

反転を伴うトラッキング課題の学習過程と瞳孔反応

小堀 聡*・阿部 陽祐*

Learning Processes and Pupillary Responses in Inverted Tracking Tasks

Satoshi KOBORI,* Yosuke ABE*

Abstract We used visuomotor tracking as our motor task and studied how subjects learn to adjust for inversion of the relation between joystick movement and target movement. This task requires learning a novel sensorimotor transformation. We have 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. Subjects observed a circular target moving at constant tangential velocity along a clockwise circular trajectory on a computer screen. 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. Inverted tracking trials were of 3 types, horizontal inversion, vertical inversion and bidirectional inversion. Sixty normal subjects participated in the experiment. We divided the subjects into 3 groups, horizontal inversion group, vertical inversion group, and bidirectional inversion group. Each group included 20 subjects. During 6 blocks of learning, inversion-evoked tracking error and inversion-evoked pupil dilation both decreased significantly. This finding suggests increasing automatization of the to-be-learned sensorimotor transformation. 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. Our results thus suggest a relatively direct physiological measure of the processes of motor-skill automatization.

Keywords: inverted tracking task, pupil dilation, sensorimotor transformation, cognitive load, automatization.

1. はじめに

わたしたち人間は、繰り返し練習することにより、自転車に乗ったり、ピアノを弾いたりすることができるようになるが、そうした運動技能の獲得は日常生活にとって必須の機能であり、身近な問題でもある。練習を通じて運動が未熟な段階から熟練した段階へと変容していく過程は、運動学習の重要なテーマの1つであるが、この問題は運動系や感覚系にとどまらず、注意や自動化といった知覚系、認知系の働き、さらには記憶系にも関わる複雑な問題である[1]。

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の処理から、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[2]。一般に運動学習の評価には、制御成績のような指標が用いられることが多いが、制御成績の向上が認知的負荷の軽減とどのように関係するかについては、十分に検討されているとはいえない。つまり、運動学習における自動化がどのように進むのか、それをどのように測定するのか、などについての一一致した見解はこれまでほとんど見られない[3]。

筆者らは、以前より運動課題として上肢トラッキング動作を用いて、その学習過程を調べてきたが、近年トラッキング課題の遂行と同時に被験者の瞳孔径を測定し、分析を行っている。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、自発的運動、知覚的処理を含んだ、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[4-6]こと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[7]とされているからである。

筆者らの先行研究においては、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試行途中で反転する場合に、被験者がいかにその反転への対応を学習するかにつ

生体医工学シンポジウム 2006 発表 (2006 年 9 月, 新潟)
2006 年 7 月 25 日 受付, 2006 年 10 月 31 日 改訂, 2007 年 3 月 1 日 再改訂, 2007 年 3 月 22 日 再々改訂
Received July 25, 2006; revised November 31, 2006, March 1, 2007, March 22, 2007.

* 龍谷大学理工学部電子情報学科

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

いて、トラッキング誤差と瞳孔径を同時に測定し、学習に伴って瞳孔径の増加量（散瞳量）が軽減されることを確認した。そして、散瞳量が運動学習における認知的負荷の変化の指標となりうることを示唆した[8]。こ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とを関連づけた研究はこれまでなかった。しかしながら、先行研究では目標の動きが1次元（左右方向）のみであり早期に学習してしまうことや課題の難易度に差異を設定しなかったことなどの問題点があった。

そこで、本研究では、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種類を用いて難易度に差異を設けた。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。新規の感覚運動変換を学習させる実験は、プリズム順応など古くから用いられた方法であるが、最近の研究例としては、今水らの実験がある。今水らは、回転マウスという反転課題よりもさらに制御困難な課題を用いて、人間が新しい道具の使い方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[9]。内部モデルは、運動学習の分野において近年重要になりつつある概念であるが、自動化は学習により内部モデルを獲得する過程であるともいえ、本研究との関連性も強い。

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、反転という事象に対して瞳孔径の拡大という現象が見られ、それが学習とともに軽減されることを確認する。そして、運動学習に伴う瞳孔反応の変化を分析することにより、運動学習における認知的負荷について考察する。

2. 方 法

2.1 システム構成

図1に示した実験システムは、刺激提示システムと瞳孔径測定システムから構成されている。刺激提示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の同期が取られる。

