

[研究助成 (A)]

外骨格ロボットを用いて運動パフォーマンスを向上させる 仕組みの解明

2251009



研究代表者
(助成金受領者)

一般社団法人NeuroPiano プロジェクトリサーチャー 加藤 辰 弥

[研究の目的]

本研究の目的は、自分では実行することが難しい高速な指の動きを受動的に経験することが、その後の能動的な運動パフォーマンスをどのように改善するのか明らかにすることである。運動技能は通常、自分で繰り返し練習することで上達すると考えられている。しかし、スポーツや音楽演奏のような高度な技能では、現在の自分の能力を超える動きを自力で経験することが難しく、それがさらなる上達を妨げる一因となる可能性がある。近年、外骨格ロボットなどの技術を用いることで、人が自発的には行えない速さや複雑さの運動を身体に経験させることが可能になってきた^{1,2}。このような受動運動トレーニングは、従来の能動的な練習とは異なる新しい学習方法として期待される。

一方で、受動的に指を動かされる経験が、どのような仕組みで能動運動の向上につながるのかは十分に分かっていない。単に同じ感覚入力を経験するだけで運動が改善するのか、それとも、その動きがどのような系列であるかを理解し、予測しながら経験することが重要なのかは未解明である。そこで本研究では、外骨格ロボットを用いて、参加者の指を一定の系列に従って高速に動かすトレーニングを行い、系列に関する事前知識の有無が、その後の能動的な系列指運動の改善に影響するか検証した。

さらに本研究では、長年の訓練によって精密な指運動を獲得しているピアニストと、専門的

な演奏経験を持たない非演奏家を比較した。ピアニストは、複雑な指の動きに関する感覚運動の表象をより精緻に持っていると考えられるため、事前知識を利用して高速な受動運動を意味のある系列として捉えやすい可能性がある。したがって、本研究では、事前知識によるトレーニング効果の増強は、非演奏家よりもピアニストで顕著に現れると予測した。

以上より、本研究は、自発的には実行困難な高速受動系列運動による能動運動パフォーマンス改善の背後には、単なる感覚入力への曝露だけでなく、系列に関する事前知識と熟練した感覚運動表象によって、その入力の意味のある系列として予測・構造化されることが重要である可能性を検証するものである。本研究により、受動運動トレーニングによる運動学習機序解明だけでなく、ロボットを用いた受動運動トレーニングの効果を高めるための認知的条件を明らかにし、音楽演奏、スポーツ、リハビリテーションに応用可能な新しい運動学習法の基盤を築くことを目指す。

[研究の内容、成果]

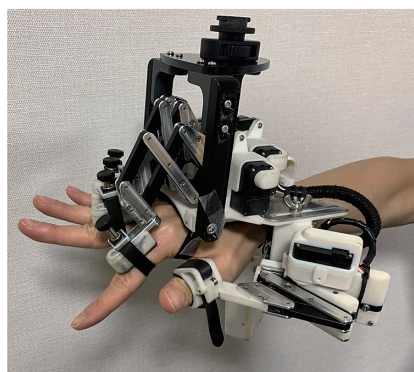
本研究では、外骨格ロボットによって指を高速に動かされる受動的なトレーニングが、その後に能動的に行う複雑な指運動のパフォーマンスを向上させるかを検証した。特に、参加者がトレーニング中に経験する指の系列について事前に知っていることが、トレーニング効果に影響

響するかを調べた。

実験には、音楽大学に所属している、または卒業後も継続して専門的な訓練を行っているピアニスト 17 名（ 22.8 ± 3.9 歳；女性 14 名）と、楽器演奏歴が 5 年未満の非演奏家 17 名（ 22.5 ± 2.5 歳；女性 14 名）が参加した。参加者は、外骨格ロボットによる 15 分間の受動トレーニングの前後で、複雑な系列指運動をできるだけ速く正確に行った（図 1B）。テストでは、5 つの指運動からなる系列を 15 秒間に何回繰り返せるかを評価した。2 種類の系列について、それぞれ 3 試行ずつテストした。トレーニングは右手に対して行われたが、テストは右手と左手の両方に対して行われた。2 つの系列を比較することで、トレーニング効果が系列を超えて汎化するか、左手の技能を評価することで、効果が対側手へ転移するかを評価した。また、テストの前には、各系列について同じく 3 試行ずつ練習を行った。

