain Machine Interface 技術、略して BMI 技術を一言で言うなら、脳とコンピューターをつなぐ双方向の情報伝達技術と書いていいだろう。

「そんなことは出来るはずがない」と思うヒトも多いかもしいないが、SF の世界ではまったく当たり前の技術なので、間違いなく時間はかかっても、いずれは社会に実装される技術に違いない。なぜなら、これまでヒトが考えた技術はたいてい実現しているのだから。自動車しかり、飛行機しかり、宇宙船しかり。

実際、BMI 技術の開発は、もはや夢物語などではなく、すでに 1990 年代後半から基礎研究が始まり、さらに数年前からはヒトを対象とした臨床治験も実際に始まっている。しかし開発のステージは、まだまだ基礎研究の範囲に留まっている。そのため、BMI 技術が今後どのような形で社会に実装されるのかはまだ具体的に見えていない。それは、技術自体がまだまだ未熟であるというのが大きな理由の一つだが、一方でそれにまつわる様々な倫理的な問題も解決されなければならないからである。

SF や映画等のフィクションの中で使われている BMI 技術は様々で、例えばジェームスキャメロンの「アバター」では、観客には殆ど何の説明も無く、BMI 技術が当たり前のように入られている。この映画では、ある惑星への侵略の際、車いすに乗る主人公が、BMI 技術を用いて離れた場所にいるナビ族（現地住民）の姿形をしたアバターを自由に動かすことでストーリーが進展する。

そこまで進んだ技術があるなら、なぜ車いすに乗らないといけないのかは分からないが、とにかく主人公の兄の脳に最適化された BMI 装置の中に、兄の代わり

に入れられた主人公は、いきなりアバターを自在に動かすことに成功する。これには周りの科学者もビックリで、エイリアンで有名なシガニー・ウィーバー演ずる科学者は計画の成功を確信する。その後のストーリーは、本稿の趣旨とは異なるので割愛する。

同じような技術を用いた映画にサロゲートがある。サロゲートは、近未来の地球上での話だが、人びとがサロゲートと呼ばれるアンドロイドを操作して、自分自身は自宅にしながら、あらゆる仕事やコミュニケーションを、アンドロイドを介して行う世界が描かれている。

どちらの映画も、自分自身は一カ所に留まり、自分とは異なる場所にある別の人工的な身体を、まるで自分の一部のように動かすことがポイントである。

しかし、BMI 技術を語る上で外せないのは、なんといっても「攻殻機動隊」だろう。士郎正宗原作の攻殻機動隊の独特の世界感、国内のみならず世界中で高く評価されている。攻殻機動隊は、アバターやサロゲートと違い、脳以外の自分自身の身体は義体と呼ばれる人工的な身体に置き換えることが可能になっている。そこでは、「ナノマシン」技術を用いて脳を「電脳化」することによって外部と脳を双方向につなぎ、人工的デバイスを自分の一部のように使用可能にする。身体を義体に置き換える割合はヒトそれぞれだが、全身を義体に置き換える時、脳は「脳殻」とよばれるシェルの中に入れられる。つまり、脳殻を別の義体に入れる事で、別の身体を持つ事が可能になるのだ。もちろん、その技術によって、アバターやサロゲートのように、離れた所にある義体をリモートで動かす事も可能である。

攻殻機動隊は、技術そのものも興味深いのだが、その技術の進歩に伴ってヒトと社会がどのように変化するのかという点においても、非常に面白い思考実験を

私たちにを見せてくれる。さらに、その後に作られた「RD 潜脳調査室」という攻殻機動隊と同じプロダクション I.G. が製作したアニメでは、そのあたりについての考察が中心となっていて非常に興味深いので、興味のある方には一見をお勧めする。

それでは、これらのフィクションで使われている BMI 技術の開発が、どこまで進んでおり、アバターや攻殻機動隊のような脳世界が本当に可能なのかを検証してみることにする。

2. まもられている脳

ヒトである以上、誰もが脳を一つずつ持っている。それでは、この脳がどのように守られているか知っているだろうか。脳は頭蓋骨の中に収まっているが、頭蓋骨以外のどのような組織が脳を守っているのだろうか。