2.1.1 刺激提示システム 刺激提示システムは、市販のパーソナルコンピュータ（デル：Dimension 4100, Pentium III 1 GHz, 128 MB, 40 GB, 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）、デジタル入出力ボード（コンテック：PIO-16/16T (PCI)）、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

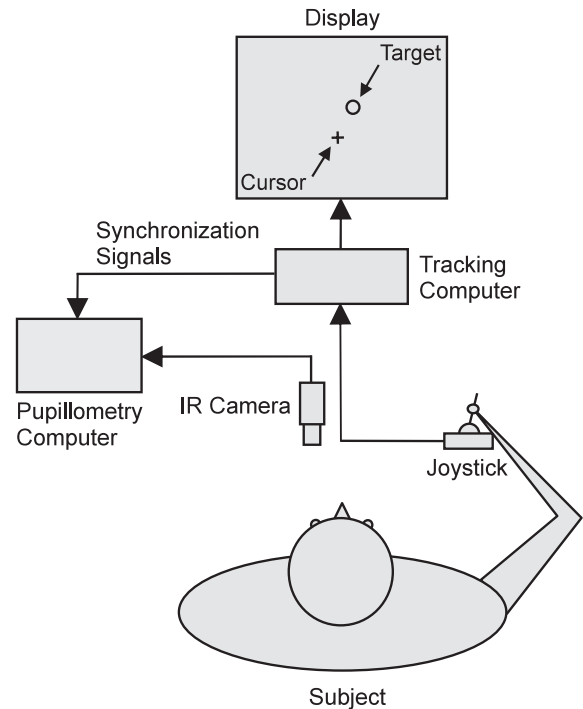


図1 実験システム

Fig 1 Experimental apparatus.

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30 Hzで得られる。

2.1.2 瞳孔径測定システム 瞳孔径測定システムは、ナックイメージテクノロジー社の眼球運動測定装置EMR-8BNLの機能を用いている。この装置は市販のパーソナルコンピュータ（デル：Dimension 8400, Pentium4 2.8 GHz, 1 GB, 160 GB, Windows XP Home）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）、および、画像入力・処理系の装置（あご台、眼球撮影カメラ、データプロセスボード、眼球データ解析ソフトウェアなど）から構成されている。これらのうち、眼球データ解析ソフトウェアには、眼球データを実時間でコンピュータに取り込む機能が含まれており、瞳孔データとして瞳孔の直径（単位はmm）が分解能0.02 mm、サンプリング周波数60 Hzで得られる。

なお、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、瞳孔に入射する光量が極力一定になるようにする工夫として、実験画面は白色を基本とし、ディスプレイの縁には白い紙の枠を取り付け、さらに、視野範囲内の背景はすべて白い布で覆うようにした。

2.2 課題と条件

2.2.1 2次元トラッキング課題の実験 この実験は、目標の動きが2次元の場合でも、反転課題に対して被験者が学習すること、また、制御成績が反転の種類によって異

なることなどを確認するために行う。ここでは瞳孔径の測定は行わない。

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 (13 mm) の円で、制御値を示すカーソルは一辺 44 画素 (13 mm) 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 (148 mm) の円周上で規則的な運動 (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 66 cm である。

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 40 s で、試行開始後 14 s から 20 s 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。

実験群は、左右反転群、上下反転群、上下左右反転群から成り、それぞれの種類の反転課題を 10 回実施した。実験の総測定時間は約 15 分である。

2・2・2 運動学習と瞳孔反応の実験 この実験は、反転の種類の異なる実験群での運動学習とそれに伴う瞳孔反応の変化を調べるために行う。

実験課題と実験群については、先の 2 次元トラッキング課題の実験と同様であるが、この実験では、1 回の試行時間は 20 s で、試行開始後 11.5 s から 12.5 s までの間のランダムな時刻に反転するように設定し、トラッキング誤差だけでなく瞳孔径についても測定した。

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 (試行途中で反転の起こらない課題) をそれぞれ 1 ブロックずつ、学習ブロックでは、それぞれの反転課題を 6 ブロック実施した。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。実験の総測定時間は約 30 分である。

2・3 解析

2 次元トラッキング課題の実験については、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。この評価値の試行回数による変化を表すために、実験群別に平均と標準偏差を算出する。

