

令和 6 年 5 月 2 7 日現在

機関番号：8 2 6 2 6

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：2 2 K 2 1 3 2 1

研究課題名（和文）補助による運動スキル獲得のための運動主体感の定量化とその誘起による運動変容の実現

研究課題名（英文）Motor transformation through induction and quantification of sense of agency for skill acquisition with assistance

研究代表者

宮脇 裕（Miyawaki, Yu）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・産総研特別研究員

研究者番号：7 0 9 6 5 4 1 7

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、健常者を対象に上肢のリーチング運動を計測し、この際に外骨格型ロボットを用いて上肢運動に対する運動補助を実施した。この実験により、ロボットによる運動補助が「自分が運動を制御している」という感覚である運動主体感にどのような影響を及ぼすのか、またその結果として運動制御にどのような変化が起こるのかを検証した。実験の結果、単調な運動補助を繰り返し受けることにより、運動主体感が減少し、補助を解除した際の運動エラーが増大した。この結果から、ロボットによる単調な介入が運動主体感を奪い、その結果として運動戦略の変容が起こる可能性が考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

外骨格型ロボットは、運動障害を有する方のリハビリテーションなど、運動を補助する目的で使用されており、今後の技術発展に伴いますますます身近なものになることが予想される。一方で、こういったロボットによる介入が心理的側面にどのように影響し、その結果として運動にどのような影響を及ぼすのかは明らかになっていない。本研究は、この問いを明らかにするとともに、たとえロボットに介入されていても、「自分自身が運動を制御している」と感じられる介入手法の開発に貢献することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we measured reaching movements of upper limbs in healthy individuals and implemented motor assistance using an exoskeleton robot during these movements. Through this experiment, we examined how robotic assistance affects the sense of agency, which refers to the feeling of controlling one's own movements, and what changes occur in motor control as the result. The results of the experiment indicated that repetitive motor assistance decreased the sense of agency and increased movement errors. Based on these findings, it is considered that monotonous interventions by the robot might diminish the sense of agency and alter movement strategy.

研究分野：実験心理学

キーワード：運動主体感 運動補助 外骨格型ロボット 運動制御

## 1．研究開始当初の背景

リハビリテーション医療や介護現場では、ロボットを用いた運動補助が実践されている。この補助は、運動障害を有する人の身体機能を拡張し、本来遂行できない運動を遂行可能にすることから、運動障害の改善や運動スキルの学習などに対する効果が期待されている。この実現には、単に身体を動かされるだけでなく、対象者自身もその運動を実行しようとする必要があるであり、「自分が運動を制御している」という感覚である運動主体感が不可欠となる。実際に、先行研究は、たとえ他者由来の感覚結果でも、運動主体感が生じた場合に人がその他者由来感覚に基づき運動を制御しようとすることを示し、運動主体感が、感覚入力と運動出力間の Mediator の役割を持つことを提唱している (Asai, Conscious Cogn, 2015)。この知見を考慮すると、運動補助による学習効果を最大化させるためには、その拡張された運動に運動主体感を与えることが重要といえる。しかし、運動主体感は一行為の一部が自動化された場合や (Berberian et al., PLOS ONE, 2012)、他者と共に行為を実行した場合 (Beyer et al., Soc Cog Affect Neurosci, 2017) に減少することが報告されており、運動補助は運動主体感を奪う可能性がある。行為における運動主体感の役割を考慮すると、運動補助により運動主体感が減少した場合、運動を制御しようという動機付けが低下し、結果として運動の変化が生じることが考えられる。これが事実であれば、運動の獲得という期待される効果が阻害される恐れがあるため、運動主体感のメカニズムを考慮し、運動補助時に運動主体感を与える手立てを見出す必要がある。

