The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Effects of Attention to Proprioception on Motor Learning
Author(s)	千代原, 真哉
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/88161
rights	Reproduced with permission from Springer Nature
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Effects of Attention to Proprioception on Motor Learning

A dissertation presented
by

Shinya Chiyohara
Student Number: 32A14031

Graduate School of Frontier Biosciences
Osaka University

March 2022

Abstract

Learning new motor skills needs a lot of training such as pitching, darts, tennis serve, golf swing, and shoot at soccer game. Therefore, development of learning methods for efficient learning of motor skills and motor controls are expected. One reason for a lot of training to acquire motor skills is that solutions to achieve a goal are explored in the large search space. The aim of this study is to explore efficient learning-method of complex motor skills.

For this purpose, I investigated “passive” training through physical contacts, which helps to instruct trainees on how to move the limbs and help trainees to learn new skills. A merit of this passive training is the transferring of instructions via proprioceptive information. However, it remains unclear how passive training affects the proprioceptive system and improves motor learning.

This study examined effects of the passive training and mechanisms using an upper extremity exoskeleton robot. If learners use proprioceptive information to improve motor performances, their attention should be directed to proprioception. Therefore, I examined change in proprioceptive acuity due to passive training to examine if learners attentively and intensively utilize the proprioceptive information during the training. As a result, proprioceptive acuity increased after the training. Furthermore, I examined whether participants learn kinematic information in the proprioceptive space. I also investigated relationship between effect of passive training and proprioceptive short-term memory, sensory uncertainly or attention to understand the underlying cognitive mechanisms of the passive training by the exoskeleton robot.

In consequence, I found that passive training shapes motor trajectory representation in the joint space, which is based on proprioceptive short-term memory and attention. Accordingly, these results suggest that passive training may limit search space to around instructed space. These results will lead to developments of motor learning systems in which an exoskeleton robot helps everyone to experience movements suitable for themselves and to utilize the experience for efficient learning.

要旨

我々が投球動作やダーツ，テニスのサーブ，ゴルフのスイング，サッカーのシュートのような新しい運動スキルを学習するときは，多くの試行錯誤と練習を必要とする．そのため，運動スキルの学習や運動制御を効率的に学習する方法が望まれており，先行研究でも様々な観点から検討されている．運動スキルの習得に時間がかかる一つの理由は，広い探索空間の中，試行錯誤で目的を達成するための解（運動指令や感覚表象）を探索していく必要性があげられる．このような複雑なスキルの学習や運動制御において効率的に学習する方法を検討するのが本研究の狙いである．

この目的を達成するために，本研究で注目したのが，インストラクターが学習者にフォームや望ましい運動を教える際に用いる身体接触による教示である．この受動的なトレーニングの利点は自己受容感覚を通した運動情報の伝達にあるが，このことがどのように自己受容感覚システムに影響し，学習を改善するのかは分かっていなかった．

そこで，本研究では身体接触による運動教示（受動的なトレーニング）を再現するために外骨格ロボットを使用して，受動的なトレーニングの学習効果とそのメカニズムを検証した．まずは学習者が自己受容感覚情報に注意を向け，どのように利用しているかを検討するために自己受容感覚の変化に着目し，もし学習者が運動パフォーマンスの改善に自己受容感覚情報を利用しているならば，注意が自己受容感覚に向き，結果的に自己受容感覚の鋭敏さがトレーニング後に改善するという仮説を立てて検証した．また，自己受容感覚から得た情報を運動学習に利用するために視覚的な軌道に変換して保持・利用しているのか，自己受容感覚の情報として関節空間で記憶し，運動学習に利用しているのかを調べた．さらに，受動的なトレーニング効果と関連する可能性が考えられた自己受容感覚の短期記憶や感覚の不確実性，注意について，運動軌道の学習効果との関係性を検討した．

その結果，受動的な身体教示によるトレーニング効果は自己受容感覚の短期記憶や注意を基盤とした，関節空間（自己受容感覚）での運動軌道の表象の形成であることが示唆された．これにより，受動的に運動を教示することで，教示した空間周辺に探索空間を限定することができる可能性が示された．このような受動的な運動経験によって，学習を効率的に進めることができるならば，外骨格ロボットによって自身に適した運動を誰しもが経験し，学習に利用できるシステムの開発に繋がる可能性がある．

目次

ABSTRACT 2

要旨 3

第 1 章　序論 6

1.1　はじめに 6

1.2　研究ターゲット 6

1.3　本論文の構成 8

第 2 章　関連研究 10

2.1　運動スキルの学習 10

2.1.1　運動スキルの学習 *10*

2.1.2　運動スキルの神経基盤 *11*

2.1.3　運動スキルのトレーニング *12*

2.1.4　自己受容感覚と運動学習との関連 *13*

2.2　問題の所在 14

2.3　本研究の目的 15

第 3 章　上肢外骨格ロボットを用いた受動的な トレーニング効果 19

3.1　はじめに 19

3.2 実験セットアップと実験手順 20

3.2.1　実験参加者 *21*

3.2.2　実験機器 *21*

3.2.3　実験手順 *22*

3.2.4　データ解析 *27*

3.3 結果：動的なトレーニングの学習への影響 28

3.3.1　筋電図（EMG） *28*

3.3.2　運動軌道 *30*

3.3.3　Proprioceptive Judgment *32*

3.3.4　ダーツ *33*

3. 4 考察 34

第 4 章　受動的なトレーニング効果に対する自己受容感覚短期記憶の影響 37

4.1 はじめに 37

4.2 実験セットアップと実験手順 39

4.2.1　実験参加者 *39*

4.2.2 実験機器 *40*
4.2.3 実験手順 *40*
4.2.4 データ解析 *45*
4.3.1 受動的な運動軌道の学習効果 *47*
4.3.2 自己受容感覚短期記憶パフォーマンス課題 *52*
4.3.3 Proprioceptive Judgment パフォーマンス *54*
4.3.4 自己受容感覚短期記憶と運動課題との関係 *55*
4.3.5 認知パフォーマンスの影響 *60*
4.4 考察 62
第 5 章 結論 65
5.1 本論文の要約 65
5.2 将来の方向性 66
参考文献 68
謝辞 77
研究業績 78

第 1 章　序論

1.1　はじめに

我々が投球動作やダーツ，テニスのサーブ，ゴルフのスイング，サッカーのシュートのような新しい運動スキルを学習するときは，多くの試行錯誤と練習を必要とする．スポーツやミュージシャン，医師やセラピストの治療技術などエキスパートになるまでには何百，何千時間の繰り返しの練習と経験が必要になる．どうしてこのように運動スキルの習得には時間がかかるのだろうか．効率的に学習する方法はないのだろうか．習得に時間がかかる一つの理由としては，我々の身体は数百もの関節や筋で構成されており，冗長なシステムであるため，ある目的動作を達成するのに無数の解が存在することが考えられる．身体や環境からの制約があると言っても，試行錯誤によって探索する空間は広いため，適切な動作の学習には時間がかかる．また，探索空間が広いために，悪いフォームとなり怪我を招くこともある．例えば投球動作で相手のミットにボールを投げることを考えてみる．ボールが相手のミットに届くようになったとしても，山形の軌道を描く場合や肘に負担のかかるフォームであった場合は故障のリスクが生じる．このような複雑なスキルの学習や運動制御において効率的に学習する方法を検討するのが本研究の狙いである．

この目的を達成するために，本研究で注目したのが，親が子どもに動きを教えたり，インストラクターが学習者にフォームを教えたり，セラピストが患者に動作を教えたりする際に用いる身体接触による教示である．この教示はどのような意味や効果があるのだろうか．もしこの教示が新しいスキルの学習に効果的ならば，運動スキルを効率的に習得する一助になるかもしれない．

1.2　研究ターゲット

運動学習は大別して，運動適応と運動スキルの学習に分けられる(Krakauer et al. 2019)．運動適応はすでに獲得している運動や行動を環境や身体の状況，その変化に応じて，パフォーマンスを維持できるように調整していくことである．つまり,運

動適応はすでに獲得した運動や行動のパラメータの調整である．そのため，短時間で急速に学習が進む．一方で，運動スキルの獲得は感覚刺激や現在の身体の状態，環境情報をもとに正しい選択をし，正確に早く運動や行動を遂行することである．身体のバイオメカニクスや課題の複雑さのため，運動スキルは高次元パラメータの探索問題であり，非線形，冗長性の問題として特徴づけられる．そのため運動適応とは異なり，新しい運動パターンや制御則を学習するには多くの時間が必要となる(Shmuelof, Krakauer, and Mazzoni 2012)．そこで本研究では，学習に時間がかかるスキルの獲得をターゲットとし効率的に学習する方法を検討する．また，スキルの学習には複数の段階があることが知られている(Wolpert, Ghahramani, and Flanagan 2001; Stanley and Krakauer 2013; Wolpert, Diedrichsen, and Flanagan 2011; Diedrichsen and Kornysheva 2015; Lövdén, Garzón, and Lindenberger 2020)．その段階の中には，行動レベルの学習（正確さや適切なスピード，ばらつきの減少など）だけでなく，エキスパートの行動選択や学習初期の新しい反応選択のように認知成分や知識への依存も含むとされ(Krakauer et al. 2019; Stanley and Krakauer 2013)，スキルの学習は複雑で様々な要因から構成されている．本研究では学習の効率化を目標に，エキスパートの行動選択のような認知的な側面よりも，学習初期に行動探索や制御方略を効率的に学習する方法を検討する．

本研究では，効率的なスキルの学習（最適あるいは準最適解となる行動則の探索と行動のばらつきの減少）のために，身体接触による運動教示方法に焦点を当てた．スキルの学習を効率化する方法は観察学習や模倣，ゴール空間でフィードバック（ゴールの状態と現在の状態を示したフィードバック）による学習の誘導(Rohde et al. 2019)などにより冗長性を解決する方法が報告されている．しかしながら，これらの方法は視覚的な教示であるため，直接的に身体情報を教示することはできない．そこで本研究では，直接的に関節運動を誘導することで，バイオメカニクスや課題の冗長性から生じる広大な探索空間を狭小化し，スキルの獲得の効率化を目標に，他者からの身体接触による学習効果とそのメカニズムを研究ターゲットとした（Fig 1.1）．

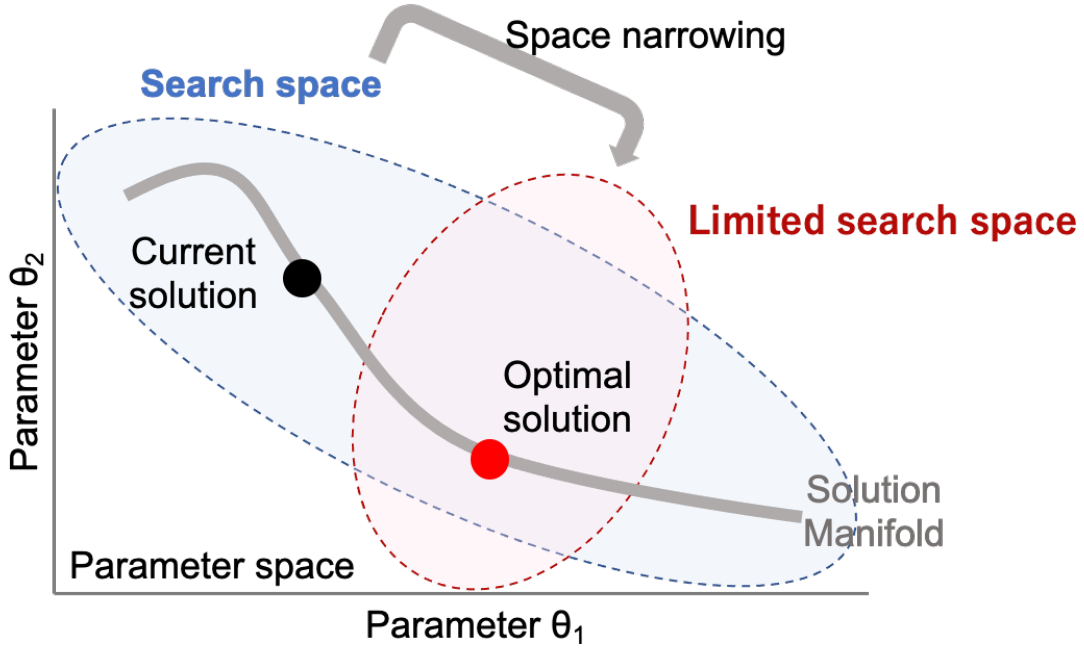


Figure 1.1. スキルの効率的な獲得のための探索空間の狭小化イメージ. 無数にある解（パラメータ空間）の中で，本来の探索空間を最適解の周辺に制限する．その方法として本研究では受動的な運動教示に注目．

1.3　本論文の構成

この論文は以下で構成した．第 2 章で関連研究を示し，自身の研究の位置付けを説明した．本研究では探索空間を減少するために，身体接触による運動教示の学習効果に着目した．そのため，身体の関節に対し受動的に動きを教示し，その効果およびメカニズムを検討する必要がある．また，受動的な教示では自己受容感覚から情報を得て，その情報をもとに学習することが必要になる．そこでこれらの先行研究の概要を説明する．

次に第 3 章で，実際に受動的な運動教示を外骨格ロボットで実験参加者に教示し，学習できるのかを検討した．また，そのメカニズムとしては自己受容感覚の記憶として動作を保持するのか，視覚的に動きを再構成するのか，脳が受動的に教示された情報を処理する戦略について検討した．また，身体のスキルの学習において自己受容感覚が変化することも知られている．そのため，自己受容感覚の鋭敏さを受動的な教示前後で取得し，その変化を学習の1指標として測定した．

第 4 章では，第 3 章の実験を拡張し、教示された内容をどのように短期記憶で保持するのかを調べた．自己受容感覚の情報をどのように記憶して学習に利用し

ているのか，より詳細な検討を行うために，自己受容感覚の短期記憶課題を調査し，受動的なトレーニングによる学習効果との関係性を調査した．さらに，自己受容感覚の短期記憶課題や受動的なトレーニングによる学習は自己受容感覚の知覚情報を利用するため，感覚知覚の不確実性が両者のパフォーマンスに関係する可能性がある．また，注意機能は感覚情報の精度を向上させ，不確実性を減少させる可能性がある．そのため，自己受容感覚の不確実性（ばらつき）と注意機能を測定し検討を加えた．

最後に第 5 章で本論文を通した成果を要約し，将来の研究課題について議論した．

第 2 章 関連研究

この章では運動スキルの学習について先行研究をまとめる．運動適応はその研究の行いやすさから理論的、生理学的な知見が集積され，メカニズムの理解が進んでいる．一方で運動スキルの学習は運動適応と比較すると研究数が少なく，今後更なる知見が蓄積されていくことになると思われる．本研究は運動スキルの学習に応用することを念頭に実施してきた．そのため，まずは運動スキルの学習についてまとめ，本研究で焦点を当てた運動スキルの学習と自己受容感覚の関係性についても報告する．

2.1 運動スキルの学習

2.1.1 運動スキルの学習

運動スキルの獲得は課題の中で与えられる適切なゴールを特定し，感覚刺激や現在の身体・環境（世界）の状態から正しい行動を選択して(Diedrichsen and Kornysheva 2015)，正確に適切な速度でパフォーマンスを遂行することである(Krakauer et al. 2019)．この定義からもわかるように，運動スキルの学習は 2 つの成分の改善から構成されている．1 つ目は行動選択で 2 つ目は行動遂行である(Diedrichsen and Kornysheva 2015)．行動選択は，いつ何を行うかといった課題環境を理解、学習することであり，行動遂行は speed-accuracy trade-off のシフトで，行動を早く正確に行う能力の改善をさす．また，運動スキルの獲得を時間的要素(学習の進み方）で捉えると複数のフェーズに別れる．1 つのモデルでは Fast stage，Slow stage，Consolidation stage，Automatization stage，Retention stage の 5 つの stage に分類している(Doyon and Benali 2005)．Fast stage は 1 回のトレーニングセッションでも急激な改善が進む段階，Slow stage は多くの練習によってゆっくりと学習効果が得られる段階である．Consolidation stage は，最初のトレーニングセッションから数時間後に追加のトレーニングなく，自発的にパフォーマンスが増加する段階，Automatizaion stage は運動に必要とする認知リソースが最小となり,マルチタスクも干渉することなく可能となる段階である．最後の Retention stage は長期間の遅延があっても運動スキルを遂行できるようになる段階である．このように運動スキ

ルの学習過程は練習を繰り返すことによって，徐々にスキルを定着させていく．スキル定着の過程では関わるメカニズムも異なるため，運動スキルの学習を研究する上ではどの成分に着目するのか，どの時間的要素に着目するのかを決めて介入することが必要になる．

また運動スキルの獲得は課題や身体のバイオメカニクスによる冗長性の問題としても捉えられる．生物学的な感覚運動システムは高次元な階層システムであるため，与えられた行動を行う方法は無限に存在する．この冗長性はヒトの複雑な神経筋システに起因した内在的冗長性（例．リーチング動作時の多数の関節配置など）と課題や環境に起因した外在的冗長性（例．コップを持つときの多数の接触位置の存在など）の 2 つに分けることができる(Sternad, Huber, and Kuznetsov 2014)．このような冗長性は複数の解が存在するという意味で課題達成のために利点がある一方で，最適解の探索を難しくしている要因でもある．神経-筋システに起因した内在的冗長性に対し，外骨格ロボットによる受動的な運動教示は特定の運動（解）に誘導できる方法と考えられる．

2.1.2 運動スキルの神経基盤

新しい運動スキルには前頭頭頂皮質，小脳，基底核など複数の脳領域が相互作用する複雑なネットワークシステムが必要とされる(Doyon, Penhune, and Ungerleider 2003; Dayan and Cohen 2011)．系列学習課題を利用した研究では，大脳皮質-基底核回路は異なる学習ステージで異なった相互作用を示すことが報告されている(Lehéricy et al. 2005; Poldrack et al. 2005; Jankowski et al. 2009; Bapi et al. 2006)．しかしながら，このような大脳皮質-基底核回路の報告は系列学習課題による報告が主である．運動スキルは探索的な行動選択を含むため，系列学習では運動スキルの神経基盤の理解を制約してしまう可能性がある(Krakauer et al. 2019)．実験的，理論的には運動スキルの課題として Mirror-reversal learning(Telgen, Parvin, and Diedrichsen 2014; C. S. Yang, Cowan, and Haith 2021)，報酬フィードバック評価による学習(Izawa and Shadmehr 2011)，両手制御課題(Haith et al., n.d.)，弧の軌道を描くポインティング課題(Shmuelof, Krakauer, and Mazzoni 2012)などが報告されているが，これらの神経基盤を調べた研究は少ない．1 つの研究では右手の指でコンピュータ上のカーソル操作の学習課題を数日に渡って実施し，スキル学習の初期と自動化段階で比較した．その結果，尾状核の前後で分離し，それぞれ初期と後期の学習ステージのパフォーマンスに関連していた(Choi, Shin, and Kim 2020)．また,学習に関連した GABA の増加も機能的結合や

行動パフォーマンスと関連があることも示唆されている．つまり，運動スキルの学習は大脳基底核を中心とした複数の脳領域の相互作用が基盤になっていると考えられるが，今後の研究でより詳細に理論的背景との関係性も踏まえて解明されることが望まれる．

2.1.3 運動スキルのトレーニング

運動スキルの獲得のために数百，数千時間以上も必要となるため，効率的に習得できる方法が望まれる．先行研究においても運動スキルの学習を効率的に行うために様々な方法が検討されている．

運動スキルの学習を効率化するための一つの方法は報酬と罰の利用である．スポーツのコーチやセラピストなどは報酬や罰を使い分けることがある．これらの2つは行動選択や行動遂行においてそれぞれ別の効果を有しており，外在的な報酬が内在的な報酬に影響することも知られている(Chen, Holland, and Galea 2018)．また，報酬は運動と認知制御の speed-accuracy trade-off を変化させることも知られている(Manohar et al. 2015)．このように報酬の効果を明確に目的に応じて使い分けることで学習の促進が期待でき，簡便に導入できる方法と言えるだろう．

最適化されたトレーニング方法もスキルの学習を改善することが知られている．天井効果を示したエキスパートに運動生成中の能動的な体性感覚機能をトレーニングすることで，ただ単にトレーニングを繰り返し行うだけでは改善しなかった力制御が改善したことを報告している(Hirano, Sakurada, and Furuya 2020)．つまり，最適な方法でトレーニングを行うことでスキルの改善を図れる可能性を示唆している．

他者の観察による観察学習の導入も学習を強めることが知られている．観察学習は目的とする運動についての情報を学習者が得ることや潜在的な失敗を避けることに繋がる．観測学習の効果は身体的練習と組み合わせたときに，より効果を発揮する(Shea et al. 2000)．実際に観察学習は能動的な行動生成と共通の神経基盤を利用していることが報告されており(Ramsey, Kaplan, and Cross 2021)，運動のシミュレーションやゴールを明確にすることが可能になる．つまり，観察学習も複雑な運動スキルの学習において探索空間を限定する方法になりうると考えられる．

さらに，非侵襲的な脳刺激である経頭蓋直流電気刺激（transcranial direct current stimulation: tDCS）を使用して一次運動皮質への刺激によって運動スキルの獲得と記憶の固定を強めたことを報告している(Reis et al. 2009) ．このような脳刺激との組み合わせも学習効果を高める方法として注目されている．

現在報告されている上記のような方法は，ターゲットとしている運動スキルの段階や運動スキルの要素が異なる．それぞれを組み合わせることで相乗効果がもたらされる可能性がある．本研究で注目した方法は，どの学習段階でも利用することが可能である．運動スキルの学習中には，自己受容感覚の関節空間で内部モデルが形成され(Cuppone, Semprini, and Konczak 2018)，運動感覚の形成はスキルの学習と相互に関与している．自己受容感覚はどの学習段階でも利用しており，本研究の方法は運動感覚の形成だけでなく，教示された感覚を教師信号として関節空間での内部モデルと比較・照合することで様々な学習段階で利用できると考える．

2.1.4 自己受容感覚と運動学習との関連

自己受容感覚は筋や関節受容器，ゴルジ腱器官を通して関節角度や筋の緊張のような身体の状態を知覚する主要な感覚モダリティである(Tuthill and Azim 2018)．自己受容感覚は身体の運動の制御や運動の学習に中心的な役割を果たす(Omrani et al. 2016)．脳は力の制御や課題パフォーマンスの誤差情報を感覚情報として収集し，精緻な運動を生成するために運動指令や結果をアップデートしていく(Nowak, Glasauer, and Hermsdorfer 2004; Johansson and Flanagan 2009)．そのため，このような自己受容感覚を消失したヒトは運動制御や学習が難しいことが報告されており(Rothwell et al. 1982; Yousif et al. 2015; Miall et al. 2021)，さらに精緻な運動を練習してきたヒトはそうでないヒトと比較して自己受容感覚が優れていることも報告されている(Elbert et al. 1995) ．運動適応においては，運動学習後に自己受容感覚のリキャリブレーションが起こることが報告されている(Ostry et al. 2010; Izawa and Shadmehr 2011)．一方でスキルの獲得と行動遂行においても自己受容感覚は重要な役割を果たすことが報告されている(Ostry and Gribble 2016; Zatorre, Chen, and Penhune 2007; Bernardi, Darainy, and Ostry 2015; Vahdat, Darainy, and Ostry 2014; Mirdamadi and Block 2020)．つまり，運動学習と自己受容感覚は相互に関連しており，運動学習には自己受容感覚の変化が付随して生じることが示唆される．本研究で注目した受動的な運動教示による軌道の学習では自己受容感覚によって情報を取得するため，自己受容感覚と学習の関係性はより重要になると考える．そこで，本研究では運動軌道の学習と自己受容感覚の変化を調査し関係性を検討した．

2.2 問題の所在

運動スキル獲得は身体のバイオメカニクスや課題の複雑さにより，高次元パラメータを階層的に制御することが必要となる．その結果，運動スキルを学習するための探索空間が広く，ゴールを達成する行動変数は無限に存在し，冗長となる．バイオメカニクスといった内在的な冗長性に加え，課題特性やゴールといった外在的特性の相互作用によってより煩雑なものとなる．このような構造を持つ運動スキルの学習は，習得に数百，数千時間の練習が必要となる．そのため効率的に学習できるシステムの開発はスポーツやリハビリテーションなどの運動スキルの獲得に寄与するだけでなく，学習メカニズムの解明にも役に立つ．本研究では複雑な運動スキルの学習を効率化するシステム開発のために，親やコーチが学習者の身体に接触して身体感覚を教示することに注目して研究を進めた．

運動学習の研究でよく用いられるのは End-effector タイプのロボットが多い．しかし，手先位置で誘導する End-effector タイプでは，関節の冗長性は維持されているため，関節レベルでどのように動かすのかといった教示は難しい．運動フォームを考えてみると，不恰好なフォームで学習していた場合，そのフォームの修正には手先位置ではなく，関節レベルで教示していくことが必要である．そのため，探索空間を最適解の周辺に限定する目的を考えると，関節レベルでどのように身体を動かすのか，関節レベルで感覚形成が可能なのかを検討することが重要である．そこで，本研究では End-effector タイプのように手先位置に教示するのではなく，各関節に運動を教示できる外骨格ロボットを採用した（Fig 2.1）．

