

視覚運動変換学習における  
誤差信号獲得タイミングに関する  
実験的研究

石川 拓海

電気通信大学

2013年6月

視覚運動変換学習における  
誤差信号獲得タイミングに関する  
実験的研究

電気通信大学大学院情報システム学研究科  
博士（工学）の学位申請論文

石川 拓海

2013年6月

視覚運動変換学習における  
誤差信号獲得タイミングに関する  
実験的研究

博士論文審査委員会

主査	阪口	豊	教授
委員	長岡	浩司	教授
委員	榎森	与志喜	教授
委員	野嶋	琢也	准教授
委員	佐藤	俊治	准教授

著作権所有者

石川 拓海

2013

# **An Experimental Study on The Timing of Error Signal Acquisition in Visuomotor Learning.**

Takumi Ishikawa

## Abstract

An important issue in motor learning research is how the brain accepts the error signals required for maintaining and improving task performance in a changing environment. Previous research has demonstrated that the brain accepts error signals most effectively when visual feedback is synchronized with the end of reaching movements, meaning that timing of error feedback is essential in motor learning. The present study investigated this problem by behavioral experiments in which timing of error feedback was manipulated. Specifically, I conducted two experiments using shooting tasks. In the first experiment, the visual information of a

thrown ball was blocked to examine whether or not the visual information of the endpoint was required for prism adaptation. The result shows that magnitude of prism adaptation was maintained when the endpoint position was not fed back implying that visuomotor learning occurs regardless of the knowledge of success or failure of the shooting task. In the second experiment, I examined how the timing of visual feedback affected the visuomotor learning using a virtual shooting task where subjects controlled their arm/wrist movements to meet a target on a screen with a cursor as accurately as possible. The timing of visual feedback of the impact position was manipulated so that it occurred either ahead of or behind the true time of impact (task-end). The result shows that magnitude of adaptation marked two distinct peaks when the visual feedback was given just after the end of body movement and around the task end. This suggests that two different error-acceptance mechanisms might work in parallel. To conclude, the present study investigated the timing of error signal acquisition in visuomotor learning and clarified that the knowledge of task performance was not essential for learning of visuomotor transformation and that not a single error-acquisition mechanisms worked in the brain.

# 視覚運動変換学習における 誤差信号獲得タイミングに関する実験的研究

石川 拓海

## 概要

視覚で捉えた目標に対して手を伸ばしたり物を投げ当てたりするには、視覚情報を運動情報に適切に変換する必要がある。ヒトは環境の変化に柔軟に対応して正しく運動ができることから、このような視覚運動変換は学習によって逐次修正されていると考えられる。視覚運動変換学習の一つであるプリズム適応の実験では、くさび型プリズムにより視覚的に変形した環境を作り出し、その環境における運動学習過程を観察する。この学習過程において、脳が課題遂行中に得られた視覚情報を利用していることは自明だが、脳が視覚像に含まれるどのような情報をいつどのようにして利用しているかは明らかにされていない。この問題に関して、到達運動のプリズム適応では運動結果の視覚フィードバックが運動終了から50ミリ秒以上遅れると、適応の効率が有意に減ずることが報告されている。この知見は、視覚運動変換学習において脳が誤差信号を効果的に受容するタイミングが存在する可能性を示している。本研究の目的は、この問題をさらに追及し、脳がいかな

るタイミングの視覚情報を視覚運動変換学習に利用しているかを行動実験により明らかにすることである。視覚運動変換学習の実験で課題に用いられることが多い到達運動では、手を目標に運ぶ身体運動そのものの終了時刻と手が目標に達するという課題の終了時刻が同一であるほか、到達時に知覚される視覚や体性感覚情報の人工的な操作が難しいという制約がある。本研究では、この問題を解決するため、投てき課題（ボール投げ運動）を課題に採用して実験を行った。投てき課題では、ボールを投げるという身体運動の終了時刻とボールが的にあたるという課題の終了時刻が一致しないほか、課題終了が視覚情報を通じてしか知覚できないために、運動学習に用いられる視覚情報操作の効果が観察しやすいという利点がある。本研究ではまず、いかなるタイミングの視覚情報が運動学習に必要なかを探るため、実環境においてシャッタ眼鏡を用いて投てき運動中に得られる視覚情報を動的に遮断する実験を行った。具体的には、ボールが手を離れてから着弾するまでの軌道やボール着弾位置の視覚情報を遮断することがプリズム適応に与える影響を調査した。その結果、ボールの軌道が提示されれば適応は生じるという結果が得られた。この「ボールの運動軌道だけで適応が生じる」という結果は、課題の結果を知らなくてもボールの軌道を示す視覚情報が得られれば適応が進行することを示しており、視覚運動変換学習が課題の成否とは無関係に進行する可能性を示唆している。なお、ボール軌道の視覚情報そのものが適応を駆動



しているか、軌道の視覚情報から予測される着弾点と目標との誤差が適応を駆動しているかは今後の検討課題である。次に、「到達運動終了後の一定時間以内に運動結果に関する視覚情報がフィードバックされないと適応の効率が減弱する」現象について、PC上での仮想的な投てき課題を対象にして実験を行った。この課題は、手首関節あるいは肘関節の屈曲運動によりPC画面上の仮想ボールを目標に投げ当てる課題である。この実験環境において、ボールの到達位置の視覚情報をフィードバックするタイミングを操作して視覚運動変換学習に与える影響を調査した。脳が運動課題の成否が判明するタイミングで誤差信号を効果的に取得していると仮定すれば、視覚フィードバックが課題終了（ボール到達）時刻付近で行われるときに視覚運動変換の学習効率が高くなると予想できる。しかし、実験の結果、課題終了時刻付近だけでなく、投てきする身体運動の終了直後に結果に関する視覚情報をフィードバックした場合にも学習の効率が高くなることが明らかになった。この結果は、課題内容を若干変更した追実験においても一貫して観察された。このように、二つの異なるタイミングで視覚運動変換学習の効率が高くなったという結果は、脳の中に少なくとも二つの誤差信号獲得メカニズムが並列して存在している可能性を示唆する。特に、課題の成否とは直接的に関係ない身体運動終了直後に適応の効率が向上したという結果は、上述した実環境における実験の結果と同様に、視覚運動変換学習が課題の成否とは独立した誤差信号によ

り駆動されている可能性を示唆する。以上まとめると、本研究では、視覚運動変換学習における誤差信号獲得タイミングについて調査した。そして、脳は誤差信号を効果的に受容するタイミングを複数持つこと、運動課題の成否とは独立した誤差信号で適応が駆動されることを明らかにした。本研究の結果は、視覚運動変換学習において、脳が学習に用いる視覚情報を効率的に受容するタイミングや誤差信号が単一ではなく、並列的に複数存在することを示唆する。

# 目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.1.1 論文の構成	4
第2章 研究背景	7
2.1 視覚運動変換学習	7
2.1.1 プリズム適応において検討すべき課題	9
2.2 問題意識	13
2.2.1 取り上げる問題	14
第3章 視覚運動変換学習に必要な視覚情報	17
3.1 導入	17
3.2 予備実験	18
3.2.1 方法	18
3.2.2 結果及び考察	22

3.3	実験 1	23
3.3.1	方法	24
3.3.2	結果	30
3.4	実験 2	31
3.4.1	方法	31
3.4.2	結果	37
3.5	考察	38
第 4 章	学習を効率的に駆動する誤差信号獲得タイミング	41
4.1	背景	41
4.2	方法	46
4.2.1	実験装置	46
4.2.2	試行の流れ	47
4.2.3	実験条件	50
4.3	結果	52
4.4	追加実験	58
4.5	追加実験結果	59
4.6	考察	60
第 5 章	全体的考察と議論	65

第 6 章 結論	67
謝辭	69
參考文獻	71

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

ヒトにとって運動は欠かせない機能であるが、ヒトはどのようにして運動を獲得するのであろうか。乳幼児を見ればわかるように、ヒトは生まれたときから目で見た目標に手を伸ばす到達運動のような運動を正確に素早く実行することはできない。このような運動の多くは生後の学習により習得される。また、ヒトは成長期における身体の成長や、眼鏡の装着による視環境の変化といった周囲の環境変化に対して適応し、変化した環境下で適切な運動が行えるようになる。このように、ヒトには新たな運動を学習し、また、変化する環境に適用する能力がある。この運動学習はヒトの脳が持つ重要な機能の一つであり、そのメカニズムの解明は脳研究における大きな課題である。

本研究ではヒトの運動学習のメカニズムを解明することを目指し、運動学習の一つである「視覚運動変換学習」に焦点をあてた。視覚運動変換学習とは「目で見た目標に対して行った運動の結果を観察することで行われる視覚と運動の関係

の学習」である。例えば、目で見たコップに手を伸ばすといった運動を行うとき、ヒトの脳は視覚から得たコップの位置情報などを、腕などの身体を動かす筋への運動指令に変換することで、コップに手を伸ばす運動を実現する。このように視覚からの情報を適切な運動の情報に変換する過程を学ぶのが視覚運動変換学習である。

この視覚運動変換学習の研究において次のような興味深い報告がなされている。到達運動の視覚運動変換学習において、運動結果である指先の到達位置に関する視覚フィードバックが運動終了から 50 ミリ秒以上遅れる、すなわち、指が目標に到達した時刻から  $1/20$  秒以上経過した後に指先位置の情報がフィードバックされる場合、視覚フィードバックの遅れがない場合と比べて、有意に適応量が減るという研究報告 [1] である。この報告は視覚運動変換学習において、脳が特定のタイミングで誤差信号を獲得できないと適応の効率が減衰することを示している。著者はこの現象に着目して本研究を始めた。脳が視覚運動変換学習に用いる視覚情報が提示されるタイミングが明らかになれば、脳が学習に用いる情報や脳で駆動される学習メカニズムについての手がかりが得られると考えたからである。

視覚運動変換学習における誤差信号獲得のメカニズムを調査するにあたり、問題となるのは学習を駆動する手がかりとなる感覚情報の切り分けの難しさである。例えば、到達運動では、指先が目標に到達したとき、運動結果に関する情報が、視

覚だけでなく身体の姿勢や指先の触覚といった体性感覚を通じても与えられる。このように運動結果に関する感覚情報が複数の手がかりにより同時にフィードバックされるため、どの感覚手がかりが学習を駆動させているかを切り分けて調査することが難しい。そのため、学習を駆動する信号獲得のメカニズムを調査するためには、これらの感覚情報を切り分けて調査できる実験環境を構築し、それぞれの手がかりが学習に与える影響を調査する必要がある。

著者はこの問題を解決するため、ボール投げ運動に代表される投てき運動課題を題材とした。投てき運動課題は本研究の問題に対して有用な特徴を持つ。例えば、ボールを的に当てる運動では、運動終了時の姿勢がボールの到達位置そのものを示さないため、運動結果に関する体性感覚と視覚情報を切り分けることができる。また、ボールを投げるための運動が終了する時刻とボールが標的に当たり課題が終了する時刻が一致せず、この二つの手がかりを切り分けることが可能である。投てき運動課題がもつこれらの特徴を利用すれば、運動結果に関してフィードバックされる情報を視覚情報のみに絞ることが可能となり、視覚情報に含まれる誤差信号に狙いを絞った実験が可能となる。さらに、ボールを投げるための身体運動が終了する時刻とボールが標的に到達する課題が終了する時刻が一致しないため、脳が効率的に誤差信号を獲得するタイミングはどちらかを調査することができる。著者は本研究の問題に取り組むにあたり、投てき運動課題のこのよう



な特徴を利用した行動実験を計画した。

このような考察の下で，本研究では，投てき運動課題を題材とした二つの視覚運動変換学習の行動実験を行った。まず，いかなる視覚情報が運動学習に必要であるかを探るため，実環境においてシャッタ眼鏡を用いて投てき運動課題中に得られる視覚情報を動的に遮断する実験を行った。具体的には，投げたボールの途中軌道やボールの着弾位置の視覚情報を遮断することがプリズム適応に与える影響を調査した。次に，運動結果に関する視覚情報がいつフィードバックされると運動学習が効果的に進むかを探るためにPC上での仮想的な投てき運動課題を対象にして実験を行った。この課題は，ビデオゲームでのボウリングゲームを模したもので，画面上の仮想ボールを腕の運動により目標に投げ当てる課題である。この実験環境において，仮想ボールの到達位置の視覚情報をフィードバックするタイミングを操作して視覚運動変換学習に与える影響を調査した。本論文では，これらの実験により得られた，視覚運動変換学習における誤差信号獲得タイミングのメカニズムに関する新たな知見を示す。

### 1.1.1 論文の構成

本論文は，以下の6つの章から構成される。

第1章は本論文の序論である。第2章では本研究の背景と関係する知見や先行研

究，そして本研究の問題意識について述べる．第3章では，「いかなる視覚情報が視覚運動変換学習に必要か」という問題に対して行った，実環境における投てき運動課題のプリズム適応課題の行動実験について述べる．ここでは，プリズム適応実験において，ボールの着弾位置に関する視覚情報が提示されなくとも適応が生じることを示し，投げ出されたボール軌道に関する視覚情報が一部分でも提示されると適応を生じることを明らかにする．第4章では，「いかなるタイミングで誤差信号を提示すると視覚運動変換学習が効率的に進むか」という問題に対して行った，仮想環境における視覚運動変換学習課題の行動実験について述べる．ここでは，仮想環境を用いた利点を最大限に利用して，ボールの着弾位置の情報を種々のタイミングでフィードバックし，どのタイミングで視覚情報を提示すると学習が効率的に進行するかを明らかにする．その結果に基づき脳が学習に必要な誤差信号を獲得するタイミングについて考察する．第5章では，以上の実験結果に基づき，視覚運動変換学習における誤差信号獲得タイミングのメカニズムについて議論する．そして，第6章では本研究の結論を述べる．

## 第2章 研究背景

本章では、研究の背景として、最初に運動学習、特に視覚運動変換学習について説明する。次に、視覚運動変換学習の先行研究から著者が着目した研究報告について述べる。最後に、本研究で取り上げる問題を示す。

### 2.1 視覚運動変換学習

ヒトは生まれつき到達運動や歩行といった、成人が日常的に行うような運動を正確に素早く行うことはできない。このような運動の多くは生まれつきヒトに備わっていたものではなく、学習により後天的に獲得される。さらに、ヒトは変化した環境下に対して適応し新たな環境の中で適切な運動が行えるように学習できる。ヒトの脳が持つこのような機能を「運動学習」と呼ぶ。運動学習は身近かつ重要な脳の機能であり、そのメカニズムの解明は脳の研究における大きな課題である。ここでは、本研究の題材である運動学習の一つ「視覚運動変換学習」を取り上げる。

ヒトの脳は、目標位置などの視覚情報をもとに、適切な運動指令を作り出して目的の運動を行う。このような視覚情報と運動情報の関係は先天的に備わっているものではなく、生後に学習・獲得される。また、それらの関係が変化した状況でも、その変化に追隨して正しく運動することができる。例えば、くさび型プリズムを組み込んだプリズム眼鏡を装着するなどして視覚的に定位される位置が変化した場合、それまでに学習した視覚と運動の関係が乱されるため、ヒトは視覚的目標に対して正しく手を伸ばすことができなくなる。しかし、プリズム眼鏡をかけたまま繰り返し目標に対して手を伸ばす運動を行うと、新しい環境における視覚と運動の関係を学習し、目標に対して正しく手を伸ばせるようになる。さらに、新しい環境に十分に適応した後、かけていたプリズム眼鏡を外すと、再び目標に対して正しく手を伸ばすことができなくなる。この状態は、眼鏡をはずした環境で繰り返し運動を行うことによって解消される。この過程は、眼鏡を装着したときに生じる「適応」過程と対比して「逆適応」と呼ばれる。なお、眼鏡を外したときに生じた誤差の大きさは残効量と呼ばれ、新しい環境における適応の大きさを示す指標として用いられることが多い。本研究においても、この量を適応の大きさを示す指標として用いる。

