

サイボーグ型ロボットは装着者の意思の力により脳の可塑性を引き出す

装着者がロボットを自ら動かそうとする「意思」がある時、高次の動作の計画や準備を制御する運動前野などの脳領域が活発に働くことを、ロボット動作中の脳計測により世界で初めて明らかにしました。装着者の意思に応じて動くロボットを用いた能動的治療が、脳の再構築を助ける可能性を示しています。

病気やけがで手足が動かしにくくなった人たちのために、腕や足の動きをサポートし、脳が運動を学習することを支援するニューロ・リハビリテーション用のロボットが少しずつ広まっています。しかし、そのロボットに「ただ動かされる」場合と、「自分で動かそう」と考えながら使う場合とで、それぞれ脳がどのように反応するのかは、これまで十分に分かっていませんでした。脳がどのように学び、変化し、機能を回復していくかを考える上で、この違いを明らかにすることはとても重要です。

本研究チームは、健康な人たちに腕を上げる動作をしてもらい、その時の脳の活動をサイボーグ型ロボット（CYBERDYNE 株式会社の装着型サイボーグ HAL[®]）を用いて三つの条件にて詳しく調べました。一つ目は、「自分で動かそう」という意思を持ちながらロボットが動きを補助する「能動的ロボット支援」。二つ目は、ロボットに任せて動かされるだけの「受動的ロボット支援」。三つ目は、ロボットを使わず自力で腕を上げる「自発運動」です。

脳の血流の変化を捉える fNIRS（機能的近赤外分光法）という装置を使って測定したところ、「能動的ロボット支援」と「自発運動」の時には、運動をつかさどる脳の領域が有意に多く活動していました。特に、運動前野や補足運動野に代表される、動作を計画・準備する高次運動野の領域が強く働いていたのです。一方で、受動的に動かされているだけの時には、動かしている腕と同じ側の脳や、高次運動野の活動が低いことが分かりました。

この結果は、リハビリテーションやロボット治療において「自分で動かそう」という意思を持つことが、より広範な脳活動を引き出し、脳の学習や回復を促す上でとても重要であることを示しており、人とロボットが協力し、装着者の「意思に応じて動く」サイボーグのようなリハビリテーション技術により、これからの医療を大きく進化させる可能性を開くものです。

研究代表者

筑波大学システム情報系

Margaux Noémie Lafitte 研究員

研究の背景

ロボットによるリハビリテーション治療は、身体の動作補助に加え、脳の再構築（神経可塑性）を促す手段として世界的にも大きく注目されています。なかでも肩の運動、特に腕を上げる動作は、日常生活の基本動作であり、筋協調や意図的な制御が強く関わるため、脳活動との関連性が高いと考えられます。しかし、ロボット支援動作中に脳の働きをリアルタイムで測定することは技術的に困難であり、「自分で動かそうとする意思」が脳に与える影響については、十分に明らかになっていませんでした。そこで、本研究では、サイボーグ型ロボット（CYBERDYNE 株式会社（*）の装着型サイボーグ HAL®）を用いて運動意思の有無による脳活動の違いを明らかにすることを目指しました。

研究内容と成果

本研究では、健常な成人 20 人を対象に、肩関節により腕を上げる運動における脳活動の違いを調べました。参加者には三つの条件で運動課題を実施してもらいました。一つ目は、自力で腕を上げる「自発運動」。二つ目は、「自分で動かそうとする意思」を持ちながらロボットに動作を補助してもらう「能動的ロボット支援」。三つ目は、完全にロボット任せで動かされる「受動的ロボット支援」です。

各条件の脳活動を、機能的近赤外分光法（fNIRS）という非侵襲的な方法で測定しました。fNIRS は、頭皮に装着したセンサーを通じて脳の血流（血中の酸素化ヘモグロビンの濃度変化）を測定し、脳の活動を推定する技術です。測定対象は、前頭葉を中心とした感覚運動関連の皮質領域としました。

その結果、自発運動と能動的ロボット支援のいずれにおいても、運動の計画・準備に関わる前頭葉の高次運動野（運動前野^{注1)}、補足運動野^{注2)}）で明確な活性化が確認されました。さらに、動かす腕と同側の一次運動野や感覚運動領域の活性は感覚一運動のネットワーク構成のために重要であるという知見が報告されていますが、それらの知見を裏付けるように、本研究においても自発運動や能動的ロボット支援ではこれらの領域で有意な活動が観察されました。これは、「自分で動かそうとする意思」によって、脳の広範な感覚一運動のネットワークが動員されていることを示しています。一方、受動的ロボット支援の条件では、こうした高次運動野および同側半球の活動は顕著に低く、運動意思の有無が脳の働きに大きな影響を与えることが明らかになりました。