まず、脳を守っている一番外側は髪の毛と頭皮だ。その下には、筋肉、骨膜、頭蓋骨があり、さらにその下に硬膜、くも膜、軟膜と続いてようやく脳に至る。つまり脳へ到達するには何層にも渡るバリアを通り抜けなければいけないのである。逆に、脳の中にある情報を外部に出力するには、それらのバリアを突破しなければならないことになる。ヒトの場合は、皮膚表面から脳表面までの距離は 2-3 センチ程度の距離がある。一方、ニホンザルだとその半分位の距離である。つまり、脳と外部の人工的デバイスが情報をやり取りするということは、見えない壁の向こうを透視したり、ガラス瓶の中のコインを触らずに動かしたりするのと同じ難しさがあるのである。

当然ながら、(サイキック的な何かという意味で) 脳内の情報を外部に直接出力する術や、直接外部の情報を読み取る術を、僕たちの脳は(おそらく)持っていない。すなわち、それらの何層にもわたるバリアを持つ、生物学的かつ進化的な意義は、もっぱら脳を外部の衝撃から守るということにあると言って良いに違い無い。

つまり、BMI 技術が目指している、脳の外側から脳の中身を観察したり、脳に向かって直接何かを語りかけたりすることは、簡単ではないのである。何故なら、大抵の生き物の脳はそういう風に出来ていないから。

3. 脳を傷つけないで情報を取り出す

それでは、いくつものバリアで守られ、しかも外部に対して直接的な情報伝達手段を持たない脳と、情報をやり取りするにはどうやればいいのか。

おそらく誰もが真っ先に思い浮かべる方法は脳波で

はないだろうか。脳波の他には fMRI もしくは NIRS と呼ばれる機能イメージングという方法がよく使われている。

脳波が記録対象にするのは、頭部皮膚に貼り付けた電極を用いて記録される皮膚局所の電位の変化だ。この電位の変化が脳波と呼ばれるのは、脳を守る何層にも渡るバリアを通じて漏れ出て来た、脳内部の脳活動を反映していると考えられているからである。

ところが、脳波信号は皮膚表面の電位差を測っているので、脳以外で発生する電気的な変化の影響も強く受けてしまう。おそらく、皆さんはあまり実感したことは無いかもしれないが、ヒトの体は様々な電気的な変化に満ちている。

脳の内部はニューロンが電気的なパルスを送達することによって情報処理が行われているし、脳からの指令は、やはり電気的な信号として神経を通じて筋肉に伝えられる。そして、少しでも筋肉の収縮が起これば、筋肉から筋電図と呼ばれる電気的な変化が周辺に広がる。つまり、わたしたちは、ある意味で電気仕掛けの人形なのであり、体中のあらゆる所に大小様々な大きさの発電所を持っているのである。

電気信号というのは、発生源からの距離が離れれば離れる程弱くなっていくので、頭の皮膚から脳波を記録するとしたら、足を多少動かした位ではあまり大きな影響は受けない。しかし、眼球周りの筋肉(片目で 6 本、両眼で合計 12 本)や、顎や顔面の筋肉などは、小さな筋肉ではあっても、場所が脳波を計測する電極に近いので、脳からの信号と混ざり脳波信号に強い影響を与える。これらの脳以外の電気的な信号の混入は脳波の計測にとって極めて大きな問題となっていて、その根本的な解決方法はまだない。特に安価な装置で素人が記録する脳波は、その殆どが筋活動由来の筋電図だと言って良いだろう。つまり脳波は、記録中の被験者の行動を専門家の指導下できちんとコントロールしないとうまく記録出来ないものなのである。

一方の機能イメージングは、脳の中で起きている代謝を計測する方法である。代謝というと分かりにくいですが、脳の中で消費されるエネルギー量だと考えれば良いだろう。例えば、脳の一部が、ある行動を行った時に普段より余計に働くとする。すると、その部位では普段より多くのエネルギーが消費されるので、その部位へのエネルギーの供給を増やさないといけない。このエネルギー供給の増減を磁気や近赤外線を使って記録するのが、fMRI であり NIRS なのだといえる。

つまり、機能イメージングは、脳活動に由来する電気信号を直接記録しているのではなく、原理的にその結果を見ている事になる。そのため、脳活動の変化と機能イメージングが計測するデータの変化の間にはどうしても時差が生じる。

これらの脳機能計測方法は、外科的処置を一切必要としないために、非侵襲的計測手法と呼ばれている。非侵襲的手法は、誰に対してでも簡単に使う事が出来るというメリットに対して、上記で示したいくつかの理由から、どうしても信号の質が十分ではないのが悩み。それは、すなわち取り出せる情報量に限度がある事を意味している。

