

TR - H - 129

視覚運動学習を可能にする中枢神経機構  
人間の到達運動から推定する座表系とその表現

今水 寛

*Hiroshi Imamizu*

1995. 2. 13

ATR人間情報通信研究所

〒619-02 京都府相楽郡精華町光台2-2 ☎ 0774-95-1011

ATR Human Information Processing Research Laboratories

2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02 Japan

Telephone: +81-774-95-1011

Facsimile: +81-774-95-1008

© (株)ATR人間情報通信研究所

# 視覚運動学習を可能にする中枢神経機構

— 人間の到達運動から推定する座標系とその表現 —

今水 寛



## 目次

第1章 序論

	頁
1. 1 感覚運動学習における変換実験 .....	1
1. 1. 1 視覚環境を変換する方法 .....	2
1. 1. 2 機械環境を変換する方法 .....	7
1. 1. 3 変換実験の意味するところ .....	9
1. 2 生体の運動制御・学習に関する計算論的アプローチ .....	11
1. 2. 1 到達運動の計算モデル .....	11
1. 2. 2 運動学習と内部モデル .....	13
1. 3 本論文の目的と構成 .....	16

第2章 外部座標の線形変換に対応する内部モデル

2. 1 論理	
2. 1. 1 運動プログラミングにおける外部座標と身体座標 .....	21
2. 1. 2 両手間転移効果と学習のレベル .....	22
2. 1. 3 両手間転移効果の研究史 .....	24
2. 1. 4 実験の概要 .....	27
2. 1. 5 一般的な方法 .....	29
2. 2 行動実験1：回転変換を用いた視覚運動変換課題の性質	
2. 2. 1 目的 .....	32
2. 2. 2 方法 .....	32
2. 2. 3 結果と考察 .....	33
2. 3 行動実験2：回転変換を用いた視覚運動学習	
2. 3. 1 目的 .....	37
2. 3. 2 方法 .....	37

2. 3. 3	結果	38
2. 3. 4	考察	41
2. 4	行動実験 3 : 回轉變換における両手間転移効果	
2. 4. 1	目的	45
2. 4. 2	方法	45
2. 4. 3	結果	48
2. 4. 4	考察	51
2. 5	考察	
2. 5. 1	結果のまとめ	52
2. 5. 2	外部座標レベル以外での学習の可能性の検討	52
2. 5. 3	計算論, 生理学, 行動実験に共通の枠組み	56
2. 5. 4	結論	57
補遺 2. 1	: 実験 3 における軌道形状の量的解析	59
<u>第 3 章 身体座標の線形変換に対応する内部モデル</u>		
3. 1	論理	
3. 1. 1	視覚環境の変換による関節角変換	63
3. 1. 2	目的	67
3. 1. 3	身体座標の変換として学習されているかどうかを検討する論理	67
3. 2	方法	72
3. 3	結果	80
3. 4	考察	86
補遺 3. 1	実際に使っている腕とは反対側の腕の関節角変換	87
補遺 3. 2	始めの弾動運動の終了地点を見つける方法	89

## 第4章 視覚運動学習を可能にする内部モデルの表現方法

4. 1	論理	
4. 1. 1	内部モデルを構成する方法	93
4. 1. 2	汎化と内部表現	98
4. 1. 3	一般的な方法	99
4. 2	行動実験1：修正運動と弾道運動における学習の汎化	
4. 2. 1	目的	103
4. 2. 2	方法	103
4. 2. 3	結果と考察	108
4. 3	行動実験2：弾道運動における学習の汎化	
4. 3. 1	目的	117
4. 3. 2	方法	117
4. 3. 3	結果と考察	119
4. 4	考察	
4. 4. 1	結果のまとめ	127
4. 4. 2	単純でないtabular およびstructured representationの汎化特性	128
4. 4. 3	単純でないtabular representationの検討	130
4. 4. 4	単純でないstructured representationの検討	133
4. 4. 5	connectionist representationにおける学習の汎化	137
4. 4. 6	実験1と2における汎化の違いについて	138
4. 4. 7	行動実験から導かれる結論	141
4. 5	行動実験に基づく計算機シミュレーション	
4. 5. 1	目的	142
4. 5. 2	方法	142
4. 5. 3	結果と考察	146
補遺4. 1	最急降下法を用いたパラメータ推定	150
補遺4. 2	赤池の情報量規準	151

## 第5章 全体考察

5. 1 知見のまとめ .....	155
5. 2 視覚運動学習を可能にする内部モデルの意味	
5. 2. 1 学習レベルの多様性 .....	157
5. 2. 2 脳における変換のメカニズム .....	158
5. 2. 3 到達運動以外の視覚運動学習について .....	159
<u>引用文献</u> .....	163
<u>後記</u> .....	171

## 第1章 序論

### 1. 1 感覚運動学習における変換実験

私たちは、刻々と変化する外部環境の情報を取り込み、適切な情報処理と判断をし、今度は逆に外部環境に対して働きかけている。多くの場合、それは一瞬の出来事であり、無意識のうちに手足は動いている。脳は外部環境に対して働きかける精巧な出力装置(手足)を備え、それを素早く自在に操ることができる。中枢神経系がどのような仕組みで、視覚、聴覚、触覚などから得られた感覚情報を基にして運動司令を生成しているかということは、心理学のみならず、神経生理学や生体工学の分野でも多くの研究者の関心を集めている。

神経生理学では感覚情報の入力から運動の企画、その構成や組み立て、遂行のための出力にいたるまでの諸段階において、脳のどの部位がどのように関わっているかを理解しようとしている。脳のどの部位を破壊したときに運動がどのように変化するか、どの部位を電気刺激したときにどのような運動が発現されるか、どのような運動を行っているときにどの部位の神経細胞が活動しているかが調べられている。生体工学では、ロボットを制御する際に解かなければならない問題を念頭に置き、人間の行動実験や生理学で得られたデータをもとに、数理モデルを立てている。

実験心理学においては、人間の行動を詳細に調べ、複雑で多様な運動にも法則があることを見い出そうとしている。例えば、運動速度と運動の精度に関するフィッツの法則は(Fitts, 1954)は、このようなアプローチの代表的な例である。一方で、プリズムや鏡



など光学的な方法で視覚環境を変換することにより、生体がこれまでに学習してきた視覚と運動の対応関係を一度崩壊させ、新たな環境に対する適応過程を調べる方法もある。このように感覚と運動の間の対応関係を学ぶことを「感覚運動学習」という。感覚運動学習の研究においてどのようなことが行われてきたか、その概要と意義を述べ、次に本論文で扱う問題の所在を明らかにする。

### 1. 1. 1 視覚環境を変換する方法

偏位プリズムを用いて視野を一定方向にずらすところみは、すでにHelmholtz (1866) や Wundt(1898) によって行われていた。眼前に偏位プリズムを置き、目標物に素早く手を伸ばすと、プリズムによって目標物の視覚像が平行移動させられた分だけ、ずれて手を

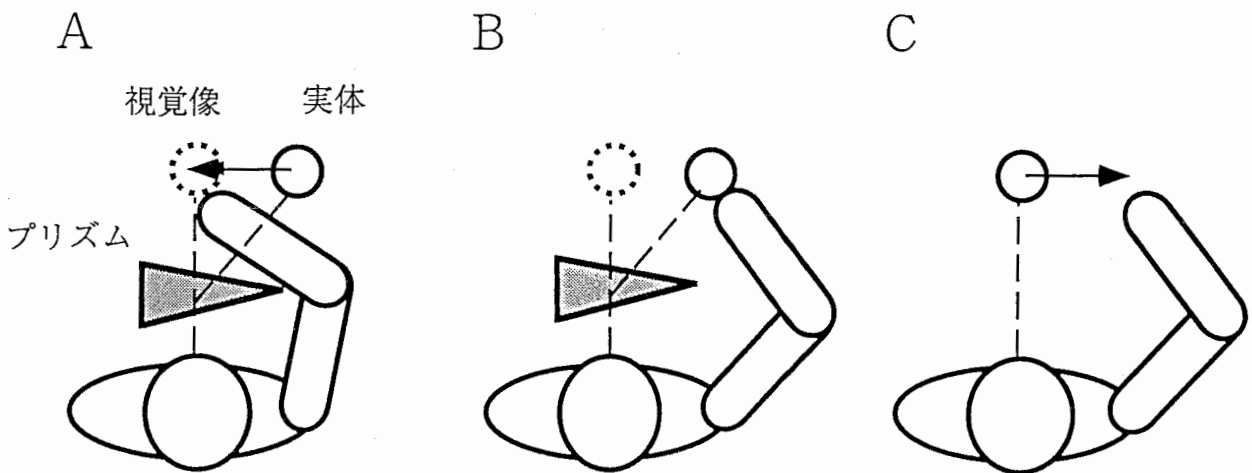


図 1. 1 偏向プリズムによる視野の平行移動。被験者とその眼前に置かれたプリズムを上から見た図。被験者に、偏向プリズムを通して見た視覚像に対して、比較的速い到達運動を行うように教示する。Aは順応前（プリズムを着けた直後）に到達運動を行った様子。プリズムによって目標物の視覚像が平行移動させられた分だけ、ずれて手を伸ばす。Bは順応後（プリズムを着けた状態で繰り返し到達運動の練習をした後）に到達運動を行った様子。プリズムを通して見た目標物に対しても正確な到達運動ができるようになる。Cは、順応後、プリズムを除去した直後に到達運動を行った様子。順応前と反対方向へずれて手を伸ばす。この現象をプリズム残効と言う。