この例で示したように、視覚情報と運動情報の関係を学習することを視覚運動変換学習という。また、くさび型プリズムを用いた変位した視覚環境への適応は

特にプリズム適応 (prism adaptation) と呼ばれる。成人の被験者は、日常生活の中で到達運動を頻繁に行っており、到達運動の実行に必要な視覚運動変換はすでに獲得している。したがって、通常的环境下で到達運動に関わる視覚運動変換の学習過程を観測することは難しい。しかし、プリズム眼鏡を装着することで視覚と運動の関係を変形すれば、脳は新たな視覚情報と運動情報関係を学習しなければならないため、視覚運動変換学習の過程を容易に観測できる。このように、プリズム適応はプリズム眼鏡を装着させるだけで容易に運動の学習過程を観察することができるため、運動学習研究の題材として良く用いられてきた [1-12]。そして、プリズム適応のメカニズムを解明することは、視覚運動変換学習のメカニズムを解明することと強く結びついている。本研究では視覚運動変換学習の研究を行うにあたり、プリズム適応とプリズム適応を模した仮想実験課題を題材とした。

### 2.1.1 プリズム適応において検討すべき課題

プリズム適応はどのような情報に基づいて駆動されているのであろうか。到達運動のプリズム適応では、課題終了時に、到達すべき目標の位置と実際に指先が到達した位置に関する視覚情報がフィードバックされる。到達運動は目標に他正しく手を伸ばす運動であるから、到達した指先位置と目標位置の差を誤差信号として考えて教師あり学習の枠組みで学習メカニズムを捉えることは一見自然であると

考えられる。また、小脳に疾患を持つ被験者でプリズムが阻害されること [13–16] や、小脳が運動学習に関係し [17–20]、Albus [21]、Marr [22] が提唱した「小脳パーセプトロン仮説」をはじめとしてそれが教師あり学習のメカニズムで駆動されている仮説が有力である [23] ことを考慮すれば、プリズム適応が教師あり学習の枠組みで実現されている可能性は高い。

このような背景の下で、ここではプリズム適応を教師あり学習の枠組みで捉えて考えてみる。その場合、着目すべき問題は脳が視覚運動変換の学習において何を学習しているかである。先に、目標位置と到達位置のずれが誤差情報であることについて触れたが、ここでの誤差情報は「到達運動の課題としての誤差」であって、視覚運動変換学習における誤差ではない。なぜならば、視覚運動変換学習において脳が学習すべきものは「正しい運動指令」であって「目標位置」ではないからである。一方で、プリズム適応は運動結果に関する視覚情報がなければ生じないから、視覚運動変換学習を生み出すもとになる情報は視覚情報の中に含まれていることになる。このことから、脳の中には視覚情報の含まれた信号に基づいて運動指令を修正するメカニズムがあると考えべきである。そのようなメカニズムの可能性は種々あるが、そのメカニズムを考えることは視覚情報をもとに運動指令を計算するメカニズム、すなわち、視覚運動変換メカニズムを考えることになる。例えば、脳は運動に関する因果関係の順モデル、すなわち、出力した運動

指令とその結果生じた手の到達位置の関係を保持していて、その順モデルを用いて適切な運動指令を計算しているというメカニズムを想定することができる。この仮説の下では、脳は視覚運動変換学習において順モデルを学習することになるので、そのための誤差信号は順モデルが予測した到達位置と実際の到達位置の差として与えられることになる。このように考えれば、視覚情報の中に視覚運動変換学習に必要な誤差情報が含まれている可能性を理解することができる。

このような前提の下で、本研究では、視覚運動変換学習には「どのような視覚情報が必要か」また、「視覚情報はいつ与えられるべきか」という二つの問題について検討する。

この問題に関連して、足がかりとなる研究報告がすでになされている。到達運動の視覚運動変換学習において、運動結果の視覚フィードバックが運動終了から遅れると適応効率が減ずるという報告である。[1,24-26]。これは、脳が運動終了直後の短い時間のあいだにフィードバックされた誤差信号を効率的に適応に反映させていることを示唆している。さらに、近年、Tanakaら [27] と Hondaら [28] が、Kitazawaらの研究をさらに発展させた研究を行っている。Tanakaら [27] はまず、運動終了と視覚フィードバックのあいだに 100 ミリ秒の時間遅れを挿入した場合に適応の効率が減弱することを示した。彼らはさらに、被験者がこの時間遅れに適応し、物理的には 100 ミリ秒ある遅れが主観的には 40 ミリ秒程度に知覚される

ような状況の下で適応の実験を行った場合にも場合においても、適応効率の減弱が生じることを報告した。この結果に基づき、彼らは視覚運動変換学習の効率は、被験者が主観的に知覚する遅れの大きさではなく、物理的な遅れの大きさに依存して決まると結論付けている。一方、Hondaら [28] は、被験者が視覚フィードバックの時間遅れに気がつかないように、徐々に遅れ時間を挿入する実験において、やはり適応効率が減少することを示した。さらに、彼らは「遅れなし」「時間遅れを突然挿入」「実験開始時から時間遅れを挿入」の三つの条件間で適応の大きさを比較した。その結果、実験開始時から遅れを挿入した条件では、時間遅れを突然挿入した条件と異なり、適応の大きさは有意な減少が見られなかった。この結果に基づき彼らは、運動結果とその知覚の時間的な繋がりが、視覚運動変換学習における重要な要因であると述べている。すなわち、彼らの結果は、Tanakaらの結論とは対照的に、被験者の主観的な知覚が適応効率関係していることを意味している。

このような違いはあるものの、これらの研究は、脳が視覚運動変換学習において「運動終了と同期した時刻」に「運動結果に関する視覚情報」がフィードバックされることが学習に重要であることを示している。本研究では、これらの知見を踏まえ視覚運動変換学習における誤差信号獲得タイミングを調査するため、二つの問題を提起した。



## 2.2 問題意識

著者はまず、到達運動における誤差信号獲得の重要なタイミングでは身体運動の終了と課題の終了が同時であること、そして投てき運動課題（ボールの的当て課題）では、これらのタイミングが一致しないことに着目した。すなわち、投てき運動課題を利用することで、身体運動終了と課題終了を時間的に切り分けて考えることができ、どちらのタイミングが視覚運動変換学習を効率よく駆動させる誤差信号獲得のタイミングかを調査することが可能となると考えた。

本論文では、視覚運動変換学習を効率よく駆動させる誤差フィードバックのタイミングは「身体運動終了時刻」と「課題終了時刻」のどちらなのか、という問題意識の下、投てき運動を題材とした視覚運動変換学習課題の行動実験を行う。なお、投てき運動課題においても視覚運動変換学習が生じることが報告されている [14, 29, 30]。

投てき運動課題は上述の問題に対して有用な特徴を有する。例えば、投てき運動課題では、ボールを投てきするための身体運動の終了時刻と課題であるボールの目標到達の終了時刻が一致しない。そのため、これらのタイミングを時間的に切り分けた実験環境を構築でき、どちらのタイミングが視覚運動変換学習に誤差信号獲得に関する重要なタイミングかを探ることが可能となる。また、投てき運動課題では運動終了時の姿勢に関する体性感覚情報が運動結果であるボール着弾

位置と一致しない．そのため，より視覚情報のみに焦点を当てた視覚運動変換学習の実験環境を構築することができる．

この問題に加えて，本研究では，いかなる視覚情報が視覚運動変換学習に必要なものであるかという問題についても議論する．投てき運動においては，ボールが運動者の手を離れてから目標に到達するのに時間がかかり，その間被験者は運動結果を観察することができる．ボールが飛行する途中の軌道の視覚情報も変形されていることを考えれば，運動者は飛行するボールの軌道からも変形された視覚環境に関する情報を得ることができる．すなわち，運動者は，ボールの着弾位置だけでなく飛行中のボールの位置情報もまた視覚運動変換学習を駆動できる可能性がある．本研究では，視覚運動変換学習に不可欠な視覚情報が何であるのかについて検討する．

本論文では，このような学習を駆動する手がかりの切り分けに有用な特徴を持つ投てき運動課題を題材に行動実験を行った．

### 2.2.1 取り上げる問題

以上で述べてきたように，本論文では，視覚運動変換学習における誤差信号獲得タイミングについて調査を行うため，「いかなる視覚情報が視覚運動変換学習に必要なか」「脳が効率的に誤差信号を獲得するタイミングはいつか」という二つの問

題を取り上げる．

上述したように，視覚運動学習では課題終了時に得られる視覚情報に着目しがちであるが，運動終点（投てき運動においては着弾位置）以外に提示される視覚情報が適応に影響を与える可能性は十分に考えられる．

本研究では，投てき運動課題を用いてこの問題に対してアプローチする．具体的には，ボールが手を離れたあとに得られる視覚情報を制限することにより，いかなる視覚情報に視覚運動変換学習に必要な誤差信号が含まれているかを調査することができる．実験環境は実環境にて構築し，視覚運動変換学習の題材としてプリズム適応を用いて行動実験を行った．

一方，第2の問題については，身体運動終了と課題終了が異なる時刻に生じる投てき運動課題を用いることにより，どちらのタイミングが効率的に誤差信号を獲得するタイミングであるかを調査する．本研究では，視覚情報を提示するタイミングを系統的に操作するために，PC上に仮想投てき運動課題の実験環境を構築した．なお，仮想空間における視覚運動変換学習課題についてはすでに報告がなされている [3]．

本研究では上記の方法で覚運動変換学習における誤差信号獲得タイミングに関する実験的研究を行った．それぞれの実験の詳細な解説は次章より行う．

# 第3章 視覚運動変換学習に必要な 視覚情報

## 3.1 導入

本章では「いかなる視覚情報が視覚運動変換学習に必要なか」という問題に対して取り組んだ，投てき運動課題における視覚運動変換学習課題の行動実験について述べる．具体的には，実環境にて投てき運動におけるプリズム適応課題の実験環境を構築して行動実験を行った．実験では被験者が投げだしたボールの軌道に関する視覚情報を部分的に遮断することにより視覚情報の遮断がプリズム適応に与える影響を調査した．

本章では，初めに試験的に行った予備実験を紹介する．次に，予備実験の結果を受けて構築した実験環境にて行った二つの実験について述べる．

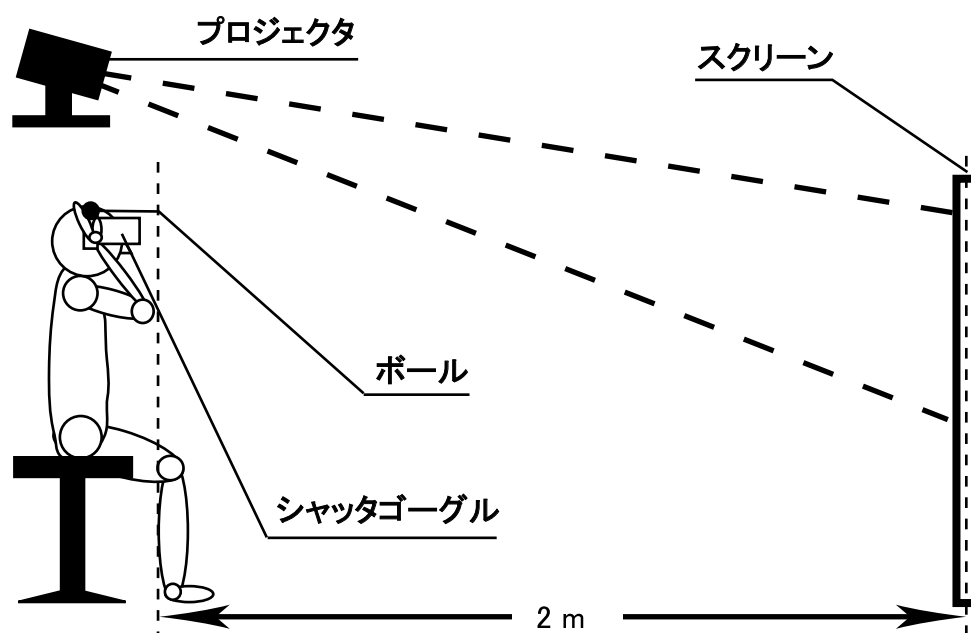


図 3.1: 実験環境

## 3.2 予備実験

本実験に先立ち、著者は投てき運動のプリズム適応実験環境を構築し、プリズム適応が生じることを確認するための予備実験を行った。

### 3.2.1 方法

#### 実験装置

予備実験における実験装置を図3.1に示す。この装置は、目標を投影するプロジェクタとスクリーン、被験者の視覚情報を制御するためのシャッタゴーグル (FE-1 goggles, Cambridge Research Systems 社製)、被験者が球を手で持っていること

を検出するセンサ、および、球がスクリーンに着弾したことを検出するセンサから構成されている。

シャッタゴーグルは強誘電液晶 (FLC) 技術を用いたもので、開閉に要する時間は 0.1 ミリ秒、開放時の光の透過率は 30%、開放時：閉鎖時のコントラスト比は 1000:1 である。被験者が投げる球は表面にアルミ箔を巻いた直径約 3 cm の粘土球 (以下、ボール) である。被験者の視野を水平方向に偏移させるプリズムとして、樹脂製のフレネルレンズ型平面プリズム (Fresnel 3M Press-on plastic lenses 30 ジオプタ：3M Health Care 社製) を利用し、これをシャッタゴーグルに着脱できるように加工したプリズム眼鏡を用意した。このフレネルレンズは先行研究 [14, 29] において使用されたものと同じである。センサには、ボールが被験者の指から離れたことを感知するために被験者の指に装着する投球センサと、投てきしたボールがスクリーンに到達したことを感知するためにスクリーンに設置した着弾センサがある。これらのセンサを用いてシャッタの開閉を制御した場合、ボールが手を離れてからシャッタが開閉するまでの遅れ時間は 1 ミリ秒、着弾してからシャッタが開閉するまでの遅れ時間は 10 ミリ秒 以下であった。

これらのセンサとシャッタゴーグルは、マイコン (Peripheral Interface Controller: PIC, マイクロチップ社製) で制御した。ボード上にはプロジェクタを介して目標 (1 辺 5 cm の十字) と、計測に用いる 1 cm 方眼を提示した。被験者は、スクリー

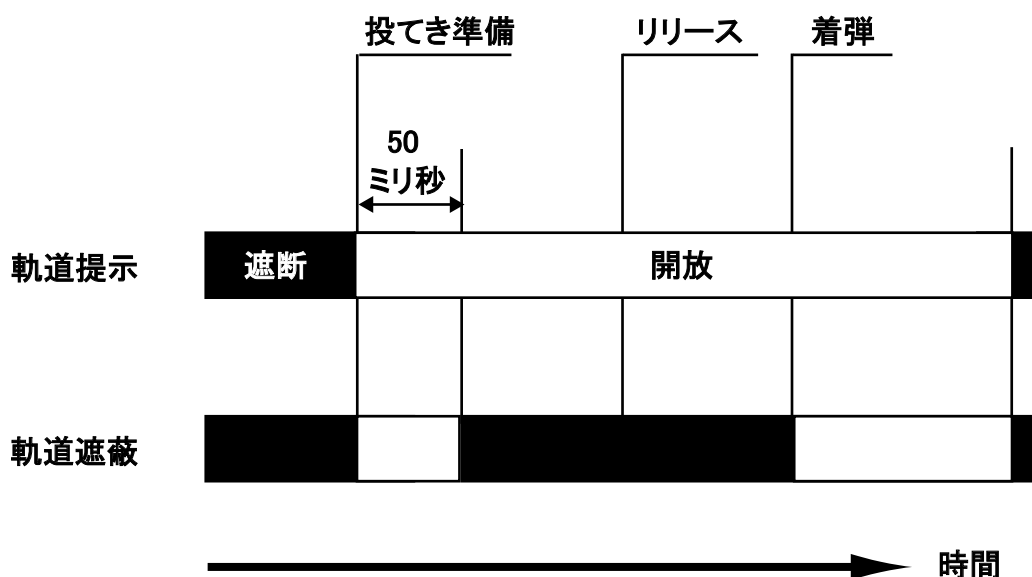


図 3.2: 試行の流れ

ンから 2 m 離れた位置に設置された回転可能なイスにシャッタゴーグルと投球センサをそれぞれ装着して座り，座った状態で投てき運動を行った。

### 試行の流れ

実験には 2 名の被験者が参加した。

実験を始めるのに先立って，被験者には，2 m 離れた目標に一定の精度 (10 回の投てき中，全てが目標位置から水平方向誤差  $\pm 10$  cm 以内に着弾) で投てきできるようになるまで練習を課した。また，被験者には常に見えた目標に向かってボールを投げるように指示した。