それでは、これらの計測方法を実際に BMI に使うとしたらどうなるだろうか。

4. 非侵襲的 BMI 技術

SF やアニメで BMI 技術が語られる時に、外科手術が必要だという話をはっきりと出しているものはあまりない。その中では、手術やリハビリも含めて語る攻殻機動隊は例外的と言えるだろう。それ以外の大抵の場合では、どうやって脳から信号を取り出しているのかの方法をはっきり示す事無く、方法は曖昧なまま、いきなり脳波の電極のようなものを頭にかぶって機械を操作することが多い。

そういうシーンをぼんやり見ていると、まるで脳波や機能イメージングを使う事で高度なリアルタイム制御が可能に見える。しかし、リアルタイム性が要求される BMI 技術には、現状利用可能なそれらの非侵襲的手法はおそらく使う事が出来ない。

まず、脳波は実際に脳の中で起きている脳活動と観測される電位変化の間に時間差はないものの、あまりにノイズ成分が多すぎるのが問題。目玉ひとつ動かすだけで盛大なノイズが発生する脳波は、明らかに情報量が十分とは言えない。

実際に脳波を用いた BMI 技術では、同時に読み取れる情報量はせいぜい 2 ビット程度、つまり上下左右の動きの区別が出来る程度。しかもその情報を得る為に数秒必要であったりすることが多く、実際の情報量は 1bit/sec(bps) 以下であることが殆どである。そのような低い情報量で、現実存在するリアルなアバターを動かす事は間違いなく不可能だ。もし、動かす事が出来たとしても、目が光ってガーガー言いながらまっすぐ進むブリキのロボット以上のものは無理に違いない。

同じように、機能イメージングも、リアルタイム

BMI への応用には問題が少なくない。最大の問題は、脳の活動と機能イメージングで記録される情報に時差があること。その時差は最短 1-2 秒程度で、さらに脳の変化が 10 秒以上続く変化として観察される。そのため、機能イメージングは時差だけでなくキレも悪く、リアルタイム制御にはあまり向いているとは言えない。例えば誰かにぶつかりそうになって、それを避けようとしても、実際にアバターが反応するのが 10 秒後なのは、全く使い物にならないのは明らかだ。

つまり、現状における非侵襲的手法は、リアルタイム性を持たない範囲に限ればある程度有効だが、アバターや義体を動かすというような、膨大な情報量をリアルタイムでやり取りしなければならない種類の BMI 技術には原理的に向いていないことになる。

もし、現在の非侵襲記録技術を究極まで発展させたとしても、その未来には、わたしたちが想像するような、アバターや義体を自由に動かす種類の BMI 技術は残念ながら無いだろう。もし、非侵襲 BMI 技術でそれを実現するのなら、これまでに無い、全く新しい原理で脳内現象を記録出来る方法を開発する以外にないのである。

5. 脳を直接覗き込む

それでは、アバターや義体を動かすために、脳と外部を、太い情報パイプでつなぐにはどうすれば良いのだろうか。一番手っ取り早い方法は、皮膚も骨も硬膜も記録に邪魔な組織を全部切り開いて、脳を直接観察することである。これが、実のところ一番効率が良いのは明らかだ。なぜなら、途中の邪魔するものが全くないので、脳から記録する信号に余計なノイズが入り込みにくいから。また、直接脳内部の電気的な変化を見ることが出来るため、リアルタイムの情報処理にも向いている。

このような、外科手術を必要とする方法は、非侵襲的手法と比較して侵襲的手法と呼ばれているが、国内の BMI 研究では一種タブー視されている。その理由は簡単で、侵襲型 BMI で行われる外科的手術に伴うリスクを相殺できるだけのメリットを、わたしたち研究者がまだ提供出来ていないからだ。

侵襲的手法に伴うリスクとは何か。それは、外科的アプローチに伴って発生するあらゆるリスクである。例えば、麻酔をかける、皮膚を切開する、頭蓋骨を切り開く、そういうあらゆる外科的操作にリスクは隠れている。常に、何が起きてもおかしくないというのが、外科手術の真実。これは、どんな簡単な操作を行って

も、それを原因としてヒトが死ぬ可能性があるという事。つまり、普段健康診断で行う採血や、虫歯を抜歯するだけでショックを起こして心停止が起きても不思議はないのである。

それでは、世間で日常的に行われている外科手術は、なぜ普通に行われているのか。それは、外科手術から得られるメリットが、合併症などのデメリットを上回っているからだ。もし、指に刺さったトゲを抜いた10人のうち5人が死んでしまうとすれば、トゲを抜くのも命がけになるし、多少痛くてもトゲは放っておこうと思うヒトも出てくるだろう。しかし、トゲの痛みが激烈で、眠る事も出来ず、死ぬような痛みが一生続くのだとしたら、50%の致死率を知った上で手術を選択する事も十分あり得る。