伸ばす（図1. 1 A）. しかし、何回か到達運動の訓練を繰り返すうちに、プリズムを通して見た目標物に対しても正確な到達運動ができるようになる（順応：図1. 1 B）. さらに、プリズムを除去した後では反対方向へずれて手を伸ばす（残効：図1. 1 C）ことを発見している.

Stratton (1896, 1897) は、網膜像が外界の事物に対して逆転した像となっているにもかかわらず、なぜ外界の知覚は正立しているかという知覚心理学における古典的な疑問に基づいて、上下逆転と左右反転を同時に生じさせる眼鏡を作った. この眼鏡をつけたまま数日間過し、順応過程を詳細に記録した. それによると、視覚に基づく運動は、次第に適応的になり、新たな視覚環境における動作反応が獲得されることがわかった.

Strach (1910)やSiipola (1935)は、鏡映描写（Mirror Drawing）と呼ばれる方法で視覚環境を変換した条件下での運動学習を調べた. 自分の手先は直接見えないようにしたうえで、正面に垂直に立てた鏡に手先の像が映るようにする（図1. 2 A）. この場合、例え

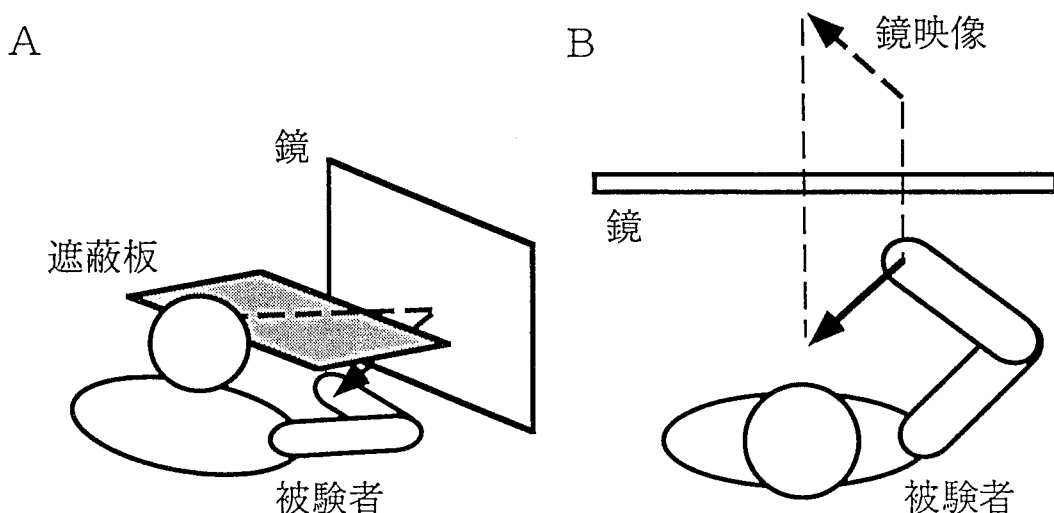


図1. 2 鏡映描写の仕組み. A：実験装置と被験者の配置を示す図. 被験者の斜め後ろから見た様子. 自分の手先は直接見えないようにしたうえで、正面に垂直に立てた鏡に手先の像が映るようにする. 被験者は鏡に映った手先の像を見ながら、迷路を辿るなどの課題を行う. B：鏡による対称変換. 被験者とその眼前にある鏡を上から見た図. 例えば、手先を体に引き寄せる方向に動かすと、鏡の像は遠ざかる方向に動くように見える.

ば手先を体に引き寄せる方向に動かすと、鏡の像は遠ざかる方向に動くように見える（図 1. 2 B）。この状態で、一定の幅の曲がりくねった路を書いた紙を手元の机の上に置き、鉛筆を持って路を辿ることを訓練する。始めは路から何回も逸脱するが、訓練が進むにしたがって、逸脱することなく短い時間でゴールまで移動できるようになる。

近年になって、コンピュータが一般的に用いられるようになると、従来プリズムや鏡などの光学的な手段で行われていた視覚像の変換も、コンピュータを用いて行われるようになった。マウスやデジタイザ<sup>1</sup>などで手先の位置を2次元平面上で計測し、計測した座標値を実時間で変換して、CRT画面上のカーソルの位置を変更する方法が一般的である。この方法の利点は、光学的に変換する方法とは異なり、対称変換や平行移動だけでなくさまざまな種類の変換が容易にできることである。Cunningham (1989)は、デジタイザとCRT画面を用いて、手先の位置を回轉變換して表示する装置を使った（図 1. 3 A）。デジタイザの中心を回轉變換の中心点として、指先の座標を一定の角度で回転してCRT画面上のカーソルとして表示する。0°変換の場合、指先の運動方向と画面上のカーソルの運動方向は一致する<sup>2</sup>が、他の回轉變換では一致しない。例えば、時計と逆周りに90°変換の場合、指先をデジタイザの中心から右上の方向に動かすと、カーソルは左上の方向に動く（図 1. 3 C）。Cunninghamは、さまざまな回轉變換角において、被験者にカーソルをターゲットまで移動させ、変換角と到達運動の難しさの関係について調べた。それによ

<sup>1</sup> ガラス面に静電膜を張ったり、圧力に反応する素子を一面に配列することにより、指先が触れた位置を検出する装置。銀行の現金自動預入払出機の操作パネルなどによく使われている。

<sup>2</sup> Cunninghamの実験ではデジタイザは被験者の前に水平に置かれ、CRT画面は垂直に置かれていた。従って、0°変換であっても、指先の運動ベクトルとカーソルの運動ベクトルとは厳密には一致しない。両者を一致させるには、3次元空間内で平行移動し回轉變換する必要がある。しかし、このような状況はコンピュータのマウスを使うときなど、日常生活でごく一般的にあることなので、すでに十分学習していると考えられる。

ると、被験者に予め変換の回転角を知らせた状況でも、 $90^\circ$  から $120^\circ$  までの回転変換が最も難しく、 $0^\circ$  と $180^\circ$  は同じくらい易しいという結果が得られた。ただし、この実験では繰り返し訓練を行うことにより、学習がおきるかどうかということは明確にされていない。