受動的な運動教示による学習は先行研究でも能動に行う運動学習のコントロールとして用いられており(Ostry et al. 2010)，外骨格ロボットによる受動的なトレーニング（関節への感覚情報の教示）によって学習効果があるのかを検証する必要がある．さらにその学習基盤を検討することによって，効率的に運動スキルを獲得するための示唆を得ることができる．そこで，本研究では脳が受動的な運動トレーニングを通した自己受容感覚情報をどのように処理しているのか，短期記憶や注意などの認知機能と関連性があるのかを検討した．

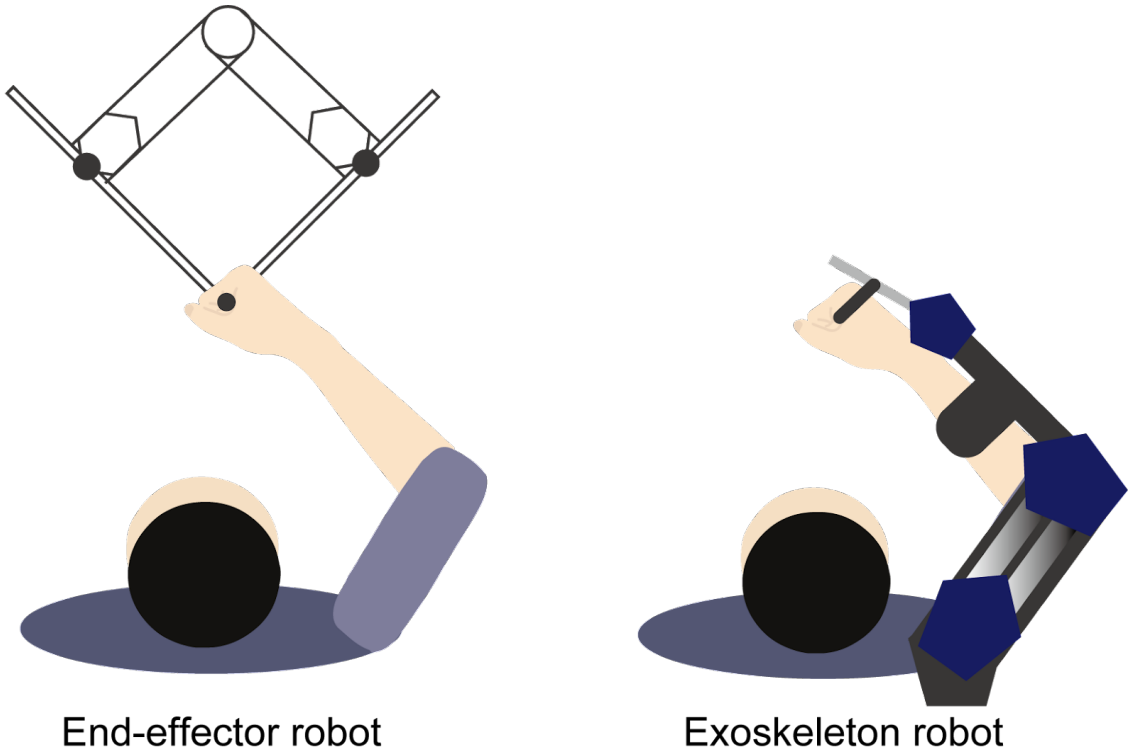
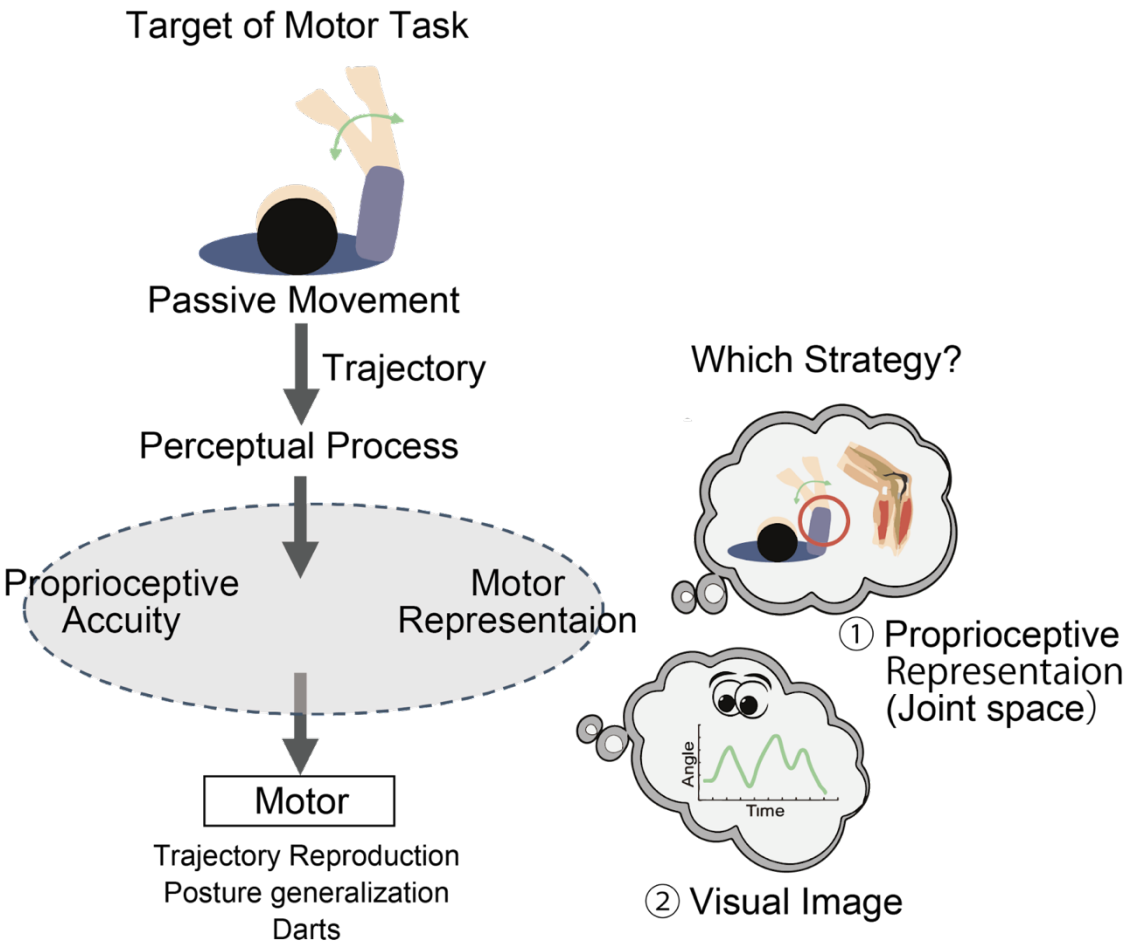


Figure 2.1. End-effector robot と Exoskeleton robot の図. 左は End-effector robot. 右は Exoskeleton robot（外骨格ロボット）. End-effector robot は手先位置で制御. 外骨格ロボットはそれぞれの関節を制御することができるため，各関節に動きを教示することができる. そのため，本研究では関節に動きを教示できる外骨格ロボットを採用した.

2.3　本研究の目的

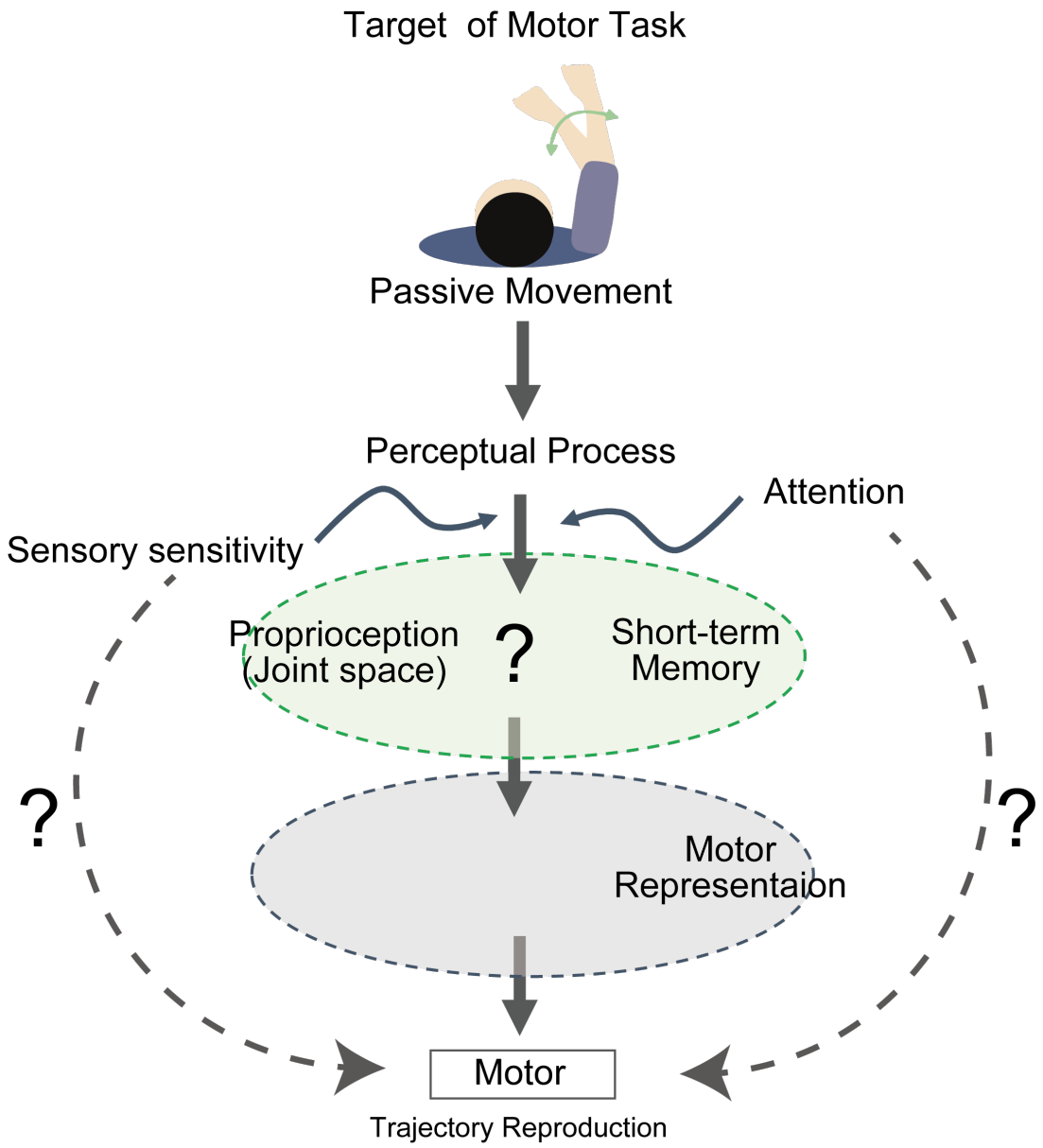
本研究の目的は，受動的なトレーニングにおける効果とそのメカニズムを検討することによって，運動スキルの効率的な習得に寄与する可能性を調べることである. 新規の運動スキルを獲得する初期段階においては，目的とする運動感覚を形成することが必要になる. その感覚の形成を受動的なトレーニングによってサポートすることできれば，能動的な運動における身体座標の探索空間を限定することが可能となる. さらに，受動的なトレーニングのメカニズムおよびその基盤を検討し，受動的なトレーニングを用いた効率的な学習方法の提案を行う.

1. 外骨格ロボットによって，各関節に繰り返し正確に運動教示を行うことで（受動的なトレーニング），教示したターゲット軌道を能動的に再現することが可能となるかを検討する（第 3 章）.
2. 自己受容感覚を通して得られた感覚情報を脳がどのように処理して学習に利用しているのかを調査するために，両手間転移を調べることで，情報処理過程を検討する（第 3 章）.
3. 受動的なトレーニングによる学習メカニズム解明の試金石として，自己受容感覚の鋭敏さの変化を調査し，その変化が他の課題の学習に与える影響についても考察する（第 3 章）.



第 3 章の目的. 左上の運動軌道の受動的な学習が本研究で扱う運動課題. 自己受容感覚を通して繰り返し情報処理されることで運動表象の形成や自己受容感覚の変化が生じるのかを検討. 右の Strategy で示したように脳が情報を処理する戦略を検討する. Motor で示した複数の課題を通して受動的な運動教示の効果とメカニズムを明らかにすることが第 3 章の狙い.

4. 第 3 章で受動的な運動軌道の教示（受動的なトレーニング）によって得られた自己受容感覚の情報をどのように利用しているのかを検討したが，この結果を拡張するために，教示された情報をどのように短期記憶として保持するのか検討する（第 4 章）．
5. 感覚情報はノイジーであるため，感覚知覚の推論は感覚の不確実性を推定することが必要になる．自己受容感覚の短期記憶課題や受動的なトレーニングによる軌道の学習は自己受容感覚の知覚情報を利用するため，自己受容感覚の不確実性に関与するのかを検討する（第 4 章）．
6. 注意機能は感覚情報の精度を向上させ，不確実性を減少させる可能性がある．第 3 章では，受動的なトレーニングの効果として自己受容感覚の変化を調べることで注意機能について言及したが，直接的に注意機能との関連性は調べなかった．そこで，注意機能の指標を測定し，関係性を検討した（第 4 章）．



第 4 章の目的. 上の運動軌道の受動的な学習が本研究で扱う運動課題（第 3 章と同じ課題，軌道は異なる）．受動的な運動教示によって形成される運動表象が自己受容感覚の短期記憶や感覚の不確実性，注意に影響を受けるのかを検討．これらの複数の課題を通して，認知的側面が運動軌道の形成に関与するかを検討し，受動的な運動教示の利用方法を検討することが第 4 章の狙い．

第 3 章　上肢外骨格ロボットを用いた受動的なトレーニング効果

親やスポーツのコーチが運動を指導するとき，学習者の手足を把持して望ましい運動を教示することがある．このような受動的な運動教示の利点は自己受容感覚を通して運動を教示できることにある．もし，この身体接触を通した教示が学習に効果があるならば，運動スキルの獲得（特に運動フォームや正確な運動の学習）において身体座標の探索空間を限定し，効率的な学習に繋がる可能性がある．しかしながら，このような身体接触による運動教示の効果を調べた研究はほとんどない.そのため自己受容感覚を通した教示は運動スキルの学習（特に運動フォームや正確な運動の学習）に効果があるのか，もし効果があるならば，脳はどのように情報処理し学習に利用しているのかということはまだ分かっていないのが現状である．この研究を難しくする一つの理由としては，他者からの受動的な運動教示の効果を検証するために，各関節において繰り返し同一軌道を教示できるシステムが必要不可欠であることがあげられる．本研究ではこの問題を解決するために，上肢外骨格ロボットを使用することによって，肘関節に運動軌道を正確に繰り返し教示し，受動的な運動教示による効果と自己受容感覚情報を脳がどのように学習に利用しているかを検討した.

3.1　はじめに

スポーツインストラクターやセラピスト（リハビリテーションなど）は学習者の身体を把持し，動かすことで，どのように身体を動かすかを教示することがある．この際，学習者は受動的な状態を維持し，自己受容感覚へ注意を向けて学習しようとする．このような身体接触を通した受動的なトレーニングは学習者が新しいスキルを習得したり，運動パフォーマンスを効率的に改善したりする一つの方法である．このトレーニング方法の利点は，指導者がターゲット関節の自己受容感覚の情報を直接的に学習者に教示することができる点である．自己受容感覚は関節角度や筋の緊張のような身体の状態を知覚する主要な感覚モダリティで(Tuthill and Azim 2018)，身体の動きの学習に寄与する(Beets et al. 2012; Darainy, Vahdat, and Ostry 2013; Vahdat, Darainy, and Ostry 2014; Lei, Bao, and Wang 2016; Ostry and Gribble 2016)．しかしながら，受動的な運動トレーニングによる運動パフォーマンスの改善に，自己受容感覚情報への注意がどの程度重要なのか，自己受容感覚によって脳

に伝達された情報をどのように運動の学習に利用しているのかは分かっていない．そこで，この章では学習者が自己受容感覚情報に注意を向け，どのように利用しているかを調べるために自己受容感覚の変化に着目し，もし学習者が運動パフォーマンスの改善に自己感覚情報を利用しているならば，注意が自己受容感覚情報に向き，結果的に自己受容感覚の正確さがトレーニング後に増加するという仮説を立てて検証した．また，自己受容感覚から得た情報を運動学習に利用するためには 2 つの戦略があると考えらえられる．一つは自己受容感覚から得た情報を視覚的な軌道に変換して保持・利用する方法，もう一つは自己受容感覚の情報として関節空間で記憶し，運動学習に利用する方法である．それゆえ，脳がどちらの戦略を用いて自己受容感覚情報を処理しているのかも同時に検証した．

この実験を行うために，手先位置を制御する end-effector robot の代わりに，外骨格ロボット（Exoskeleton robot)(Noda et al. 2014; Furukawa et al. 2017)を使用した．外骨格ロボットは使用者の上肢や下肢全体に配置したり，あるいは肘や足関節など特定の身体部位のみに配置することによって，直接的に使用者の姿勢（関節角度）を繰り返し正確に誘導することができる．それにより，使用者は望ましい運動の感覚状態をそれぞれの関節ごとに得ることができる．

先行研究(Wong et al. 2012)では，end-effector robot によって受動的にターゲット運動を行うセッションと実験参加者が能動的に自己の腕を動かすセッションを交互に繰り返すことで自己受容感覚のトレーニングが運動学習を改善することを報告している．特に能動的なセッションだけでトレーニングを行なったときと比較し，受動的な教示セッションを能動的な運動セッションと交互に実施したときでより学習パフォーマンスが高くなった．これらの報告は，運動学習を改善するために,自己受容感覚情報を積極的に使用していることを示唆している．しかしながら，受動的なトレーニングと能動的なトレーニングを交互に繰り返しているため，受動的なトレーニングの効果を能動的なトレーニングから分離することは難しい．それゆえ，本研究では受動的なトレーニングセッションと能動的なトレーニングセッションを交互に実施することなく，受動的なトレーニングの後に教示された運動を再現するようにした．

3.2 実験セットアップと実験手順

この研究では，肘関節の受動的なトレーニングの前後で 3 つの行動計測・評価を実施した．1）肘関節運動の再現の正確さ，2） 肘関節の自己受容感覚の鋭敏さ，3） 同じ関節を含む他のタイプの運動の学習パフォーマンス（ダーツパフォーマンス）の 3 つである．この 3 つの行動計測・評価によって，受動的な運動のトレーニング

効果，脳内における自己受容感覚情報の処理，自己受容感覚への注意効果を検討した.

3.2.1 実験参加者

実験参加者は年齢や疾患の自己受容感覚への影響を避けるために，20 代の健常者をリクルートした．また，肘関節の運動やダーツパフォーマンスへの利き手の効果をコントロールするために，右利きを対象とした．ダーツパフォーマンスの学習効果を調査するために，今までにダーツ経験が 3 回未満と報告したダーツ初心者を対象とした．実験参加者は 36 人の右利き（男性：24 人，女性：12 人，年齢 22-29 歳）で，視覚や神経疾患，筋骨格系の障害歴はなかった．36 人の実験参加者を fixed group（n = 18）と transfer group（n = 18）に分けた．それぞれのグループのサンプルサイズは受動的な運動学習（実験参加者のグループ：n = 11 or 12）(Wong et al. 2012)や自己受容感覚の学習(各グループ：n = 14）(Darainy, Vahdat, and Ostry 2013)の先行研究にしたがって決定した．実験参加者には実験開始前にインフォームドコンセントを行い，同意を得た上で実施した．本研究のすべての実験は，ATR 倫理委員会の承認を得て，ヘルシンキ宣言に基づいて実施した.

3.2.2 実験機器

3.2.2.1 上肢外骨格ロボット

本研究では上肢外骨格ロボット(Noda et al. 2014; Furukawa et al. 2017)を使用した．上肢外骨格ロボットのリンクの長さは肩関節から肘関節まで 0.265m，肘関節から手関節まで 0.26m で，肩関節の屈曲・伸展，肩関節の外転・内転，肘関節の屈曲・伸展，手関節の背屈・掌屈の 4 自由度である．本研究では，ターゲット軌道を教示する間，肩関節と手関節はピンで固定し，電動アクチュエータで肘関節のみ屈曲・伸展運動を行なった．実験参加者の腕はベルクロで外骨格ロボットに装着し，指の位置が変化しないように手のストラップを軽い力で握るように指示した．すべての試行において，外骨格ロボットは最初に実験参加者の腕をスタート位置に誘導するようプログラムした．スタートポジションに到達した後，4 秒後に実験参加者に運動開始の

合図を与え，実験参加者が 10 秒間の能動的な運動あるいは他動的な肘関節の曲げ伸ばしを経験した後に終了の合図を与えた.

3.2.2.2 筋電図（Electromyography：EMG）

ターゲット軌道の受動的な教示中と能動的な運動軌道の再現中の筋活動を測定するために筋電図（EMG）を測定した. EMG 信号は肘関節の主要な筋である上腕二頭筋と上腕三頭筋から取得した. Ag/AgCl 表面電極は皮膚の研磨後にそれぞれの筋腹に取り付けた.

3.2.2.3 ダーツ

本研究では，ハードダーツボードとスチールチップダーツ（Puma darts production Ltd.; https://www.shotdarts.com）を使用した. ダーツボードは国際ルールに従ってセットアップを行なった. ボードの中心は床上から 1.73m，そしてボードの表面はスローラインから 2.73m の距離になるように設置した.

3.2.3 実験手順

受動的な関節運動のトレーニングおよびその前後で行なった以下の 3 つの行動計測の実験手順について説明する.