トゲの例は単なるたとえだが、実際の眼科疾患で急性の狭隅角緑内障発作という病気がある。わたしたちの眼球内部は硝子体と眼房水というもので満たされており、房水が適切に眼球外部と循環することで適切な圧に保たれている。もし、眼圧がその範囲内であれば何の問題もない。しかし、急性の緑内障発作では房水が出口を失い、眼球内部の圧力が異常に高まってしまう。その眼圧の上昇は患者に激しい痛みを与えるが、眼圧を下げるあらゆる処置に反応が見られない場合、眼球そのものを切除、摘出するという治療が行われる事もある。健康なヒトの眼球を切除する事は常識では考えられないが、その他に痛みを取り除く方法が無ければ、緊急の治療として患者同意の上で許されるのである。

つまり、ヒトに対する侵襲的外科操作は、操作に伴う患者が享受する利益と不利益のバランスに応じて選択される。もちろん、そこには倫理的問題も絡むため、医者と患者の間の同意だけでは済まない点も多く、そんなに単純ではない。しかし現実の医療現場では、社会的な合意を考慮に入れつつも、緊急性との兼ね合いであらゆる可能性が模索され、患者にとって最適な診療方針が決定される。

ところが侵襲的BMI技術はこれまでになかった、全く新しい技術である。そのため、何が出来て何が出来ないのか、どれくらいのリスクがあるのかなどについての情報が不十分で、社会的合意を形成するには時期尚早である。しかも日々刻々とその技術は進歩し、それに伴うリスクの大きさや種類は変化している。つまり、将来解決されるかもしれないリスクが、もしくは既に昨日解決されたかもしれないリスクが、絶対に解決出来ないリスクのように語られる事も多い。

また、BMI技術が目指すのが、命を救う事ではなく、生活の質を改善するという事にあることも医療関係者が一歩踏み出す事のできない理由である。死ぬか生きるかの境目では、ハイリスクの処置を行う理由があるが、生死に関して落ち着いた状態の患者に、あえてリスクのある処置を行う事が許されるのかという疑問を押し切るのは大変な事なのである。

それでは、そのような倫理的側面を抱える侵襲的BMI技術の現状について説明してみよう。侵襲的BMI技術は、大別して脳へ直接情報を与える方法と、脳から情報を読み取る方法の二つがある。

6. 脳へ情報を与える

まず、脳へ直接情報を与えると言う意味はどういう意味かを考えてみよう。ここでのキーワードは、「直接」である。

「直接」がキーワードになる理由は、脳に向かって間接的に情報を与える事が比較的簡単だからだ。誰もが、世界を見て、聞いて、感じている。そういう持って生まれた五感を通じた情報伝達は、脳にとって自然な情報経路だと言えるだろう。ここで言う間接的な情報伝達というのは、目や耳、鼻のように、身体に埋め込まれている生得的なセンサーを使って情報を獲得することと同じ意味である。

一方、直接的な情報伝達とはどのようなものだろうか。直接的な情報伝達とは、簡単に言うなら、五感に頼らない、脳へ直接「意味」を伝える方法の事を指す。それでは「意味」とは何か。それは、私たちが五感を通じて感じ、様々な情報処理を脳内で行い、その結果として最終的に意識上にのぼってくる抽象的な情報の事である。

まさに、その誰とでも共有出来るはずの抽象的意味そのものを脳に対して与える事が、双方向的なBMIに重要だと僕は考えている。なぜなら、五感を通じて与える情報は、意識に上るまでの間に様々な主観的なフィルターをかけられてしまうから。僕は、BMI技術はこれまでに無かった新しい感覚を手に入れる事だと思っている。これは、純粋な「意味」覚というような新しい感覚で、ヒトのコミュニケーションを根本的に変える可能性を秘めていると考えられる。

ただ、この考え方は、BMI開発の主要目的である、失われた身体機能を補償するという意味合いからは少し離れているので、これがBMI研究者の主流ではないことは強調しておくべきだろう。

