LJ-002

反転を伴うトラッキング課題における学習とその転移
Learning and Transfer in Inverted Tracking Tasks

小堀 聡†
Satoshi Kobori

1．まえがき

わたしたち人間が何かの運動をする際には，ある状況に対する知覚のもとでそれに協応する運動を行い，学習する．そうした運動の制御や学習における感覚・知覚系と運動系との対応関係に関わる認知機能を知覚運動協応（perceptual motor coordination）と呼ぶ[1)，2)]．たとえば，わたしたちが視覚によって捉えた空間のある位置に自分の手を差し伸べるようなとき，適切な筋肉の命令を生成しなければならないが，そのためには，視覚入力と適切な運動出力との写像関係を獲得しておく必要がある．

しかしながら，わたしたちはそのような写像規則を発達の過程で学習により獲得しているので，感覚運動変換（visuomotor transformation）を通常何の努力もせずに用いることができる．そこで，研究上の手法として，そうした感覚運動変換を一時的かつ擬似的に破壊する方法が用いられる．そのような例として有名なのがプリズムの順応実験である．これはプリズムを介して視野をずらした状態で到達運動を行わせても，試行を繰り返すことにより正しく目標に手を伸ばせるようになるというものである．つまり，この実験により，感覚・知覚系と運動系の新しい対応関係に順応していく過程を調べることができる．このような新規の感覚運動変換の学習について研究を行った例としては，トラッキング課題において，ポインティング・デバイスの操作方向とカーソルの移動方向との関係が反転するもの[3)，4)]や回転しているもの[5)]などがある．

本研究では，運動課題として上肢トラッキング動作を用いて，試行の途中においてジョイスティックの操作方向とカーソルの移動方向との関係が反転する場合に，被験者がいかにその反転への対応を学習するかを調べる．このような課題は，新規の感覚運動変換すなわち，感覚・知覚系と運動系の新しい対応関係を学習することを要求する．ここでは文献３）および４）と同様，反転については，左右反転，上下反転，上下左右反転という３種類を用いる．

本論文では，反転を伴うトラッキング課題に対して被験者が学習すること，また，その制御成績は反転の種類によって異なることを示すとともに，先行学習が後行学習に影響を及ぼす，学習の転移（transfer of learning）[6)，7)]は正と負がともに観察されることを確認する．そして，どのような場合に正と負の学習の転移が見られるかを分析することにより，学習の転移に関わる要因について考察する．

2．実　験

2.1　実験システム

実験システムは，市販のパーソナルコンピュータ（デル：Dimension 4100，PentiumⅢ 1GHz，128MB，40GB，Windows 98SE）とディスプレイ（エプソン：15 型 TFT 液晶ディスプレイ LCV-15MAT，1024×768 画素），ジョイスティック（サンワサプライ：トラックボール TB-350PS），トラッキング動作測定ソフトウェアで構成されている．これらのうち，ジョイスティックは，市販のトラックボールに鉛直のスティックを取り付けたものを用いた．また，トラッキング動作測定ソフトウェアは，独自に開発したものであり，制御値データとして刺激提示用ディスプレイの座標値（ｘ軸方向およびｙ軸方向，単位は画素数）がサンプリング周波数 30Hz で得られる．なお，ディスプレイは鉛直面に設置されているので，被験者がジョイスティックを自分自身に対して前後方向に動かすと，カーソルはディスプレイ上を上下方向に動くことになる．

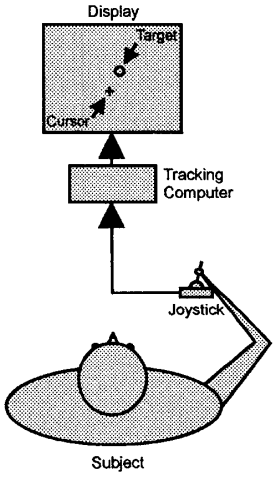

図１　実験システム

2.2　実験方法

トラッキング課題として，ディスプレイ上を動くターゲットをカーソルで追従する動作を行わせる．目標値を示すターゲットは直径 44 画素（13mm）の円で，制御値を示すカーソルは一辺 44 画素（13mm）の十字で表示される．ターゲットはあらかじめ作成，保存された目標値データに基づき，直径 500 画素 （148mm）の円周上で規則的な運動（時計回りの等速円運動．周期は５ s）を繰り返す．一方，十字のカーソルは，ジョイスティックで制御される．視距離は 66cm である．

