

平成 11 年度

修士論文

視覚誘導性到達運動の適応メカニズム
に関する研究

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
ヒューマン・インターフェース学講座

9851003 赤司 裕一

指導教官

阪口 豊

出澤 正徳

福地 一

平成 12 年 2 月 2 日提出

修士論文の和文要旨

大学院情報システム学研究科	博士前期課程	情報ネットワーク学	専攻
氏名	赤司 裕一		学籍番号 9851003
論文題目	視覚誘導性到達運動の適応メカニズムに関する研究		
要旨	<p>我々は成長に伴って手足の長さが変化しても、眼鏡によって視野に歪みなどが生じて、見えたものに対して正しく手を伸ばすことができる。これは、脳が、各感覚器官を通じて取り込んだ情報を用いて、環境に適応しているからである。このとき脳は、運動を実現するのに必要な視覚入力と運動指令の対応関係をどのように更新しているのだろうか？</p> <p>このような視覚-運動学習の研究には、プリズムを用いて視野を側方にずらすことで、視覚と運動系の対応関係を人工的に変形する手法が用いられてきた。しかし、冒頭で述べたような適応が、意識することなく自動的に行なわれているのに対し、視覚-運動学習の研究では若干の例外を除いて、被験者が変換に気づく状況で行なわれてきた。</p> <p>そこで、被験者が変換に気がつかない場合の適応と、気がつく場合の適応のメカニズムの違いを調べた。</p> <p>被験者が変換に気がつかないようにするため、視野変換にコンピュータを用い、従来のプリズムを用いた実験では困難であった視野の段階的な変換を実現した。</p> <p>実験1では、視野変換に気がつく場合と気がつかない場合とで、体性感覚と視覚の対応関係の変化を調べた。その結果、視野変換に気がつかない場合のみ、体性感覚と視覚の対応関係が変化することがわかった。</p> <p>実験2では、視野変換に気がつく場合の適応と、気がつかない場合の適応とを同じ手に連続して行ない、それぞれの適応が他方に対して影響を及ぼすかを調べた。その結果、変換に気がつかない場合の適応に対して、気がつく場合の適応の影響はないということが明らかになった。</p> <p>今回の実験からは、適応には意識的に行なうものと無意識に行なわれるものがあり、これらは別々のメカニズムであることを示唆する結果となった。従来の適応モデルでは、この2つを区別せずに扱っていたが、別々のモデルを構築することで、より本質的な人間の学習メカニズムの解明につながると思われる。</p>		

目次

1	序論	3
1.1	研究の目的	3
1.2	本論文の構成	4
1.3	感覚感不一致とプリズム適応	5
1.3.1	視野変換	5
1.3.2	プリズム適応	5
1.3.3	転移	7
1.3.4	視覚フィードバック	7
1.3.5	運動と小脳の関わり	7
2	実験装置	9
2.1	装置の概要	9
2.2	各装置の説明	11
2.2.1	手先位置の計測	11
2.2.2	PC上での処理	11
2.2.3	手先位置・目標の提示	11
3	適応実験	13
3.1	実験1	14
3.1.1	実験の目的	14
3.1.2	運動課題	14
3.1.3	実験方法	18
3.1.4	結果	19
3.1.4.1	ランプ型適応の結果	19

3.1.4.2	ステップ型 (24 mm) 適応の結果	24
3.1.4.3	ステップ型 (50 mm) 適応の結果	27
3.1.5	考察	30
3.2	実験2	32
3.2.1	実験の目的	32
3.2.2	運動課題	32
3.2.3	実験方法	32
3.2.4	結果	33
3.2.5	考察	35
4	結論	37
A	実験装置	42
A.1	カタログスペック	42
A.1.1	ガルバノメータスキャナ	42
A.1.2	ポジションセンサー	43

第 1 章

序論

1.1 研究の目的

私たちは、いとも簡単に目を動かして外界から視覚の情報を取り込み、それに基づいて手足を動かすことができる。しかも、成長して手足の長さが変わったり、筋肉が疲労したりして身体と外界の関係が変化しても、苦もなく手足を思いどおり動かすことができる。このような外界の情報を取り込み、適応的に行動することは、特に意識することなく当たり前のようにできるため何でもないことのように思えるが、実際には脳内で複雑で大規模な情報処理計算が行われており、またそのメカニズムも明らかになっていない。

一般に、各感覚間、そして感覚と運動系との対応関係の成立は、環境への適切な行動における前提条件である。たとえば、机の上の鉛筆を手にとる場合を考えると、鉛筆の位置が自分に対してどのように位置しているかをまず知らなければならぬ。この際重要なのは視覚情報だけでなく自分自身の姿勢に関する体性感覚情報であり、両者の協応的働きにより定位が確定する。さらに、得られた手と鉛筆の位置関係に基づいて運動が実行される。このような視覚的に与えられた目標に向かって手を伸ばす運動を「視覚誘導性到達運動」(visually guided reaching) といひ、これは外界に働きかける運動のなかでも基本的なものである。

視覚誘導性到達運動について考えると、先に述べたように身体と外界の関係は常に変化しており、視覚で捉えた目標位置と正しく到達するのに必要な運動司令との対応関係は常に変化していると考えられる。そのため、正確な運動を行うためには視覚入力と運動指令の対応関係を学習によって逐次、適応させなければならぬ。

い。このような視覚-運動学習 (visuo-motor learning) の研究には、プリズム適応 (prism adaptation) がよく用いられてきた。

プリズムを通して外界を眺めると視野が変換されるため、それにより視覚系と体性感覚系の対応関係が変形するのである。このような状態で到達運動を行なうと、視野が変換されているため手は思うようには動かせない。しかし、同じ運動を何度も繰り返すことにより、正確に目標に到達できるようになる。これを「プリズム適応」という。

過去に行われたプリズム適応を用いた研究によって、運動課題、視野変換の種類などにより様々な結果がでることが知られている。しかし、これまでの実験では若干の例外を除いて、被験者が変換に気づく状況で行なわれてきた。変換に気づく場合、正確に到達運動を行うのにどういった戦略をとるかにより、適応に使われる情報や適応そのものに違いがでるはずである。通常、我々は成長して手足の長さが変化したり、眼鏡を着けることによって視野が縮小や歪みをおこしても、特別意識する事無く正確に運動を行うことができる。このような意識的に促進された適応と無意識の適応は同じものなのだろうか？ また、変換に気づかない場合、適応するのだろうか？

そこで本研究では、視野を側方偏位させた状態での到達運動を学習課題にし、さらに、被験者が視野を変換されていることに気づかない場合の適応を調べるため、視野変換を緩やかに行う方法を使用した。本研究ではこの変換方式をランプ型変換と呼ぶ。反対に従来のプリズムを装着したとき、装着していないときの2パターンしかない、すなわちいきなり変換されるものをステップ型変換と呼ぶ。

この二つの変換方式を用いることで、無意識的に進む適応と意識的に進める適応とで、学習に使う情報に違いがあるのか、適応に違いがあるのかを調べた。

1.2 本論文の構成

まず第1章で、プリズム適応と関連する研究について述べる。第2章では、実験装置について述べる。第3章では、ランプ型変換と、従来使用されてきたステップ型変換を用いた適応実験の結果を述べる。第4章では、結論を述べる。

1.3 感覚感不一致とプリズム適応

知覚-運動学習 (perceptual-motor learning) は、心理学の分野で感覚系と運動系との相互協調関係や、感覚系間関係を扱い、回転盤追跡 (rotary pursuit, visual tracking) や鏡映描写 (mirror drawing) 課題などを中心に動作や技能学習の研究に対応して使用されてきた。

1.1でも述べたように、各感覚間、感覚と運動系との対応関係の成立は運動を実行するのに必要不可欠である。このような対応関係がどのように形成されているのかという研究において取り上げられる実験方法として次のようなものがある。基本的な手続きは、欠如 (defect), 孤立化 (isolation), 組み替え (recombination) 実験と分類される。欠如実験とは、盲人の空間知覚に関する研究などに、孤立化実験は、身体運動の視覚的フィードバックが制限された実験などに代表される。そして、組み替え実験は、視野をプリズムのような光学系で変換する”さかさ”眼鏡実験などに代表される。

1.3.1 視野変換

感覚間不一致をもたらす方法として、視野変換がある。変換の種類は偏位、回転、縮小、湾曲など多岐にわたり、また、変換をもたらす光学系も種々に工夫されてきた。くさび型プリズム (側方偏位)、直角プリズム (反転) といった光学プリズムによる屈折、鏡を利用したり、さらに、コンピューターを使用したりと工夫されてきた。

