

トラッキング課題における学習とその転移

— 知覚・認知と身体運動の関係を考える —

Learning and Transfer in Tracking Tasks

小堀 聡¹

Satoshi Kobori¹

¹龍谷大学工学部電子情報学科

¹Department of Electronics and Informatics, Ryukoku University

Abstract: We have used suppressed tracking tasks and inverted tracking tasks and studied the learning processes and transfer of learning in order to investigate perceptual motor coordination. In suppressed trials, either the target or the manual cursor was suppressed for a brief period during each trial. In inverted trials, the relation between joystick movement and target movement was inverted at an unpredictable time during each trial. These tasks require learning a novel sensorimotor transformation. We have used this approach to discuss the internal models used during tracking, and their updating during motor learning. The results suggested hierarchy and modularity of the internal models.

1. まえがき

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、学習するが、そのような感覚・知覚系と運動系との対応関係や相互協調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]. そうした知覚運動学習の研究には、古くからトラッキング課題の実験がよく用いられてきた[3].

本研究では、知覚運動協応、すなわち知覚・認知と身体運動の関係を考察するため、消滅あるいは反転を伴うトラッキング課題を設定した。これらの課題の学習過程と学習の転移を分析し、内部モデルの階層性やモジュール性についても検討した。

1.1 トラッキング課題と内部モデル

トラッキング動作において、被験者は操作器を動かして、ディスプレイ上のカーソルをターゲットに合わせようとする。被験者は、ターゲットとカーソルが離れると、その距離が小さくなるように操作する。つまり、視覚フィードバックによる誤差修正に頼ることになる。

しかし、トラッキング動作は純粋にフィードバック制御だけではなく、予測が関わるということが示されている。ターゲットの動きが予測可能な場合には制御成績が良くなる[3]のは当然であるし、さらには、ターゲットやカーソルが表示されず、誤差が検

出できないときでさえ、正確な制御ができることもある[4].

一方、知覚運動協応の観点から考えると、たとえば、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、感覚入力と適切な運動出力との写像規則を獲得しておく必要がある[2]. わたしたちが感覚運動変換 (sensorimotor transformation) を通常何の努力もせずに用いることができるのは、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からである。

トラッキング課題での学習の問題については、近年運動学習の分野において重要な概念になりつつある、内部モデル (internal model) [5-7] と関連づけて議論することができる。内部モデルとは、脳外に存在する、ある対象の入出力特性を模倣できる中枢神経機構のことをいう。一般的に、与えられた入力からシステムの出力を推測するモデルを順モデル (forward model)、その逆に、システムの出力から与えるべき入力を推測するモデルを逆モデル (inverse model) という。

内部モデルが存在することを示す研究例はいくつもあるが、近年の研究では、課題の学習の前後での脳活動が比較され、その差異は内部モデルの学習の結果として解釈されている。たとえば、今水らは、回転マウスという課題を用いて、新規の感覚運動変換を学習するときの小脳活動を調べる実験を行い、

内部モデルを反映すると考えられる脳活動を捉えた[8]。しかし、彼らの実験方法では、内部モデルの働きと視覚フィードバックの役割を区別することができない。また、そのような内部モデルが表しているものは何か、どれだけの数のモデルが関わっているのかなどは不明確である。

計算論的に考えるならば、正確なトラッキング動作には、現在のターゲットの位置とカーソル(手)の位置の表現が必要となる。すなわち、トラッキング動作には2種類の順モデルが関わると考えられる。1つはそれまでの運動の情報に基づいてターゲットの位置を推測するモデルであり、もう1つは運動命令や自己受容感覚フィードバックに基づいて手やカーソルの位置を推測するモデルである。ここでは、前者を視標順モデル(target forward model)、後者を運動順モデル(motor forward model)と呼ぶことにする。

さらに、トラッキング動作には逆モデルも関わると考えられる。すなわち、望ましい位置にカーソルを表示(出力)するための運動命令を算出する逆モデルである。ここでは、これを運動逆モデル(motor inverse model)と呼ぶことにする。