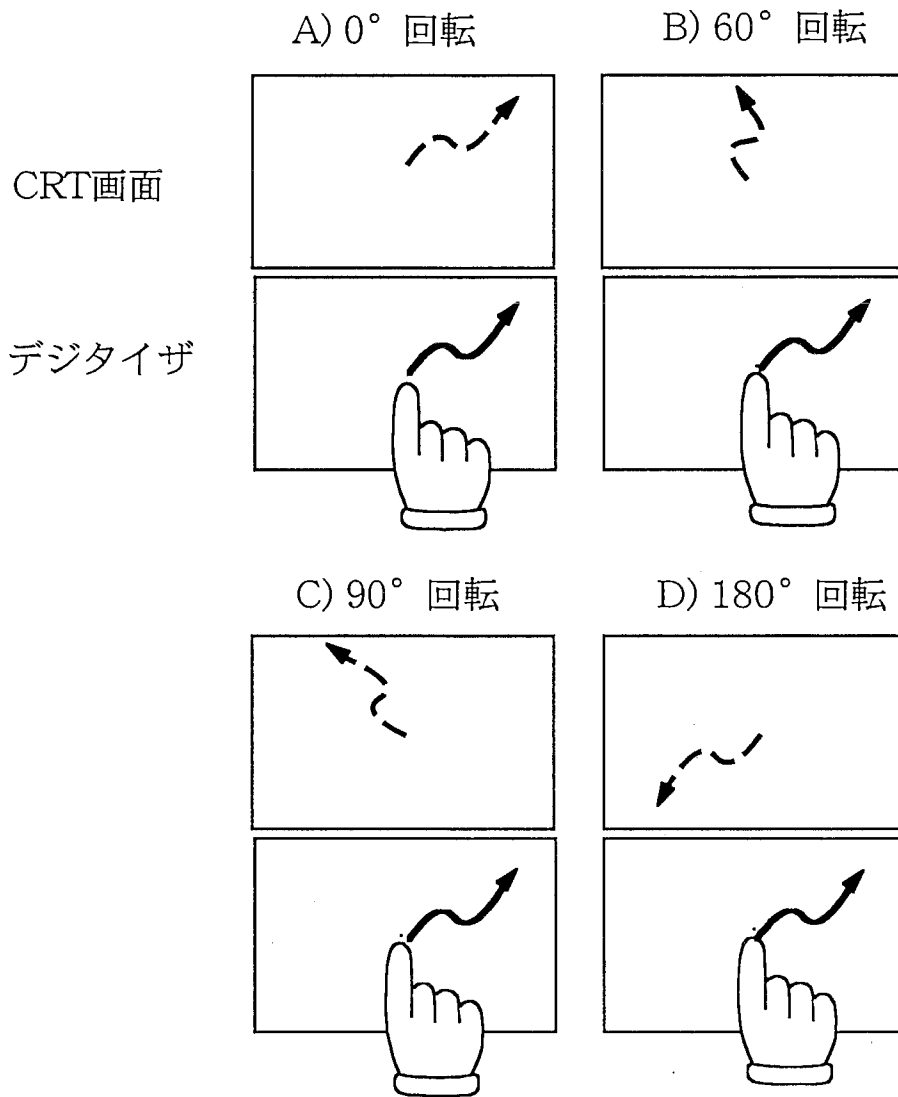


図1. 3 Cunningham (1989)が用いた回転変換の例。

被験者の前にデジタイザとCRT画面が置かれ、被験者はデジタイザの上に指をのせる。指を動かすと画面のカーソルが連動して動くが、デジタイザと画面の間には、上の図のようなさまざまな回転変換の関係がある。被験者は直接自分の指を見ることはできない。矢印のついた実線は指先の軌跡、矢印のついた破線は、それに対応する画面上のカーソルの軌跡を示す。

Wolpert, Ghahramani & Jordan (1993) は、非線形変換を用いても、順応がおきることを示した。彼等の本来の目的は、到達運動における手先の軌道が、視覚の作業座標で計画されるか、関節の角度や筋の張力といった身体座標で計画されるかを調べることであった。デジタイザによって取り込まれた手先の現在位置を、

$$\delta P = A \sin(\pi D / L)$$

で表わされるような非線形関数を用いて変換し、プロジェクタ画像上のカーソルとして表

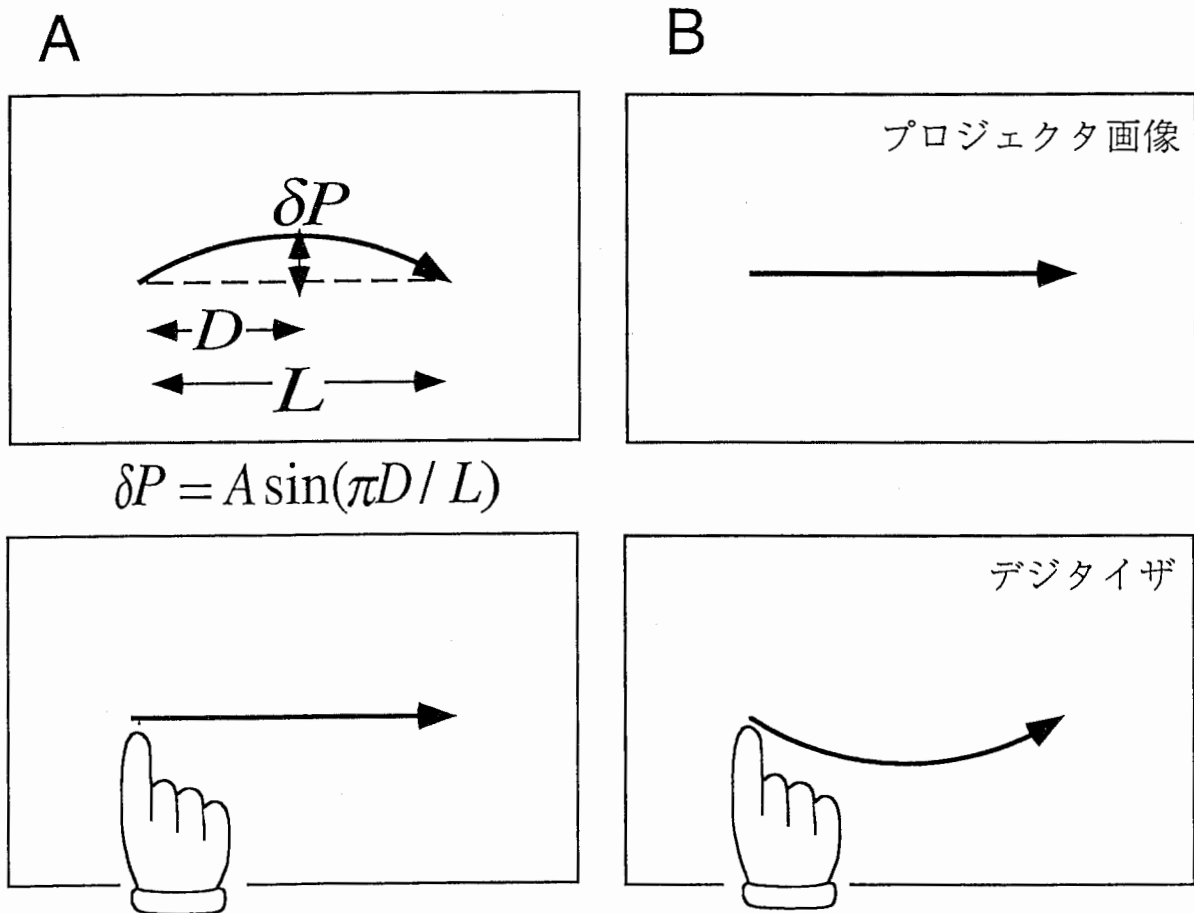


図1. 4 Wolpert, Ghahramani & Jordan (1993)が用いた非線形変換。

図1. 3に示したCunningham(1989)の実験と同様、被験者は自分の手先が直接見えない状態で、デジタイザ上で指先を動かし、画面上のカーソルを移動させる。画面とデジタイザの間には上の式で表わしたような変換がある。そのため、手先の軌道が直線であっても、カーソルの軌道は曲がる(A)。カーソルの軌道を直線にするためには、手先の軌道を変換とは逆方向に曲げなければならない(B)。 $\delta P$ は出発点とターゲットを結ぶ直線とカーソルの間の距離(変換によるずれの量)、 $A$ は定数、 $L$ は出発点とターゲットの間の距離、 $D$ は手先の現在位置と出発点の間の距離である。

示した (図 1. 4) .  $\delta P$  は出発点とターゲットを結ぶ直線とカーソルの間の距離,  $A$  は定数,  $D$  は手先の現在位置と出発点の間の距離,  $L$  は出発点とターゲットの間の距離である. このような変換のもとでは, 手先の軌道が直線であっても, カーソルの軌道は曲がる (図 1. 4 A) , カーソルの軌道を直線にするためには, 手先の軌道を変換とは逆方向に曲げなければならない (図 1. 4 B) . 彼等は, 実験開始時には  $A$  の値を 0 にしておき, 被験者に繰り返し到達運動をさせながら, 徐々に  $A$  の値を増加させた. もし, 軌道が身体座標で計画されているならば, 手先の軌道は変換によって変わらないが, 視覚の作業座標で計画されているならば, プロジェクタ画像のカーソルの軌道を直線にするために, 手先の軌道は曲線になるはずである (図 1. 4 B) . 結果は, 後者の方であり, 手先の軌道は視覚の作業座標で計画されると結論した.