トラッキング課題には通常課題と反転課題がある．通常課題とはジョイスティックの操作方向とカーソルの移動方向が一致しているものである．一方，反転課題には，左右反転，上下反転，上下左右反転の３種類があり，ジョイスティックの操作方向とカーソルの移動方向の関係が，それぞれの方向において試行途中で反転する（たとえば，左右反転であれば，ジョイスティックを右に動かすと，カーソ

†龍谷大学理工学部, Ryukoku University

ルは左に動くが，上下方向の関係は変わらない．一方，上下反転では，ジョイスティックの前後の操作方向とカーソルの上下の移動方向の関係が通常とは反転する）．また，いずれの課題においても，動作中の手や腕の姿勢についての違いはなく，すべての実験条件で統制されている．

1回の試行時間は 40s で，測定は通常課題で開始されるが，試行開始後 14s から 20s までの間のランダムな時刻に反転するように設定した．なお，一度反転するとその試行の終了まで反転の状態が続く．被験者には，「ジョイスティックを操作して，十字のカーソルをできるだけ正確にターゲットに合わせるようにし，反転している間もできる限り最善を尽くしなさい．」という指示を与えた．

15 回の試行を1セットとし，被験者には左右反転，上下反転，上下左右反転のうちの2種類を1セットずつ（合計2セット 30 回）行わせるが，1セット 15 回の試行の中に反転課題 10 回と通常課題5回がランダムに出現するようにした．実験の総測定時間は約 30 分である．

18 歳から 23 歳までの健常な大学生 60 名（男性 43 名，女性 17 名）を被験者とした．それらの被験者を，左右反転，上下反転の順に行うA群，上下反転，左右反転の順に行うB群，左右反転，上下左右反転の順に行うC群，上下左右反転，左右反転の順に行うD群，上下反転，上下左右反転の順に行うE群，上下左右反転，上下反転の順に行うF群のそれぞれ 10 名ずつの実験群に分けて実験を実施した．この実験デザインにより，前半の先行学習が後半の後行学習にどのような影響を及ぼすかという学習の転移について調べることができる[7]．

実験に先立ち，被験者には実験に関する調査票に記入をさせた．質問項目は，年齢，学部・学科・学年の他，利き手と視力に関することであり，利き手についてはペンを持つ，箸を使う，ボールを投げるなどが異なるかどうか，視力については眼鏡やコンタクトレンズの使用の有無についても尋ねた．その結果，すべての被験者について，利き手は右であること，また，裸眼もしくは眼鏡・コンタクトレンズの使用により，本実験を行うのに充分な視力（両眼で 0.7 以上）を有していることを確認した．

2.3 解析方法

基本的には反転課題を解析の対象とする．制御成績を示す評価値として，反転後の目標値と制御値との2次元平均絶対誤差（単位は mm）を算出する．

まず，反転の種類による違いを明らかにするため，実験の前半のセットの解析を行う．実験の前半のセットについては，A群とD群が左右反転，B群とF群が上下反転，C群とE群が上下左右反転と同じ課題なので，それらをまとめて，それぞれ 20 名ずつの左右反転群，上下反転群，上下左右反転群とする．そして，評価値の試行回数による変化を表すために，これらの群別に平均と標準偏差を算出する．

次に，学習の転移について明らかにするため，先行学習のない前半のセットを対照群とし，先行学習の影響を受けた後半のセットを実験群とする．実験の後半のセットについても，それぞれ 10 名ずつのA群～F群において群別に平均と標準偏差を算出する．そして，対照群と実験群のデータを比較する．

3．結　果

3.1 反転の種類による違い

左右反転群，上下反転群，上下左右反転群について，2次元平均絶対誤差の試行回数による変化を学習曲線として図2のグラフに示した．グラフ中の点はそれぞれの試行での平均を，上向きまたは下向きの線は標準偏差を示している．

図2より，各群とも明らかな学習効果が認められること，3つの群を比較すると，2次元平均絶対誤差の大きさは，左右反転，上下左右反転，上下反転という順序であることが分かり，反転の種類による違いが確認できた．このことは課題自体の困難さと学習の相対的な困難さを示している．