1.2 消滅を伴うトラッキング課題

本研究において、消滅を伴う課題には、ターゲット消滅とカーソル消滅の2種類があり、それぞれ、ターゲットもしくはカーソルが、ある時間だけ表示されない。

トラッキング動作における視標順モデルと運動順モデルの違いを検討するのに有効な方法として、ターゲット消滅とカーソル消滅の効果を比較するというのが考えられる[9]。

ターゲット消滅やカーソル消滅の間はターゲットとカーソルが同時に表示されないので、誤差信号を視覚的に検出することができない。つまり、消滅の間のトラッキング動作は内部モデルのみに頼ることになる。ターゲットが消滅している場合は、ターゲットについての表現は、それまでの動きから現在の位置を予測する視標順モデルから得られるものだけである。逆に、カーソルが消滅している場合は、カーソルについての表現は、現在の運動命令や自己受容感覚情報から現在のカーソルの位置を予測する運動順モデルから得られるものだけである。

ターゲットもしくはカーソルが消滅していても、それらが再出現すれば、視覚フィードバックによる誤差信号が再び得られる。この誤差信号はターゲット消滅においては視標順モデルの、カーソル消滅においては運動順モデルの修正・更新に使われるに違いない[10]。被験者が試行を繰り返し行えば、これ

らのモデルが修正・更新され、消滅を伴うトラッキング課題の制御成績が改善されると考えられる。

1.3 反転を伴うトラッキング課題

本研究において、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。

このような課題は、感覚運動変換を一時的かつ擬似的に破壊することに相当し、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とになる。

こうした研究上の手法はよく用いられるが、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。

トラッキング課題において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、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[11-15]や回転しているもの[8]などがある。

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。すなわち、どの反転であれ、反転方向において逆向きに操作しなければ望ましい制御ができない。したがって、それぞれの反転に対応した運動逆モデルを獲得する必要がある。

1.4 学習の転移と内部モデル

消滅課題の実験では、ターゲット消滅とカーソル消滅とのトラッキング動作の違いを明らかにすることに焦点を当てている。もしターゲット消滅とカーソル消滅が制御成績や学習において差異を示すならば、ターゲット消滅とカーソル消滅についての異なるモデルの存在を支持する証拠となる。それゆえ、ターゲット消滅およびカーソル消滅での制御誤差を測定し、学習過程を分析する。さらに、ここでは、学習の転移(transfer of learning)[16-18]を調べることによって、トラッキング動作の学習に関わる視標順モデルと運動順モデルの関係について考察する。

また、反転課題の実験では、被験者がそれぞれの反転課題を学習すること、すなわち、それぞれの運動逆モデルを獲得すること、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、運動逆モデルの観点からも考察する。

2. 実験

2.1 実験システム

図1に示した実験システムは、市販のパーソナルコンピュータ（デル：Dimension 4100, Pentium III 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。

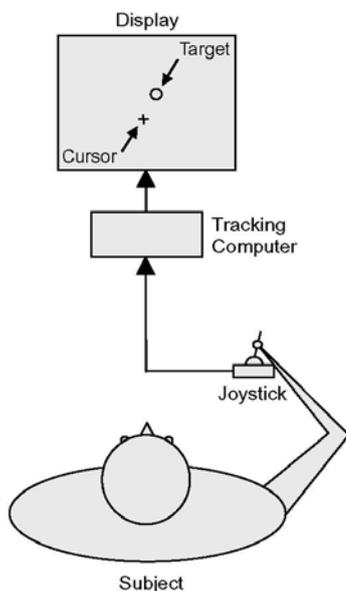


図1 実験システム

2.2 実験方法

2.2.1 実験課題

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 (周期は 5 s) を繰り返す。一方、カーソルは、ジョイスティックで制御される。

トラッキング課題には通常課題、消滅課題、反転課題がある。通常課題とは、消滅や反転を伴わないものである。

消滅課題には、ターゲット消滅とカーソル消滅の 2 種類があり、それぞれ、ターゲットもしくはカーソルが、ある時間だけ表示されない。本実験では、いずれも 1 回の試行時間は 20s で、ターゲットやカーソルは、試行開始後 5 s から 7 s までの時刻において消滅し、11s から 13s までの時刻に再び出現するように設定した。なお、消滅と再出現の時刻は、それらの範囲内でランダムに決定されるようになっている。

