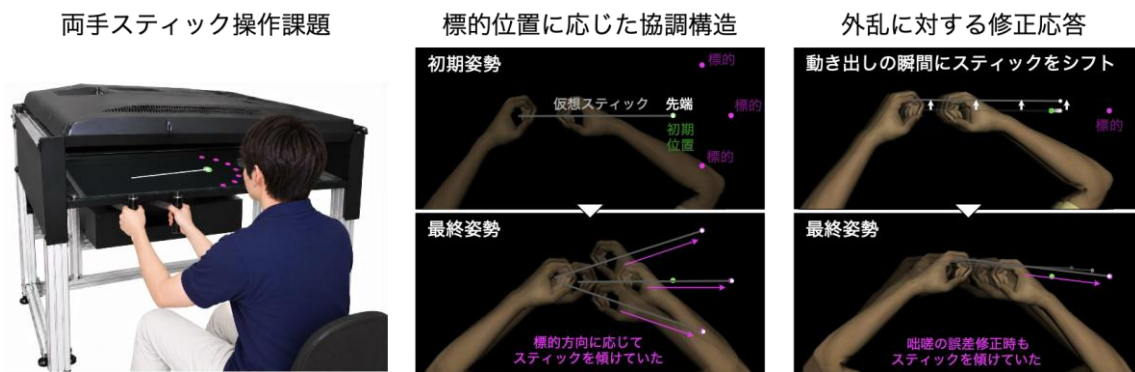


身体運動の協調構造が形づくる瞬時の運動修正 ——仮想視覚環境で実装した冗長運動課題で解明——

発表のポイント

- ◆ロボットマニピュランダムと仮想視覚環境を組み合わせ構築した、両手で道具を操作する課題を用いることで、脳の身体運動制御系が、道具に生じた視覚的誤差に対して 150 ミリ秒という極めて短い時間で自動的な修正を開始することを示しました。
- ◆道具に与える視覚的誤差を操作することで、この「咄嗟に生じる運動修正」は無数に可能な修正パターンの中から自由に選ばれるのではなく、通常の道具操作時にみられる両手の動作の「協調構造」に沿って選択されることを明らかにしました。
- ◆本成果は、脳が身体と道具を一体として制御する仕組みの理解を深め、スポーツや道具操作における技術習得や指導法を考えるための基盤となることが期待されます。



両手でスティックを操作する運動課題における協調構造と瞬時の運動修正

概要

東京大学大学院教育学研究科の小林稔季特任研究員と野崎大地教授は、道具操作中に生じる視覚的な誤差が、素早い運動修正へ変換される機序を明らかにしました。本研究では、ロボットマニピュランダムと仮想視覚環境を組み合わせ、両手でスティックの先端を標的へ動かす運動課題を構築しました。この課題では、同じ先端運動をさまざまな両手の動かし方で実現できるにもかかわらず、実際には先端の動きとスティックの傾きとの間に一貫した「協調構造」が観察されました。スティックの先端位置や傾きに様々な視覚的誤差を加えたところ、150 ミリ秒以内に自動的な修正が開始され、その修正運動も通常の道具操作時にみられる「協調構造」に沿って生じていました。これらの結果は、身体運動制御系が既存の協調構造を基盤として素早い修正運動を生成していることを示唆します。本成果は、身体と道具を一体として制御する仕組みの理解を深め、将来的にはスポーツや道具操作における技術習得や指導法を支える科学的基盤になることが期待されます。

発表内容

脳の身体運動制御システムには、極めて素早く作動する運動修正機能が備わっています。例えば、マウスを操作してカーソルを動かしている最中に、カーソルの位置を突然ずらすと、150ミリ秒以内という短い時間で修正運動が開始されます。一方、意識的にカーソルのズレを認識し、意図的に運動を修正するには300ミリ秒程度の時間を要します。このため、このような高速な運動修正は、意識的な判断を介さず、自動的に生じる反応であると考えられています。

しかし、身体には多数の関節があるため、同じ運動結果を生み出す動き方は一つではありません。例えばゴルフでは、同じクラブヘッド位置を実現する肩、肘、手首、体幹の組み合わせは無数に存在します(図1)。これを「運動の冗長性」と呼びます。クラブヘッドとゴルフボールのズレ(誤差)を修正するときも同様に、無数の修正パターンが可能です。このような無数の可能性の中から、唯一の運動修正パターンがどのように選択・生成されているのか、その仕組みは十分に分かっていませんでした。



図1：多自由度運動の冗長性

ゴルフスイングでは、無数の全身姿勢パターンで同じクラブヘッド位置が実現される。

本研究チームは、先行研究(Kobayashi & Nozaki, eLife, 2024)で開発した、ロボットマニピュランダムと仮想視覚環境を組み合わせる構築した両手で道具を操作する課題を用いて、この問題を検討しました。参加者には、両手でロボットアームを操作し、画面上の仮想的なスティックの先端を標的まで動かすよう指示しました(図2A)。この課題では、同じ先端軌道を実現するスティックの傾け方が無数に存在するという冗長性を有しています(図2B)。

