

立石賞特別賞の受賞記念講演概要

脳神経科学と情報工学の融合による BMI の研究開発

(株) 国際電気通信基礎技術研究所 脳情報通信総合研究所長 川 人 光 男

私は、脳機能を情報処理と計算理論の観点から研究し、腕の到達運動における平衡位置制御仮説を批判的に検証し、小脳内部モデル理論を提案し、更にそれを発展させたモザイク理論でコミュニケーションや見まねなどを含めた高次認知機能も説明しました。また、大脳皮質の低次と高次の視覚野の間に存在する前向きと後ろ向きの神経結合、あるいは視覚野内の神経結合が光学の順逆モデルや、外界の内部モデルを提供していると考えた視覚の双方向性理論を提案しました。これらの理論を自ら実験的に検証すると共に、様々な関連する理論的あるいは実験的な研究を呼び起こすなど、計算論的神経科学とシステム神経科学の分野に『内部モデル』というキーワードを中心とした研究分野を作り出すことに貢献しました。また、これらの知見を応用して、ヒトの脳を傷つけずに、脳活動から必要な情報を抽出し、考えるだけで、遠隔にあるヒューマノイドロボットやコンピュータなど情報通信機器を学習させて動かす革新的なブレ

イン・マシン・インターフェース (BMI) 技術の開発を行ってきました。

BMI は、脳の感覚、中枢、そして運動機能を電気的な人工回路で補綴、再建、そして増進するものです。感覚と中枢に関してはすでに実用化しています。例えば、人工内耳は世界で20万人の方の失われた聴覚を再現しています。私が主に研究をしているのは、失われた運動、あるいはコミュニケーション機能の代償、回復に関する、いわゆる運動型の BMI です。約10年前に運動型 BMI の基礎論文が出版されましたが、それから僅か数年のうちに、臨床試験が始まりました。脊髄損傷の患者さんの脳に、4ミリ×4ミリほどの非常に小さな剣山型の電極を差し込みます。この電極を使って得られたニューロンの活動を用いて、コンピューター画面上のカーソルを動かせるようになったのです。

このような BMI は、医学用語で「侵襲型」と呼ばれています。脳に針を刺すことでどうしても脳を傷つけてしまいます。さらに、電極と脳の間的位置関係が安定せず、電極をグリア細胞が取り囲んでいわば絶縁するので、長期的に安定に記録はできません。平成20年度から始まりました文部科学省脳科学研究戦略推進プログラムの課題 A『日本の特長を活かした BMI の総合的研究開発』の拠点長として、私は侵襲型ではなくて低侵襲型、あるいは非侵襲型に力点を置いて研究を進めてきました。

BMI が成功するためには、いろいろな要素



図1 ヒト型ロボット, CB-i (JST-ICORP)

が必要です。1つは、神経科学の知識で、例えばBMIで運動を実現しようと思えば、大脳皮質の中で運動に関わる部位（運動野）からニューロンの発火頻度を記録し、しかもたくさんのニューロンから情報を取ることが必要となります。2つ目は、IT技術、コンピュータサイエンス、機械学習を脳科学に応用した脳情報解読（デコーディング）です。脳の活動信号値から、脳から読み出したい情報への対応関係を、コンピューターのアルゴリズムで自動的に発見します。3つ目は、ユーザーの訓練です。ユーザーの脳がシナプスの可塑性によって変化することで、最初はあまり上手に使いえなかったBMIが自由自在に使えるようになります。

非侵襲型の脳活動計測方法は、大型で主に医療、研究用として用いられる機能的磁気共鳴画像法（fMRI）、脳磁計から、比較的小型で携帯可能な近赤外光計測（NIRS）までいろいろな種類があります。fMRI、NIRSは、脳のどこから活動があるかが高い精度で分かります。脳磁計、脳波は時間の分解能が高いです。そこで、ATRの佐藤雅昭所長らは、fMRIと脳磁計を組み合わせる、あるいは近赤外光計測と脳波の同時計測により、脳のどの部分にどれだけ電流が流れているかを、正確に推定することに成功しました。佐藤雅昭所長、大須理英子室長、そして私たちは、このような脳活動推定の先進的な手法を用いて、非侵襲型で、さらに携帯型でさえも、脳活動の時空間パターンを正確に推定し、それを用いて高性能のBMIを構築することに成功しました。

ニューロフィードバックトレーニングとは、バイオフィードバックトレーニングの一種で、被験者が自身の脳活動に関するフィードバックを受けることで、脳活動を操作する方法を学ぶというものです。これまで、単一ニューロン活動記録、脳波など、様々な脳機能計測モダリティを利用して、ニューロフィードバックが行われてきました。私は、脳情報デコーディング技術とニューロフィードバックを組み合わせ、