一方、運動学習と瞳孔反応の実験については、以下のとおりに解析を行う。

トラッキング誤差と瞳孔径については、各試行における反転の時刻を基準 (0 s) とした同期加算平均による処理を行う。まず、トラッキング誤差については、目標値と制御値から 2 次元絶対誤差を算出し、瞳孔径については、-1.0 s から 0 s までの瞳孔径の平均を基線 (0 mm) とする処理を施して、瞳孔径増加幅を算出する。そして、それぞれの値について、-4.0 s から 6.0 s 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×被験者数) を同期加算し、平均した波形を求める。

次に、2 次元絶対誤差の波形からトラッキング誤差の増加の特徴を示す範囲を定め、評価値を算出する。すなわち、反転の時刻を基準として、-1.0 s から 0 s までの 2 次元絶対誤差の平均を基線とし、0 s から 4.0 s までの 2 次元絶対誤差の平均と基線の差分を試行ごとに算出し、それを平均誤差増加値 (単位は mm) と定義する。この評価値のブロックによる変化を表すために、各被験者の平均誤差増加値の各ブロックでの平均を求め、実験群別に全被験者の平均と標準偏差を算出する。

また、2 次元絶対誤差の場合と同様に、瞳孔径増加幅の波形から、瞳孔径の増加の特徴を示す範囲を定め、評価値を算出する。すなわち、瞳孔反応の潜時を考慮し、反転の時刻を基準として、0.5 s から 4.5 s までの瞳孔径増加幅の平均を試行ごとに算出し、それを平均瞳孔径増加値 (単位は mm) と定義する。この評価値のブロックによる変化を表すために、各被験者の平均瞳孔径増加値の各ブロックでの平均を求め、実験群別に全被験者の平均と標準偏差を算出する。

3. 結 果

2 次元トラッキング課題の実験では、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、運動学習と瞳孔反応の実験では、18 歳から 24 歳までの健常な大学生 60 名 (男女ともに 30 名) を被験者とし、それぞれの実験において、左右反転群、上下反転群、上下左右反転群の 20 名ずつの 3 つの実験群に分けた。なお、これらの 2 つの実験の被験者は重複していない。

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。

3・1 2 次元トラッキング課題

2 次元平均絶対誤差の試行回数による変化を図 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、

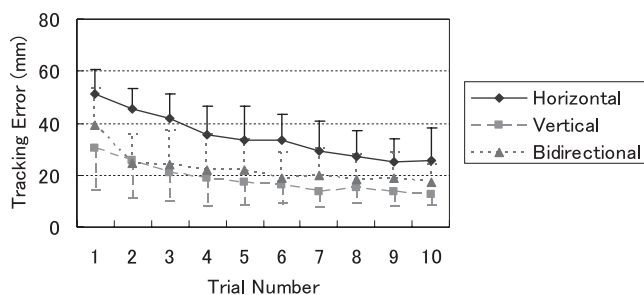


図2 2次元平均絶対誤差の変化 (2次元トラッキング課題の実験)

Fig. 2 Learning curve of tracking error for each learning block (Two-dimensional tracking experiment).

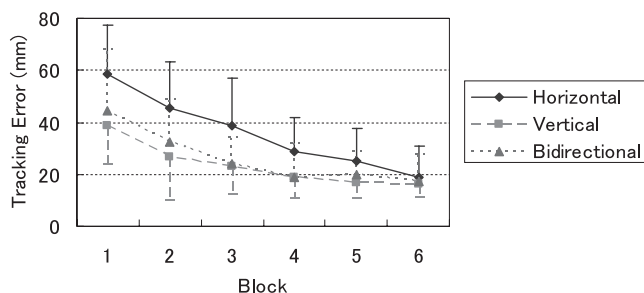


図4 平均誤差増加値の変化

Fig. 4 Learning curve of tracking error for each learning block.

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、各実験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。

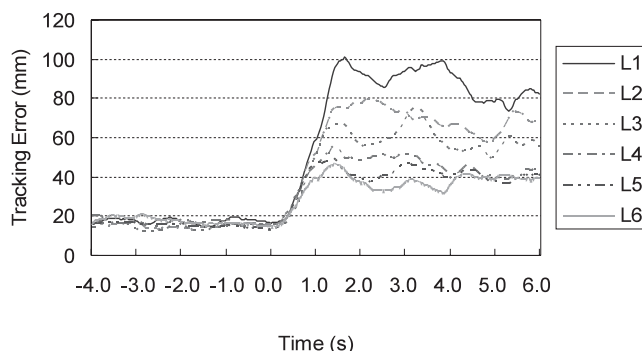
なお、以上に関しては、t検定を用いて有意差検定を行った。その結果、左右反転群と上下反転群の間、および左右反転群と上下左右反転群の間では、すべての試行において危険率1%の水準で、左右反転群の値が上下反転群および上下左右反転群の値よりも有意に大きいことが示された。一方、上下左右反転群と上下反転群の間では、第1回と第7回の試行において危険率5%の水準で、上下左右反転群の値が上下反転群の値よりも有意に大きいことが示された。

