HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	投射動作における自己および他者の誤差に基づく試行間学習［全文の要約］
Author(s)	松田, 直祥
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(教育学)
Dissertation Number	甲第16317号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95456
Type	doctoral thesis
File Information	MATSUDA_Naoyoshi_summary.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文内容の要約

博士の専攻分野の名称：博士（教育学）　　氏名：松田　直祥

学位論文題名

投射動作における自己および他者の誤差に基づく試行間学習

序論

私たちの感覚運動系は、動作の結果として誤差が発生すると、次の試行ではその誤差を減らすように動作を潜在的に修正する。このような試行間学習は、運動パフォーマンスの向上と維持に寄与する。バスケットボールを例にすると、フリースローの成功率は1、2、3投目と徐々に増加することが知られている。また、中枢性疲労や筋疲労などで身体状態が変化する中、試合を通じてシュートを決めることが求められる。このような運動パフォーマンスの向上と維持は、誤差に基づく試行間学習により実現されると考えられている（Wolpert & Bastian, 2022; Sutter et al., 2022; Wunderlich et al., 2020; Phatak et al., 2020）。

誤差に基づく試行間学習の知見は、数多くの運動学習研究により積み上げられてきた。そこでの実験課題では、ターゲットに向かって手を伸ばすリーチング動作が主に用いられている（Kim et al., 2021）。他方、スポーツ場面では、ターゲットに対してオブジェクトを投げたり、蹴ったり、打ったりするようなバリスティックな動作がよく行われる。本博士論文では、「オブジェクトを身体からリリースしてターゲットまで移動させるための動作」を投射動作と定義する。注目すべきことに、リーチング動作と投射動作の間には、動作の完了から結果が判明するまでの遅延の有無をはじめ、誤差学習に影響を及ぼす可能性のある相違点が複数存在する。それにもかかわらず、投射動作を用いた運動学習研究は少なく、投射動作における誤差学習の知見は限られている。

また、誤差学習について調べた研究のほとんどは、「自己動作の結果として生じる誤差」に着目している。しかし実際のスポーツ場面などでは、自己の誤差だけではなく「他者動作の結果として生じる誤差」を観察する機会も多くある。例えば、ダーツ、ボーリング、モルックなどのスポーツでは、他者のターンと自分のターンが順に実施されるため、動作実行の直前に他者の誤差を観察することになる。そのため、誤差に基づく試行間学習を研究するうえで、他者の誤差の影響は重要な観点の１つといえる。以上のことを踏まえ本博士論文では、投射動作における“自己”および“他者”の誤差に基づく試行間学習についての実験研究を行った。これにより、投射動作における誤差学習の特徴や、“自己”の誤差 に基づく学習と“他者”の誤差に基づく学習の共通性の一端が明らかになることが期待される。

研究Ⅰ

“自己”の誤差に基づく試行間学習を調査した研究Ⅰでは、ゲームコントローラを使った実験課題を作成・実施した。この課題では、コントローラのスティックを一回だけはじくことで、モニター上に表示されるボールをターゲットに向けて打ち放つという単純な投射動作が行われた。潜在的な誤差学習を測定するために、視覚エラークランプ

（VEC）フィードバック（Morehead et al., 2017）を散発的に提示することで強制的に誤差を発生させた。VEC フィードバックでは、実際の動作方向（参加者がスティックを倒した方向）がボールの軌道方向に全く反映されず、実験者側が事前に定めた方向にボールが移動するため、一定の誤差を視覚的に提示することができる。また、VEC フィードバックの仕組みは参加者に対して事前に説明がなされ、このフィードバックが提示された際にはそのことを知らせる合図も送られる。つまり、参加者は自身の動作と無関係な誤差が表示されたことを認識しているため、その誤差を利用してスティック方向を意図的に変更することは考えにくい。VEC フィードバックが提示された次の試行で、動作がその無関係な誤差を修正する方向（i.e. 誤差と反対方向）に変化した程度を測定することにより、潜在的な試行間学習を定量できる。本研究では、投射動作を用いた実験課題に VEC フィードバックを初めて適用し、試行間学習が潜在的に引き起こされるかどうか調査した。併せて、投射動作の試行間学習を増減させる要因についても検討した。まず、リリースされたボールの移動スピードに介入することで、動作が完了してから結果が判明するまでの遅延を操作した。次に、複数のターゲット方向（動作方向；右上、真上、左上）を採用することで、動作結果のばらつきが大きい条件と小さい条件を設定した。