なお，以上に関しては，t検定を用いて有意差検定を行った．その結果，左右反転群と上下反転群の間，および左右反転群と上下左右反転群の間では，すべての試行において危険率1％の水準で，左右反転群の値が上下反転群および上下左右反転群の値よりも有意に大きいことが示された．一方，上下左右反転群と上下反転群の間では，第1回，第7回，第9回，第 10 回の試行において危険率5％の水準で，上下左右反転群の値が上下反転群の値よりも有意に大きいことが示された．

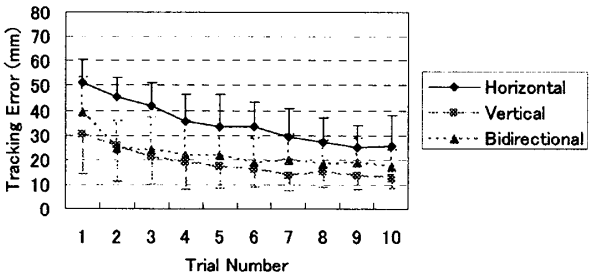

図2　反転の種類による学習曲線の比較

3.2 学習の転移

A群～F群については，後半のセットの2次元平均絶対誤差の試行回数による変化を，対応する対照群のデータとともに図3～図8のグラフに示した．また，対照群と実験群のデータを比較するため，t検定による有意差検定を行った．なお，図中の*と**は，対照群と実験群とを比較して，危険率5％あるいは1％の水準で統計的に有意差が認められるものをそれぞれ示している．