図 3.2 に試行のダイアグラムを示す。実験中，被験者は常にシャッタゴーグルと投球センサを装着した。被験者はイスに座り，右こめかみ付近に手を持って行き，

投てき準備の姿勢を取る．被験者がこの姿勢を保ちつつ，実験者からボールを受け取ると，シャッタが開き目標位置が確認できるようになる．被験者はボールを受け取った後，できるだけ早く目標に向けてボールを投てきする．シャッタは実験条件に指定された時間が経過した後再び閉じる．ボールがスクリーンに着弾したのち，被験者は素早く投てき準備姿勢に戻り，次のボールを受け取る．以後，被験者は実験者の指示があるまでこの動作を繰り返した．プリズム眼鏡の着脱を行う時は，実験者の合図で被験者は投てき準備姿勢を保ちつつ目を閉じ実験者から指示があるまで待機するようにした．

一試行に要する時間は約 4 秒であったが，タイマーなどを用いて試行の間隔を一定に保つ操作は特に行わなかった．試行回数 70 回の実験では，プリズムの着脱時間を含め，おおよそ 6 分で 1 セッションが完了した．

#### 実験条件

実験条件として軌道提示条件と軌道遮蔽条件の 2 条件を設けた．軌道提示条件では，被験者がボールを把持した時点からボールが着弾する時点までシャッタが開放される．すなわち，飛行するボールの軌道全ての視覚情報が提示される．一方，軌道遮蔽条件では，ボール投てきの 50 ミリ秒後にシャッタが閉じる．その後ボール着弾時にシャッタが開き，目標位置とボール着弾位置を見ることができる．この



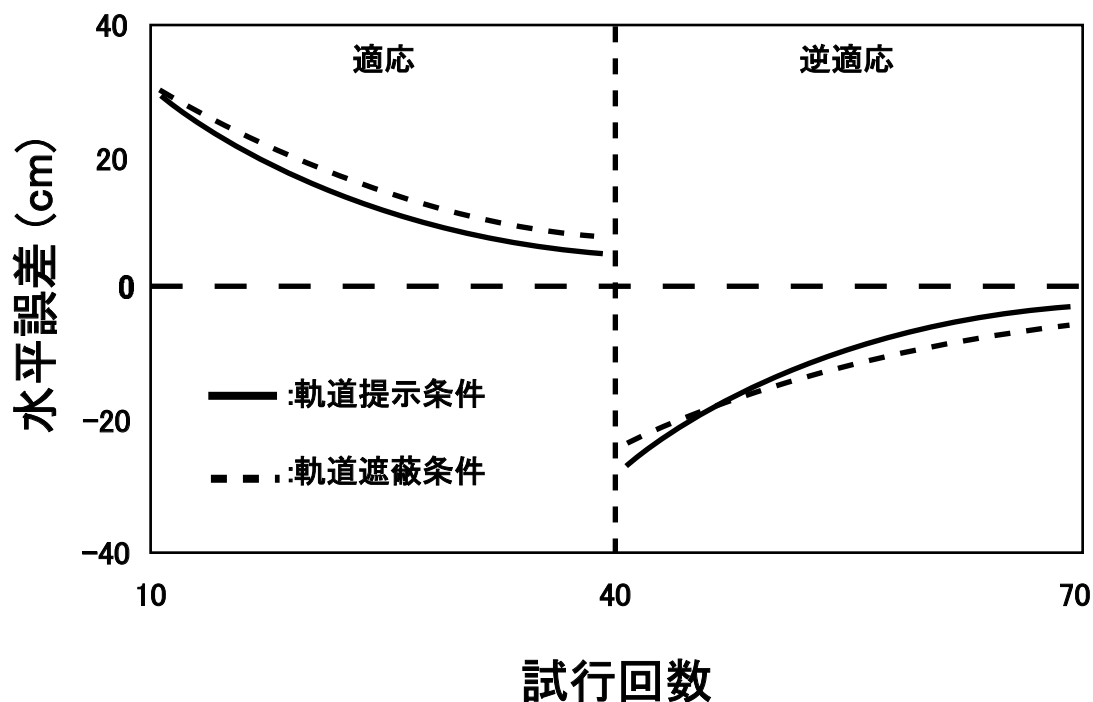


図 3.3: 実験結果

条件では，飛行中のボール軌道が観測できないこととなる．

被験者がそれぞれの条件に3回ずつ参加した．二つの条件間の順序の影響が生じないように，条件の順序については被験者間でカウンターバランスをとった．

### 3.2.2 結果及び考察

図 3.3 に結果を示す．横軸は試行回数を表する．縦軸は水平誤差であり，座標軸の正方向は被験者から見て右方向を表す．グラフは被験者2名の全試行の平均誤差に対して次式で与えられる曲線を用いてフィッティングを行って得られたものであり，実線は軌道提示条件，破線は軌道遮蔽条件の結果を表す．

$$e(t) = A \exp^{-\beta t} \quad (3.1)$$

ここで、 $e(t)$  は試行番号  $t$  における水平誤差の大きさ、 $A$  は初期誤差の大きさ、 $1/\beta$  は適応の時定数である。

この結果から明らかなように、本実験環境において2名の被験者はどちらもプリズム適応を示した。また、ボール軌道の視覚情報の有無は適応量に影響を及ぼさなかった。これらの結果は、ボールの飛跡に関する視覚情報の有無にかかわらず的に衝突する際の視覚情報が与えられればプリズム適応が進むことを示している。

一方で、本予備実験の過程で、この実験の手続き不備が判明した。例えば、予備実験では被験者の投てき運動について制限を設けていなかったため、被験者ごとに異なる動作をしていた可能性があった。著者はこれらの予備実験で明らかになった問題点を受け、問題点を解決した新しい実験環境を構築した。

### 3.3 実験1

予備実験の結果は、飛行中のボールの運動軌道に関する視覚情報が得られなくても、ボールの着弾位置に関する情報が得られれば適応は同じように進むことを示している。この結果は、運動課題に直結する運動結果が視覚的にフィードバックされれば、それ以外の情報は視覚運動変換の学習には不要であることを示唆し

ている．そこで，本実験では，この実験とは逆に，着弾位置の視覚情報を遮断し，飛行中のボール軌道の視覚情報のみを提示した条件で実験を行った．

また，予備実験で明らかになった実験環境や実験手順の不備を解消するべく，実験環境と手順を改良した．まず，プロジェクタ光源から漏れる光が実験環境に与える影響をなくすためにプロジェクタによる視覚刺激提示を廃止し，代わりに暗幕で覆われたブース内でレーザーポインタにより視覚刺激を提示することとした．その際，間接照明を設置することで，シャッター開放時に十分な視覚フィードバックが得られるように光量を調整した．また，投てき運動の際に身体の自由度が高いと被験者間で運動の統制がとれず，実験内での学習効果が異なる可能性が生じたため，運動の自由度を制限する治具と装置を導入した．

### 3.3.1 方法

#### 実験装置

実験装置の構造を図 3.4 に示す．この装置は，目標を提示するレーザーポインタ，被験者の視覚情報を制御するためのシャッターゴーグル（FE-1 goggles, Cambridge Research Systems 社製）と姿勢を固定するためのあご台と肘置き，被験者が球を手で持っていることを検出するセンサ，および，球がボードに着弾したことを検出するセンサから構成されている．シャッターゴーグルは実験 1 と同じものを用いた．

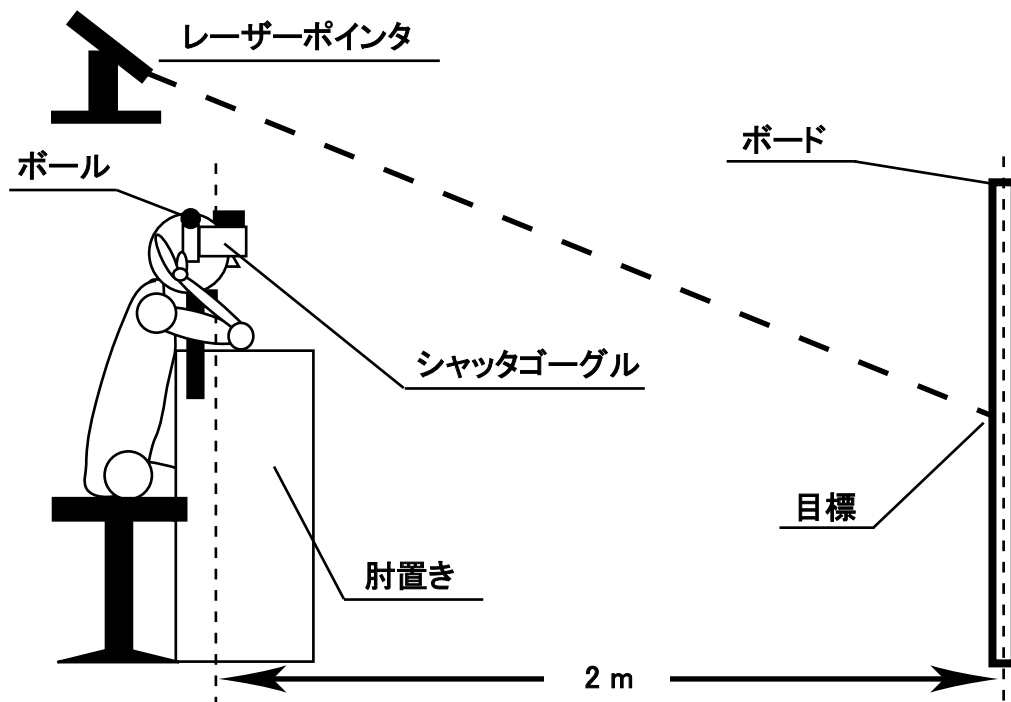


図 3.4: 実験環境

ゴーグルはあご台に固定されており、ゴーグルを通してボードを覗くと、姿勢が固定されるようになっている。被験者が投げる球は表面にアルミ箔を巻いた直径約3cmのゴム製のボールである。被験者の視野を水平方向に偏移させるプリズムとして、アクリル樹脂製のくさび型プリズム(約12度)を作成し、これをシャッタゴーグルに着脱できるように加工したプリズム眼鏡を用意した。この眼鏡は、ゴーグルへの取り付け方により、水平方向の左右どちらの方向へも視野を偏移させることができる。ボールが被験者の指から離れたことを感知するために被験者の指に装着する投球センサと、投てきしたボールがボードに到達したことを感知するためにボードに設置した着弾センサを設置した。これらのセンサを用いてシャッタ

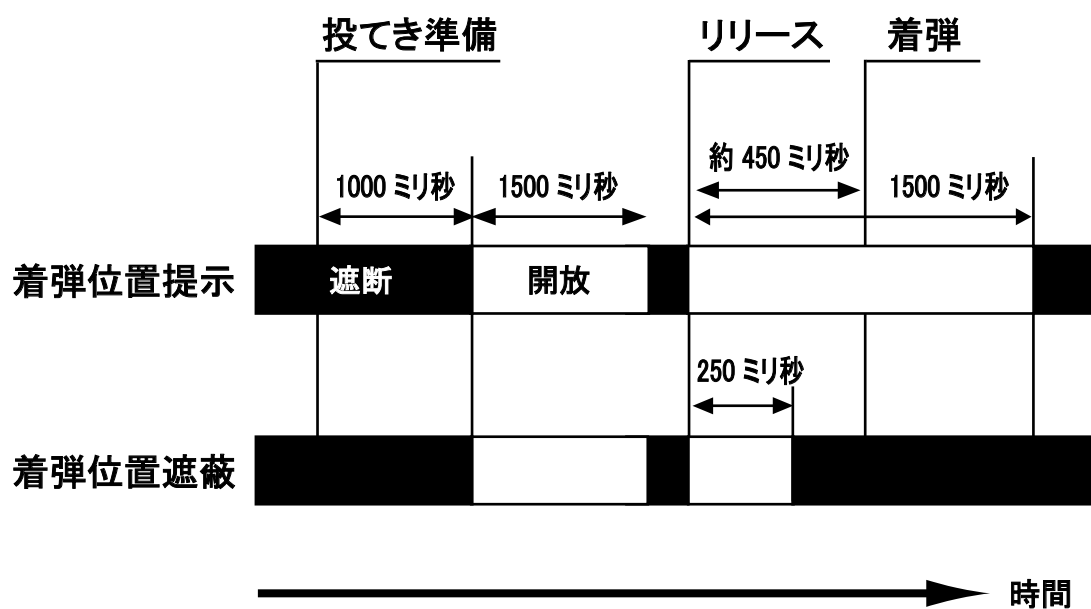


図 3.5: 試行の流れ

の開閉を制御する場合，ボールが手を離れてからシャッタが開閉するまでの遅れ時間は1ミリ秒，着弾してからシャッタが開閉するまでの遅れ時間は10ミリ秒以下であった．これらのセンサとシャッタゴーグルは，マイコン（Peripheral Interface Controller : PIC, マイクロチップ社製）で制御した．レーザーポインタは緑色光でボード上に目標を提示する．目標の初期位置は被験者正面だが，水平方向にランダムな位置に移動できるように工作した．被験者は，ボードから2m離れた位置に設置されたシートに座り，シャッタゴーグルが設置されたあご台にあごを載せて姿勢を固定し，投球センサを装着した．被験者はこの状態で投てき運動課題を行った．

### 試行の流れ

実験には3名の被験者が参加した。

実験を始めるのに先立って、被験者には、2m離れた目標に一定の精度(10回の投てき中、すべてが目標位置からの水平方向の誤差が $\pm 10\text{cm}$ 以内に着弾)で投てきできるようになるまで練習を課した。また、被験者には常に目標が見えたところに向かってボールを投げるように指示した。

図 3.5 に試行のダイアグラムを示す。実験中、被験者は常にシャッタゴーグルと投球センサを装着してイスに座り、肘置きとあご台で姿勢が固定された状態で試行を行った。まず、実験者の合図に従い右こめかみ付近に設置されたボールホルダからボールを受け取る。被験者がボールを掴むと指先のセンサが反応してシャッタが開き、被験者に目標を一定時間だけ提示する。シャッタは1.5秒後に再び閉じ、被験者の視界は遮断される。目標が見えなくなり次第、被験者はできるだけ早く、目標に向けてボールを投てきする。ボールが被験者の手から離れた時点から再びシャッタが開く。シャッタは実験条件により指定された時間が経過すると再び閉じる。ボールがボードに着弾したのち、被験者は待機姿勢をとり、次の合図まで待機する。次の試行はボール着弾の5秒後に始まる。以後、被験者は実験者の指示があるまでこの動作を繰り返す。プリズム眼鏡の着脱を行う時は、実験者の合図で被験者は投てき準備姿勢を保ちつつ目を閉じ実験者から指示があるまで待機す

る。一試行に要する時間は約 12 秒であったが、タイマーなどを用いて試行間隔を一定に保つ操作は特に行わなかった。

1 回の実験は 35 試行で行われた。35 回の試行は三つのブロックに分かれている。最初の 5 試行は適応前期間である。続く 15 試行はくさび型プリズムを装着した環境で運動を行う、適応期間である。最後の 15 試行は、プリズムを外してもとの環境で行う逆適応期間である。試行回数 35 回の実験では、プリズムの着脱時間を含め、おおよそ 7 分で 1 セッションが完了した。

