

Brain control of a helping hand

神経科学

腕型ロボットを脳で制御する

John F. Kalaska

麻痺患者にとって、自分の意思が日常の動作に変換されるようになれば、大いに役立つだろう。今回サルで、脳の活動によって腕型ロボットを正確に制御できると実証されたことは、こうした目標に向けた一歩である。

Nature Vol.453 (994-995) / 19 June 2008

脳卒中や脊髄損傷、神経筋変性疾患ではいずれも、筋肉を使う能力が著しく損なわれることがある。このような運動能力の低下によって移動や自立がむずかしくなった患者では、生活の質（Quality of Life; QOL）が大幅に低下してしまう。こうした患者の病態または損傷を回復させるために、さまざまな方面から医学研究が精力的に行われている。その一方で、患者のQOLを向上させる別の取り組みが求められている。Nature 6月19日号 994 ページに掲載された Velliste たちの研究¹は、いずれ実用化が期待できる報告例である。

前述のような疾患では、随意運動の制御にかかわる一次運動野や運動前野、後頭頂葉皮質などの大脳皮質領域の機能は損なわれていないことが多い。こうした患者では、随意運動を正常に起こす脳活動を生じる可能性はまだある。ただ、疾患による障害のせいで脳からの信号が筋肉に伝わらなかったり、十分に筋肉を刺激できなかつたりしているのだ。このような場合に考えられる1つの解決法は、患者が行いたい動作を、頭の中でリハーサルするように思い描いてもらい、その結果生じた脳の活動を記録して、これらの信号を使ってロボット型装具を制御することである。こうした脳・機械インターフェース（BMI）あるいは神経機能代替コントローラー（neuroprosthetic controller）は、現在いくつかの研究室で開発が進められているところだ。

Velliste たち¹は今回、この分野の最先端といえ

る成果の1つを報告した。彼らは、サルの一次運動野に微細な電極をグリッド状に埋め込み、これらのサルを訓練して、腕型ロボットを制御する脳活動パターンを発生できるようにした。この腕型ロボットには、肩関節、肘関節、物をつかむための爪状の「手」すなわち把持部がある。サルは座った状態で、両腕は脇にやさしく拘束してあり、腕型ロボットは肩の隣に設置してある（図1参照）。注目すべきことに、サルは、腕型ロボットを果物片などの好物の餌のほうに伸ばし、そこで止めて把持部を餌に近づけ、固定してあった餌を取って、餌をつかんだ把持部を自分の口元へもってきて爪を開き、餌を食べるという動作を、数日以内で行えるようになった。これらの動きはすべて、自然の状態で見られるのと同じようなひとつながりの動作になっていた。

この研究成果は、動物にBMI技術を用い、三次元空間内で腕型ロボットの動作を脳によって制御して餌を食べるという、実用的な動作が可能なることを初めて実証したものである。これは、複雑な腕型ロボットを制御する神経機能代替コントローラーの開発分野における最先端の技術である。原理上、こうした腕型ロボットはやがて、障害を負った患者が食事をしたり、飲み物をコップから飲んだり、道具を使ったりするなど、多くの日常的な作業を行う際の助けになると期待できる。

