

脳の科学 第 8 回

担当：浅川伸一

brain.science@cis.twcu.ac.jp

霜月 21 日, 2008 年

Brain-Machine Interfaces

1 Brain Machine Interface とは

脳の信号でロボットアームなどを動かす技術のこと。この BMI が実現すれば「思っただけ」で勝手に機械が動いてくれることになり、夢のような SF のような超能力のような話である。だが、すでに絵空事ではない。近未来に実現しそうな、実用化がすぐそこまで来ている技術である。今回は BMI の最前線を取り上げ、この技術のもたらす社会的な意味や倫理的な問題点についても考えてみたい。

BMI には大きく分けて 2 種類ある。一つは脳にマイクロ電極を埋め込んで直接ニューロンの活動を記録し、それをもとに外部にあるロボットを動かすシステム。脳の開頭手術が必要なので**侵襲的 BMI** と呼ばれる。一方、脳波などを用いることで、外科手術を必要としない**非侵襲的 BMI** のことは Brain Computer Interface(BCI) と呼んで区別することもある。

一見すると、BMI が完全に動作するためには、脳の働きが完全に解明されていなければいけないかのような感じがするが、そうではない。脳の活動は、この授業でも見てきたとおりまだまだ謎の多いシステムである。だが不完全ではあっても、今までに明らかになった事実と最近のテクノロジーを繋ぎ合わせると驚くほど精巧に動作する BMI システムを作り上げることができた。その見事でショッキングなデモンストレーションのため、マスメディアで最近盛んに報道されるようになってきた。

BMI が驚くほど見事に動作することの鍵は、脳の可塑性にあると言っても過言ではない。今までこの授業で見てきたように、脳は柔軟なシステムである。BMI 装置をつけたサルやネズミがロボットを巧みに操るようになるには、動物たちがロボットを操作するのを学習するように、脳自体が変容したからである。すなわち **BMI を動作させるためには、脳の情報表現を読み取るインターフェイスが脳の活動を学習すると同時に、ロボットが正しく動作するように脳自体が学習によって変化している** という側面が強い。

BMI の基礎概念が明らかになったのは、1980 年代 (たとえば [2]) である。しかし、実際に動作する BMI システムが報告されたのは 2000 年代に入ってからである。臨床医学的な

応用は急務の課題であり、たとえば、ALS¹を含む、運動マヒの患者の運動回復に役立つ可能性がある。ALS 患者が家族とコミュニケーションをとるための唯一の手段であり、難治性疾患の患者が生活する上でなくてはならない技術である、ということになる。

2 三たび脳の情報表現について

運動野の皮質情報は、高度にチューニングされた小数のニューロンによってではなく、広域にチューニングされた大集団の連合によってコーディングされているらしい [2]。これをポピュレーションコーディングと呼んだ (第 7 回のハンドアウトも参照)

— 文献 [1] の要約 —

Chapin らは、ラットの運動野 (32 箇所) と視床腹側部 (14 箇所) のニューロンを同時記録することによって、ロボットアームのリアルタイムでの制御が可能かどうかを調べた。喉の乾いたラットを小さな箱の中に入れ、ラットがレバーを押すとコントローラが作動し、一滴分の水が報酬として与えられるような実験場面を作ってラットを訓練した。その結果、ラットは水滴を咽下するために、ロボットアームの位置を制御するようにレバー押しを学習した。ニューラルネットワークを含む数学的な変換によって、マルチニューロンの信号が、レバーの軌跡を正確に予測できるように「ニューロン集団関数」に変換された。次に、これらの関数をロボットのアームを実時間でコントロールするように電氣的な信号へと変換された。この「ニューロロボティック」モードに課題を変更した後、6 匹中 4 匹のラット (> 25 個の課題関連ニューロン) が脳によって駆動された信号としてロボットアームの位置を制御するために恒常的に用いられた。ニューロロボティックモードに移行して引続き訓練を行うことで、このラットたちのレバー押し運動は消失し、あたかもラットが「意図だけで」ロボットアームを動作させているかのように見えた。

図 1 は実験の概要を示している。ラットは最初、報酬の水を咽下するために、水滴落下装置のロボットアームを適切に動かすよう、レバーを押すことを訓練された。(a) 「レバー運動、ロボットアーム」モード。ラットはレバーを押すことを訓練された。(b) 報酬としての水が得られるよう、運動は電氣的に変換されてロボットアームが適切に動くようにされていた。(c) 障壁内のレスト位置 (d) 水滴落下装置 (e) ロボットアームと水滴の落下は受動的にラットのいるレスト位置まで動かされた。(f) 「ニューロン集団関数とロボットアーム」モード: 第一次運動野と視床腹側部に多極記録用電極が実験の期間中に埋め込まれ 46 個以上のニューロンの同時記録が行われた。(g) 24 個のニューロンの波形 (h) N1, N2 という 2 つのニューロンから 2 秒間に渡って記録されたスパイク波形の系列。(i) 32 個のニューロン集団の第一主成分から抽出されたニューロン集団 (Neuronal-population: NP) 関数。(j) ロボットアームの位置を制御するための入力源をレバーの運動か NP 関数か、を切