#### 実験条件

実験条件として、着弾位置提示条件と着弾位置遮蔽条件の 2 条件を用意した。着弾位置提示条件では、ボールリリースの 1500 ミリ秒後にシャッタが閉じる。予備実験により得られたボールリリースから着弾の平均時間は約 450 ミリ秒なので、被験者はボールの着弾位置を見ることができる。一方、着弾位置遮蔽条件では、シャッタはボールが手から離れた 300 ミリ秒後に閉じるため、被験者はボールの着弾位置を目視できない。

被験者はそれぞれの条件に 3 回ずつ、計 9 セッションずつ参加した。条件の順序が結果に与える影響をおさえるために、条件の順序については被験者間でカウンターバランスをとった。

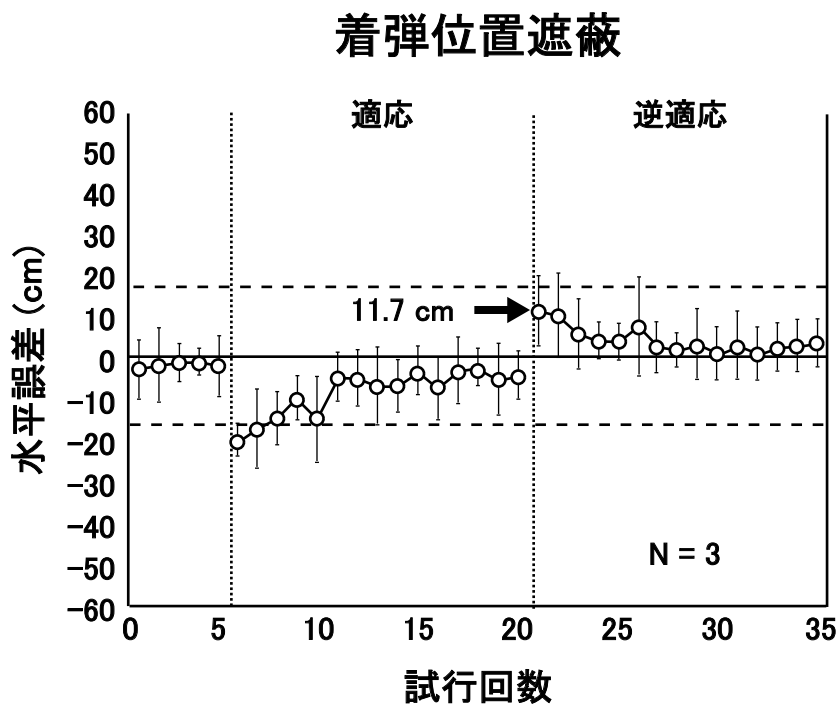
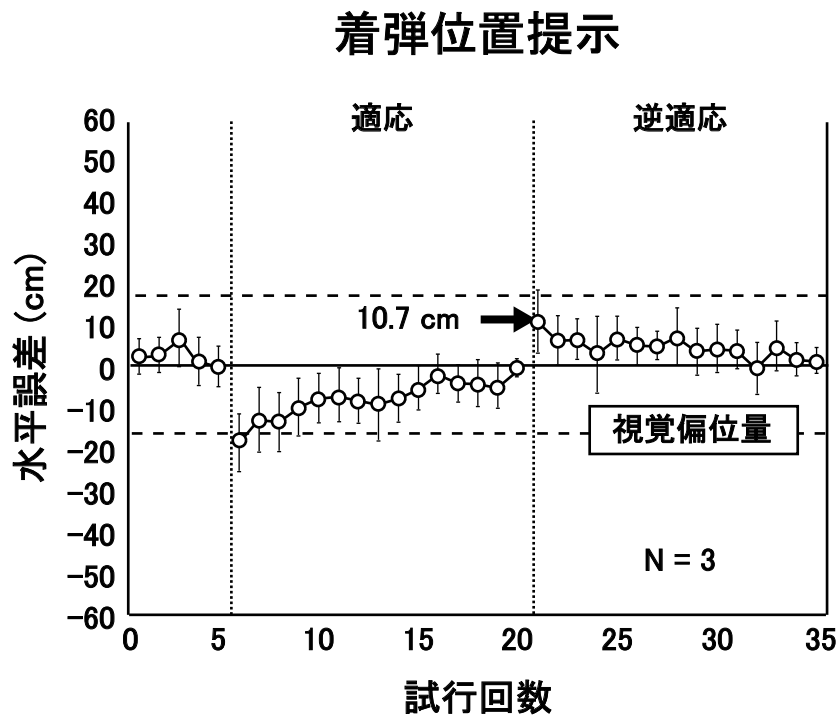


図 3.6: 実験1 結果: 適応曲線



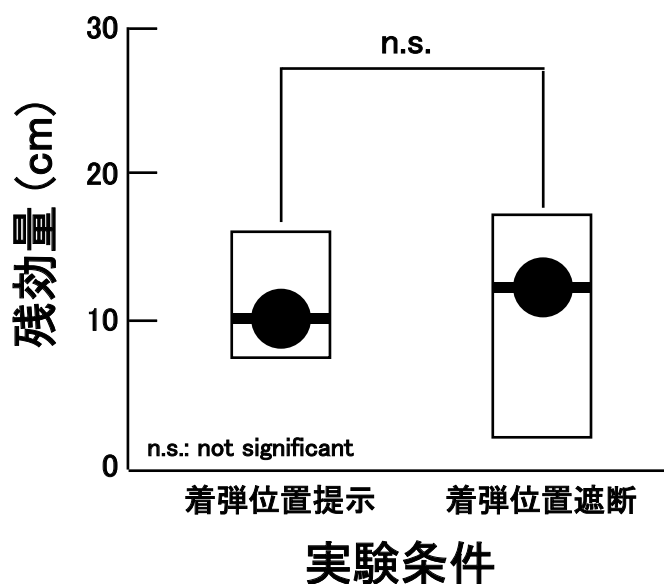


図 3.7: 実験 1 結果 : 残効量

### 3.3.2 結果

実験結果を図 3.6 に示す。この図は 9 つのセッションにおける水平誤差の中央値を試行番号ごとに示したもので、横軸は試行番号、縦軸は誤差を表す。矢印は逆適応期間における第 1 試行の誤差の中央値であり、この値を残効量と呼ぶ。両方の条件において、残効量は有意に 0 よりも大きく ( $p < 0.01$ , Wilcoxon rank-sum test), 本実験環境においてプリズム適応が生じていることがあらためて確認できた。

次に、二つの条件間で残効量を比較した。その結果を図 3.7 に示す。この図は 2 条件で得られたデータを四分位で示したもので、横軸は条件、縦軸は残効量を示す。統計的検定の結果、二つの条件間で有意な差が見られなかった ( $p = 0.9502$ )。この結果は、ボール着弾点の視覚情報の有無にかかわらず、飛行するボールの軌道

が途中まで与えられれば、プリズム適応が同様に生じたことを意味している。すなわち、着弾時点での誤差情報がなくてもプリズム適応の適応量が減少しないことを示している。

## 3.4 実験2

脳が適応に用いる視覚情報の別の可能性として、被験者自身の身体に関する視覚情報が考えられる。ボールを投げたあとの腕の位置はボールの着弾位置とのあいだには一定の関連性があるため、運動後の身体に関する視覚情報がフィードバックされれば、その情報をもとにして視覚運動変換学習が生じる可能性は完全には否定できない。本研究では、腕に関する視覚情報が適応に影響を与える可能性を検討するため、第2の実験を行った。

### 3.4.1 方法

#### 実験装置

実験装置（図 3.8）の多くは実験1の装置と同じであるが、プリズムの角度及びボールの投てき方法を含む幾つかの点で異なる部分がある。シャッタゴーグルは他の実験同じものである。実験1と同様に、シャッタゴーグルはあご台にとりつけられ、くさび型プリズム（約 17 diopter）が着脱可能に加工してある。図中のあご

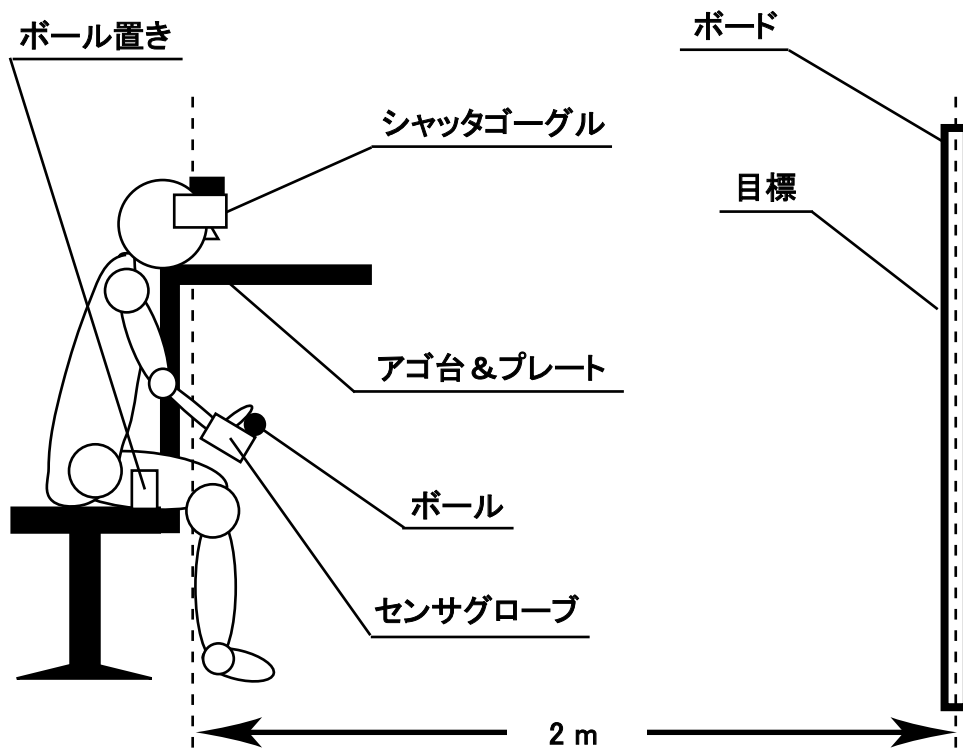


図 3.8: 実験環境

台付近に設置されたプレートは、被験者が自身の腕運動を見ることを防ぐための敷居である。被験者は実験 1 とは異なる形状の、ボールが手を離れるタイミング検知用センサグローブを装着した。投てきするボールはアルミホイルで包まれた直径 4 cm, 50 g のゴムボールである。被験者は大腿付近に設置されたボール置きよりゴムボールを拾い上げ、親指でセンサに固定し、腕の振子運動と親指の開放によってボールを投てきした。目標を提示するボードにはショックセンサを組み込み、ボールの着弾時刻を取得した。シャッタゴーグル、ショックセンサ、リリースセンサ、そして実験を進行する音信号は全てマイコンによって制御した。目標はボードに貼り付けられた 4 cm 平方の色紙である。目標の視覚的な位置は、プリズムの着脱に関係なく、常に被験者の正面に見えるように位置を調整した。

#### 試行の流れ

4 名の被験者が実験に参加した。

図 3.9 は実験 2 における試行の流れを示したものである。被験者がボールを親指でセンサに固定した 1 秒後に三つの連続したビーブ音が 600 ミリ秒の間隔で鳴り、3 回目のビーブ音の終了と同時にシャッタが開く。被験者は、3 回目のビーブ音後、500 ミリ秒以内にボールを投げることを要求された。この条件に違反した場合、シャッタが閉じて失敗を知らせるビーブ音が鳴る。ボール投てき後、実験条件

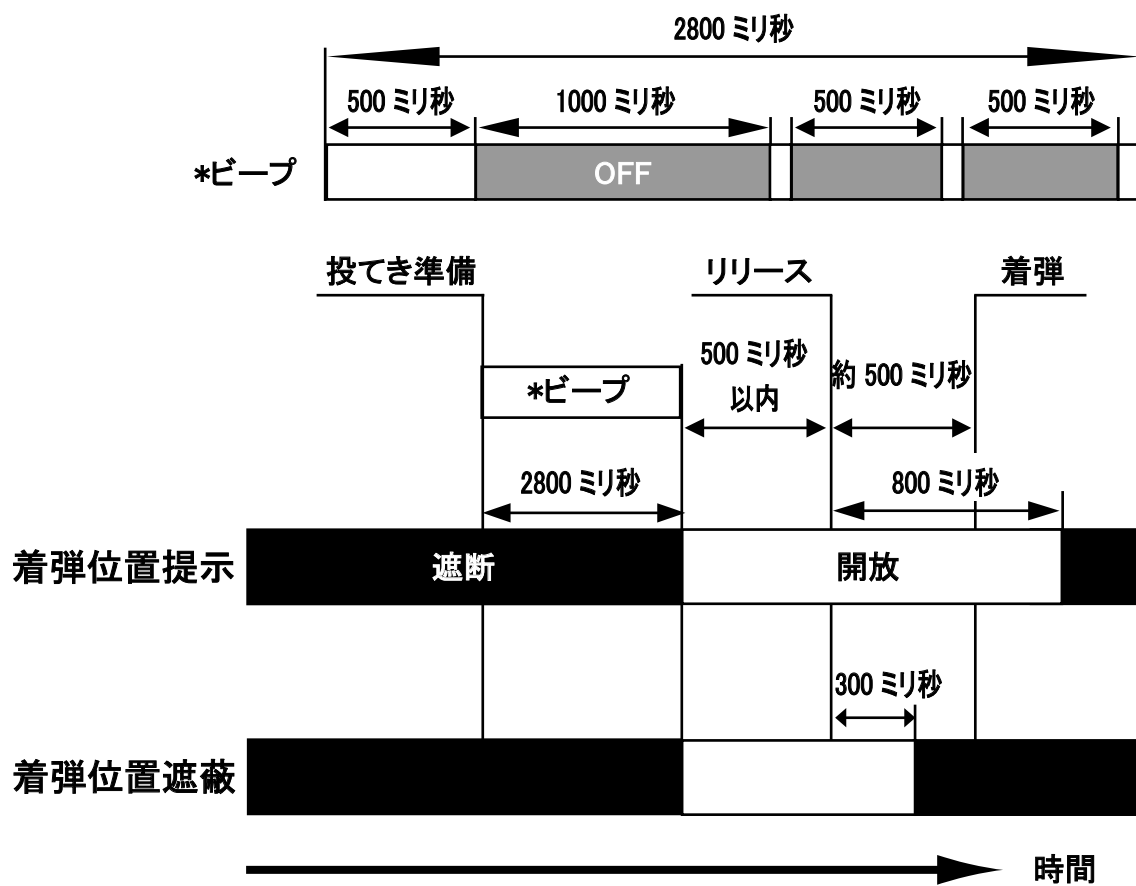


図 3.9: 視覚情報のダイアグラム

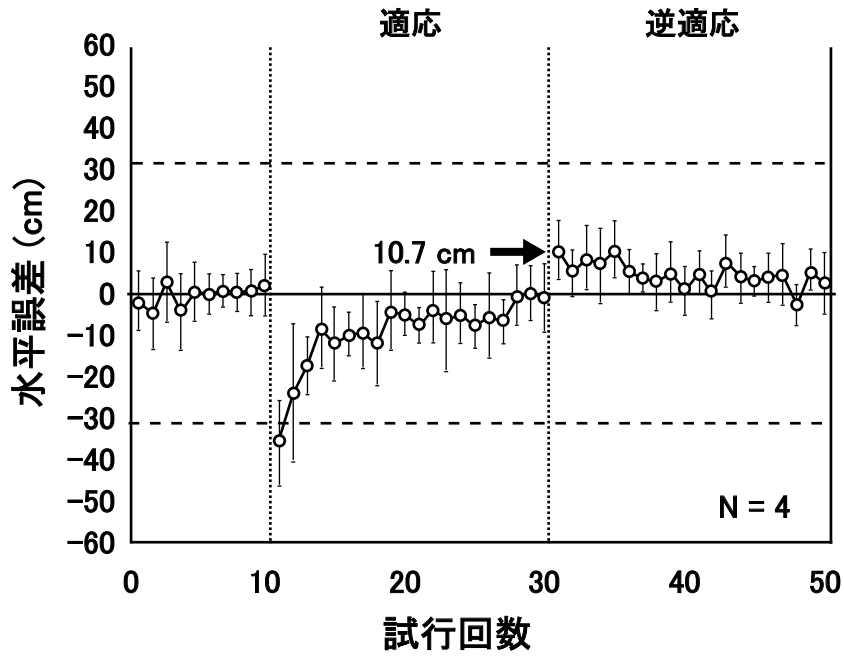
で指定された時間後にシャッタが閉じた。ボールが着弾した 3 秒後に次の試行を始めた。

