

# 消滅を伴うトラッキング課題の学習における瞳孔反応

小堀 聡<sup>1</sup> 阿部 陽祐<sup>2</sup> 中園 正吾<sup>2</sup>

<sup>1</sup>龍谷大学理工学部電子情報学科 <sup>2</sup>龍谷大学大学院理工学研究科電子情報学専攻

トラッキング動作の学習における自動化について考察するため、ターゲットもしくはカーソルが一時的に消滅する課題を用いて被験者実験を行い、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、ターゲット消滅とカーソル消滅のいずれにおいても、消滅と再出現の事象に対して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が減少していくことが示された。消滅の事象に対する瞳孔反応は内部モデルに基づく制御に関わるものであり、散瞳量の減少は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。

## 1. はじめに

楽器演奏やスポーツ技能の上達などの運動技能の学習においては、感覚・知覚系と運動系の協調の習熟が重要な役割を果たしている。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 (automaticity) 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 (阪口, 2002)。

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 (Schneider & Shiffrin, 1977)。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、自動化においてどのような認知過程が関わっているのか、などについての一致した見解はこれまでほとんど見られない (Brown & Carr, 1989)。

### 1.1 消滅を伴うトラッキング課題と内部モデル

運動の制御や学習の研究には、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 (Poulton, 1974)。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粹にフィードバック制御だけではなく、予測が関わるといこと

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 (Poulton, 1974) 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 (Beppu et al., 1987)。

こうしたトラッキング動作での予測の問題については、内部モデルと関連づけて議論されることが多い。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る。

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、トラッキング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 (Imamizu et al., 2000)。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。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という。本研究では、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ることにした。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

ここでは仮に、前者を視標モデル、後者を運動モデルと呼ぶことにする。

トラッキングにおける視標モデルと運動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。ターゲット消滅では、カーソルは見え続けるが、ターゲットが試行途中のある時点で見えなくなるので、被験者はターゲットの動きを予測しながら操作する。逆に、カーソル消滅では、ターゲットは見え続けるが、カーソルは見えなくなる。消滅していたターゲットもしくはカーソルはやがて再出現するが、その間も被験者は制御を続けなければならない。

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モデルの、カーソル消滅においては運動モデルの修正・更新に使われるに違いない。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。

## 1.2 瞳孔反応と認知的負荷

筆者らは、以前より運動課題として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 (Kobori & Haggard, 2003)。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 (松永, 1990; Beatty, 1982; Sirevaag & Stern, 2000) 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 (Matthews et al., 2000) 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課題を用いて被験者実験を行い、制御誤差を測定すると同時に瞳孔径を測定し、学習に伴う瞳孔反応の変化を分析した。その結果、いずれの反転においても、制御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が減少していくことが示された。この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 (小堀・阿部, 2007a)。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、反転を伴うトラッキング課題においては、反転という事象において同時に大きな誤差が生じるので、その際に観測される瞳孔反応の要因が、反転への対応のための負荷なのか、誤差の修正のための負荷なのかを明確に区別することはできない。それに対して消滅を伴うトラッキング課題では、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ため、誤差信号を視覚的に検出することができないが、ターゲットあるいはカーソルが再出現すれば、誤差信号が再び得られる。すなわち、ターゲットあるいはカーソルが消滅している間は、消滅への対応が負荷となるのに対して、再出現後は誤差の修正が負荷となり、これら2つの認知的負荷に対する瞳孔反応がもしあるとすれば、それらを別々に観測することができる。

## 1.3 本研究の目的

本研究では、トラッキング動作の学習における自動化について考察するため、ターゲットもしくはカーソルが一時的に消滅する課題を用いて被験者実験を行い、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明らかにする。

ここでは、消滅課題は2つの異なる過程に関わると仮定している。すなわち、まず、ターゲットもしくはカーソルが消滅すると、被験者は内部モデルに頼ることになるということ、また、ターゲットもしくはカーソルが再出現すると、視覚フィードバックにより誤差を検出し、フィードバック制御による修正がなされるということ、である。そして、消滅および再出現の事象に対して瞳孔反応が観測されるとすれば、それらはそれぞれ内部モデルによる制御とフィードバック誤差による制