3.2 運動学習と瞳孔反応

3.2.1 トラッキング誤差

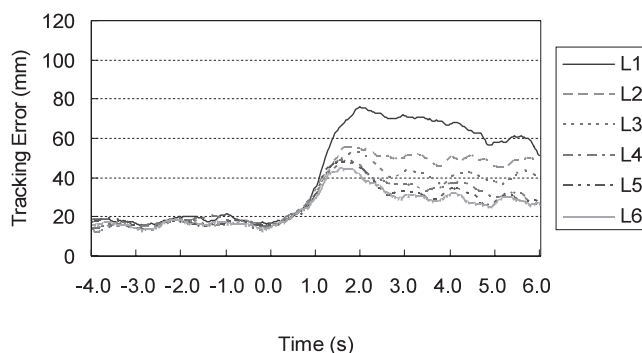
トラッキング誤差について同期加算平均した波形を実験群別に図3に示した。

図3より、1) いずれの実験群においても、2次元絶対誤差はブロックが進むにつれて小さくなっており、明らかな学習効果が認められること、2) 左右反転群と上下反転群を比べると、左右反転群は学習の初期において2次元絶対誤差が大きい、第6ブロックでは2つの群にほとんど変わりはなく、3) 上下左右反転群は他の実験群とは2次元絶対誤差の変化の形状が異なり、反転後の減少が比較的早いこと、が分かる。



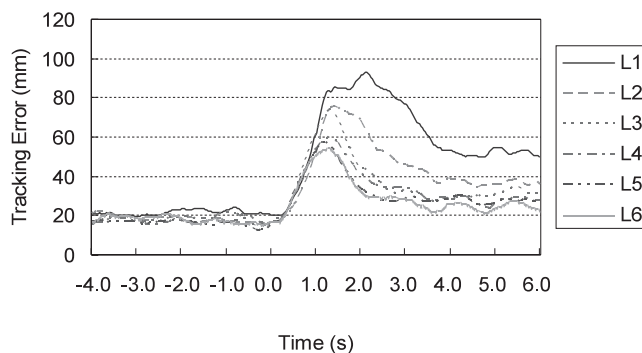
Time (s)

(a)



Time (s)

(b)



Time (s)

(c)

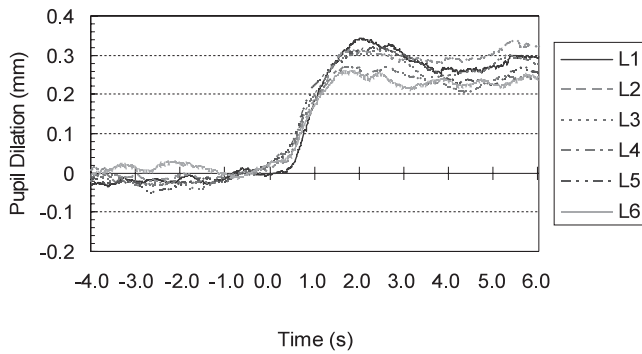
図3 学習ブロックごとのトラッキング誤差の同期加算平均波形 (a) 左右反転群, (b) 上下反転群, (c) 上下左右反転群 Lnは学習の第nブロックを示している。

Fig. 3 The waveform of grand average tracking error arranged by learning block.

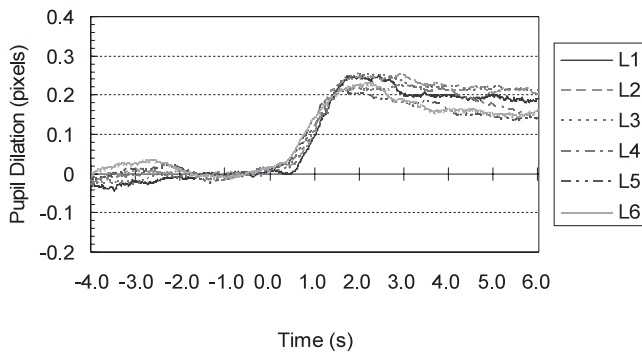
(a) Horizontal inversion group, (b) Vertical inversion group, (c) Bidirectional inversion group Ln refers to nth learning block.