1）肘関節運動の受動的な学習課題
2）肘関節の自己受容感覚課題
3）肘関節を含む別の運動課題の学習パフォーマンス（ダーツ）課題

3.2.3.1 肘関節運動の受動的な学習課題

肘関節のターゲット軌道を実験参加者に教示するために外骨格ロボットを使用した（Fig. 3.1A）. 腕をロボットスーツで囲むように装着できる外骨格ロボットシステムは，それぞれの関節に独立して力を適用し，腕の動きを構成することを可能にす

る．生成した運動軌道は Figure 3.1B のような 10 秒間の肘関節の屈曲-伸展運動で，すべての実験参加者と試行で一つの運動軌道を採用した．

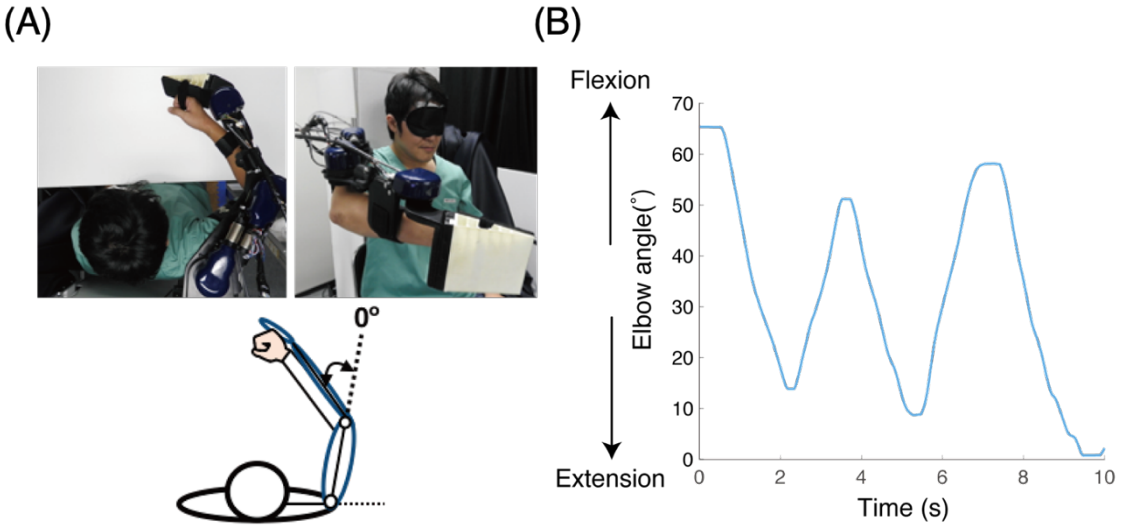


Figure 3.1. 実験セットアップ (A) とターゲットの運動軌道 (B). (A) 水平面上での肘関節の屈曲-伸展運動を受動的に教示する外骨格ロボットシステム．上の左の写真と下のイラストは実験システムを上から見た図．右の写真は外骨格ロボットを右前から見た図．写真は実験参加者が外骨格ロボットをどのように取り付けていたかを示すことを目的としているため，プライバシー保護の観点から著者が装着して撮影．(B) ターゲットの肘関節運動軌道．この軌道は実験者が自身の肘関節の屈曲-伸展を実際に行なって生成したもので，全ての実験参加者，試行で同じ軌道を使用した．

実験のメインパートは運動軌道の学習セッション（Trajectory learning session）である（Fig. 3.2A）．このセッションでは，実験参加者は視覚的な情報をアイマスクで遮断して実施した．最初にターゲットの軌道を教示するために，外骨格ロボットによって 5 回の運動軌道の教示試行（Short instruction）を行い，その後実験参加者は能動的にターゲットの運動軌道を再現した．この運動軌道の再現を実験参加者のベースラインパフォーマンスとし，5 回測定した（Pre-test）．次に外骨格ロボットによって 30 回の運動軌道の教示試行（Long instruction）を実施し，その後に 5 回の運動再現性テストを行なった（Post-test）．個人ごとの運動軌道の再現パフォーマンスの改善は pre-test から post-test を減算することで算出した．

実験参加者がキネマティックな情報を自己受容感覚空間（関節空間）で保持しているのか，視覚的なイメージとして運動を再構成しているのかを調べるために，Long instruction 中に学習した軌道の両手間転移を調査した．すべての実験参加者は（n = 36）において， Pre-test，Post-test 期間はともに右腕を使用して運動軌道を再現した（Fig 3.2A）．実験参加者の半分には Long instruction 期間中に運動軌道を右腕に教示し（Fixed Group: n = 18），実験参加者の残りの半分は教示が反対側に転移するのかを調べるために左腕に運動軌道を教示した（Transfer Group： n = 18）．とりわけ，左腕におけるターゲットの運動軌道は右腕の運動軌道を矢状面で反転させて教示に用いた．

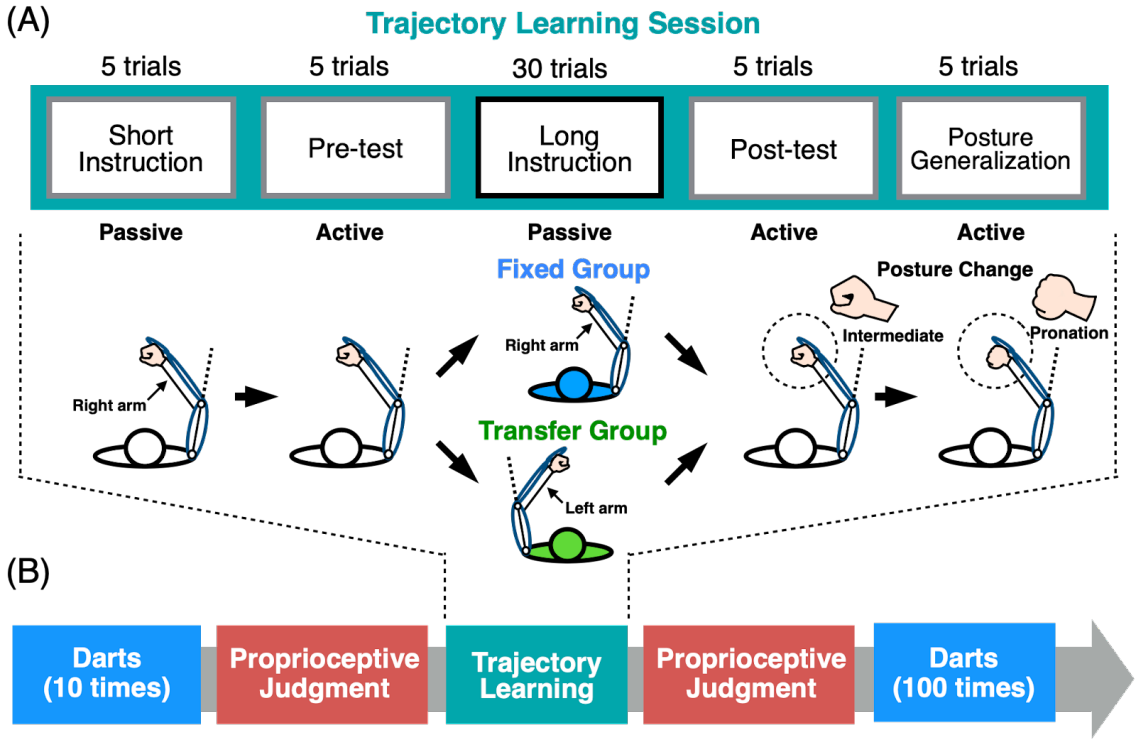


Figure 3.2. 実験手順. (A) 運動軌道の学習セッション．このセッションのメインパートは外骨格ロボットによって実験参加者にターゲットの運動軌道を 30 回教示する Long Instruction 期間と教示した運動軌道を実験参加者が再現する Post-test セッションである．反対の腕への教示が両手間で転移するかを調べるために，実験参加者は Fixed group（青）と Transfer group（緑）の 2 グループに分けた（下段）．教示が異なる手の姿勢に汎化するのかを調べるために，Posture generalization test を行なった（下段右）． (B) 全体の実験手順．自己受容感覚の鋭敏さの変化を調べるために，Trajectory Learning セッションの前後で Proprioceptive judgment セッションを実施した（赤ボックス）．さらに，自己受容感覚の鋭敏さ

の変化が同じ関節を含む他の運動に影響するのかを確認するために，実験の開始と終わりにダーツを測定した（シアンボックス）．

さらに実験参加者が右腕の手の姿勢を変化させたときにも右肘関節の学習効果が保持されているのかを調査した．Post-test セッションの後，Posture Generalization として，実験参加者は前腕を 90°回転することによって中間位から回内位に姿勢を変更し，運動軌道を5回再現した（Fig 3.2A 右）．

Short instruction 期間と Long instruction 期間において，実験参加者に受動的な状態，つまり筋収縮をしないようにリラックスした状態でいるように指示した．実験参加者がこの指示に従っていたかを確認するために，上腕二頭筋（肘関節屈曲の主動作筋）と上腕三頭筋（肘関節伸展の主動作筋）の筋電図（EMG: electromyography）を計測した．リラックスした状態でいるように指示した Long instruction 期間と能動的に運動軌道を再現したポストテスト期間中の運動軌道再現時の EMG を実験参加者で平均して比較した．

3.2.3.2 Proprioceptive Judgment 課題

運動軌道の学習セッションの前後で自己受容感覚の鋭敏さを測定した（Fig. 3.2B 赤ボックス）．このセッションでも実験参加者が視覚的に位置を特定しないようにアイマスクを使用して視覚を遮断した．このセッションは全部で 30 試行からなり，それぞれの試行の最初に，実験参加者の肘関節をベースラインの角度（angle = 0°: Fig. 3.3）に動かした．外骨格ロボットによって，実験参加者の右腕をベースライン角度から参照角度へ移動した．その際，参照角度は 15°，30°，45°，60°，75°からそれぞれの試行で擬似ランダムに選択した．実験参加者には力を抜いてリラックスした状態で参照角度を覚えるように教示した．その後，外骨格ロボットによって肘関節をベースラインへ戻し，次にテスト角度へ肘関節を曲げた．テスト角度は事前に教示した参照角度に対して 0°，± 1°，± 2°をそれぞれの試行で擬似ランダムに逸脱させた．実験参加者にはテスト角度が参照角度と比較して，「曲がった」，「同じ」，「伸びた」の 3 つの選択肢の中から言語的に回答させた．自己受容感覚の鋭敏さは，トータルの反応に対する正答反応数（正答率）として定義した（自己受容感覚の鋭敏さ ＝ 正答反応数/トータル反応数）．さらに，個人の自己受容感覚の鋭敏さの改善指標として，運動軌道学習後の計測セッションの自己受容感覚の正答率から運動軌道学習前の正答率を減算することによって算出した（自己受容感覚の鋭敏さの改善度 ＝ ポスト自己受容感覚の鋭敏さ － プレ自己受容感覚の鋭敏さ）．

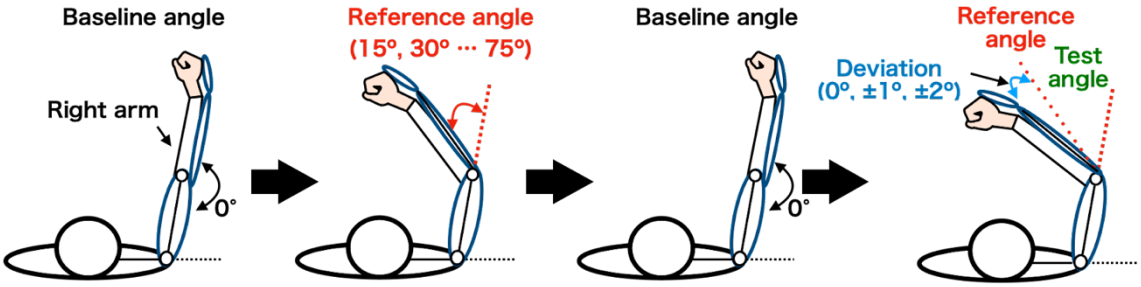


Figure 3.3. Proprioceptive judgement の実験手順. それぞれの試行の開始に，実験参加者は肘関節をベースライン角度（angle = 0°）へ伸展した．外骨格ロボットによって実験参加者の右肘関節をベースライン角度から参照角度へ曲げた．参照角度は 15°, 30°, 45°, 60°, 75° の中から擬似ランダムに選択した．その後，外骨格ロボットによって腕をベースライン角度に戻し，再び肘関節をテスト角度に曲げた．テスト角度は事前に教示した参照角度からわずかに角度を逸脱させた．この逸脱角度は，0°, ± 1°, ± 2 の中から擬似ランダムに選択した．実験参加者はテスト角度が参照角度と比較して，「曲がった」，「同じ」，「伸びた」の 3 肢から判断させた．

3.2.3.3 ダーツ

受動的な肘関節トレーニングの効果が同じ関節を含む他のタイプの運動パフォーマンスを改善するのかを調査するために，ダーツを実施した．実験参加者は,実験の最初と最後にダーツを実施した（Fig 3.2 シアンボックス）．実験参加者はダーツボードの中心を狙って右腕でスローイングした．ダーツのスローイングは事前に 10 回（Pre），事後に 100 回（Post）実施した．ダーツの誤差はダーツボードの中心からダーツの先までの距離として計測した．事後セッションのデータはそれぞれの実験参加者の事前セッションの平均と標準偏差を用いて z-スコアとして標準化した．事後セッションのダーツパフォーマンスが改善したかを調べるために学習ステージを 2 つに分けた．1 つは事後セッションの最初の半分（1st - 50th），もう一つは後半の半分（51st - 100th）で，それぞれの区間で標準化した誤差を平均してパフォーマンスの改善を調査した．

3.2.4 データ解析

3.2.4.1 筋電図（EMG）解析

EMG 信号はカットオフ周波数 10Hz のハイパスフィルター（4 次，バターワース）をかけて基線揺れを除去し，全波整流した．次にそれぞれのタイムポイントを中心に 100ms 窓の移動平均による二乗平均平方根（Root mean square：RMS）によってそれぞれの EMG 振幅をスケーリングすることで平滑化した．この処理の後，全ての能動的な運動軌道の再現条件（Pre-test，Post-test，Posture generalization-test）で生成される最大の EMG 振幅によって，それぞれのタイムポイントの振幅を徐算するこで筋電図波形を正規化した（% MVC：percentage maximum voluntary contraction）．それぞれの筋（上腕三頭筋，上腕二頭筋）において Post-test 期間中（能動的運動）の主動作筋の EMG を Long instruction 期間中（受動運動）と比較した．ターゲットの運動軌道に従って，屈曲と伸展期間を決定し，記録されたデータからそれぞれの期間の EMG を抽出した．屈曲期間中の主動作筋を上腕二頭筋，伸展期間中の主動作筋を上腕三頭筋として，主動作筋として使用しているときの筋活動を算出した．正規化した EMG 振幅を試行と実験参加者においてそれぞれの期間で平均した．

3.2.4.2 運動軌道パフォーマンス解析

肘関節の角度は外骨格ロボットのエンコーダーによって 250Hz で測定し，肘関節のターゲット軌道と再現した運動軌道の二乗平均平方根誤差（RMSE：root mean square error）を算出した．受動的に教示した運動軌道の学習を調査するために，それぞれのグループにおいて Pre-test と Post-test の誤差を対応のある t 検定で比較した．腕の姿勢の汎化を調べるために誤差はそれぞれの実験参加者ごとに 3 つの期間（Pre-test，Post-test，Posture generalization-test）のデータを z-スコアで標準化した．Fixed group の Pre-test と Posture generalization-test の誤差の比較，Post-test と Posture generalization-test の誤差の比較をするために対応のある t 検定を行なった．その後，Pre-test と比較して Post-test で誤差の平均値が減少せず（Pre-test の平均誤差 ≦ Post-test の平均誤差），学習効果がみられなかった実験参加者を Fixed-group から除外して残りの実験参加者で再解析した．

3.2.4.3 Proprioceptive Judgments パフォーマンス解析

Post-session の正答率から Pre-session の正答率を減算することによって，それぞれの実験参加者の自己受容感覚の鋭敏さの改善指標を算出した．自己受容感覚の改善の統計的な有意性を評価するために Pre-session と Post-session の正答率に対応のある t 検定を適用した．

3.2.4.4 ダーツパフォーマンス解析

本実験ではダーツ初心者の実験参加者をリクルートしたので，初期パフォーマンスは実験参加者間で大きく異なる．そのため，Post-session の誤差はそれぞれの実験参加者で Pre-session の平均と標準偏差を使用して z-スコアとして標準化した．Pre-session の誤差と Post-session の前半（1-50 試行目：early-stage improvement），後半（51-100 試行目：late-stage improvement）の誤差を比較するために対応のある t 検定を用いた．また，Fixed group と Transfer group 間の標準化した誤差に違いがあるかを調べるために 2 標本 t 検定を適用した．

3.3 結果：動的なトレーニングの学習への影響

3.3.1 筋電図（EMG）

Short instruction 期間と Long instruction 期間の間に，実験参加者が受動的な状態（リラックスして腕の筋収縮が生じていない状態）を維持していたかを確認するために EMG を計測し比較した．その結果，Long instruction 期間の振幅はポストテスト期間の振幅より有意に小さかった[上腕二頭筋; $t(17) = 5.64, p < 0.001$，上腕三頭筋; $t(17) = 3.23, p < 0.005$]．これらの結果は，実験参加者が Long instruction 期間中は受動的な状態であったことを示唆している（Fig. 3.4）．

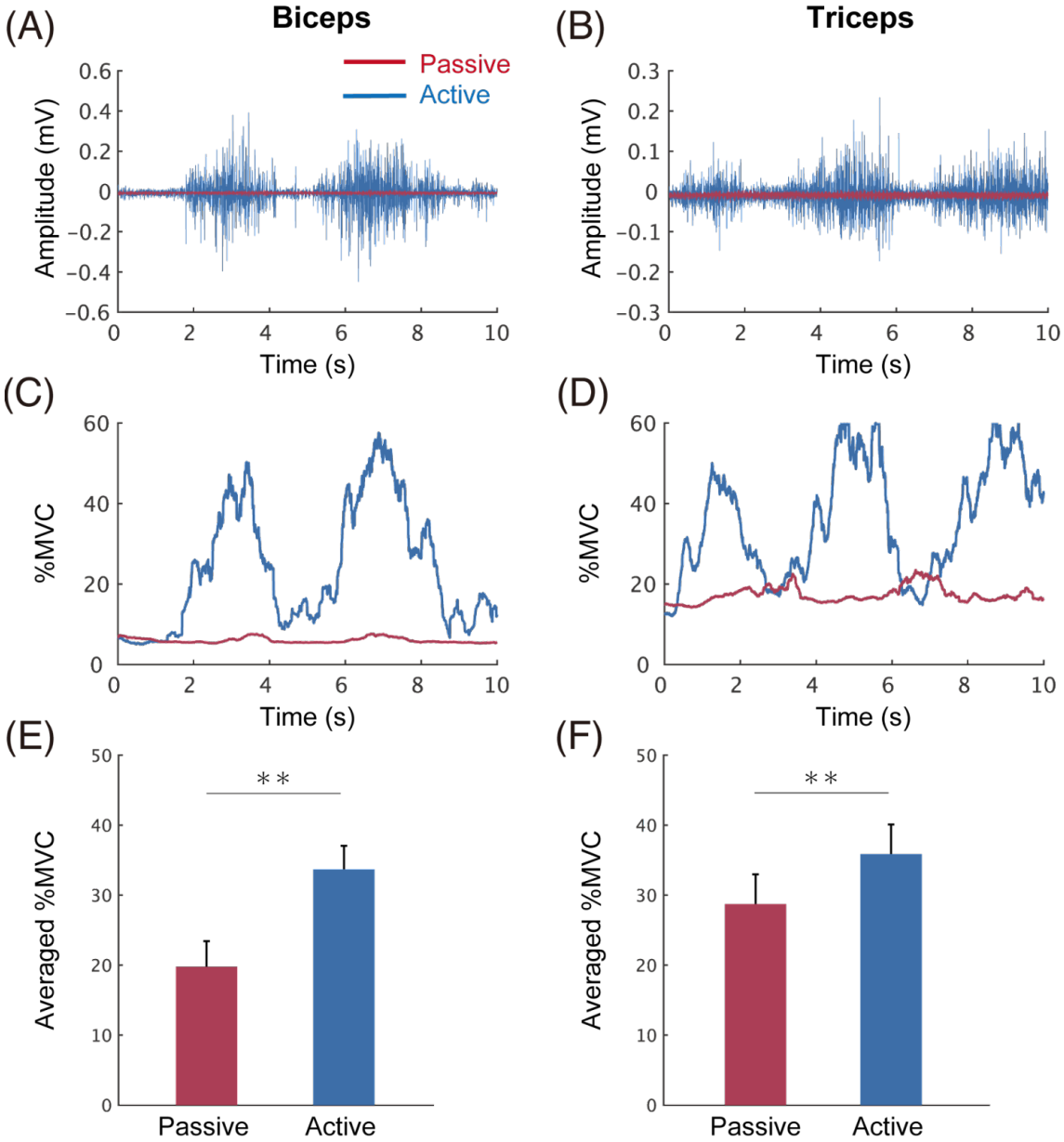


Figure 3.4. 受動的条件（赤）と能動的条件（青）の EMG の活動. 代表的な実験参加者の上腕二頭筋（A）と上腕三頭筋（B）の EMG 信号. 同じ実験参加者の上腕二頭筋（C）と上腕三頭筋（D） の EMG の活動レベル（%MVC）. Fixed group の実験参加者で平均した上腕二頭筋（E）と上腕三頭筋（F）の EMG 活動レベル. エラーバーは標準誤差を示している. ** $p < 0.01$.

3.3.2 運動軌道

Figure 3.5A に Fixed group の代表的な実験参加者が再現した Pre-test（赤）と Post-test（青）期間中の平均的な運動軌道を示した．運動軌道の再現性の誤差はターゲットの運動軌道と実験参加者が再現した運動軌道の二乗平均平方根誤差（RMSE：root mean square error）として算出した．運動軌道の再現パフォーマンスの改善度を調べるために Post-test 期間の誤差を Pre-test 期間の誤差から減算した．その結果，Fixed-group において Post-test で Pre-test よりも有意に誤差が減少した[a paired test: $t(17) = 3.139$, $p = 0.006$]．一方で，Transfer-group では有意な運動軌道誤差の変化は見られなかった[a paired test: $t(17) = 0.346$, $p = 0.734$]（Fig. 3.5B）これらの結果は，Long instruction による学習効果があること，外骨格ロボットによって左腕に与えられた運動教示は右腕に転移することが難しいことを示唆している．

次に，この学習効果が異なる腕の姿勢に汎化するのかを調査した．運動軌道を学習した Fixed group において，ベースラインの誤差の個人差を調整するために，それぞれの実験参加者で，3 つの期間（Pre-test，Post-test，Generalization-test）の誤差を標準化した．もし学習効果が異なる腕の姿勢に汎化するならば，Generalization-test 期間中の誤差は Pre-test よりも有意に減少するが，Post-test の誤差とは有意差がないと予測される．対象的に学習効果が汎化しないならば，Generalization-test 期間中の誤差は Pre-test の誤差と有意差がなく，Post-test と比較するとより大きな誤差になると考えられる．しかしながら，Generalization-test の誤差は Pre-test [a paired test: $t(17) = -1.47$, $p = 0.320$ Bonferroni corrected]，Post-test [a paired test: $t(17) = 1.76$, $p = 0.192$ Bonferroni corrected]と両期間ともに有意差がみられなかった（Fig. 3C）．そこで，Pre-test から Post-test で誤差が有意に減少しなかった実験参加者（非学習者，[Pre-test の平均誤差] ≦ [Post-test の平均誤差]）4 名を除外して，残りの実験参加者（$n = 14$）のデータを再解析した．その結果，Generalization 期間中の誤差は Pre-test の誤差よりも有意に小さかったが[$t(13) = -3.74$, $p = 0.005$ Bonferroni corrected]，Post-test 期間中の誤差とは有意な違いが認められなかった[$t(13) = 1.72$, $p = 0.220$ Bonferroni corrected]（Fig. 3D）．これらの結果は，実験参加者がターゲット軌道を一つの姿勢（中間位）で十分に学習するならば，トレーニング効果は，異なる姿勢（回内位）に汎化することを示唆している．

以後の分析では Fixed group から 4 人の非学習者を除外して実施した．

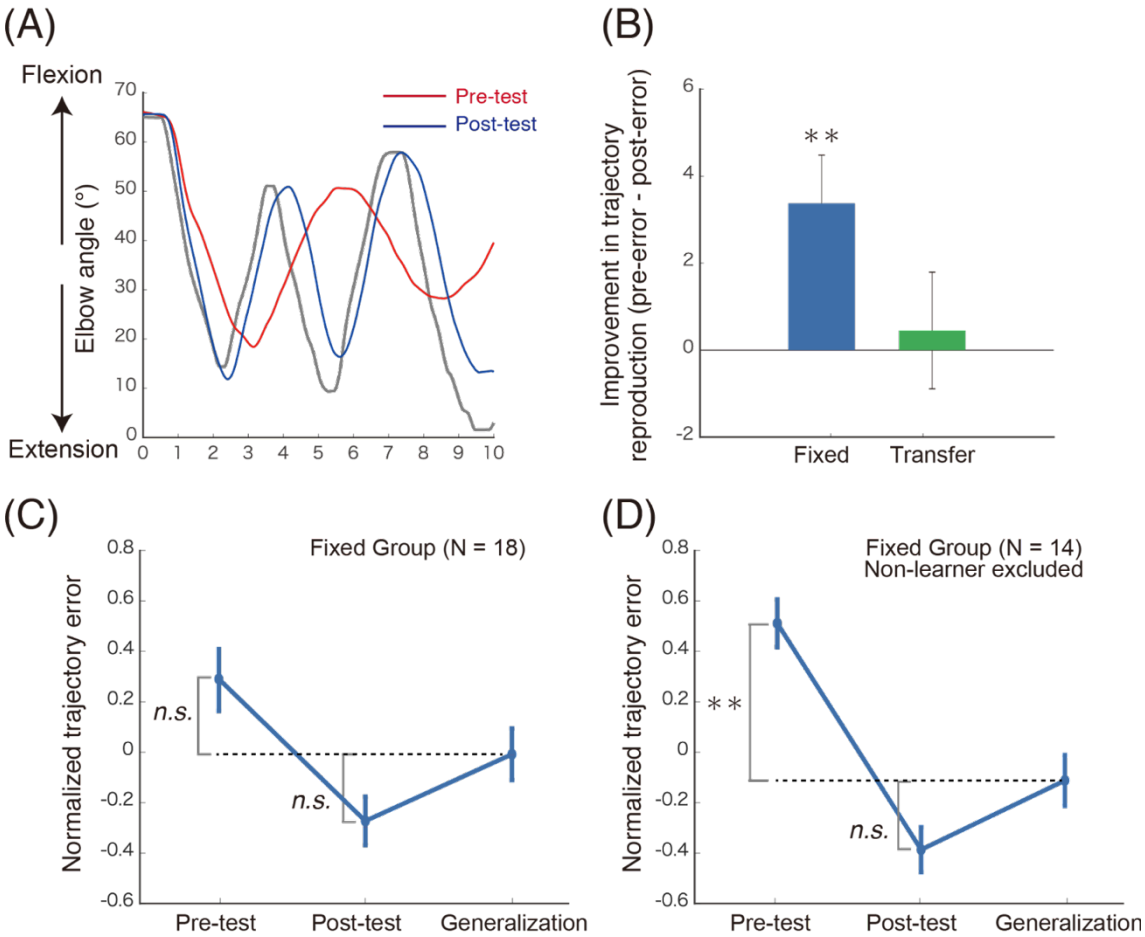


Figure 3.5. Trajectory learning session の結果. (A) ターゲットの肘関節運動軌道（灰色の軌跡）と代表的な実験参加者の再現軌道を示した. Pre-test 期間中（赤）と Post-test 期間中（青）でそれぞれ再現軌道を平均して示した. (B) 運動軌道の再現パフォーマンスの改善の指標は Pre-test 期間の誤差から Post-test の誤差を減算することによって算出した. Fixed group の誤差は Pre-test から Post-test で有意に減少した（青）が, Transfer group は有意な減少は認められなかった（緑）. (C) Fixed group の Pre-test と Post-test, 異なる手の姿勢に変化させた Generalization-test の運動軌道の再現誤差. (D) (C)で示したデータから学習が認められなかった 4 名の実験参加者を除外した運動軌道の誤差. エラーバーは標準誤差である. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$; n.s.: not significant.

