

国立大学法人 電気通信大学
 フランス国立科学研究センター (CNRS)
 国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST)

独立制御可能な「第6の指」を身体化することに成功

【ポイント】

- * 人間の手に装着し、他の身体部位と独立に動かせる人工指- sixth finger -を初めて開発
- * 使用に短時間慣れることで、自身の身体の一部と感じる（身体化する）ことが可能
- * 人間の身体拡張の可能性を実験的に実証

【概要】

電気通信大学大学院情報理工学研究科の梅沢昂平氏（当時大学院生）、鈴木悠汰氏（当時大学院生）、宮脇陽一教授らは、フランス国立科学研究センター（CNRS）の Gowrishankar Ganesh 主任研究員と共同で、他の身体の部分と独立して動かすことができる人工身体部位である“sixth finger”を開発し、自らの身体の一部として取り込む（身体化する）実験に成功しました。

私たちの脳は、身体の変化にとっても柔軟に対応できることが知られています。では、私たちが生得的に持たない身体部位が人工的に与えられたときでも、それを自らの身体として感じ、自由に動かすことはできるのでしょうか？こうした可能性を検証するひとつの方法として、ロボットアームや指型の機械を自らの身体に装着し、それを他の身体部位（例えば足など）の動きで動かす研究が近年行われています。しかし、こうした従来の試みは全て、既存の身体部位の機能や動きを人工身体のそれへと置き換えているにすぎません。自らが生得的に持つ身体の機能や動きはそのまま、それらとは独立して制御することが可能な新しい人工身体を人間は獲得することができるのでしょうか？

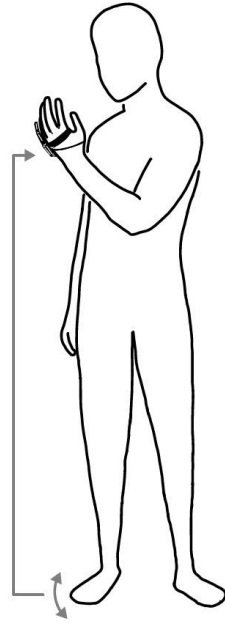
こうした問いに答えるため、我々の研究グループは、まず他の身体部位の機能や動きと独立して制御可能であり、手のひらに簡易に装着可能な“sixth finger”を開発しました。次に、この sixth finger の使用に短時間（1時間程度）慣れることにより、それが自分の身体の一部と感じられた（身体化した）ときに起こる感覚と行動の変容を捉えることに世界で初めて成功しました。これらの結果は、人間は自らの既存身体部位の機能と干渉することなく新しい付加的身体を取り込み、自らの身体を拡張できる可能性を実験的に証明したものです。

本研究の成果は Scientific Reports 誌に 2022 年 2 月 14 日（日本時間）に掲載されます。

【背景】

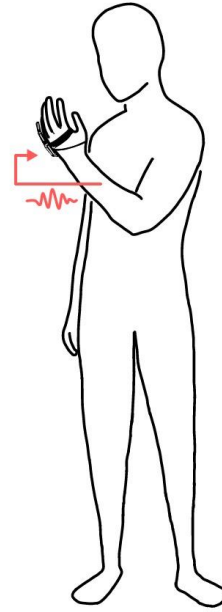
私たちの脳は、身体の変化にとっても柔軟に対応することができます。たとえば、人間の身体は成長とともに変化しますが、そうして変化した身体を私たちはこともなげに自由自在に操ります。身体の変化は、事故による欠損や病気による麻痺などによっても起こりますが、そうしたときでも変化した身体に我々は順応できますし、失われた機能を補う人工義手[1]などの使用にも習熟することができます。では、私たちが生得的に持っている身体に、さらに新しい身体部位を付加すること

運動置換型の人工身体(従来研究)



他の身体部位を動かす必要あり
(例:人工指を動かすために、足を動かす)

独立制御可能な人工身体(本研究)



動きに使われない筋活動を利用し、
他の身体部位の動きから独立

図1 独立制御可能な人工身体。従来型の人工身体(左図)は、人工身体を動かすために他の身体部位を動かす必要がある。すなわち、既存の身体部位の運動を人工身体の運動へと置き換えているに過ぎない。一方、本研究で開発した独立制御可能な人工身体(右図)は、動きに使われない筋活動を利用するため、他の身体部位の動きと独立して制御可能である。

は可能でしょうか? そのように付け加えられた身体を、我々は自分の身体と感じ、自由自在に動かすことができるでしょうか?