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。1 回の試行時間は 20s で、測定は通常課題で開始されるが、試行開始後 11.5s から 12.5s 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なさい。消滅 (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。

2.2.2 被験者

消滅課題では、19 歳から 24 歳までの健常な大学生 20 名 (男性 10 名, 女性 10 名) を、反転課題では、18 歳から 24 歳までの健常な大学生 60 名 (男性 30 名, 女性 30 名) を被験者とした。

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、本実験を行うのに十分な視力 (両眼で 0.7 以上) を有していることを確認した。

2.2.3 実験条件

ここでは 5 回の試行を 1 ブロックとし、実験は、

テスト前 (pre-test) ブロック, 学習ブロック, テスト後 (post-test) ブロック, 転移ブロックから構成される. テスト前ブロックとテスト後ブロックでは, 通常課題をそれぞれ1ブロックずつ実施する. また, 学習ブロックと転移ブロックとは, 異なる種類の課題をそれぞれ6ブロックと2ブロック実施する. こうした実験デザインにより, 学習ブロックでの先行学習が転移ブロックで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[18].

消滅課題では, 被験者20名を, T-C群とC-T群の10名ずつ(男女5名ずつ)の実験群に分けた. 学習ブロックと転移ブロックについては, T-C群では, ターゲット消滅, カーソル消滅の順に, それとは逆に, C-T群では, カーソル消滅, ターゲット消滅の順に実施した.

反転課題では, 被験者60名を, A群からF群までの10名ずつ(男女5名ずつ)の実験群に分けた. 学習ブロックと転移ブロックについては, A群では, 左右反転, 上下反転の順に, B群では, 上下反転, 左右反転の順に, C群では, 左右反転, 上下左右反転の順に, D群では, 上下左右反転, 左右反転の順に, E群では, 上下反転, 上下左右反転の順に, F群では, 上下左右反転, 上下反転の順に実施した.

実施に際しては, 各ブロックの間に約1分程度の休憩を挿入し, 被験者が疲労しないように心がけた. なお, 実験の総測定時間は約40分である.

2.3 解析方法

2.3.1 消滅課題

(a) 誤差データの波形

各試行における消滅と再出現の時刻をそれぞれの基準(0s)とし, 目標値データと制御値データからそれらの2次元絶対誤差データ(以下, 単に誤差データ, 単位はmm)を算出する. 消滅および再出現について, それぞれ-4.0sから4.0sまでの範囲において, ブロックごとにすべての試行(5試行×被験者10名)を同期加算し, 平均した波形を実験群別に描いた.

(b) 平均誤差の算出

誤差データの波形から誤差の増加の特徴を示す範囲を定め, 評価値を算出する. その結果, 消滅の時刻から再出現の時刻の2.0s後までの誤差データの平均を算出し, 制御成績の評価に用いることにした.

(c) 学習の転移

平均誤差について, 実験群(T-C群, C-T群)とブロック(学習ブロック, 転移ブロック)を要因とした分散分析を行った.

2.3.2 反転課題

(a) 誤差データの波形

各試行における反転の時刻を基準(0s)とし, 目標値データと制御値データからそれらの2次元絶対誤差データ(以下, 単に誤差データ, 単位はmm)を算出する. -4.0sから6.0sまでの範囲において, ブロックごとにすべての試行(5試行×被験者10名)を同期加算し, 平均した波形を実験群別に描いた.

(b) 平均誤差の算出

誤差データの波形から誤差の増加の特徴を示す範囲を定め, 評価値を算出する. その結果, 反転後4s間の誤差データの平均を算出し, 制御成績の評価に用いることにした.

また, 反転の種類による違いを明らかにするため, 学習ブロックの解析を行う. 学習ブロックについては, A群とC群が左右反転, B群とE群が上下反転, D群とF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, 評価値のブロック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した.

(c) 学習の転移

学習の転移について明らかにするため, 先行学習のない学習ブロックを対照群とし, 先行学習の影響を受けた転移ブロックを実験群とする. 転移ブロックについても, 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した. そして, 対照群と実験群のデータを比較した.

3. 結果

3.1 消滅課題

3.1.1 誤差データ

誤差データの波形により, 次のようなことが分かった.