一回の実験は実験 1 と同じように三つのブロックで構成され、それぞれ適応前期間：10 試行、適応期間：20 試行、逆適応期間：20 試行、合計 50 試行で構成された。

#### 実験条件

実験条件は実験 1 と同じように、飛行するボールの軌道がすべてが見える着弾位置提示条件とボールの着弾位置に関する視覚情報が得られない着弾位置遮蔽条件の 2 種類を設定した。前者の条件はボール投てき後 800 ミリ秒でシャッタが閉じるため、被験者はボールの軌道及び着弾位置の視覚情報を得ることができるに、後者の条件は、ボール投てき後 300 ミリ秒でシャッタが閉じるため、被験者はボールの軌道は途中までしか観測できず、ボールの着弾位置の視覚情報を得ることができない。被験者はこれら 2 条件を、プリズムによる変位方向の違いにより 2 回ずつ、合計 4 回の実験に参加した（2 条件 × 左右）。

### 着弾位置提示



### 着弾位置遮蔽

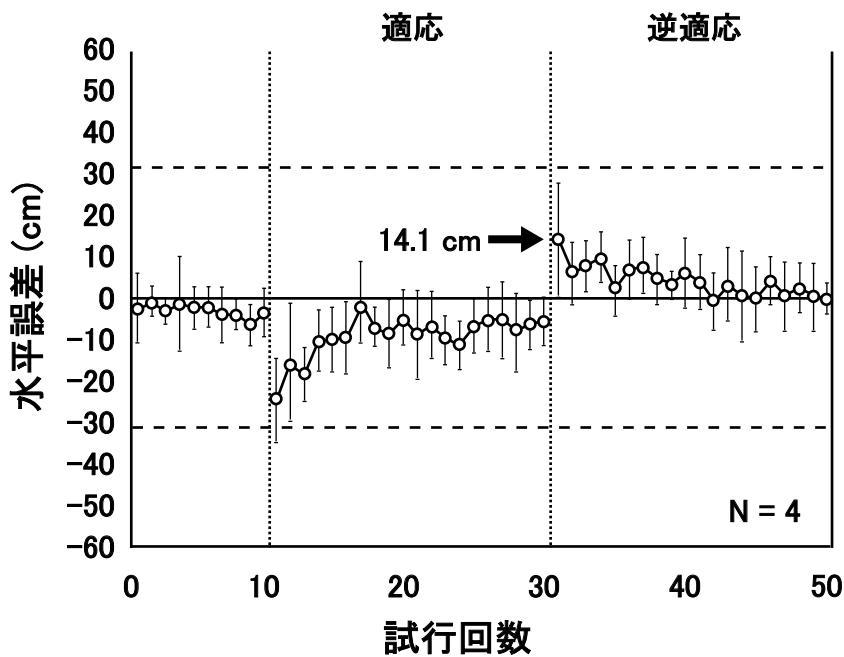


図 3.10: 実験 2 結果: 適応曲線

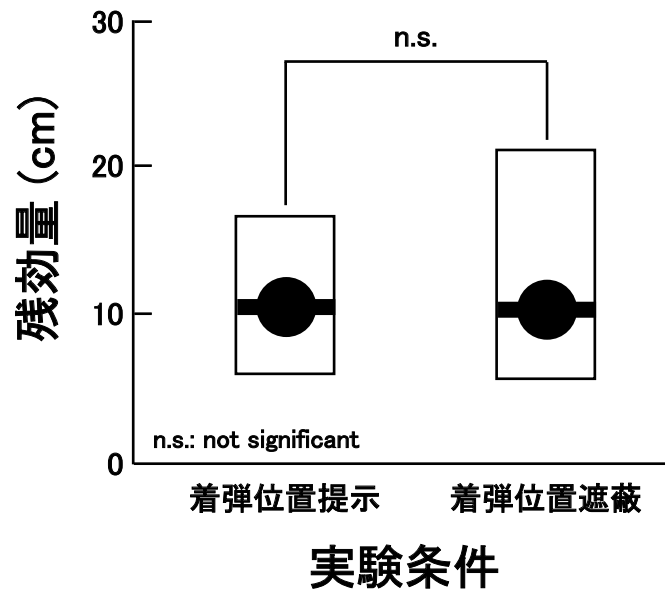


図 3.11: 実験2 結果：残効量

### 3.4.2 結果

図 3.10, 3.11 に結果を示す。どちらの条件においても、残効量は0よりも有意に大きく ( $p < 0.01$ )、プリズム適応が生じていることが確認されたが、二つの条件のあいだで残効量に有意な差はなかった ((図 3.11,  $p = 0.8785$ )).

実験2においても、条件にかかわらずプリズム適応が生じた。この結果は、身体に関する視覚情報が得られないことが保証された条件においても、ボールの着弾位置に関する視覚情報が投てき運動課題におけるプリズム適応には必要ないことを示す。すなわち、飛行するボール軌道の視覚情報が部分的にでも与えられれば適応は同様に進むことが明らかになった。



### 3.5 考察

本実験により，ボールの着弾位置の視覚情報が与えられず，ボール軌道の一部が視覚情報として与えられた場合でも適応が生じることが明らかになった．このことは，運動結果に関する視覚情報が少しでも与えられれば，脳はそれを手がかりにして視覚運動変換学習を行っていることを示唆している．

ここでは，ボールの飛行軌道の視覚情報がどのようにして視覚運動変換学習に利用されるかについて考察する．この疑問に対する答えとしては以下の二つの可能性が考えられる．一つは，脳が観測したボール軌道からボール着弾位置を予測し，その予測着弾位置と運動指令計画時に予測した着弾位置を比較する，という可能性である．もう一つは，脳が運動指令計画時にボール軌道を予測していて，その予測軌道と観測された軌道と比較する，という可能性である．本実験の結果だけでは，これら二つの可能性のいずれが妥当であるかを判断することは困難である．これらの可能性については今後の研究の進展の中で明らかになることを期待したい．

この問いに関連する知見として，まず物理的な運動法則に関する予測メカニズムがヒトの脳内に存在する可能性を示唆する研究がある [31]．このほか，ら [32] は観測された視覚的な誤差と運動結果の現実的な予測のあいだの差が適応誤差信号の由来であること，そして，Pelisson ら [33] は運動予測と視覚情報の比較が可

能であるとする報告をしており，予測メカニズムが適応にも利用される可能性は十分にあると考えられる．

# 第4章 学習を効率的に駆動する

## 誤差信号獲得タイミング

### 4.1 背景

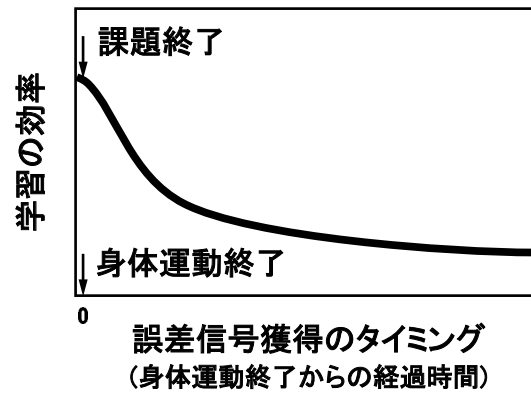
第2章で述べたように，Kitazawaら [1] は，到達運動のプリズム適応において，運動結果に関する視覚フィードバックのタイミングが遅れると適応量が有意に減少することを示した．この結果は，誤差信号が特定のタイミングでフィードバックされると学習が効率的に進むことを示唆している．

本研究では，学習を効率的に駆動させる誤差信号獲得タイミングを探るため，投てき運動課題を題材とした行動実験を行った．図4.1に示すように，到達運動課題では「身体運動終了」と「課題終了」が同時刻に生じるのに対して，投てき運動課題ではこれらのタイミングが異なる時刻に生じる．したがって，投てき運動課題では「身体運動終了時刻」と「課題終了時刻」のどちらのタイミングが視覚運動変換学習において重要な誤差信号獲得タイミングであるかを調査することができる．著者は，これら二つのタイミングのうち，前章の実験で脳がボールの飛跡

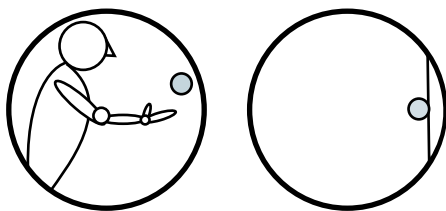
## A. 到達運動課題



身体運動終了 = 課題終了



## B. 投てき運動課題



身体運動終了 ≠ 課題終了

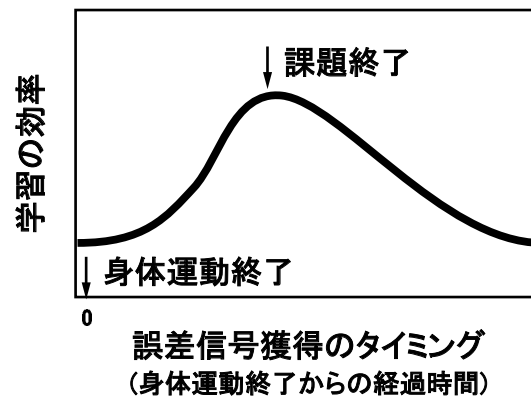


図 4.1: 誤差信号獲得のタイミングに対する二つの仮説

を予測して学習に用いている可能性が示唆されたことから，ボールの着弾位置がフィードバックされる課題終了時刻が誤差信号獲得の重要なタイミングであるという作業仮説をたてた．すなわち，図 4.1 のグラフで示したように，投てき運動課題においては，課題終了時刻に誤差信号を獲得した場合に適応が効率良く進むであろうと考えた．

ここであらためて，以上の作業仮説を含めて可能性のある三つの仮説について説明する．第一の仮説は，「運動指令生成時刻を起点としてそれから一定時間内に誤差情報を受け取ると適応の効率が向上する」という考え方である．これは，誤差情報を効果的に受け取るタイミングが感覚手がかりには依存せず，運動指令生成のみによって決まる点に特徴がある．第二の仮説は「課題終了を告げる感覚情報を受け取る時点を中心として一定時間内に誤差情報を受け取ると適応の効率が向上する」という考え方である．到達運動を例にとれば，「目標に手が触れる」という体性感覚情報が適応の効率向上の手がかりとなるということになる．また，投てき運動については，着弾に伴う音響信号が手がかりとなることが考えられる．第三の仮説として「脳は課題が終了する時刻を予測し，その時刻を起点にして一定の時間内に誤差情報を受け取ると適応効率が向上する」という考え方であり，これが上記の作業仮説である．これは，課題が終了した時点でその課題の結果に関する情報が得られることから，その時刻を脳が内的に予測し学習に必要な誤差

信号を受け入れる準備をしているという考え方である。この観点から見れば、視覚運動変換学習にとって重要な時刻は「運動そのものの終了時刻」ではなく「課題の終了時刻」であることになる。例えば、投てき運動課題では、運動結果に関する評価が得られるのはボールが着弾する時刻であり、その時刻に同期して誤差情報が与えられると学習の効率が向上すると考えるのである。

著者はこれらの仮説のいずれが妥当であるかを検証することを目的として、仮想投てき運動課題を用いた行動実験を行った。この課題はビデオゲームのボウリングゲームを模したものであり、被験者は腕の運動によってスクリーン上に提示された目標に対して画面上のボール（カーソル）を投げ当てる。図4.1に示したように、視覚的偏位はスクリーン上のカーソルの運動方向を変化させることにより実現した。実験では、カーソルが着弾する位置をフィードバックするタイミングを操作した。また、実験では、カーソルが投てきされてから目標に到達して課題終了するまでの時間を2条件用意した。さらに、課題終了の影響をより確実に調査するため、課題終了のタイミングを被験者により明示的に伝える条件での実験を行った。

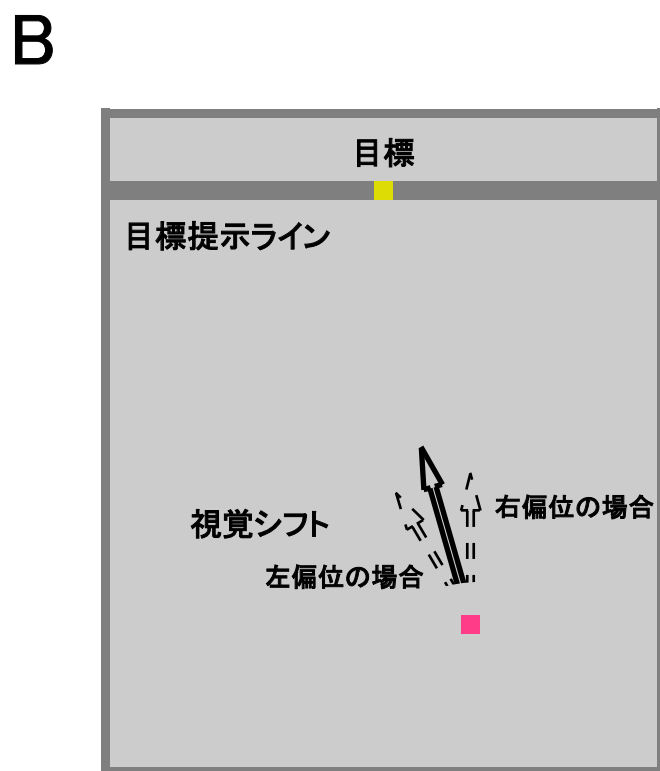
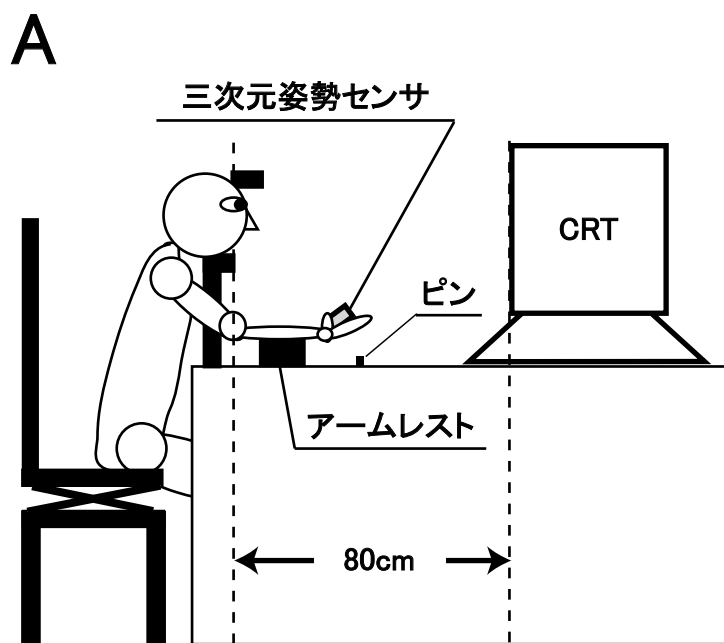