近年こうした可能性を検証する試みのひとつとして、ロボットアームや指型の人工身体を身体に装着し、それを他の身体部位(例えば足など)の動きで動かす研究が行われています。しかし、これらの試みは全て、既存の身体部位の動きを人工身体のそれへと置き換えているに過ぎません(図1左)。自らの持つ身体部位の機能や運動性はそのまま、それとは独立して制御可能な付加的な人工身体(図1右)が実現可能なのか、またそうした人工身体を人間は自身の身体の一部として感じる(身体化する)ことができるのかはこれまで明らかになっていませんでした。

【手法】

こうした問いに答えるため、本研究では他の身体部位の機能や動きと独立して制御可能であり、手のひらに装着可能な小型の人工指システムを開発しました(図2)。手のひらの小指側に装着するとあたかも指が6本あるかのように見えるので、この装置のことを「第6の指(sixth finger)」と呼ぶことにしました。Sixth fingerは、腕の筋肉の電気活動[2]によって制御可能なシステムです。腕の筋肉の電気活動をセンサで計測し、それが指を曲げ伸ばしするときに通常生じる腕の筋肉の電気活動とは異なる特定の信号パターンとなったときに、sixth fingerが動くように設計しました。これにより、自身の指の動きおよび他の身体部位の動きとも独立して、sixth fingerを動かすことができます。

次に、このsixth fingerの使用に慣れたあとに、どのような感覚や行動の変化が起こるかを実験的に確かめました。実験データは成人被験者18名から取得できました。具体的には、sixth fingerを装着した状態で、自身の指とsixth fingerの両方を使って指の曲げ伸ばしやキータッピングをする習熟タスクを平均1時間程度行ってもらいました。この習熟タスクの前後で、人工指に対する感覚を問う主観評定課題[3]と人工指の影響が及ぶ可能性がある手の感覚を評価する行動実験課題を、sixth fingerを外した状態で実施しました。行動実験は、目標到達軌道上での障害物回避課題[4]と