御に関わるものであり、学習に伴う散瞳量の変化により自動化との関係について考察することができる。

## 2. 方法

### 2.1 実験システム

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トリガー信号により、瞳孔径測定システムでの測定との同期が取られる。

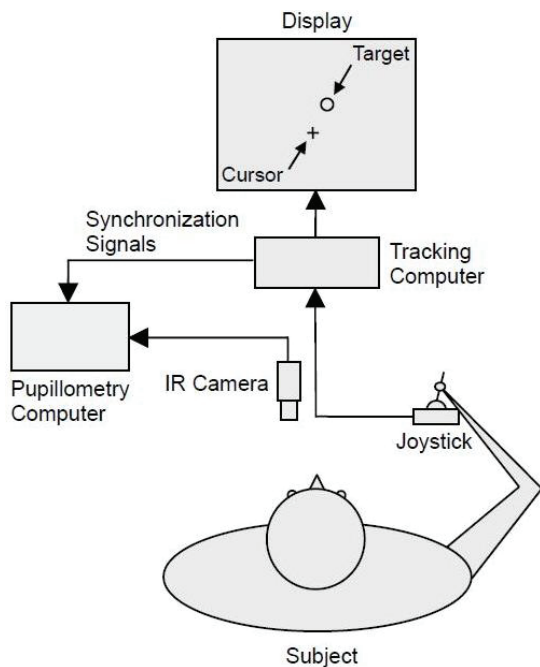


図1 実験システム

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 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)、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。

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 デル, Pentium4 2.8GHz, 1GB, 160GB, 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0.02mm, サンプリング周波数60Hz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 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5s)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。

実験の課題には、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5sから7s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。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

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

被験者20名を、T群とC群の10名ずつ（男女5名ずつ）の実験群に分けた。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。どちらの実験群でも、テスト前ブロックとテスト後ブロックでは、通常課題（試行途中で消滅のない課題）をそれぞれ1ブロックずつ実施する。一方、学習ブロックでは、T群はターゲット消滅を、C群はカーソル消滅を、それぞれ6ブロックずつ実施する。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。

## 3. 結果

### 3.1 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。そのグラフから分かることは以下のように要約できる（小堀・阿部, 2007b）。

- 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ことである。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。

### 3.2 平均誤差増加値の算出

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、消滅の時刻を基準として、-1.0sから0sまでの誤差データの平均を基線とし、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と基線と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）と定義し、制御成績の評価に用いることにした。

ここで、この評価値についての学習効果を調べるために、実験群（T群、C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での平均誤差増加値の比較を行った。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（小堀・阿部, 2007b）。

### 3.3 瞳孔径データの波形

瞳孔径については、-1.0sから0sまでの瞳孔径の平均を基線（0mm）とする処理を施して瞳孔径増加幅を算出したうえで、誤差データと同様の方法で同期加算平均波形を求め、実験群別に描いた。ここでは、学習ブロックについてのみ図2に示した。

図2より、次のようなことが分かる。

- 1) ターゲットやカーソルの消滅後には散瞳が見られるが、それは0.5s頃から始まり、1.5s頃にピークとなる。一方、再出現の散瞳量は消滅後よりも大きく、ピーク状態の持続時間もやや長い。
- 2) 最も重要な特徴は、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。T群では、学習ブロック1と2は他のブロックと比べて、消滅後の散瞳量が明確に大きく、C群では、学習ブロック1～3は学習ブロック4～6と比べて、消滅後の散瞳量が明確に大きい。

### 3.4 平均瞳孔径増加値の算出

瞳孔径データの波形から散瞳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、消滅と再出現の時刻をそれぞれの基準として、0.5sから2.0sまでの瞳孔径増加幅の平均を試行ごとに算出し、それぞれを平均瞳孔径増加値1および同2（単位はmm）と定義し、

