

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2014

課題番号：26750387

研究課題名(和文)階層的運動学習システムの解明

研究課題名(英文)Hierarchical motor learning system

研究代表者

池上 剛 (Ikegami, Tsuyoshi)

独立行政法人情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター脳情報通信融合研究室・研究員

研究者番号：20588660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：運動学習過程は、運動計画と運動実行の2つの学習過程に依存する。両者の関係を調べるためには、運動実行だけでなく、運動計画の学習プロセスを賦活させる必要がある。運動計画の目標指向性を考慮し、終点で大きなターゲットエラー(失敗)が生じる力場を新たに開発し、ターゲットエラー存在下のリーチング運動軌道の変化を調べた。実験の結果、失敗が生じた後は、ターゲットエラーを減らすように運動軌道が素早く変化した。さらにその力場の脱学習後には、学習前のベースライン(直線)軌道とは異なる軌道に収束した。この結果は、運動実行の学習過程の階層的上位にkinematicな運動計画の学習過程が存在することを示唆する。

研究成果の概要(英文)：It is controversial whether the motor system utilizes kinematic plans (e.g. movement trajectory) to produce voluntary movements. We develop new force field learning tasks by arm reaching movements inducing large target errors (i.e. task failure) and isolate a learning process of kinematic plan driven by failure. We found that in the presence of target errors, the reaching trajectory did not show a monotonic change observed in the absence of target errors but a non-monotonic change ensuring a rapid reduction in the target error and that the appearance of target errors in the de-adaptation period caused a new steady-state trajectory, distinct from the baseline trajectory, despite the same no-force field environment. The established internal model learning process can explain our observations by including a hierarchical interaction with a kinematic plan learning process modulated by the task failure, thus showing a behavioral evidence for the kinematic plan utilized by the motor system.

研究分野：運動学習

キーワード：階層学習 運動計画

1. 研究開始当初の背景

新しい運動を学習するためには、目標を実現する運動計画と、その計画を遂行する運動指令を学習する必要がある。たとえ良い運動計画でも、計画通り実行されなければ目標は達成されず、計画通り実行されても、粗悪な計画では効率が悪い。故に、運動学習過程は、目標指向的な運動計画と、運動計画指向的な運動実行の2つの学習プロセスの両者に依存すると考えられる。

運動学習における運動計画と運動実行の学習プロセスの関連は不明である。それは、両プロセスが共に活性化し、それらを実験的に操作できる課題を用いて研究が行われてこなかったことに起因する。従来の到達運動学習研究は、運動途中で手先が乱されるがターゲットには到達可能な力場課題を主に用いてきた。目標が常に達成される環境では、運動実行のプロセスのみが活性化し、運動計画の学習プロセスが活性化しない。そこで我々は、運動計画の学習プロセスを活性化させるために、失敗を誘起する力場課題を開発し、運動学習過程における運動計画と運動実行の学習プロセスの関連を調べた。

2. 研究の目的

我々は、「運動学習は、課題が失敗した場合に更新される運動計画の学習プロセスと、運動計画の実現を目的とした運動指令の学習プロセスからなる階層システムによって実現されている」という階層的運動学習システム仮説を立てた。この仮説を実験と計算シミュレーションによって検証することを目的とする。

3. 研究の方法

階層的運動学習システム仮説を検証するためには、運動実行だけでなく、運動計画の学習プロセスを賦活させる必要がある。そこで、終点で大きなターゲットエラー（失敗）が生じる力場を新たに開発し、ターゲットエラー

存在下のリーチング運動軌道の変化を調べた。具体的には、運動途中で外乱が最大になるのではなく、ターゲット付近で外乱が最大になる力場を開発した。

4. 研究成果

実験の結果、獲得される運動記憶が、運動計画と運動実行に対応する階層的な2つの学習プロセスによって構成され、それらの相互作用によって形成されることを示唆する興味深い2つの行動学的結果を得た。