- (1) いずれの実験群においても, 誤差は消滅までは小さく, 通常課題の誤差とは違いはない.
- (2) 消滅後, 再出現の直後まで誤差は少しずつ単調に増加していく. カーソル消滅の方が, 消滅からしばらくの間の増加は急である. 誤差は再出現の直後から急速に減少し, 消滅前のレベルに戻る.
- (3) 最も重要なことは, 消滅している間の誤差は, 学習ブロックによって変化するという点である. ターゲット消滅では, 学習ブロック1~3

の誤差は、学習ブロック4～6までと比べて明らかに大きい。それに対して、カーソル消滅では学習ブロックによる違いは見られるものの、その違いはそれほど明確ではない。

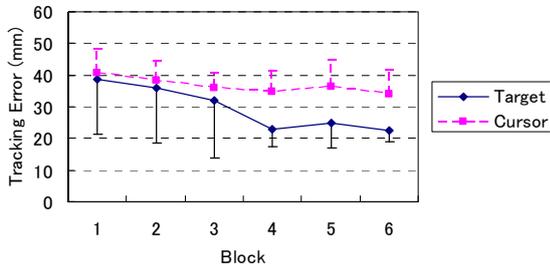


図2 消滅課題の学習曲線 (Target : ターゲット消滅, Cursor : カーソル消滅)

次に、ターゲット消滅とカーソル消滅について、平均誤差のブロックによる変化を学習曲線としてグラフに示した (図2)。

また、平均誤差についての学習効果を調べるために、実験群 (T-C 群, C-T 群) とブロック (学習ブロック1, 学習ブロック6) を要因とした分散分析を行い、学習ブロック1と学習ブロック6での平均誤差の比較を行った。その結果、まず、ブロックによる主効果が見られ ($F(1, 18) = 11.514, p = 0.003$), 学習ブロック1よりも学習ブロック6が有意に小さいことが示された。また、実験群による差はなく ($F(1, 18) = 3.701, p = 0.070$), 交互作用もなかった ($F(1, 18) = 1.859, p = 0.190$)。すなわち、いずれの実験群においても消滅課題に対して学習効果が認められた。

3.1.2 学習の転移

平均誤差について、実験群とブロックを要因とした分散分析を行った。その結果、まず、実験群については、C-T 群が T-C 群よりも制御成績が優れるという有意傾向が示された ($F(1, 18) = 4.188, p = 0.056$)。また、ブロックについては、転移ブロックの方が学習ブロックよりも有意に制御成績がよく ($F(1, 18) = 0.401, p = 0.021$), 全体として、有意な学習の転移が見られた。さらに、もっとも重要な点として、明確な交互作用が認められた ($F(1, 18) = 11.341, p = 0.003$)。そこで、この交互作用について下位検定を行った (図3)。その結果、T-C 群、すなわち、先にターゲット消滅を学習し、あとでカーソル消滅を学習した実験群では、有意な転移が見られなかったが ($t(18) = 0.001, n. s.$), それに対して、C-T 群、すなわち、先にカーソル消滅を学習し、あとでターゲット消滅を学習した実験群では、有意な

正の転移が認められた ($t(18) = 2.460, p = 0.024$)。

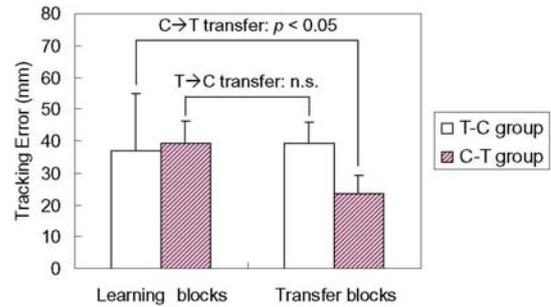


図3 消滅課題の学習の転移

3.2 反転課題

3.2.1 誤差データ

左右反転群, 上下反転群, 上下左右反転群について、平均誤差のブロックによる変化を学習曲線としてグラフに示した (図4)。

この図より、各群とも明らかな学習効果が認められること、3つの実験群を比べると、学習の初期では、平均誤差の大きさは、左右反転, 上下左右反転, 上下反転という順序であるが、第6ブロックではほとんど変わりはないこと、が分かった。このような反転の種類による違いは、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では、第1ブロックから第5ブロックまでにおいては危険率5%の水準で、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、また、第6ブロックにおいては両者に有意差がないことが示された。一方、上下反転群と上下左右反転群の間では、すべてのブロックにおいて有意差がないことが示された [15]。