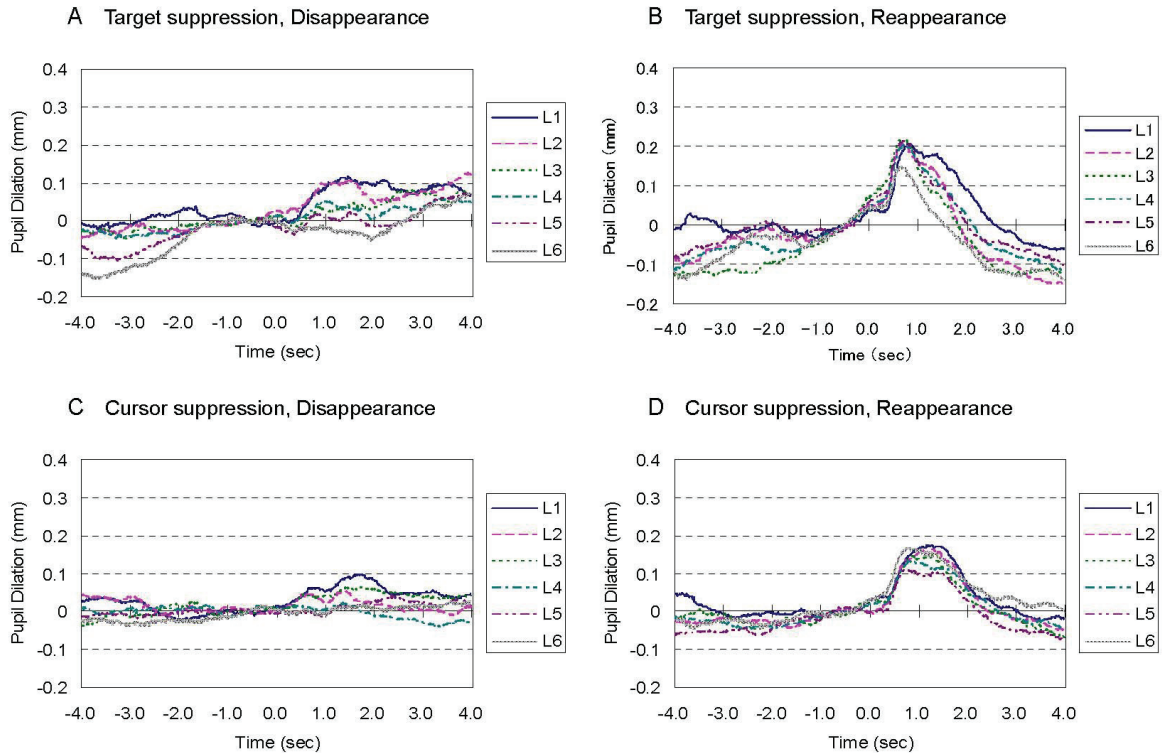


図2 学習ブロックごとの瞳孔径データの同期加算平均波形

瞳孔反応の評価に用いることにした。

ここでは、消滅の事象に対する瞳孔反応に着目して評価値と学習の関係を調べることを目的とし、実験群 (T 群, C 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 での平均瞳孔径増加値 1 の比較を行った。その結果、ブロックによる主効果が見られ ( $F(1,18) = 12.929, p = 0.002$ ), 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、交互作用もなかった。すなわち、いずれの実験群の消滅の事象においても学習に伴う散瞳量の減少が認められた。

## 4. 考察

### 4.1 消滅課題における内部モデルの学習

本研究では、視覚運動制御における 2 種類の内部モデルを検討する方法として、ターゲットもしくはカーソルの消滅を伴うトラッキング課題を用いた。ターゲットやカーソルを表示させなくすることは視覚フィードバックによる誤差修正の可能性を排除し、被験者に予測的表現だけに基づいて制御を続けることを要求する。ターゲット消滅では、カーソルは手の位置に関する視覚的情報を与え続けているのに対して、被験者はターゲットの

現在の位置を予測しなければならない。カーソル消滅では、ターゲットは視覚的に示されているが、被験者は手の位置の情報からカーソルの位置を推測・予測しなければならない。