¹筋萎縮性側索硬化症 (きんいしゆくせいそくさくこうかしょう、amyotrophic lateral sclerosis、通称 ALS)。筋肉の萎縮と筋力低下をきたす神経変性疾患。病気の進行が速く、半数ほどが発症後 3 年から 5 年で呼吸筋麻痺により死亡すると言われている。有効な治療法は確立されていない。

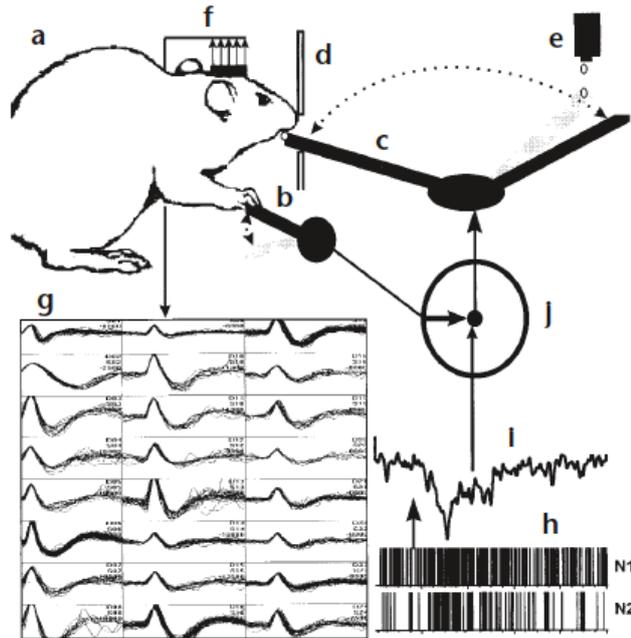


図 1: [1] の Fig. 1

替えるスイッチ。実験では、水滴をもらえるように、ラットはレバー押しから訓練を開始して、その後に、直接ロボットアームを神経集団によって制御するように、入力源が NP 関数に切り替わった。

3 霊長類での実験

Nicolelis & Chapin[3] は、霊長類 (ヨザル) を用いた BMI を開発した。ヨザルが手を伸ばしてフルーツ片をつかみ口元に運ぶ際の手首の動きをセンサで計測し (motion capture)、運動野に埋め込んだ 100 個ほどのマルチニューロン記録装置を使って、その対応を調べた。多数のニューロンの活動を線形加算すると手の動きを高精度に予測できることを確かめた。そこで 50-100 ミリ秒単位でマルチニューロン活動を積分し、それをロボットアームの 3 次元動作に変換するようにした。そして、ヨザルが目の前にあるスクリーンの左右のランプの点灯に合わせてジョイスティックを手で左右に動かしている時の運動野のニューロンの活動でロボットアームをコントロールしたところ、ロボットアームはヨザルの腕と同じ動きをした。

さらに Wessberg ら [5] は、運動野だけでなく、運動前野と頭頂連合野からもニューロンの活動を記録し、人工ニューラルネットワーク (Artificial Neural Network: ANN) と組み合わせることで、より精巧にロボットアームをコントロールできるようにした (図 3)。

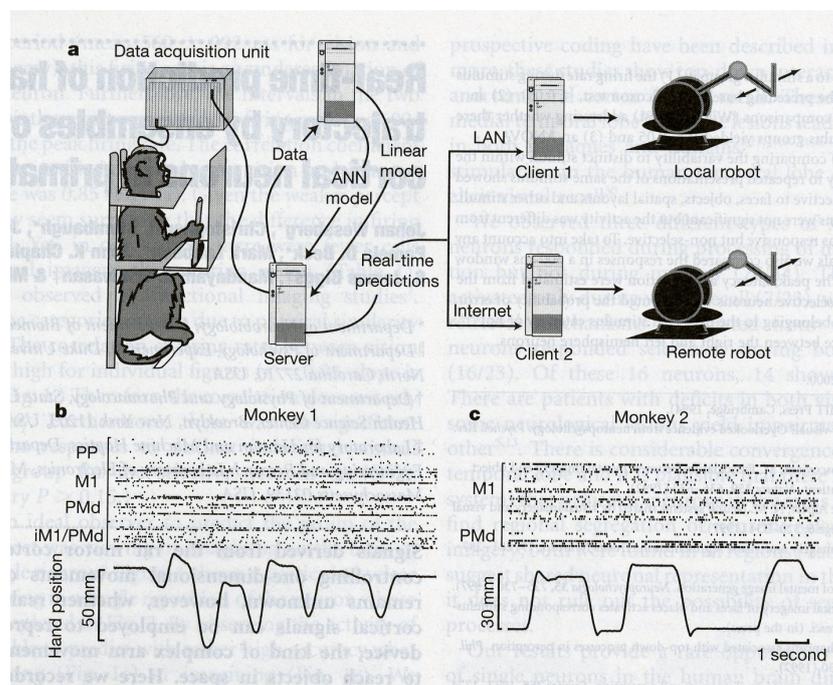


図 2: Wessberg et al.,[5] より。サルの BMI 用システムの模式図とデータ。(a) 実験システム, (b) サル 1 のニューロンの活動, (c) サル 2 のニューロンの活動。下のグラフはサルの腕の位置。PP:頭頂連合野後部, M1:一次運動野, PMd:運動前野背側部, iM1/PMd:腕と同側半球の一次運動野と運動前野背側部