図 4.2: 実験環境

## 4.2 方法

### 4.2.1 実験装置

実験装置の構造を図 4.2 に示す。被験者はあご台にあごを載せた状態で実験台の前に座り、目の前の 21 インチカラー CRT (リフレッシュレート 100 Hz, , ソニー社製) を観察する。あご台からモニタ面までの距離は 80 cm であった。被験者は手のひらを上にして手首をアームレスト上に載せ、手の姿勢を計測する三次元姿勢センサ (MTx-28A53G25, Xsens Technologies B.V., Enschede) を握る。あご台より下は遮蔽されていて被験者が自身の手首運動を見ることはできない。

実験制御用の PC は姿勢センサからデータを取得して、被験者の手首の動きをモニタし、その動きに応じて画面上を移動するカーソルの動きを制御する。具体的には、手首の屈曲角速度が最大となった時刻を検出してカーソル運動を開始させ、屈曲角速度最大時刻における手首の回内、回外角度に応じてカーソルの運動方向を定めた。

図 4.2B は、CRT 画面に表示される画像の概略を示したものである。目標は目標提示ライン上に画面中央を中心に左右に  $\pm 20$  pixel (約 0.8 cm) の範囲内のランダムな位置に提示される。カーソルのスタート位置は、画面の下側中央から 100 pixel (約 4 cm) 右側で常に一定である。外枠の内側 (以下、表示部) の状態には ON と OFF の二つがあり、ON の状態ではカーソルや目標の位置が表示されるが、



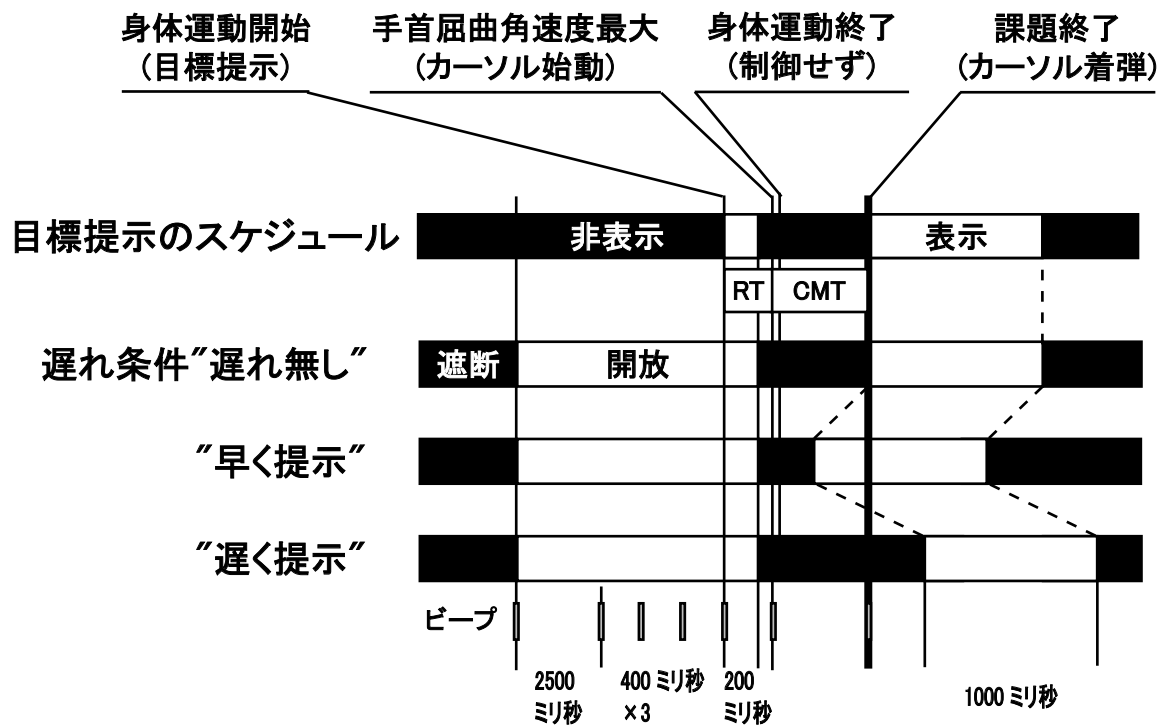


図 4.3: 試行のダイアグラム

OFF の状態では背景のみが表示される。この環境において、プリズム偏位に対応する視覚的偏位はカーソルの運動方向を画面上で変化させることで実現した。

#### 4.2.2 試行の流れ

図 4.3 に実験における試行のダイアグラムを示す。各試行において、被験者は手の甲が台上のパッドに触れる初期姿勢を保ち、試行開始を示すビープ音 (450 Hz) を待つ。そのビープ音より 2.5 秒後に、表示部が ON の状態になる。さらに、その 2.5 秒後から 400 ミリ秒間隔で低いビープ音 (400 Hz) が 3 回、高いビープ音

(600 Hz) が1回鳴り、最後の高いビープ音とともに目標が提示される。目標提示の200ミリ秒後に表示部はOFFの状態(図4.3 目標提示のスケジュールを参照)になる。被験者は目標が提示されるとともにできるだけ早くかつ正確に目標に向けて投てき運動を行う。カーソルは手首の屈曲角速度が最大値となったとき(図4.3 手首屈曲角速度最大)にビープ音と共に投げ出される。目標提示から運動開始までの時間が400ミリ秒(図4.3 RT, Reaction Time: 反応時間)以上の場合には画面に警告文を表示したが、その場合も試行そのものは有効とした。なお、カーソル投てき後、被験者は課題の終了まで投てき完了時の姿勢を保持する。

カーソルは、手首の屈曲運動の速さに依存せず、条件ごとに指定された時間(図4.3 CMT, Cursor Motion Time: カーソル移動時間)をかけて目標提示ラインに到達する。条件によっては、カーソルと同期して運動する視覚手がかりであるカーソル位置提示ライン(図4.2Bにおける目標提示ラインと同型)が表示される。カーソル位置提示ラインは、指定された条件において運動中常に表示され、実験の進行にかかわらずカーソル移動時間に従って垂直方向に運動する。カーソルが目標提示ラインに到達した際(図4.3 課題終了)にビープ音が鳴る。カーソルが目標提示ラインに到達した時刻から、条件ごとに指定された時間(以下、フィードバック遅れ時間)が経過した後、再び表示部がONの状態となり、目標の位置と目標提示ライン上のカーソル到達位置、すなわちカーソル運動の終点が被験者に提示

され、課題が終了する。なお、本実験ではカーソルが移動している時刻にフィードバックがなされる条件も存在するが、その場合も移動中のカーソル位置ではなく、目標の位置とカーソル運動の終点が提示される。被験者は課題が終了し次第、次の試行に備えて初期姿勢に戻る。1 試行に要する時間は、条件設定にもよるがおよそ 7 秒である。

一つのセッションは 45 試行で構成され、約 7 分で終わる。一つのセッションは三つのブロックで構成される。最初の 25 試行は適応前期間であり、このあいだは視覚的偏位がゼロである。次の 10 試行が適応期間であり、カーソル位置が目標提示ラインにおいて左右いずれかの方向に 50 pixel 偏位するような方向にカーソルの運動方向を変化させた。最後の 10 試行が逆適応期間であり、この期間は適応前期間と同一条件である。一人の被験者に対し同一の実験条件を、右方向の偏位と左方向の偏位を 2 セットずつ行った。

1 日の実験は 5 セッションで構成され、本実験前の 50 試行程度の練習セッションやセッション間の休憩時間を含めて 1 時間程度で終了する。実験は 7 日にわたって行った。第 1 日は課題に慣れるための練習日であり、300 試行程度偏位のない条件で繰り返し課題を行った。この日は、本課題におけるカーソルの動きのイメージを獲得してもらうために、すべての試行においてカーソルが的に向かって移動する様子が観察できるよう試行中表示部を ON の状態にした。2 日目から 7 日目

には本実験を行った。本実験では、実験開始前に表示部 ON かつ変位がない状態で 10 試行の練習を行い、続いて表示部 OFF の状態で 45 試行の練習を行った。

### 4.2.3 実験条件

今回の実験では、フィードバック遅れ時間を 9 条件を設定し、遅れ時間が適応に与える影響を調べた。条件のうち、フィードバック遅れ時間なしの条件は、カーソルが目標提示ラインに到達すると同時に視覚情報が ON になる。フィードバック遅れ時間が正の値の 4 条件は、それぞれの条件で決まった時間だけ画面が ON になるタイミングが遅れる。フィードバック遅れ時間が負の値の 4 条件は、カーソルが本来目標提示ラインに到達する時刻に先んじて到達位置が表示される。

実験では、三つの実験ブロックのうち、視覚的偏位が加えられる適応期間でのみフィードバック遅れ時間を与え、適応前期間及び逆適応期間ではフィードバック遅れ時間はゼロとした。これは、被験者がフィードバック遅れ時間がある環境に慣れてしまうことを防ぐためである。なお、手首の屈曲角速度が最大値を示してからカーソルの運動が始まるまでの時間が 20 ミリ秒、屈曲運動が終わるまでの時間がおよそ 30 ミリ秒であることから、カーソル運動時間は手首の動きが終了する時刻からの課題終了の時刻までの時間とほぼ一致する。したがって、身体運動終了時刻から視覚情報提示までの時間、つまり身体運動終了時刻を起点とした

フィードバック遅れ時間は、カーソル運動時間（CMT）とフィードバック遅れ時間の和として与えられることになる。

CMT については 600 ミリ秒と 1100 ミリ秒の二つの条件を設定した。これら二つの条件での結果を比較することにより、身体運動終了時刻からの絶対的な遅れ時間が適応の進み方に与える影響を調査する。

さらに、CMT600 ミリ秒の条件については、カーソル位置を示すラインを提示する条件とない条件を設定した。この条件間の比較により、課題終了時刻が明示的に示された場合、適応にどのような影響が現れるかを調べる。

実験 1 は、CMT 600 ミリ秒、カーソル位置提示ラインなしの条件で、20 名の被験者が参加した。フィードバック遅れ時間の条件は、 $-500$ ,  $-300$ ,  $-200$ ,  $-100$ ,  $0$ ,  $100$ ,  $200$ ,  $300$ ,  $500$  ミリ秒とした。

実験 2 は、CMT 1100 ミリ秒、カーソル位置提示ラインなしの条件で、23 名の被験者が参加した。フィードバック遅れ時間の条件は、 $-1000$ ,  $-800$ ,  $-500$ ,  $-300$ ,  $-100$ ,  $0$ ,  $100$ ,  $300$ ,  $500$  ミリ秒とした。

実験 3 は、CMT600 ミリ秒、カーソル位置提示ラインありの条件で、14 名の被験者が参加した。フィードバック遅れ時間の条件は実験 1 と同じく、 $-500$ ,  $-300$ ,  $-200$ ,  $-100$ ,  $0$ ,  $100$ ,  $200$ ,  $300$ ,  $500$  ミリ秒とした。

被験者は、すべてのフィードバック遅れ時間条件に対して、視覚的偏位の方向

を左右2回ずつの計4回の実験に参加した。実験の順序は偏りが出ないように、被験者間でカウンターバランスをとった。

### 4.3 結果

図4.4に本実験における代表的な実験結果を示す。このグラフは、実験1におけるフィードバック遅れ時間 -500 ミリ秒の条件での結果である。上側の図は被験者(TI)の結果を示し、下側は全被験者の結果を平均した適応曲線を示す。横軸は試行回数、縦軸は水平誤差を示す。

上側の図では、細線は各試行のデータを、太線はそれらの中央値を示す。下側の図では、太線が平均された学習曲線を、エラーバーは試行番号ごとの標準偏差を示す。どちらのグラフでも適応が生じていることが見て取れる。まず、適応前期間では水平誤差はゼロ付近に分布しており、被験者が正確に投てき運動を行えていることを示している。次に、適応期間では初めに大きな誤差が生じるが、試行を重ねることで誤差が減少しており、視覚的偏位に適応する過程が見られる。最後に、逆適応期間では、最初に適応期間とは逆方向に大きな誤差が生じるが、その後試行を重ねることで誤差が減少しており、逆適応の過程を見て取れる。このように、本実験環境においても、プリズム適応実験と同様の適応曲線が得られた。

次に、被験者ごとに計4回のセッションで得られた水平方向誤差の平均値に対

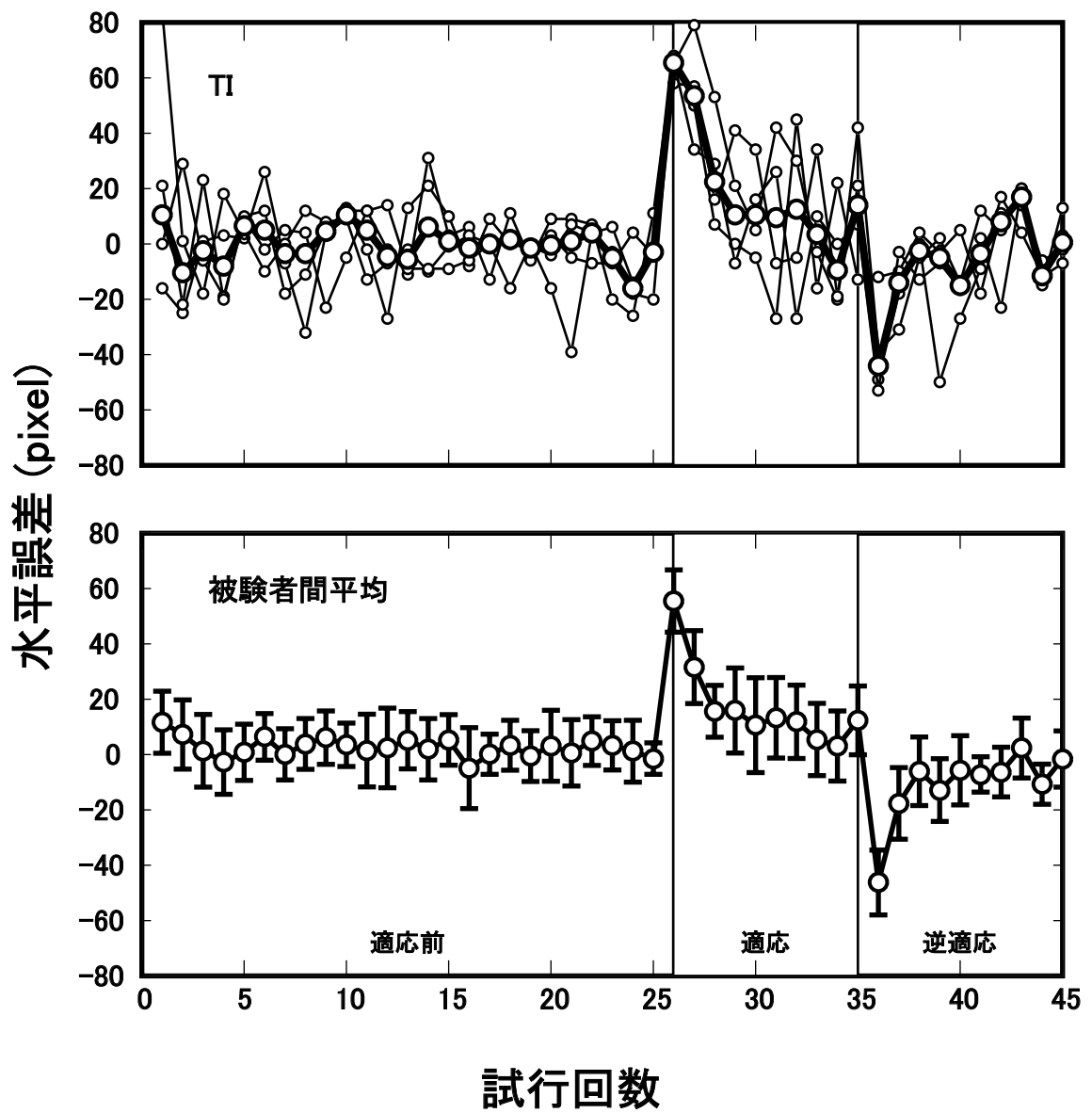


図 4.4: 典型的な結果

して、次式で与えられる曲線を用いてフィッティングを行い、適応曲線を得た。

$$e(t) = A \exp^{-\beta t} + C \quad (4.1)$$

ここで、 $e(t)$  は試行番号  $t$  における誤差の大きさ、 $A$  は初期誤差の大きさ、 $1/\beta$  は適応の時定数、 $C$  はバイアス量である。具体的には、初期誤差の大きさを与えた偏位量に固定した。そして、適応期間で得られたデータに対してフィッティングを行い、時定数とバイアス量を推定した。次に、推定したバイアス量から偏位量を引いて得られた値を初期誤差とした。そして、同じバイアス量を用いて逆適応区間のフィッティングを行い、逆適応区間における時定数と残効量を求めた。