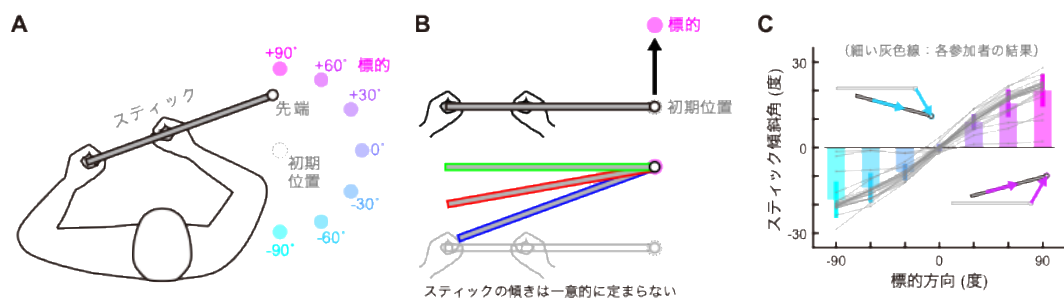


図2：冗長な両手スティック操作課題

実験参加者は両手でロボットアームのハンドルを握り、VRシステムを用いて表示された仮想的なスティックの先端を標的へ移動させる到達運動課題を行った(A)。この課題では、同じ先端軌道を実現するためのスティックの傾け方は無数に存在する(B、緑、赤、青)。それにもかかわらず、どの参加者も一様に、先端の標的方向に応じてスティックを一定の量だけ傾けるという関係(協調構造)を維持しながら課題を行っていた(C)。

ところが、参加者は一貫して、先端位置を動かす方向に応じてスティックを一定の関係で傾けながら課題を行っていました（図 2C）。これは、先端運動とスティックの傾きの間に固有の「協調構造」が存在することを示しています。先行研究では、この「協調構造」によって、先端位置の移動距離に対する両手の総移動距離を小さくできるというメリットが示されていました。その一方で、先端位置の移動方向に応じてスティックの傾きを調整し続けることは、脳の運動制御にとって複雑な処理を必要とする可能性があります。

それでは、予期しない誤差が突然生じたとき、運動修正はどのように行われるのでしょうか。我々はまず、標的への到達運動中に、画面上のスティック全体を突然ずらして呈示することで、先端位置に視覚的な誤差を与えました（図 3A）。咄嗟の修正では、通常運動時の「協調構造」に沿った複雑な修正ではなく、両手を並行に動かして先端位置を戻すような単純な修正が選択される可能性があります（図 3A 左下）。しかし実際には、参加者は約 150 ミリ秒以内の極めて短い潜時で修正を開始（図 3B）し、スティックを傾けながら先端位置を元に戻していました（図 3A 右下，図 3C）。このときの先端運動とスティックの傾きの関係は、通常運動時の「協調構造」と一致していました（図 3C）。

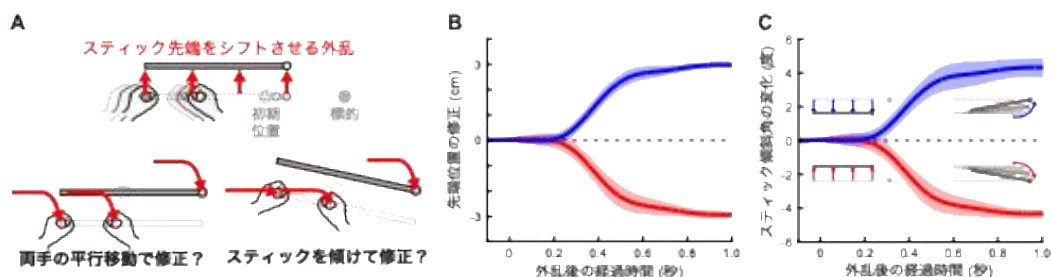


図 3：課題の成否に関する誤差に対する修正応答

標的への到達運動中にスティックの先端位置が突然シフトする外乱を与えた（A 上）。スティック傾斜角という余剰な自由度があるため、この外乱に対する修正パターンは一意的には定まらない（A 左下、右下）。参加者は約 150 ミリ秒という短潜時で先端位置の修正を開始した（B）。この素早い修正はスティックを傾かせる動作によって実現されていた（C）。

もし運動修正パターンが「協調構造」に沿って生じるのであれば、図 4A のように先端位置を変えずにスティックの傾きだけを変化させる外乱に対しても、運動修正が生じるはずです（図 4A 右下）。従来の運動制御理論では、課題の達成に直接影響しない誤差に対しては、運動制御