実験の結果、視覚誤差に基づく試行間学習が検出された。また、ボールスピード条件間での試行間学習の有意な違いは確認されなかったが、ばらつきが小さな動作（真上ターゲット条件）よりも大きな動作（左・右上ターゲット条件）において試行間学習が顕著に生じることが明らかになった。動作結果のばらつきに関する実験結果は、近年提唱されている、最適統合理論に基づく誤差学習モデルにより説明可能である（Tsay et al., 2022; Zhang et al., 2024）。このモデルでは、感覚フィードバックの情報と、動作実行によってどのような結果が得られるかという予測的な情報（事前情報）が、各情報の不確実性により重み付けられて統合され、動作結果が推定される。そして、推定された動作結果から誤差が計算され、試行間学習に至るとされる。事前情報には、動作結果のばらつきなどの過去の運動履歴が反映されるため、ばらつきが大きな動作では事前情報がより不確実になると考えられる。そのため、ターゲットからの逸脱を表す視覚フィードバックの影響力が相対的に強くなり、試行間学習の程度が大きくなる可能性がある。

研究Ⅱ

研究Ⅰで観察されたターゲット方向ごとの試行間学習の違いは、事前情報ではなく、視覚フィードバック（ボールの軌道）の違いにより説明される可能性がある。当然、真上ターゲットではボールが上方向に、斜め上（左・右上）ターゲットでは斜め上方向に移動することが多く、視覚フィードバックはターゲット条件間で同一ではない。例えば一つの可能性として、実際には同じサイズの視覚誤差であっても、斜め上ターゲット条件において誤差が大きく知覚される場合、斜め上ターゲットで試行間学習が顕著になることは否定できない。そこで研究Ⅱでは、視覚フィードバックの違いによる説明可能性を検証するため、20°の視覚運動回転を付加し、斜め上ターゲットにボールを到達させるためには真っすぐ、真上にボールを到達させるためには斜めにスティックをはじく必要のある環境を作り出した。この環境に参加者を適応させたのち、研究Ⅰのように VEC フィードバックを用いて試行間学習を評価した。この環境下での斜め上ターゲット条件では、研究Ⅰの斜め上ターゲット条件と比較して、要求されるスティック動作は異なるものの、視覚フィードバックは変化しない。したがって、ターゲット方向ごとの試行間

学習の違いが視覚フィードバックの違いに起因するならば、20°回転環境下でも斜め上ターゲットにおいて顕著な試行間学習が生じると予想される。

しかし、研究Ⅱの実験データはこの説を支持せず、20°回転環境下では真上ターゲット条件の方が試行間学習の程度が大きいことが明らかになった。動作結果のばらつきについては、視覚運動回転導入前では研究Ⅰと同様に斜め上ターゲット条件で大きかったが、導入後では真上ターゲット条件で大きいことが確認された。したがって、研究Ⅱにおいても、ばらつきが大きな動作で試行間学習が顕著に生じることが示された。

研究Ⅲ

研究Ⅲでは、研究ⅠとⅡで使用した実験課題を複数人で行う課題に拡張し、“他者”の誤差に基づく試行間学習について調査した。この実験課題では、他者と1試行ずつ交互に動作を実行し（スティックをはじき）、他者のターンのときは他者動作に伴うボールの軌道を観察した。ある試行においてVECフィードバックにより誤差を強制的に発生させ、解析ではその直後の試行の動作に着目した。連続する2つの試行では動作実行者が異なるため、この解析方法により他者の誤差に基づく試行間学習を評価することができる。研究Ⅲでは、他者の誤差の影響を増減させる要因についても検討した。今回着目したのは、観察対象との関係性（敵・味方）である。味方の誤差を観察する協力課題と敵の誤差を観察する競合課題を設定し、課題間の試行間学習の違いを調査した。

その結果、直前に観察した他者の誤差を減らす方向に自己の動作が変化しており、他者の誤差に基づく試行間学習が確認された。さらに、研究Ⅰ・Ⅱの結果と一貫して、ばらつきの大きな動作では大きな試行間学習が引き起こされることが明らかになった。一方、協力課題と競合課題の間に有意な違いはなく、味方の誤差であっても敵の誤差であっても試行間学習は生じることが示された。

総括・結論

一連の研究から、投射動作では“自己”の誤差と“他者”の誤差の両方が試行間学習を駆動することが明らかになった。加えて、自己の誤差の影響と他者の誤差の影響には、動作結果のばらつきの効果など複数の共通性が示された。このことから、“自己”の誤差と“他者”の誤差は運動指令を同様のメカニズムで更新する可能性が考えられる。

ヒトの感覚運動系は、投射動作の結果として誤差が発生すると、それが自己のものであっても他者のものであっても、動作を修正しようとする。その程度は、結果のばらつきが大きな動作において特に顕著であり、ばらつきは動作の難易度や熟練度に依存する。つまり、難しい動作や慣れていない動作ほど、自己の誤差からも他者の誤差からも積極的に学ぶという特徴が、私たちの感覚運動系には存在すると考えられる。