得られた残効量を全被験者に対して求め、条件ごとにその四分位を示したものが図 4.5 である。

グラフの横軸はフィードバック遅れ時間、縦軸は残効量の大きさである。図は上から順に、A は実験 1 (CMT 600 ミリ秒, カーソル位置提示ラインなし)、B は実験 2 (CMT 1100 ミリ秒, カーソル位置提示ラインなし)、C は実験 3 (CMT 600 ミリ秒, カーソル位置提示ラインあり) の実験結果をそれぞれ示している。

まず、実験 1 ではフィードバック遅れ時間  $-500$  ミリ秒の条件において残効量は最も大きな値を示した。この条件において視覚フィードバックが運動終了直後に与えられることを考えると、身体運動終了時刻付近において高い適応効率を得



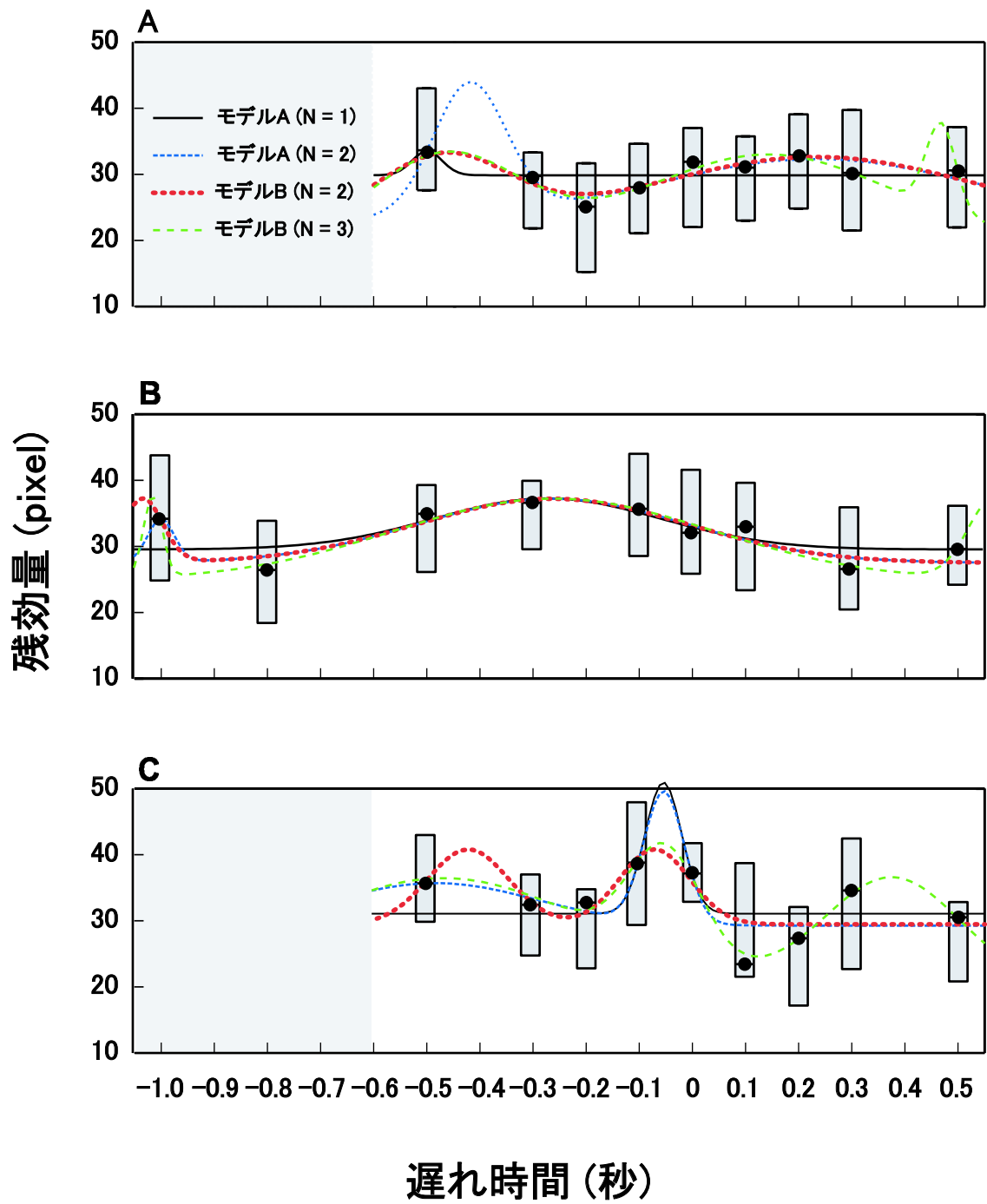


図 4.5: 実験結果

られたことになる。フィードバック遅れ時間が  $-500$  ミリ秒から  $-300$  ミリ秒まで大きくなると、残効量は急激に減少した。しかし、フィードバック遅れ時間がさらに大きくなると残効量はゆるやかに増加した。フィードバック遅れ時間の効果についてノンパラメトリック分散分析である Friedman 検定を行ったところ、有意な効果が認められた ( $p < 0.05$ , Friedman test)。

次に、実験2においても、残効量はフィードバック遅れ時間が  $-1000$  ミリ秒の条件で高く、フィードバック遅れ時間が  $-800$  ミリ秒まで大きくなると減少するが、遅れ時間が大きくなるに従って増加するという傾向が得られた。この実験でもフィードバック遅れ時間の効果について有意な効果が認められた ( $p < 0.05$ , Friedman test)。

最後に、実験3では、 $-500$  ミリ秒の条件で高い残効量が観測された。その後フィードバック遅れ時間の増加に伴い残効量は減少傾向を示し、 $-100$  ミリ秒の条件で再び増加した。 $0$  ミリ秒においても高い残効量が観測されたが、以降の条件では残効量が大きくばらついた。実験3においても、フィードバック遅れ時間の効果について有意な効果が認められた ( $p < 0.05$ , Friedman test)。

なお、以上3種類の実験について多重比較検定を行ったが、条件間に有意な差は認められなかった。

次に、残効量の遅れ時間に対する増減の傾向を検討し、残効量のピークがいつ

現れるかを調べるため放射基底関数を用いて残効量と遅れ時間の関係を調査した。具体的には、以下の2種類の曲線を用いてフィッティングを行った。

$$\text{モデル A} \quad f(d) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \exp \left\{ -\frac{(d - d_i)^2}{2\sigma_i^2} \right\} \quad (4.2)$$

$$\text{モデル B} \quad f'(d) = a_0 + a_c \sum_{i=1}^N \exp \left\{ -\frac{(d - d_i)^2}{2\sigma_i^2} \right\} \quad (4.3)$$

$N$  は基底関数の数を示す。  $a_0$ ,  $a_i$ ,  $d_i$ , そして  $\sigma_i$  は、MATLAB の optimization toolbox に含まれる lsqcurvefit 関数を用いて、残効量  $A_d(d)$  と中央値  $f(d)$  のあいだの最小二乗誤差を求めることで推定されるパラメータである。

図 4.5 の色つき線は、放射基底関数を用いた残効量と遅れ時間の関係のモデルを示す<sup>1</sup>

図 4.5 では、 $N = 1$  の曲線に比べ、 $N = 2$  の曲線はより近似している。 $N = 3$  の曲線も適合するが、 $N = 2$  と比べて大きくは変わらない。これは、遅れ時間と残効量の関係が二つのピークを持つことを示唆する。

本実験の結果は、運動終了時刻と課題終了時刻付近でカーソルの着弾位置をフィードバックした場合に適当量が増加する傾向があることを示す。しかしながら、統

<sup>1</sup>これらのフィッティングの尤もらしさは、試みとして赤池情報量規準を用いて評価した。しかしながら、本研究では、データの正規分布を仮定しておらず、ノンパラメトリックな手法を用いてデータ処理・分析を行っているため、赤池情報量規準を用いて評価することは適切ではない。

計的には多重比較検定における有意な差が得られなかった．その原因の一つとして，投てき運動を正確に行うことが難しいためか着弾位置のばらつきが大きかったことが考えられる．そこで，運動のばらつきを減らして安定したデータを得られるように修正を加えた課題を題材とした追加実験を行った．

#### 4.4 追加実験

前節で説明した実験では，手首の屈曲運動によってカーソルの動きを生み出すように設定していた．しかし，手首の屈曲運動を行う際の回内・回外の方向だけでカーソルの運動方向を正確に調整することは難しく，結果として，狙ったところに正確にカーソルが到達しないことがしばしば生じた．このような問題は，この実験環境での練習を繰り返すことが解消されることを期待したが，数百回の練習ではばらつきを十分に小さくすることは困難であった．

この問題を解決するため，追加実験では，課題の内容を，手先で目標を指示する課題に変更した．そして，腕の運動を検出するとともにカーソルの運動が開始され，一定時間後に目標提示ラインに到達するようにした．これは遠隔的到達運動とも呼べるもので，前節の実験と異なり，被験者は運動終了時に手先位置と目標位置の関係を明確に知覚することが可能である．そのため，課題遂行に対する安心感も増し，運動結果のばらつきも減少させることができた．ただし，課題の

成績はカーソルの着弾位置によって評価され、また、カーソルが着弾する前に一定の時間を有する点で、到達運動とは異なる。そのため、課題終了時刻を操作することで「運動終了と課題終了の切り分けた実験」を行うことが可能である。

追加実験の実験環境は、前述の実験とほぼ同様である（図 4.2）。ただし、より個人差を減らす目的で、手の甲に 3 次元姿勢センサ（MTx-28A53G25, Xsens Technologies B.V., Enschede）を取りつけた特別なグローブを装着し、手首を固定した。このグローブを用いることで、センサの握り方や手首の姿勢による運動結果への影響を軽減できる。試行の流れは前節の実験と同様である（図 4.3）。ただし、フィードバックおくれ時間の条件は、 $-500$ ,  $-300$ ,  $0$   $500$  ミリ秒の 4 条件とした。実験には 11 名の被験者が参加した。

## 4.5 追加実験結果

図 4.6 は追加実験の結果をまとめたものである。フィードバック遅れ条件の効果が有意であることが示された ( $p < 0.05$ , Friedman test)。また、多重比較検定においても図に示した条件間で有意な差が生じた ( $-500$  vs  $-300$ ,  $-300$  vs  $0$  ミリ秒, Scheffe's method)。この結果は、前実験で得られた「運動結果に関する視覚フィードバックが運動終了時刻と課題終了時刻に行われた場合、適応の効率が向上する」という結果を支持する。

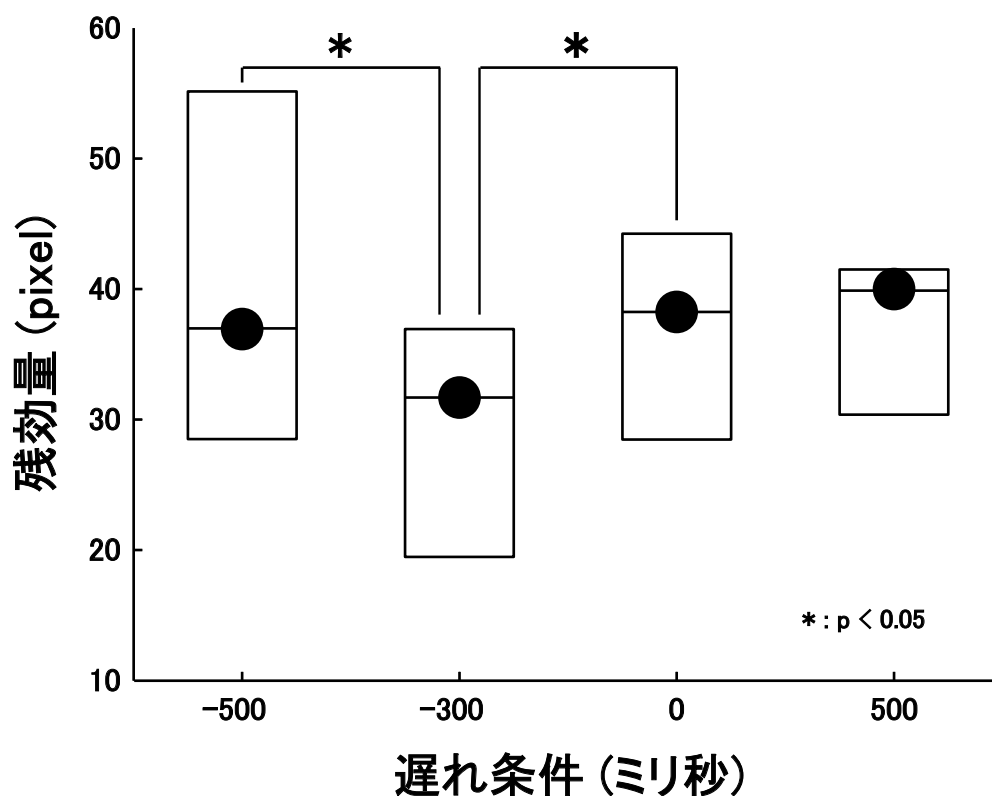


図 4.6: 実験結果

## 4.6 考察

本章で述べた実験では、仮想投てき運動課題における視覚運動変換学習の残効量が、着弾位置をフィードバックするタイミングに応じて有意な増減を示すことが明らかになった。特に、残効量は、投てき運動の身体運動終了時刻と、投てき課題の終了時刻の二つの時点で高まることが明らかになった。

到達運動を課題とした Kitazawa らの研究 [1] では、フィードバック遅れ時間が増加するのに応じて適応量は一様に減少する結果が得られていた。それに対し、本実験の結果は、運動終了時刻を起点としたフィードバック遅れ時間が増加するに

つれて残効量がいったん減少するものの、その後再び増加し、課題終了時刻付近で2番目のピークを迎えることが明らかになった。この結果は、運動終了時刻と課題終了時刻が視覚運動変換学習のための誤差情報獲得タイミングとして重要であることを示唆している。

次に、Tanakaら [27] と Hondaら [28] の実験結果について、本実験結果より検討する。今回の実験では、課題終了時刻付近に運動結果に関する視覚フィードバックが行われた場合に適応量が増加するという結果が得られた。課題終了時刻を物理的に変更した場合でも、適応量のピークは課題終了時刻付近に現れている。さらに言えば、適応の量は運動終了時刻を起点としてフィードバックの遅れに従っていったん減少しているにもかかわらず、課題終了時刻付近で再び増加した。被験者が課題の練習中に課題終了のタイミングを学習していると考えれば、今回の実験結果は、身体運動とその運動結果との関係性依存して適応の効果が増減することを示している。Hondaらは視覚運動変換学習の重要な要因として「運動とその結果の知覚の時間的な結合」を挙げており、その点で、本実験の結果は彼らの主張と一致するものであるといえる

最後に、本章の最初に挙げた三つの仮説について上記の実験結果に基づいて考察する。

まず、本来の課題終了時刻に先んじて運動終了直後に運動結果をフィードバック

クする条件において適応量が大きかったという本実験の結果は、脳内に運動指令生成時刻を起点とした一定時間のあいだに受け取った誤差情報に基づいて視覚運動変換学習を進めるメカニズムが存在する可能性を示している。すなわち、第一の仮説「運動指令生成時刻を起点としてそれから一定時間内に適応の効率が向上する」に基づく学習メカニズムの存在を強く示唆する。