1.3.2 プリズム適応

本研究では、感覚感不一致をもたらす方法として視野を側方偏位させる。側方偏位させた場合の例を図 1.1に示す。

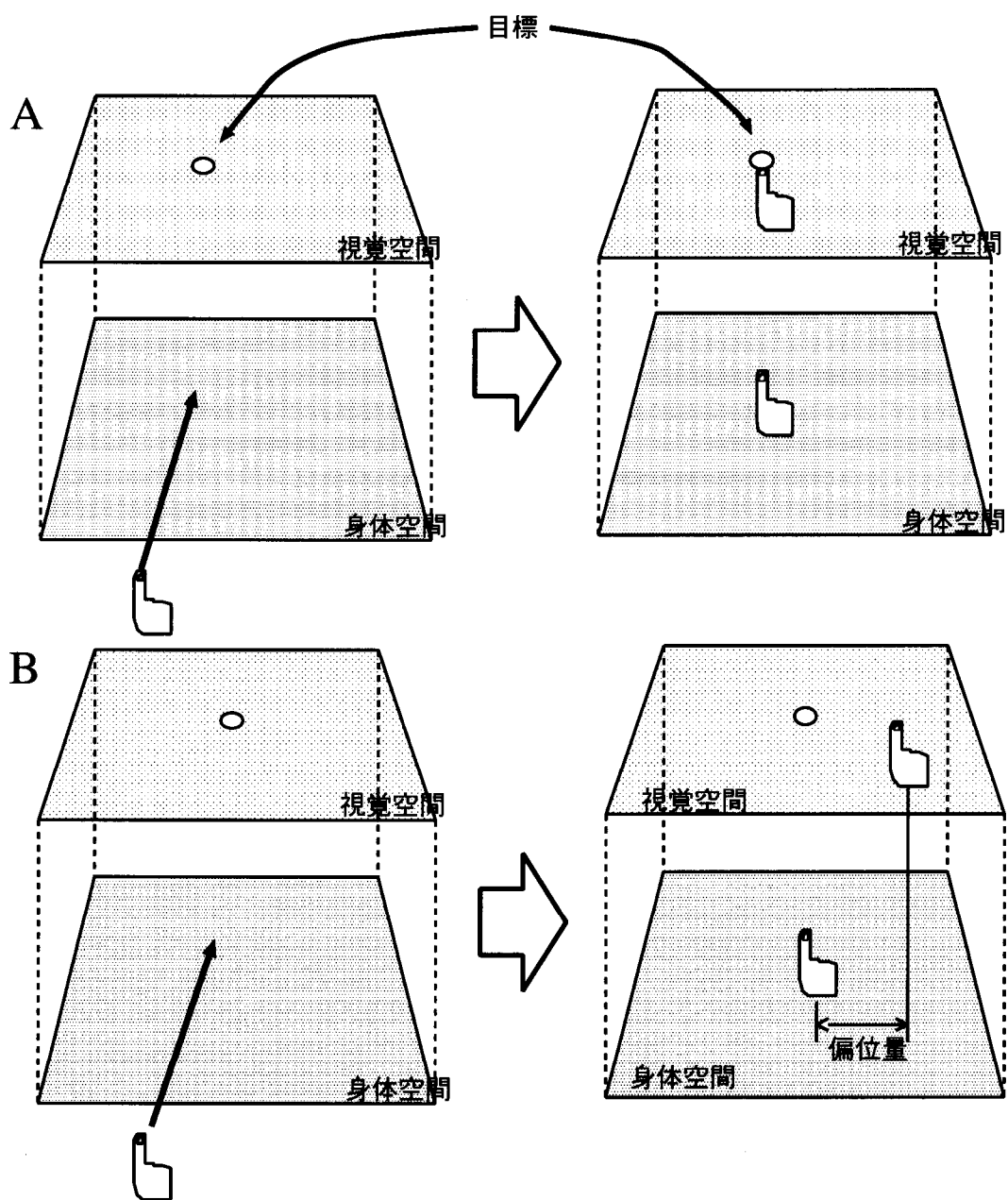


図 1.1: 変換されていない状態と変換された状態の到達運動を示したものである。

A. 実際の位置と視覚で与えられる位置は同じなので、目に見える目標に向かって指先を動かせば、正しく到達する。

B. 視野が右に変換されているので、目に見える目標 (実線) に向かって指先を動かすと実際の指先は実際の目標より右側に到達する。

プリズム適応においては、到達運動の場合、標的指示の正確さが問題となる。側方偏位の場合、目標と手先の身体に対して水平方向の差が、運動の正確さの基準となる。

適応の指標には、次のようなものが一般に使われる。視野変換事態を、A:プリズム着用前—ベースライン, B:着用直後—プリズムによる直接的効果, C:着用初期から後期— $C_1 \cdots C_n$ 暫時的修正過程, D:はずす直前—最終段階, E:はずした直後—残効, F: $F_1 \cdots F_n$ —F 残効過程, という段階に分ける。残効とは、視野変換された状態に適応した後、視野をもとに戻したときに残る影響のことである。特に、側方偏位された方向と逆方向にでる影響を負の残効という。適応現象の記述には、AとEの差によってもたらされる残効がまず第一に扱われ、さらに、BとDの差による変化、 C_1 から C_n への変化、AからBへの変化がDへの過程Cでどのようになるか、AとBの間とDとEの間の比較などが用いられる [12]。また、残効のみが純粋な意味での適応であるとの考えもある [4][12]。本論文では、視野変換された状態で正確に運動できるようになることを「適応」と呼ぶ。

1.3.3 転移

ある運動を訓練したときに、まだ訓練を受けていない別の運動に学習効果の影響があらわれることを「転移」という。例えば、右手運動の適応効果が左手運動に影響を与えることは、両手間転移 (intermanual Transfer) とよばれる。

1.3.4 視覚フィードバック

通常、我々は到達運動を行なうとき、まず目標位置の視覚情報に基づいて運動を開始する。そして、手が目標に近づいてくると、手と目標の位置のずれをもとに手の動きを修正する。このような、オンライン視覚情報によるフィードバック制御を視覚フィードバック (visual feedback) という。

1.3.5 運動と小脳の関わり

小脳が損傷すると筋の緊張が低下して、四肢がだらりとした状態になる。さらに、運動の調節がうまく行かず、動作を正しく行えなくなる。腕を伸ばして空中の一点を指差した位置をスタート点とし、そこからすみやかに鼻の先端に触って下

さいと言うと、正常者ではほとんどまっすぐに開始点から鼻まで指が運ばれるが、小脳に傷害があると、目標から離れたコースをたどり、しかも目標の近くにきて指がふるえるために、目標に到達するまでに困難を来すのである [10]. また、??節で述べたように、正常な人はプリズムを装着してしばらくその環境で活動すれば、目的の場所に手足を正確に動かすことが出来るようになるが、小脳に傷害があると、プリズム適応が弱まったりなかつたりすることが知られている [1]. 運動制御や運動学習の中でもプリズム適応のような学習は、小脳が深く関与しているといわれている.

第 2 章

実験装置

2.1 装置の概要

実験では実際に指先のある位置を，被験者に変換して提示しなければならない．そのため，リアルタイムで手先位置の計測，データ変換，指先位置提示を行う必要がある．そこで，図 2.1 のような装置を製作し，使用した．

本体は，腕を動かすテーブル，手先位置・目標などを表示するスクリーン，被験者がそのスクリーンを見るためのミラーからなる．

被験者は自分の手は見えず，かわりにレーザーポイントによって指先位置は提示される．テーブルとスクリーンはミラーを軸に対称になっており，目からスクリーン上のレーザーポイントまでの距離と指先までの距離は等しくなる．そのため，ミラー上に映る目標，指先位置は被験者にはテーブル上にあるように感じる．

変換・測定の流れは図 2.2 に示す．

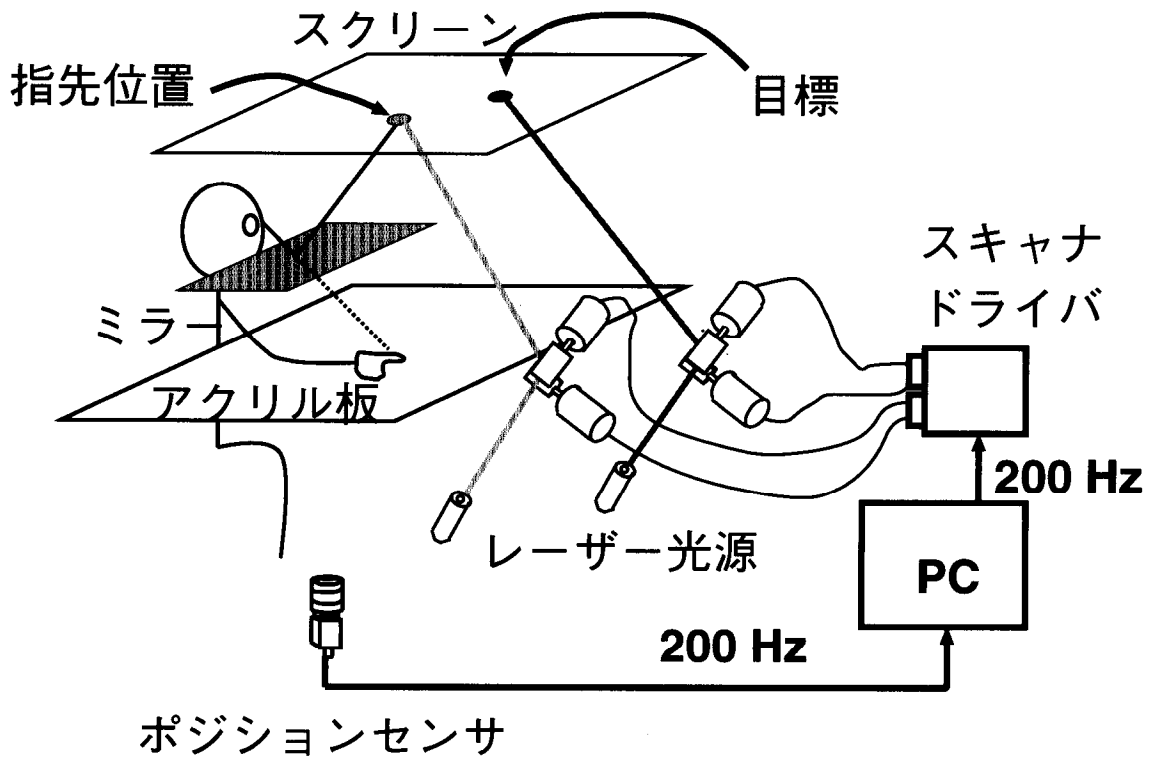


図 2.1: 実験装置の構成. ポジションセンサーで計測された手先位置データは, PC で変換され, レーザーポイントによってスクリーンに提示される.

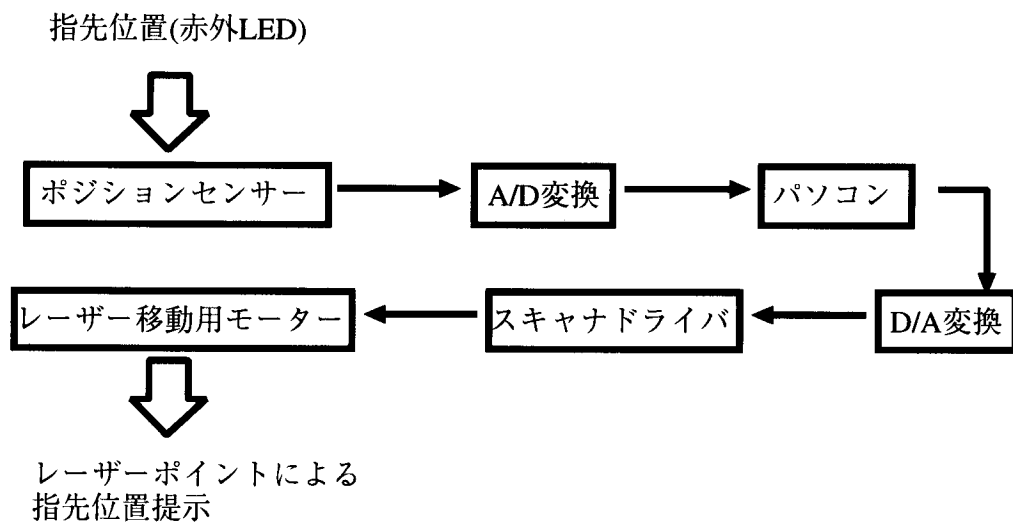


図 2.2: 実験装置の情報の流れ

到達運動を行うとき，レーザーポイントで提示される目標と指先位置以外を手がかりとしないために，装置全体を暗幕で覆った．また，被験者の頭は顎台で固定した．

2.2 各装置の説明

実験に使用した機器の細かいスペックについては，付録 A を参照．

2.2.1 手先位置の計測

指先位置の計測には，光スポットの二次元位置を計測する光点位置計測装置であるポジションセンサ C 5 9 4 9 (浜松ホトニクス社製) を使用した．なお，サンプリング周波数は 300 Hz とした．赤外 LED は 2 個用い，図 2.3 のように人指し指の両側に取り付け，2 つの LED の中点を指先位置とした．測定値は，アナログで出力したものを A/D 変換ボードを介して，PC に取り込んだ．