外骨格ロボットの臨床効果を厳密に解析した最新のレビュー論文¹⁾によると、運動意思に応じて能動的に支援する装着型サイボーグ HAL®は、受動的な支援をする他のデバイスと異なり、神経可塑性を誘導し全身的な治療効果を示す唯一の機器であることの報告がありました。今回の成果は、ロボット支援設計において、装着者が単にロボットに動かされるのではなく、装着者自らが動かそうとする意思を取り入れることが、脳の広範な感覚一運動のネットワークを広げ、より効果的に脳の活性化や神経可塑性を引き出す鍵であることを示唆しています。また、fNIRS によるモニタリングが、その変化を安全かつ定量的に捉える手段として有効であることも確認されました。

今後の展開

本研究は、「動かされる」から「動かそうとする」への転換が脳の広範な活性化を導くことを示しました。今後は、患者の運動意思をリアルタイムに検出し、それに応じてロボットが動作を支援する「意思駆動型」のロボット治療技術の展開が期待されます。人とロボットが一体となり、意思に応じて動作を調整するサイボーグ型ロボット支援技術は、医療の可能性を拡張する鍵となることが期待されます。

（*）なお、今回の論文の著者の 1 人である鈴木健嗣・筑波大学システム情報系教授は、CYBERDYNE 株式会社の社外取締役で、株主でもあります。

参考図

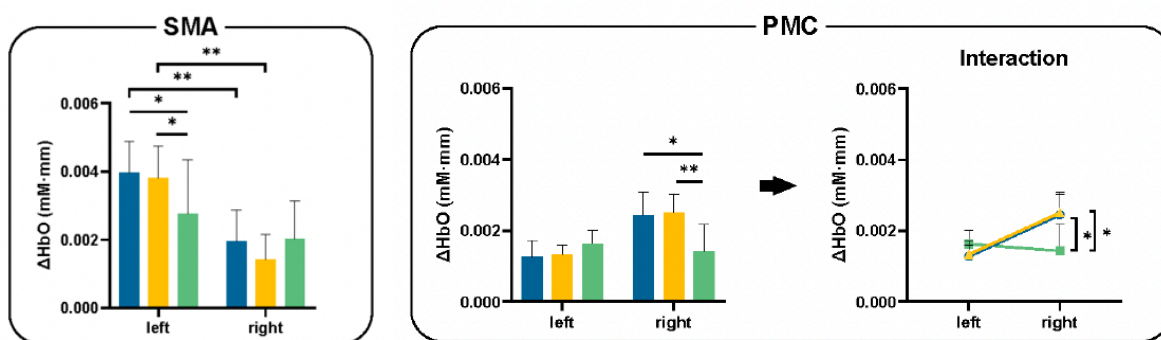
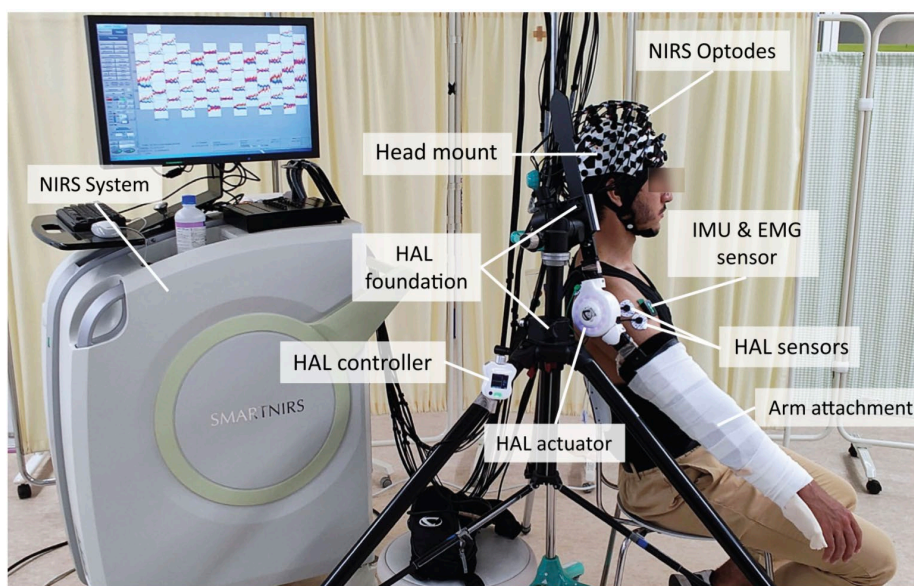