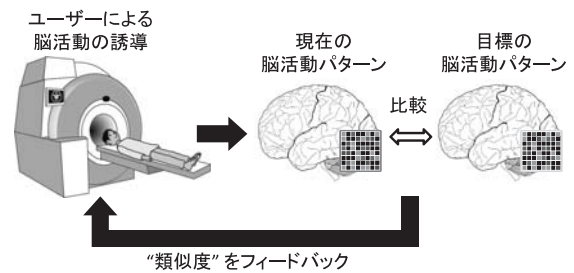


図2 DecNefの仕組み

DecNef（Decoded neurofeedback）法を開発しました。

DecNef法で用いられる脳情報デコーディング技術とは、脳活動信号から脳の中で表現されている情報を解読する技術です。ものを見たり音を聞いたりするなど、外界からの刺激入力や認知の変化に伴い、脳活動は変化します。例えば、知覚に話しを限定しますと、知覚刺激に誘発された脳活動を解析し、脳活動と知覚刺激の対応関係を見つけ出し、脳活動から知覚刺激を予想するのがデコーディング、脳情報復号化・脳情報解読です。このデコーディング技術をニューロフィードバックと組み合わせたDecNef法には、これまでのニューロフィードバックにはなかった利点があります。第一に、これまでのfMRIニューロフィードバックよりも複雑な脳活動を扱える、という点です。これまでのfMRIニューロフィードバックは、ある脳領域の活動の変化量や、2つの脳領域の活動間の相関を扱うなど、脳領域単位の操作でした。一方、DecNef法では、ミリメートル程度の大きさのボクセルという細かい単位で、空間的なパターンをフィードバックの計算に用いることで、これまでの脳領域単位の操作よりもずっと高度な情報の操作が可能になります。第二に、フィードバックに使う脳活動を効率よくかつ自動的に決めることができる、という利点もあります。これまでのニューロフィードバックでは、活動を操作する領域はある程度の事前知識によって決められてきましたが、デコーディング技術を用いることで、外界刺激や認知状態を表している脳活動を見つけ出し、フィードバック

に使うことができます。

脳科学では、脳活動を原因として結果として行動を引き起こす、因果関係の研究は従来行いませんでした。そこで、脳活動のデータから脳内の情報を解読し、それを短い時間遅れで脳に報酬として帰還し、結果として特定の空間的脳活動パターンを誘起する、DecNef法を開発しました。

このDecNef法を用いて、ヒトの大脳皮質初期視覚野に特定の空間的な活動パターンを引き起こして、特定の視覚刺激に対してだけ知覚能力が向上する、いわゆる視覚知覚学習を導きました。経験を積んだ医師は、身体の断層画像から、一般のヒトには認識できないような異変を瞬時に読み取ることができます。このような専門家の持つ視覚能力は、例えば何度も体の断層画像を見るといったような、経験・訓練によって培われたものです。この訓練に伴う視知覚能力の向上について、心理物理実験によって、コントラストの低い縞模様でも、繰り返し縞模様を見せられることで、縞の方向を知覚できるようになるということが分かっています。しかし、視知覚能力の向上の神経基盤についてはよく分かっておらず、とりわけ初期視覚野の可塑的変化が関連しているかどうかは、長い間議論がありました。そこで、DecNefを用いて、縞模様を見たときの脳活動を初期視覚野で繰り返し発生させることが、視知覚能力の向上の十分条件であることを明らかにしました。被験者は、自分自身の初期視覚野の脳活動を、ある視覚刺激（縞模様）を見ているときの脳活動に近づける訓練を行いました。この研究は、視覚刺激・誘導した脳活動パターンの意味・実験の仕組みについての自覚が被験者になくても、初期視覚野における特定の活動パターンの繰り返しが、そのパターンに対応する視覚特徴に対する知覚学習を引き起こすことを示したという点が画期的です。

これは、脳活動パターンを原因として、知覚

学習が結果としてえられたという意味で、因果関係を証明したことになります。従来は、ヒトやサルに知覚学習をしてもらい、その時の脳活動とニューロン活動をfMRIや刺入電極による単一ニューロン記録法で調べる研究がほとんどでした。このような研究は学習と脳活動の相関を調べているに過ぎないので、ある脳領域、あるニューロンの活動が学習の原因なのか結果なのかについては、いつまで経っても結論が出ません。今回のDecNef法を用いた研究によって、初期視覚野の空間活動パターンだけで知覚学習を起こし、十分条件を示したことで、この論争に決着がつけました。また、臨界期を過ぎると神経回路が固定されシナプス可塑性がなくなると考えられていた初期視覚野でさえ、大人でも十分なシナプス可塑性を保持し、それによって知覚能力が向上する、つまり知覚学習が可能なことを示しました。



図3 DecNefで自分の脳を自在に制御する

1960年代あるいは80年代に行われたサルの電気生理学の基礎研究からBMIの素晴らしい応用分野が切り拓けてきました。私は、応用が先か、基礎研究が先かということにこだわらず、応用と革新的基礎研究の両方に役立つ技術と方法論を開発することを目指しています。例えばDecNef法を応用して、今まで治せないと思われていた精神疾患、神経疾患の全く新しい治療法やリハビリテーション法が開発できる可能性があります。脳の仕組みも、脳活動からころへという意味での因果律も含めてより深く理解することができるかと期待されます。今後も、応用としても基礎研究としても革新的な研究・技術開発を続けていきたいと思っています。