2.2.2 PC 上での処理

PC 上では，ポジションセンサから得られた値のスキヤニングドライバ上での値への変換，および手先位置の変換を行う．なお，A/D・D/A 変換ボードを介しての，ポジションセンサからのデータの読み取り，スキヤニングドライバへのデータの出力は，ともにサンプリング周波数 200 Hz で行った．

2.2.3 手先位置・目標の提示

指先位置の提示には，レーザーポイント (キコー技研社製) を用いた．レーザーポイントの移動には，ガルバノメータスキャナ G120DT にミラーを装着し (図 2.4)，スキャナ制御用ドライバ MiniSAX driver (共に GSI LUMONICS 社製) とともに，XY 軸それぞれに 1 セットずつ用いた．また，目標の提示にもこれと同じものを用いた．

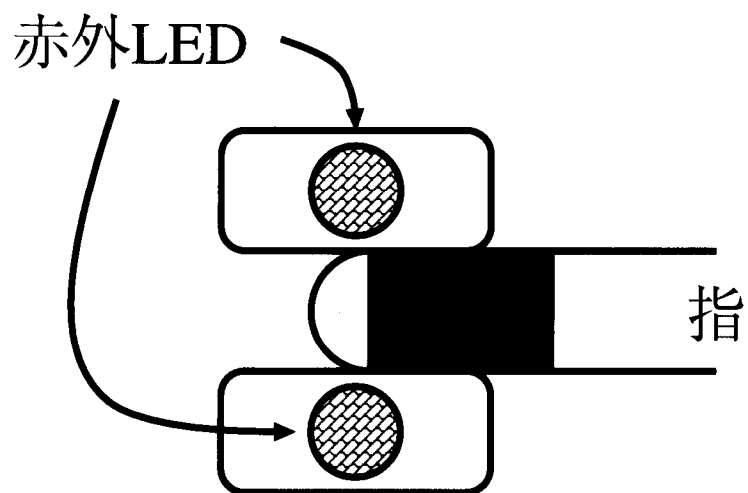


図 2.3: 指先に取り付けた赤外LED

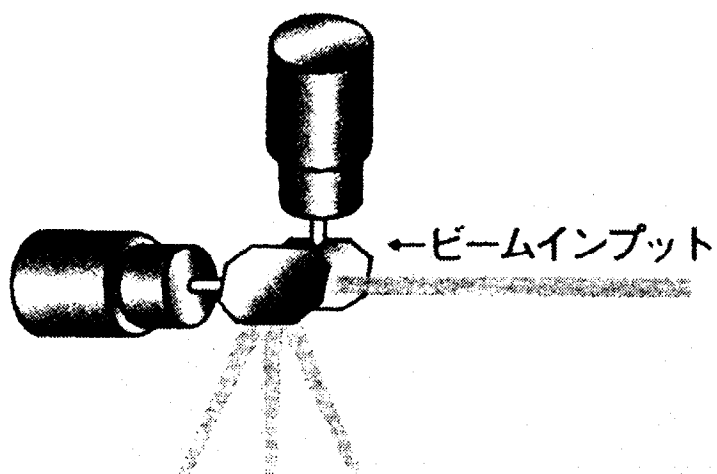


図 2.4: ガルバノメータスキャナによるレーザーポイントの移動

第 3 章

適応実験

過去のプリズム適応の研究では、意図的な部分をなるべく排除するために反応時間に制限を設け、考える余裕を与えないようにしたり [3]、事前に意図的にずらさないように指示したり [2] することによって、意図的な部分をなるべく排除した実験が行なわれてきた。しかし、従来使用されてきたステップ変換では、被験者が手先の位置をずらされていることに気付くため、どうしても学習に意図的、戦略的な要素が入ってしまう。このため、意識的な適応と無意識な適応が明確に区別されてこなかった。

そこで、本研究では、ランプ型変換を用い被験者に不一致が検出されない場合と、従来のステップ型変換を用い不一致が検出される場合とで、適応の違いがあるのかを実験により検証する。

ここでいう、被験者が偏位変換に気づくというのは、視覚で与えられる目標と体性感覚により知覚される指先位置とが一致しないと感ずること、またあるいは、脳内のモデルによって予測される身体の動きと、視覚を通じて得られる身体の動きが一致しないと感ずることである。本実験では、被験者に与える視覚情報を運動終了後のみに限定することで、体性感覚情報と視覚情報の不一致のみを扱うことを試みた。

3.1 実験 1

3.1.1 実験の目的

側方偏位させた場合、もし、被験者が変換に気がつくならば、そのずれの量を計算して到達運動を行なうだろう。つまり、検出された体性感覚情報と視覚情報の不一致量をもとに、指先を眼に見える目標と異なる位置に意識的に動かすことによって、視覚で与えられる目標と指先位置を一致させるであろう。これは、体性感覚と視覚の対応関係は変化させずに視覚入力と運動指令の対応関係を変化させることによって、変換された環境に適応したといえる。この場合は、体性感覚と視覚の対応関係の再構成は行なわれないので、負の残効はないと予想される。

被験者が変換に気がつかないならば、気がつくときのような戦略はとれない。この場合どうなるのであろうか？適応が生じるのであれば、視覚入力と運動指令の対応関係は変化したことを意味する。その上で、体性感覚と視覚の感覚間不一致がないのならば、体性感覚と視覚の対応関係の再構成が行なわれたということになる。適応すれば、再構成が行なわれ、負の残効が生じるはずである。

以上の予測を検証するため、本実験では、感覚間不一致を検出させないためのランプ型変換と、従来使用されてきたステップ型変換を用いて適応実験を行ない、負の残効の有無を調べる。

なお、本実験では、運動終了後のみ指先位置を提示することによって、被験者が得られる運動の正確さは、運動終了後の目標と指先位置のみになる。これにより、1 試行中の学習は無く、1 試行ごとに学習することになる。

被験者の個体差をなるべく減らすため、また、運動の速度によって適応に違いがあったりするため [3]、運動時間や反応時間に制限を設けた。

3.1.2 運動課題

被験者は、図 2.1、図 3.1 のように着席、顎台による頭部固定の状態、スタート地点からレーザーポイントで提示される視覚目標まで人差指を移動する。スタート地点には、直径 10 mm、高さ 2 mm のプラスチック製の円盤が固定されている。このとき頭部は固定され、暗室内で行うため、ミラー上に映る目標、指先位置しか見ることが出来ない。スタート地点は身体の正面にあり、視覚目標はスタート地点か

ら垂直方向に 187 mm 離れた位置を中心に長径 67 mm(水平方向), 短径 17 mm(垂直方向) の楕円領域内にランダムに現われる。視覚目標は直径 5 mm の円, 指先位置は直径 2 mm の円で提示される。

1 試行の流れを図 3.2 に示す。指先がスタート位置に来たのが確認されるとビーブ音が鳴る。次にランダムで 1500 msec~2000 msec 待った後, ビーブ音と同時に目標が提示される。ここで被験者は, 目標が現われてから指先が動きだすまでの反応時間が 200 msec 以内であることが要求される。目標は運動中も提示されている。次に運動終了と同時にビーブ音が鳴り, 指先位置が提示される。ここでも運動を始めてから 600 msec 以内に運動を終了することが要求される。200 msec 後, 目標と指先位置が消える。これで 1 試行終了となり, スタート地点に指先を戻すと次の試行が始まる。