それでは、そのような夢物語を少し離れて、実際に失われた視覚や聴覚を、人工的デバイスで補償可能かと言うと、その成果は感覚の種類による。

最も成功しているのは、人工内耳という技術で、失われた聴覚を取り戻すために用いられている。これは、耳の奥の内耳と呼ばれる場所にある聴神経を電氣的に刺激することで実現され、すでに健康保険の適応として一般的に行われている手術方法だ。現在国内に人工内耳を装着している患者数は 6000 人を超えつつあり、それらの人びとは、人工的な電気刺激によってつくられる聴覚を通じて世界とコミュニケーションしている。もし、この人工内耳の入力部分に携帯電話の出力を繋いでやれば、そのまま SF のような通話が出来ることになるだろう。

一方、人工的な視覚補填技術も世界中で開発が進んでいる。その殆どは、眼球内部の網膜を電氣的に刺激することを目的としているが、まだ大きなブレークスルーには至っていない。ただ、ゆっくりとした進歩ではありながら、視覚補填の技術は進歩しているので、人工内耳のように、保険適応の術式が実現できる日も遠くないかもしれない。

しかし、いずれの技術も、脳の外部にある、生まれながらに持っている感覚センサーに対して刺激を与える事で、情報伝達を実現するという点では同じである。それでは、ヒトの脳に直接電気刺激を与えらるのだろうか。

実は、そのような研究はてんかん治療の歴史と重なる。てんかんという疾患は、脳内部の一部の神経細胞が異常に活動することで生じる異常な感覚や意識消失、痙攣などを主体とする疾患だ。そのため、患者は発作が何時起きるか分からないために日常生活に大きな支障をきたす。そのてんかん発作が起きている脳の部位を探す為に、外科的に脳を露出し、脳の一部を電氣的に刺激するという事が行われる。この場合、患者は目を覚ましたままである。なぜなら、刺激の効果を、患者の反応を元に判断しなければいけないから。

それでは、そのような刺激を与えた場合何が観察されるのだろうか。実際の効果はヒトそれぞれ、刺激部位それぞれだが、刺激によって昔の記憶が“ありあり”と蘇ったり、音楽が聞こえて来たり、言葉が一時的にしゃべれなくなったりというようなことが起きる。

このことは、三つの重要な事実を示している。一つは脳を電氣的に刺激する事で、何らかの知覚を引き起こす事ができるということ。そして、二つ目はその効

果は部位によって異なる事、さらに患者が異なれば刺激の効果も異なるという事である。

BMI の技術開発に関して、これらの三つの事実は非常に重要だ。まず、脳に対して電氣的に情報を与える事が可能である事から、これを意味のある情報と関連づけるトレーニングを行えば、情報を伝える事が可能になる。例えば、アルファベット 26 文字を脳に区別させるには、キーボードのように文字一つ一つに特別な感覚を与えなければいけない訳ではなく、単に 5 ビットの情報を与えるだけで十分である。つまり、5 種類の異なる刺激効果を与える事で、その組み合わせを使って脳は文字情報を受け取る事が可能である。もし、ひらがなを区別したいと思えば、6 ビットあれば良いことになる。

この技術が実現するなら、わたしたちの脳は、まるでティッカー広告のように、文字の流れを自由に受け取る事が出来るようになるだろう。例えば、1 秒に 2-3 文字程度の弁別が出来たら、このテキスト全体を読むのに 2 時間程度で十分だ。この情報伝達では、外部のセンサーを全く介していないので、脳に対しての直接的な抽象的意味伝達ということになる。

また、脳の部位ごとに、そして一人一人の脳ごとに刺激効果が異なるという事は、BMI 技術は個別の脳に対してカスタマイズしなければ最大の効果を出す事が出来ない事を意味する。逆に言うなら、誰にでも使えるユニバーサルな方法は原理的にあり得ないという事である。

実は、この一人一人の脳は異なっているという考え方は、これまでの脳科学が無視して来た事実なのである。しかし、BMI 技術の開発は、脳の現実に立ち向かうという意味であり、この事実を無視する事は出来ないのである。

7. 実際に電気刺激で情報を与える事ができるのか？

それでは、実際に電気刺激で脳に対して直接的な意味情報を与える事に成功しているのだろうか。答えはイエスでもありノーでもある。

実際の BMI 技術の開発において、情報を与える技術はあまりうまくいっていない。現在のところ、いくつかの動物実験の結果から、おそらく可能であろうと考えられているレベルである。

例えば、ネズミの脳に刺激電極を入れ、右もしくは左に進行方向を変えるように指令を与えるリモートラットという実験が行われた。これは、ヒゲの感覚を

司る脳の部位に刺激電極を入れ、刺激を与える事で、まるでヒゲに何か当たったような知覚を人工的に引き起こす。それに従うように訓練を行った所、ネズミの動きを自由自在にコントロールすることが出来たという報告である。