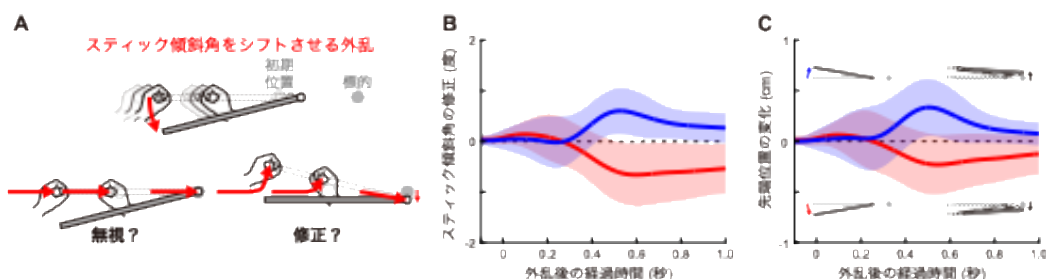


図 4：課題の成否に関与しない誤差に対する修正応答

標的への到達運動中に先端位置を変えずにスティックの傾斜角だけを突然回転させる外乱を与えた（A 上）。この外乱は先端位置に一切影響しないため無視されるかもしれない（A 左下）。一方、先端位置とスティック傾斜角との関係性が動作そのものを拘束している場合、修正されるかもしれない（A 右下）。参加者は生じた傾斜角の誤差の修正を約 150 ミリ秒という短潜時で開始した（B）。この修正に伴って、肝心の先端位置にも系統的なズレが生じた（C）。

系は応答しないと考えられてきました（図 4A 左下）。ところが、誤差を修正する必要がないのにもかかわらず、参加者は素早く両手の動作を変化させ、スティックの傾きを修正していました（図 4B）。さらに興味深いことに、この修正はスティックの傾きだけにとどまらず、課題達成に重要な先端位置にズレを生じさせていました（図 4C）。これらの結果は、通常時の運動パターンを規定する「協調構造」が、素早い自動的な誤差修正にも共通して利用されていることを示唆するものです。

さらに、先端位置とスティックの傾きに同時に誤差を与え、「協調構造」に沿った修正しやすい外乱（図 5A）と、それに逆らう方向の外乱（図 5B）に対する運動修正を比較しました。その結果、修正を開始するタイミングはほぼ同じでしたが、協調構造に沿う場合には先端位置の修正が速く、逆らう場合には遅くなることが明らかになりました（図 5C）。これは、「協調構造」が修正運動のパターンだけでなく、誤差を減らす速度にも影響することを示しています。

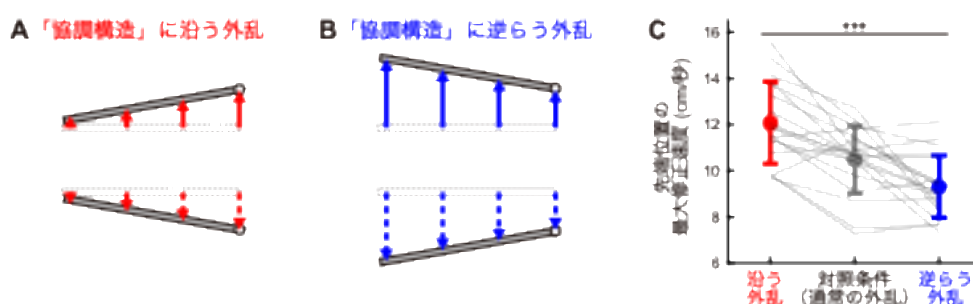


図 5：協調構造は運動修正の速度をも左右する

協調構造に沿う外乱 (A) と協調構造に逆らう外乱 (B)。両外乱に対する先端位置の修正応答速度を比較すると、協調構造に沿う外乱では修正速度が速く、逆らう外乱では遅かった (C)。

道具操作やスポーツ、リハビリテーションを含め、私たちの日常動作の多くでは、多数の身体自由度を協調させる必要があります。本研究は、複雑な身体が予期しない誤差に素早く対応する仕組みの理解を深めるものであり、将来的には、新しい運動スキルの学習過程や運動機能の回復過程など、運動制御・学習機序の解明につながることを期待されます。

なお、本研究は東京大学倫理審査専門委員会の承認（審査番号：19-225）のもと実施されました。

発表者・研究者等情報

東京大学大学院教育学研究科

小林 稔季 特任研究員

兼：ソニーコンピュータサイエンス研究所 プロジェクトリサーチャー

野崎 大地 教授

論文情報

雑誌名：The Journal of Neuroscience

題名：Fast corrective responses in redundant motor control are shaped by intrinsic constraints of movement patterns (10月19日付掲載)

著者名：Toshiki Kobayashi, Daichi Nozaki

DOI:10.1523/JNEUROSCI.0627-26.2026

URL:<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0627-26.2026>

研究助成

本研究は、日本学術振興会特別研究員奨励費（JP20J13734、JP25KJ0444）および科研費（JP17H00874、JP21H04860、JP23K10739）の支援により実施されました。

問合せ先

〈研究内容について〉

東京大学大学院教育学研究科

教授 野崎 大地（のざき だいち）

Tel：03-5841-3983 E-mail：nozaki@p.u-tokyo.ac.jp

〈機関窓口〉

東京大学大学院教育学研究科 広報担当

Tel：03-5841-3904 E-mail：edushomu.p@gs.mail.u-tokyo.ac.jp