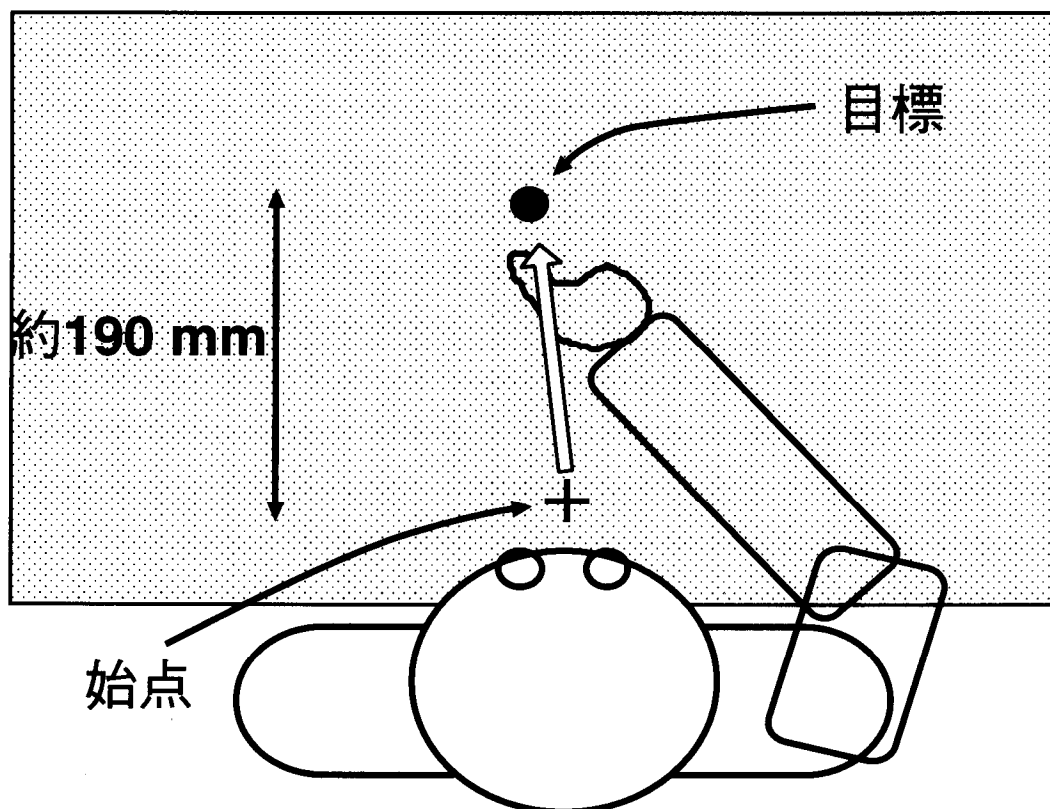


図 3.1: 被験者はスタート地点から目標まで到達運動を行なう。このとき、目標以外は見ることができない。

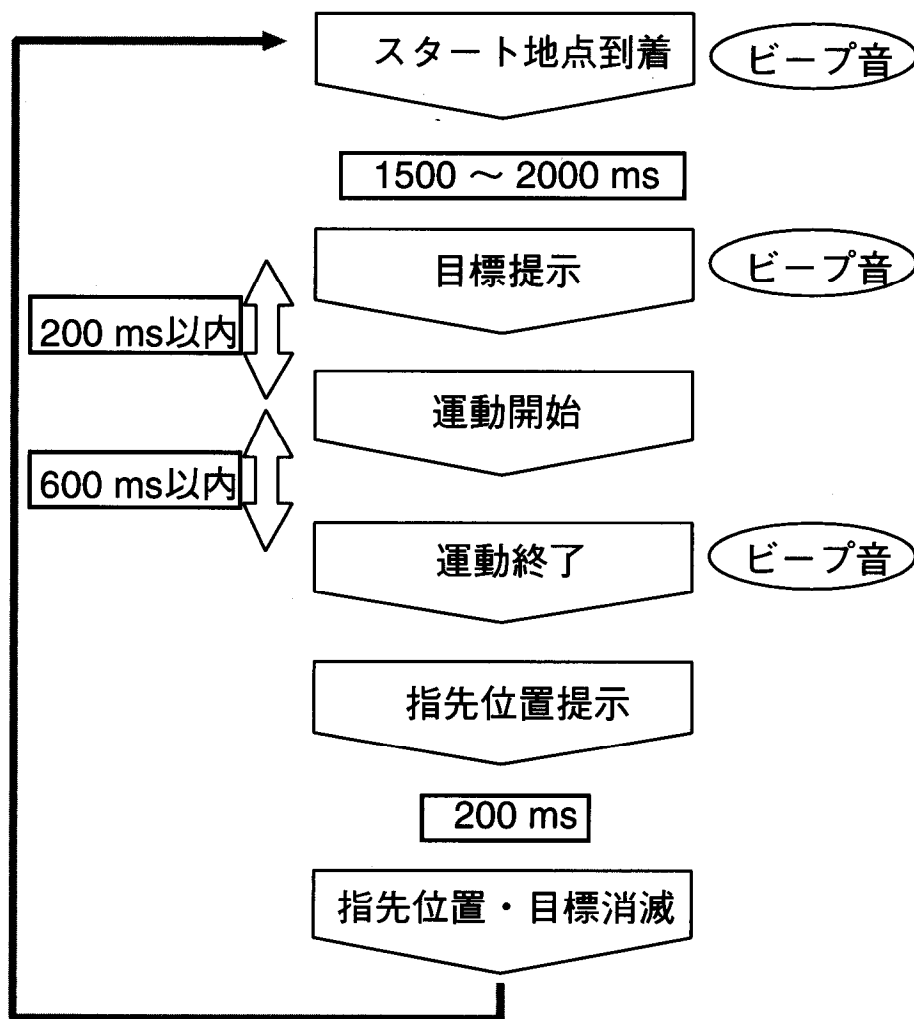


図 3.2: 1 試行の流れ。指先がスタート位置に来たのが確認されるとビープ音が鳴る。次にランダムで 1500 msec~2000 msec 待った後、ビープ音と同時に目標が提示され、200 msec 以内に運動を開始する。目標は運動中も提示されている。そして 600 msec 以内に運動を終了するとビープ音が鳴り、指先位置が提示される。200 msec 後、目標と指先位置が消える。これで 1 試行終了となり、スタート地点に指先を戻すと次の試行が始まる。

3.1.3 実験方法

実験は4つのブロックにわかれ、1ブロック目は変換なしで15試行、2・3ブロック目は側方偏位変換ありで30試行ずつ、4ブロック目は変換なしで10試行行った。4ブロック目のみ残効を確認するため、指先位置の提示は行わなかった。変換はステップ型右方偏位24mm及び50mm、ランプ型右方偏位24mm(0.67mm刻み)の3パターン行った。距離はすべてテーブル上での値である。ステップ型変換の場合、2・3ブロック目とも最初から変換した。ランプ型変換の場合、ブロックの最初18試行を変換する。2ブロック目は18試行目まで0.67mmずつ右方偏位され、この段階で12mm右方偏位する。残り12試行はこの変換状態で続ける。3ブロック目は12mm右方偏位した状態で始まり、同じように最初18試行が0.67mmずつ右方偏位され、残り12試行は24mm右方偏位した状態で続ける。なお、運動はすべて右手で行った。

被験者には、なるべく正確に目標に到達するよう運動して下さい、また、各ブロックは独立したものであるという指示を与えた。

3.1.4 結果

被験者ごとに、残効の有無をまとめたグラフを図 3.10 に示す。

3.1.4.1 ランプ型適応の結果

結果は、ほぼ 100% 負の残効があった被験者から、負の残効がない被験者までいた。変換を気づかせないためのランプ型変換だったが、6 人中 2 人が実際の指先位置と視覚提示される指先位置がずれていると感じた。変換に気づいた被験者は全員、負の残効がなく、気がつかなかった被験者は全員ほぼ 100% の負の残効があった。

負の残効があった一例 (被験者 KW) を図 3.3 に示す。このグラフは、横軸に試行回数、縦軸に目標と指先の水平誤差を表したものである。変換なしのブロック 1 では、水平誤差は 0 の周りに分布した。ブロック 2・3 では緩やかに変換していくが、ずっと水平誤差は 0 の周りに分布している。これは適応しているといえる。そして変換なしに戻したブロック 3 では、偏位させた方向とは逆方向である左方約 25 mm の周りに分布した。ほぼ 100% の負の残効があった。また、被験者は視野変換には気づかなかった。

同様に、負の残効が現われた被験者を図 3.4 に示す。3 人とも変換には気づかなかった。ブロック 4 は指先の提示が無いので精度が悪いが、全体の傾向は負の残効があるといえる。特に最初の数回は YS, KS に関しては左方 20 mm ~ 25 mm に分布している。被験者 YN は、左方 15 mm の辺りに分布しているが、ブロック 3 で 15 mm 程度しか適応していないのでほぼ 100% 負の残効があるといえる。