次に、平均誤差増加値のブロックによる変化を図4のグラフに示した。

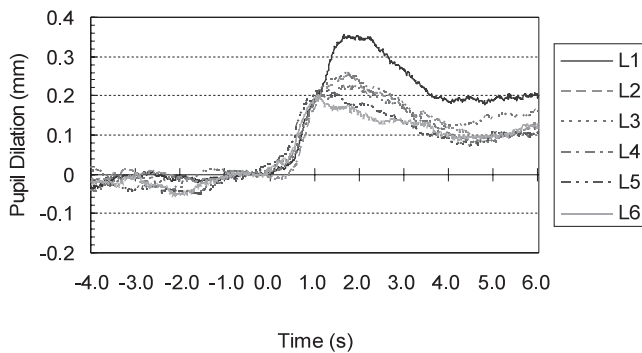
図4より、1) 各群とも明らかな学習効果が認められること、2) 3つの実験群を比べると、学習の初期では、平均誤差増加値の大きさは、左右反転、上下左右反転、上下反転という順序であるが、第6ブロックではほとんど変わりは



(a)



(b)



(c)

図 5 学習ブロックごとの瞳孔径の同期加算平均波形 (a) 左右反転群, (b) 上下反転群, (c) 上下左右反転群 Ln は学習の第 n ブロックを示している.

Fig. 5 The waveform of grand average pupil dilation arranged by learning block. (a) Horizontal inversion group, (b) Vertical inversion group, (c) Bidirectional inversion group Ln refers to nth learning block.

ないこと, が分かる.

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

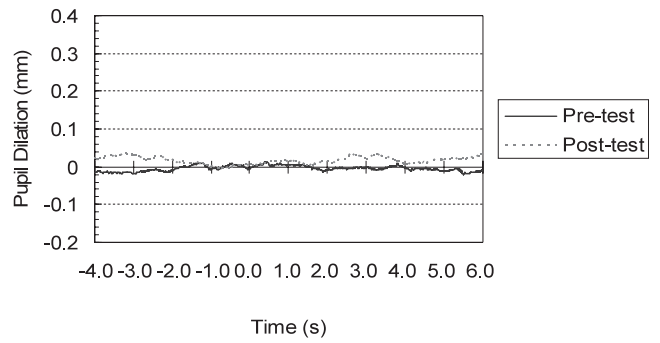


図 6 通常課題での瞳孔径の同期加算平均波形 (左右反転群の例)

Fig. 6 The waveform of grand average pupil dilation for each normal tracking block (Horizontal inversion group).

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.

3・2・2 瞳孔径 瞳孔径について同期加算平均した波形を実験群別に図 5 に示した.

図 5 より, 1) すべての実験群において反転後 0.5 s 前後で瞳孔径増加幅が増加していること, 2) いずれの実験群においても, 概して瞳孔径増加幅はブロックが進むにつれて小さくなっていく傾向にあること, 3) 左右反転群と上下反転群を比べると, 左右反転群は学習ブロック全体を通して瞳孔径増加幅が大きいこと, 4) 上下反転群と上下左右反転群を比べると, 上下左右反転群は第1ブロックでの瞳孔径増加幅が著しく大きい, その後のブロックでは, むしろ上下反転群よりも小さくなること, 5) 上下左右反転群は他の実験群とは瞳孔径増加幅の変化の形状が異なり, 反転後の減少が比較的早いこと, が分かる.

一方, 反転課題での瞳孔径の波形と比較するため, 通常課題を実施したテスト前ブロックとテスト後ブロックについても, 同様の方法で同期加算平均した波形を描いた. ただし, 同期加算の基準の時刻は反転の時刻の平均である試行開始後 12 s とした. 通常課題では実験群による違いは見られなかった, ここでは左右反転群の例を図 6 に示した.

図 6 より, 通常課題であるテスト前ブロックとテスト後ブロックのいずれにおいても, 反転課題に見られるような瞳孔径増加幅の増加は一切見られず, ほとんど変化がないことが分かる. これは他の実験群でも同様であった.