同じように、サルの体性感覚野と呼ばれる部位に刺激電極を入れる事で、意味情報を与えようという試みも行われた。この場合の刺激は、腕の知覚に関係する脳の部位を刺激し、それによってまるで腕に誰かが触ったかのような知覚を引き起こす。つまり、電気的な刺激によって、皮膚が触られたような感覚が引き起こされ、その感覚に行動課題で必要とされる情報を結びつけることを覚えたサルは、以後刺激の意味する情報を理解して、課題行動の選択に用いる事が出来るようになる。

つまり、いずれの場合も、電気刺激が脳の内部に知覚を引き起こし、その知覚と情報の関連付けを学習することで、意味情報を手に入れる事に成功していると言える。そして、この技術を延長することによって、もう少し複雑な情報を、複数の刺激と組み合わせる事で、脳内に与える事が出来るだろうと期待されているのである。

ただ、ここで用いられている技術の延長で本当に情報量を増やす事が出来るのかはまだ分からない。また、本当に抽象的な「意味」情報を理解しているのかも、刺激の効果が実験動物の主観的な感覚なので、わたしたちが外から証明するのは難しい。

しかし、この技術を用いて脳が学習を行う事によって、おそらくそこには全く新しい知覚が生まれるのではないかと期待されている。この知覚はこれまでのわたしたちが持ち合わせていた感覚とは異なる BMI 時代の新しい時代の知覚能力としてわたしたちの生活に役に立つに違い無い。

8. 脳から情報を読み取るには

一方、脳に情報を与える技術と比較して、脳から情報を取り出す技術は比較的進んでいる。具体的には、脳の中に置いた電極から神経活動を記録し、その情報を元にして、様々な運動情報を抽出することができるようになって来た。

例えば、サルの一次運動野と呼ばれる脳部位に、高密度の剣山状の電極を差し込むと、その電極から沢山の神経活動を記録する事が可能である。そして、その神経活動を元にして、サルの腕の運動を予測するための計算モデルを作ることが出来る。このモデルの事を

デコーダーと呼ぶ。

デコーダーは、ある入力に対して、何らかの計算結果を自動的に出力するブラックボックスのようなもの。デコーダーへ与える入力は神経活動で、デコーダーの内部では、計算モデルが入力情報から出力情報を作り出す。計算モデルは、事前に決まった入力と出力に対して学習が行われ、目的とする出力と実際の計算結果の差が最も小さくなるように最適化が行われる。

一旦デコーダーが出来上がったら、あとは電極から記録される神経活動を入力として与えてやれば、デコーダーが学習した行動データを自動的に出力してくれる。もしデコーダーが腕の位置情報を出力するとしたら、その情報をロボットアームに与えてやれば、原理的には考えただけでロボットアームを動かす事が出来るようになる。これが、BMI 技術の基本的な考え方である。

ただ、ここで気をつけなければいけないのは、デコーダーの出力が常に正しいとは限らない事。キーボード入力を見張っているプログラムが出力を間違える事はよほどの事が無い限りありえないが、BMI 技術で使われるデコーダーの出力は常にある程度の誤差を含んでいる。それは神経活動データというノイズやゆらぎを含んだ生体情報を扱う以上、どうしても避けられない事である。そのため、デコーダーの出力は予測値と呼ばれ、予測値と実際の予測すべき値の誤差を計算する事で、デコーダーの性能が評価される。デコーダーの性能は理想的には 100% に近い予測性能が期待されるが、実際に実用可能なデコーダーの性能は 80% 程度あれば上々と考えられる。

9. 運動を予測する

それでは、実際にこのような複雑な情報を出力するデコーダーを作る事が可能なのか。勿論可能である。このアイデアに基づく研究は既にサルを使って行われており、サルは実際の自分の腕を動かす事なく、目の前に置かれたロボットアームを、サルが考えただけで動かす事が出来る事が証明されている。

これが出来るのは、事前にサルの神経活動と実際の腕の位置情報との関係を学習した、高い予測性能を持つデコーダーのおかげである。手を動かしたいというサルの意思を神経活動から読み取るデコーダーの出力を、リアルタイムでロボットアームの制御装置に与える事で、考えただけでロボットアームを動かす事が可能になったのである。