外骨格ロボットによるトレーニングでは、参加者の右手の指を 10 Hz のテンポで高速に動かした。具体的には、ある指が 100 ミリ秒で 45 度屈曲し、その直後に次の指が屈曲した。このとき、同時に、先に屈曲していた指は伸展し、元の位置に戻った。トレーニング前のテストにおける指運動のテンポは、ピアニストで 7.8 ± 1.1 Hz、非演奏家で 3.2 ± 1.0 Hz であったため、参加者は自分で実行するよりもはるかに速いテンポで、連続的に指を動かされる経験を受けた。15 分間のトレーニングのうち、10 分間はテストで用いた 2 つの系列のうち一方が繰り返し提示された。この系列をトレーニング系列とした。残りの 5 分間には、トレーニング系列と一部が類似している別のランダムな系列を挿入した（図 1C）。実際のトレーニングでは、15 ～ 45 秒程度のトレーニング系列と、約 10 秒間のランダム系列が交互に現れるようにした（図 1C）。また、同じランダム系列が時間的に近接して繰り返されないようにし、ランダム系列自体に対する学習効果が生じにくいよう設計した。徐々

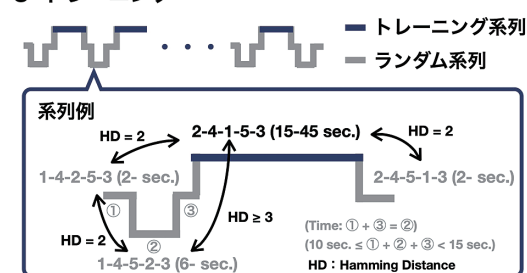
A 外骨格ロボット



B 実験の流れ



C トレーニング



D 実験条件

1. ランダム条件



2. 事前知識条件



図 1 実験概要

に系列が切り替わることで、参加者がトレーニング中にどの系列で指を動かされているかを判断することは難しくなっていた。実際、事前知識がない場合、テストした 2 つの系列のうちどちらがトレーニング中に繰り返し提示されていたかを知覚できたと報告した参加者は、ピアニスト 1 名を除いていなかった。

実験条件は、ランダム条件と事前知識条件の

2つであった（図 1D）。すべての参加者が両方の条件を行い、条件間には3日以上の間隔を空けた。各条件では異なる系列を用い、どの系列を用いるかは、あらかじめ用意した3つのペアの中から参加者ごとにランダムに決定した。また、ランダム条件と事前知識条件のどちらを先に行うかは、参加者間で偏りが出ないように調整した。ランダム条件では、参加者に「ロボットはランダムな系列で指を動かします」と説明した。一方、事前知識条件では、「テストで行った2つの系列のうち系列 A が、15 分間のどこかで繰り返し差し込まれます」と説明した。いずれの条件でも、参加者にはトレーニング中に指の動きに意識を向けるよう指示した。

さらに、トレーニング中の注意の程度を評価するため、15 分間の中に8～12回、通常よりも遅く指が動くイベントを挿入した。通常は100 ミリ秒で45度屈曲するところを、このイベントでは500 ミリ秒かけて45度屈曲した。参加者には、このゆっくりした指の動きが何回あったかを数えるよう求めた。これにより、条件間でトレーニング中の注意の向け方に大きな違いがないかを確認した。実際、非演奏家群でもピアニスト群でも、カウントの誤りに条件間で統計的有意差はなく、条件間でトレーニング中の指運動への注意に大きな差はないことが示唆された。

トレーニング中は、テストで用いた2つの系列が描かれた画面が表示され、参加者はできるだけ画面を見るよう指示された。外骨格ロボットによる実際の指の動きは布で隠し、視覚的に確認できないようにした。

この実験により、自発的には実行困難な高速受動系列運動が、その後の能動的な指運動パフォーマンスを高めるか、またその効果が単なる感覚入力への曝露だけでなく、系列に関する事前知識に依存するかを検証した。さらに、ピアニストと非演奏家を比較することで、長期的な訓練によって形成された精緻な感覚運動表象が、高速受動トレーニングの効果を高めるか明