次に, 平均瞳孔径増加値のブロックによる変化を図 7 のグラフに示した.

図 7 より, 1) いずれの実験群においても, 概して平均瞳孔径増加値はブロックが進むにつれて小さくなっていく傾向にあるが, 左右反転群と上下反転群ではあまり明確でないこと, 2) 左右反転群と上下反転群を比べると, 左右反転

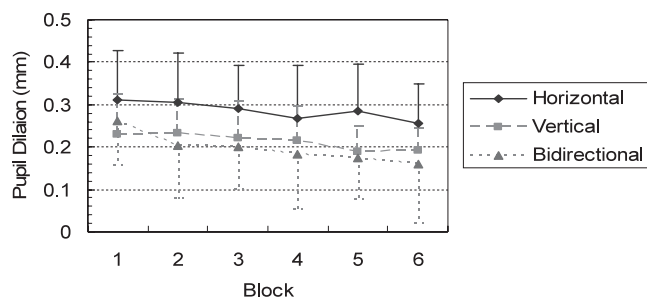


図7 平均瞳孔径増加値の変化

Fig. 7 Learning curve of pupil dilation for each learning block.

群は学習ブロック全体を通して平均瞳孔径増加値が大きいこと、3) 上下反転群と上下左右反転群を比べると、上下左右反転群は第1ブロックでの平均瞳孔径増加値が大きいですが、その後のブロックでは、むしろ上下反転群よりも小さくなること、が分かる。

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。まず、ブロックによる平均瞳孔径増加値の減少の傾向について確かめた。その結果、左右反転群と上下反転群については危険率5%、上下左右反転群については危険率1%の水準で、第6ブロックの値が第1ブロックの値に比べて有意に小さいことが示された。

次に、実験群間の比較を行った。その結果、左右反転群と上下反転群の間においては、第1ブロック、第3ブロック、第5ブロック、第6ブロックでは、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(第2ブロックと第4ブロックでは10%水準の有意傾向のみ)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。

3・2・3 **トラッキング誤差と瞳孔径の関係** まず、平均誤差増加値と平均瞳孔径増加値の相関係数を算出した結果、左右反転群、上下反転群、上下左右反転群における相関係数は、それぞれ0.16, 0.22, 0.23であり、かなり小さく、相関は弱いといえる。また、ブロックごとに相関係数を求めたところ、ブロックによるばらつきが見られ、第1ブロックの値は比較的大きく(最大値は上下反転群の第1ブロックでの0.41)、第2ブロックもしくは第3ブロックにかけて小さくなる傾向が見られるものの、学習に伴う変化には明確な傾向はなかった。

一方、平均誤差増加値の変化と平均瞳孔径増加値の変化の関係を分かりやすくするため、前者を横軸に、後者を縦軸にして描いたものを図8に示した。この図では個々の試行での平均誤差増加値と平均瞳孔径増加値を学習ブロックごとに平均してプロットしている。

図8により、どの実験群においても、学習に伴って両方の値が減少していることが分かるとともに、実験群による

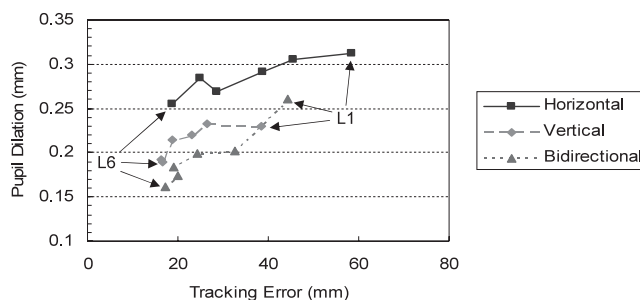


図8 平均誤差増加値と平均瞳孔径増加値の関係

Fig. 8 Relation between tracking error and pupil dilation.