3.3.3 Proprioceptive Judgment

Figure 3.6 に両群（Fixed and Transfer group）の自己受容感覚の改善を示した．その結果，自己受容感覚の改善指標は Fixed group で有意な改善を示した [a paired test: $t(13) = 3.92$, $p = 0.002$]．一方で，Transfer group では有意な改善が認められず，反対に減少した [a paired test: $t(17) = -2.60$, $p = 0.019$]．また，2 群間の差を調べると両群の間に有意差が認められた [two-sample t-test, $t(30) = 4.27$, $p < 0.001$]．これらの結果は，自己受容感覚は外骨格ロボットによって繰り返し教示を受けた後に改善したことを示し，その改善は教示された腕に限定されることを示唆している．つまり，受動的な教示による肘関節運動の学習は，関節角度の自己受容感覚の改善と関連している．

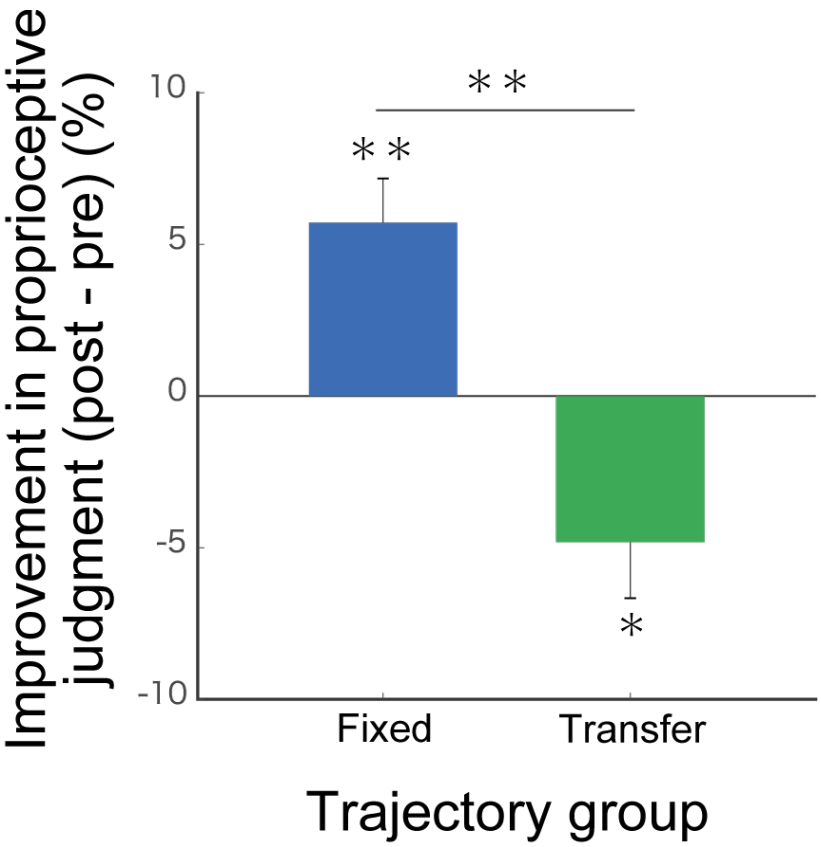


Figure 3.6.　自己受容感覚の鋭敏さの改善． Fixed group では有意な改善がみられた（青）が Transfer group では有意な改善はみられなかった（緑）． * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

3.3.4 ダーツ

受動的な肘関節のトレーニング効果が同じ関節を含む他のタイプの運動（ここでは，ダーツ）のパフォーマンスを促進するかを調査した．その結果，Fixed group では Early-stage（Fig 3.7B, left panel)で有意に改善したが [a paired test: $t(13) = -5.31$, $p < 0.001$]，transfer group では有意な改善は認められなかった [$t(17) = -1.21$, $p = 0.242$)]．一方で，Late-stage（Fig. 3.7B, right panel）では Fixed group [a paired test: $t(13) = -8.17$, $p < 0.001$]同様，Transfer group でも有意な改善を示した [$t(17) = -2.35$, $p = 0.031$]．また，Fixed group と Transfer group の改善度を比較すると Early-stage および Late-stage において，ともに Fixed group で有意な改善を示した (early-stage: $p = 0.004$; late-stage: $p = 0.004$).

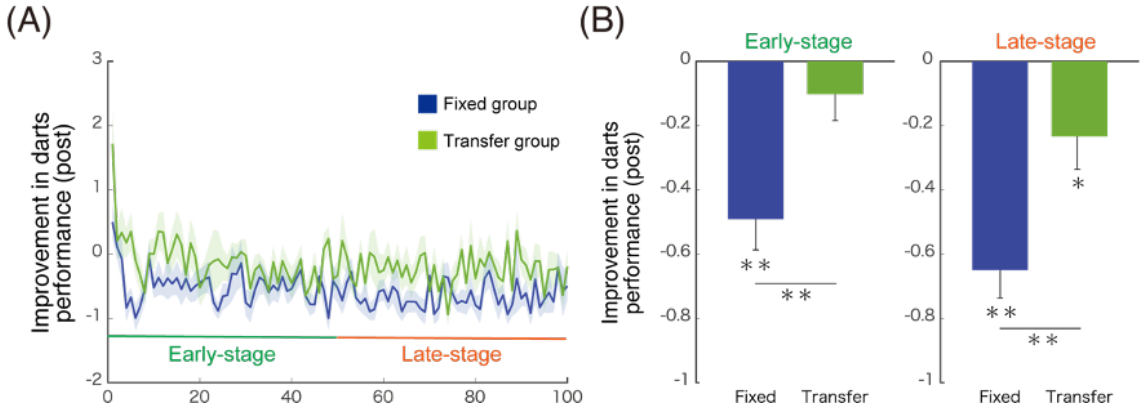


Figure 3.7. Generalization of elbow-joint training to darts performances. (A) Post-session のダーツパフォーマンスのデータは Pre-session の平均と標準偏差を用いて z スコアとして算出した．プロットは Fixed group（青）と Transfer group（緑）の実験参加者平均と標準誤差を示している． (B) ダーツパフォーマンスの前半の改善度を示す Early-stage improvement (Post-session の 1-50 試行目までの平均）と後半の改善度を示す Late-stage improvement (51-100 試行目までの平均）．Early-stage improvement は Fixed group のみで有意な改善が観測された．Late-stage improvement は Fixed group だけでなく，Transfer group でも有意な改善が認められた．さらに，Fixed group は Early stage，Late stage ともに，Transfer group よりも有意に改善した． * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

3. 4 考察

本研究ではどのように受動的なトレーニングが運動学習に寄与するのかを調査した．特に 1) 関節（この研究では右腕の肘関節）の受動的なトレーニング効果の両手間転移や異なる姿勢への汎化，2) 受動的なトレーニング後の自己受容感覚の変化，3) 自己受容感覚の鋭敏さの変化が他のタイプの運動パフォーマンスに与える影響を調査した．その結果，受動的なトレーニングは運動軌道の再現パフォーマンスと自己受容感覚の鋭敏さを改善した．運動軌道の学習パフォーマンスは同じ腕の異なる姿勢に汎化したが，反対の腕には転移しなかった．さらに，自己受容感覚の改善は同じ関節を含む他の運動タイプのパフォーマンス（この研究ではダーツ）も促進した．これらの発見は受動的なトレーニング中に関節空間でターゲット運動を表象し，自己受容感覚の使用度に応じて自己受容感覚が改善することを示唆している．

本研究では反対の腕の運動軌道の再現性に有意な改善は認められなかた（Fig. 3.5B：a transfer group）．この結果は実験参加者が自己受容感覚のような内在的な情報に基づいて学習し，表象していたことを示唆している．この結果は受動的なトレーニングによる自己受容感覚の改善とも一致している（Fig 3.6）．また，手の姿勢を変化させた場合においても運動軌道の再現性は汎化した（Fig 3.5D）．この結果は学習された運動軌道の表象は手の姿勢に独立であることを示唆している．

本研究において Transfer group の実験参加者は左の腕で Post-test を行わなかった．その理由は実験参加が右腕の Post-test の前に左腕で運動軌道を能動的に再現することが必要になるためである．能動的なトレーニングの効果は一方の腕から反対の腕へ転移することが知られている（intermanual transfer) (Imamizu, Uno, and Kawato 1998; Wang and Sainburg 2006; Morris et al. 2009; Taylor, Wojaczynski, and Ivry 2011; Green and Gabriel 2018). それゆえ，本研究では左の腕を使用した能動的な運動が Post-test における右腕のパフォーマンスに影響する可能性を避けるために，左腕を使用して運動軌道を再現する実験デザインにしなかった．左腕の学習パフォーマンスは右腕の肘関節の運動と有意な違いはないと考えられ，Transfer group と Fixed group の実験参加者は同程度の運動軌道の学習効果を有すると仮定した．

Fixed group において自己受容感覚の鋭敏さが改善した一方で，Transfer group では改善がみられず，反対に有意な低下を示した．この結果の理由は，受動的なトレーニングはトレーニングした関節の自己受容感覚情報への注意を必要としていることが考えられる．いくつかの先行研究では，特定の感覚モダリティへの注意はその感覚の感度や鋭敏さを強めることが報告されている(Pestilli and Carrasco 2005; Correa and Nobre 2008; Herrmann et al. 2010; Carrasco 2011; Anton-

Erxleben and Carrasco 2013; Johansen-Berg and Lloyd 2000; Spence and Gallace 2007). つまり，自己受容感覚への注意は感覚の鋭敏さを改善し，ターゲットの運動軌道の再現パフォーマンスに影響する可能性がある．この研究の結果は，ターゲット位置に繰り返しリーチング運動を行なった後，その位置に対する自己受容感覚の鋭敏さが改善したという先行研究(Bernardi, Darainy, and Ostry 2015)の結果とも一致している．本研究の自己受容感覚の判別課題では運動軌道に含まれる複数の位置で自己受容感覚の鋭敏さが変化するのかを調査した（Fig. 3.3）．この判別課題の結果は，受動的なトレーニングが特定の位置の自己受容感覚の鋭敏さを改善するだけでなく，トレーニングした運動軌道に含まれる位置においても改善することを示唆している．

特定の関節の受動的なトレーニングが他の運動タイプのパフォーマンスの学習に影響するのかを調査した．その結果，ダーツパフォーマンスの改善は Fixed group で Transfer group（Control）よりも有意に改善した（Fig. 3.7）．これらの結果は特定の関節への受動的なトレーニングはその自己受容感覚の鋭敏さを改善し，同じ関節を含むダーツパフォーマンスの学習を強めることを示唆している．さらに，初期パフォーマンスは Fixed group のみ有意な改善を示したが，Transfer group では認められなかった（Fig. 3.7B）．この結果は学習の初期ステージにおいて顕著な効果があることを示唆している．多くの研究は感覚情報の不確実性が運動学習や運動適応の学習率を低下させることを報告している(Izawa and Shadmehr 2008; Burge, Ernst, and Banks 2008; Wei and Körding 2010; He et al. 2016). 先行研究では高齢者において自己受容感覚の鋭敏さのばらつきと視覚運動回転への適応率の間に有意な相関があることを示した(Lei and Wang 2018). 本研究でも，受動的なトレーニング後の自己受容感覚の改善は肘関節の自己受容感覚情報の不確実性やばらつきを減少したと考えられ，結果として同じ関節を含むダーツのスローイングパフォーマンスの学習率を増加したと考えられる．

本研究では受動的なトレーニングがトレーニングした関節の自己受容感覚の鋭敏さと他のタイプの運動パフォーマンスの学習を改善した．この研究の発見は受動的なトレーニング中の自己受容感覚情報の役割や効率的なトレーニング方法の理解に寄与すると考えられる．本研究では，受動的なトレーニングの効果を単関節運動で調査した．しかしながら，身体接触に基づいた受動的な教示は複雑な多関節運動のトレーニング中に使用する．それゆえ，将来的には受動的なトレーニングの効果を多関節運動で調査する必要がある．また，異なる姿勢での自己受容感覚の鋭敏さの測定やダーツを投げる際の関節のばらつきを計測しなかった．それゆえ，他の運動タイプの学習パフォーマンスが改善したメカニズムを理解することは難しい．将来的には数理モデルの構築や更なる実験的研究を行うことで，自己受容感覚の鋭敏さの改善や他の運動タイプの学習パフォーマンスを促進するメカニズムの解明を行う必要があ

る．そのような研究は外骨格ロボットによる受動的なトレーニングのメカニズムの理解を助け，それはスポーツやリハビリテーションでのトレーニングデバイスの開発に繋がる．

第 4 章　受動的なトレーニング効果に対する自己受容感覚短期記憶の影響

この章では第 3 章の研究を拡張する．第 3 章の実験より，受動的なトレーニングでは自己受容感覚空間（関節空間）で情報を保持し，学習に用いていることが示唆された．また，自己受容感覚への注意が受動的なトレーニングによる運動軌道の学習（再現パフォーマンス）に寄与している可能性を示した．受動的な運動軌道のトレーニング効果は関節の空間パターンのみの学習（運動軌道のみの学習）と速度やタイミングなども含めた時空間パターンの学習への寄与が考えられる．しかしながら，第 3 章ではこの点に触れなかった．そこでこの章では受動的なトレーニングの効果を空間的側面と時空間的側面に分けて検討する．また，第 3 章の実験で示したように受動的なトレーニングでは教示された情報を自己受容感覚空間（関節空間）で表象すると考えられた．その基盤として，自己受容感覚への能動的な注意と，短期記憶として保持する機構が考えられる．そこでこの章では注意と自己受容感覚の短期記憶が運動軌道の学習と関連するのかを検討する．

4.1　はじめに

我々がダーツやテニス，ダンスのような運動スキルを学習するとき，運動を成功させるためには，どこに手があるのか，どれくらいの速度で動いたのかなど，適切に身体の状態を知覚し，目標を達成できる運動を探索する必要がある．そのためには，事前に実行した動きを記憶，保持し，その記憶をもとに運動を修正しながら試行錯誤を繰り返していく必要がある．

身体運動の探索では視覚情報は制限される．特に近位の関節運動や早い運動の中で，視覚的に複数の関節運動を追跡し，情報を保持しておくことは難しい．さらに，視覚情報を自己受容感覚と比較するためには座標変換が必要となり，非効率である．第3章の研究でも，自己受容感覚情報として情報を保持し学習に利用していること，視覚情報への変換という戦略を用いていないことが示唆された(Chiyohara et al. 2020)．そのため，自己受容感覚としての情報を一時的に保持する機構が存在し，学習や運動の意思決定（成功する運動を繰り返す，失敗した運動を避ける）に利

用していると考えられる．このような一時的に保持して学習に利用する自己受容感覚の記憶を本研究では自己受容感覚の短期記憶として定義する．

先行研究(Sidarta, van Vugt, and Ostry 2018)では，体性感覚（自己受容感覚）の記憶課題を実施し，その記憶が運動の強化学習に関与すること，報酬が与えられた運動軌道を優先的に記憶していることを報告している．このことから，自己受容感覚への記憶の存在が明らかになった．同様に視空間的な記憶容量の個人差が視覚回転変換の適応率や系列学習の学習率と関連していることも報告されている(Bo and Seidler 2009; Bo, Jennett, and Seidler 2011; Buszard et al. 2017; Wolpe et al. 2020; Christou et al. 2016; Trewartha et al. 2014)．このように記憶は様々な課題での関与が示唆され，運動学習の文脈でも重要な役割を果たすことが考えられる．さらに，能動的な感覚運動トレーニングによって感覚記憶の定着が生じることも報告されている(Cuppone, Semprini, and Konczak 2018)．これらのことは，能動的な運動トレーニングによって体性感覚（自己受容感覚）空間で内部モデルが形成されることを示唆している．しかしながら，これらの研究は能動的な運動とその学習に従って形成される感覚に焦点をあてており，受動的な関節運動トレーニングにおける運動軌道の形成が，個人の自己受容感覚の短期記憶容量に起因しているのかは十分に分かっていない．そこで本研究では，第 3 章で用いた受動的なトレーニング課題を使用し，受動的なトレーニングを繰り返すことによる学習効果が自己受容感覚容量の個人差と関連しているのかを調査した．本研究で用いた受動的なトレーニングは，自己受容感覚情報を短期的に保持し，次の試行の自己受容感覚情報との比較を繰り返し，運動軌道に従った自己受容感覚の感覚分布を形成していくと考えられる.さらに，本研究で用いた運動軌道は 10 秒間の時系列データであり，感覚情報は上書きされずに保持する必要がある．そのため，自己受容感覚の短期記憶能力が高く，以前の記憶を正確に保持できる実験参加者ほど運動軌道の学習効果が高いと仮説立てた．

また，短期記憶の情報と受動的なトレーニングによる運動軌道の教示は自己受容感覚から得られた情報である．感覚情報はノイジーであるため，感覚は統計的推論のもとで知覚されている(Knill and Pouget 2004)．そのため感覚知覚の推論は感覚の不確実性を推定することである（感覚の分散によって測定される）．この感覚の不確実性は短期記憶と関係していることが報告されている(Li et al. 2021)だけでなく，行動結果の不確実性に繋がることも報告されている．つまり自己受容感覚の不確実性（ばらつき）は運動軌道の推論を不確実にし，学習効果の低下や自己受容感覚の短期記憶にも影響する可能性が考えられる．また，注意機能は信号の精度を高める機能を有することが考えられており，感覚の不確実性を減少させ，受動的なトレーニングによって運動軌道の学習効果に影響する可能性がある．第 3 章の結果からも，受動的なトレーニングの効果に注意機能が関与することが考えられたが，直接的に注意機能との関連性は調べなかった．そこで，この章では自己受容感覚の不確実

性（ばらつき）が小さく，注意機能が高い実験参加者ほど，より運動軌道の学習効果が高いと仮説立て，自己受容感覚の不確実性や注意機能との関連も調べた．

このことを検証するために，第 3 章の実験をもとに本研究の実験をデザインした．本研究では，最初に自己受容感覚の短期記憶を測定し，次に自己受容感覚の不確実性（ばらつき）の測定，最後に受動的なトレーニングによる肘関節の運動軌道の学習効果を調べた．その結果，受動的な運動軌道のトレーニングは肘関節の空間パターンの学習に寄与し，自己受容感覚の短期記憶と相関が認められた．特に直近の記憶よりもより以前の運動感覚を記憶できた実験参加者ほど学習が促進された．一方で，肘関節の自己受容感覚の不確実性（ばらつき）は運動軌道の学習効果と相関は認められなかった．このことから，受動的なトレーニングによる運動軌道の学習には短期記憶が関係しており，一方で感覚の不確実性は運動軌道の学習効果との関係性が小さいことが示唆された．

4.2 実験セットアップと実験手順

この研究では，自己受容感覚の短期記憶と不確実性（ばらつき）が受動的な運動軌道の学習量に与える影響を調査することを目的とした．自己受容感覚の短期記憶課題として Proprioceptive short-term memory task を実施した．また，自己受容感覚の不確実性（ばらつき）の指標として Proprioceptive judgment を測定した．さらに，受動的なトレーニング効果は個人の注意機能で説明できるのか検討し，自己受容感覚の記憶と関連する要因を検討した．

4.2.1 実験参加者

本研究では認知機能（この研究では注意機能）と運動課題の関係性を調べるために，他の研究に参加し事前に認知機能バッテリー検査（the Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery）を受けたことがある実験参加者を対象とした．実験参加者は 21 人の健常者（男性：15 人，女性：6 人，年齢 19-38 歳）を本研究にリクルートした．肘関節の運動課題や自己受容感覚の利き手の効果をコントロールするために事前に右利きであるかを確認した．実験参加者には視覚や神経疾患，筋骨格系の障害歴があるものはいなかった．実験参加者には実験開始前にイ

ンフォームドコンセントを行い，同意を得た上で実施した．本研究のすべての実験は，ATR 倫理委員会の承認を得て，ヘルシンキ宣言に基づいて実施した．

4.2.2 実験機器

4.2.2.1 外骨格ロボット

本研究では第 3 章の実験同様に上肢外骨格ロボット(Noda et al. 2014; Furukawa et al. 2017)を使用した(第 3 章 Methods 参照)．本研究では，すべての運動課題（Proprioceptive short-term memory task，Proprioceptive judgment，受動的な運動トレーニング）の実施において，肩関節と手関節はピンで固定し，電動アクチュエータを PID 制御して肘関節のみ屈曲・伸展運動を行なった．実験参加者の腕はベルクロで外骨格ロボットに装着し，指の位置が変化しないように手のストラップを軽い力で握るように指示した．すべての運動課題，試行において，外骨格ロボットは最初に実験参加者の腕をスタート位置に誘導するようプログラムした．スタートポジションに到達した後，それぞれの実験課題に応じた形で動きを制御した．

4.2.3 実験手順

本研究では，受動的な関節運動軌道の学習課題の前に 1）肘関節の自己受容感覚の短期記憶（Short-term memory），2）肘関節の自己受容感覚の知覚能力（不確実性）を測定した．運動課題はすべての実験参加者において最初に肘関節の自己受容感覚の短期記憶，次に肘関節の自己受容感覚の知覚能力を測定し，最後に受動的な運動軌道学習を行なった．第 3 章の研究で，受動的な運動軌道の学習により自己受容感覚の鋭敏さが影響を受ける可能性を示した．そのため，自己受容感覚の変化や自己受容感覚の短期記憶への影響を避けるためにこの順序で実施した．本研究ではすべての実験において，実験参加者が視覚的に腕の位置を特定できないようにアイマスクを使用して視覚を遮断した．

4.2.3.1 自己受容感覚短期記憶課題（Proprioceptive short-term memory task）

最初に自己受容感覚の短期記憶を調べるために，自己受容感覚の短期記憶課題（Proprioceptive short-term memory task）を行なった．この課題は先行研究(Sidarta, van Vugt, and Ostry 2018)を参考に外骨格ロボットを用いた方法に変更・改良して実施した．自己受容感覚短期記憶課題の実験手順を Figure 4.1 に示した．このセッションは 1 ブロック 12 試行の実験を 5 ブロック行い合計 60 試行で構成した．1 試行の中で 3 つの記憶アイテム（肘関節位置）を連続に教示し，ビープ音が鳴った後にテストアイテムを与えた．実験参加者には力を抜いてリラックスした状態で記憶アイテムの肘関節角度を覚えるように教示した．実験参加者には 3 つの記憶アイテムの中にテストアイテムが「あった」，「なかった」の 2 値判別をさせ，「あった」と回答した場合には，テストアイテムがどのラグの記憶アイテム（Figure 4.1 記憶アイテム）と同じだったかを追加で回答させた．回答はすべて言語的に実施した．

それぞれの試行の最初に，外骨格ロボットによって実験参加者の右肘関節をベースラインの角度（angle = 0°）に動かした．その後，ベースライン角度から最初の記憶アイテムの角度に肘関節を曲げ，2000ms 保持した後にベースラインへ戻るようにした．この一連の流れを 3 回繰り返したあと，ビープ音を提示してテストアイテムを与えた．肘関節は 2000ms でそれぞれの位置への移動が完了し，到達位置で短時間保持した後に，ベースライン角度に肘関節を伸展した．ベースライン角度に肘関節を戻したあと，次のアイテムを与えるまでに 2000ms 間の遅延を挟んだ．

60 回の試行のうち 30 回はテストアイテムを記憶アイテムと同じとし，残りの半分は記憶アイテムから逸脱させた．各記憶アイテムの角度は 6 つの肘関節位置のインデックス i（i = 0, 1, 2, 3, 4, 5），逸脱角 j（j = -12, -10, -8, -6, -4, -2 , 2, 4, 6, 8, 10, 12 ）とし angle = $10i + 20 + j$, で角度を設定した．その結果，設定角度は 8°から 82°の範囲の角度となる．テストアイテムが記憶アイテムの中にある一致条件の場合，少なくとも 10°以上のズレが生じるように，設定した角度の中から 3 つの記憶アイテムの角度を擬似ランダムに決定し，テストアイテムはその 3 つの中から 1 つを選択した．テストアイテムの位置は，それぞれのラグ（Fig 4.1，記憶アイテム参照）で同じ回数となるように調整した（各ラグ 10 回ずつ）．一方で，テストアイテムが記憶アイテムの中にない不一致条件の場合，少なくとも 10°以上のズレが生じるように，設定した角度の中から 3 つの記憶アイテムと 1 つのテストアイテムの角度を擬似ランダムに決定した．それぞれの角度で 10°以上に設定したのは，自己受容感覚の知覚弁別課題とならないようにするためである．

