

階層的多重順逆モデルによる運動学習における認知の影響の説明

上田一貴 妻藤公啓 滝公介 前田新一 向内隆文

1 はじめに

運動調節及び学習の重要な一側面を説明できるモデルとしてフィードバック誤差学習モデルは脳内の具体的な構造との関連を比較的詳細に想定しており、かつ多くの実験データに支持されているという理由で広く受け入れられつつある。また、この枠組はその発展型として多重順逆モデル(MPFIM)、及びその階層化といったモデルを産みだし、より微妙な運動学習の特徴について説明することが可能になった。

私たちは、この枠組みのなかで、自己と道具の知覚認知による区別などのより高次の機能の関与がどのように表現されているか説明できないか、という問題意識をもち、一つの実験データに注目した。それは、赤司、阪口(信学技報, NC99-174, 2000)に報告されたランプ型変換に対する適応がその偏位に対する認識の有無の影響を受けるという発見である。偏位の存在に気付いた被検者では、After Effectがなく、意図的に運動を切り替えていたことが示唆されたのだが、私たちは、このような切り替え可能性の有無が自己の体の一部の運動の内部モデルと道具の運動の内部モデルの差として重要なのではないかと考え、その由来がMPFIMの階層化された構造でうまく説明出来るのではないかというアイデアを得た。また、fMRIによって脳の活動部位をそれぞれ同定することで、このアイデアを支持するデータをとることが出来ないかと考えた。

2 方法と結果の解釈

2.1 微小一段階ステップ型偏位の繰り返し課題による After Effect の解析

被検者は椅子にすわり、目標への手先の到達運動を行うが、観察できるのは鏡を通して見ることに出来る手先位置に応じて移動するレーザースポット光投影位置のみである(赤司、阪口, 信学技報, NC99-174, 2000)。この状態で、被験者の約半数が気付かない程度のステップ型の偏位を一定時間繰り返し与え、その After Effect を観察し、気がついた人と気がつかなかった人で After Effect の差を見る。あるいは、この2群にさらに予め偏位を加えることを知らせた群を加える。

先行研究からの類推により、気がつかなかった人では After Effect がでて気がついた人では After Effect が見られないだろうと予測している。問題は After Effect が出た人でそれが徐々に減少するか、それとも毎回同じ程度であるか、ということである。

気がつかなかった人で、この到達運動を可能にしている運動制御形式は、単一の順逆モデルと、MPFIM(さらに、2層に階層化して上層は単一モジュール)のどちらがより適当か、という問題に対して、単一の順逆モデルでは After Effect そのものが次第に減少することを説明できないという点で一つの解答を与えると期待している。ただし、After Effect が変化しなかったときはどちらともいえない。

2.2 fMRI による解析

私たちは、赤司、阪口(信学技報, NC99-174, 2000)に報告された、偏位の認識が After Effect の生成を抑制するという所見にたいし、次のような説明を試みた。まず、After Effect の生成は、その際使われている運動制御系が素早い転換を前提としていないものであることを示唆しており、それはすなわち通常運動特性の急激な変化がありえない自己の体の内部モデルに適していると言える。それにたいして偏位に気がついて After Effect がみられない例では運動特性の切り替えが意識的に可能な運動制御系、すなわち道具使用に適した内部モデルであるとも考えることも出来るのではないかと考えた。すなわち、後者においては、少なくとも2層の階層化 MPFIM を考える必要がある。簡略化のために次のように考える。第1層の MPFIM は2つのモジュールからなると考え、第1のモジュールは本来の手の動きの制御系でありこれに第2のモジュールの出力を1:1で足し合わせると偏位に対応できるとする。

このとき、前章で After Effect の変化がないのはこの足し合わせの重みを変化できないがゆえに第2のモジュールの内容を書き換える必要があるという状況に対応し、After Effect が低減すれば上位のモジュールで学習がおこりうることを表わしている。さらに、気がついて一瞬で切り替わるのは上位のモジュールに知覚認知に関連する文脈信号の入力があり、それによって起こったと考える。また、第1層 MPFIM の第2モジュールなどの各モジュールについても、認知のありなしで小脳の異なった場所が使われる可能性もある。

以上の仮説を支持するデータを得る目的で、この到達運動における脳活動部位を fMRI を利用して解析することを考えた。fMRI のセッティングについては、Imamizu et al. (Nature, 2000) を参考にする。ただし、手先の動きを検出するシステムとタスクは、前出の赤司、阪口のタスクに則る。

内部モデルが獲得される小脳の位置を同定するために、次のようにベースライン条件、テスト条件を決める。

1. ベースライン条件通常の到達運動をおこなう。習熟時の fMRI 像を使用する。
2. テスト条件ランプ型の偏位を加える。習熟時の fMRI 像を使用する。

どちらの条件についても、習熟時には到達誤差がほとんどないことから、誤差信号が十分小さいと仮定している。誤差信号の成分が無視できないと考えられる時には、ベースライン条件では移動距離を大きくとるなどして誤差信号が同じになるように工夫する。

テスト条件下での活動部位からベースライン条件下での活動部位を引いて、獲得された内部モデルがコードされていると考えられる領域を割り出す。

気がついている条件と気がついていない条件について比較して見る。また、最初から知らせた群についても同じようにデータを取り、比較することも出来る。

小脳外の部位でも活動部位に差が見られないか検討する。認知が何らかの形で関与していることは明らかなので、どの部位あるいは経路が特に関与するのかについて示唆が得られる可能性がある。

3 考察

3.1 或る仮想的な結果とその意味について

fMRI 実験によって、偏位に気がついていない条件では小脳内側部(虫部)に主として信号が見られたが、偏位に気がついている条件では小脳半球に主として信号が見られる、という所見が得られた場合、小脳半球には意識的な切り替えが利きやすい内部モデルが生成されるという仮説を立てることが出来る。これは、極論する

とこの領域は道具使用を可能にする領域である，と言い替えることもできるだろう．十分な小脳半球の量が進化の過程で獲得されたことが人間に複雑な道具使用を可能ならしめた，といえるのかもしれない．

3.2 階層的 MPFIM の実証について

十分に到達運動に習熟した時点ではもはや上位層のモジュールは活動していないとも考えられるため，以上の実験では上位モジュールの局在を fMRI で示すことは出来ないが，偏位を加えつつある状態での fMRI 信号をうまく解析することが出来れば，上位モジュールについても示唆が得られる実験を組むことが出来るかもしれない．