

感覚運動変換の学習における散瞳現象

小堀 聡^{1†}

¹ 龍谷大学 理工学部 電子情報学科

要旨 反転を伴うトラッキング動作の学習過程を調べるとともに、被験者の瞳孔径の変化を測定した。反転とは、ジョイスティックの操作方向とカーソルの移動方向との関係が、試行途中で反転することをいう。この課題は、新規の感覚運動変換を学習することを要求する。12名の健常な被験者には6つのブロックで学習を行わせた。その結果、トラッキング誤差が減少するという学習効果が認められた。また、反転に伴い散瞳が観測されたが、動作の学習とともに散瞳量も減少していった。しかし、誤差と散瞳量との相関が見られなかったことから、散瞳は単に誤差に対する反応だけで生じたものではなく、むしろ反転への対応に伴う認知的負荷によるものと考えられる。

キーワード：感覚運動変換、瞳孔反応、運動学習、認知的負荷、反転トラッキング

1. はじめに

人間の行う運動にとって感覚・知覚との協調は大変重要である。例えば、眼で捉えた物に手を伸ばしたり、音が聞こえた方向に視線を向けたりするには、感覚情報に基づいて対象を定位し、それに基づいて運動命令を定める必要があるが、このような変換が正しく行われるには、感覚・知覚系と運動系の間に整合性のとれた対応関係が成立していなければならない¹⁾。

わたしたちは、そのような対応関係を規定している写像規則を発達の過程で学習により獲得しているので、感覚運動変換を通常何の努力もせずに用いることができる。しかし、手を伸ばすとか物をつかむといった、一見単純な行為を分析してみると、それがいかに複雑であるかが見えてくる²⁾。

こうした問題についての有名な研究の1つにプリズムの順応実験がある。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行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。

それらの研究では、いずれも制御成績が向上するという明確な学習効果が認められているが、主観的には、わたしたちは操作方法の「こつ」をつかんだという感覚が得られる。一

方、一般的に運動学習においては、練習を重ねることで次第に意識的な努力が軽減され自動的にになっていく⁶⁾とされているが、その際の認知的負荷を客観的にどのように測定し、評価するかについての一致した見解があるとはいえない。

そこで、筆者らは、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とにした。このような課題は、新規の感覚運動変換を学習することを要求する。また、課題の遂行と同時に被験者の瞳孔径を測定し、分析を行った。瞳孔径を測定する理由は、人間の瞳孔径は、言語処理、算術計算、知覚的处理を含んだ、広範な認知課題において課題の困難さに伴って増加する^{7,8)}こと、つまり、瞳孔径は認知的負荷と強く関連していること⁹⁾は広く知られた知見であり、視環境などの要因の影響を受けやすいという問題点があるにしても、精神的な作業負荷の生理学的指標として有望である¹⁰⁾とされているからである。しかしながら、本研究のように、感覚運動課題において、瞳孔径を連続的に測定し、瞳孔反応と運動学習を関連づけた研究はこれまでにはなかった。ここでは、特に散瞳現象が運動学習における認知的負荷を客観的に評価する指標となりうるかどうかを検討する。また、本研究では瞳孔径を連続的に、かつ学習課題の事象と関連づけて測定できるシステムを一般的な測定機器を組み合わせるにより構築しており、他の学習課題への応用も期待できる。

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、反転という事象に対して、瞳孔径の拡大(散瞳)という現象が見られること、さらに、その散瞳量が学習によって軽減されることを確認する。そして、反転に伴う散瞳の要因を分析し、認知的負荷という観点から、運動学習との関係について考察する。

2006年9月11日受付 2007年7月14日受理
†〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷1-5

龍谷大学理工学部電子情報学科

小堀 聡

Tel:077-543-5111 Fax:077-543-7428

E-mail:kobori@rins.ryukoku.ac.jp

2. 方法

2.1 実験システム

図1に示した実験システムは、トラッキング測定システムと瞳孔径測定システムから構成されている。トラッキング測定システムから送信される信号により、瞳孔径測定システムでの測定と同期が取られる。

(1) トラッキング測定システム

トラッキング測定システムは、市販のパーソナルコンピュータ（日本電気：ラップトップ型コンピュータ PC-9801NC40, 386SX 20MHz, 2.6MB, 40MB, MS-DOS 5.0, 9型 TFT 液晶ディスプレイ, 640 × 400 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-350NE）、トラッキング測定ソフトウェアから構成されている。

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、トラッキング測定ソフトウェアは、Turbo Pascal 6.0（ボーランド社）により独自に開発したものであり、サンプリング周波数 30Hz でターゲットとカーソルが表示され、その座標値がコンピュータに保存される。