この研究は当然ながら、非常な驚きをもって迎えら

れた。頭の中では誰もが考えたことのある実験だが、それが実際に実現可能であるとは思わなかったから。この実験を最初に行ったのは Duke 大学のニコレイラスのグループだが、その後もいくつかのグループが類似の実験を行い、この方法が有効であることが明らかになった。

そして、その研究結果を受けて、実際のヒトを対象とした臨床治験もアメリカで始まっている。この場合の治験対象となっているのは、頸椎損傷等で首から下の運動機能が殆ど完全に失われた人々で、脳内に埋め込まれた剣山状の電極によって神経活動を記録し、それを元にコンピューターのカーソルを自由自在に操り、それまでできなかった様々なコミュニケーションを考えるだけで行う事が可能になったのである。つまり、治験に参加した患者は、生まれながらにして持っている意思伝達のチャンネルに加えて、全く新しいチャンネルを獲得したことになる。

10. 侵襲型 BMI の問題

しかし、この方法には大きな問題点があった。それは長期間安定的に使用する事が難しいという事である。デコーダーの予測性能が、時間が経つにつれて低下していきってしまうのである。つまり、今日使う事ができたデコーダーが、そのままでは明日には使えなくなるのである。

実は、これはデコーダーそのものが問題なのではない。問題なのは、神経活動を記録する方法が極めて不安定なところにある。そのため、運動に対応する神経活動のパターンが日によって異なり、デコーダーを毎日作り直さなければならないことになる。

つまり、安定した神経活動の記録技術が存在しなかったことが、BMI 開発の最大の問題点であった。これに関しては、これまで世界中の科学者達が、様々な方法を使って解決方法を探ってきたが、うまくいかなかった。

しかし、我々のチームが試みた ECoG という電極を用いれば、この問題が解決する事が分かった。ECoG は剣山状の電極とは異なり、脳に刺す事はしない。外科的な開頭手術は同じように必要だが、電極を脳の表面に置くだけ。つまり、剣山状電極よりも脳に優しいやり方と言える。

しかも、脳に優しいだけではなく、神経活動記録の安定性が非常に高いことが分かった。もちろん、デコーダーの性能もこれまでの剣山状電極を用いたものとほぼ遜色無く、しかも長期安定性能の高さはこれま

でのどの方法と比較しても抜群に優れている。つまり、ECoG 電極を使う事で、メンテナンスフリーの実用的なシステムが構築できる可能性が見えて来たのである。

これは、BMI 技術を家庭の中で日々使う事を考えると大きな利点だ。なぜなら、これまでのやり方では専門のエンジニアが毎日デコーダーを作らなければいけなかったのに対して、ECoG を使った方法では、月に一度程度の通院で、十分実用レベルのデコーディングが可能だと考えられるからである。

11. より高機能な BMI 技術へ

ECoG 電極を使った方法が優れているのは、安定性だけではない。実は、ECoG 電極を用いる事で、多様な脳内情報を網羅的に予測する事が可能な事が分かってきた。

これまでの剣山状電極は、脳の狭い範囲にしか電極を入れなかったため、取り出せる情報の種類は、その狭い脳の領域が持っている情報に限られていた。しかし、ECoG 電極は脳の広い範囲から神経活動を記録するので、様々な種類の情報を同時に読み出す事が可能だと言う事が明らかになった。これは、何かの調べものをするときに、一人のヒトに聞くよりも、沢山のヒトに聞いた方が、多様な疑問に適切な回答を得る事ができるのと同じ。つまり、知り合いが多い方が困った時に助けてくれる。

例えば、ロボットアームを操作してアームの先端を目の前の空間のどこかに向かって動かしたいとする。その場合に必要なのは、“どこ”という情報である。それさえロボットアームに与えてやれば、ロボットアームは自分の関節の角度を自動的に調整して、ゴール地点に向かってアームを動かしてくれる。

しかし、そのやり方では動かしているロボットアームのポーズをどういう風にするかというような細かい情報を取り出す事は出来ない。手首の角度を変えたり、肘をもっと下げたいと思ったり、脇を締めたりしたいと思っても、それをロボットアームに理解してもらうことは出来ないのである。

もちろん、腕を目標の地点に持っていくという目的を達成する事が第一であり、それ以外の細かい事は二次的な情報なのかもしれない。しかし、ロボットアームを自分の本当の身体の一部として使う事を考えるなら、その全ての操作可能な機能を、必要に応じて操作出来るようになっている方が良いに決まっている。それは、操作の自由度が上がるほど、自分の身体の一部