差異も明確に示されている。特に、平均瞳孔径増加値が反転の種類に対応した数値を示していることが特徴的である。つまり、第6ブロックでの平均誤差増加値の値はどの実験群でもほぼ等しいにも関わらず、その際の平均瞳孔径増加値は、左右反転、上下反転、上下左右反転の順に小さくなり、その大小関係は第2ブロック以降変わらない。

4. 考 察

4・1 反転課題に対する学習

2次元トラッキング課題の実験において、いずれの種類反転においても、学習に伴いトラッキング誤差が減少していくことが示され、明らかな学習効果が確認できた(図2)。しかし、反転の種類による違いが見られた。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。これらのことは運動学習と瞳孔反応の実験においても同様の結果であった(図3, 図4)。

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[10]と筆者らの実験[11]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ない、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[11]。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ない、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、2次元トラッキング課題の実験、運動学習と瞳孔反応の実験の両方において、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[11]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、比較的早くコツをつかむことができ、また一度コツ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。このことは上下左右反転群の2次元絶対誤差の変化の形状が他の2つの実験群とは異なること(図3)とも関連していると考えられる。

4・2 運動学習と認知的負荷

反転課題のいずれの反転の事象においても瞳孔径の拡大が見られるが(図5)、逆に学習ブロックの前後の通常課題では一切瞳孔径の拡大は見られない(図6)。このことは反転の事象と観察された瞳孔反応との関係を示唆している。また、そうした瞳孔反応は、認知課題を実行する際に見られる典型的なもの[4]である。

平均誤差増加値の変化(図4)と平均瞳孔径増加値の変化(図7)の関係をみると、どの実験群においても、平均誤差増加値が大きいと平均瞳孔径増加値も大きく、学習に伴って両方の値が減少していることが分かる。

これらのことを総合すると、学習による認知的負荷の変化が瞳孔反応の変化と関連しているということが推察される。瞳孔径の拡大が認知的負荷によるものとするなら、その認知的負荷の要因としては、少なくとも2つの可能性がある。1つは、誤差に対する反応、つまり、誤差を検出し、それを修正しようとするのと、もう1つは、反転していることへの対応である。

もし前者の誤差に対する反応が主たる要因であるなら、個々の試行での平均誤差増加値と平均瞳孔径増加値の相関が高いはずである。しかし、両者の相関係数については、左右反転群、上下反転群、上下左右反転群のいずれにおいてもかなり小さく、相関は弱かった。また、ブロックごとに相関係数を求めてみても、学習に伴う変化には明確な傾向はなかった。

このことから、誤差に対する反応だけが認知的負荷の要因となり瞳孔径の増加が見られたのではなく、むしろ反転していることへの対応が負荷となったと考えられる。すなわち、反転に対処することに難しさを感じていても、実際にうまく制御できる場合とそうでない場合もあるし、逆にいえば、学習がある程度進んで、うまく制御できたとしても、それに困難さを感じる場合もあれば、そうでない場合(つまり、楽に対応できている場合)もあると考えられ、そうしたばらつきにより相関係数が小さくなったと推察され

る。

トラッキング誤差と瞳孔径の関係(図8)からも、運動学習に伴って、全体としては、反転への対応を次第に学習し、困難さをあまり感じずに制御できる状態、つまり、より自動的な処理へと変容していったことが推察される。また、一般的に瞳孔径は課題の困難さに対応して拡大するとされるが、実際に、平均瞳孔径増加値は、左右反転、上下反転、上下左右反転の順に小さくなり、その大小関係は第2ブロックから第6ブロックまで変わらず、課題自体の困難さを示していると考えられる。

さて、反転課題のいずれに対してもトラッキング誤差は減少し、学習が行われていることは明らかであった。そして、この学習によって課題に対する困難さ、つまり、認知的負荷は軽減されたはずである。一方で、運動学習に伴い、散瞳量が減少することも確認できた。すなわち、散瞳量が学習に伴って減少したことは、課題に対する認知的負荷が次第に減少していったことを意味すると推察される。この推察は、散瞳量が課題の困難さに伴って増加するという知見の自然な拡張であり、散瞳量の減少は運動学習における認知的負荷の軽減、つまり自動化を示している可能性を示唆している。

なお、運動学習は脳皮質・小脳などの系によるもの[12]とされるのに対して、瞳孔反応は自律神経系によるもの[13]であるとされるので、運動学習と瞳孔反応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 瞳孔反応についての検討

認知的負荷によって瞳孔径が拡大することは一般的な知見であるとしても、瞳孔径が拡大したからといって、それが認知的負荷によるとは限らず、本研究においても、課題遂行以外の要因[14]についても十分に検討する必要がある。