(2) 瞳孔径測定システム

瞳孔径測定システムは、市販のパーソナルコンピュータ（デル：Dimension 4100, Pentium III 1.0GHz, 128MB, 40GB, Windows 98SE）とディスプレイ（デル：15型 TFT 液晶ディスプレイ 1503FP, 1024 × 768 画素）、赤外線ビデオシステム（ナショナルインスツルメント社：画像入力ボード PCI-1408, ソニー：CCD カメラ CCD-IRIS M370CE, CBC：マクロレンズ Computar MLH-10X, 赤外線フィルタ, 赤外線光源, あご台）、瞳孔径測定ソフトウェアから構成されている。

このシステムでは、ビデオカメラで被験者の右目の瞳孔部分の画像を撮影し、画像入力ボードを通してコンピュータに取り込み、瞳孔の領域として白黒画像データのしきい値以下の画

素数を算出し、画素数は瞳孔の直径に変換され、30Hz のサンプリング周波数でコンピュータに保存される。また、まばたきのある場合は、その区間を線形補間した。このような処理を行う瞳孔径測定ソフトウェアは LabVIEW 5.1（ナショナルインスツルメント社）により独自に開発したものである。なお、瞳孔径の測定精度は 0.02mm である。

また、当然のことながら、瞳孔径は実験環境および視対象の明るさに強く影響される。そこで、ディスプレイの周辺を紙や布で覆い、それらの色や明るさを工夫するなどして、瞳孔に入射する光量が極力一定になるようにした。

2.2 実験方法

(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させる動作を行わせる。目標値を示すターゲットは直径 12 画素（3.6mm）の円で、制御値を示すカーソルは一辺 8 画素（2.4mm）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、正弦波上に水平方向のみを動く。目標の移動周波数は 0.1Hz, 0.2Hz, 0.3Hz のいずれかである。これらの周波数は先行研究¹¹⁾を参考にして設定した。一方、十字のカーソルはジョイスティックで制御される。視距離は約 69cm とした。

トラッキングの試行には、非反転と反転という2つの種類がある。非反転の試行では、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が、反転の試行では、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、試行中のランダムな時刻で反転する。反転に対応するため、被験者はカーソルを左に動かすときには、ジョイスティックを右に動かす必要がある（その逆も同様）。本実験では、いずれも1回の試行時間は 10s で、反転の時刻は、試行開始から 3.1s から 6.9s の間でランダムに変化し、平均は 5.0s である。これにより被験者はいつ反転が起きるか予測できないようにした。また、反転は移動速度の大きい中央部付近で起きるように設定し、反転したことが認識しやすいように工夫した。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。

被験者には頭部をあご台にのせて楽な姿勢で椅子に座らせ、ジョイスティックを右手に持たせ、ディスプレイを注視させる。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。途中でカーソルの動きが反転する場合もあるが、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) 被験者

被験者は、22歳から35歳の12名（男性：4名、女性：8名）の健常者であった。全員ロンドン大学（University College London）の学生あるいは研究員であるが、実験に関する予備知識のない者を選んだ。すべての被験者について、利き手は右であり、また、裸眼もしくは眼鏡の使用により、本実験を行う