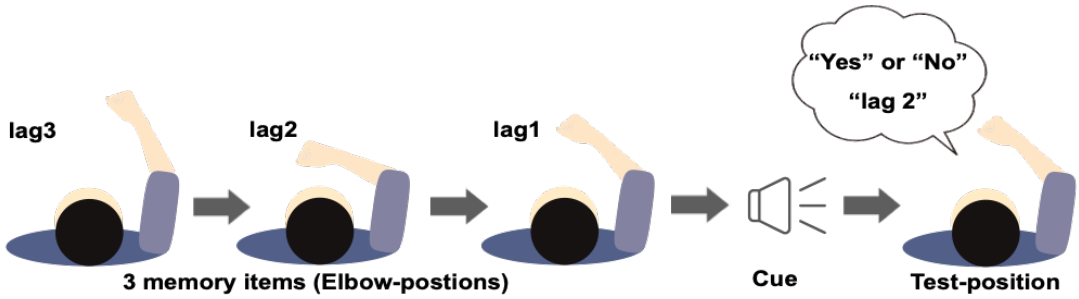


Figure 4.1. Proprioceptive working memory task. 外骨格ロボットによって肘関節を開始肢位（肘関節 0°）から記憶アイテムの位置へ曲げていく．2000ms 保持した後に開始肢位に肘関節を戻す．3 つの記憶アイテムの位置へロボットで繰り返し肘関節を曲げた後，テストを示すビープ音がなり，テスト位置へ肘関節を曲げた．実験参加者は，テスト位置が 3 つの記憶アイテムの中に存在したのかを「あった」あるいは「なかった」で回答した．さらに「あった」と回答した場合はどのラグの記憶アイテムと一致していたかをラグの番号で回答した．

4.2.3.2 Proprioceptive judgment 課題

実験参加者がどの程度の自己受容感覚の知覚能力（不確実性）を有しているのかを調べるために，自己受容感覚の短期記憶課題終了後に Proprioceptive judgement task を実施した（Fig 4.2）．この課題は第 3 章の手法を調整した．このセッションは全部で 80 試行からなり，それぞれの試行の最初に，実験参加者の肘関節をベースラインの角度（angle = 0°：Fig. 4.2）に動かした．外骨格ロボットによって，実験参加者の右腕をベースライン角度から参照角度へ移動した．その際，参照角度は 30°，50°とし，それぞれの試行で擬似ランダムに選択した．実験参加者には力を抜いてリラックスした状態で参照角度を覚えるように教示した．その後，外骨格ロボットによって肘関節をベースラインへ戻し，次にテスト角度へ肘関節を曲げた．テスト角度は事前に教示した参照角度に対して± 2°，± 4°，　± 6°，± 8°　をそれぞれの試行で擬似ランダムに逸脱させた．本研究では 2 肢強制選択（2AFC：Two-alternative forced choice）とし実験参加者にはテスト角度が参照角度と比較して，「曲がった」，「伸びた」の 2 肢の中から言語的に回答させた．

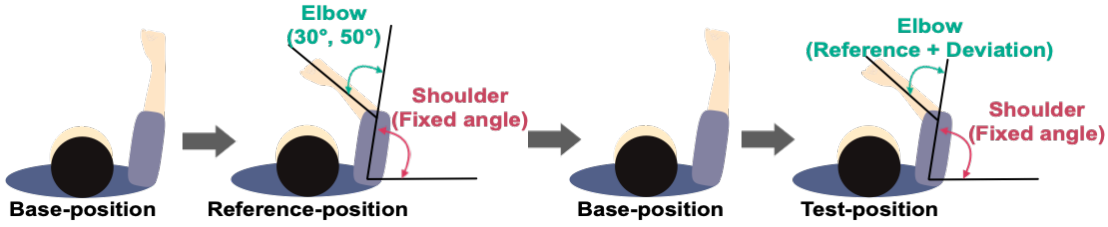


Figure 4.2. Proprioceptive Judgment Task. 試行の開始に外骨格ロボットによって肘関節をベースライン角度に伸展した（angle = 0°）．その後，右肘の肘関節をベースライン角度から参照角度へ肘関節を曲げた．参照角度は 30°あるいは 50°から擬似ランダムに選択した．その後，ベースラインへ肘関節を戻し，テスト位置へ再度肘関節を曲げた．テスト角度は±2°，± 4°，± 6°，±8°の中から擬似ランダムに選択し参照角度から逸脱させて教示した．実験参加者はテスト角度が参照角度と比較して「曲がった（屈曲）」あるいは「伸びた（伸展）」の 2 つの選択肢の中から回答した（2 肢強制選択）．

4.2.3.3 受動的な運動軌道学習課題

受動的な運動軌道の学習課題は第 3 章の学習課題と類似した課題を使用した（Fig 4.3）．最初にターゲットの軌道を教示するために，外骨格ロボットによって 5 回の運動軌道教示試行（Short instruction）を行なった．その後，実験参加者は能動的にターゲットの運動軌道を再現し，それぞれの実験参加者のベースラインの再現パフォーマンスを 5 回測定した（Pre-test）．次に外骨格ロボットによって 30 回の受動的な運動軌道のトレーニング試行（Long instruction）を実施し，その後に 5 回の運動軌道の再現性テストを行なった（Post-test）．学習の難易度を合わせるために，運動軌道は Figure 4.3 に示した軌道をすべての実験参加者に使用した．この運動軌道は実験者が生成した運動軌道に基づいており，速度も時事刻々と変化する軌道であるため，肘関節の空間的なパターンだけでなく運動タイミングやスピードの学習も必要となる．

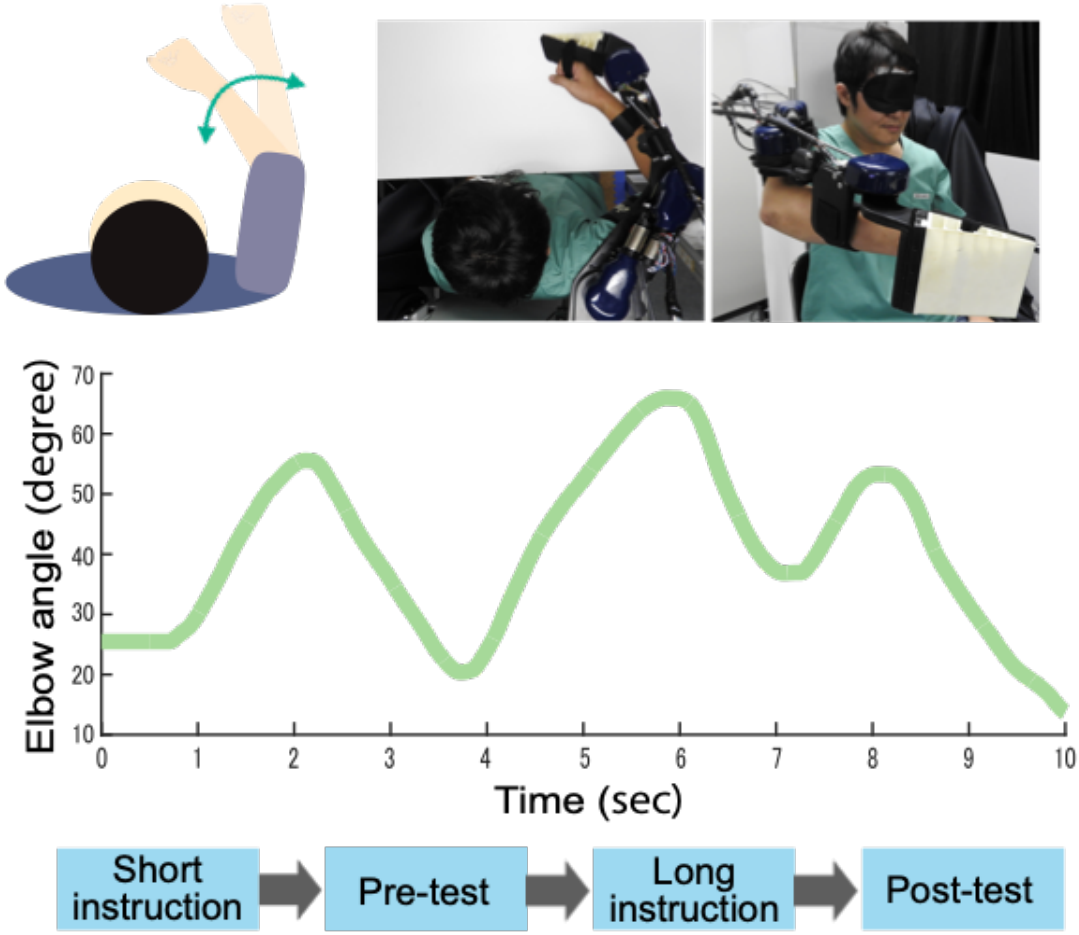


Figure 4.3. 受動的なトレーニングによる運動軌道の学習課題. 水平面上での肘関節の屈曲-伸展運動（左上イラスト）を受動的に教示する外骨格ロボットシステム（上写真）を使用した．左上の写真は実験システムを上から見た図，右上の写真は外骨格ロボットを右前から見た図を示した．真ん中の図は肘関節のターゲット軌道．この軌道は実験者が自身の肘関節の屈曲-伸展を実際に行なって生成したもので，すべての実験参加者，試行で同じ軌道を使用した．下の図は受動的な運動軌道の流れを示している．運動軌道の学習課題では，最初に Short instruction として 5 回実験参加者に運動軌道を受動的に教示し，その後，教示された運動軌道を 5 回再現した（Pre-test）．次に Long instruction として受動的な運動軌道を 30 回教示した後，5 回運動軌道を再現した（Post-test）．

4.2.3.4 認知機能パフォーマンス（CANTAB）

本研究では，事前に認知機能のテストバッテリーである Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery（CANTAB）(Robbins et al. 1994)のデータを取得した実験参加者をリクルートした．CANTAB は認知機能を正確に測定でき，パフォーマンスレベルを定量化できるため，臨床研究(Foltynie et al. 2004; Levaux et al. 2007; Cabeça et al. 2018)や健常者の認知機能検査(Lenehan et al. 2016; De Luca et al. 2003)として多くの研究で利用されている．CANTAB では複数の課題と指標を組み合わせて測定する．本研究で取得した運動課題のパフォーマンス（自己受容感覚の短期記憶や自己受容感覚の知覚能力（不確実性），受動的なトレーニングの効果）と注意機能の関係を調査するために，事前に取得された CANTAB データの中から，持続性注意の指標(Gau and Huang 2014; X. Yang et al. 2015)として，Rapid Visual Information Processing（RVP）を用いて検討した．この課題は擬似ランダムに与えられる数字の間に出現するターゲットの数字系列に対して反応する．本研究では Median latency を測定変数として利用した．Median latency は持続性注意の指標である反応潜時であり，実験参加者が正確な反応をしたときの反応潜時の中央値である．測定課題の詳細は以下の URL を確認してほしい．http://www.cambridgecognition.com/cantab/cognitive-tests/.

4.2.4 データ解析

4.2.4.1 自己受容感覚短期記憶パフォーマンス解析

自己受容感覚の短期記憶は 3 つの記憶アイテム（肘関節角度）の中に，テストアイテムが「あった」，「なかった」の 2 値判別を行なった．信号の有無に対する応答パターンから，ヒット，ミス，誤警報，正棄却を算出しこれらの値をもとに，(ヒット数 ＋ 正棄却数) / 試行数として正答率を算出した．次に，それぞれのラグ（Fig 4.1，記憶アイテム参照） ごとの刺激に対して，ヒット数/（ヒット数 ＋ ミス数）によって感度を算出した．さらに，実験参加者には 3 つの記憶アイテム（肘関節角度）の中に，テストアイテムが「あった」と回答した場合に限って，階層的にどのラグにテストアイテムがあったかを回答させた．これは「なかった」，「ラグ 1」，「ラグ 2」,「ラグ 3」の 4 つの回答の中から 1 つを選択する 4 値判別と同意である．この回答を 4 値判別として捉えた場合，なし条件と各ラグで試行数が不均衡となるため，それぞれの選択肢の試行数（そ

れぞれ 30 試行，10 試行，10 試行，10 試行）の逆数で重み付けして応答パターン（ヒット，ミス，誤警報，正棄却）を調整した．テストアイテムが記憶アイテムのそれぞれのラグ（ラグ 1，ラグ 2，ラグ 3）にあったときに，実験参加者が回答したラグが正解した確率を各ラグの感度として算出した．また，実験参加者がそれぞれのラグを回答した場合に，そのラグが正解だった確率を算出し精度とした．

4.2.4.2 Proprioceptive Judgment パフォーマンス

本研究では 2 肢強制選択法を用いて実験を行なった．「曲がった」の反応の得られた確率（反応数 / 試行数）を参照角度からのズレである逸脱角度（angle = ± 8, ± 6, ± 4, ± 2°）の関数として心理測定関数（psychometric function）を算出した．個人ごとに心理測定関数を算出して，累積分布関数をフィッティングし，正規累積分布関数のパラメータである平均 μ と標準偏差 σ を算出した．パラメータ μ は知覚確率 50%の点に相当し，実験参加者の知覚が屈曲方向あるいは伸展方向に偏りがないかを表すバイアスの指標である．一方で，パラメータ σ は知覚の不確実性（ばらつき）を表す指標であり，本研究ではパラメータ σ を知覚能力の評価指標として使用した．

4.2.4.3 運動軌道のパフォーマンス解析

肘関節の角度は外骨格ロボットのエンコーダーによって 250Hz で測定し，運動軌道の再現性は 1）二乗平均平方根誤差（RMSE：root mean square error），2）相互相関係数によって定量化した．RMSE はターゲットの運動軌道と実験参加者が再現した運動軌道の間で算出した．一方，相互相関係数はターゲットの運動軌道と再現した運動軌道の相互相関関数を個人ごとに算出し，ピークを持つ時点での相関係数として算出した．RMSE は空間パターンが類似していたとしても時間的にズレが生じると誤差が大きくなる．そのため，本研究では RMSE を肘関節の運動速度やタイミング（時間）を含めた時空間パターンの指標とした．一方で，相互相関係数はターゲット軌道と再現した軌道の時系列信号の類似度を評価する指標である．つまり，空間的に類似した運動軌道を生成していた場合に高い相関値を示すため，軌道の空間的類似性を評価した空間的パターンの指標とした．個人ごとの運動軌道の再現パフォーマンスの改善は RMSE では pre-test から post-test を減算，相互相関係数では Post-test から Pre-test を減算することで算出した．つまり，どちらの指標も 0 以上であれば改善を示す指標とした．

4.3　結果

ここでは，まず初めに第 3 章と類似した課題である受動的な運動軌道トレーニングの学習効果を確認する．その後で自己受容感覚の短期記憶課題，Proprioceptive Judgment による自己受容感覚の不確実性（ばらつき）の結果を報告し，両者の影響を検討する．最後に CANTAB で測定した注意機能が運動軌道の学習や自己受容感覚の短期記憶，不確実性（ばらつき）と関連するのか検討する．

4.3.1　受動的な運動軌道の学習効果

Figure 4.4 に Pre と Post の実験参加者の平均運動軌道を示した．第 3 章の結果同様に，Post（赤）では Pre（青）と比較して，明らかに運動軌道の再現性の改善を示した．また，Figure 4.4 の下パネルに各試行の再現軌道を示した．Pre-test では再現した軌道はターゲット軌道から軌道の形状やタイミングが大幅にズレていたが，Post-test では軌道の形状，タイミングともに類似していた．特に 5 試行目は 1 試行目よりもより軌道が精緻された．

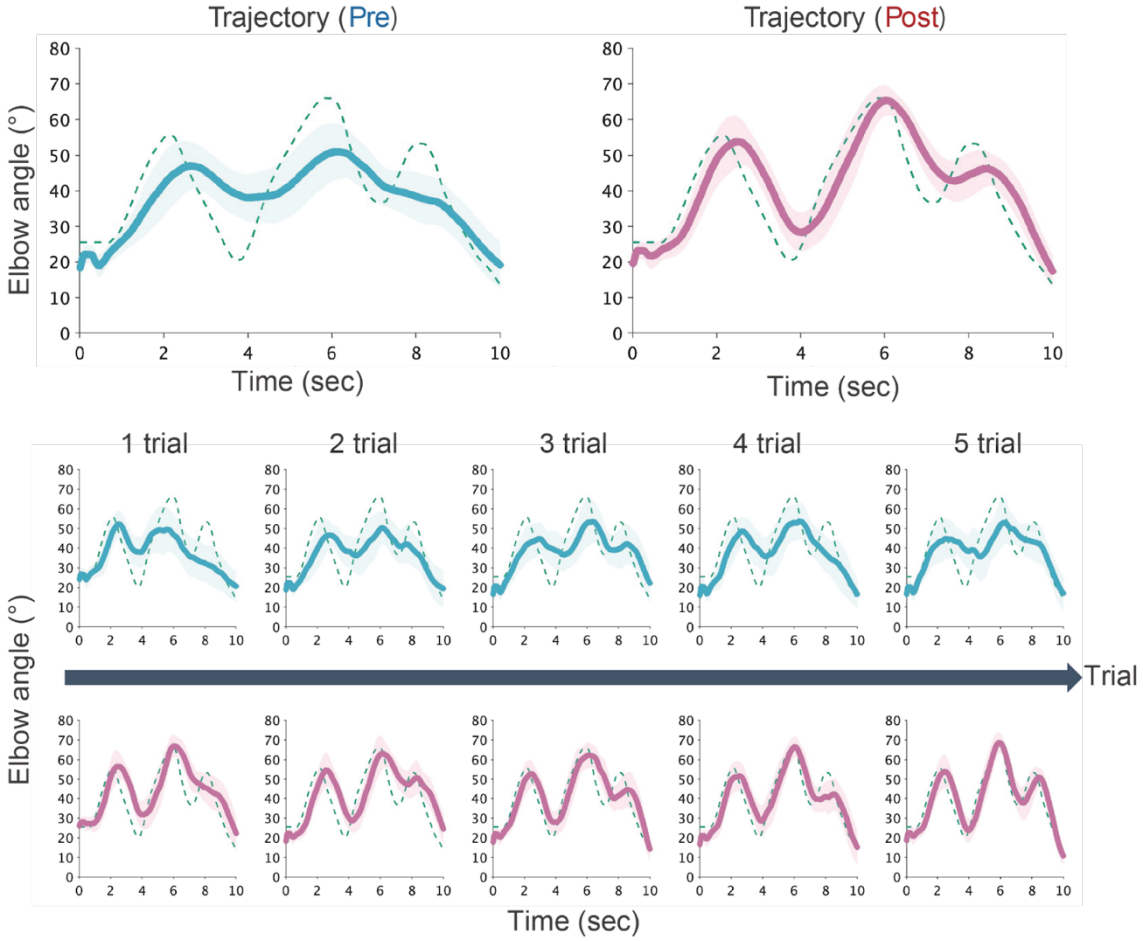


Figure 4.4. 実験参加者の再現運動軌道の平均. 上の図は肘関節の Pre-test と Post-test の 10 秒間の再現軌道. 実験参加者, 試行で平均した値を示した. 下の図は Pre-test と Post-test の各試行を実験参加者で平均した軌道. 緑の点線はターゲット軌道. 薄い色は標準誤差.

このことを定量的に示すために, 1)RMSE, 2)相互相関係数を算出した(4.2.4.3 運動軌道のパフォーマンス解析参照). 運動軌道の再現パフォーマンスの改善度を調べるために RMSE では Post-test 期間の誤差を Pre-test 期間の誤差から減算, 相互相関係数では Pre-test 期間の相関係数を Post-test 期間の相関係数から減算した. その結果, RMSE では Post-test で Pre-test よりも有意に誤差が減少[a paired test: $t(20) = 3.713$, $p = 0.001$] し, 相互相関係数では Pre-test と比較して Post-test で有意に高い相関値を示した[a paired test: $t(20) = 5.715$, $p < 0.001$] (Fig. 4.5). これらの結果は,外骨格ロボットによる Long instruction の学習効果を示唆しており,

第 3 章の結果の再現性が確認できた．また，本研究では第 3 章で用いた RMSE の指標に加えて相互相関係数を算出し，時空間パターンの指標（RMSE）と空間的パターンのみの指標（相互相関係数）を分けて比較した．これらの結果は，受動的な運動トレーニングは時間的，空間的パターンの学習効果があったことも示唆している．

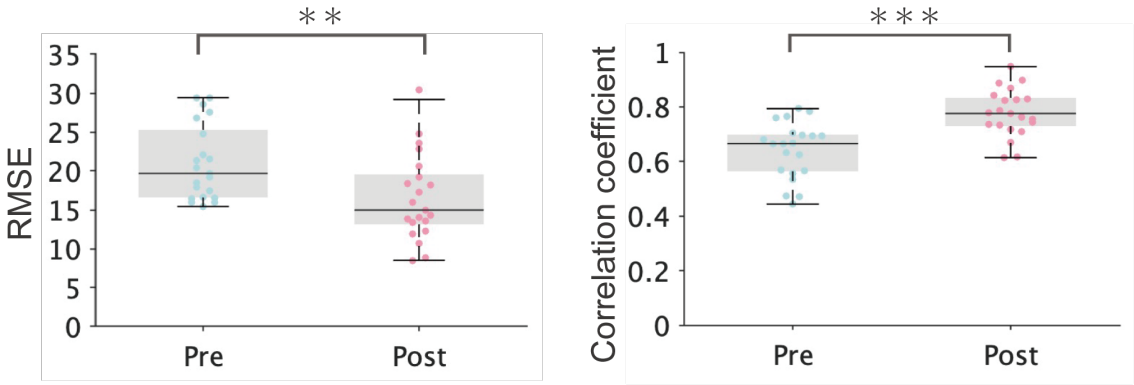


Figure 4.5. 肘関節の運動軌道の再現性の定量的指標．左側は RMSE，右側は相互相関係数によって算出した指標．RMSE は肘関節の屈曲-伸展の運動タイミング（時間的要素）を含む時空間パターンの指標，相互相関係数は運動タイミングを無視した運動軌道の空間的パターンの指標とした．＊＊＊ < 0.001，＊＊ < 0.01，＊ < 0.05.

次に，受動的な運動軌道の教示による効果を確認するために，Pre-test, Post-test の試行ごとの 1）RMSE，2）相互相関係数を Figure 4.6A に示した．RMSE は Post-test で試行を経るごとに誤差が減少，一方で相互相関係数には試行による変化はみられなかった．このことを定量的に確認するために，Pre-test，Post-test の 1 試行目と 5 試行目をそれぞれ比較した．その結果，RMSE は Pre-test では 1 試行目と 5 試行目に有意差はみられなかったが[a paired test: $t(20) = -0.380$, $p = 0.708$]，Post-test では 5 試行目が 1 試行目より有意に誤差が減少[a paired test: $t(20) = 2.420$, $p = 0.025$] した．一方で相互相関係数は Post-test では 1 試行目と 5 試行目で有意な相関値の増加はみられなかったが[a paired test: $t(20) = 2.116$, $p = 0.131$]，Pre-test で有意な違いがみられた[a paired test: $t(20) = 2.513$, $p = 0.021$]．これらの結果は受動的な運動教示での Long-instruction の効果が時空間的指標（RMSE）と空間的指標（相互相関係数）で異なることを示唆している．つまり，受動的

な運動軌道の教示では関節角度（動きの空間パターン）をターゲット軌道に収束させるが，タイミングや速度を含む関節運動の時空間パターンは能動的な運動軌道によって改善が促進されることが示唆された.