### 1. 1. 2 機械環境を変換する方法

生体が運動を制御する場面において, 視覚と同じくらいに重要となるのが自己受容感覚である. 例えば, 目を閉じたまま腕を動かしても, 手先の現在位置はおおよそ見当がつく. これは, 筋肉中にある筋紡錘や筋の両端に付いているゴルジの腱器官によって, 筋の収縮状態に関する情報が得られるからである. 視覚環境は変わらずに機械環境が変わる場合, 例えば, 見かけは同じでも重さが異なる物体を操作するとき, あるいは水のなかで手を動かすときには, この自己受容感覚と運動司令の間の対応関係を学ぶことが必要になる. これもまた, 感覚運動学習である.

Lackner & Dizio (1992) は, 被験者を大きな回転盤の上に乗せ, 高速度で回転させるこ

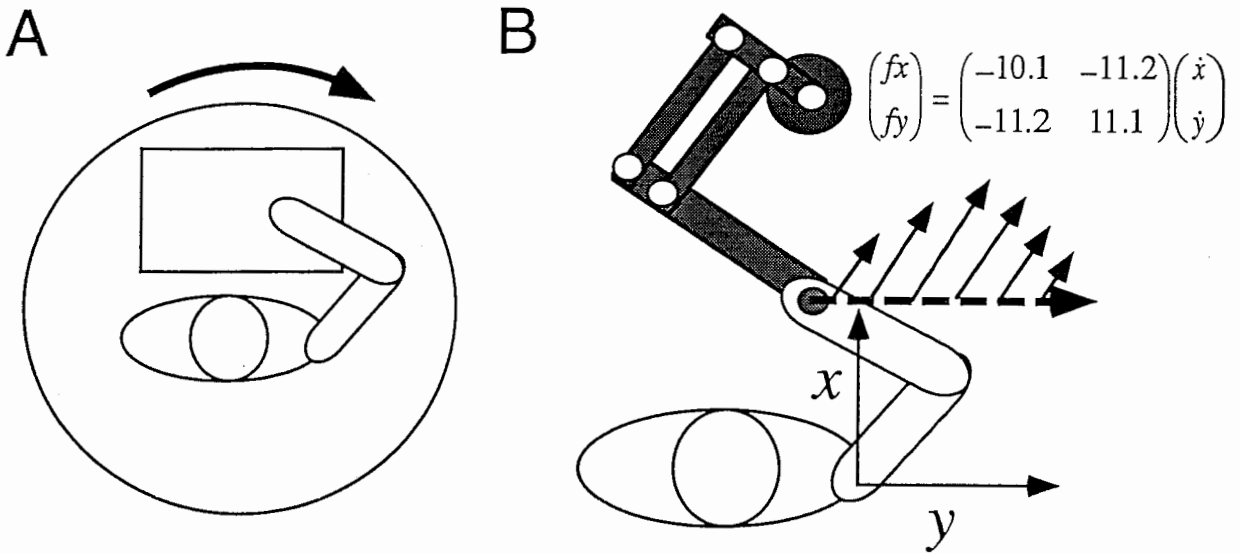


図1. 5 機械的環境の変換実験の例.

A) 被験者を大きな回転盤の上に乘せ、高速度で回転させることにより腕にかかるコリオリ力を増加させた。被験者と回転盤を上から見た図(Lackner & Dizio, 1992).

B) マニピュランダムとよばれる装置を用いて、被験者の手先にかかる力をモーターによって制御し、「力場(force\_field)」を作り出した。例えば、破線の方に被験者が手先を動かすと、マニピュランダムは矢印のような方向に、手先の速度に比例した力を発生させる。 $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  は、それぞれ  $x$ ,  $y$  方向の速度,  $f_x$ ,  $f_y$  はマニピュランダムが発生する  $x$ ,  $y$  方向の力を示す (Shadmehar & Mussa-Ivaldi, 1994)

とにより腕にかかるコリオリ力を増加させて (図1. 5 A) 順応過程を調べた。また、Shadmehar & Mussa-Ivaldi (1994) は、マニピュランダムとよばれる装置を用いて、被験者の手先にかかる力をモーターによって制御した。彼等が用いたマニピュランダムは図1. 5 Bに示すような2関節のロボットアームで、各関節に付属するサーボモータは、コンピュータで制御されている。被験者はマニピュランダムの先端を持って到達運動を行うが、このとき、手先の速度に応じて、マニピュランダムは

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -10.1 & -11.2 \\ -11.2 & 11.1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix}$$

で表わされるような力を発生する。 $f_x$ と $f_y$ は、マニピュランダムが発生する $x$ 方向、 $y$ 方向の力、 $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$ は手先の速度を表わしている。例えば、被験者が図1. 5 Bの破線で示さ

れるような軌道で、ごく自然に手先を動かした場合<sup>3</sup>、実線の矢印で示されるような力が働く。始めのうちはマニピュランダムが発生する力に流され、曲がりくねった軌道で到達運動を行うが、およそ1000回の練習試行を経た後では、軌道はターゲットに向かってほぼ直線となり、マニピュランダムが力を発生しないときと同じになる。

### 1. 1. 3 変換実験の意味するところ

Stratton (1896, 1897)は逆転眼鏡を用いて、新たな視覚環境に対する順応過程を調べ (p.3) , 人間の誕生後の感覚運動発達過程を調べようとした。その後、種々の実験条件下における逆転眼鏡 (例えば, Kohler, 1964) や偏位プリズム (例えば, Hein & Held, 1962) の順応・学習過程が調べられた。しかし、成人を被験者として用いる場合、1) これらの変換条件を経験する前に、すでに多くの感覚運動課題を学習していること、2) 高度に認知的なストラテジー (例えば対称変換の場合、まず対称軸を探し、それをイメージしながら運動方向を決めるなど) を取り得ることなどを考えると、必ずしも発達過程における感覚運動学習と同一視することはできない。

しかし、これまでに見てきた順応・学習がすべて、変換に関する知識や高度に認知的なストラテジーの習得によるものであると考えることはできない。その理由は第一に、変換に関する知識が予め与えられていても、感覚運動課題を遂行できるようになるでわけはなく、そのような知識があってもなお遂行成績は徐々に向上し続けることである。第二に、海馬とその周辺に損傷があり、認知的、言語的な記憶に障害がある患者でも鏡映描写など

<sup>3</sup>ここで言う「ごく自然に手先を動かす」とは、躍度最小基準 (Flash & Hogan, 1985) に従って、速度波形がベル型になるように動かすことを言う。



の感覚運動学習は可能で、しかもその学習は比較的長期に渡って残ることが、Milnerら(1968)によって明らかにされている。従って、意識的な知識やストラテジーは、順応・学習の初期にはある程度課題の遂行成績に影響を与える可能性はあるものの、実際に運動を行い、試行錯誤の経験を積まない限り、変換条件下における感覚運動学習は成立しない。

以上のことから、変換条件下における順応・学習過程は、個体発生における感覚運動学習とは必ずしも一致しないが、人間が基本的な運動感覚や知識を得た後に、スポーツや楽器演奏において繰り返し練習することによって獲得する感覚運動学習の過程を反映していると考えられる。しかも、複雑な技能を要求されるスポーツとは異なり、到達運動という最も基本的で目的のはっきりしている動作において、感覚運動学習を調べることができる。

1960年代ごろからは、Heldらによって感覚運動学習が成立するための要因分析がいくつか行われてきた。例えばHeld & Gottlieb (1958)は、プリズム順応(図1.1, p.2)が成立するためには、自発的な運動が重要であると指摘している。順応期間中に、被験者が自発的に到達運動を行う場合(自発的運動)と、被験者の腕を板に固定し、実験者がこの板を動かすことによって同じ到達運動を強制する場合(受動的運動)を比較すると、前者の運動ではプリズムを除去した後で、残効が見られるのに対して、後者の運動では残効が見られなかった。また、Heldら(1966)は、感覚入力と運動司令の間の時間的随伴性が重要であると指摘している。彼等はテレビモニタとVTRを用いて、到達運動の視覚フィードバックに時間遅れが生じるような装置を作り、時間遅れ0msから570msまでのさまざまな条件下でプリズム順応実験を行った。その結果、時間遅れが0~150msまでは順応が起きるが、それ以上の時間遅れでは順応が起きなかったと報告している。

これまでの心理学における研究史のなかで、以上のように変換に対する順応・学習が成

立するための要因は分析されてきたが、それに対応する中枢神経系の学習機構がどのようなものであるか——計算論的な枠組みにおいてどのレベルに存在し、どのような方法で表現されているか——という問題に直接答えようとする研究はなかった。本論文では、この問題を明らかにすることを目的とする。