実験結果より、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、明確な学習効果が認められた。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 (Craink, 1947)。それゆえ、トラッキング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ことを意味するといえる。

### 4.2 学習における瞳孔反応の変化と認知的負荷

筆者らの先行研究では、反転を伴うトラッキング課題を用いて同様の実験を行い、反転の事象に対する瞳孔径の拡大を観測した。そして、個々の試行における誤差と散瞳量の相関係数は小さいことから、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

の対応によるものであると推察した (小堀・阿部, 2007a)。しかしながら, 誤差に対する反応と反転自体への対応を明確に区別することはできなかった。

それに対して, 消滅を伴うトラッキング課題における瞳孔反応の測定は, 消滅と再出現という2つの事象に対する独立した認知的負荷の指標を与えてくれる。本研究の実験では, 再出現において制御誤差に関わると考えられる大きな散瞳が見られた。一方, 消滅の間においては, それより小さな, しかし, 確かな散瞳を観測したが, この瞳孔反応は誤差によるものではなく, 消滅への対応によると考えられる。つまり, 本研究では, 瞳孔反応という生理学的相関現象を, トラッキング動作における誤差による制御という成分とモデルによる制御という成分に分離することができたといえる。このような分離は他の研究例では見られない。

さらに重要なことは, 本研究での瞳孔反応は, 誤差による制御とモデルによる制御の両方において, 学習に伴う明確な変化を示しているということである。一般的に自動化とは, 課題を遂行する際の認知的負荷が学習に伴って軽減されることをいう。本研究において消滅の事象に対応して観察された散瞳量の減少は, 誤差の修正ではなく, 内部モデルの学習に関連した自動化を示していると考えられる。

## 5. おわりに

本研究で示された消滅の事象に対する瞳孔反応は内部モデルに基づく制御に関わるものであり, 散瞳量の減少は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。

なお, ターゲット消滅とカーソル消滅のいずれにおいても散瞳現象が見られたことから, 瞳孔反応は視標モデルと運動モデルのどちらの学習にも関わっていると考えられる。

## 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) で行った研究によるものです。関係者の方々, 特に Patrick Haggard 教授に感謝申し上げます。

## 参考文献

Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary response, processing load, and the structure

- of processing responses. *Psychological Bulletin*, **91**, 276-292.
- Beppu, H., Nagaoka, M., & Tanaka, R. (1987). Analysis of cerebellar motor disorders by visually guided elbow tracking movement, 2. Contribution of the visual cues on slow ramp pursuit. *Brain*, **110**, 1-18.
- Brown, T. L., & Carr, T. H. (1989). Automaticity in skill acquisition: mechanisms for reducing interference in concurrent performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **15**, 686-700.
- Craik, K. J. W. (1947). Theory of the human operator in control systems: I. The operator as an engineering system. *British Journal of Psychology*, **38**, 56-61.
- Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Puetz, B., Yoshioka, T., & Kawato, M. (2000). Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. *Nature*, **403**, 192-195.
- Kobori, S., & Haggard, P. (2003). Cognitive load during learning of tracking task. *Proceedings of European Cognitive Science Conference 2003*, 119-204
- 小堀 聡・阿部 陽祐 (2007a). 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.
- 小堀 聡・阿部 陽祐 (2007b). 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.
- 松永 勝也 (1990). 『瞳孔運動の心理学』. 京都: ナカニシヤ出版.
- Matthews, G., Davies, D. R., Westerman, S. J., & Stammers, R. B. (2000). Divided attention and workload. In: *Human performance: Cognition, stress and individual differences*. East Sussex: Psychology Press.
- Poulton, E. C. (1974). *Tracking skill and manual control*. New York: Academic Press.
- 阪口 豊 (2002). 運動習熟. 日本認知科学会 (編), 『認知科学辞典』. 東京: 共立出版.
- Sirevaag, E. J., & Stern, J. A. (2000). Ocular measures of fatigue and cognitive factors. In: R. W. Backs & W. Boucsein (Eds.), *Engineering psychophysiology*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, **84**, 1-66.