であるという感覚が強くなるから。

つまり、自動車のセミオートマのように、必要に応じてマニュアル操作したり、自動で変速してくれたりするような形式が望ましい。そのためには、普段の使用には必要がないけれども、必要な時に必要な情報を取り出せる性能を持つ必要があると言えるだろう。

12. これからのBMI

ECoG電極という記録技術は、おそらくBMI開発の当面の主流となっていくだろう。しかし、この技術で全てが解決したわけではない。なぜなら、今の技術では、まだまだ義体のような複雑な装置を動かすことは無理だから。つまり、当然ながら攻殻機動隊の実現にはまだまだ課題が山積み。

まず、最大の課題は、記録情報のスケールの問題である。攻殻機動隊の中では、マイクロマシン技術を用いて、脳の中から情報を取り出したり、脳の中に情報を与えたりしているという設定になっている。そのようなマイクロマシン技術は、当然実現していないが、脳の内部の広範な領域とコミュニケーションするシステムを実現するには、記録デバイスそのものを小型化する以外にない。

現在の我々が使っている電極はプラチナの皿状電極で、直径は2ミリ、厚みは0.2ミリ程度である。今のところサルの頭に入れられる電極の数は最大で200-300個と限られている。なぜなら脳には、そういう物体を入れるためのスペースがあらかじめ脳内に準備されている訳ではないから。朝にはぴったりの靴が、夕方足が少しむくむだけで履けなくなるように、頭蓋骨で守られている脳の中に入れられる電極の数には、頭蓋内空間のもつ物理的な制限がある。そのため、チャンネル数を増やしてこれまで以上の情報を手に入れるには、これまでにない新しい技術を待つしかないことになる。

実は、我々はこれに関しても色々と検討を始めている。マイクロマシンとはいかなくても、現在の電極と比べて遥かに小さい体積の電極をデザイン中だが、まだまだ詳細をお伝え出来る段階ではないし、開発の費用をどうやって賄うかも全然目処が立っていない。

しかし、ECoG電極の成功により、これをコンパクトにすればいいという次のステップが見えて来た。技術開発というのは、うまく行く方向を手当たり次第に探り、その中で一番見込みのありそうなところに集中的にリソースを投入すれば良いはず。そういう意味で、ECoG電極は、極めてスジの良い方法であるし、それを小型

化して発展させる方向が、現在のところ最も成功の確率が高いだろう。

つまり、BMI技術を現実的なものにする為の最初の最大の関門はすでに突破されたと考えて良い。安定した記録性能をもつ電極を手に入れた事で、わたしたちは次の段階へ進む事が出来るようになってきたのである。

13. おわりに

これまで、BMI技術の現状と今後の課題について急ぎ足で説明して来た。途中色々な解決困難な問題点を指摘したため、BMIの実用化にはネガティブな印象を持たれたかもしれない。

しかし、実現不可能に見えるどんな困難な問題でも、適切な質問に分解できれば、それに対して答え続けることで解決出来るものである。逆に、適切な質問の無い所には、正しい答えは生まれない。

20年前には、「BMIは可能か？」という大雑把な質問しか出来なかったが、その頃と比較すると、現状は違う。問題点がかなり明確になって来ているのである。これは明らかに良い兆候だろう。BMI開発は、どう解決すればいいかわからずに闇雲に進むステージから、明確な問題意識をもつステージへとシフトしつつある。

それでは、「攻殻機動隊は可能か？」という問いはどうだろう。BMI研究者として、それを可能にする技術は“必ず実現する”と信じたい。何と云っても、こんなクールな研究領域は他に無いのだから。たとえ、その一部であっても自分たちの研究がそれに貢献出来るのであれば、研究者冥利に尽きるではないか。

【略歴】

藤井直敬 (FUJII Naotaka)

理化学研究所 脳科学総合研究センター 適応知性研究チーム チームリーダー

1965年生まれ。1991年東北大学医学部卒業、同大医学部眼科学教室にて初期研修後同大大学院入学、1997年同大学院修了、医学博士号取得、1998年MIT(マサチューセッツ工科大学) McGovern Institute Graybiel Lab 上級研究員、2004年理化学研究所 脳科学総合研究センター象徴概念発達研究チーム 副チームリーダー、2008年から現職。主な著書「つながる脳」(NTT出版)、「予想脳」(岩波書店、岩波科学ライブラリー)、「ソーシャルブレインズ入門」(講談社、講談社現代新書)。「つながる脳」で第63回毎日出版文化賞(2009年)、ゴールド・メダル「東京テクノ・フォーラム21賞」(2010年)。