4 BMI の近未来

乗り越えるべき障害はあるが、私たちは楽観的だ。それには多くの理由がある。人間用の人口神経を実用化をこの目で見るのは 10 年後かも知れない。しかし、ダラムである実験を行った午後、ベルのニューロンの活動がコンピュータの画面に表示される場面を目撃した私たちは、そのときありとあらゆるすばらしい可能性を思い描いていた。霊長類の脳内で思考が形成される過程を垣間見た時に感じた畏敬の念を忘れることはないだろう。ジュースをもらうためにベルが頭の中で考えたのは単純ではあったが、確かな思考だった。単なる思考が外界に指令を出し、まぎれもなく真の目的を達成したのである。[3] より

いつの日か、BMI を用いれば、患者は脳の活動によって電氣的、機械的、そしてヴァーチャルな装置でさえコントロールできるようになるだろう。それは失われた感覚機能、運動機能、認知機能でさえ快復することができるだろう。

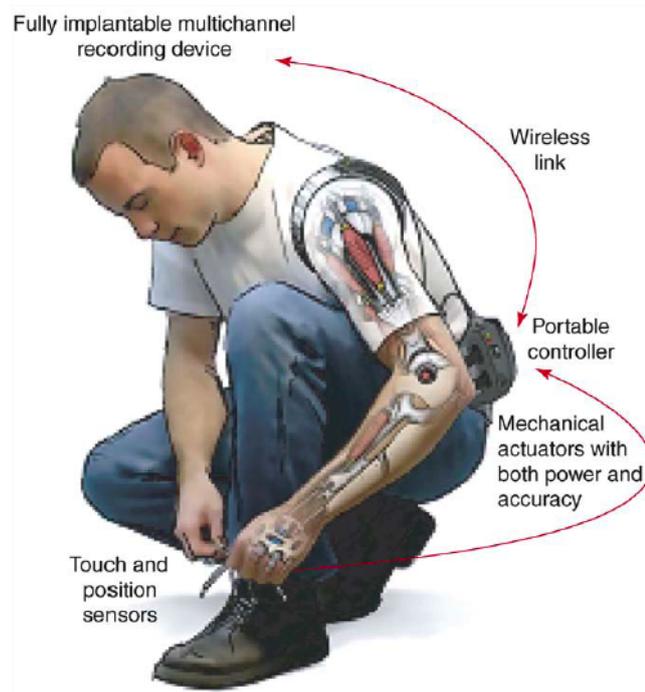


図 3: Lebedev & Nicolelis[4] より

— 演習 —

1. どこまで認知機能を補うことが倫理的に許されるのだろうか。たとえば、頭を良くする、性格を良くする、BMI が開発されたとする。この BMI を用いることは貴女の性格を変えてしまうことになるが、BMI を使わない自己と、本当になりたいと願う (BMI を使った) 自己と、どちらがより貴女らしいと言えるのだろうか。
2. 常識は時代ともに変化する。100 年前夢物語であったことが今や常識となっている。たとえば、お金さえ払えば誰でもが宇宙旅行ができる時代になったことを 100 年前の人は想像できただろうか。口紅やアイシャドウを塗ったり、髪を染めたり、ピアスを開けたりする感覚で BMI を使う日が来ると想像できないのは、今の常識に縛られすぎているからではないだろうか。Nicolelis が書いたとおり 10 年後には BMI は実用化の時代に入る。そのとき貴女の判断が求められている。

参考文献

- [1] Chapin, J.K, Karen, A., Moxon, Ronald S., Markowitz & Nicolelis, M.A.L. (1999) Real-time control of a robot arm using simultaneously recorded neurons in the motor cortex, *Nature Neuroscience*, 2(7), 664–670.
- [2] Georgopoulos, A.P., Schwartz, A.B., & Kettner, R.E. (1986) Neuronal population coding of movement direction, *Science*, 26(233), 1416–1419.
- [3] Nicolelis, M.A.L. & Chapin, J.K.(2002) Controlling robots with the mind, *Scientific American*, 287, 24–31.
- [4] Lebedev, M. A., Nicolelis, M.A.L., Beggs, J. M. & Plenz, D., J. (2003) Brainmachine interfaces: past, present and future, *Trends in neuroscience*, 29, 536–546.
- [5] Wessberg, J., Stambaugh, C.R., Kralik, J.D., Beck, P.D., Laubach, M., Chapin, J.K., Kim, J., Biggs, S.J., Srinivasan, M.A., & Nicolelis, M.A.L. (2000) Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates, *Nature*, 408, 361–365.