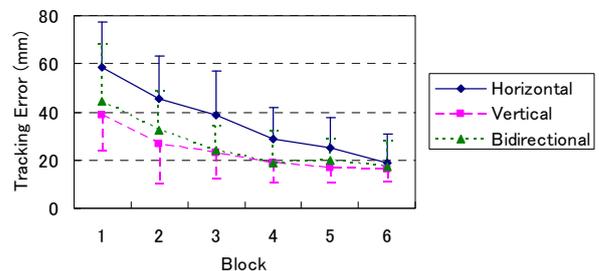


図4 反転課題の学習曲線 (Horizontal: 左右反転, Vertical: 上下反転, Bidirectional: 上下左右反転)

3.2.2 学習の転移

対照群と実験群のデータを比較するため、 t 検定

表1 反転課題の学習の転移

対照群 (学習ブロック)	実験群 (転移ブロック)	t-value	p	転移の有無
左右反転 (A群+C群)	上下反転→左右反転 (B群)	-0.059	0.476	転移なし
	上下左右反転→左右反転 (D群)	1.327	0.095	正の転移傾向
上下反転 (B群+E群)	左右反転→上下反転 (A群)	-1.289	0.099	負の転移傾向
	上下左右反転→上下反転 (F群)	-1.698	0.047	負の転移
上下左右反転 (D群+F群)	左右反転→上下左右反転 (C群)	2.249	0.014	正の転移
	上下反転→上下左右反転 (E群)	-0.148	0.441	転移なし

による有意差検定を行い、その結果を表にまとめた(表1)。この表から、以下のことが分かる。

- (1) 左右反転の後の上下左右反転では、明確な正の転移が見られる ($p < 0.05$)。
- (2) 上下左右反転の後の左右反転では、正の転移の傾向が見られる ($p < 0.10$)。
- (3) 上下左右反転の後の上下反転では、明確な負の転移が見られる ($p < 0.05$)。
- (4) 左右反転の後の上下反転では、負の転移の傾向が見られる ($p < 0.10$)。

4. 考察

4.1 消滅課題

実験結果より、ターゲット消滅とカーソル消滅の両方の実験条件において、消滅している間について誤差の減少が見られることから、明確な学習効果を認められた。ターゲットやカーソルが消滅している場合は、フィードバックによる誤差修正が不可能であるので、消滅課題での制御成績の改善は、ターゲットの動きや被験者自身の手の動きについての内部表現を学習したと考えられる。多くのトラッキング課題の研究によりトラッキング動作における運動学習は本質的に予測的であるということが示されている[19]。それゆえ、トラッキング動作の制御成績が改善されたことは、被験者が予測することを学び、練習することで予測が改善されたからであるといえる。

次に、学習の転移について調べた結果、被験者自身の手の動きについての学習(カーソル消滅)から、ターゲットの動きについての学習(ターゲット消滅)への明確な転移が示されたが、その逆には転移はなかった。このことは2つの重要なことを示唆している。1つは、運動制御についての内部モデルを学習することと、外界の事象を一般的に予測する過程は

明確に異なるということである。もう1つは、視覚運動制御は階層的な構造になっていることを示唆しているということである。

すなわち、被験者がカーソル消滅のトラッキングをしている際には、被験者自身の手の動きの運動順モデルを学習しているが、この内部モデルの獲得は、同時に外部環境の純粋に知覚的な事象についての学習も含んでいる。なぜならば、被験者がターゲットの動きについての内部モデルを持っていることが求められる、のちのターゲット消滅のトラッキングで、うまく制御ができたからである。それとは逆に、被験者がターゲット消滅のトラッキングをしている際には、ターゲットの動きの知覚的な予測をする視標順モデルを学習しているが、この内部モデルの獲得は、被験者自身の運動制御についての学習を支援しない。なぜならば、被験者が運動順モデルを持っていることが求められる、のちのカーソル消滅のトラッキングでは、うまく制御できなかったからである。