まず、課題が失敗した直後の試行で、力場を過補償する程大きな軌道の修正が観察された。左向き力場の学習では、被験者の軌道は、最初は、ターゲットの左側に逸れて、大きなターゲットエラー（失敗）を生じる。すると、次の試行では、前の試行とは逆方向の右向きの弧を描くように大きく軌道を修正した。この大きな軌道修正は、直前の試行で、被験者の手先が上手くターゲットに到達せずに、課題を失敗した場合に常に観察された。この結果は、たとえ軌道は曲がっていても、課題が成功（ターゲットへの到達）していた場合に活性化していた学習プロセスだけでなく、課題が失敗した場合に活性化する別の学習プロセスが存在する可能性を示唆している。

さらに、さらに興味深い現象が、力場学習後の脱学習過程（力場なし環境下で課題を行う）において観察された。力場環境から力場なし環境に移行する際、力場学習の後効果（after effect）によってターゲットに到達できず課題を失敗するため、次の試行では軌道が大きく修正される。さらに課題を継続すると、運動はある曲線軌道に収束した。この軌道は、力場学習前に力場なし環境下で観察される直線軌道とは明らかに異なっていた。その曲線軌道は20分以上も保持されたことから、単なる力場学習の後効果の持続では説明できない。むしろ、課題の失敗を誘起する力場学習前後において、異なる運動計画によって異

なる運動が実行されたことを示唆している。

この興味深い学習動態は、課題の失敗によって活性化する運動計画の学習プロセスと、運動計画を実現するための運動実行の学習プロセスが階層構造をもって相互作用すると仮定することで説明できる。課題が成功している間は、運動計画は変更されず、その計画を効率よく実現するための運動実行のみが学習される。一方、課題が失敗した場合は、素早く課題を達成するために運動計画が変更されるため、大きく早い軌道修正が可能になる。力場学習後の脱学習過程でも失敗によって運動計画が変更されるが、一旦成功すると運動計画は一定になる。その運動計画は、学習前の運動計画(直線軌道)とは異なっていたため、結果的に曲がった軌道が長時間持続して生成されたと考えられる。

実際に、従来の運動実行の学習モデル(Izawa et al., 2008)を下位階層とし、失敗に応じて更新される運動計画の学習プロセスを上位階層に追加した階層的運動学習モデルを構築して計算シミュレーションを行ったところ、実験結果を上手く説明できた。さらに、課題が常に成功する環境下で脱学習する場合をシミュレーションしてみたところ、上位階層の運動計画は変化せず、下位階層の運動実行プロセスだけが脱学習し、学習前の運動計画(直線軌道)とは異なる軌道(右に弧を描く緩やかな曲線)に収束することがわかった。

階層的運動学習システム仮説の妥当性をさらに検証するため、常に課題の成功を保証する新しい力場を開発した。この環境下では、運動の前半は力場がないが、後半以降はスタートとターゲットを結ぶ直線からのずれに比例した力が中央方向にかかり、手先がターゲットへと誘導される。先に述べた実験は、失敗を誘起する力場学習後の脱学習過程では力場なし環境を用いていたが、本研究では

この力場を用いる。重要なことは、どちらも運動前半は力場がかからないため、前半の運動軌道によって、失敗の有(以前の実験)・無(本研究)による力場の脱学習過程への影響を比較検証できる。上述した実験では、脱学習過程の始めで生じた課題の失敗によって運動計画が修正された結果、左に弧を描いた曲線軌道によって課題が成功したため、その軌道が長時間持続したと考えられる。しかし、この新しい力場を用いれば、運動計画は変更されずに、運動実行の学習プロセスが獲得した学習効果だけが脱学習される。その結果、予備的解析で行なったシミュレーション結果に従い、運動軌道は、右に弧を描く緩やかな曲線に収束すると予測される。

実際、この予測は実験的に実証された。よって、一連の実験とシミュレーションの結果より、失敗によって活性化する運動計画の学習プロセスと、その運動計画を達成するための運動実行の学習プロセスが階層的に相互作用することによって、運動学習が進んでいることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：

権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池上 剛 (IKEGAMI, Tsuyoshi)
独立行政法人 情報通信研究機構 脳情
報通信融合研究センター 脳情報通信融
合研究室 研究員
研究者番号：20588660

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：