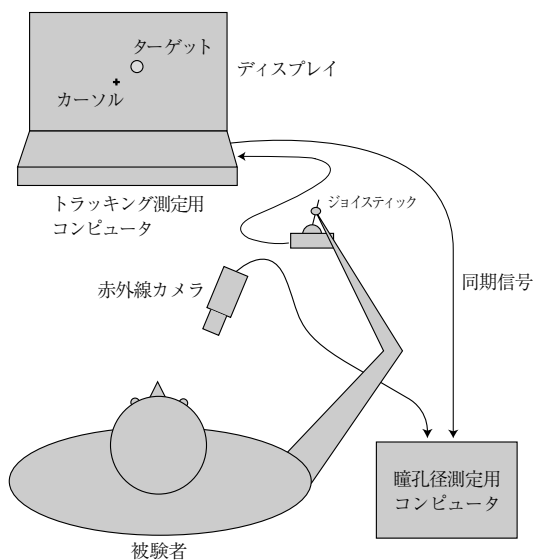


図1 実験システムの構成

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。

(3) 実験条件

実験は、練習、テスト前（pre-test）ブロック、学習ブロック、テスト後（post-test）ブロックから構成される。

まず、実験は 4 回の非反転の練習の試行で始まる。これにより、実験装置の使い方に慣れさせた。その後、被験者はテスト前ブロックとして 12 回の非反転の試行を行う。これには、目標の周波数として 0.1Hz, 0.2Hz, 0.3Hz のいずれかが 4 回ずつ含まれ、ランダムな順序で出現する。そして、被験者は 11 回の試行からなる 6 つの学習ブロックを実行する。各ブロックには、9 回の反転の試行と 2 回の非反転の試行が含まれる。すなわち、学習ブロックでは計 66 回の試行があり、そのうち 54 回は反転である。各ブロックにおいて、反転の試行は目標の周波数のいずれかが 3 回ずつ含まれ、また、非反転の試行についても、異なる周波数が含まれるようにした。反転と非反転という種類と目標の周波数はランダムな順序で出現するようにした。実験の最後には、テスト前ブロックと同様の方法で、テスト後ブロックとして 12 回の非反転の試行を行う。

実施に際して、各ブロックの間に 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、実験に先立ち、被験者には利き手や視力に関する調査票に記入をさせ、実験後には、実験課題についての感想の聴き取り調査を行った。

2.3 解析方法

(1) トラッキングデータ

目標値データと制御値データから、それらの絶対値の誤差データ（単位は画素数）を算出した。反転の試行については、各試行における反転の時刻を基準とし、反転の 2.0s 前から 3.1s 後までの区間のデータを解析に用いた。非反転の試行については、反転の試行での反転の時刻の平均である試行開始から 5.0s 後を基準とし、反転の試行と同様の区間のデータを解析に用いた。6 つの学習ブロック（ブロック 1～ブロック 6）、

テスト前ブロック、テスト後ブロックに分けて解析を行った。学習ブロックに含まれる非反転の試行については、別に分けて 1 つのデータ群として解析した。

(2) 瞳孔径データ

トラッキングデータの場合と同様である。ただし、反転の試行については、各試行における反転の時刻を基準とし、反転の 2.0s 前から 1.8s 前までの瞳孔径データの平均値を基線とし、元のデータから差し引く処理を施して散瞳量（単位は mm）を求めた。非反転の試行については、反転の試行での反転の時刻の平均である試行開始から 5.0s 後を基準として、反転の場合と同様の処理を施した。

3. 結果

実験結果の例として、反転の試行での目標値、制御値、誤差、瞳孔径の波形を図 2 に示した。これは反転によって生じたトラッキング誤差と散瞳を示す典型的な例である。

3.1 誤差データ

各試行における反転の時刻を基準（0s）とし、-2.0s から 3.1s までの範囲において、ブロックごとに全被験者の全試行（学習ブロックでは非反転を除き、9 試行×被験者 12 名）の誤差データを同期加算平均した波形を図 3 に示した。学習ブロックでの非反転は 1 つのデータ群にまとめて同期加算平均した（6 ブロック×2 試行×被験者 12 名）。

図 3 より次のことがいえる。

- 1) トラッキング誤差は反転の前は小さく、反転に伴って急速に増加するが、テスト前ブロックとテスト後ブロックの試行では変化はない。
- 2) 学習ブロックに含まれる非反転の試行では、誤差の増加は見られない。つまり、被験者は反転を予測した動作をしていない。
- 3) 反転の試行での誤差は、反転後の約 0.5s あたりで明確なピークに到達してからすぐに減衰するが、その後、非反

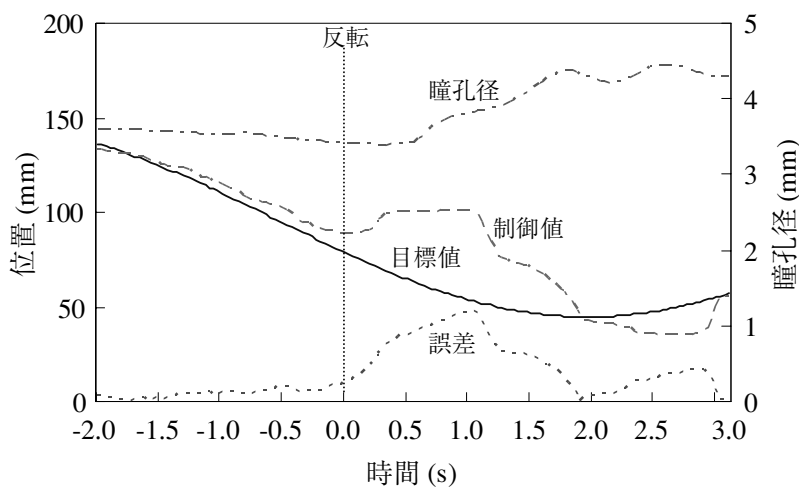


図 2 実験データ（目標値、制御値、誤差、瞳孔径）の典型例（被験者 B の学習ブロック 1 の最初の反転試行）

転の試行よりも値が大きい状態が続く。

くよりもより低い誤差を示しており、学習効果が認められる。

- 4) 最も重要な特徴は、反転により生じた誤差は、学習ブロックによって変わっていくということである。誤差のピーク値に関しては、ブロック1は他のブロックよりも大きい。ブロック2からブロック6では、反転直後の誤差は類似しており、ブロックごとの軌跡はほとんど重なり合っているように見える。しかし、ピーク値を過ぎたあとでは、ブロック6は他のブロッ