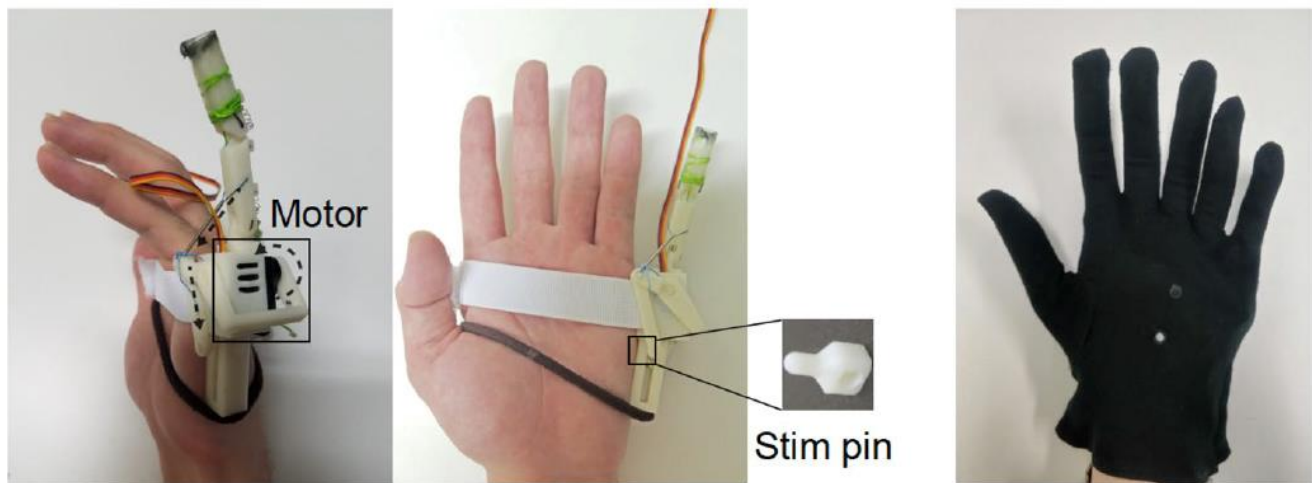


図2 開発した「第6の指 (sixth finger)」。腕の筋肉の電気活動の計測結果に応じて制御されるモーターが内蔵されている。このモーターの動きに連動し、指が動く。また同時に、手のひら装着部位に皮膚を刺激することができる刺激ピンがついており、指の曲げ伸ばしと同期して、皮膚感覚がフィードバックされるようになっている。この刺激ピンは着脱式であり、皮膚感覚をフィードバックしない条件にもできる。右図は sixth finger を装着した状態ではめることができる手袋をはめた様子。

手が見えない状態で人差し指と小指の位置を定量化する位置同定課題[5]の2種類を行いました。

また対照条件として、sixth finger が被験者の意図とは関係なくランダムなタイミングで動いてしまう条件でも、同様の習熟タスクとその前後での主観評定課題と行動実験課題を行ってもらいました。

ここでは、sixth finger が意図通り動く前者を制御可能条件、後者をランダム条件と呼ぶことにします。Sixth finger が身体化するのであれば、その効果は制御可能条件で強く現れると予測されます。よって、習熟タスク前後で主観評定と行動実験の指標がどう変わるのかを定量化し、その変化を制御可能条件とランダム条件の間で比較することで、sixth finger の身体化の効果を検証しました。

【成果】

第一に、参加した全ての被験者において、この sixth finger を十分に思い通りに動かせることがわかりました。実験前の調整段階において、全ての被験者が sixth finger を直感的に動かすことができました。また自分の意図通りに sixth finger が動かしているという行為主体感は、制御可能条件のほうがランダム条件より有意に高くなりました。第二に、行為主体感以外の主観評定および行動実験の指標においては、制御可能条件とランダム条件の間で有意な差が見られないものの、主観評定と行動実験指標の被験者間での相関を解析した結果からは、sixth finger が自身の身体の一部であると感じられている度合いが高い被験者ほど sixth finger を装着していた手の小指の位置に対する感覚のばらつきが大きいことがわかりました。すなわち、sixth finger が身体化すればするほど sixth finger を装着していた手の端（小指側）の位置感覚が曖昧になってくることを示しています。これは被験者の sixth finger の身体化に対する主観的な感覚が、行動変容によっても客観的に裏付けられているという点において、sixth finger の身体化に関する強い証拠となります。

以上の結果より、新たに開発した sixth finger というシステムを利用することで、他の身体部位と独立制御可能な人工身体部位を自己の一部として身体化でき、自由自在に動かせることを世界で初めて実験的に立証することに成功しました。

【今後の期待】

既存の身体部位と独立して動かすことができる人工身体部位が工学的に実現可能であることがわかりました。応用的な観点からは、より力が出る駆動系を用いるなどの工夫を行うことにより、実世界で「使える」指になっていく可能性があります。例えば、高速なキータイピングが可能にな

ったり、ピアノやギターの演奏を6本指で巧みに奏でたり、片手では持てない数のワイングラスを持てるようになったりなど、豊かで便利な生活の実現に貢献できるかもしれません。また、同様の技術を応用することにより、第三の腕や、四本の脚、なども実現できるかもしれません。さらには、しっぽや羽など、人間が持っていない器官を人間が身体化できるのかという問いにもアタックできる可能性を秘めています。