## 1. 2 生体の運動制御・学習に関する計算論的アプローチ

Marr (1982)は、脳研究には3つのレベル——情報処理の計算理論の研究、計算理論を実現するためのアルゴリズムの研究、アルゴリズムを実現するためのハードウェアの研究——が可能であると述べた。計算理論の研究では、生体が行う運動制御とその学習メカニズムを、以下に述べるような枠組みで捉えている。

### 1. 2. 1 到達運動制御の計算モデル

計算論的に言えば、目の前にある目標物に手を伸ばすとき、中枢神経系が解かなければならない問題は3つある。第一に、目標の位置は視覚を通して与えられるので、視覚の作業座標において手先の現在位置から目標物までの軌道を決定しなければならない。第二に、このようにして決定された軌道を実現するためには、どの関節をどれくらい曲げたら良いかということを計算しなければならない。すなわち、視覚の作業座標で表現された軌道を、筋の長さや関節の角度といった身体に結び付いたキネマティックな座標系に変換しなくて

はならない（逆キネマティクス<sup>4</sup>）。第三に、そのようなキネマティックな座標系で表現された軌道を実現するためには、どの関節でどれくらいの力を発生させればよいかということ計算しなければならない。つまり、最終的には軌道を関節のトルクなど身体に結び付いたダイナミックな座標系で表現する必要がある（逆ダイナミクス）。以上のように、実際に手を動かすためには、「軌道計画」「逆キネマティクス」「逆ダイナミクス」という3つの問題が解かれる必要がある(Saltzman, 1979, 1987; Hollerbach, 1982; Kawato, Furukawa and Suzuki, 1987)，また、このようにして計算した運動司令が正しいかどうかを実際に運動を行う前に確かめるためには、上記と逆方向の変換（「順キネマティクス」，「順ダイナミクス」）を行う必要がある（Kawato, 1994）。

このように、生体が運動の制御を行う場面において最も重要なことのひとつは、視覚の座標系と身体の制御に直接結び付くような座標系との間で座標変換を行うことであると考えられる。生体工学の分野では、筋の長さや関節の角度、関節トルクなど、身体の制御に結び付く座標系のことを身体座標と言い、外界（環境）に結び付いた座標のことを外部座標と呼んでいる。通常、人間が環境の中を自由に移動できる場合、観察者中心の座標系である視覚の座標と、外界に結び付いた外部座標とは同一視できないが、本論文では、頭部や肩関節の中心が外界に固定された状態での到達運動を問題としているので、当面両者を同じものとして考える。また、身体座標が関節の角度や筋の長さといった複数の座標系で表現が可能であるのと同様に、外部座標も、デカルト座標や極座標など複数の座標系で表

---

<sup>4</sup> ロボティクスでは、モーターによって駆動される関節リンク機構（ロボットアーム）の空間的な関係を記述する問題をキネマティクス（運動学），リンク機構の力学的関係を記述する問題をダイナミクス（動力学）と言う。また、リンク機構の関節角から手先の位置を求める問題を順キネマティクス，手先の位置から関節角を求める問題を逆キネマティクスと呼ぶ。ある関節トルクが与えられたときリンク機構がどのような運動をするかを求める問題を順ダイナミクス，リンク機構にある運動を行わせるための関節トルクを求める問題を逆ダイナミクスと呼ぶ（伊藤ら，1991）。

現することが可能である。本論文の目的は、身体座標や外部座標の具体的な座標系を特定することではないので、身体座標という場合には、肘と肩の関節角で表現された座標系を指し、外部座標という場合には外界に原点を持つような<sup>5</sup>デカルト座標系を指すことにする。

## 1. 2. 2 運動学習と内部モデル

計算理論の面から見ればこのような複雑な問題があるにも拘わらず、我々は日常生活においてごく簡単に、目の前にあるものに手を伸ばすことができる。中枢神経系はなぜそのようなことができるのであろうか？

制御工学の分野では、運動制御を行う際に大きく分けて2つの方法——フィードバック制御とフィードフォワード制御——が用いられる。フィードバック制御は、制御対象に計測装置を付けて常に状態を調べ、誤った方向へ動いたときには運動方向を修正するような運動司令を生成する。一方、フィードフォワード制御は予め決められた運動司令を一回読み出すだけで、フィードバック制御と異なり、運動途中での修正を行わない。もちろん、中枢神経系はどちらの方法でも運動制御を行うことができる。例えば、線画の上にトレーシング紙を置き、鉛筆で正確に線をなぞって行くときは、鉛筆の先が下絵の線からはずれないように、常に目で見えて修正する。一方、野球の投手が球をなげるときなどは、このように

---

<sup>5</sup> 本論文の議論に出てくる外部座標は、その原点が人間の頭部や肩関節の中心にある場合が多い（例えば図1.6や図2.1）。頭部や肩は身体の一部なのでこれを『外界に原点を持つ外部座標』と言うのは一見矛盾しているように見える。しかし、本文中に述べた通り、本論文で扱う運動は、肩から先の上腕と前腕を用いた到達運動であるので、頭や肩は動かない（すなわち外界に固定されている）と考える。頭や肩を外部座標の原点とするのは、外部座標と身体座標の関係を表わす式（後に出てくる式1.2など）をなるべく簡単に表現するためである。

運動途中で修正を繰り返している時間はない。予め習得した一定のフォームに従って可能な限り速く球を投げる。

われわれが普段、何気なく行っている到達運動でも、手先の最高速度は1～2 m/秒ほどになる。しかし、生体における感覚フィードバックが有効に働くには、視覚で200～300 ms<sup>6</sup>、自己受容感覚では100～150 ms<sup>7</sup>ほどの時間遅れが必要であると言われている。このように時間遅れのあるフィードバックだけをたよりしていたのでは、ぎこちない運動になってしまう。そこで、人間はまずフィードフォワード制御で手先を目標物の周辺まで素早く移動させ、次に、視覚をたよりに比較的ゆっくりした速度で正確に目標物に到達するという方法を用いている (Woodworth, 1899など)。従って、速く滑らかな運動を行うためには、フィードフォワード制御を正確に行い、その後続くフィードバック制御をなるべく少なくすることが必要になる。

生体がどのようなメカニズムでフィードフォワード制御を行っているかということに関しては、大きく分けてふたつの見解がある。ひとつは、生体は筋肉がもつばね特性をうまく利用して制御を行うという考え方である。ある関節が一方向に動いているとき、それとともに収縮する筋肉（屈筋）と伸展する筋肉（伸筋）がある。屈筋と伸筋の張力が釣り合った時に、関節は一定の角度で安定な平衡姿勢となる。ある目標位置まで手先を移動させるときに、中枢神経系は目標位置で屈筋と伸筋が釣り合うような張力を発生させることができれば、あとは筋肉がもつ慣性や粘性の作用で、手先は滑らかに目標位置まで動いて行く（終端位置制御仮説）。この理論を発展させた仮想軌道制御仮説 (Bizzi, Accornero,

<sup>6</sup> 明室で手先が見える状態で行う到達運動と、暗室で手先が見えない状態で行う到達運動では、運動時間が200～300 ms以上でないと、正確さに有意な差が見られない (Keel & Posner, 1968)

<sup>7</sup> 到達運動中に、手先の運動を突然機械的に妨害しても、100～150 msは筋電図に変化が見られない (Schmidt, 1988)。

Chapple & Hogan, 1984; Hogan, 1984; Flash, 1987) では、平衡位置が予め計画された軌道上を滑らかに移動して行くため、手先は平衡位置を追いかけるように動いて行くとされている。これらのモデルの魅力的な点は、筋肉のばね特性を積極的に利用することにより、逆ダイナミクスなどの複雑な計算を行う必要がなくなるという点である。しかし、仮想軌道制御仮説に基づいて人間の腕を速くまっすぐに動かすには、姿勢制御中の3～6倍というかなり大きな機械剛性が必要となるが、実際に運動中の機械剛性を計測すると、姿勢制御中よりもむしろ低い値が得られる (Bennet, Hollerbach, Xu & Hunter, 1992; Gomi, Koike & Kawato, 1992)。また逆に、計測された機械剛性の値をもとに、直線軌道を実現するための仮想軌道を計算すると、軌道は非常に複雑な形になり (Katayama & Kawato, 1993)、逆ダイナミクスを解くことと同様に複雑な計算を行う必要がある。