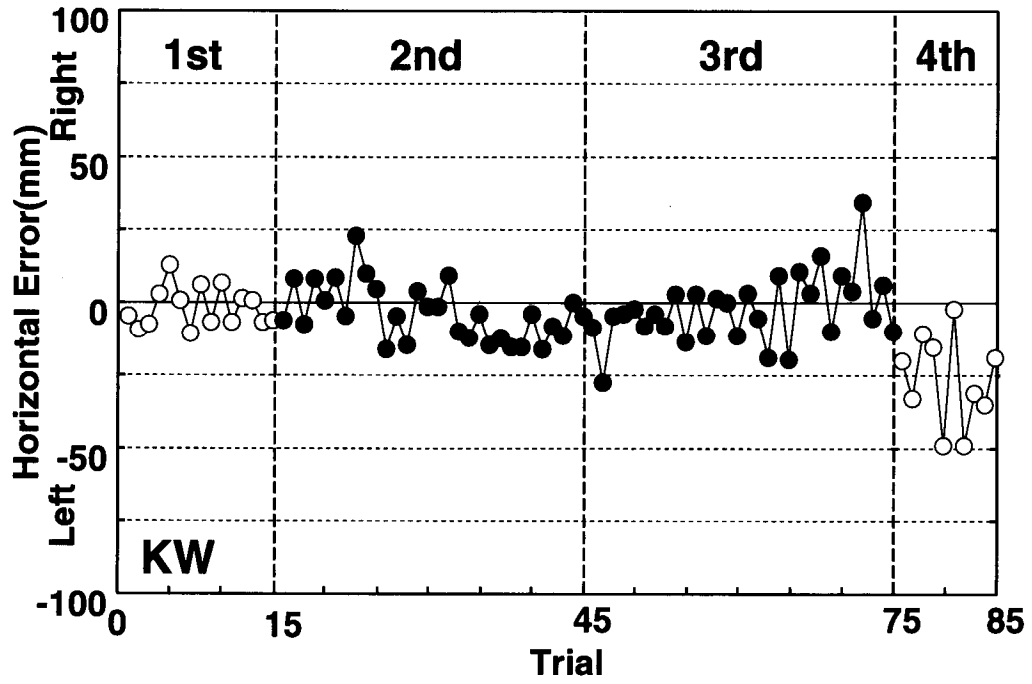


図 3.3: ランプ型変換の適応過程：緩やかに視野を右方偏位させ，最終的に 24 mm 変換した．縦軸は，目標と指先位置との水平誤差，横軸は試行回数である．

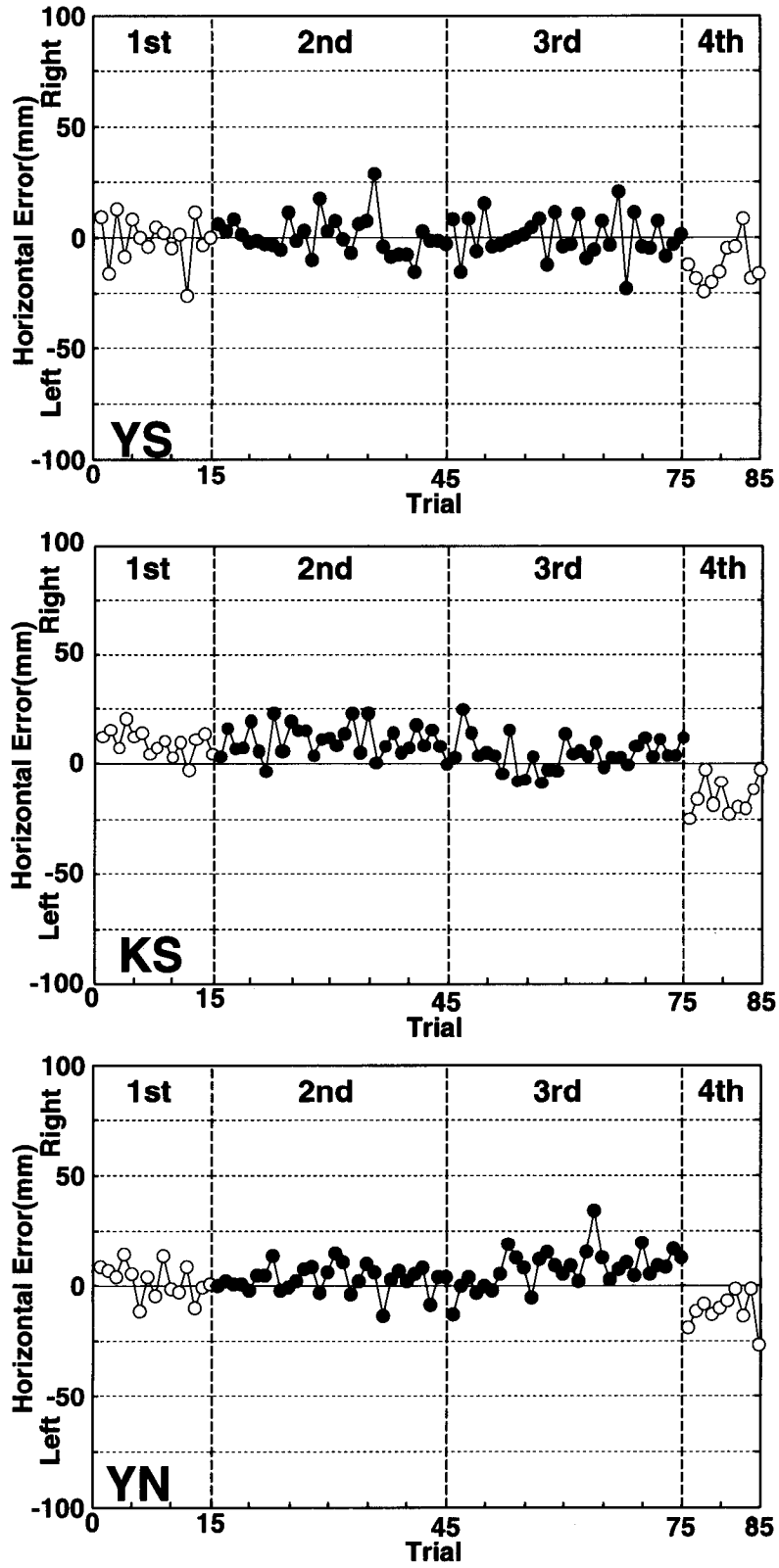


図 3.4: ランプ型変換 (負の残効あり)

次に、負の残効が無かった例を図 3.5 示す。

ブロック 3 が終了した時点で、2 人とも水平誤差は 0 付近に分布した。ブロック 4 でも、水平誤差は 0 付近に分布した。実験終了後のこの 2 人の被験者の感想は、「実際の指先位置と視覚提示される指先位置がずれていると感じた」であった。

被験者 OW は、ブロック 2 が終了した時点で、水平誤差は 12 mm の辺りに分布している。この時点では、約 12 mm 右方偏位されているので、全く適応していないことになる。その後、ブロック 3 で 0 付近に分布するようになった。このとき被験者 OW は、「ずらされていると感じる量を計算して手を動かした」ということだった。

ランプ型で変換に気づいた被験者は、1 試行 1 試行の結果を重視せず、自分の体性感覚を信じて運動を行うといった傾向がみられた。その結果、感覚間不一致を検出しやすくなったと思われる。

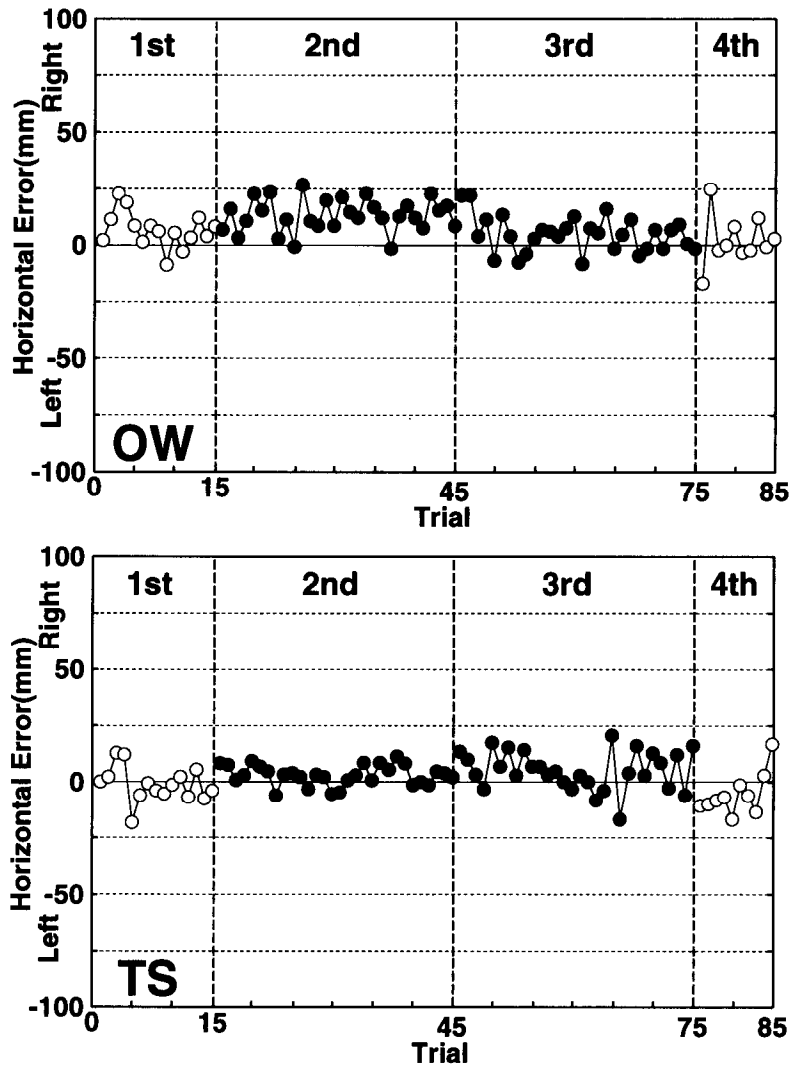


図 3.5: ランプ型変換 (負の残効なし)

3.1.4.2 ステップ型 (24 mm) 適応の結果

ランプ型と同様に、負の残効が現われた被験者もいれば現われない被験者もいた。変換に全く気づかなかったのは1人のみ(被験者 TS)で、負の残効があった。変換に気がついた被験者のうち2人で負の残効があり、2人で負の残効がなかった。なお、変換に気づいた被験者も、「ずれている量が小さいので、試行を繰り返すうち、本当にずれているのかどうかあやふやになった」という感想だった。

図 3.6に一例を示す。

被験者 YS, KS ともブロック 1 では、水平誤差は 0 付近に分布した。視野を 24 mm 右方偏位されたブロック 2 では、最初、偏位された 24 mm とほぼ同じ大きさ右に水平誤差が生じたが、数回の試行で 0 付近に分布するようになった。変換をもとに戻したブロック 4 では、被験者 OW の場合、水平誤差は 0 付近に分布したが、被験者 KS の場合は左に 12 mm ~ 30 mm の誤差を生じた。実験終了後の被験者の感想は実験終了後の被験者の感想は、被験者 YS は「実際の指先位置と視覚提示される指先位置がずれていると感じた」であり、被験者 KS は「ブロック 2 の最初のほうは、実際の指先位置と視覚提示される指先位置がずれていると感じたが、試行を繰り返すうちよくわからなくなった」であった。また、被験者 YS は、「ずらされていると感じる量を計算して手を動かした」ということであった。

図 3.7には、残り 3 人の被験者の結果を示す。

被験者 OW は、負の残効はなかった。そして、実験終了後の感想も、正確に到達運動を行なうための戦略も被験者 YS と同じであった。被験者 TS は、多少負の残効がみられた。また、実験終了後の感想は、「提示される指先位置に、何も違和感はなかった」であった。被験者 MH は「実際の指先位置と視覚提示される指先位置がずれていると感じた」という感想で、「ずらされていると感じる量を計算して手を動かした」ということであったが、負の残効が少しあった。