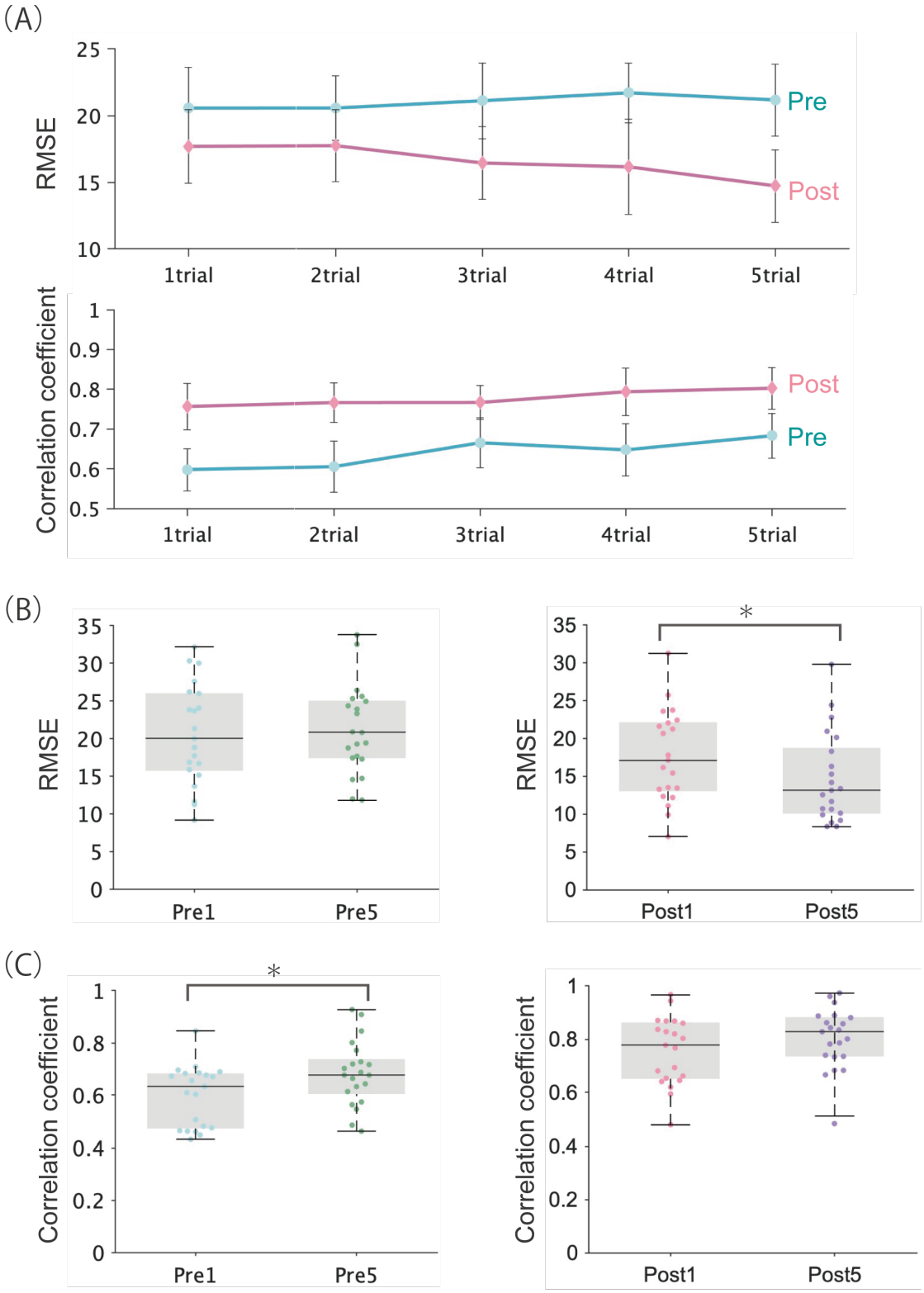

(A)
RMSE
25
20
15
10
Pre
Post
1trial
2trial
3trial
4trial
5trial
Correlation coefficient
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
Post
Pre
1trial
2trial
3trial
4trial
5trial
(B)
RMSE
35
30
25
20
15
10
5
0
Pre1
Pre5
*
RMSE
35
30
25
20
15
10
5
0
Post1
Post5
(C)
Correlation coefficient
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
*
Pre1
Pre5
Correlation coefficient
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Post1
Post5

Figure 4.6. 試行ごとの肘関節の運動軌道の再現性の定量的指標. (A)RMSE(上)と相互相関係数(下)の各試行の実験参加者間平均. エラーバーは標準誤差を示している. (B) RMSE の Pre-test(左)と Post-test(右)の 1 試行目と 5 試行目のボックスプロット. (C)相互相関係数の Pre-test(左)と Post-test(右)の 1 試行目と 5 試行目のボックスプロット. RMSE(空間的・時間的要素)は Post-test の能動的な運動軌道の再現時に改善を示したが, 相互相関係数(空間的要素)は Post-test では変化なし. ＊ < 0.05.

4.3.2 自己受容感覚短期記憶パフォーマンス課題

自己受容感覚の短期記憶が受動的な運動教示による運動軌道の学習と関連しているのかを調べるために, 外骨格ロボットによる短期記憶課題を作成した(実験方法参照). この課題では, 実験参加者に事前に教示した 3 つの記憶アイテム(肘関節角度)の中にテストアイテムが「あった」, 「なかった」を回答する 2 肢強制選択を行った. その後「あった」と回答した場合は, テストアイテムはどのラグの記憶アイテムと同じだったのかを回答した.

自己受容感覚の短期記憶では, ラグ 1, ラグ 2, ラグ 3 それぞれに回答があったときに「あった」と回答した感度を算出した(Fig 4.8A). その結果, どのラグにおいても感度に有意な違いは認められなかった[$F(3,60) = 2.358$, $p = 0.103$]. 次に, ラグの判別とテストアイテムが記憶アイテムになかったとき(なし条件)の 4 値判別を行なった. 4 値判別とした場合, 各ラグとなし条件で試行数が不均衡となるためデータを試行数の逆数で重み付けを行い感度と精度を算出した. 感度は各ラグにテストアイテムがあった場合に, 各ラグを正確に回答できる指標である. 一方で, 精度は各ラグの予測(実験参加者の回答)に対し, 実際にそのラグが正解であった割合を表す指標である. Figure 4.8B, C に感度と精度の指標を示した. その結果, 感度, 精度ともにラグが大きくなるに連れて有意にパフォーマンスが低下した[$F(3,60) = 3.763$, $p = 0.029$, $F(3,60) = 9.17$, $p < 0.001$]. 多重比較の結果, 感度ではラグ 1 とラグ 3 で有意な違いが認められた($p = 0.023$). 精度ではラグ 1 とラグ 2($p = 0.007$), ラグ 1 とラグ 3($p < 0.001$)で有意な違いがみられた. つまり, ラグの関数として短期記憶のパフォーマンスが減少することが分かった. これらの結果は, 自己受容感覚においては「あった」, 「なかった」といった単純な反応は時間的な要因は少なく, 容易に記憶保持できるが, 記憶負荷のかかる運動情報はより直近に経験した運動ほど正確に覚えていることを示唆している.

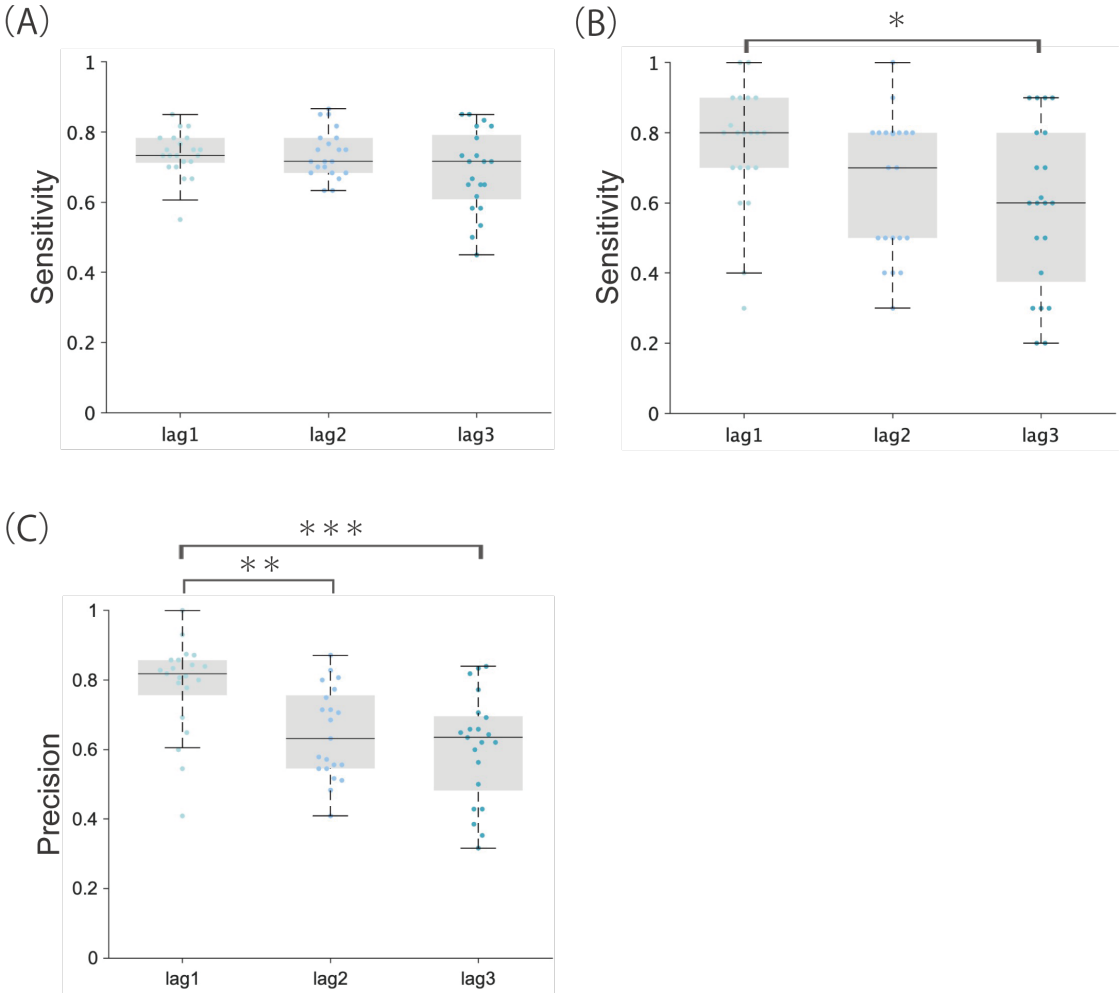


Figure 4.7. 自己受容感覚ワーキングメモリーパフォーマンスのボックスプロット. (A) テストアイテムと同じ記憶アイテムがそれぞれのラグに存在するときの 2 肢強制選択(「あり」,「なし」)の正答率(感度). (B) テストアイテムと同じ記憶アイテムがそれぞれのラグに存在するときの 4 値判別(「なし」,「lag1」,「lag2」,「lag3」)の正答率(感度). (C) テストアイテムがどのラグにあったかを回答したときの正答率(精度). 4 値判別として精度を算出. それぞれのドットは実験参加者を表す. ＊＊＊ < 0.001, ＊＊ < 0.01, ＊ < 0.05.

4.3.3 Proprioceptive Judgment パフォーマンス

自己受容感覚の不確実性（ばらつき）が自己受容感覚の短期記憶や受動的な運動軌道のトレーニング効果に関連しているのかを検討するために Proprioceptive judgment を行なった．各実験参加者の自己受容感覚の知覚能力の算出のために心理物理曲線を実験参加者ごとに算出した（Fig 4.8）．心理物理曲線のフィッティングは累積分布関数で行い，パラメータ（μ：平均，σ：標準偏差）を算出した．ここでパラメータ μ は肘関節の自己受容感覚のバイアスの指標，σ は自己受容感覚の不確実性（ばらつき）の指標である．

その結果，パラメータ μ は 0.726°（SD = 1.25）であり，0 からの有意差は認められなかった．これは肘関節の自己受容感覚にバイアスがなかったことを示唆している．

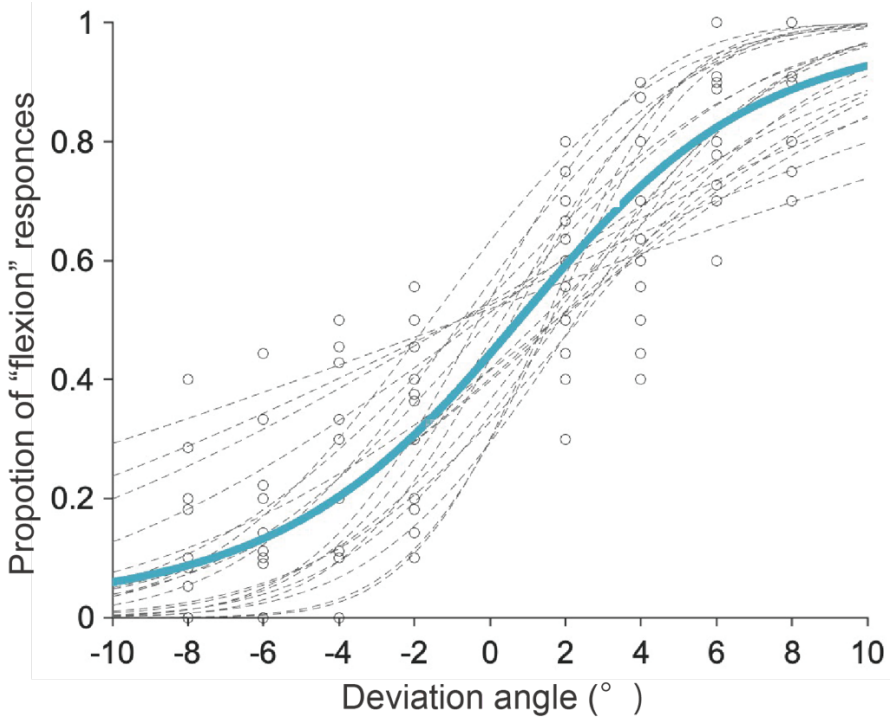


Figure 4.8. Proprioceptive judgment task の心理物理曲線.「曲がった」と回答した確率を各逸脱角度における関数として示した．心理物理曲線は累積分布関数でフィッティングしパラメータを算出した．

4.3.4 自己受容感覚短期記憶と運動課題との関係

自己受容感覚の短期記憶の容量によって受動的なトレーニングによる効果が異なるのかを調べるために，自己受容感覚の短期記憶と運動軌道の再現性の改善度との相関を調査した．短期記憶の指標としては，信号の有無（テストアイテムが記憶アイテムの中に「あった」，「なかった」の判別）に対する応答の正答率（(ヒット数 + 正棄却数) / 試行数）を用いた．一方で，運動軌道の再現性の改善指標には，時空間パターンの指標である RMSE と空間パターンの指標である相互相関係数を用いた．その結果，自己受容感覚の短期記憶のパフォーマンスと RMSE には有意な相関はなかったが [r = 0.284（p = 0.211）]（Fig 4.9A），相互相関係数とは有意な相関が認められた[r = 0.501（p = 0.021）]（Fig 4.9B）．つまり，経験した運動の自己受容感覚を保持できる実験参加者ほど，運動軌道の空間パターンが改善することが示唆された．

一方で，自己受容感覚の短期記憶と自己受容感覚の知覚能力（不確実性：パラメータ σ）の相関は r = -0.616 (p = 0.003)であった（Fig 4.9C）．つまり，自己受容感覚の短期記憶がよい実験参加者ほど自己受容感覚の不確実性が小さいことを示唆している．また，自己受容感覚の不確実性（ばらつき）と運動軌道の再現性の改善度（時空間パターン：RMSE）との相関は r = 0.019（p = 0.934），空間パターン（相互相関係数）との相関は r = -0.298（p = 0.190）で有意な関係性はみられなかった．この結果は，自己受容感覚の不確実性は受動的なトレーニングの効果に影響しないことを示唆している．

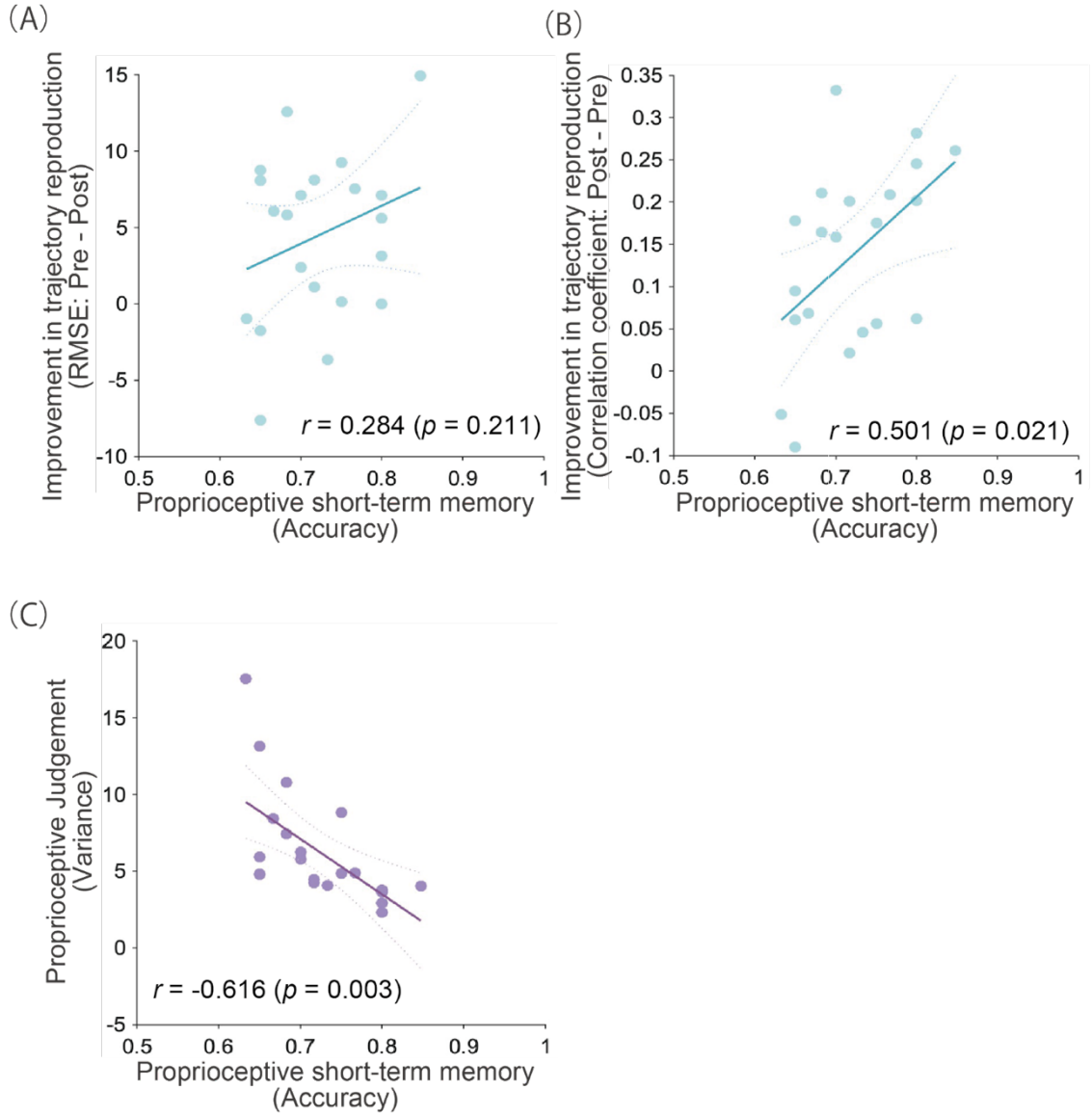


Figure 4.9. 自己受容感覚の短期記憶と他の運動課題の散布図. (A)自己受容感覚の短期記憶と RMSE によって算出した運動軌道(時空間パターン)の改善指標の散布図. 短期記憶と時空間パターンを表す運動軌道の改善指標に有意な関係性は認められなかった. (B)自己受容感覚の短期記憶と相互相関係数によって算出した運動軌道(空間パターン)の改善指標の散布図. 自己受容感覚の短期記憶パフォーマンスがよい実験参加者ほど空間的な運動軌道の改善が認められた. (C)自己受容感覚の短期記憶と自己受容感覚の知覚能力(パラメータ σ)の散布図. 自己受容感覚の短期記憶パフォーマンスがよい実験参加者ほど自己受容感覚のばらつきが少なかった.

次に各 Lag の関数として記憶の保持容量と受動的なトレーニング効果の関係性がどのように遷移するのかを調査するために，自己受容感覚の短期記憶の各ラグの感度（テストアイテムが記憶アイテムの中のラグに一致したときに「あり」と回答した確率をそれぞれのラグで算出）と運動軌道の再現性の改善度（相互相関係数）との相関を調べた．ここでは Figure 4.9A に示したように自己受容感覚の短期記憶と RMSE との間に有意な相関が認められなかったので，相関が認められた相互相関係数のみ評価した．その結果，Lag1 では $r = 0.026$ ($p = 0.912$)，Lag2 では $r = 0.426$ ($p = 0.054$)，Lag3 では $r = 0.554$ ($p = 0.009$)と，Lag1 に正解があったときよりも Lag3 に正解があったときに相関係数は増加するように遷移した（Fig 4.10A）．つまり，受動的な運動教示はラグの関数として，直近に経験した運動よりも以前の情報を覚えていられるヒトほど学習効果が高いことが示唆された．

一方で，自己受容感覚の短期記憶と自己受容感覚の不確実性（ばらつき）の相関をラグの関数として算出した．その結果，Lag1 では $r = -0.442$ ($p = 0.045$)，$r = -0.545$ ($p = 0.012$)，$r = -0.478$ ($p = 0.029$)となり，Lag による推移は認められなかった（Fig 4.10B）．つまり，自己受容感覚の短期記憶と不確実性（ばらつき）は，Lag に関係なく記憶を保持する能力と関係していることを示唆している．

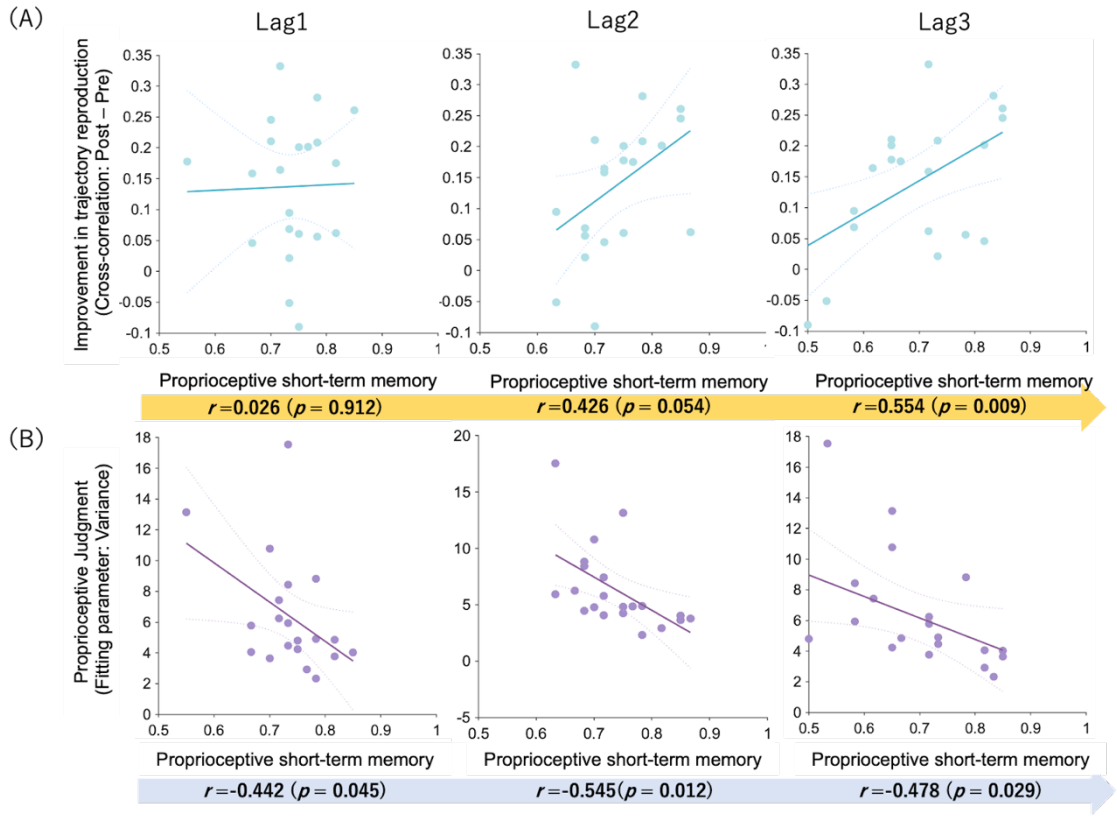


Figure 4.10. 自己受容感覚の短期記憶の各ラグのパフォーマンスと他の運動課題パフォーマンスの散布図. (A) 自己受容感覚の短期記憶と相互相関係数によって算出した運動軌道(空間パターン)の改善指標の散布図. 各ラグの短期記憶と運動軌道の空間パターンの改善指標の相関は, 直近のラグ(Lag1)に正解があったときよりも Lag2, Lag3 に正解があったときの方が高い相関係数を示す. つまり, ラグの関数として以前の記憶を保持できた実験参加者ほど, 運動軌道の学習効率が高いことを示唆する. (B) 自己受容感覚の短期記憶と自己受容感覚の知覚能力(パラメータ σ)の散布図. どの Lag でも自己受容感覚の短期記憶と自己受容感覚のパラメータの間には相関が認められ, ラグによる相関係数の変動はみられない.