3.2 散瞳量データ

散瞳量データについても、誤差データと同様の処理を施した。すなわち、各試行における反転の時刻を基準(0s)とし、-2.0sから3.1sまでの範囲において、ブロックごとに全被験者の全試行の散瞳量データを同期加算平均した波形を図4に示

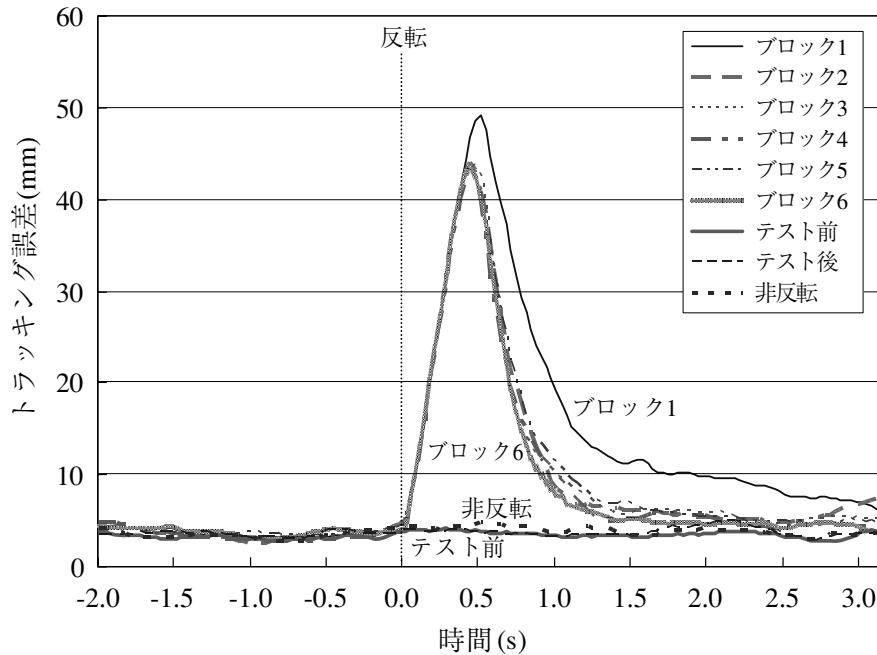


図3 誤差データの同期加算平均波形
ブロックごとに全被験者の全試行(学習ブロックでは非反転を除き、9試行×被験者12名)の誤差データを同期加算平均した波形。学習ブロックでの非反転は1つのデータ群にまとめて同期加算平均した(6ブロック×2試行×被験者12名)。