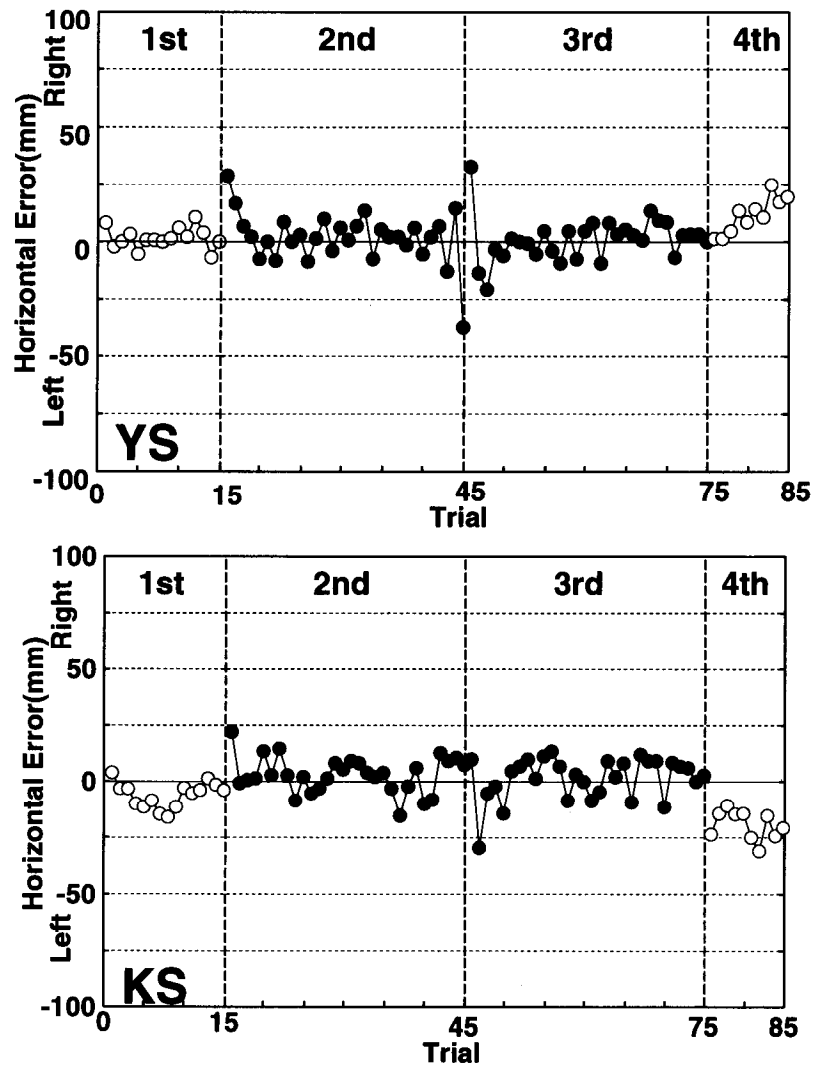


図 3.6: ステップ型変換 (24 mm) の適応過程

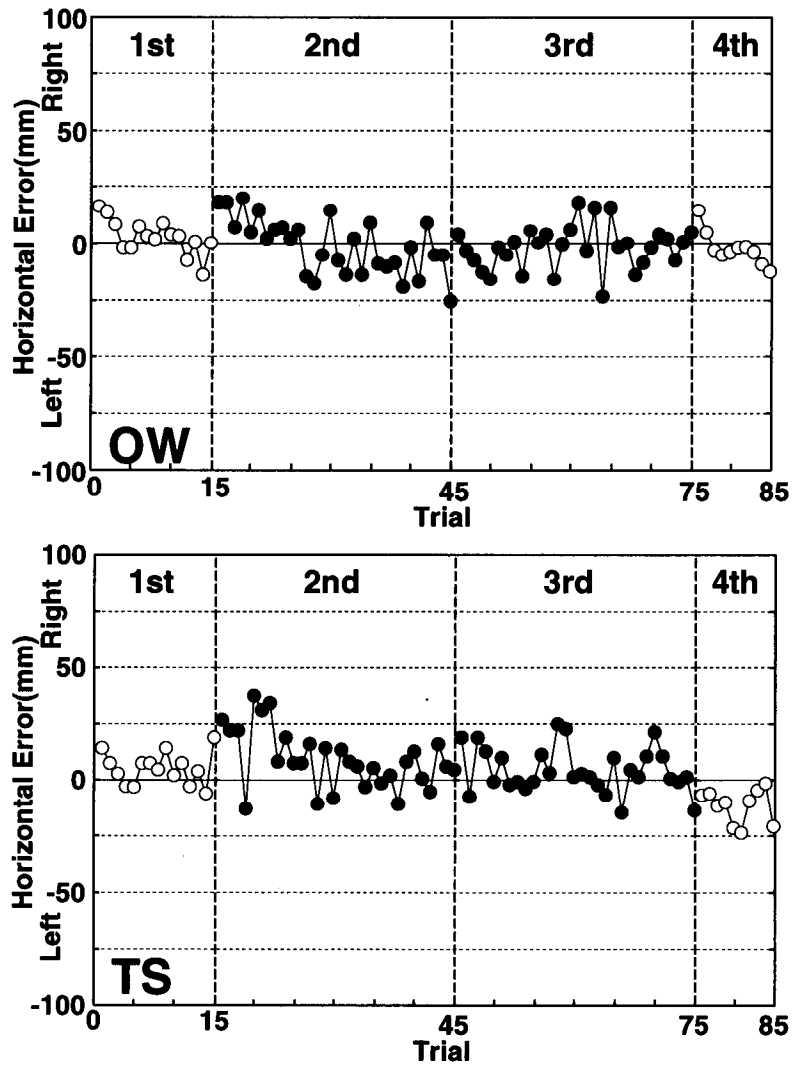


図 3.7: ステップ型変換 (24 mm) の結果 2

3.1.4.3 ステップ型 (50 mm) 適応の結果

全員変換されていることに気づいた。4人の被験者のうち、2人の被験者で全く負の残効はなく、2人の被験者で、多少の負の残効があった。

結果の一例を図 3.8に示す。ブロック1では、水平誤差は0の周りに分布した。視野を50 mm 右方偏位されたブロック2では、最初、偏位された方向と同じ方向に約50 mm 程度水平誤差が生じた。その後、誤差は0付近に分布するようになった。ブロック3でも、ブロック2と同様の過程がみられた。変換なしに戻したブロック4では、水平誤差は0付近に分布し、負の残効はなかった。実験終了後の被験者の感想は「実際の指先位置と視覚提示される指先位置がずれていると感じたので、ずらされている分だけ、反対方向に指先を動かした」ということだった。

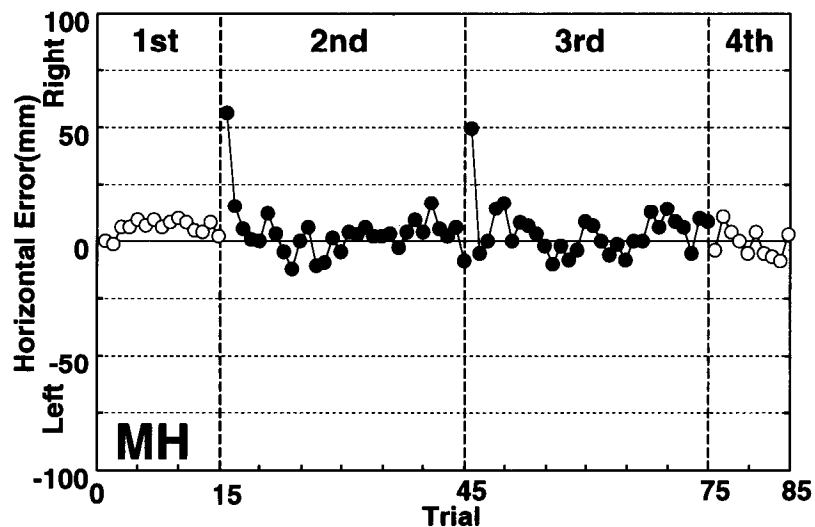


図 3.8: ステップ型変換 (50 mm) の適応過程

残り3人の結果を図 3.9示す。3人の被験者とも実験終了後の感想は、被験者 MHと同じだった。しかし、被験者 KSでは、20 mm ほど、被験者 YSでは僅かだが負の残効があった。なお、被験者 YSと OWは、ブロック3の1回目の試行を前のブロックと同じと勘違いしたため、水平誤差は生じていない。

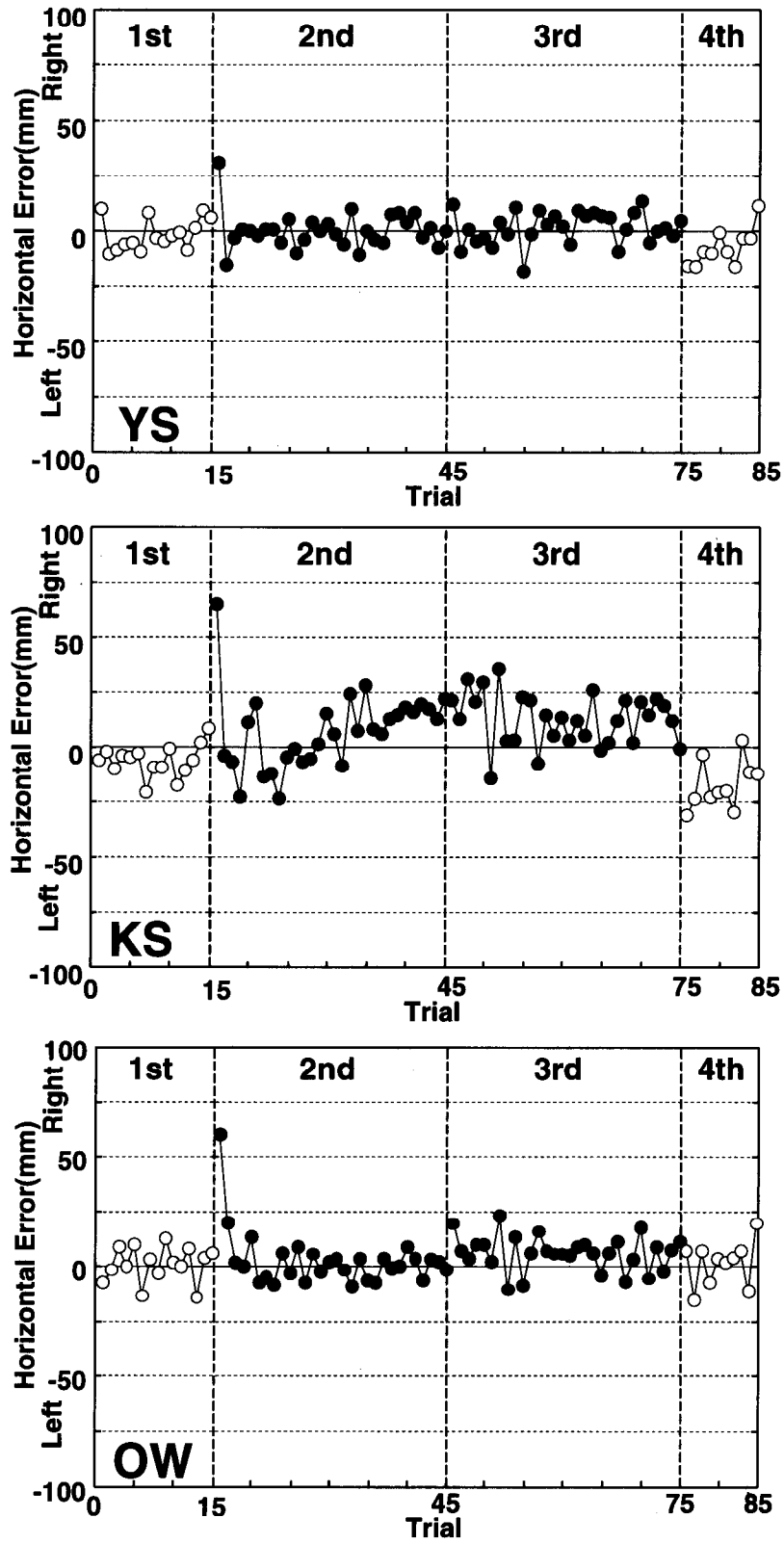


図 3.9: ステップ型変換 (50 mm)

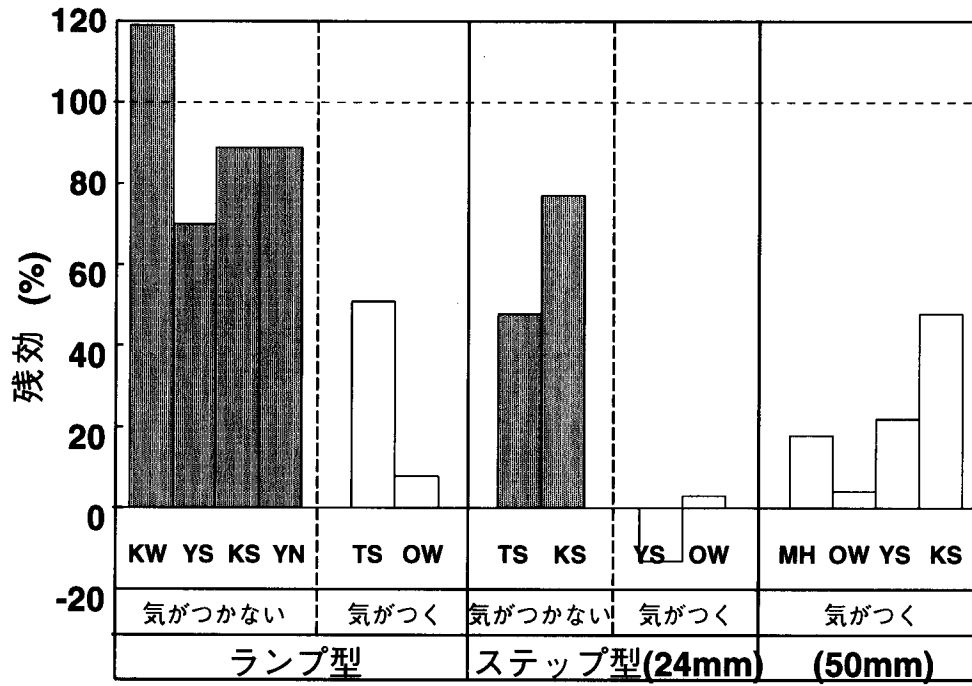


図 3.10: 被験者ごとの残効

3.1.5 考察

ランプ型, ステップ型 (24 mm) にかかわらず,

- ・ほぼ 100%負の残効があり, 実験後の感想は, 指先の位置がずれてるようには感じなかった, もしくはずれてるような気もしたけどよく分からなかった.
- ・負の残効が全く無く, 実験後の感想は, 指先位置と視覚提示で与える指先位置がずれていると感じ, かつ, 意識的に指先をずれてる方向とは逆方向にずらして動かした.
- ・負の残効があり, 実験後の感想は, 指先位置と視覚提示で与える指先位置がずれていると感じ, かつ, 意識的に指先をずれてる方向とは逆方向にずらして動かした.