以上のことより、基本的な内部モデルの観点からすれば、運動学習には外部の知覚学習を含んでいる、もしくは、少なくとも知覚学習を一般化している、ということ推察される。逆に、外部環境の知覚学習は、運動学習とは明確に異なる性質のものであると考えられる。

心理学の理論は受動的な知覚から相互作用的な知覚へとパラダムシフトしている[20, 21]。本実験の結果から、自分自身の動きの内部表現についての学習は、外部の知覚世界の学習に重要な役割を果たしていることが示唆される。

4.2 反転課題

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、見つけれたととしても、しばしばはかないものである」という従来の報告[22]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[17]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。

明確な正の転移は、左右反転の後の上下左右反転においてのみ見られ、有意傾向まで含めると、その逆の上下左右反転の後の左右反転でも正の転移の傾向が見られたが、これらの正の転移は、上下左右反転に含まれる左右反転の要素が「類似または同一の運動」となっていると解釈できる。

一方、明確な負の転移は、上下左右反転の後の上下反転においてのみ見られ、有意傾向まで含めると、左右反転の後の上下反転でも負の転移の傾向が見られたが、これらの負の転移は、上下左右反転に含まれる左右反転の要素もしくは左右反転それ自体が上下反転と「拮抗的または両立不可能」な関係になっていると解釈できる。しかし、それぞれの逆の順序において負の転移は見られず、このような転移の非対称性は、上記の原則だけでは説明できない。

以上の実験結果からは、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、正の転移および負の転移のどちらの場合も、より制御が困難な左右反転の要素が関わっていることに注目すべきである。

左右反転は制御の困難さゆえ、先行学習と後行学習に共通している場合は、正の転移が生じるので、対称性が見られたと考えられる。

一方、左右反転と上下反転は拮抗的であるといえるが、左右反転もしくは上下左右反転の後の上下反転について負の転移が観察されるのは、左右反転の要素の学習の痕跡[17]が強く残り、後の上下反転に影響を及ぼすが、逆に、上下反転を先に学習する場合は、学習の痕跡があまり強くないために、後の左右反転もしくは上下左右反転に影響しないと考えられる。

反転課題における新規の感覚運動変換の学習は、各課題の運動逆モデルを学習する過程であるともいえる、学習の転移は複数の運動逆モデルの切り替えの

問題[23]として考察できるであろう。本実験で観測された転移の現象は、エキスパート混合モデルでのゲートモジュールによる選択よりも、MOSAICモデルでの逆モデルの出力の調整の方が説明しやすいように思われる。

今後、本実験で示されたような学習の転移が、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獲得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。

5. あとがき

本研究の結果は以下のようにまとめられる。

消滅課題の実験では、ターゲット消滅とカーソル消滅の間の非対称な学習の転移が示されたが、これはそれぞれの条件での異なる内部モデルの存在とそれらの内部モデルの階層的な関係を示唆している。また、運動学習と知覚学習の関係についても興味深い結果が示された。

反転課題の実験では、反転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なる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され、内部モデルのモジュール性との関係も示唆された。

最後に、紙面の都合で触れることができなかった、本研究に関連した事項について紹介しておきたい。

運動学習は自動化 (automaticity) とも関連する問題である。運動学習における自動化は、課題遂行そのものに心的資源を必要とする制御的処理からそれを必要としない自動的処理へと変容し、学習が進むにつれて、認知的負荷が軽減されていくことに関連しているとされる。そこで、消滅課題および反転課題の実験において、制御誤差を測定すると同時に認知的負荷の指標として瞳孔径を測定し、学習に伴う瞳孔反応の変化を分析した。その結果、学習とともに減少する散瞳量は自動化を示す可能性が示唆された[13, 15]

また、これらの実験においては、アイカメラ (ナックイメージテクノロジー社 EMR-8BNL) を用いて眼球運動についても測定している。眼球運動を測定することにより、どのようなタイミングでどのような情報を獲得しようとしているのかという認知過程を推察することができるが、詳細な分析はまだ行っていない。

さらに、各課題の実験においては、実験終了後に

被験者に対してインタビューを行い、「何かコツをつかんだか？ そのコツはどのようなものか？」を尋ねている。その結果、ほとんどの被験者が何らかのコツをつかんだと述べた。ただし、どのようなコツであるかについては、言語化の上手下手もあり、詳細な分析はまだできていない。