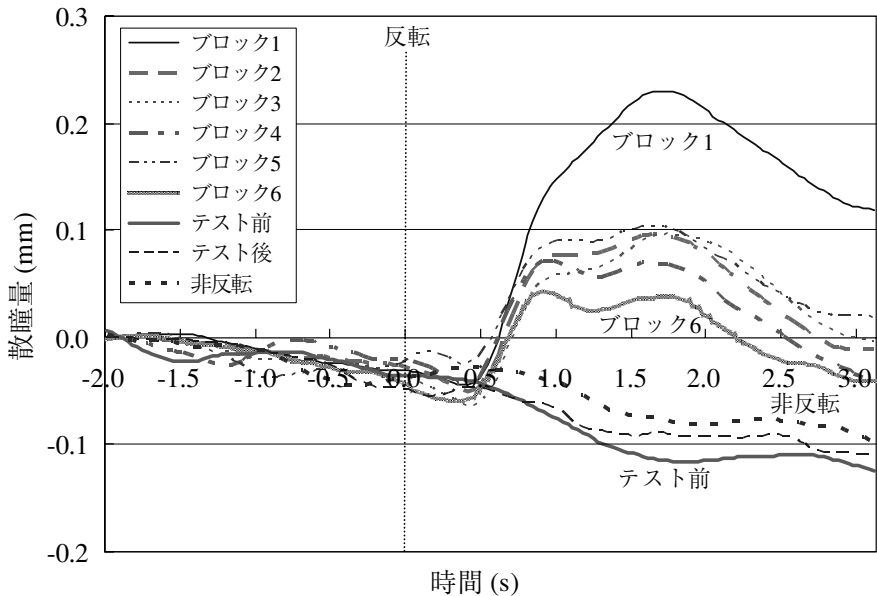


図4 散瞳量データの同期加算平均波形
ブロックごとに全被験者の全試行の散瞳量データを同期加算平均した波形。図3と同様の処理を施している。

した。非反転の試行についての処理も同様である。

図4より次のことがいえる。

- 1) すべての波形において、反転前から反転後の0.5sぐらいまでは、散瞳量はわずかに減少して行く傾向にあり、ブロック間での違いは見られない。非反転の試行、すなわち、テスト前ブロック、テスト後ブロック、学習ブロックに含まれる非反転の試行では、0.5sの後も緩やかに減少していく。
- 2) 反転の試行では、反転の事象に伴う明確な散瞳が見られる。このような散瞳現象は、非反転の試行ではまったく観察されない。また、波形の形状はブロック1ではやや異なるものの、ブロック2～ブロック6ではかなり類似している。
- 3) 散瞳量は反転後の約0.5sから急速に増大し、1.5s付近を中心にかなり幅広いピークを持つ。そして、散瞳量は反転後の約1.5sを過ぎたあたりから次第に減少していく。しかし、散瞳量は、少なくともここで観察した区間では、非反転の試行でのレベルまでは戻らない。
- 4) 最も重要な特徴は、反転により生じた散瞳量は、学習ブロックによって変わっていくということである。ブロック1は他のブロックよりも散瞳量がかかなり大きいのに対して、ブロック6は他のブロックよりも明確に散瞳量が小さい。ブロック2は、少なくともメインピーク付近では、ブロック3やブロック4よりも大きな散瞳量を示している。ただし、ブロック5では、ブロック3やブロック4よりも散瞳量が大きくなっている。

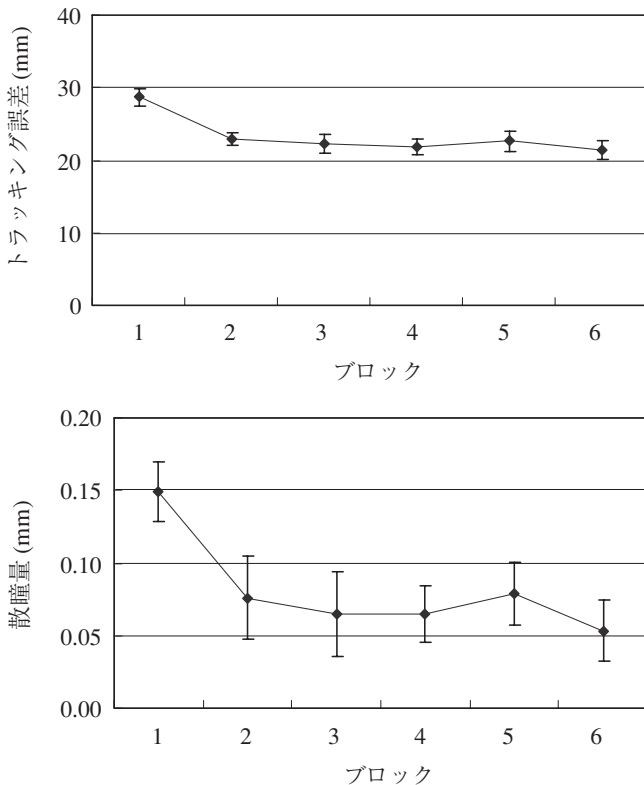


図5 試行に伴う平均誤差の変化(上)と平均散瞳量の変化(下) グラフ中の点はそれぞれのブロックでの平均を、上下の線は標準偏差を示している。

3.3 分散分析

反転の試行でのトラッキング誤差を分散分析(ANOVA)で解析するため、反転の時刻を基準にして-2.0sから3.0sまでの範囲を、0.5s間隔で10個の区間(区間1～区間10)に分割し、中央点の時刻(-1.75s, -1.25s, ..., 2.50s, 2.75s)での誤差を代表値とした。そして、学習ブロック(ブロック1～ブロック6)、目標速度(0.1Hz, 0.2Hz, 0.3Hz)、区間(区間1～区間10)を被験者間の要因とした $6 \times 3 \times 10$ の分散分析を行った。