図 本研究で行なった実験の概要図

(a)は動作アルゴリズム、(b)は実験で定めた三条件 (c) はサイボーグ型ロボットを用いた実験の様子を示す。肩の動きをコントロールするうえで重要とされる補足運動野 (SMA) や運動前野 (PMC) は、受動的に動かされた条件 (緑色) でのみ活動が有意に低く、自発的に動かす場合 (青色) やロボットの支援を受けながら能動的に動かす条件 (黄色) では、活動が同様に強かった(d)。補足運動野や運動前野は、肩のような体の中心に近い関節を制御する皮質網様脊髄路^{注3)}の起点であり、肩の複雑な神経支配や左右両側への信号の伝達、運動系列の開始・切り替えの制御に深く関与している。これらの結果は、運動の意思があるかどうか補足運動野や運動前野の活動に関連し、特に受動的な運動では筋肉の活動や左右の連携の低下が、活動の低下に影響している可能性を示唆している。

参考文献

- 1) K. I. Argus Chiu, C. Taylor, P. Saha, M. J. Gallagher, S. Abbot, B. Ajayi, J. Bernard, T. Bishop, D. Lui, Actively Controlled Exoskeletons Show Improved Function and Neuroplasticity Compared to Passive Control: A Systematic Review, *Global Spine J*, 2025.
doi: 10.1177/21925682251343529. Online ahead of print.

用語解説

注1) 運動前野 (premotor cortex: PMC)

前頭葉において、運動前野 (PMC) は一次運動野の前方に位置し、運動の計画や調整に関わる脳領域である。このうち背側運動前野 (dorsal premotor cortex: PMd) は視覚など外部の情報に応じた動きを、腹側運動前野 (ventral premotor cortex: PMv) は体内の感覚に基づく動きを担当し、感覚と運動の統合に重要な役割を果たしている。

注2) 補足運動野 (supplementary motor area: SMA)

補足運動野 (SMA) は一次運動野の内側前方にあり、主に自発的で内的な意図に基づく運動の計画や開始に関与している。複雑な動作の順序づけや両手の協調動作にも重要な役割を果たし、外部刺激に頼らない動作の制御を支えている。

注3) 皮質網様脊髓路

皮質網様脊髓路は、大脳皮質の運動関連領域（主に運動前野など）から網様体を經由して脊髓へと下る神経経路である。直接筋肉を動かす錐体路とは異なり、体幹や近位関節（肩や股関節など）の姿勢制御や運動の調整を担い、左右両側に信号を送る特徴がある。

研究資金

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究(A) (23H00485) の一環として実施されました。

掲載論文

【題 名】 Cerebral correlates of robot-assisted upper limb motion driven by motor intention in healthy individuals: an fNIRS study

(運動意思により駆動するロボット支援上肢運動における脳活動：fNIRS による研究)

【著者名】 M. N. Lafitte¹⁾, C. S. Andrea¹⁾, H. Kadone (門根秀樹)²⁾, E. Hoshino (星野英一)³⁾, M. Yamazaki (山崎正志)⁴⁾, Y. Minagawa (皆川泰代)⁵⁾, K. Suzuki (鈴木健嗣)⁶⁾

1) 筑波大学システム情報系

2) 筑波大学医学医療系 准教授

3) 慶應義塾大学グローバルリサーチインスティテュート 特任助教

4) 筑波大学医学医療系整形外科 教授 (研究当時：現客員教授)

5) 慶應義塾大学文学部心理学専攻 教授

6) 筑波大学システム情報系 教授

【掲載誌】 *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*

【掲載日】 2025 年 6 月 11 日

【DOI】 10.1109/TNSRE.2025.3578796

問合わせ先

【研究に関すること】

鈴木 健嗣

筑波大学システム情報系 教授

URL: <https://www.ai.iit.tsukuba.ac.jp/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp