

論文の内容の要旨

The Influence of Habituation to Visual Feedback Delay on Motor Learning, Current Hand-State Estimation, and Mass Perception

(時間遅れへの適応が運動学習・手の状態推定・質量知覚に与える影響に関する研究)

本多 卓也

【研究の目的】

神経の情報伝達には不可避的な時間遅れが存在する。それにも関わらず、我々の認知行動を見ると、その遅れを補完している事がわかる。これは神経系に予測機構が備わっていなければ達成されない。実際、その様な予測機構の存在を示唆する認知行動実験が多数報告されている。この予測機構は、脳が学習を通して獲得した外界についての情報（内部モデル）に組み込まれていると考えられる。内部モデルは様々な外界の物理特性を表象し、運動知覚経験を通して更新される。運動選手が練習を通して新しい技術を獲得する過程は、内部モデル更新の好例である。内部モデル研究として、運動学習（目標運動に対して生じる空間誤差をゼロにする様に内部モデルが更新される過程）の観点からなされる研究は多いが、時間遅れ適応という観点からなされる研究は多くない。しかし、時間遅れ研究の重要性が低いわけではない。例えば時間遅れの正確な予測に失敗すると、自分の運動を正しく自身の行為として認識できず、自身が動かした手を見ながら他者に操られていると認知してしまうこともありうる。

実験的に作り出した時間遅れに一定時間被験者を暴露すると、初めに認知していたその遅れを認知しなくなる（時間遅れ適応）。この認知変化に伴う脳活動変化などが研究されている。この様な研究は一つのリサーチクエスチョンを導く。即ち、環境変化の自覚を伴わない運動学習や運動中の手の状態推定などの、より低次の感覚運動レベルでも時間遅れ適応が生じるのか？もし生じるとするならば、その様な適応と認知レベルの変化はどう関わるか？脳のどの部位が寄与しているのか？などである。本論文の一連の研究では、特に最初の二つを解明する事を目的とした。

【研究1：時間遅れ適応が運動学習に与える影響】

被験者は、自身の手が見えない状況でハンドルを操作し、手の位置を示すカーソルをターゲットに素早く移動する課題を行った。ターゲットはスタート地点から6方向存在し、ランダムな順序で提示される。この6試行の結果を平均して1セットとした。運動学習試行中には漸増する回轉變換がかけられるので、この回転を打ち消す方向に手の軌道を修正する学習が起こる（図1 A）。カーソル遅れが存在する試行中には、2

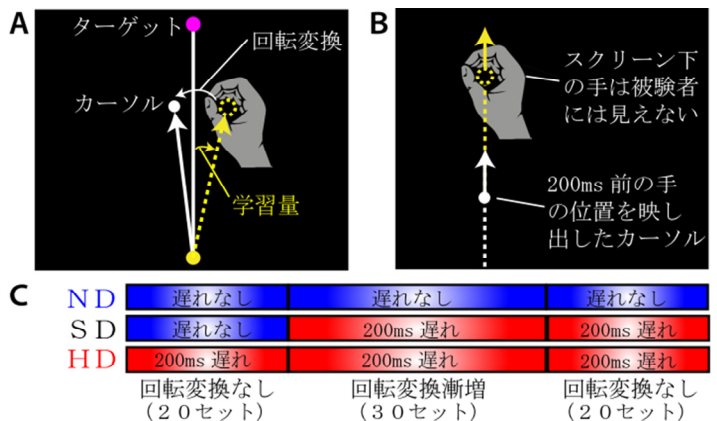


図1 研究1の方法

0 0 m s 前の手の位置が提示された (図 1 B)。カーソル遅れを導入するタイミングが異なる 3 つの実験条件が用意されたが、いずれの条件でも「回轉變換なし→あり→なし」という流れで行い、回轉變換に対する学習量を評価指標とした。遅れなし (ND) 条件では全試行でカーソル遅れがなく、遅れ挿入 (SD) 条件では 2 1 セット目以降でカーソル遅れを挿入し、遅れ適応条件 (HD 条件) では全試行でカーソル遅れが存在した (図 1 C)。実験後の聴き取りにおいて、漸増回轉變換の存在に気付いた被験者は居なかった。

実験の結果 (図 2)、ND で最も学習量が大きかったのに対し、SD ではカーソル遅れのために有意に学習量が低下した。興味深いのは、HD 条件である。2 1 セット目以降の環境は SD と全く同じであるにも関わらず、HD の運動学習量は SD のそれよりも有意に大きかった。これは、最初の 2 0 セットでカーソル遅れに適応した結果と考えられる。

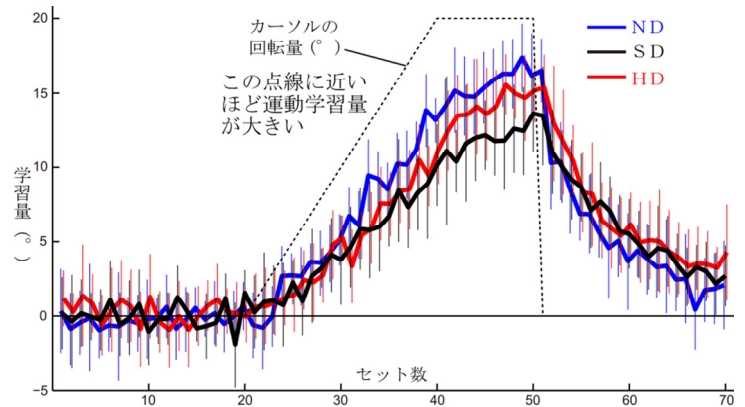


図 2 研究 1 の結果

【研究 2：時間遅れ適応と運動学習】

研究 1 で、環境変化の自覚を伴わない運動学習に遅れ適応効果が反映される事が確認された。この適応を齎したのは、予測誤差か誤差感度のどちらだろうか。これを確かめるために、再び運動学習実験を行った。今回は、カーソル回転を数試行に一回の割合で生じる様に設定し、その次の試行の学習量を評価した。本実験の特徴は、回轉變換試行のカーソル遅れが、0・100・200・300ms の 4 種類ある点である。実験条件は 2 つで、回轉變換・学習量評価試行以外の全試行が遅れなしカーソルで行われる ND 条件と、それらが 200ms 遅れカーソルで行われる HD 条件である (図 3 A)。

ND 条件における学習量はカーソル遅れに伴って有意に低下したが、HD 条件ではその様な低下が見られない (図 3 B)。これは研究 1 の知見と一致する。興味深いのは、カーソル遅れが 100ms 以下の回轉變換学習では条件間の差が見られない事である。これは、予測誤差と誤差感度の両方の寄与で、遅れ適応効果が運動学習に反映されている事を示唆する。

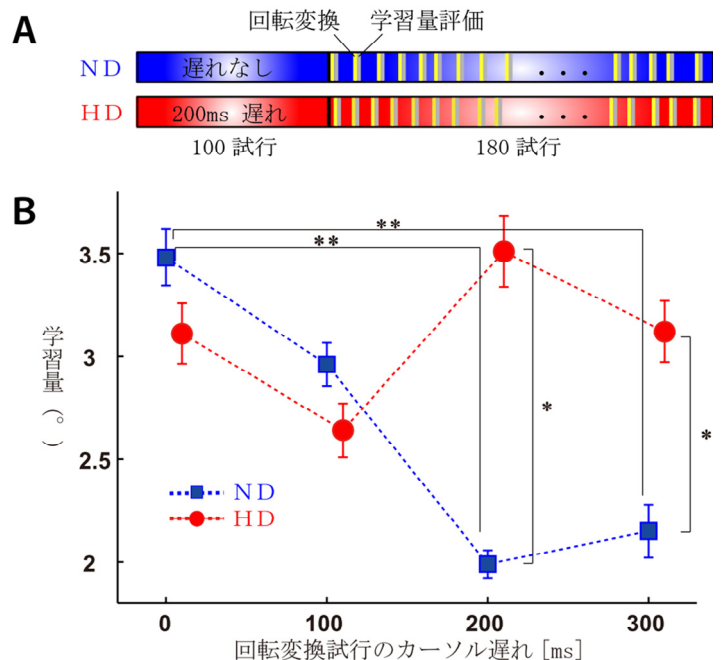


図 3 研究 2 の方法 (A) と結果 (B)

【研究3：時間遅れ適応と手の状態推定】

予測誤差の変化について観察するために、運動学習課題ではなくターゲットジャンプ (TJ) 課題を課した。被験者は、前方に提示されるターゲットにカーソルを入れる様に手を伸ばす (図4A；ジャンプなし試行)。数試行に一回の割合で、手の動き出しと同時にターゲットが±20° どちらかの位置にジャンプした (図4A；TJ試行)。この試行において被験者は、即座に新たなターゲット位置に向かって軌道修正をせねばならない。この修正運動指令は、脳が推定している手の状態に依存するはずなので、修正軌道が脳でなされる推定を表現する。実験条件は2つで、TJしない全試行が遅れなしカーソルで行われるND条件と、それらが200ms遅れカーソルで行われるHD条件である (図4B)。TJ試行中のカーソル遅れは、0msと200msの二種類設けた。つまり、ND条件中の0ms遅れTJ課題 (ND₀) と200ms遅れTJ課題 (ND₂₀₀)、HD条件中の0ms遅れTJ課題 (HD₀) と200ms遅れTJ課題 (HD₂₀₀) がある。

TJ試行の全被験者の平均軌道を、図4Cに示す。ND₀に比べND₂₀₀の軌道は大きく前方にオーバーシュートしている。これは、カーソルの遅れによって手の推定位置が実際よりも後方だと脳が推定した結果と考えられる。ところが、HD₂₀₀の軌道はND₀と酷似している (軌道修正前半)。これは、200ms遅れに適応した結果、予測誤差が減少した事を示す。

【研究4：時間遅れ適応と質量知覚】

視覚フィードバック遅れが質量知覚に与える影響を定量化するため、抵抗レバーを操作するリーチング課題を課した。抵抗は9段階あり、それぞれ1・2・3・4・5・6・7・8・9kgの物体を押す事と等しい。カーソル遅れは、0・100・200・400・800msの5段階であった。試行ごとに、質量値・カーソル遅れがランダムに一つずつ選ばれた。この状況で、被験者は675試行を繰り返し行い、試行終了ごとに「これまでの試行で経験した平均質量よりも重いか」をYes/Noで回答した。各カーソル遅れごとに心理物理曲線をフィッティングして、Yes率50%となる質量 (PSE) を同定した。遅れ0ms試行のPSEとその他のPSEが比較され、遅れ0ms試行に比した時のPSE増加量がカーソル遅れごとに算出された。24名の結果の平均を図5に示す。200msと400msのカーソル遅れがある時に、視覚フィードバック遅れの影響による有意な質量知覚増加が生じた。800msでその様な有意な増加が生じないのは、過度な遅れでは視覚情報への参照率が低下するためと考えられる。

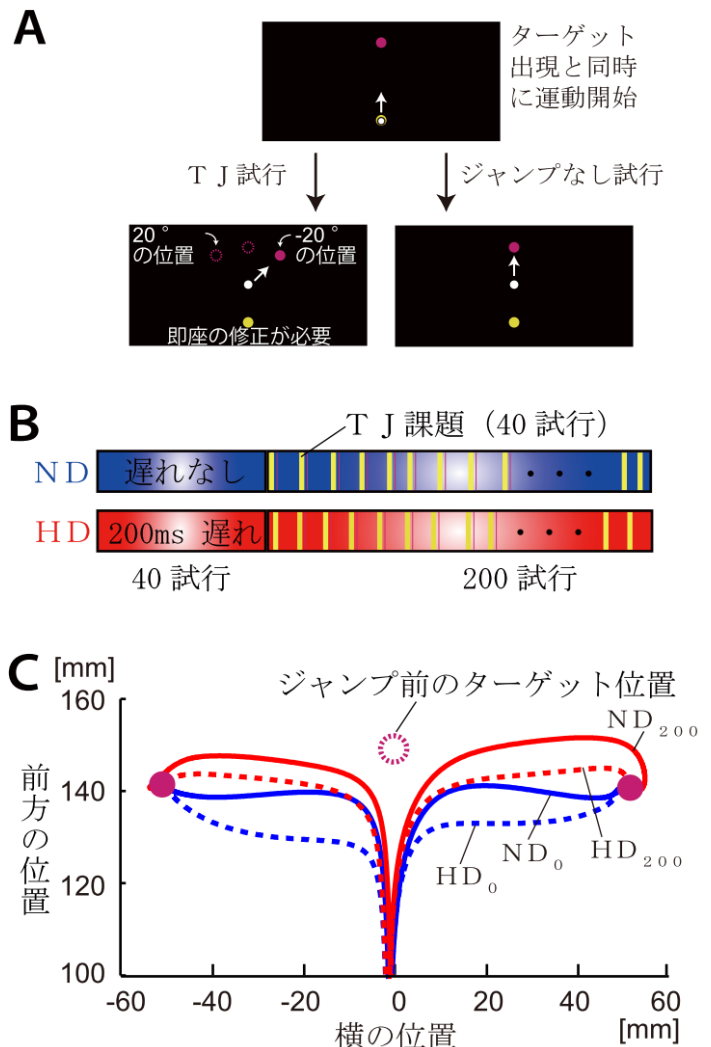


図4 研究3の方法 (A、B) と結果 (C)