次に直近の情報に上書きされず以前の情報を維持する能力と受動的な運動軌道の学習量を調査するために, Lag1 のときの記憶パフォーマンスから Lag3 のときの記憶パフォーマンスを減算することで実験参加者の記憶の維持能力を算出し, 他の運動課題(運動軌道の再現性と自己受容感覚の知覚能力)との関係性を調べた. 記憶の維持能力は, Lag1 と Lag3 でのパフォーマンスに違いがなければ Lag1 -

Lag3 = 0 となり，以前の情報を維持できていると定義した．一方で Lag1 - Lag3 > 0 で，数値が大きくなるほど Lag3 の情報が上書きされている（忘却）と定義した．その結果，忘却量の大きさと空間的な運動軌道の再現性の改善指標は有意に負の相関を示した（r = -0.508， p = 0.019）．つまり，Lag3 の情報を直近の情報より忘却した実験参加者は受動的なトレーニングによって，運動軌道の空間的パターンが改善しないことが示唆された．一方で，自己受容感覚の不確実性（ばらつき）は，自己受容感覚情報の忘却量とは有意な関係は確認されなかった（r = 0.188， p = 0.425）．

これらの結果は，自己受容感覚の記憶が直近の情報に上書きされずに保持できる能力が，受動的なトレーニングの学習と関係していることを示唆している．また，自己受容感覚の知覚パフォーマンスは自己受容感覚の忘却とは直接的な関係がないことを示唆している．

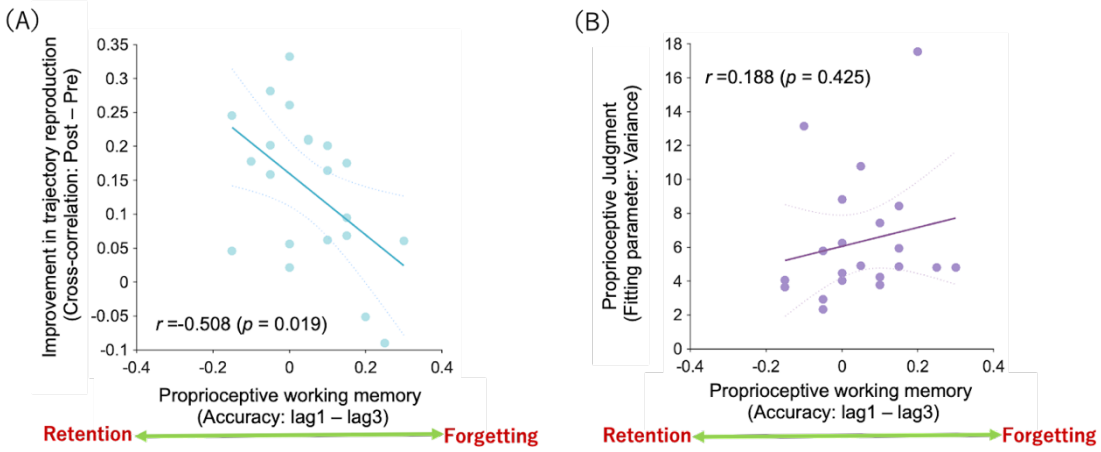


Figure 4.11 自己受容感覚の短期記憶の各 Lag のパフォーマンスと他の運動課題パフォーマンスの散布図．（A）自己受容感覚の短期記憶の忘却量（Lag1 - Lag3）と相互相関係数によって算出した運動軌道の改善度の散布図．Lag1 - Lag3 は直近の記憶と比較して以前の記憶がどの程度保持できているかを示す指標．以前の情報の忘却量が多い実験者ほど運動軌道の学習ができていないことを示している．（B）自己受容感覚の短期記憶の忘却量（Lag1 - Lag3）と自己受容感覚の不確実性（ばらつき）の散布図．忘却量と不確実性には関係性は認められない．

4.3.5 認知パフォーマンスの影響

これまでに，自己受容感覚の短期記憶と受動的なトレーニングの効果との関連について示した．第 3 章で報告したように注意機能との関連性について調査するために，CANTAB で測定した持続性注意のパフォーマンスとの関係を検討した．

CANTAB の持続性注意機能の指標である RVP の中央潜時と 1）自己受容感覚の短期記憶パフォーマンス，2）受動的なトレーニングによる運動軌道の学習，3）自己受容感覚の不確実性（ばらつき）との関係性を調査した（Fig 4.12）．その結果，CANTAB で測定された持続性注意は，自己受容感覚の短期記憶の指標と有意傾向であった（Fig 4.12A, B）．短期記憶の指標である 2 肢強制選択のパフォーマンスとの相関係数は r = -0.407（p = 0.067），直近の情報と比較して前の情報をどの程度忘却したかを示す指標（Lag1 - Lag3）との相関係数は = 0.420（p = 0.058）と持続性注意が悪い実験参加者ほど忘却量が多い傾向にあった．持続性注意の指標は運動軌道の改善量のみと有意な相関を認めた（Fig 4.12C, D）．時空間パターンの指標である RMSE との相関係数は r = -0.621（p = 0.003），空間パターンの指標である相互相関係数との相関は r = -0.488（p = 0.025）であり，受動的な教示による運動軌道の再現性の改善に注意が関係していることが示唆された．さらに持続性注意の指標と自己受容感覚の不確実性（ばらつき）との相関を調べると（Fig 4.12E），r = 0.344（p = 0.127）であった．これらの結果は，持続的な注意は受動的なトレーニングにおける短期記憶と相関があり，軌道の学習（関節空間での表象形成）に関わっている可能性を示唆している．

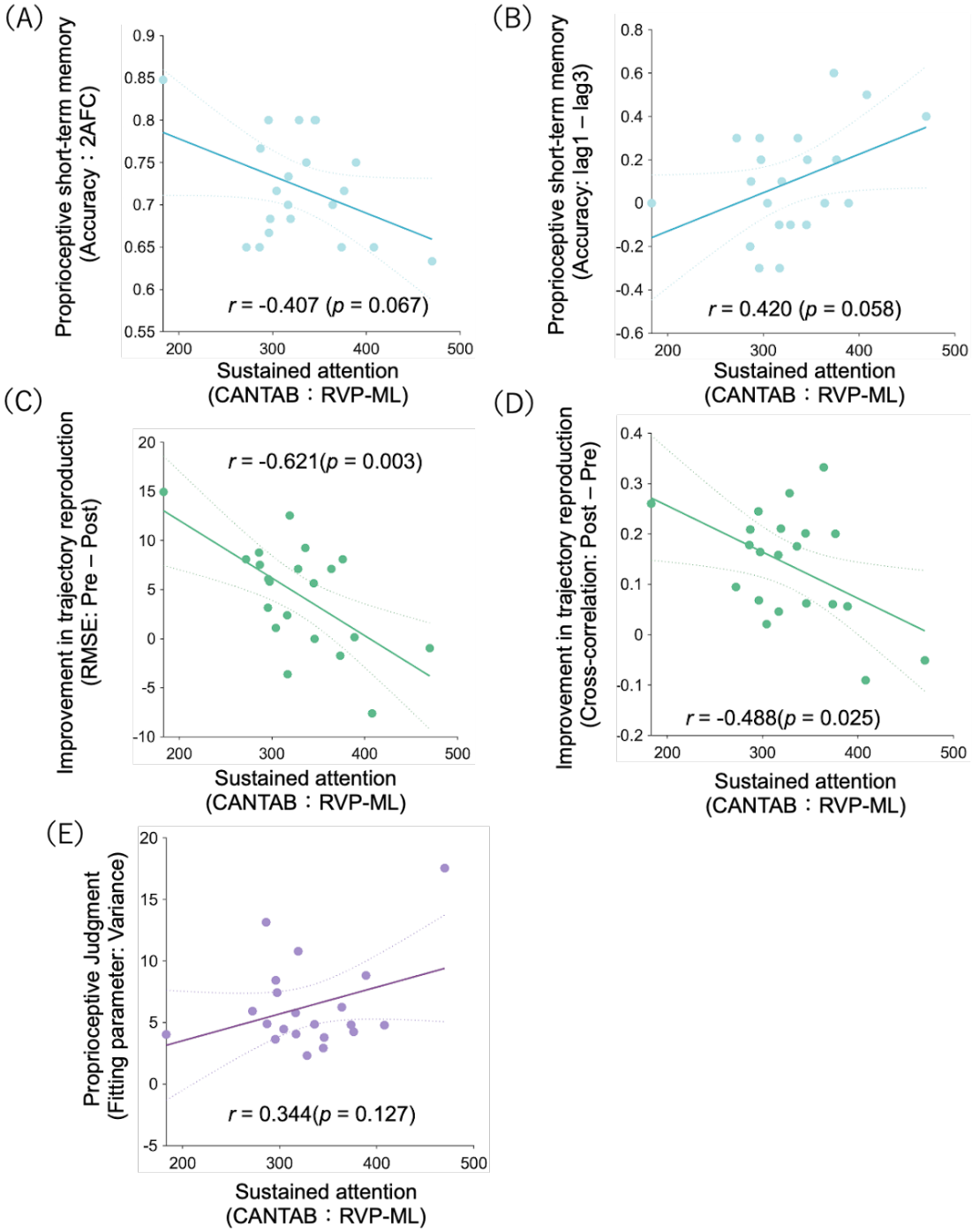


Figure 4.12. CANTAB によって測定した持続性注意の指標（RVP-MR）と各運動パフォーマンスの散布図. 持続性注意の指標は短いほど注意機能が高いことを示す．（A）持続性注意と自己受容感覚の短期記憶（2 肢強制選択のパフォーマンス）の散布図．持続性注意が悪い実験参加者ほど短期記憶が低い傾向．（B）持続性注意と自己受容感覚の忘却量（Lag1

sensitivity - Lag3 sensitivity で算出）の散布図．持続性注意が悪い実験参加者ほど忘却しやすい傾向．（C）持続性注意と受動的なトレーニングによる学習量（RMSE による時空間パターン）の散布図．持続性注意が悪い実験参加者ほど運動軌道の再現性の改善量が少ない．（D）持続性注意と受動的な運動トレーニングによる学習量（相互相関係数による空間パターン）の散布図．持続性注意が悪い実験参加者ほど運動軌道の再現性の改善量が少ない．（E）持続性注意と自己受容感覚の不確実性（ばらつき）の散布図．持続性注意が悪い実験参加者ほど感覚の不確実性（ばらつき）が大きい傾向にあるが，有意な相関はない．

4. 4 考察

本研究では自己受容感覚の記憶能力が高く，自己受容感覚の不確実性（ばらつき）が小さい実験参加者ほどより運動軌道の学習効果が高いとの仮説を立て，受動的なトレーニングによる再現性の改善と自己受容感覚の短期記憶，自己受容感覚の不確実性（ばらつき）との関係を調査した．運動軌道の再現性の指標として空間パターンのみの指標（相互相関係数）と時空間パターンの指標（RMSE）を算出した．その結果，受動的な運動軌道のトレーニングは肘関節の空間パターンの学習を収束させること，その改善量は自己受容感覚の短期記憶と相関することが確認された．特に直近の記憶よりもより以前の運動感覚情報を記憶した実験参加者ほど学習が促進された．一方で，肘関節の自己受容感覚の不確実性（ばらつき）は運動軌道の学習量と相関は認められなかった．このことから，受動的なトレーニングによる運動軌道の学習は，自己受容感覚の短期記憶が重要な役割を果たしており，感覚の不確実性は受動的なトレーニングの学習効果には影響が少ない可能性が示唆された．

受動的なトレーニングによる運動軌道の再現性の改善指標として，時空間パターンの評価指標（RMSE）と空間パターンの評価指標（相互相関係数）に分けて調査をした．その結果，受動的なトレーニングによって運動軌道の空間パターンは収束したが（Fig 4.6C），時空間パターンは Post-test の運動軌道再現時にも改善を認めた（Fig 4.6B）．このことから，時空間パターンは運動軌道を能動的に再現する際にも学習が進むことが示唆された．時間的なパターンの再現にはダイナミクスが関与しており，運動パターンの特性であるタイミング(Zhang and Sternad 2019)は練習を通して徐々に獲得される(Balasubramaniam et al. 2021)．本研究では，運動再現の終了のタイミング（スタートから 10 秒間経過した時点）を実験参加者に教示している．そのため，運動タイミングはその情報を利用し，能動的な再現を通して，発展した可能性が考えられる．

自己受容感覚の短期記憶と運動軌道の再現性の改善量の関係性を時空間パターンの指標と空間パターンの指標に分けて関係性を調査した．その結果，空間パターンの改善量と短期記憶の指標に有意な相関が認められたが（Fig 4.9B），時空間パターンの指標とは有意な関係性はみられなかった（Fig 4.9A）．これは自己受容感覚の短期記憶課題は肘関節位置を記憶するという空間的な位置の記憶に特化した課題であったことが要因と考えられる．この課題特性により空間的な指標である相互相関係数とは有意な関係性を示したが，時間的な側面を持つ RMSE とは有意な相関がみられなかった可能性がある．先行研究においても，時間的，空間的な情報に分けて保持されることが報告されている(Noyce et al. 2016; Michalka et al. 2015).つまり，受動的なトレーニングによる運動軌道の情報も時間的，空間的な情報に分けて学習していた可能性がある．今後は時空間的な短期記憶課題の指標との関係性の調査も望まれる.

運動軌道の再現性の改善量は，自己受容感覚の直近の記憶よりも，より前の記憶と相関しており（Fig 4.10A），忘却量として算出した指標においても，前の情報を忘却しやすい実験参加者は運動軌道の学習量が小さいことが示された（Fig. 4.11A）．これらの結果は，自己受容感覚の記憶が直近の情報に上書きされずに保持できる能力が受動的なトレーニングの学習に寄与していることを示唆している．先行研究においても適応課題(Christou et al. 2016)や系列課題(Bo and Seidler 2009; Bo, Jennett, and Seidler 2011)，強化学習課題(Sidarta, van Vugt, and Ostry 2018)などで短期記憶やワーキングメモリーが学習と関連していることを示唆しており，本研究の結果と一致している．本研究の受動的なトレーニング課題は自己受容感覚の関節空間での保持という第 3 章の結果も考慮すると記憶という側面が強い．そのため，自己受容感覚の短期記憶がより学習に寄与していることが考えられる.

さらに，自己受容感覚の短期記憶課題と感覚の不確実性（ばらつき）との間にも有意な相関が認められた（Fig 4.9C）．自己受容感覚の不確実性（ばらつき）の指標は直近の記憶保持も前の記憶保持も関係性に大きな違いは認められなかった（Fig 4.10B）．また，自己受容感覚の忘却量との関係を調べてみると有意な相関はみとめられなかった（Fig 4.11）．これは自己受容感覚の不確実性が短期記憶課題における肘関節位置を知覚する基盤となっており，記憶能力と直接的に関係していないことを示唆している．つまり，感覚が不確実な場合，間違った情報の取得が増えることで，短期記憶のパフォーマンスが低下するということが生じる可能性が考えられる．身体的な内部ノイズは知覚情報の信頼性を変化させることが報告されており(van Bergen et al. 2015)，本研究の結果とも一致すると考えられる．つまり，自己受容感覚の不確実性が短期記憶課題のパフォーマンスに影響した可能性が考えられる.

運動軌道の再現性と自己受容感覚の不確実性との間に有意な相関は認められなかった．これは，自己受容感覚の不確実性が運動軌道の学習に直接的に関係しないことを示唆している．第 3 章の実験や先行研究(Vahdat, Darainy, and Ostry 2014; Ostry and Gribble 2016; Bernardi, Darainy, and Ostry 2015)では，運動学習の学習量とトレーニング後の自己受容感覚の変化量との間に関係性が認められた．脳は感覚知覚の不確実性を補償しながら運動に利用する．そのため，運動軌道の学習とは直接的に関与しなかった可能性がある．また，CANTAB の注意機能と各運動指標との間で関係性を調査した．その結果，運動軌道の改善度の指標のみ有意な相関が認められた（Fig 4.12）．この結果から注意機能が高いヒトほど受動的なトレーニングの効果が高い可能性が示唆されたが，注意機能によって効果が変化するかは，注意を変化させたときの効果を確認するなどさらなる研究が必要である．自己受容感覚の短期記憶や不確実性（ばらつき）も注意との関連する傾向を示していたが，本研究では有意差は認められなかった．これは効果量の要因が大きいと考えらえれる．今後はサンプルサイズを増やし，実験的操作を加えることで注意や短期記憶，感覚の不確実性，学習との関係を調査し，因果関係を明らかにしていくことも必要となる．

本研究では受動的なトレーニングによって運動軌道の学習効果と自己受容感覚の短期記憶，不確実性との関係を調査した．その結果，受動的な運動教示の学習効果は，より前の情報を保持できていればいるほど学習効果が高いことが示唆された．つまり，受動的な運動教示の学習には自己受容感覚の保持能力が重要であり，感覚の不確実性は運動軌道の推論に影響が少ないことを示唆している．さらに，受動的な運動教示の学習効果は持続性注意とも相関があり，運動軌道教示中の注意が学習効果を促進した可能性も示唆された．

第 5 章 結論

5.1 本論文の要約

本論文では，受動的な運動軌道のトレーニングの効果とそのメカニズムを検討してきた．本研究の目的を達成するために第 3 章，第 4 章で検討を加えた．

第 3 章では，外骨格ロボットを使用して受動的な運動教示を肘関節に与え，実験参加者が運動軌道を学習できるか確認した．外骨格ロボットから教示される情報は自己受容感覚を通して脳へ伝達される．その際，伝達された情報を脳が処理する仕組みとして 2 つの戦略が考えられた．1 つ目は，自己受容感覚として情報を保持し運動軌道の学習に利用する戦略，2 つ目は自己受容感覚の情報を視覚情報に変換して肘関節の動きを再構成するという戦略の 2 つである．そこで，受動的なトレーニングによる学習にどちらの戦略が用いられているのかを確認するために，教示した肘関節運動の両手間転移を調べた．もし 1 つ目の戦略をとっていたならば，両手間転移は認められず，両手間転移を調べたグループでは学習がみられないと考えられる．一方で，脳が 2 つ目の戦略を採用していたならば，教示された腕と反対の腕で動きを再現したとしても学習効果が認められるはずである（両手間転移）．その結果，両手間転移を調べたグループでは運動軌道の学習効果が認められず，脳は 1 つ目の戦略を用いて学習していることが示唆された．

さらに，運動軌道を学習したグループは自己受容感覚の鋭敏さも有意な改善を示した一方で，両手間転移を調べたグループでは反対に自己受容感覚の鋭敏さが有意に低下していた．これらの結果をまとめると，脳は受動的なトレーニング中に関節空間でターゲット運動を表象し，自己受容感覚の使用度に応じて自己受容感覚が改善すると考えられる．

加えて，自己受容感覚を通して学習した軌道は腕の姿勢を変化させても汎化するのかを検討した結果，運動軌道を学習した実験参加者は姿勢を変化させても，動きを再現することに成功し，姿勢の変化には頑健であることが示唆された．また，自己受容感覚の鋭敏さの改善によって，同じ関節を利用する他のタイプの運動の学習に影響するのかをダーツを用いて調査した．その結果，自己受容感覚が改善したグループはダーツパフォーマンスを開始初期から有意に改善した一方で，自己受容感覚が低下したグループではダーツのパフォーマンスの改善は後半のみにみられた．この結果は，受動的な運動軌道の教示による自己受容感覚への注意が，他の運動

課題においても，状態推定能力に影響し学習パフォーマンスに違いが認められた可能性が示唆された.

次に 4 章では，第 3 章の研究を拡張する形で，自己受容感覚の短期記憶と不確実性（ばらつき）が受動的な運動教示の効果に影響を与えるのかを検討した．その結果，自己受容感覚の短期記憶の能力が高いヒトほど，運動軌道の再現性が改善したが，自己受容感覚の不確実性（ばらつき）とは関係が認められなかった．さらに短期記憶を時間（ラグ）の関数としたとき，直近の記憶よりもより前の情報を保持する能力と運動軌道の再現性の改善量に関連性が認められた．直近の短期記憶のパフォーマンス（Lag1）からより前のパフォーマンス（Lag3）を減算することで忘却量を算出し（Lag1 - Lag3），運動軌道の再現性の改善度と関係性を調べてみると，情報の忘却がみられない実験参加者ほど受動的な運動教示の学習効果が高いことが示唆された．これらの結果は受動的な運動教示の学習には自己受容感覚の保持能力が重要であり，感覚の不確実性は運動軌道の推論に影響が少ないことを示唆していた．さらに，受動的な運動教示の学習効果は持続性注意とも相関があり，運動軌道教示中の注意が学習効果を促進した可能性も示唆された.

以上の結果を総括すると，受動的な身体教示によるトレーニング効果は注意や自己受容感覚の短期記憶を基盤とした，関節空間（自己受容感覚）での運動軌道の表象の形成であると考えることができる．これにより，受動的に運動を教示することで，教示した空間周辺に探索空間を限定することができる可能性が示唆された.親やインストラクター，セラピストが学習者に身体接触によって教示するのは，自己受容感覚として感覚経験を与え，探索空間を限定しようとする試みであると考えられる．その場合，1，2 回よりも複数回繰り返し教示する，あるいは，1，2 回受動的に教示した後に，能動的な再現を行うというように受動的な教示と能動的な運動を交互に複数回繰り返す(Wong et al. 2012)ことが学習を促進する方法になりうる.

5.2 将来の方向性

本論文では，受動的な運動軌道のトレーニングによって，複雑な運動スキルの獲得のために，制御パラメータの探索空間を限定できる可能性が示唆された．しかし，本研究の成果は肘関節のみへの教示であり，多関節に教示した場合に学習できるのかは不明である．本研究の結果，自己受容感覚への注意機能が軌道の学習量と関係していたことから，多関節になると注意を分散させることが必要になるため同時に学習することが難しくなる可能性もある．その点に関しては今後の検討が必要である．ただし，多関節の自己受容感覚のトレーニングは自己受容感覚の精度を改善

することが他の研究で分かった．また，その改善はフォームの学習のような多関節運動の学習に寄与する結果も得られている．このような観点から，探索空間を限定するためにどのような手法が良いか比較検討することも必要となるだろう．

また，本研究の結果は，受動的な運動教示による学習の基盤に自己受容感覚の記憶と注意機能が含まれることを示している．そのため，記憶や注意機能が低下したヒトや高齢者は学習に時間が必要となるかもしれない．そのような記憶や注意機能が低下したヒトにはそのヒトの注意や保持能力に合わせて，受動的な運動経験と能動的な運動を適切な比率で交互に繰り返す方法が良い可能性もある．まずは記憶や注意機能が低下したヒトの学習能力の検討を行い，そのようなヒトでも効率的に学習できるシステムの開発を行っていく必要があるだろう．

さらに，このようなシステムで探索空間を限定した場合，効率的に学習は進んだとしても，探索的に経験していないパラメータ空間で対応が必要になったときに，柔軟な対応ができない可能性もある．運動スキルの学習初期の運動のばらつきが学習を促進するといった報告(Wu et al. 2014; Herzfeld and Shadmehr 2014; Singh et al. 2016; Dhawale, Smith, and Ölveczky 2017)もあるように，学習の中の探索行動はその後の柔軟な対応に影響する可能性もあり，探索の効果を慎重に検討していく必要がある．もし，このような現象が生じたとしてもシステムは使い方次第である．その時々の状況や状態に応じて学習方法を選択してくべきであろう．

しかしながら，このような受動的な運動経験によって，学習を効率的に進めることができるならば，外骨格ロボットによってスポーツのトッププレイヤーの動きや自身に適した運動を誰しもが経験し，学習に利用できる可能性も考えられる．また，能動的に再現した動きと参考にした動きを外骨格ロボットによって比較検証することができれば，その誤差をフィードバック信号としてユーザーに教示し学習の促進に繋がる可能性がある．これはリハビリの補助システムや重たい荷物を持つなど身体の拡張システムとして主に利用されている外骨格ロボットの新しい利用方法の一つである．このようなシステムを考えていく上で必要となる技術がある．その 1 つは一人一人が違う身体構造（バイオメカニクス）を持つ中で，どのような動きがその人にとって適切であるかを推定し，提案するシステムである．そのようなシステムの一つとして登録したデータベースからユーザーに類似したデータを協調フィルタリングを用いて取得する手法の開発も行っている(Furukawa et al. 2021)．今後は上述した基礎研究を通して，効率的な学習をサポートするシステムの開発を行っていきたい．

参考文献

Anton-Erxleben, Katharina, and Marisa Carrasco. 2013. “Attentional Enhancement of Spatial Resolution: Linking Behavioural and Neurophysiological Evidence.” *Nature Reviews. Neuroscience* 14 (3): 188–200.

Balasubramaniam, Ramesh, Saskia Haegens, Mehrdad Jazayeri, Hugo Merchant, Dagmar Sternad, and Joo-Hyun Song. 2021. “Neural Encoding and Representation of Time for Sensorimotor Control and Learning.” *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 41 (5): 866–72.

Bapi, Raju S., K. P. Miyapuram, F. X. Graydon, and K. Doya. 2006. “fMRI Investigation of Cortical and Subcortical Networks in the Learning of Abstract and Effector-Specific Representations of Motor Sequences.” *NeuroImage* 32 (2): 714–27.

Beets, Iseult A. M., Marc Macé, Raf L. J. Meesen, Koen Cuypers, Oron Levin, and Stephan P. Swinnen. 2012. “Active versus Passive Training of a Complex Bimanual Task: Is Prescriptive Proprioceptive Information Sufficient for Inducing Motor Learning?” *PloS One* 7 (5): e37687.