もうひとつの見解は、生体が筋骨格系や外部環境の内部モデルを構成することにより、逆キネマティクスや逆ダイナミクスを解いて、フィードフォワード制御をしているという考え方である (Albus, 1975; Kawato, Furukawa & Suzuki, 1987; Jordan, 1990など)。例えば、中枢神経系には何らかの形で逆キネマティクスや逆ダイナミクスに相当する内部モデルが存在し、それが学習によって精度が高まるものであるならば、速く正確なフィードフォワード制御が可能になる。運動に作用する外部環境は生体が置かれた状況により変化するし、筋骨格系も成長とともに変化する。生体はこのような変化に対応するためにも、学習によって内部モデルの精度を良くする必要がある。

このような内部モデルと同様の考え方は、生体の運動制御に対する計算論的なアプローチやロボティクスにおける適応制御とは独立に、心理学における運動学習理論でも Schmidt (1975)が提案している。Schmidtのスキーマ理論によれば、人間はある運動を

行う前後で4つの情報を得ることができる。ボールを投げるという動作を例として考える。まず動作を行う前に、姿勢の状態やボールの重さ大きさなどの「初期状態 (initial condition)」が得られる。次に動作を行うときに、どのような運動司令 (制御信号) を発したかという「応答の詳細 (response specifications)」と、手足においてどのような感覚が生じたかという「自己受容信号 (proprioceptive signal)」が得られる。そして動作が終わった後、ボールが目標からどれくらいずれていたかという「結果に関する知識 (knowledge of results)」を得ることができる。人間は過去の動作経験で得られた「結果に関する知識」と「自己受容信号」を基に、さまざまな「初期状態」に応じた「応答の詳細」と運動結果の関係 (スキーマ) を学習するという。

### 1. 3 本論文の目的と構成

本論文の目的は、視覚環境を変換した状況において感覚運動学習が成立するとき、それを可能にする中枢神経系の内部表現 (内部モデル) がどのようなものであるか——どのレベルに存在し、どのような方法で表現されているか——を調べることにある。

図1. 6は、本論文で用いた実験課題に即して、視覚運動学習を行うときに必要なキネマティクス変換を表わしている。本論文では、デジタイザまたはCCDカメラを用いた位置計測装置と、パーソナルコンピュータ、CRT画面を用いて実験を行った。図1. 6に示すように、被験者は正面に水平に置かれた板の上で手先を動かす。板はほぼ肩の高さにあり、腕の動きは板の平面内にほぼ拘束されているとする。手先の位置  $P(x, y)$  はデジタイザまたはCCDカメラによって一定の周波数でサンプリングされており、その現在位

置はCRT画面上のカーソル $T(X, Y)$ として表示される。この方法は、先に述べたCunningham (1989)やWolpert, Ghahramani & Jordan (1993)の実験でも用いられ、日常生活ではコンピュータのマウスを操作し、画面上のカーソルを目標位置まで移動させるという状況に近い。

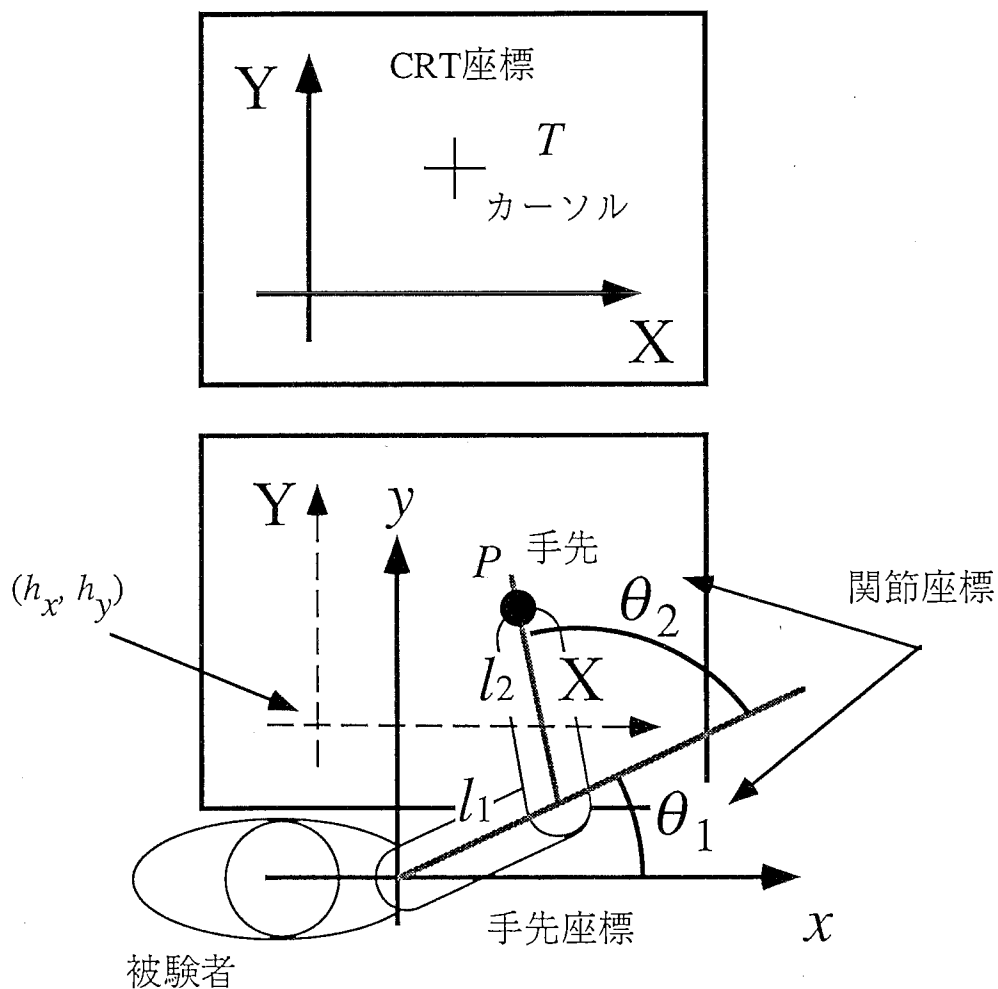


図1.6 本論文で用いた視覚運動学習の実験方法。被験者と実験装置を上から見たところ。被験者は正面に水平に置かれた板の上で手先を動かす。板はほぼ肩の高さにあり、腕の動きは板の平面内にほぼ拘束されていた。手先の位置 $P(x, y)$ はデジタルカメラまたはCCDカメラによって一定の周波数でサンプリングし、その現在位置はCRT画面上のカーソル $T(X, Y)$ として表示される。被験者には自分の手先が見えず、画面上に表示されたターゲットまでカーソルを移動させることが被験者の課題。座標軸は参考のために書き加えたものであり、実際には表示されない。 $l_1$ は被験者の肩から肘までの長さ、 $l_2$ は肘から手先までの長さ、 $\theta_1$ は肩の関節角、 $\theta_2$ は肘の関節角を示す。また、 $(h_x, h_y)$ はCRT座標と手先座標のずれを示す。



このような状況で、中枢神経系が行わなければならないキネマティクス変換は2つある。第一に、CRT画面から手先座標への変換、すなわち外部座標の間での変換である。例えば、コンピュータのマウスにおいても、マウスとカーソルの間には平行移動と拡大縮小があるので、画面上の目標点 $T(X, Y)$ とそれに対応する手先(マウス)の位置 $P(x, y)$ の間には、一般に

$$\begin{aligned} x &= k_x(X - h_x) + h_x \\ y &= k_y(Y - h_y) + h_y \end{aligned} \quad 1.1$$

という関係が成り立つ。ここで $k_x, k_y$ は $x, y$ 方向の拡大縮小率、 $(h_x, h_y)$ は画面の原点が手先座標に移される点である。第二に、手先座標から関節角への変換、すなわち外部座標から身体座標への変換である。これは、肩の関節角を $\theta_1$ 、肘の関節角を $\theta_2$ とすると、一般に、

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) \\ \theta_1 &= \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \arctan\left(\frac{l_2 \sin(\theta_2)}{l_1 + l_2 \cos(\theta_2)}\right) \end{aligned} \quad 1.2$$

という関係で表わされる。ただし、 $l_1$ は肩から肘までの長さ、 $l_2$ は肘から手先までの長さを表わしている。以上のような変換ができて始めて、画面上のカーソルを目標位置まで移動させることができる。

式1.1は、一般的に

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = F \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + K \quad 1.3$$