一方、第二の仮説「運動終了を告げる感覚情報を受け取る時点を中心として一定時間内に適応効率が向上する」については、今回の実験環境では、到達運動における手先の接触のような明確な運動終了を告げる感覚情報がないこと、課題終了を告げるビープ音よりも前に視覚情報がフィードバックする条件でも残効量が高くなる傾向が示されたことから、感覚情報を受け取ること自体ではなく、受け取ると想定しているタイミングが重要なのではないかと考えられる。よって、この仮説は少なくとも支配的な要素ではないと考えることができる。

最後に、課題終了後時刻付近で高めの残効量が見られたことは「脳は予想課題終了時刻を起点にして適応効率が向上する」という第三の仮説を支持するといえる。ただし、身体運動終了直後に比べて残効量のピークがゆるやかであることについてはさらなる考察が必要である。二つのピークが異なる様相を示した原因は明らかではないが、一つの可能性としては、誤差信号が与えられる時刻の確実度が考えられる。すなわち、運動終了直後の誤差獲得チャンネルは運動指令生成とい



う脳内イベントを起点としているために時間方向のあいまいさが小さく、したがって、特定の時間区間のみ適応効率を高くできる。これに対し課題終了付近の誤差獲得チャンネルは、脳がその時刻を予測して適応効率を向上する制御をする必要があるために、タイミング予測の誤差を許容して誤差信号獲得区間を幅広くしている可能性が考えられる。カーソル位置提示ラインを表示した実験 2 において課題終了時刻付近の残効量のピークが鋭くなった結果はこの考えにより説明できるかもしれない。

いずれにしても、今回の実験結果は、獲得した誤差信号を視覚運動学習に効率的に反映させるメカニズムとして、時間的特性が異なる二つのチャンネルが存在することを示唆している。

## 第5章 全体的考察と議論

本研究では、実環境と仮想環境における投てき運動課題を題材として視覚運動変換学習の行動実験を行った。実環境において行った実験では、視覚運動変換学習において、必ずしも運動の結果を観測する必要ではなく、投げたボールの軌道が部分的に観測できれば学習が進行することが明らかとなった。次に仮想環境にて行った実験では、運動結果に関する視覚情報がフィードバックされるタイミングが学習の効率に影響を与えること、効率的に学習が進む視覚フィードバックのタイミングは、身体運動の終了直後と課題終了次項付近であることが明らかになった。このように、いずれの実験においても、目的とする課題の終了とは直接関係のない手がかりやタイミングで得られた視覚情報が学習を駆動する可能性が示された。すなわち、実環境での実験の結果は、ボールが着弾する位置の視覚情報が適応には不要であることを示しており、仮想環境での実験結果は、ボールが着弾するタイミングより早く誤差情報を提示した条件でも適応が速やかに進むことを示した。これらの結果は、脳が視覚運動変換学習の際に何をどのように学習しているか、という根本的な問題をあらためて提起する。

ヒトが随意的な運動を行う際には必ず目的が伴う [34]。本研究における実環境での実験で示されたように、ボールを目標に当てるという運動課題に対する課題成績に直結した誤差信号が与えられない場合でも学習は生じた。このとき、被験者が「ボールを目標に当てると」という目的意識は変化していないと考えられる。したがって、ボールを当てるという目的意識は維持したまま、その目的とは直接的には関係のないボールの途中軌道を学習するメカニズムが働き、その学習メカニズムが働いた結果としてボールの着弾位置の誤差が小さくなると考えられる筆者は、このとき、課題の成績を向上させようとする（つまり、着弾位置の誤差を小さくしようとする）学習メカニズムと運動結果として生じるボールの飛行軌道を予測するモデルの学習メカニズムが切り替わるのではなく、常に並列して機能しており、意識に上らないレベルで脳の中で統合的に機能しているのではないかと考える。この考察について検証するためには、二つの学習の様相が分離して捉えられるような実験環境や実験課題を構築して実験を行う必要があるだろう。

## 第6章 結論

本研究では、視覚運動変換学習のしくみを探るため、実環境と仮想環境における投てき運動課題を題材として行動実験を行った。

第1の実験として、視覚運動変換学習に必要な視覚情報を調査するため、実環境にて投てき運動を題材としたプリズム適応の行動実験を行った。その結果、ボールの着弾位置に関する視覚情報が得られなくても飛行するボール軌道に関する視覚情報が部分的に与えられれば学習が進むこと、運動結果に関する視覚情報の有無は適応量に有意な影響は及ぼさないことが判明した。

この結果は、視覚運動変換学習が着弾位置の誤差という課題成績に関する視覚情報を必ずしも必要とせず、運動の結果もたらされるボールの軌道に関する視覚情報を用いて視覚運動変換学習を進めるメカニズムが存在することを示唆する。

第2の実験では、PC上に構築した仮想投てき運動課題を用いて、課題の結果に関する視覚情報がフィードバックされるタイミングが視覚運動変換学習に与える影響について調査した。その結果、身体運動終了直後と課題終了時刻付近に課題結果に関する視覚情報を与えると視覚運動学習が効率的に進むことが明らかになっ

た．この結果は，運動指令生成時刻を起点としてそれから一定時間内に適応の効率が向上するメカニズムの存在と，予想課題終了時刻を起点にして適応の効率が向上するメカニズムの存在の可能性を示している．すなわち，脳には，二つ以上の異なる運動学習メカニズムが並列して存在している可能性を示唆する．

以上をまとめると，本研究では，脳は誤差信号を効果的に獲得するタイミングを複数持つこと，運動課題の成否とは独立した誤差信号で適応が駆動されることを明らかにした．本研究の結果は，視覚運動変換学習において，脳が学習に用いる視覚情報を効率的に獲得するタイミングや誤差信号が単一ではなく，並列的に複数存在することを示唆する．

本研究の内容をより推し進めるためには，運動課題に対する被験者の予測を自在に乱すことができる実験環境を構築することが求められる．

## 謝辞

研究の立案から論文作成まで、大変長い期間にわたり終始丁寧かつ熱心なご指導を賜りました阪口 豊教授に深謝いたします。また、私の研究や発表に対して的確なご指摘をいただいた佐藤 俊治准教授、研究から学生生活まで様々な形でご助力いただいた佐藤 好幸助教、井上 康之特任助教、中嶋 豊特任助教に深くお礼を申し上げます。そして、実験を行う際にお世話になった津田 葉子さんと掘地 晶代さんを始め、共に研究生活をすごし、研究の議論や研究環境の構築、実験の被験者などに協力してくれた研究室の皆様はこの場を借りて深く感謝いたします。

本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] Kitazawa S, Kohno T, Uka T (1995) Effects of delayed visual information on the rate and amount of prism adaptation in the human. *J Neurosci* 15: 7644-7652.
- [2] Stratton GM (1896) Some preliminary experiments on vision without inversion of the retinal image. *Psychological Review* 3: 611-617.
- [3] Norris SA, Greger BE, Martin TA, Thach WT (2001) Prism adaptation of reaching is dependent on the type of visual feedback of hand and target position. *Brain Res* 905: 207-219.
- [4] Newport R, Jackson SR (2006) Posterior parietal cortex and the dissociable components of prism adaptation. *Neuropsychologia* 44: 2757-2765.
- [5] Fernandez-Ruiz J, Diaz R (1999) Prism adaptation and aftereffect: specifying the properties of a procedural memory system. *Learn Mem* 6: 47-53.

- [6] Fernandez-Ruiz J, Hall-Haro C, Diaz R, Mischner J, Vergara P, et al. (2000) Learning motor synergies makes use of information on muscular load. *Learn Mem* 7: 193-198.
- [7] Fernandez-Ruiz J, Diaz R, Hall-Haro C, Vergara P, Mischner J, et al. (2003) Normal prism adaptation but reduced after-effect in basal ganglia disorders using a throwing task. *Eur J Neurosci* 18: 689-694.
- [8] Fernandez-Ruiz J, Diaz R, Aguilar C, Hall-Haro C (2004) Decay of prism aftereffects under passive and active conditions. *Brain Res Cogn Brain Res* 20: 92-97.
- [9] Fernandez-Ruiz J, Diaz R, Moreno-Briseno P, Campos-Romo A, Ojeda R (2006) Rapid topographical plasticity of the visuomotor spatial transformation. *J Neurosci* 26: 1986-1990.
- [10] Fernandez-Ruiz J, Velasquez-Perez L, Diaz R, Drucker-Colin R, Perez-Gonzalez R, et al. (2007) Prism adaptation in spinocerebellar ataxia type 2. *Neuropsychologia* 45: 2692-2698.
- [11] Ishikawa T, Sakaguchi Y (2010) Effect of time difference between task-end and error-feedback on visuo-motor adaptation. *Neuro2010*: P2-j04.



- [12] Ishikawa T, Sakaguchi Y (2011) Visual information of endpoint position is not required for prism adaptation of shooting task. *ICONIP2011*: 95-102.
- [13] Baizer JS, Kralj-Hans I, Glickstein M (1999) Cerebellar lesions and prism adaptation in macaque monkeys. *J Neurophysiol* 81: 1960-1965.
- [14] Martin TA, Keating JG, Goodkin HP, Bastian AJ, Thach WT (1996) Throwing while looking through prisms. I. Focal olivocerebellar lesions impair adaptation. *Brain* 119 (Pt 4): 1183-1198.
- [15] Thach WT (1998) A role for the cerebellum in learning movement coordination. *Neurobiol Learn Mem* 70: 177-188.
- [16] Fine EJ, Ionita CC, Lohr L (2002) The history of the development of the cerebellar examination. *Semin Neurol* 22: 375-384.
- [17] Miall RC, Weir DJ, Wolpert DM, Stein JF (1993) Is the cerebellum a smith predictor. *J Mot Behav* 25:203-216.
- [18] Miall RC, Christensen LO, Cain O, Stanley J (2007) Disruption of state estimation in the human lateral cerebellum. *PLoS Biol* 5: e316.

- [19] Rao SM, Harrington DL, Haaland KY, Bobholz JA, Cox RW, et al. (1997) Distributed neural systems underlying the timing of movements. *J Neurosci* 17:5528-5535.
- [20] Xu-Wilson M, Chen-Harris H, Zee DS, Shadmehr R (2009) Cerebellar contributions to adaptive control of saccades in humans. *J Neurosci* 29: 12930-12939.
- [21] Albus JS (1971) A theory of cerebellar function. *Mathematical Biosciences* 10: 25-61.
- [22] Marr D (1969) A theory of cerebellar cortex. *J Physiol* 202: 437-470.
- [23] Ito M, Sakurai M, Tongroach P (1982) Climbing fibre induced depression of both mossy fibre responsiveness and glutamate sensitivity of cerebellar Purkinje cells. *J Physiol* 324: 113-134.
- [24] Kitazawa S, Kimura T, Uka T (1997) Prism adaptation of reaching movements: specificity for the velocity of reaching. *J Neurosci* 17: 1481-1492.
- [25] Yin PB, Kitazawa S (2001) Long-lasting aftereffects of prism adaptation in the monkey. *Exp Brain Res* 141: 250-253.

- [26] Kitazawa S, Yin PB (2002) Prism adaptation with delayed visual error signals in the monkey. *Exp Brain Res* 144: 258-261.
- [27] Tanaka H, Homma K, Imamizu H (2011) Physical delay but not subjective delay determines learning rate in prism adaptation. *Exp Brain Res* 208: 257-268.
- [28] Honda T, Hirashima M, Nozaki D (2012) Adaptation to visual feedback delay influences visuomotor learning. *PLoS One* 7: e37900.
- [29] Martin TA, Keating JG, Goodkin HP, Bastian AJ, Thach WT (1996) Throwing while looking through prisms. II. Specificity and storage of multiple gaze-throw calibrations. *Brain* 119 (Pt 4): 1199-1211.
- [30] 藤田昌彦 (1997) ボール投げプリズム適応における文脈依存性の検討 (2). *電子情報通信学会技術研究報告 NC ニューロコンピューティング* 96(583): 179-184.
- [31] Indovina I, Maffei V, Bosco G, Zago M, Macaluso E, et al. (2005) Representation of visual gravitational motion in the human vestibular cortex. *Science* 308: 416-419.

- [32] Wong AL, Shelhamer M (2011) Sensorimotor adaptation error signals are derived from realistic predictions of movement outcomes. *J Neurophysiol* 105: 1130-1140.
- [33] Pelisson D, Prablanc C, Goodale MA, Jeannerod M (1986) Visual control of reaching movements without vision of the limb. II. Evidence of fast unconscious processes correcting the trajectory of the hand to the final position of a double-step stimulus. *Exp Brain Res* 62: 303-311.
- [34] Allen GI, Tsukahara N (1974) Cerebrocerebellar communication systems. *Physiol Rev* 54: 957-1006.

## 関連論文の印刷公表の方法及び時期

### 論文

( 1 ) Takumi Ishikawa and Yutaka Sakaguchi

論文題目「Visual information of endpoint position is not required for prism adaptation of shooting task」

平成 23 年 11 月 Proceedings of 18th International Conference of Neural Information Processing (ICONIP2011), LNCS 7064, 95?102.

( 本文第 3 章 )

( 2 ) Takumi Ishikawa and, Yutaka Sakaguchi

論文題目「Both movement-end and task-end are critical for error feedback in visuomotor adaptation: A behavioral experiment」

平成 25 年 2 月 PLoS ONE 8(2): e55801. doi:10.1371/journal.pone.0055801.

( 本文第 4 章 )

## 参考論文

1 . 石川 拓海 , 阪口 豊

題目「投擲運動のプリズム適応における視覚情報の効果：投擲物の視覚情報が適応に与える影響」

平成 19 年 3 月 信学技報, vol. 106, no. 590, NC2006-189, pp. 17-22.

2 . Takumi Ishikawa and Yutaka Sakaguchi

題目「Role of visual information on prism adaptation of throwing movements: The effect of visual information of the thrown ball」

平成 19 年 9 月 The 30th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, P1-f31.

3 . Takumi Ishikawa and Yutaka Sakaguchi

題目「Role of visual information in prism adaptation of ball shooting: adaptation requires no visual information of the hit location」

平成 20 年 7 月 The 31st Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, P2-n17.

4 . Takumi Ishikawa and Yutaka Sakaguchi

題目「Effect of timing of error feedback on prism adaptation in a virtual shooting task」

平成 21 年 9 月 The 32nd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, P3-e02.

5 . 石川 拓海, 阪口 豊

題目「誤差フィードバックのタイミングが視覚運動変換の適応に与える影響：仮想投てき課題を用いた運動終了と課題終了の分離」

平成 22 年 3 月 信学技報, vol. 109, no. 461, NC2009-127, pp. 231-236.

6 . Takumi Ishikawa and Yutaka Sakaguchi

題目「Effect of time difference between task-end and error-feedback on visuo-motor adaptation」

平成 22 年 9 月 The 33rd annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, P2-j04.

7 . 石川 拓海, 阪口 豊

題目「視覚運動変換の適応ゲインは運動終了と課題終了の二つの誤差フィードバック タイミングにおいて異なるピークをとる」

平成 23 年 3 月 信学技報, vol. 110, no. 461, NC2010-170, pp. 253-258.

8 . Takumi Ishikawa and Yutaka Sakaguchi

題目「Error feedback is most effective both at movement end and at task end in visuo-motor adaptation with virtual shooting task.」

平成 24 年 9 月 The 35th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, P4-f16.



## 著者略歴

石川 拓海（いしかわ たくみ）

昭和55年10月 横浜市に生まれる

平成12年4月 東京工科大学工学部機械制御工学科入学

平成16年3月 同上卒業

平成16年4月 東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科

バイオニクス専攻 博士前期課程入学

平成18年3月 同上 修了

平成18年4月 電気通信大学大学院情報システム学研究科

情報ネットワーク学専攻 博士後期課程入学

平成24年3月 同上単位取得のうえ退学