Bergen, Ruben S. van, Wei Ji Ma, Michael S. Pratte, and Janneke F. M. Jehee. 2015. “Sensory Uncertainty Decoded from Visual Cortex Predicts Behavior.” *Nature Neuroscience* 18 (12): 1728–30.

Bernardi, Nicolò F., Mohammad Darainy, and David J. Ostry. 2015. “Somatosensory Contribution to the Initial Stages of Human Motor Learning.” *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 35 (42): 14316–26.

Bo, J., S. Jennett, and R. D. Seidler. 2011. “Working Memory Capacity Correlates with Implicit Serial Reaction Time Task Performance.” *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale* 214 (1): 73–81.

Bo, J., and R. D. Seidler. 2009. “Visuospatial Working Memory Capacity Predicts the Organization of Acquired Explicit Motor Sequences.” *Journal of Neurophysiology* 101 (6): 3116–25.

Burge, Johannes, Marc O. Ernst, and Martin S. Banks. 2008. “The Statistical Determinants of Adaptation Rate in Human Reaching.” *Journal of Vision* 8 (4): 20.1–19.

Buszard, Tim, Damian Farrow, Simone J. J. M. Verswijveren, Machar Reid, Jacqueline Williams, Remco Polman, Fiona Chun Man Ling, and Rich S. W. Masters. 2017. “Working Memory Capacity Limits Motor Learning When Implementing Multiple Instructions.” *Frontiers in Psychology* 8 (August): 1350.

Cabeça, Hideraldo Luis Souza, Luciano Chaves Rocha, Amanda Ferreira Sabbá, Alessandra Mendonça Tomás, Natali Valim Oliver Bento-Torres, Daniel Clive Anthony, and Cristovam Wanderley Picanço Diniz. 2018. “The Subtleties of Cognitive Decline in Multiple Sclerosis: An Exploratory Study Using Hierarchichal Cluster Analysis of CANTAB Results.” *BMC Neurology* 18 (1): 140.

Carrasco, Marisa. 2011. “Visual Attention: The Past 25 Years.” *Vision Research* 51 (13): 1484–1525.

Chen, Xiuli, Peter Holland, and Joseph M. Galea. 2018. “The Effects of Reward and Punishment on Motor Skill Learning.” *Current Opinion in Behavioral Sciences* 20 (April): 83–88.

Chiyohara, Shinya, Jun-Ichiro Furukawa, Tomoyuki Noda, Jun Morimoto, and Hiroshi Imamizu. 2020. “Passive Training with Upper Extremity Exoskeleton Robot Affects Proprioceptive Acuity and Performance of Motor Learning.” *Scientific Reports* 10 (1): 1–9.

Choi, Yera, Emily Yunha Shin, and Sungshin Kim. 2020. “Spatiotemporal Dissociation of fMRI Activity in the Caudate Nucleus Underlies Human de Novo Motor Skill Learning.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117 (38): 23886–97.

Christou, Antonios I., R. Chris Miall, Fiona McNab, and Joseph M. Galea. 2016. “Individual Differences in Explicit and Implicit Visuomotor Learning and Working Memory Capacity.” *Scientific Reports* 6 (November): 36633.

Correa, Angel, and Anna C. Nobre. 2008. “Spatial and Temporal Acuity of Visual Perception Can Be Enhanced Selectively by Attentional Set.” *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale* 189 (3): 339–44.

Cuppone, Anna Vera, Marianna Semprini, and Jürgen Konczak. 2018. “Consolidation of Human Somatosensory Memory during Motor Learning.” *Behavioural Brain Research* 347 (July): 184–92.

Darainy, Mohammad, Shahabeddin Vahdat, and David J. Ostry. 2013. “Perceptual Learning in Sensorimotor Adaptation.” *Journal of Neurophysiology* 110 (9): 2152–62.

Dayan, Eran, and Leonardo G. Cohen. 2011. “Neuroplasticity Subserving Motor Skill Learning.” *Neuron* 72 (3): 443–54.

De Luca, Cinzia R., Stephen J. Wood, Vicki Anderson, Jo-Anne Buchanan, Tina M. Proffitt, Kate Mahony, and Christos Pantelis. 2003. “Normative Data from the CANTAB. I: Development of Executive Function over the Lifespan.” *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology* 25 (2): 242–54.

Dhawale, Ashesh K., Maurice A. Smith, and Bence P. Ölveczky. 2017. “The Role of Variability in Motor Learning.” *Annual Review of Neuroscience* 40 (July): 479–98.

Diedrichsen, Jörn, and Katja Kornysheva. 2015. “Motor Skill Learning between Selection and Execution.” *Trends in Cognitive Sciences* 19 (4): 227–33.

Doyon, Julien, and Habib Benali. 2005. “Reorganization and Plasticity in the Adult Brain during Learning of Motor Skills.” *Current Opinion in Neurobiology* 15 (2): 161–67.

Doyon, Julien, Virginia Penhune, and Leslie G. Ungerleider. 2003. “Distinct Contribution of the Cortico-Striatal and Cortico-Cerebellar Systems to Motor Skill Learning.” *Neuropsychologia* 41 (3): 252–62.

Elbert, T., C. Pantev, C. Wienbruch, B. Rockstroh, and E. Taub. 1995. “Increased Cortical Representation of the Fingers of the Left Hand in String Players.” *Science* 270 (5234): 305–7.

Foltynie, Thomas, Carol E. G. Brayne, Trevor W. Robbins, and Roger A. Barker. 2004. “The Cognitive Ability of an Incident Cohort of Parkinson’s Patients in the UK. The CamPaIGN Study.” *Brain: A Journal of Neurology* 127 (Pt 3): 550–60.

Furukawa, Jun-Ichiro, Shinya Chiyohara, Tatsuya Teramae, Asuka Takai, and Jun Morimoto. 2021. “A Collaborative Filtering Approach Toward Plug-and-Play Myoelectric Robot Control.” *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 51 (5): 514–23.

Furukawa, Jun-Ichiro, Tomoyuki Noda, Tatsuya Teramae, and Jun Morimoto. 2017. “Human Movement Modeling to Detect Biosignal Sensor Failures for Myoelectric Assistive Robot Control.” *IEEE Transactions on Robotics* 33 (4): 846–57.

Gau, S. S-F, and W-L Huang. 2014. “Rapid Visual Information Processing as a Cognitive Endophenotype of Attention Deficit Hyperactivity Disorder.” *Psychological Medicine* 44 (2): 435–46.

Green, Lara A., and David A. Gabriel. 2018. “The Effect of Unilateral Training on Contralateral Limb Strength in Young, Older, and Patient Populations: A Meta-Analysis of Cross Education.” *Physical Therapy Reviews: PTR* 23 (4-5): 238–49.

Haith, Adrian M., Christopher Yang, Jina Pakpoor, and Kahori Kita. n.d. “De Novo Motor Learning of a Bimanual Control Task over Multiple Days of Practice.” https://doi.org/10.1101/2021.10.21.465196.

He, Kang, You Liang, Farnaz Abdollahi, Moria Fisher Bittmann, Konrad Kording, and Kunlin Wei. 2016. “The Statistical Determinants of the Speed of Motor Learning.” *PLoS Computational Biology* 12 (9): e1005023.

Herrmann, Katrin, Leila Montaser-Kouhsari, Marisa Carrasco, and David J. Heeger. 2010. “When Size Matters: Attention Affects Performance by Contrast or Response Gain.” *Nature Neuroscience* 13 (12): 1554–59.

Herzfeld, David J., and Reza Shadmehr. 2014. “Motor Variability Is Not Noise, but Grist for the Learning Mill.” *Nature Neuroscience*.

Hirano, M., M. Sakurada, and S. Furuya. 2020. “Overcoming the Ceiling Effects of Experts’ Motor Expertise through Active Haptic Training.” *Science Advances* 6 (47): eabd2558.

Imamizu, H., Y. Uno, and M. Kawato. 1998. “Adaptive Internal Model of Intrinsic Kinematics Involved in Learning an Aiming Task.” *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance* 24 (3): 812–29.

Izawa, Jun, and Reza Shadmehr. 2008. “On-Line Processing of Uncertain Information in Visuomotor Control.” *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 28 (44): 11360–68.

Izawa, Jun, and Reza Shadmehr. 2011. “Learning from Sensory and Reward Prediction Errors during Motor Adaptation.” *PLoS Computational Biology* 7 (3): e1002012.

Jankowski, J., L. Scheef, C. Hüppe, and H. Boecker. 2009. “Distinct Striatal Regions for Planning and Executing Novel and Automated Movement Sequences.” *NeuroImage* 44 (4): 1369–79.

Johansen-Berg, H., and D. M. Lloyd. 2000. “The Physiology and Psychology of Selective Attention to Touch.” *Frontiers in Bioscience: A Journal and Virtual Library* 5 (November): D894–904.

Johansson, Roland S., and J. Randall Flanagan. 2009. “Coding and Use of Tactile Signals from the Fingertips in Object Manipulation Tasks.” *Nature Reviews. Neuroscience* 10 (5): 345–59.

Knill, David C., and Alexandre Pouget. 2004. “The Bayesian Brain: The Role of Uncertainty in Neural Coding and Computation.” *Trends in Neurosciences* 27 (12): 712–19.

Krakauer, John W., Alkis M. Hadjiosif, Jing Xu, Aaron L. Wong, and Adrian M. Haith. 2019. “Motor Learning.” *Comprehensive Physiology* 9 (2): 613–63.

Lehéricy, Stéphane, Habib Benali, Pierre-François Van de Moortele, Mélanie Pélégrini-Issac, Tobias Waechter, Kamil Ugurbil, and Julien Doyon. 2005. “Distinct Basal Ganglia Territories Are Engaged in Early and Advanced Motor Sequence Learning.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102 (35): 12566–71.

Lei, Yuming, Shancheng Bao, and Jinsung Wang. 2016. “The Combined Effects of Action Observation and Passive Proprioceptive Training on Adaptive Motor Learning.” *Neuroscience* 331 (September): 91–98.

Lei, Yuming, and Jinsung Wang. 2018. “The Effect of Proprioceptive Acuity Variability on Motor Adaptation in Older Adults.” *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale* 236 (2): 599–608.

Lenehan, Megan E., Mathew J. Summers, Nichole L. Saunders, Jeffery J. Summers, and James C. Vickers. 2016. “Does the Cambridge Automated Neuropsychological Test Battery (CANTAB) Distinguish Between Cognitive Domains in Healthy Older Adults?” *Assessment* 23 (2): 163–72.

Levaux, Marie-Noëlle, Stéphane Potvin, Amir Ali Sepehry, Juliette Sablier, Adrianna Mendrek, and Emmanuel Stip. 2007. “Computerized Assessment of Cognition in Schizophrenia: Promises and Pitfalls of CANTAB.” *European Psychiatry: The Journal of the Association of European Psychiatrists* 22 (2): 104–15.

Li, Hsin-Hung, Thomas C. Sprague, Aspen H. Yoo, Wei Ji Ma, and Clayton E. Curtis. 2021. “Joint Representation of Working Memory and Uncertainty in Human Cortex.” *Neuron* 109 (22): 3699–3712.e6.

Lövdén, Martin, Benjamín Garzón, and Ulman Lindenberger. 2020. “Human Skill Learning: Expansion, Exploration, Selection, and Refinement.” *Current Opinion in Behavioral Sciences* 36 (December): 163–68.

Manohar, Sanjay G., Trevor T-J Chong, Matthew A. J. Apps, Amit Batla, Maria Stamelou, Paul R. Jarman, Kailash P. Bhatia, and Masud Husain. 2015.

"Reward Pays the Cost of Noise Reduction in Motor and Cognitive Control." *Current Biology: CB* 25 (13): 1707–16.

Miall, R. Chris, Daria Afanasyeva, Jonathan D. Cole, and Peggy Mason. 2021. "The Role of Somatosensation in Automatic Visuo-Motor Control: A Comparison of Congenital and Acquired Sensory Loss." *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale* 239 (7): 2043–61.

Michalka, Samantha W., Lingqiang Kong, Maya L. Rosen, Barbara G. Shinn-Cunningham, and David C. Somers. 2015. "Short-Term Memory for Space and Time Flexibly Recruit Complementary Sensory-Biased Frontal Lobe Attention Networks." *Neuron* 87 (4): 882–92.

Mirdamadi, Jasmine L., and Hannah J. Block. 2020. "Somatosensory Changes Associated with Motor Skill Learning." *Journal of Neurophysiology* 123 (3): 1052–62.

Morris, Tiffany, Nicki Ann Newby, Michael Wininger, and William Craelius. 2009. "Inter-Limb Transfer of Learned Ankle Movements." *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale* 192 (1): 33–42.

Noda, Tomoyuki, Tatsuya Teramae, Barkan Ugurlu, and Jun Morimoto. 2014. "Development of an Upper Limb Exoskeleton Powered via Pneumatic Electric Hybrid Actuators with Bowden Cable." In .

Nowak, Dennis A., Stefan Glasauer, and Joachim Hermsdorfer. 2004. "How Predictive Is Grip Force Control in the Complete Absence of Somatosensory Feedback?" *Brain: A Journal of Neurology* 127 (Pt 1): 182–92.

Noyce, Abigail L., Nishmar Cestero, Barbara G. Shinn-Cunningham, and David C. Somers. 2016. "Short-Term Memory Stores Organized by Information Domain." *Attention, Perception & Psychophysics* 78 (3): 960–70.

Omrani, Mohsen, Chantelle D. Murnaghan, J. Andrew Pruszynski, and Stephen H. Scott. 2016. "Distributed Task-Specific Processing of Somatosensory Feedback for Voluntary Motor Control." *eLife* 5 (April): e13141.

Ostry, David J., Mohammad Darainy, Andrew A. G. Mattar, Jeremy Wong, and Paul L. Gribble. 2010. "Somatosensory Plasticity and Motor Learning." *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 30 (15): 5384–93.

Ostry, David J., and Paul L. Gribble. 2016. "Sensory Plasticity in Human Motor Learning." *Trends in Neurosciences* 39 (2): 114–23.

Pestilli, Franco, and Marisa Carrasco. 2005. “Attention Enhances Contrast Sensitivity at Cued and Impairs It at Uncued Locations.” *Vision Research* 45 (14): 1867–75.

Poldrack, Russell A., Fred W. Sabb, Karin Foerde, Sabrina M. Tom, Robert F. Asarnow, Susan Y. Bookheimer, and Barbara J. Knowlton. 2005. “The Neural Correlates of Motor Skill Automaticity.” *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 25 (22): 5356–64.

Ramsey, Richard, David M. Kaplan, and Emily S. Cross. 2021. “Watch and Learn: The Cognitive Neuroscience of Learning from Others’ Actions.” *Trends in Neurosciences* 44 (6): 478–91.

Reis, Janine, Heidi M. Schambra, Leonardo G. Cohen, Ethan R. Buch, Brita Fritsch, Eric Zarahn, Pablo A. Celnik, and John W. Krakauer. 2009. “Noninvasive Cortical Stimulation Enhances Motor Skill Acquisition over Multiple Days through an Effect on Consolidation.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106 (5): 1590–95.

Robbins, T. W., M. James, A. M. Owen, B. J. Sahakian, L. McInnes, and P. Rabbitt. 1994. “Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery (CANTAB): A Factor Analytic Study of a Large Sample of Normal Elderly Volunteers.” *Dementia* 5 (5): 266–81.

Rohde, Marieke, Kenichi Narioka, Jochen J. Steil, Lina K. Klein, and Marc O. Ernst. 2019. “Goal-Related Feedback Guides Motor Exploration and Redundancy Resolution in Human Motor Skill Acquisition.” *PLoS Computational Biology* 15 (3): e1006676.

Rothwell, J. C., M. M. Traub, B. L. Day, J. A. Obeso, P. K. Thomas, and C. D. Marsden. 1982. “Manual Motor Performance in a Deafferented Man.” *Brain: A Journal of Neurology* 105 (Pt 3) (September): 515–42.

Shea, C. H., D. L. Wright, G. Wulf, and C. Whitacre. 2000. “Physical and Observational Practice Afford Unique Learning Opportunities.” *Journal of Motor Behavior* 32 (1): 27–36.

Shmuelof, Lior, John W. Krakauer, and Pietro Mazzoni. 2012. “How Is a Motor Skill Learned? Change and Invariance at the Levels of Task Success and Trajectory Control.” *Journal of Neurophysiology* 108 (2): 578–94.

Sidarta, Ananda, Floris T. van Vugt, and David J. Ostry. 2018. “Somatosensory Working Memory in Human Reinforcement-Based Motor Learning.” *Journal of Neurophysiology* 120 (6): 3275–86.

Singh, Puneet, Sumitash Jana, Ashitava Ghosal, and Aditya Murthy. 2016. "Exploration of Joint Redundancy but Not Task Space Variability Facilitates Supervised Motor Learning." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113 (50): 14414–19.

Spence, Charles, and Alberto Gallace. 2007. "Recent Developments in the Study of Tactile Attention." *Canadian Journal of Experimental Psychology = Revue Canadienne de Psychologie Experimentale* 61 (3): 196–207.

Stanley, Jason, and John W. Krakauer. 2013. "Motor Skill Depends on Knowledge of Facts." *Frontiers in Human Neuroscience* 7 (August): 503.

Sternad, Dagmar, Meghan E. Huber, and Nikita Kuznetsov. 2014. "Acquisition of Novel and Complex Motor Skills: Stable Solutions Where Intrinsic Noise Matters Less." *Advances in Experimental Medicine and Biology* 826: 101–24.

Taylor, Jordan A., Greg J. Wojaczynski, and Richard B. Ivry. 2011. "Trial-by-Trial Analysis of Intermanual Transfer during Visuomotor Adaptation." *Journal of Neurophysiology* 106 (6): 3157–72.

Telgen, Sebastian, Darius Parvin, and Jörn Diedrichsen. 2014. "Mirror Reversal and Visual Rotation Are Learned and Consolidated via Separate Mechanisms: Recalibrating or Learning de Novo?" *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 34 (41): 13768–79.

Trewartha, Kevin M., Angeles Garcia, Daniel M. Wolpert, and J. Randall Flanagan. 2014. "Fast but Fleeting: Adaptive Motor Learning Processes Associated with Aging and Cognitive Decline." *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 34 (40): 13411–21.

Tuthill, John C., and Eiman Azim. 2018. "Proprioception." *Current Biology: CB* 28 (5): R194–203.

Vahdat, Shahabeddin, Mohammad Darainy, and David J. Ostry. 2014. "Structure of Plasticity in Human Sensory and Motor Networks due to Perceptual Learning." *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 34 (7): 2451–63.

Wang, Jinsung, and Robert L. Sainburg. 2006. "Interlimb Transfer of Visuomotor Rotations Depends on Handedness." *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale* 175 (2): 223–30.

Wei, Kunlin, and Konrad Körding. 2010. "Uncertainty of Feedback and State Estimation Determines the Speed of Motor Adaptation." *Frontiers in Computational Neuroscience* 4 (May): 11.

Wolpe, Noham, James N. Ingram, Kamen A. Tsvetanov, Richard N. Henson, Daniel M. Wolpert, Cam-CAN, and James B. Rowe. 2020. “Age-Related Reduction in Motor Adaptation: Brain Structural Correlates and the Role of Explicit Memory.” *Neurobiology of Aging* 90 (June): 13–23.

Wolpert, Daniel M., Jörn Diedrichsen, and J. Randall Flanagan. 2011. “Principles of Sensorimotor Learning.” *Nature Reviews. Neuroscience* 12 (12): 739–51.

Wolpert, Daniel M., Zoubin Ghahramani, and J. Randall Flanagan. 2001. “Perspectives and Problems in Motor Learning.” *Trends in Cognitive Sciences* 5 (11): 487–94.

Wong, Jeremy D., Dinant A. Kistemaker, Alvin Chin, and Paul L. Gribble. 2012. “Can Proprioceptive Training Improve Motor Learning?” *Journal of Neurophysiology* 108 (12): 3313–21.

Wu, Howard G., Yohsuke R. Miyamoto, Luis Nicolas Gonzalez Castro, Bence P. Ölveczky, and Maurice A. Smith. 2014. “Temporal Structure of Motor Variability Is Dynamically Regulated and Predicts Motor Learning Ability.” *Nature Neuroscience* 17 (2): 312–21.

Yang, Christopher S., Noah J. Cowan, and Adrian M. Haith. 2021. “De Novo Learning versus Adaptation of Continuous Control in a Manual Tracking Task.” *eLife* 10 (June). https://doi.org/10.7554/eLife.62578.

Yang, Xiao, Xiaojuan Ma, Bin Huang, Guizhi Sun, Liansheng Zhao, Dongtao Lin, Wei Deng, Tao Li, and Xiaohong Ma. 2015. “Gray Matter Volume Abnormalities Were Associated with Sustained Attention in Unmedicated Major Depression.” *Comprehensive Psychiatry* 63 (November): 71–79.

Yousif, N., J. Cole, J. Rothwell, and J. Diedrichsen. 2015. “Proprioception in Motor Learning: Lessons from a Deafferented Subject.” *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale* 233 (8): 2449–59.

Zatorre, Robert J., Joyce L. Chen, and Virginia B. Penhune. 2007. “When the Brain Plays Music: Auditory-Motor Interactions in Music Perception and Production.” *Nature Reviews. Neuroscience* 8 (7): 547–58.

Zhang, Zhaoran, and Dagmar Sternad. 2019. “The Primacy of Rhythm: How Discrete Actions Merge into a Stable Rhythmic Pattern.” *Journal of Neurophysiology* 121 (2): 574–87.

謝辞

本研究を遂行するにあたり，多くの方にご支援をいただきました．本研究のためにご協力いただいたみなさまに心から感謝いたします．

まず初めに研究生活の中で日々ご指導をいただいた，ATR 認知神経科学研究所の今水寛所長に心より感謝申し上げます．研究の進め方，考え方，論文の書き方など多くのことを学び，実験や解析についての示唆をいただきました．研究についての悩んだ時には，貴重な時間を割いてご助言をいただきました．大阪大学大学院生命機能研究科の柳田敏雄特任教授には，ATR の学外研修生になるために学生として受け入れていただき，懇切丁寧なご指導，ご支援を頂きました．心より感謝いたします． ATR 脳情報研究所の川人光男所長には，素晴らしい研究環境を与えていただき，深い洞察力で多くのご助言をいただきました．厚く御礼申し上げます．ATR 脳情報研究所・ブレインロボットインターフェース研究室の森本淳室長には本研究を遂行するにあたり，研究方針や研究内容について多大なご助言を頂きました．また，理化学研究所の古川淳一郎研究員には，日頃より多大なご助言を頂き，外骨格ロボットの実装や 3 次元動作分析の取扱などを教えていただきました．心より感謝いたします．実験に利用した外骨格ロボットの制作と調整をして頂きました ATR 脳情報研究所・ブレインロボットインターフェース研究室の野田智之主任研究員に感謝の意を表したいと思います．また ATR 脳情報研究所・ブレインロボットインターフェース研究室のみなさまには，実験場所の提供や外骨格ロボットの整備など幅広くご協力を頂きました．心より感謝いたします．

研究生活の中で，幅広く議論する機会や発表する機会を与えてくださり，多大な助言を頂いた ATR 認知機構研究所のみなさまに深く感謝申し上げます．事務面で日頃よりお力添え頂きました，ATR 認知神経科学研究室の平田美英子秘書，大阪大学大学院生命機能研究科柳田研究室の谷口恵里秘書，寺村有理子秘書に心より感謝いたします．素晴らしい環境を与えて下さった大阪大学生命機能研究科および ATR の全てのスタッフの方に感謝申し上げます．

最後に私の研究生活をサポートし日頃より支えてくれた家族に感謝いたします．

研究業績

1　　国際論文

1. Shinya Chiyohara, Jun-ichiro Furukawa, Tomoyuki Noda, Jun Morimoto & Hiroshi Imamizu, Passive training with upper extremity exoskeleton robot affects proprioceptive acuity and performance of motor learning. Sci Rep. 10, 11820 (2020)

2. Jun-ichiro Furukawa, Shinya Chiyohara, Tatsuya Teramae, Asuka Takai, and Jun Morimoto, “ A Collaborative Filtering Approach Toward Plug-and-Play Myoelectric Robot Control”, IEEE TRANSACTIONS ON HUMAN-MACHINE SYSTEM, Vol. 51, No. 5, pp. 514-523, 2021.

2　　国際学会

1. Shinya Chiyohara, Jun-ichiro Furukawa, Jun Morimoto & Hiroshi Imamizu，“ Proprioceptive Gain Affects Motor Learning.”, real-time functional imaging and neurofeedback conference, Nov 29-Dec 1, 2017

3　　国内学会

1. Shinya Chiyohara, Jun-ichiro Furukawa, Jun Morimoto & Hiroshi Imamizu，運動学習における柔軟な多感覚統合システム～固有感覚ゲインの影響～. 第 11 回 Motor Control 研究会，2017