また基礎的な観点からは、こうした新しい身体部位を身体化したときに脳でどのような変化がおきているのかを調べるのが重要です。身体は、体性感覚野[6]や運動野[7]と呼ばれる脳の部位で地図状に表現されています。新しい身体部位を身体化することによってこうした地図がどのように変わるのか、そしてまた脳はどこまで新しい身体を受け入れることができるのか、といった問いに挑戦することが可能になります。これらは、本研究で開発したような人工身体を使うことでしか解決できない問いであり、多くの重要な知見が生み出される可能性を秘めています。

こうした今後の期待と可能性を紹介した動画を以下で公開しておりますので、あわせてご覧ください（動画中で使われている sixth finger は、本実験で用いたものを改良した新しいバージョンになりますので、図2で示しているものと異なります）。

プロジェクト紹介動画 URL:
<https://youtu.be/qM2fxYnDFTE>

（論文情報）

Kohei Umezawa, Yuta Suzuki, Gowrishankar Ganesh, Yoichi Miyawaki, "Bodily ownership of an independent supernumerary limb: an exploratory study," Scientific Reports (2022).

（外部資金情報）

本研究は、科研費基盤研究（C）（15K12623）および JST ERATO 稲見自在化身体プロジェクト（JPMJER1701）の支援を受けて実施されました。

（用語説明）

[1]人工義手 腕や手などの欠損部位に装着することができる人工の手。つけるだけのものもあれば、筋肉の電気活動で制御することができる筋電制御義手などもある。

[2]腕の筋肉の電気活動 筋電位のこと。例えば、腕を動かしたい場合、脳から対応する運動指令が腕の筋肉に伝達され、電気活動が生じる。この電気活動が筋電位である。

[3]主観評定課題 7段階のリッカート尺度（アンケートなどで広く使われる心理検査的回答尺度）で、行為主体感、身体所有感、身体像に関する主観的な評定を行ってもらう課題

[4]障害物回避課題 手指を特定の位置に到達させる課題において、最短軌道上に障害物を置き、手がどのような回避軌道を取るかを調べる課題。人工指の身体化により自身の手幅に関する感覚が変わっていた場合は、この回避軌道が変わる可能性がある。

[5]位置同定課題 被験者からは見えない箱の中に手を挿入し、その箱の上に表示した線分の位置と思われる位置を箱の中でタッチする課題。人差し指と小指を用いてタッチすることにより、手幅感覚に関する身体像の変化を捉えられる可能性がある。

[6]体性感覚野 ヒトでは頭頂葉にある大きな溝（中心溝）の後部にある。全身の身体部位が地図のように表現されており、深部感覚（自分の身体部位の位置や関節の曲がり具合などに関する感覚）や皮膚感覚（いわゆる触覚）に応じて、各部位が反応する。

[7]運動野 ヒトでは頭頂葉にある大きな溝（中心溝）の前部にある。体性感覚野と類似して、全身の身体部位が地図のように表現されており、運動する身体部位に応じて、各部位が反応する。

【連絡先】

<研究内容に関すること>

電気通信大学 大学院情報理工学研究科

【職名】 教授

【氏名】 宮脇 陽一

Tel : 042-443-5982 E-Mail : yoichi.miyawaki[at]uec.ac.jp

Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microelectronique de Montpellier
(LIRMM), Univ. Montpellier, CNRS

【職名】 Senior Researcher

【氏名】 Gowrishankar Ganesh

Tel : +33(0)467-149-570 E-Mail : ganesh.gowrishankar[at]lirmm.fr

<報道に関すること>

電気通信大学 総務企画課 広報係

Tel : 042-443-5019 Fax : 042-443-5887

E-Mail : kouhou-k[at]office.uec.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-Mail : jstkoho[at]jst.go.jp

<JSTの事業に関すること>

科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部

今林 文枝

Tel : 03-3512-3528 Fax : 03-3222-2068

E-Mail : eratowww[at]jst.go.jp