これらのグラフから，以下のことが分かる．

(1) 左右反転の後の上下反転では，誤差が大きい傾向は見られるものの，負の転移はあまり明確でない（図3）．

(2) 上下反転の後の左右反転では，誤差が顕著に大きく，明確な負の転移がある（図4）．

(3) 左右反転の後の上下左右反転では，誤差が顕著に小さく，明確な正の転移がある（図5）．

(4) 上下左右反転の後の左右反転では，誤差にあまり差がなく，正・負とも転移は見られない（図6）．

(5) 上下反転の後の上下左右反転では，誤差が小さい傾向が見られ，少し正の転移が見られる（図7）．

(6) 上下左右反転の後の上下反転では，誤差が大きい傾向が見られるものの，負の転移はあまり明確でない（図８）．

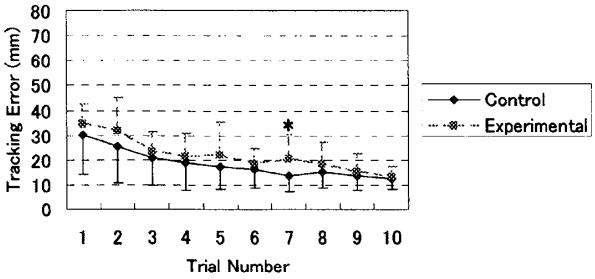

図３　左右反転の後の上下反転（A群）

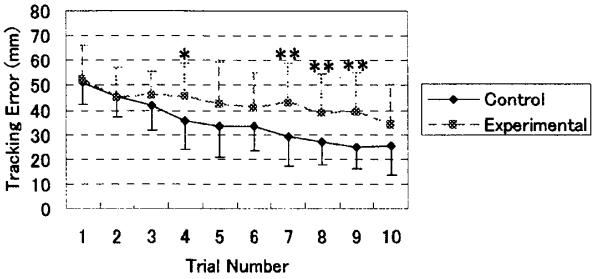

図４　上下反転の後の左右反転（B群）

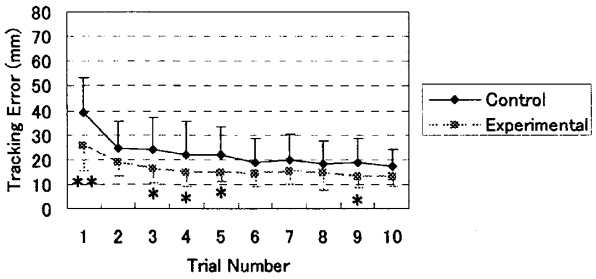

図５　左右反転の後の上下左右反転（C群）

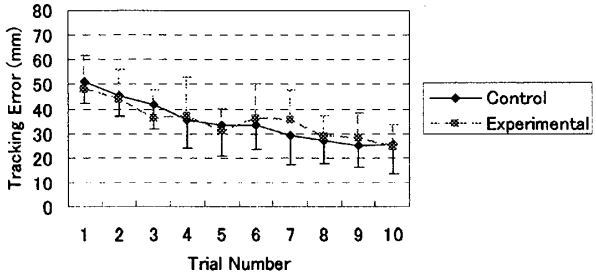

図６　上下左右反転の後の左右反転（D群）

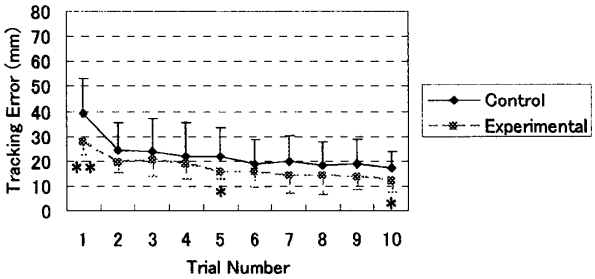

図７　上下反転の後の上下左右反転（E群）

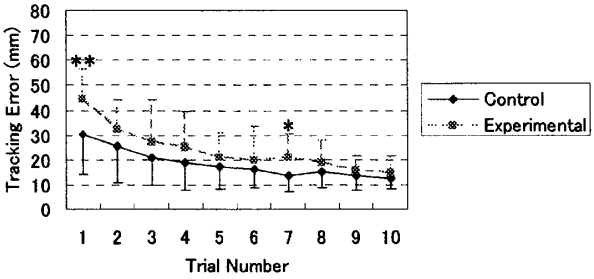

図８　上下左右反転の後の上下反転（F群）

４．考　察

4.1　反転の種類による違い

実験結果より，被験者はトラッキングにおいて予測不可能な反転が生じても，新規の感覚運動変換の写像関係を学習することができること，また，反転要素の種類によって制御成績や学習過程には差異が見られることが分かった．

まず，左右反転群と上下反転群を比べると，左右反転群の方がトラッキング誤差が大きく，制御が困難であることが分かる．左右反転と上下反転を比較した例としては，吉澤らの実験[3]と筆者らの実験[4]がある．吉澤らの実験は２次元の振幅の大きなランダム・ステップ状信号を用いた補償型の制御（目標値と制御値の偏差が表示されるもの）であるが，左右反転の方が制御成績が悪いことが示されている．この理由として，上下反転に対する再反転は大脳の片半球だけで行えるのに対して，左右反転に対する再反転は半球間の連絡が脳梁を通じて密接になされなければならず，それだけ時間がかかることによるという仮説を提案している．一方，筆者らの実験は２次元のランダム連続信号を用いた追従型の制御（目標値と制御値がそのまま表示されるもの）であり，そのような方向による違いは見られなかった．この理由として，被験者は連続的に変化する目標をわずかな動作で追従するだけだから，吉澤らの説明が当てはまらないと考えた[4]．一方，今回の実験は，規則的な連続信号を用いた追従型の制御であるが，左右反転の方が制御が困難であるという結果が得られたのは，目標の移動速度が速く，被験者が大きな誤差を修正する動作を行わなければならず，吉澤らの実験に近い制御であるからであると考えられる．

また，上下左右反転群は，左右反転群と比べると明らかに制御成績が良く，上下反転群と比べてもほぼ同じぐらいの評価値である．これらの結果は筆者らの先行研究[4]と同様，上下も左右も反転していることは，むしろ概念的に取り組みやすいことを示していると考えられる．すなわち，上下左右反転では，通常の課題と反対方向にジョイスティックを回せばよいことから，比較的早くこつをつかむことができ，また一度こつをつかむと安定して制御することができると推察される．

4.2 学習の転移

実験結果より，先行学習と後行学習の組み合わせによって，正の転移と負の転移のどちらともが明確に観察されることが分かった．しかも，その転移は一時的なものではなく，学習過程のある範囲で見られるものであった．このことは，特に負の転移について「運動技能課題で負の転移の実験的証拠を見つけることはかなり難しく，見つけられたとしても，しばしばはかないものである」という従来の報告[8]からすると大変興味深い結果であるといえる．

さて，どのような場合に正や負の転移が見られるかについては，一般的な原則[6]として「正の転移は，２つの課題が類似した刺激事態への反応として，類似または同一の運動を含む時に最もみいだされやすい」とされ，「負の転移は，２つの課題が類似した刺激事態に対して拮抗的または両立不可能な反応を要求する時に最も観察されやすい」とされる．ここではまず，この原則が実験結果に当てはまるかどうかを検討する．