200ms遅れカーソルで有意に増加した質量知覚は、遅れへの適応による予測誤差減少に伴って減少するのか？これに答えるために、次の実験を行った。質量3kgに設定された右手レバーで前方のターゲットに手を伸ばす単純試行の中に、10試行程度に一回の割合で質量比較試行を行った。この試行では、200ms遅れカーソル・質量3kgに設定されたレバーを右手で操作した後、カーソルなし・質量1or3or5kgに設定されたレバーを左手で操作する。これらが終了した時点で、「右手の方が重いか」をYes/Noで回答した。実験条件は2つで、単純試行を0ms遅れカーソルで行うND条件と200ms遅れカーソルで行うHD条件である。実験の結果、ND条件における右手の質量知覚よりも、HD条件のそれが有意に減少する事が分かった(図6)。研究3の結果も合わせて考えると、遅れ適応による予測誤差減少が、視覚フィードバック遅れに伴う質量知覚の増加を抑制する事を示唆する。

【結論】

本研究を通して、環境変化の自覚を伴わない運動学習や運動中の手の状態推定などの、より低次の感覚運動レベルでも時間遅れ適応が生じる事が明らかとなった。また、視覚フィードバックの遅れが存在する時、物理的には時間遅れとは独立した要素である「重さ」が増加したと誤認する事、その誤認は遅れ適応に伴って減少する事が示された。

時間遅れ存在下での機器操作は、運動とその知覚に乖離を生み出し、ヒューマンエラー可能性を増大させる。特に、莫大な費用をかけた宇宙開発における遠隔ロボットアーム操作や人命に関わる遠隔操作医療の現場では、時間遅れを克服しヒューマンエラーを回避する事が一つの課題となっている。運動修正能力に加え、遅れ知覚や重さ知覚が時間遅れに適応する事で緩和されるという事実は、時間遅れに起因するヒューマンエラーを効率的に回避する上で、重要なヒントを与える。

一方、今後の課題も明らかとなった。遅れに適応する事で手の状態推定が変化する事は示されたが(研究3)、それが運動学習率の変化(研究1・2)に直接影響を与えているのか？本研究で生じた適応は、脳のどこで生じているのか？また、研究1～4を通して一貫して用いられたカーソル操作課題において、適応のための“手がかり”は何だったのか？などの検討材料が残されている。

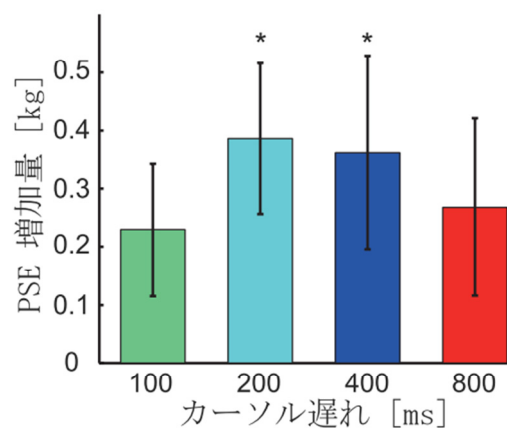


図5 カーソル遅れに伴う質量知覚増加量

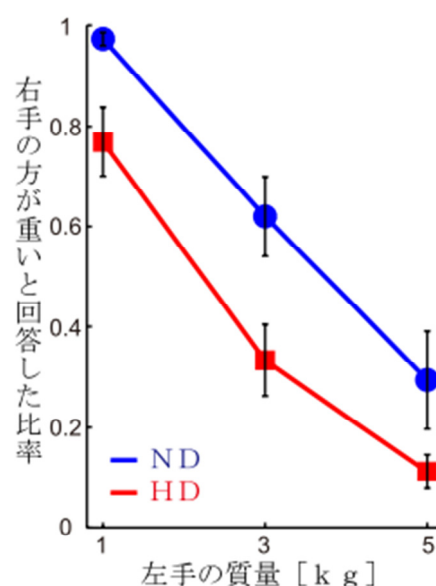


図6 質量比較試行の結果