らかにすることを目指した。

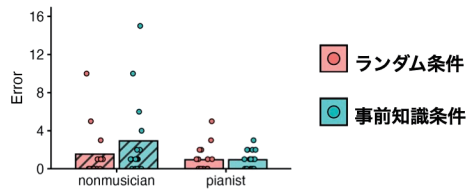
はじめに、トレーニング中に参加者が指の動きほどの程度注意を向けていたかを確認するため、通常よりもゆっくり指が動くイベントの検出成績を解析した。実際に提示された低速イベントの回数と参加者が報告した回数との差をエラーとして評価したところ、ピアニスト群、非演奏家群のいずれにおいても、ランダム条件と事前知識条件の間に統計的に有意な差は認められなかった（図 2A）。このことから、事前知識の有無によって、トレーニング中の指の動きへの全般的な注意水準が大きく異なっていた可能性は低いと考えられる。

次に、外骨格ロボットでトレーニングを受けた右手について、トレーニング中に繰り返し提示された系列のパフォーマンス変化を評価した。その結果、ピアニストでは非演奏家よりも大きなパフォーマンス向上が認められた（図 2B）。さらに、ピアニストでは、トレーニング30分後において、事前知識条件の方がランダム条件よりも有意に大きな向上を示した（ $p < 0.001$ ）。この結果は、ピアニストでは、受動トレーニング中に経験する系列への事前知識が、その後の能動的な系列指運動の改善を促進したことを示している。

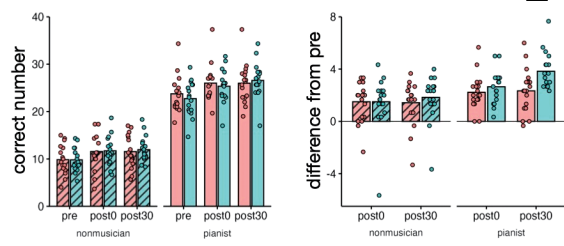
一方、右手の非トレーニング系列、すなわちトレーニング中に繰り返し提示されていない系列についても、両条件でパフォーマンス向上が認められた（図 2C）。この改善には、群間差や条件差は認められなかった。したがって、高速な指運動への受動的曝露そのものにも、後続の能動運動パフォーマンスを全般的に高める効果がある可能性が示唆された。つまり、本トレーニングの効果には、特定の系列に限られない非特異的な促進効果が含まれると考えられる。

ただし、トレーニング系列の改善量と非トレーニング系列の改善量の差を評価したところ、ピアニスト群の右手・事前知識条件のトレーニング30分後においてのみ、この差が0よりも有意に大きかった（ $p < 0.05$ ）（図 2F）。すな