と表わすことができる。この変換は先にも述べた通り、外部座標の間の変換（CRT画面→手先座標）である。Wolpertら（1993）が用いた変換（p.6）を例外として、これまでの視覚運動学習課題の研究では、 $F$ が線形変換（または平行移動）になるような場合において順応・学習過程が調べられてきたことになる。例えば、プリズム順応（p.2）では平行移動、鏡映描写（p.3）では対称変換である。このような外部座標での線形（または平行移動）変換を、身体座標（例えば関節角度空間）で表現すると、外部座標と身体座標の関係が非線形であるために（式1. 2）、一般に非線形で複雑な変換となる。

本論文で扱う第一の問題は、視覚運動学習を可能にする内部モデルが、計算論の枠組みにおいてどのレベルに位置付けられるかということである。先に述べたように、最近の計算論では外部座標の内部表現と身体座標の内部表現が必要であると考えられている。視覚運動学習は外部座標のレベルで成立しているのであろうか、身体座標のレベルで成立しているのであろうか？ 第2章では、従来の視覚運動学習において用いられてきたような外部座標において線形、身体座標において非線形な変換を用いて、どちらのレベルで学習が成立するか調べた。具体的に、 $F$ はCunningham(1989)の用いた回轉變換（図1. 3, p.5）が用いられた。一方、第3章では、従来の視覚運動学習では用いられたことがない、身体座標において線形で外部座標において非線形な変換を用いて、どちらのレベルで学習が成立するか調べた。具体的には、肩と肘の関節角がそれぞれ定数倍されるような変換が用いられた。学習効果の両手間転移現象は心理学では古くから知られているが、本論文ではこの現象を計算論的な枠組みのなかで位置付け、学習レベルを調べる際の手段として用いた。

本論文で扱う第二の問題は、視覚運動学習を可能にする内部モデルが、中枢神経系にお

いてどのような方法で表現されているかということである。計算論的に考えれば、式 1.1 と式 1.2 で表わされるようなキネマティクス変換を表現する方法は大きく分けて2つある。ひとつは、物理パラメータを推定して筋骨格系や外部環境の構造に関する物理モデルを構成する方法である。もうひとつは、そのような構造を一切無視して、入出力関係の対応関係をひとつひとつ学んで行く方法である。一般的に、前者はstructured representation, 後者はtabular representationと呼ばれている。第4章では、視覚環境の変換に対応する内部モデルはどちらの方法で構成されているか、あるいはどちらにも分類されない中間的な方法で構成されているかを、学習効果の汎化を調べることによって推定した。

以上のように、本論文では学習の「転移」や「汎化」という、心理学では古くから取り扱われているパラダイムを計算理論の枠組みと結び付け、そこから導き出される理論的な予測を行動実験によって検証した。このようにして得られた結果は、実際の中枢神経機構がどのような構造を持ち、どのような方法で情報を表現しているかを推定するうえで有効な示唆をもたらすであろう。

## 第2章 外部座標の線形変換に対応する内部モデル

### 2. 1 論理

#### 2. 1. 1 運動プログラミングにおける外部座標と身体座標

Saltzman (1979) は、視覚に誘導される運動のプログラミングを、多くの階層的なレベルをもつ複雑な構造として捕えている。Saltzmanによると、運動のプログラミングは大きく3つの段階に分けることができる。第1の段階では、外部座標において運動軌道が計画される。第2の段階は、どのような効果器(effector)を用いて運動を実現するかが決定される。手を伸ばして押すか、足で蹴飛ばすか、鼻で押すかこの段階で決定される。最後の段階は、計画された軌道を実現するために、選ばれた効果器をどのように動かすかを決定する段階である。

このように、効果器に依存しない外部座標での運動のプランニングと、効果器に依存する身体座標での運動のプランニングの両方が必要であるという考え方は、Hollerbach (1990)にも見受けられる。彼は、ロボットの腕を動かすには、「タスクレベル」と「マニピュレータレベル」という2つのレベルにおけるプログラミングが必要であると述べている。例えば、人間と同様な仕組みの目と腕を備えたロボットがあるとしよう。ロボットはまず視覚で目標物の位置を知る。つぎに、手先の現在位置から目標物までの軌道を、外界

のデカルト座標系において計画する。このような軌道計画のやり方は「タスクレベル」の運動プログラミングである。しかし、タスクレベルの運動プログラムは、それだけでは実際の制御の役には立たない。次に、そのような軌道を実現するためには腕のどの関節をどれくらい曲げればよいか、どの関節でどれくらいの力を発生させればよいかを計算しなくてはならない。このように関節の角度やトルクなどの身体座標で表わされた軌道計画を、「マニピュレータレベル」のプログラミングという。

## 2. 1. 2 両手間転移効果と視覚運動学習のレベル

ここでは、まず心理学において古くから知られている両手間転移現象が、外部座標レベル、身体座標レベルのプログラミングとどのように関わるかを理論的に明らかにする。両手間転移現象とは、片方の手を使って学習したことが、訓練を受けていない他方の手を用いての運動遂行を容易にさせることである。

図 2. 1 は人間の腕を水平面で単純化して表わした図である。この平面内で、左と右の肩の関節はそれぞれ自由度が1で、 $\theta_{l1}$  (左) と  $\theta_{r1}$  (右) で表わされている。同様にして、肘の関節は、 $\theta_{l2}$  (左) と  $\theta_{r2}$  (右) で表わされている。時刻  $t$  における外部座標 (タスクレベル) での手先の位置は体の中心に原点があるようなデカルト座標系  $(x(t), y(t))$  によって表わされている。この点  $(x(t), y(t))$  を身体座標 (マニピュレータレベル) において表現しようとするとき、図中の人間が右手を使うか左手を使うかで、座標系は全く異なる。すなわち、左手を使うとき、身体座標で手先の軌道は  $(\theta_{l1}(t), \theta_{l2}(t))$  と表わされるが、右手を使うときは  $(\theta_{r1}(t), \theta_{r2}(t))$  と表わされる。このように、外部座標は右手