手がかり統合理論によると、運動主体感には知覚の手がかりと認知の手がかりが関わり、それらの状況に応じた信頼性に基づき、運動主体感への貢献度を決める重み付けが変化する (Synofzik et al., Front Psychol, 2013)。知覚の手がかりは、運動に伴う内的予測と感覚結果の照合から得られる内受容的な情報であり、両者の一致は運動主体感を導く (Blakemore et al., Trends Cogn Sci, 2002)。認知の手がかりは、運動の上手さなど自分の運動についての外形的な知識・認識であり、これと感覚結果との一致も運動主体感を導く (Wegner et al., Am Psychol, 1999)。認知の手がかりは運動の直前に得た場合でも運動主体感を変調することがあり (Sato, Cognition, 2009)、運動補助の前にも操作することができる。しかし、外界からの介入が自明な補助された状況で認知の手がかりが重み付けられるのかは明らかでない。これを解明できれば、認知の手がかりの操作により運動補助時に運動主体感を保持できる可能性が示される。

## 2．研究の目的

本研究の目的は、運動制御の変化を指標として、運動補助による運動主体感への影響を検証し、その影響に対し、認知の手がかりが及ぼす効果を明らかにすることである。この目的を達成するために、下記 2 点の研究を実施する。

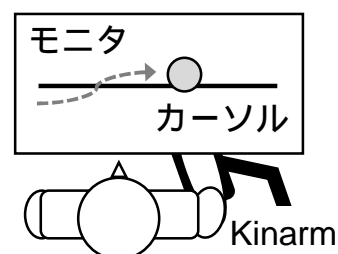
(1) 研究 A：外骨格型ロボットを用いた上肢運動の補助により運動主体感が減少し、その減少に伴い、運動制御の変化が起こるという可能性を検証する。

(2) 研究 B：認知の手がかりを操作することで、たとえ運動を補助されていても、その運動に対する運動主体感が保持されるという可能性を検証する。

これらを明らかにできれば、手がかり統合理論が運動補助の状況にも適用することが示される。本研究は認知の手がかりにより運動主体感を与えるシステムの開発に貢献することが期待できる。

## 3．研究の方法

参加者は、モニタ上のカーソルを操作し、ターゲットラインである直線を正確になぞる運動を実施した (右図)。運動補助を経験させるために、経験フェーズを設け、外骨格型ロボット “Kinarm” (BKIN Technologies Ltd) を用いて参加者の運動を補助した。この補助を伴う運動を複数回実施した後に、シームレスにテストフェーズへと移行した。テストフェーズでは、運動の後半においてランダムなタイミングで運動補助が突然解除された。この際、参加者は自ら、即座に運動を直線上に修正することを求められた。この補償運動の反応時間やターゲットラインからの逸脱程度 (運動エラー) を計測した。さらに、経験フェーズを経る前の補償運動をベースラインとして測定するために、事前にテストフェーズと同じ条件で課題を実施した (ベースライン 1)。最後に、疲労などの交絡因子の影響を検討するために、再度ベースラインを測定した (ベースライン 2)。各試行後に、運動補助時において、自分が運動を制御していると感じたか、ロボットに頼っていると感じたかを 9 件法にて聴取し、その結果と補償運動との関連を分析した。経験フェーズにおいて運動主体感が減少し運動制御の変化が生じたならば、ベースライン条件に比べてテストフェーズでは運動エラーが増大すると予想した。



#### 4. 研究成果

研究目的の達成に向けて、運動補助のタイミングなどを制御するために、外骨格型ロボット KINARM のプログラミングを行った。本実験デザインに合わせて、任意の強度で運動を補助し、任意のタイミングで補助を解除する実験プログラムを構築した。KINARM の制御環境を構築した後に、実験へと移行した。その結果、以下の成果が得られた。