その結果、学習ブロック、目標速度、区間のいずれについても有意な主効果が認められた(学習ブロック: $F(5,55) = 20.100, p < 0.001$, 目標速度: $F(2,22) = 224.371, p < 0.001$, 区間: $F(9,99) = 243.251, p < 0.001$)。ただし、これらの主効果は、2つの有意な交互作用によって限定される。1つは区間と学習ブロックの間の交互作用であり($F(45,495) = 6.818, p < 0.001$)、もう1つは区間と目標速度の間の交互作用である($F(18,198) = 50.008, p < 0.001$)。そこで、下位検定により有意差の生じる条件の組み合わせを調べた。その結果、前者の交互作用は、大きな誤差を示す反転後の区間の個数が学習ブロックにより減少していることを示しており、被験者は反転に対して素早く対応することを学習したといえる。また、後者の交互作用は、速い目標速度での反転では、遅い目標速度での反転よりも、誤差が大きい区間が長いことを示している。

非反転の試行(テスト前ブロック、テスト後ブロック、学習ブロックに含まれる非反転の試行)に対して同様の分散分析を行った。その結果、ブロックについての主効果やブロックと他の要因との間の交互作用はなかった(すべてについて $p > 0.200$)。

散瞳量に対しても同様の分散分析の方法を適用した。その結果、学習ブロックと区間について有意な主効果があった(学習ブロック: $F(5,55) = 2.572, p = 0.037$, 区間: $F(9,99) = 17.496, p < 0.001$)。ただし、区間と学習ブロックの間の交互作用が有意であった($F(45,495) = 5.209, p < 0.001$)。下位検定の結果、ブロック間の差異は、反転後の区間に限定され、学習ブロックにより大きな散瞳量を示す区間が短くなったことが分かる。

3.4 回帰分析

まず、学習曲線を描くために、学習ブロックの反転の試行に関して、誤差データについては反転直後の1.0s間の平均値から反転直前の0.5s間の平均値を基線として差し引いたものを平均誤差とし、散瞳量データについては反転後の0.5sから1.5sまでの平均値から反転直後の0.5s間の平均値を基線として差し引いたものを平均散瞳量として求めた。これらの試行回数による変化を図5に示した。

次に、各試行での平均誤差を目的変数、学習のブロック番号の対数と目標速度を説明変数として回帰分析を行った。ここで、ブロック番号を対数としたのは、線形近似よりも対数近似の方が近似曲線の精度が高いことをあらかじめ確認したからである。その結果、学習ブロックの影響が有意だった(回帰係数 = -11.6, 標準誤差 = 2.2, $t(11) = -5.21, p < 0.001$)。また、

目標速度の影響についても有意だった (回帰係数 = 93.1, 標準誤差 = 10.2, $t(11) = 9.21$, $p < 0.001$).

さらに, 平均散瞳量についても回帰分析を行ったが, ここでは図5の学習曲線などから, 散瞳量と誤差の関連性が予測されるので, その試行での平均誤差も説明変数に含めた. すなわち, 各試行での平均散瞳量を目的変数, その試行での平均誤差, ブロック番号の対数, 目標速度を説明変数として回帰分析を行った. その結果, 平均誤差の影響は有意ではなかった (回帰係数 = 0.00588, 標準誤差 = 0.00446, $t(11) = 1.319$, $p = 0.214$). 一方, 学習ブロックの影響は有意だった (回帰係数 = -0.035, 標準誤差 = 0.016, $t(11) = -2.27$, $p = 0.048$). また, 目標速度の影響については有意でなかった.

4. 考察

4.1 トラッキング課題の学習

実験結果より, 反転を伴うトラッキング課題に対して, 試行を重ねることでトラッキング誤差が減少していくことが示され, 明確な学習効果を確認することができた. つまり, 被験者は新規の感覚運動変換の学習を行うことができたことと推察される. しかも, 学習のブロック1~ブロック2にかけての学習効果が顕著であることから比較的短期間に学習すると考えられるが, その後ブロック6まで学習は進んでいることも分かった.

4.2 反転事象に対する散瞳

実験結果より, 反転の事象に対して散瞳現象が確認できた. ここでの瞳孔反応は, 認知課題を実行する際に見られる典型的なものである⁸⁾. 能動的な課題を実行する際の負荷により瞳孔径が拡大するという知見からすれば, 反転を伴うトラッキング課題の実行が認知的負荷となり, 散瞳が見られたと考えられる.

となると, 反転課題のどの要素が負荷となり散瞳を誘発したのだろうか. 反転課題において被験者が行わなければならないことは, 表面的には誤差に反応すること, つまり, 反転によって生じた誤差を検出し修正することであるが, そのためには, 反転したことに対応 (従来とは逆向きに操作) しなければならない. 反転に伴い, 逆向きに操作することはかなり意識的な努力を必要とする. このことは実験後の被験者の感想でも述べられている.