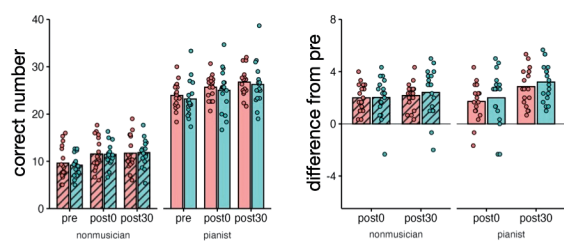
A ゆっくり指が動いた回数のエラー



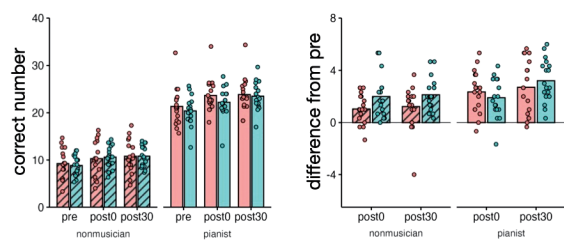
B 右手・トレーニング系列



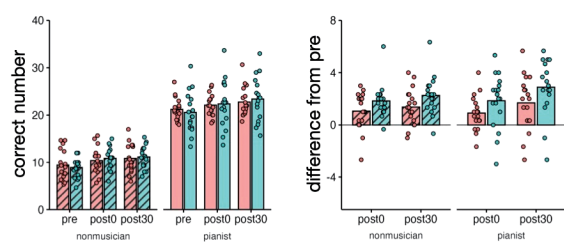
C 右手・非トレーニング系列



D 左手・トレーニング系列



E 左手・非トレーニング系列



F トレーニング系列と非トレーニング系列の差

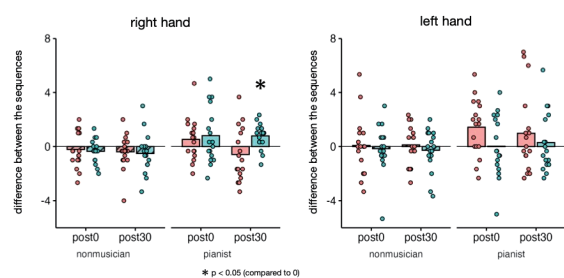


図2 実験結果

わち、ピアニストが事前に系列を知っていた場合には、単なる全般的な速度向上に加えて、実際に受動的に経験した系列に特異的な改善が生じたことが示唆された。この結果は、高速受動トレーニングの効果が、単なる感覚入力への曝露だけでなく、系列に関する事前知識と、熟練によって形成された精緻な感覚運動表象に依存して強まる可能性を支持する。特に、10 Hz という自発的には実行困難で、感覚のみから系列を同定しにくい速度であっても、既知の系列として予測・構造化できる場合には、その受動入力が後の能動運動を改善する有効な学習信号として利用された可能性がある。

さらに、トレーニングしていない左手についても解析を行った。左手のトレーニング系列では、両条件でパフォーマンス向上が認められ、群間差は認められなかった (図 2D)。一方、非演奏家では、事前知識条件でランダム条件よりも大きな向上を示した。左手の非トレーニング系列についても、両条件でパフォーマンス向上が認められ、ピアニスト、非演奏家のいずれにおいても、事前知識条件の方がランダム条件よりも大きな改善を示した (図 2E)。これらの結果は、右手で受けた高速受動運動の効果が、反対側の手にも一定程度転移することを示唆している。ただし、左手では右手のトレーニング系列で認められたような明確な系列特異的効果は確認されなかった (図 2F)。そのため、左手での改善は、特定の系列表象の更新というよりも、高速受動指運動の経験によって、系列指運動全般の実行が促進された可能性がある。

以上の結果から、外骨格ロボットによる高速受動トレーニングは、その後の能動的な系列指運動パフォーマンスを向上させることが改めて確認された。この効果には、少なくとも二つの機序が関与していると考えられる。第一に、非トレーニング系列や反対側の手にも改善が認められたことから、高速な多指運動を受動的に経験すること自体が、複数指運動における各指運動の準備や遂行を早めた可能性がある。第二に、

ピアニストの右手・事前知識条件でのみ系列特異的な改善が確認されたことから、受動的な感覚入力による学習効果が、入力の予測・構造化により促進された可能性がある。すなわち、機械によって身体へ与えられる感覚入力は、それ単独で効果を持つだけでなく、人間側の知識、予測、熟練した感覚運動表象と結びつくことで、より選択的で強い運動学習効果を生むと考えられる。

この知見は、「機械と人間の調和」という観点からも重要である。外骨格ロボットは、単に人間の身体を機械的に動かす装置ではなく、人間が持つ認知的・身体的特性に合わせて感覚経験を提示することで、能動的な運動能力を引き出す手段となり得る。本研究は、機械が一方的に人間を制御するのではなく、人間の内部状態と調和することで学習を促進するという、新しい人間－機械協調の可能性を示した。これは、音楽演奏やスポーツの技能向上に加え、リハビリテーションにおいて、自力ではまだ実行困難な運動を安全に経験し、その後の能動運動へとつなげる技術の開発にも貢献し得る。

今後は、今回観察された効果が数日後あるいは数週間後まで持続するかを検証する必要がある。

また、系列に依存しないパフォーマンス向上について、完全にランダムな系列を用いた場合を調べることで、受動トレーニングに特定の系列を用いる必要性を明らかにする。さらに、今回は参加者の事前パフォーマンスによらず 10 Hz のテンポでトレーニングしたが、適切なトレーニング速度がある可能性についても調べていき、人間の学習を最も効果的に引き出す機械側の条件を検討していく。

[引用文献]

1. Furuya, S., Oku, T., Nishioka, H., and Hirano, M. (2025). Surmounting the ceiling effect of motor expertise by novel sensory experience with a hand exoskeleton. *Sci. Robot.* *10*, 3802. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.adn3802>.
2. Michalko, A., Di Tommaso, F., Peperoni, E., Capitani, S.L., Noccato, A., Parri, A., Gener, C., Conti, R., Di Stefano, N., Tagliamonte, N.L., et al. (2026). Robot-mediated haptic feedback outperforms vision in violin duo coordination. *Sci. Robot.* *11*. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aeb1901>.

[成果の発表，論文など]

加藤辰弥：卓越した技能の更なる高みを目指す技能向上戦略，運動神経科学研究会，2025 年 8 月，長野