左右反転と上下反転は「拮抗的または両立不可能」に当てはまるが，明確な負の転移が見られるのは，上下反転の後の左右反転についてのみであり，転移の非対称性については説明できない．

左右反転と上下左右反転，あるいは，上下反転と上下左右反転は，「類似または同一の運動を含む」なのか「拮抗的または両立不可能」なのかの判断は難しい．正の転移が見られれば類似しているとみなし，負の転移が見られれば拮抗的とみなすということも可能かもしれないが，ここでも転移の非対称性が見られ，上記の原則だけでは説明できない．

実験結果からは，どのような時に正または負の転移が観察されるかは，単に２つの運動が類似しているか拮抗しているかだけでなく，課題の難易度や学習の順序も影響すると推察される．

すなわち，左右反転と上下反転は拮抗的であるため，負の転移の傾向が見られるが，上下反転の後の左右反転についてのみ明確な負の転移が観察されるのは，左右反転を先に行う場合は課題の困難さのために学習が充分でなく，後の上下反転にあまり影響を及ばさないのではないかと考えられる．

また，１方向反転の学習の後の２方向反転の学習では，学習の正の転移が見られるが，これは１方向の反転については先に学習した分が転移し，さらに１方向分の反転の学習は追加されるだけで干渉していないと解釈できる．また，より学習が困難な左右反転の方が，後の上下左右反転の学習への効果が大きいと考えられる．

一方，２方向反転の学習の後の１方向反転の学習では，少なくとも明確な正の転移は見られないが，これは先に比較的容易な上下左右反転を学習したことが，１方向反転の学習に対して妨害・干渉していると考えられる．

5．まとめ

本研究では，被験者実験により，反転を伴うトラッキング動作を測定し，その学習過程を調べ，また，学習の転移について検討した．その結果，反転を伴うトラッキング課題に対して被験者が学習すること，また，その制御成績は反転の種類によって異なることを示すとともに，学習の転移は正と負がともに見られることを確認した．そして，学習の転移に関わる要因について検討した結果，従来より言われていた単に課題の類似や拮抗という点だけでなく，課題の難易度や学習の順序も転移に関係してくることが示唆された．

運動学習の分野において内部モデル[5]は近年重要になりつつある概念であるが，写像規則の獲得は内部モデルを学習する過程であるともいえる．今後，本研究で示されたような感覚運動変換の学習における転移が，どのような理由で起きるのかについて，運動学習における内部モデルの形成やそのモジュール性との関係を踏まえて検討していく必要がある．なお，筆者らは関連研究として，ターゲットもしくはカーソルが試行途中で示されなくなるトラッキング課題を題材として，内部モデルのうちの指標モデルと運動モデルを区別する実験[9]を実施している．

謝辞：本研究は 2004 年度 龍谷大学国外研究員の期間にまとめられたものです．関係者の方々に感謝申し上げます．

参考文献

1）阪口 豊：知覚・運動協応，日本認知科学会（編）：認知科学辞典，541, 共立出版，(2002).

2）McLeod, P.（半田 智久訳）：知覚運動協応，Eysenck, M. W. (Ed)，野島 久雄他訳：認知心理学事典，261-266, 新曜社，(1998).

3）吉澤 誠，二坂 広美，竹田 宏，大友 仁，鴻巣 武，佐藤 元，大坂 和久：人間オペレータの制御 特性の異方性と脳の両側性，医用電子と生体工学，26(4)，9-17, (1989).

4）小堀 聡：反転要素を制御対象とした上肢トラッキング動作の学習過程，人間工学，28(5)，243- 249, (1992).

5）Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Puetz, B., Yoshioka, T. and Kawato, M.: Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool, Nature, 403, 192-195, (2000).

6）Mazur, J. E.（磯 博行訳）：運動技能の学習，メイザーの学習と行動（日本語版第２版），311-312, 二瓶社，(1999).

7）Schmidt, R. A. and Lee, T. D.: Retention and Transfer, Motor control and learning: a behavioral emphasis (3rd ed), 385-408, Human Kinetics (1999).

8）Blais, C., Kerr, R. and Hughes, K.: Negative Transfer or Cognitive Confusion, Human Performance, 6(3), 197-206 (1993).

9）小堀 聡，阿部 陽祐：消滅を伴うトラッキング課題における運動制御と学習，日本認知科学会第 24 回大会発表論文集，126-131, (2007).