今回の結果の中で今後の研究開発に向けて励みになる知見の1つは、サルが腕型ロボットの制御を

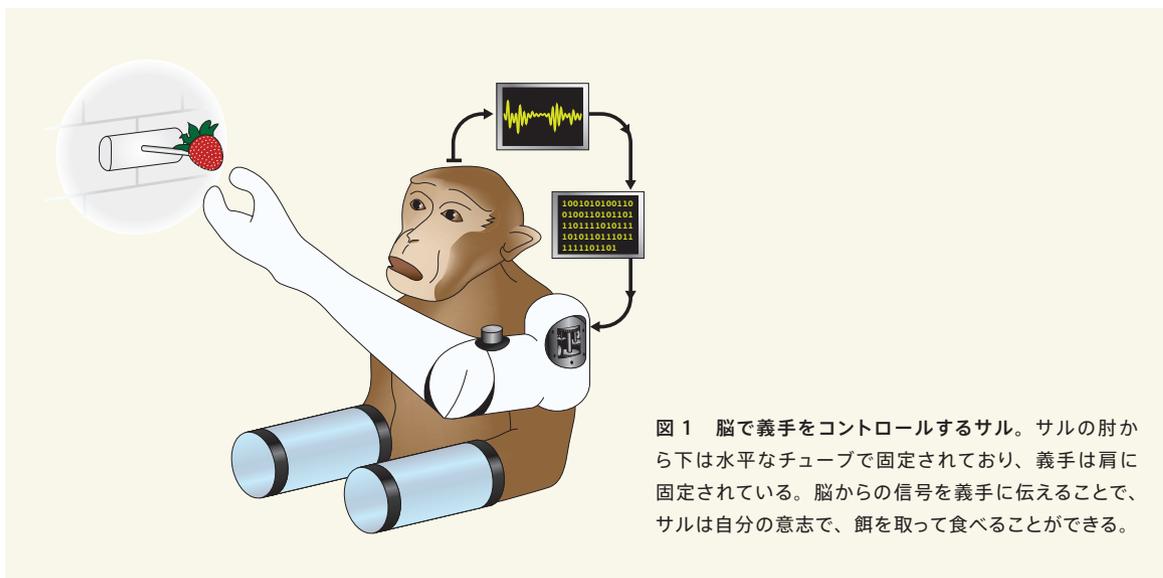


図1 脳で義手をコントロールするサル。サルの肘からは水平なチューブで固定されており、義手は肩に固定されている。脳からの信号を義手に伝えることで、サルは自分の意志で、餌を取って食べることができる。

簡単に覚えたことだ。Velliste たち¹が用いたのは、標準的なオペラント条件づけ法である。この手法で「ごほうび」として餌を食べさせることで、腕を伸ばして餌をつかみ、口元までもってくるそれぞれの動作の成功率が高まった。訓練の第一期には BMI 制御プログラムが発する修正信号で動作を支援したが、サルはすぐに、自分が望むロボットの動作を自力で起こせるように脳を活動させるやり方を習得した。ヒト被験者では学習時間をもっと短縮することができ、トレーナーが口頭で説明することにより、学習がよりスムーズに進んだ。これは、神経機能代替装置によって、リハビリ患者のフラストレーションを最小限にできることを示唆している。現在のリハビリテーション・プログラムでは、運動能力が低下していて、長く辛い機能回復訓練にもかかわらずほんの少ししか回復がみられない場合、患者は往々にしてフラストレーションを感じてしまう。

さらに、サルがいかにも自然に腕型ロボットの制御や相互作用を行ったことも、同じく今後の励みになる知見の1つとして挙げられる。障害物があると、サルはそれを避けるために空間内でカーブを描くように把持部を動かす、また餌のありかを想定外の場所に変更したときにも、把持部の動線をすぐに修正した。しかも、把持部を「つかえ棒」として使い、口に入れ損ねた餌を唇から口の中へ押し込めることさえできた。最終的にサルたちは、動かせない自分の腕の代用物として腕型ロボットに難なく順応した。従来の

知見から、サルが道具の使用を学習する場合には、自分の頭の中にある身体イメージにその道具を組み込むことが示されている²。神経機能代替装置を使う患者は、どれくらいの期間使用するにせよ、そうした装置を自分の体の延長部分として抵抗なく扱えるようになると思われる。なぜなら、自身の思考プロセスを介して効率よく、あまり苦勞もせずに装置を制御できるからである。このことは、こうした技術に頼らざるを得ない患者の心理的負担を長期にわたって軽減できるという点で、明るい材料となる。

Velliste たち¹の成果は、神経疾患患者を支援する BMI 技術の実用化の可能に期待をもたせてくれるものだ。しかし、この結果に舞い上がって、各地のリハビリ施設で神経機能代替ロボットがすぐに利用できるとなると結論づけるのは早計である。脳の活動を利用した腕型ロボットの制御に Velliste たちが採用した主要な技術はどれも、初期には実験動物で³⁻⁷、また最近ではヒトの臨床患者で⁸、もっと単純な遠隔装置を使って既に実証済みのものである。神経機能代替制御技術を臨床へ広く応用できるようにするには、いくつかのハードルを乗り越える必要があり、そのための根本的な概念上もしくは技術上の革新を今回の研究がもたらしてくれたわけではない。