の3パターンの結果がでた.

このことから, 予想どおり, 体性感覚情報と視覚情報の不一致が検出されない場合, ほぼ 100%負の残効があるといえる. つまり, 感覚間不一致が検出されない場合は, 体性感覚と視覚の対応関係が再構成されているといえる. また, 適応したということは, 視覚入力と運動指令の対応関係も変化したということである. しかし, 被験者は, これらの対応関係を直そうとは考えていないのに, なぜ変化するのであるか. それは, 運動誤差と変換されていることによる誤差の区別がつかないためと思われる. 被験者には, 「目標に対して出来るだけ正確に運動して下さい」という指示を与えているので, おそらく, 目標に正確に到達しようという意識が, 自動的に体性感覚と視覚の対応関係を更新しているのであろう.

次に, 感覚間不一致が検出される場合は, ずれていると感じる分だけ意識的に指先をずらして動かしてしまうので, その結果目標には正確に到達できるようになるが, 残効はないという予想であった. 概ね予想どおりの結果になったが, 一部の被験者に負の残効があった.

これは, 体性感覚から得る位置感覚が曖昧であるため, ずれの量を計算して動かしていても, 試行を繰り返すうち, ずれていると感じる大きさが変化し, 自動的に体性感覚と視覚の対応関係が変化したと考えられる. 体性感覚と視覚の対応関係の不一致を検出できない適応には, 時間・試行回数が重要な要因となっている. Brown(1928)は視野を 75 度回転する眼鏡を着用する実験を行った. その結果, 2 日目には回転または傾斜の印象は減じ, 7 日目にはその印象は非常に不確かなも

のとなったが、完全に自然なものとはならなかった。つまり、ある程度までは、時間をかければ感覚間不一致は減少する。

次にステップ型 (50 mm) であるが、全員変換には気がついたが負の残効があった被験者がいた。この負の残効の出現は、ステップ型 (24 mm) と同じと考えられる。これらのことから、感覚間不一致の検出の有無によって、適応するのに変化する情報が異なることがわかった。

3.2 実験 2

3.2.1 実験の目的

実験1から、感覚間不一致が検出される場合とされない場合とでは、適応に違いがあることがわかったが、運動指令と視覚の対応関係は共に変化する。この2つの対応関係の変化は、同じメカニズムなのであろうか？

そこで、本実験では、まず感覚間不一致が検出されない状態で適応させ、その後、感覚間不一致が検出される状態で適応させることにより、この2つが同じものかどうか検証した。

3.2.2 運動課題

実験は7つのブロックにわかれ、1ブロック目は変換なしで15試行、2・3ブロック目はランプ型左方偏位変換で30試行ずつ、4ブロック目は変換なしで10試行行った。5・6ブロック目はステップ型右方偏位変換で30試行ずつ、7ブロック目は変換なしで10試行行った。4・7ブロック目は残効を確認するため、指先位置の提示は行わなかった。ステップ型右方偏位は5・6ブロックとも54mm、ランプ型左方偏位は20mm(0.67mm刻み)で行なった。距離はすべてテーブル上での値である。ステップ型変換の場合、5・6ブロック目とも最初から変換した。ランプ型変換の場合、ブロックの最初15試行を変換する。なお、運動はすべて右手で行った。

被験者には、なるべく正確に目標に到達するよう運動して下さい、また、各ブロックは独立したものであるという指示を与えた。

3.2.3 実験方法

実験1と同じ。

3.2.4 結果

感覚間不一致が検出されない状態での適応に、不一致が検出される状態での適応は干渉しないという結果になった。

結果の一例 (被験者 OW) を図 3.11 に示す。

変換なしのブロック 1 では、指先位置の水平誤差は 0 の周りに分布した。ランプ型変換のブロック 2 では、左方に偏位を加えていった最初の 15 試行は、偏位量だけ誤差を生じている。しかし残りの試行及び、ブロック 3 では、水平誤差は 0 付近に分布した。ブロック 2, 3 での変換に、被験者は気づかなかった。変換なしに戻したブロック 4 (運動結果表示なし) では、指先位置の水平誤差は 20 mm の周りに分布し、ほぼ 100% 負の残効があった。ステップ型で右方に 54 mm 偏位されたブロック 5 では、最初、約 77 mm の水平誤差を生じた。これは、ブロック 2, 3 での無意識の適応により、自分の指先位置を実際より約 20 mm 左にあると知覚しているためである。その後、水平誤差は 0 付近に分布した。ブロック 6 は、ブロック 5 と同じような結果であり、また、1 回目の試行の水平誤差がブロック 5 と同じことから無意識の適応はなかったといえる。変換なしに戻したブロック 7 (運動結果表示なし) は、ブロック 4 と同じ傾向の結果となった。

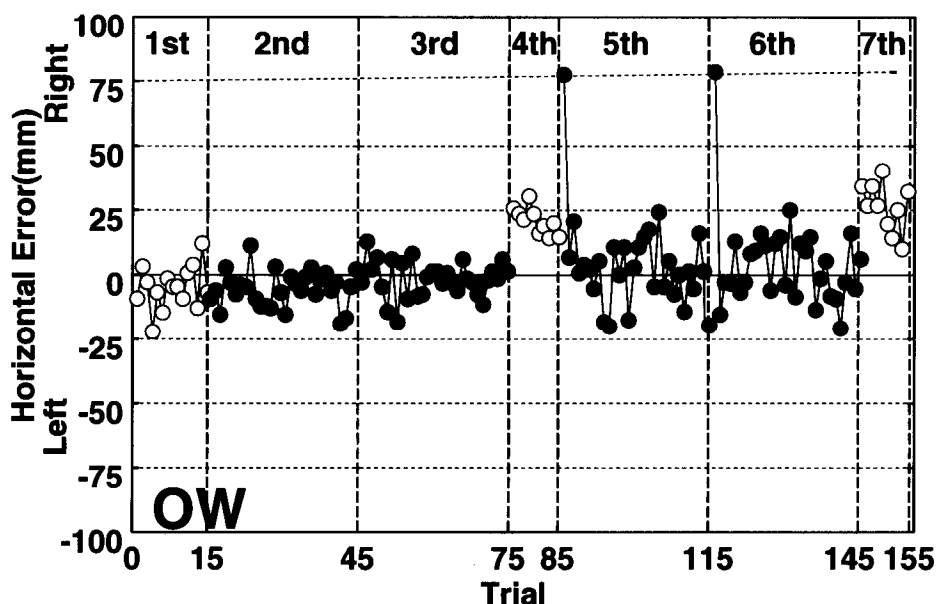


図 3.11: 実験 2 の適応過程:

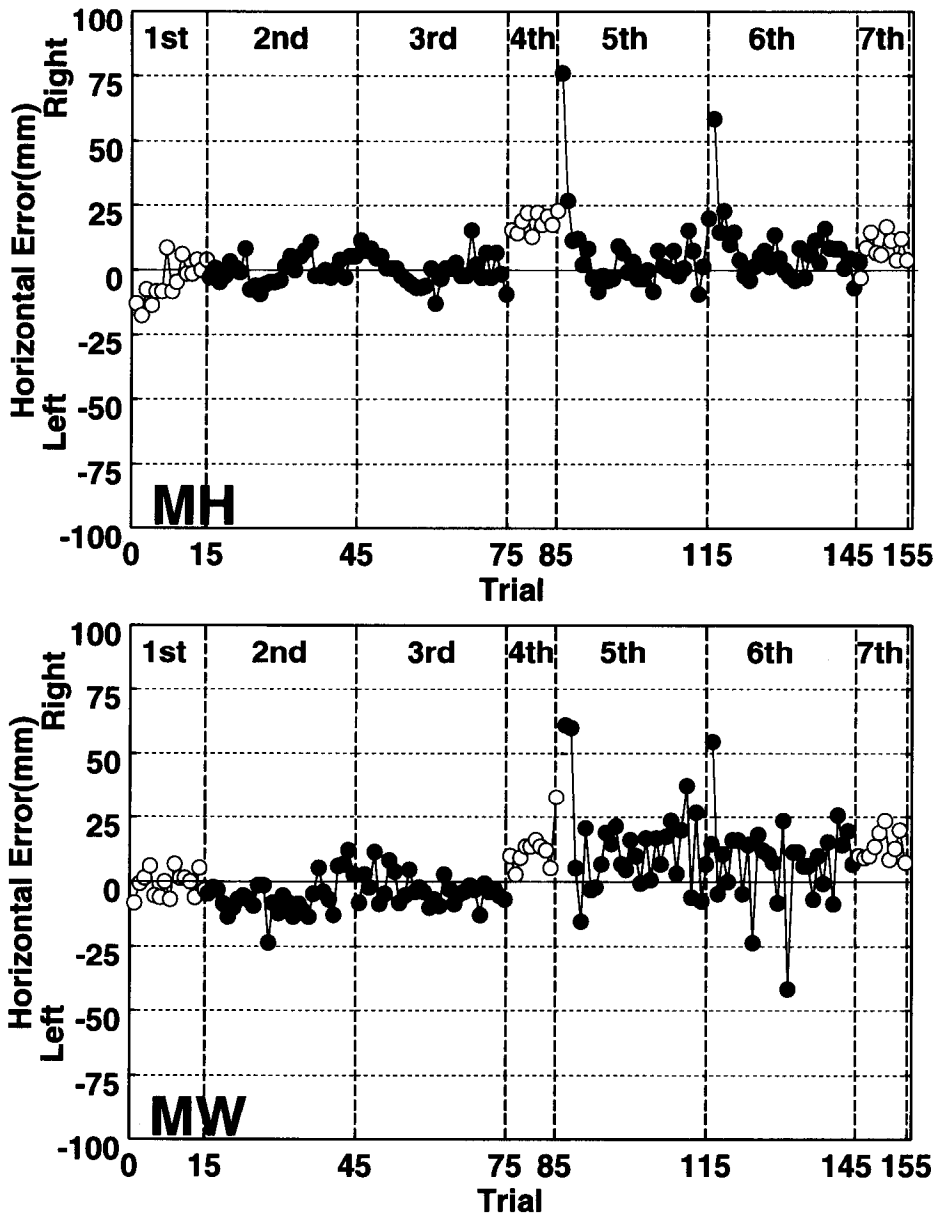


図 3.12: 実験 2 の適応過程 2

3.2.5 考察

実験中、視覚入力と運動指令の対応関係はどのように変化したのであろうか。

ブロック3が終了した時点で、視覚入力と運動指令の対応関係は、“視覚目標が現われたら目標の右20mmの位置に指先を動かす”という状態に適応している。被験者は、この適応を無意識に行なっている。