一方、学習についての個人差は随分と大きく、すぐに学習する被験者とそうでない被験者がいた。こうした個人差と言語化に能力にどのような関係があるのかについては、メタ認知の問題と関連して大変興味深いので、今後分析してみたいと思っている。

さて、トラッキング動作は単純な動作ではあるが、スポーツや楽器の演奏などで示される人間の巧みな運動技能の基本的特性を持っていると考えられるので、身体知の基礎研究として位置づけられると考えている。今後は、楽器の演奏などについても研究を発展させていきたい。

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，共立出版，p.541，(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，新曜社，pp.261-266，(1998)
- [3] Poulton, E. C.：Tracking skill and manual control, Academic Press, (1974)
- [4] Beppu, H., Nagaoka, M., Tanaka, R.：Analysis of cerebellar motor disorders by visually guided elbow tracking movement, 2. Contribution of the visual cues on slow ramp pursuit, *Brain*, Vol.110, pp.1-18, (1987)
- [5] Wolpert, D. M., Kawato, M.：Multiple paired forward and inverse models for motor control, *Neural Networks*, Vol.11, pp.1317-1329, (1998)
- [6] Wolpert, D. M., Miall, R. C., Kawato, M.：Internal models in the cerebellum, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.2, pp.338-347, (1998)
- [7] 今水 寛：運動学習と道具の使用，乾 敏郎，安西 祐一郎編：運動と言語，岩波書店，pp.1-28，(2001)
- [8] Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Puetz, B., Yoshioka, T., Kawato, M.：Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool, *Nature*, Vol.403, pp.192-195, (2000)
- [9] Kobori, S., Haggard, P.：Internal Models and Transfer of Learning in Pursuit Tracking Task, *Proc of The European Cognitive Science Conference 2007*, pp.498-503, (2007)
- [10] Kawato, M., Gomi, H.：A computational model of four regions of the cerebellum based on feedback-error-learning, *Biological Cybernetics*, Vol.68, pp.95-103, (1992)
- [11] 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*, Vol.26, No.4, pp.9-17, (1989)
- [12] 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*, Vol.28, No.5, pp.243-249, (1992)
- [13] 小堀 聡：感覚運動変換の学習における散瞳現象，*バイオメカニズム学会誌*, Vol.31, No.4, pp.206-213, (2007)
- [14] 小堀 聡：反転を伴うトラッキング課題における学習とその転移，*情報科学技術レターズ*, Vol.6, pp.295-298, (2007)
- [15] 小堀 聡，阿部 陽祐：反転を伴うトラッキング課題の学習過程と瞳孔反応，*生体医工学*, Vol.45, No.1, pp.106-113, (2007)
- [16] Adams, J. A.：Historical review and appraisal of research on the learning, retention, and transfer of human motor skills, *Psychological Bulletin*, Vol.101, pp.41-74, (1987)
- [17] 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3版），二瓶社，pp.301-323, (1999)
- [18] Schmidt, R. A., Lee, T. D.：Retention and Transfer, *Motor control and learning: a behavioral emphasis* (4th ed), *Human Kinetics*, pp.432-459, (2005)
- [19] Craik, K. J. W.：Theory of the human operator in control systems: I. The operator as an engineering system, *British Journal of Psychology*, Vol.38, pp.56-61, (1947)
- [20] Goodale, M. A., Milner, A. D.：Separate visual pathways for perception and action, *Trends in Neurosciences*, Vol.15, pp.20-25, (1992)
- [21] Wexler, M., van Boxtel, J. J. A.：Depth perception by the active observer, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.9, pp.431-438, (2005)
- [22] Blais, C., Kerr, R., Hughes, K.：Negative Transfer or Cognitive Confusion, *Human Performance*, Vol.6, No.3, pp.197-206, (1993)
- [23] Imamizu, H., Kuroda, T., Yoshioka, T., Kawato, M.：Functional magnetic resonance imaging examination of two modular architectures for switching multiple internal models, *Journal of Neuroscience*, Vol.24, No.5, pp.1173-1181, (2004)