例えば、埋め込み型電極の長期使用に関する信頼性を向上させる必要がある。患者は神経機能代替制御技術を長年にわたって利用することになるが、記録される神経活動の質は多くの場合、数週間もしくは

は数か月経たないうちに劣化してしまう。そのうえ、神経機能代替制御の成功は、これまでのところ実験室環境内に限られている。現在の技術では、移動のむずかしい記録装置やコンピューター、ロボット制御装置を含む相当大がかりな設備が必要であり、しかも、装置の作動状況を常に監視する専門の技術者も必要なのである。神経機能代替コントローラーがもち運び可能でほぼ自律的に作動できるようにするには、もっと多くの研究を積み重ねなければならない。

加えて、被験者はこれまでのところ、視覚的なフィードバックのみを使って遠隔装置を制御している。環境との物理的な相互作用には、対象物や物の表面に腕型ロボットが加えた力を被験者が感じ取って制御できなければならない。例えば、ロボットの手で物をつかむときには、物がすり抜けて落ちない程度の強さでつかみ、しかも力を入れすぎて握りつぶしてしまわないようにする必要がある。こうした重要な情報は、健常であれば皮膚や筋肉、関節にある感覚受容器によって得られている。ロボットには、これに相当するセンサーを実装させる必要があり、この感覚フィードバック⁹を患者に伝えるために、何らかの有効な方法を開発しなければならない。こうしたもろもろの技術的問題は、難題ではあるが乗り越えられないものではない。

Velliste たち¹は、従来のさまざまな BMI 研究³⁻⁷と同様に、記録を一次運動野から取った。そ

他の研究では、運動前野や後頭頂葉皮質^{7,10-12}から制御信号とみられる信号が抽出されている。これらの脳領域のそれぞれで発せられる信号には固有の性質があり、そうした性質が、随意運動のさまざまな面に特に有用だと考えられる。これは最終的に、「知的」神経機能代替コントローラーの開発へとつながる可能性がある。こうしたコントローラーがあれば、重度の運動障害をもつ患者は、ロボット装具の経時的な運動制御によるだけでなく、自分の総合的な目的や必要性、好みを反映させた、もっと自然で直観的な方法で外界と相互作用しコミュニケーションを取ることが可能となるだろう。 ■

John F. Kalaska, モントリオール大学 (カナダ)

1. Velliste, M., Perel, S., Spalding, M. C., Whitford, A. S. & Schwartz, A. B. *Nature* **453**, 1098-1101 (2008).
2. Maravita, A. & Iriki, A. *Trends Cogn. Sci.* **8**, 79-86 (2004).
3. Chapin, J. K., Moxon, K. A., Markowitz, R. S. & Nicolelis, M. A. L. *Nature Neurosci.* **2**, 664-670 (1999).
4. Wessberg, J. et al. *Nature* **408**, 361-365 (2000).
5. Serruya, M. D., Hatsopoulos, N. G., Paninski, L., Fellows, M. R. & Donoghue, J. P. *Nature* **416**, 141-142 (2002).
6. Taylor, D. M., Tillery, S. I. & Schwartz, A. B. *Science* **296**, 1829-1832 (2002).
7. Carmena, J. M. et al. *PLoS Biol.* **1**, e42 (2003).
8. Hochberg, L. R. et al. *Nature* **442**, 164-171 (2006).
9. London, B. M., Jordan, L. R., Jackson, C. R. & Miller, L. E. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* **16**, 32-36 (2008).
10. Musallam, S., Corneil, B. D., Greger, B., Scherberger, H. & Andersen, R. A. *Science* **305**, 258-262 (2004).
11. Hatsopoulos, N., Joshi, J. & O'Leary, J. G. *J. Neurophysiol.* **92**, 1165-1174 (2004).
12. Santucci, D. M., Kralik, J. D., Lebedev, M. A. & Nicolelis, M. A. *Eur. J. Neurosci.* **22**, 1529-1540 (2005).

nature
nanotechnology

A BIG NUMBER in a small world

First Impact Factor
14.917*

*Journal Citation Reports, Thomson, 2008

www.naturejpn.com/nano

npg nature asia-pacific