ここで, 学習曲線において誤差も散瞳量も同じように減少しているにも関わらず, 回帰分析の結果, 個々の試行において誤差と散瞳量の間に関連が見られなかったことから, 誤差への反応だけが要因であるという可能性は排除されるであろう. つまり, 例えば大きな誤差が示されたことによる驚愕反応として散瞳が起きるならば, 誤差と散瞳量には相関が見られるはずだが, それはなかった. 実際, 試行開始直後にはいったん誤差が大きくなるが (このことは図3の範囲では示されていないが), それに対する散瞳は観測されなかった.

一方, 反転への対応が要因であるという可能性は残される.

すなわち, 反転により従来とは逆方向に操作しなければならないということが負荷となったのに対して, 結果としての誤差の大小はあまり影響しなかったと解釈できる. 言い換えるならば, 新しい感覚運動変換を導入し, 維持することが認知的負荷となり, 散瞳をもたらしたのではないかと推察される. もしそうだとすると, 図4の瞳孔反応の波形において, 散瞳量が急激に増加した後, ピーク値から次第に減少していくところを見る限り, 新規の感覚運動変換の導入の方が負荷が大きく, その維持の方は相対的に負荷が小さいと考えられる.

なお, 運動学習は大脳皮質・小脳などの系によるもの¹²⁾とされるのに対して, 散瞳現象は自律神経系によるもの¹³⁾であるとされるので, 運動学習と散瞳現象の関係はあくまでも間接的なものであると推測される.

4.3 学習に伴う散瞳量の減少

実験結果より, 学習に伴い, トラッキング誤差と散瞳量とともに減少することが確認できた. このことも認知的負荷の観点から次のように説明される. 反転課題の試行においても, 非反転のトラッキングから始まるので, 反転に伴い, 必ず通常感覚運動変換から反転に対応した感覚運動変換に切り替える必要がある. 学習ブロックにおいて, 被験者が学習しなければならないことは反転への対応, すなわち, 新規の感覚運動変換の獲得である. 学習の初期ではこの切り替えが大きな負荷となっていたが, その後, すぐにその負荷は小さくなったと考えられる. すなわち, 学習に伴う散瞳量の減少は, 反転に対応した新規の感覚運動変換を学習し, 認知的負荷が軽減されたことを意味すると推察される. 実験後の被験者の感想でも, 最初は必要だった意識的な努力が次第に軽減されたことが述べられている.

それに対して, 散瞳量の減少は刺激に対する慣れ (habituation) と考えられるかもしれない. しかし, 前節で述べたように, 散瞳は単なる誤差への反応ではないと推察され, 慣れ (反応の低下) が生じることも考えにくい. 一般的に刺激やそれに対する慣れというものは受動的なものであるが, ここで被験者に求められていることは, もっと能動的な学習であるからである. 単なる刺激に対する反応ならば, 学習過程のもっと初期で慣れが生じ, 散瞳が見られなくなるはずである.

5. おわりに

本研究では, 新規の感覚運動変換の学習における散瞳現象について考察することを目的とし, 反転を伴うトラッキング動作の学習過程を調べるとともに, 被験者の散瞳量の変化を測定, 分析した.

その結果, 以下のような知見が得られた.

- 1) 被験者は反転を伴うトラッキング課題において, 新規の感覚運動変換を学習することができたと考えられる.
- 2) 反転の事象に対して散瞳現象が確認されたが, それは新規の感覚運動変換に必要な認知的負荷によるものであ

ると考えられる。

- 3) 反転に伴う散瞳量は学習とともに減少したが、それは新規の感覚運動変換に必要な認知的負荷が次第に減少したからであると考えられる。

本研究の結果は、散瞳現象が運動学習における認知的負荷の変化を示す指標になりうることを示唆しており、従来の認知的負荷と瞳孔反応の関係の知見を運動学習の分野まで拡張したといえる。

なお、認知的負荷により散瞳現象が見られることは一般的な知見であるにしても、散瞳が見られるからといって、それが認知的負荷によるものとは限らず、瞳孔反応に影響する他の要因や測定上の問題点（瞳孔入射の光量、自発動揺¹⁴⁾、反応特性の非線形性、被験者の疲労など）についても考慮する必要がある。本研究においても、視対象の明るさが極力一定になるように工夫したり、同期加算平均などの処理をしたりして、それらの要因をできる限り軽減するようにした。その結果、一貫した傾向¹³⁾を示すことができたと考えている。