##### (1) 結果：研究 A

4 名の参加者からデータを取得し、次の結果を認めた。

ベースライン 1 と 2 では、運動エラーや制御感に著明な差を認めなかった。

ベースラインに比べてテストフェーズでは、制御感の低下を認めた。

ベースラインに比べてテストフェーズでは、運動エラーの増大を認めた。

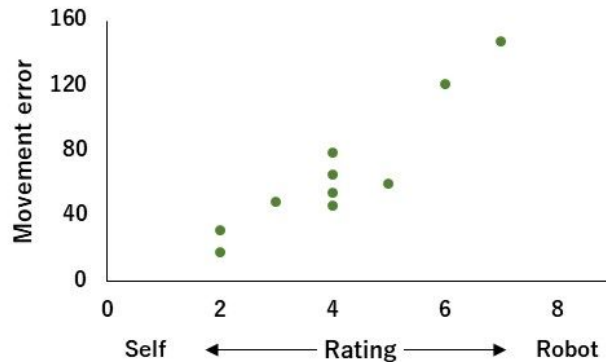
制御感と運動エラーの間に相関関係を認めた（下図）。

##### (2) 考察：研究 A

実験の結果、単調な運動補助を繰り返し受けることで、ロボットに頼るようになり、補助を解除した際の運動エラーが増大した。この結果から、ロボットによる単調な介入が運動主体感を奪い、その結果として運動戦略の変容が起こる可能性が考えられた。

一方で、この運動エラーの増大がどのような運動制御戦略の変容により生じたのかは不明であった。これを精査するためには、運動変化の背後にある筋活動を精査する必要があると考えられた。また、運動補助の効果をより詳細に精査するために、試行を通して運動補助を受けない条件を新たに追加する必要があると考えた。

そこで、当初予定していた研究 B への移行を取りやめ、KINARM の実験プログラムの改変および、研究 A の実験デザインの修正とデータの取り直しを行うこととした。KINARM による運動計測に合わせて筋電位の計測を同期させるために、実験プログラムを改変し環境構築を行った。また、新たな実験計画にて倫理申請手続きを完了した。その後、複数の予備実験を実施し、筋電データの解析方法を検討した。



参加者 1 名の制御感と運動エラー

##### (3) 結果：研究 A-2

筋電位の周波数解析の結果、現環境にて適切に筋電位を取得できていることが示唆された。条件間の比較では、これまでの実験結果で示されたとおり、ベースライン 1・2 間に差がない一方で、ベースラインに比べてテストフェーズでは、制御感の低下と運動エラーの増大を認めた。筋電データにおいて、ベースラインに比べてテストフェーズでは、上腕二頭筋や上腕三頭筋の筋活動の低下を認めた。

##### (4) 考察：研究 A-2

テストフェーズにて認めた筋活動低下の結果から、運動補助による運動主体感の減少が、運動への動機付けを奪い、結果として運動出力としての筋活動が低下した可能性が考えられた。この筋活動の低下により、運動補助が解除された際の運動修正が遅れ、運動エラーの増大へとつながった可能性がある。現時点ではサンプルサイズが小さく、本結果から結論を導くことはできないが、仮説を支持する結果が得られているため、データ取得を継続しサンプルサイズを拡大する予定である。

##### (5) 今後の展望

今後は実験を継続し、サンプルサイズの拡大を図る。その後、論文としてまとめ国際学術誌や学会にて研究成果を発表する予定である。さらに、筋電位の計測や改変した実験デザインはそのままに、研究 B へと移行することで、当初予定していたものよりも詳細なメカニズムの検討が可能になることが期待できる。最終的には、ロボットによる運動補助が積極的に活用されているリハビリテーション医療や介護現場において、たとえば脳卒中後運動障害などに対する運動補助の効果について、運動主体感を軸とした心理学的観点から検証を進める。これらの検証により、運動補助が運動制御を変化させる心理学的メカニズムを明らかにした上で、より高効率に運動スキルを獲得させる新手法の実現に向けて研究を展開していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 宮脇 裕	4. 巻 39
2. 論文標題 意識と運動制御	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 理学療法	6. 最初と最後の頁 1119-1126
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 宮脇 裕、村井 昭彦、大谷 武史、森岡 周	4. 巻 25
2. 論文標題 運動制御時の運動主体感を定める手がかり統合戦略	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 基礎理学療法学	6. 最初と最後の頁 50～55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24780/jjptf.JJPTF_2022-R2	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮脇 裕
2. 発表標題 "私が運動を制御している"と感じられることの意義とは？
3. 学会等名 第20回日本神経理学療法学会学術大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------