まず、瞳孔に入射する光量の影響を考える必要がある。これについては、実験方法のところで述べたように、視対象の明るさが極力一定になるように工夫をした。また、輻射反射の影響の可能性もある。これについては視距離を一定にすることで対処した。しかし、視対象の明るさや視距離を一定にしても、自発動揺が影響する可能性がある。自発動揺は大きな場合には2~3mm程度との報告もあるが[14]、本実験におけるテスト前ブロックとテスト後ブロックにおいて、通常課題のトラッキング動作を行わせた場合のデータにより、そのような大きな動揺がなかったことを確認している(図6)。

また、瞳孔径の拡大の要因として、驚愕があるが瞳孔径の拡大が驚愕によるものならば、もっと急激に減少するはずであり、今回の現象には当てはまらないと考えられる。一方、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が、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と考えられる。その他、疲れなどの影響も否定できないものの、テスト後ブロックも含めて、それらが大きく影響したと思われるデータは見られない。

それでもなお、瞳孔反応には非線形な特性を有していることや散瞳量は初期瞳孔径の影響を受けるという問題もある。それらについては、やはり同期加算平均などの処理[13]によって対処するしかないと考えられる。たとえば、本研究では、瞳孔径については、ブロックごとにすべての試行(5試行×被験者20名=100データ)を同期加算し、平均した波形を描いているが、これにより、反転という事象に対する瞳孔反応として、一貫した傾向を検出[13]できたといえる。

以上のように、瞳孔反応の測定にはさまざまな問題点があるが、測定やデータ処理の工夫により、ある程度は影響を取り除くことができ、瞳孔径は認知的負荷の指標となる可能性があるかと推察される。

5. おわりに

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、それと同時に認知的負荷の指標として瞳孔径を測定した。その結果、いずれの反転においても、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、反転に伴い瞳孔径の拡大が観測されたが、動作の学習とともに散瞳量も減少していくことが示された。しかし、個々の試行における誤差と散瞳量の相関係数は小さいので、瞳孔反応は単に誤差に対する反応だけで生じたものではなく、むしろ反転していることへの対応によるものと考えられる。以上のことより、散瞳量の減少は運動学習に伴う認知的負荷の軽減、すなわち自動化を示す可能性が示唆された。

謝辞 本研究は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Patrick Haggard 教授に感謝申し上げます。

文 献

1. 阪口 豊: 運動習熟. 日本認知科学会編, 認知科学辞典. 共立出版, 東京, 2002, p. 59.
2. Schneider W, Shiffrin R M: Controlled and automatic hu-

- man information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*. **84**: 1-66, 1977.
3. Brown T L, Carr T H: Automaticity in skill acquisition: mechanisms for reducing interference in concurrent performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. **15**: 686-700, 1989.
4. 松永勝也: 瞳孔運動の心理学, ナカニシヤ出版, 京都, 1990, pp. 78-95.
5. Beatty J: Task-evoked pupillary response, processing load, and the structure of processing responses. *Psychological Bulletin*. **91**: 276-292, 1982.
6. Sirevaag E J, Stern J A: Ocular measures of fatigue and cognitive factors. *In*: Backs R W, Boucsein W eds, *Engineering psychophysiology*. Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, 2000, pp. 269-287.
7. Matthews G, Davies D R, Westerman S J, Stammers R B: Divided attention and workload. *In*: *Human performance: Cognition, stress and individual differences*. Psychology Press, East Sussex, 2000, p. 97.
8. Kobori S, Haggard P: Cognitive Load during Learning of Tracking Task. *Proc of European Cognitive Science Conference 2003*. Cognitive Science Society, Osnabrueck, 2003, pp. 119-204.
9. 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*. **403**: 192-195, 2000.
10. 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.
11. 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.
12. 有働正夫: 運動制御. 塚原伸晃編, 脳の情報処理. 朝倉書店, 東京, 1984, pp. 152-225.
13. 松永勝也: 瞳孔運動の心理学. ナカニシヤ出版, 京都, 1990, pp. 7-30.
14. 福田忠彦: 生体情報論. 朝倉書店, 東京, 1997, pp. 137-144.

小堀 聡 (コボリ サトシ)

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。



日本生体医工学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 日本認知科学会, 日本人間工学会, バイオメカニズム学会などの会員。

阿部 陽祐 (アベ ヨウスケ)

2003年龍谷大学理工学部電子情報学科卒業。2005年龍谷大学大学院理工学研究科修士課程修了。現在、日本特殊塗料株式会社勤務。在学中、運動学習に関する研究に従事。