また、本研究においては、目標の動きが左右方向のみであり、比較的早期に学習してしまい、漸次的な学習過程を見ることができなかった。そこで、関連研究として、目標の動きを2次元にし、反転についても左右反転、上下反転、上下左右反転という3種類を用いて、学習過程の差異や難易度と散瞳量の関係について考察している¹⁵⁾。さらに、試行の途中でターゲットもしくはカーソルが一定時間表示されなくなる場合のトラッキング課題についても実験を行っている¹⁶⁾。今後はそうした研究を総合し、発展させ、運動学習における認知的負荷の変化や内部モデルの獲得について検討していく予定である。

謝 辞

本論文は2004年度 龍谷大学国外研究員として、ロンドン大学認知神経科学研究所 (University College London, Institute of Cognitive Neuroscience) で研究を行った期間にまとめられたものです。関係者の方々、特に研究の機会を与えていただき、データ解析についても助言をいただいた Patrick Haggard 教授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) 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)。
- 4) 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)。
- 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) Brown, T. L. and Carr, T. H.: Automaticity in skill acquisition: mechanisms for reducing interference in concurrent performance, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15(4), 686-700, (1989).
- 7) 松永 勝也：瞳孔運動の心理学，78-95，ナカニシヤ出版，(1990)。
- 8) Beatty, J.: Task-evoked pupillary response, processing load, and the structure of processing responses, *Psychological Bulletin*, 91, 276-292, (1982).
- 9) Sirevaag, E.J. and Stern, J.A.: Ocular measures of fatigue and cognitive factors, In: Backs, R. W. and Boucsein, W. (Eds): *Engineering psychophysiology*, 269-287, Lawrence Erlbaum Associates, (2000).
- 10) Matthews, G., Davies, D.R., Westerman, S.J. and Stammers, R.B.: Divided attention and workload, In: *Human performance: Cognition, stress and individual differences*, 97, Psychology Press, (2000).
- 11) 井口 雅一：人間—機械系—一人による機械の制御—，14-45，共立出版，(1970)。
- 12) 有働 正夫：運動制御，塚原 伸晃（編）：脳の情報処理，152-225，朝倉書店，(1984)。
- 13) 松永 勝也：瞳孔運動の心理学，7-30，ナカニシヤ出版，(1990)。
- 14) 福田 忠彦：生体情報論，137-144，朝倉書店，(1997)。
- 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，45(1)，106-113，(2007)。
- 16) Kobori, S and Haggard, P.: Internal Models and Transfer of Learning in Pursuit Tracking Task, *Proceedings of The European Cognitive Science Conference 2007*, 498-503, Psychology Press, (2007).



小堀 聡 (こぼり さとし)

1987年大阪大学大学院医学研究科修士課程修了。博士(工学)。現在、龍谷大学理工学部電子情報学科准教授。1998年および2005年ロンドン大学認知神経科学研究所客員研究員。生体情報処理と認知科学の立場から、知覚と運動、記憶と学習、問題解決などに関する研究に従事。電子情報通信学会、情報処理学会、日本認知科学会、日本生体医工学会、日本人間工学会などの会員。(バイオメカニズム学会正会員)。

Pupil Dilation during Learning of Sensorimotor Transformation

Satoshi KOBORI^{1 †}

¹Ryukoku University Department of Informatics and Electronics,
Faculty of Science and Technology

Abstract We used visuomotor tracking as our motor task, and measured tracking performance and pupil dilation simultaneously. We have used pupil dilation as a measure of cognitive load. The diameter of the human pupil increases with task difficulty across a wide range of cognitive tasks. Tracking trials were of 2 types, non-inverted and inverted. In inverted trials, the relation between joystick movement and subject visual cursor movement was inverted at an unpredictable time during the trial. This task requires learning a novel sensorimotor transformation. Subjects observed a circular target which moved sinusoidally across a computer screen in a horizontal direction. Subjects held a modified joystick in their right hand, and moved it so that a visual cross hair cursor tracked the target as closely as possible. 12 normal subjects participated in the experiment. During 6 blocks of learning, subjects learned the task when tracking unpredictably inverted. Tracking inversion evoked pupil dilation, and the pupil dilation decreased with learning significantly. Pupil measures were not correlated with tracking error on individual trials, suggesting that the inversion-evoked cognitive load reflects changes in motor task, and is not merely a response to high errors.

Key Words: Sensorimotor Transformation, Pupillary Response, Motor Learning, Cognitive Load, Inverted Tracking

Received Sep 11, 2006 Accepted Jul 14, 2007

[†] Satoshi Kobori

Ryukoku University Department of Informatics and Electronics,
Faculty of Science and Technology

1-5, Yokoya, Oe-cho, Seta, Otsu-shi, Shiga 520-2194, Japan

Tel:077-543-5111 Fax:077-543-7428

E-mail:kobori@rins.ryukoku.ac.jp