次にブロック5, 6で、視覚入力と運動指令の対応関係は、ブロック2, 3により、指先の位置感覚は右に20mm程度ずれているので、“視覚目標が現われたら目標の右74mmの位置に指先を動かす”という状態を新たに学習する。被験者はこの適応を意識的に行なっている。

そして、変換を元に戻したブロック7では、ブロック4と同じ状態になった。

この実験からは、無意識に適応した後に、続けて意識的に適応しても、無意識に適応した対応関係には影響がないという結果になった。これは、意識的な適応と無意識な適応は、別々のメカニズムで行なわれているといえる。

Thach(1996)らの行なった、被験者が変換に気がついている状態でのプリズム適応の実験がある。プリズムを装着した状態で、2m離れた目標に向かってボールを投げる。最初は、プリズムによって偏位された量だけ目標からずれるが、数十試行で、正しく目標に投球できるようになる。そして、負の残効も生じる。この試行を6週間繰り返すうちに、プリズムを装着しているときも、していないときも、正確に目標に対してボール投げができるようになるというものである。

つまり、2つの切り替え可能な視覚入力と運動指令の対応関係を獲得したのである。

この結果からは、2つの異なった環境で運動を行なっているということを知覚することができれば、新しい視覚入力と運動指令のモジュールを獲得できることを示唆している。

意識的な適応は、新しいモジュールを獲得するため、無意識の適応には影響がないとも考えられる。

無意識な適応は新たなモジュールを獲得できるのであろうか。実験1の結果から、ブロック1の状態というのは、無意識に適応した状態といえる。その後、無意識に新しい対応関係を学習すると、意識的に適応したときのように元の状態には戻せない。よって、無意識な適応は新しいモジュールを獲得することができず、新

しい対応関係は前の対応関係に上書きされていると考えられる。

第 4 章

結論

人間は、脳内にある様々なモデルを変化させることで、外界の環境の変化にも柔軟に適応することができる。そこで、本研究では、視野変換された環境での到達運動を観察することで、適応に使われる情報や変化するパラメータを調べた。

また、被験者に与える視覚情報を制限したり、視野変換方式を工夫することによって、意識的な学習と無意識な学習を分離し、検討した。

本実験では、感覚間不一致を検出させないためのランプ型変換と、従来使用されてきたステップ型変換を用いて適応実験を行ない、負の残効の有無を調べた。

実験 1 から以下のことがわかった。

体性感覚と視覚の対応関係の不一致が検出されると、変換に気がつき、そのずれの量を計算して到達運動を行なうだろう。つまり、検出された体性感覚情報と視覚情報の不一致量をもとに、指先を眼に見える目標と異なる位置に意識的に動かすことによって、視覚で与えられる目標と指先位置を一致させる。そのため、体性感覚と視覚の対応関係は変化させず、視覚入力と運動指令の対応関係を意識的に変化させることで適応する。また負の残効も生じない。

体性感覚と視覚の対応関係の不一致が検出されないと、変換に気がつかないため、体性感覚と視覚の対応関係が自動的に更新される。また、それと同時に視覚入力と運動指令の対応関係も意識することなく自動的に変化する。負の残効も生じる。

体性感覚と視覚の対応関係の不一致が検出される場合には、もう一つ別の結果がでた。変換に気がつき、そのずれの量を計算して到達運動を行なうが、負の残効があり、体性感覚と視覚の対応関係が変化する場合があった。従来行なわれてきた

プリズム適応の結果は、この結果と同じで、被験者が視野変換に気づいた状態でプリズム適応実験を行ない、負の残効が生じるというものである [2][6].

今回の実験では、この変換に気がついて負の残効がある場合と、変換に気がつかず負の残効ある場合とは同じものかどうかはわからない。

実験2の結果から、変換に気づく場合の適応と気がつかない場合の適応とでは、別々のメカニズムであることがわかった。

今回の実験で、適応には、無意識的行なわれるものと意識的に行なうものがあり、これらは別々のメカニズムであることを示唆する結果となった。

今後の課題として、実験手法や手続きを洗練し、無意識な適応のなかでも具体的に脳は何を誤差信号としているのかを特定していく。また、性質の異なる2つの適応を、説明できるモデルを構築することで、より本質的な人間の学習メカニズムの解明につながると思われる。

参考文献

- [1] Martin, T.A., Keating, J.G., Goodkin, H.P., Bastian, A.J. and Thach, W.T. "Throwing while looking through prisms I. Focal olivocerebellar lesions impair adaptation", *Brain*, **119**, 1183–1198, 1996.
- [2] Martin, T.A., Keating, J.G., Goodkin, H.P., Bastian, A.J. and Thach, W.T. "Throwing while looking through prisms II. Specificity and storage of multiple gaze-throw calibrations", *Brain*, **119**, 1199–1211, 1996.
- [3] Shigeru Kitazawa, Tatsuya Kimura, and Takanori Uka "Prism Adaptation of Reaching Movements: Specificity for the Velocity of Reaching", *The Journal of Neuroscience*, **17(4)**, 1481–1492, 1997.
- [4] Redding, G.M. and Wallace, B. "Adaptive spatial Alignment and Strategic Perceptual-Motor Control", *J. Exp. Psychol.: Human Perception and Performance*, **22**, 379–394, 1996.
- [5] Imamizu, H. and Shimojo, S. "The Locus of Visual-Motor Learning at the Task or Manipulator Level: Implications From Intermanual Transfer", *J. Exp. Psychol.: Human Perception and Performance*, **21**, 719–733, 1995.
- [6] Welch, R.B., "Adaptation of space perception", *Handbook of perception and human performance*, Vol.1: *Sensory processes and perception* (pp.24.1–24.45). New York: Wiley.
- [7] Iriki, A., Tanaka, M., Iwamura, Y. "Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurones.", *Neuroreport*, **7(14)**, 2325–2330, 1996.

- [8] 今水寛：“運動制御と視覚・自己受容感覚”，認知心理学1 知覚と運動，第9章，217-247，東京大学出版会，1995.
- [9] 川人光男，丹治順，藤田昌彦 他：“認知科学4 運動”，岩波書店，1994.
- [10] 丹治順：“脳と運動－アクションを実行させる脳”，共立出版，1999.
- [11] 川人光男：“脳の計算理論”，産業図書，1996.
- [12] 大山正，今井省吾，和氣典二 編：“感覚・知覚 心理学ハンドブック”，誠信書房，1994.

謝辞

本研究を進めるに当たり、いろいろと御指導をいただいた阪口豊 助教授、そして数々の助言をしていただいた出澤正徳 教授に深く感謝いたします。また、被験者として協力していただいた多くの方々には心から感謝いたします。そして、私と私の研究を支えてくれたヒューマンインターフェイス学講座のみなさまに深く感謝いたします。

付録 A

実験装置

A.1 カタログスペック

A.1.1 ガルバノメータスキャナ

仕様

MODEL	G 100シリーズ		G 300シリーズ	
	G 120DT	G 138DT	G 325DT	G 350DT
最大振り角(光学角度) degrees Opt	+/- 20	+/- 38	+/- 25	+/- 50
ロータイナーシャ gm-cm ²	0.028	0.033	4.3	6.5
ウォブル(Typical値) μ radian	50	50	25	25
ジッタ (Typical値) μ radian	100	100	50	50
コイル抵抗 Ω	2	2	2	2
コイルインダクタンス mH	1	4.7	6	6
最大トルク Nm	0.025	0.025	0.2	0.2
リニアリティ	±0.3%			
オフセットドリフト	±30 μ radian/°C			
ゲインドリフト	±0.015 %/°C			
使用環境温度	16°C ~ 40°C			
保存環境温度	-10°C ~ 70°C			

A.1.2 ポジションセンサー

一般仕様

検出器	半導体位置検出素子 (S1880)
使用受光面寸法	10mm×10mm
レンズマウント	Cマウント
動作周囲温度	0℃～+40℃
保存周囲温度	-10℃～+50℃
動作, 保存周囲湿度	90%以下 (結露しないこと)
入力電源	100V/120V/220V/240V
外形寸法及び重量センサヘッド	40 (W) × 42 (H) × 64 (D) mm 約140g
コントローラ	232 (W) × 74 (H) × 308 (D) mm 約3.4kg

電気的仕様

出力電圧: X軸	-5V～+5V
Y軸	-5V～+5V
出力インピーダンス	500Ω±50Ω
外部クロック信号	TTLレベル
サンプリング周波数	内部モード: 300Hz (標準)
推奨測定光量	光量レベル (Σ) = 4～8
位置検出誤差: ZONE A	±1% (出力電圧±100mV)
ZONE B	±2% (出力電圧±200mV)
光量変化による誤差	±1% (Σ 8→4)
分解能 (レコーダ使用時: P22参照)	1/5000
ジッタ	±1/1000 (出力電圧±10mV)
ドリフト	±0.5%/DAY (ただし初期30分の変動を除く)

測定可能距離 ※1)

Focal length (f) (mm)	F number	Light volume level	Effective measurement distance (m)
25	1.8	8	1.5
		4	2.2
25	0.85	8	2.5
		4	3.8

※1) LEDターゲット (M1375-16) を使用した時に受光光量が4から8の範囲を表示する測定距離を示しています。(レンズの絞りは開放状態)