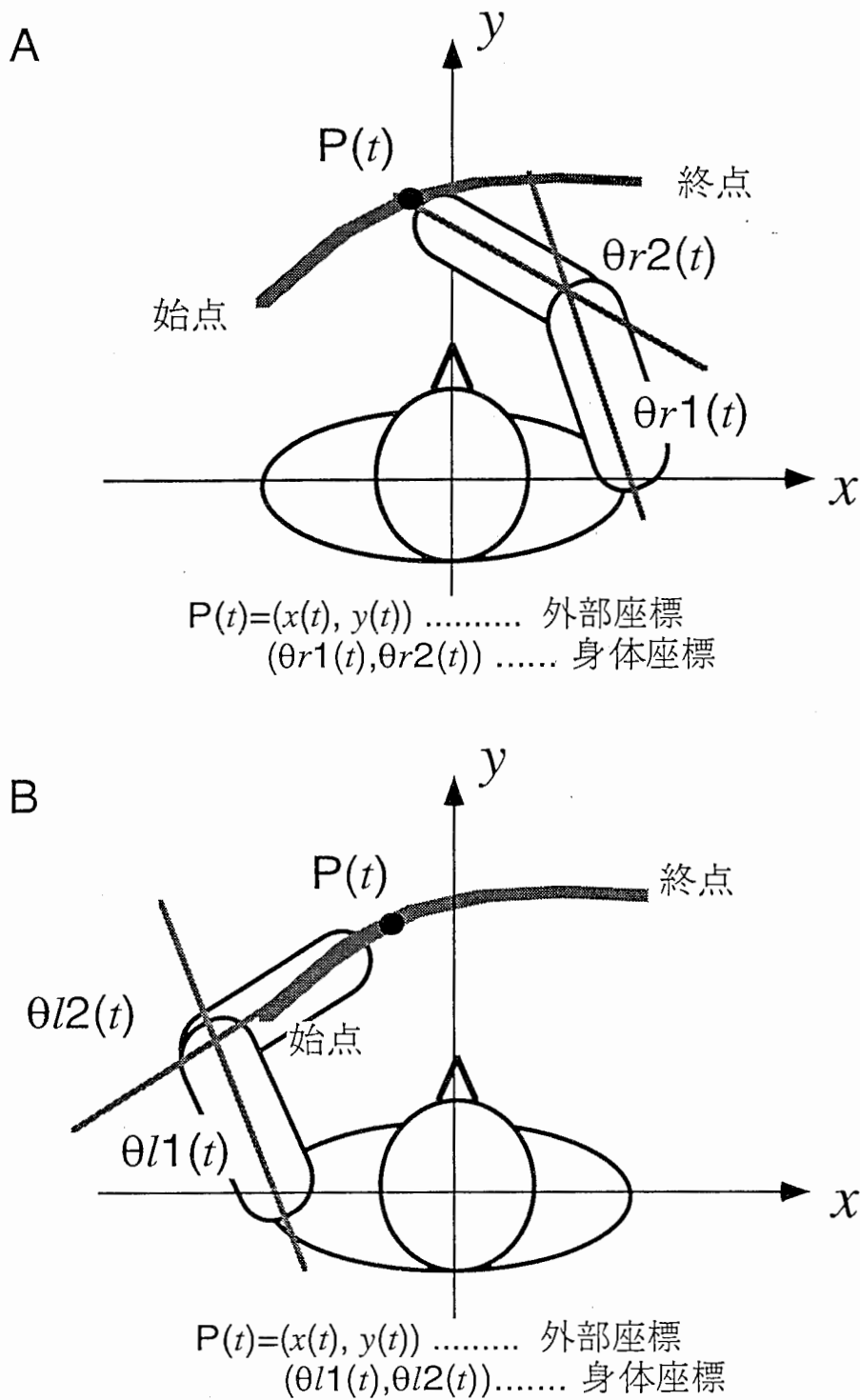


図2. 1 到達運動を行っている人間を上から見た図. 手先軌道(灰色の曲線)上のある一点 $P(t)$ に手先があるときの様子. Aは右手を使っている場合, Bは左手を使っている場合.  $\theta_{r1}$ ,  $\theta_{r2}$ は右腕の肩と肘の関節角を表わし,  $\theta_{l1}$ ,  $\theta_{l2}$ は左腕の肩と肘の関節角を表わす. 外部座標では,  $P(t)$ の表現は右手と左手で共通( $x(t)$ ,  $y(t)$ )であるが, 身体座標は右手( $\theta_{r1}(t)$ ,  $\theta_{r2}(t)$ )と左手( $\theta_{l1}(t)$ ,  $\theta_{l2}(t)$ )で全く異なる.

と左手で共通であるが、身体座標は右手と左手で全く異なる。

さらにこの問題を、第1章で述べた計算論的な枠組み (pp.11~12) のなかで位置付けるとつぎのようになる (図2. 2)。軌道計画の段階では、外部座標で軌道が計画されていると考えられている。従って、この時点で計画された軌道は右手と左手で共有できる。すなわち、外部座標レベルのプログラミングである。しかし、逆キネマティクス問題が解かれたあとでは、関節角やトルクといった身体座標で軌道は計画されるので、これ以降は身体座標レベルのプログラミングであると言える。

### 2. 1. 3 両手間転移効果の研究史

心理学者は19世紀から運動学習における両手間転移現象を研究してきた。そのほとんどは、偏位プリズムを用いた運動学習である。被験者にプリズムを掛けさせて、正しい方向の指差しができるようになるまで訓練する。その後、被験者のプリズムを外して指差しを行わせると、訓練前と逆の方向にずれた指差しを行うことが知られている (プリズム残効<sup>1</sup>)。Harris (1963) は、被験者にプリズムを付させ、片方の手を用いた指差しを訓練した後にプリズムを取り去り、訓練していない他方の手で指差しを行わせると、プリズム残効は確認されなかった、すなわち、プリズム順応において両手間転移効果は見られなかったと報告している。仮に被験者が、プリズムによって生じた視野の平行移動を視覚的に補正するのであれば、どちらの手を使っても同じように残効が見られるはずであるが、結果はそのようではなかった。被験者はプリズムによって平行移動させられた手の視覚的な位置を、視覚的に補正するのではなく、自己受容感覚において補正するとHarrisは推測して

<sup>1</sup> プリズム残効については図1.1(p.2)参照。

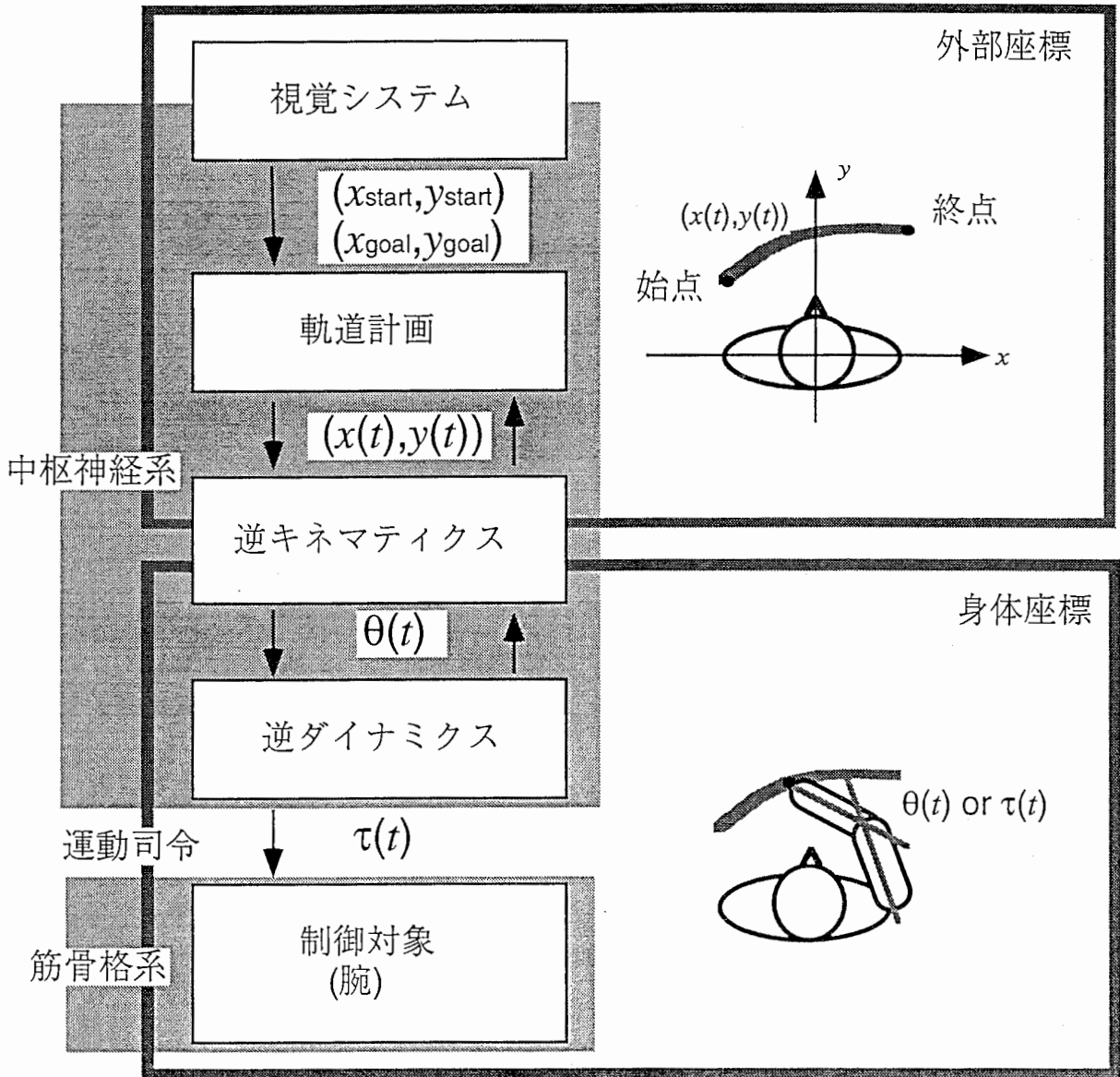


図2. 2 左の流れ図は到達運動を行う際に中枢神経系が解かなければならない問題を示している。一般に到達運動を行う時、視覚を通して目標物の位置の情報が与えられる。しかし、実際に腕を動かすには関節角などのキネマティックな身体座標に情報を変換し(逆キネマティクス)、さらに、関節トルクなどのダイナミックな身体座標に情報を変換する(逆ダイナミクス)必要がある。また、そのようにして計算された運動司令が正しいかどうかを確かめるためには、それと逆方向の計算をする必要がある。逆キネマティクスより前の段階(軌道計画)では外部座標レベル、それ以降(逆ダイナミクス)は身体座標レベルと考えられる。 $(x, y)$ は体の中心に原点があるようなデカルト座標(外部座標)、 $\theta$ は関節角、 $\tau$ は関節トルク(運動司令に相当)を示す。



いる。

しかし、その後の研究で、プリズム順応における両手間転移効果に影響を与えるさまざまな要因が明らかにされ、両手間転移が起こらないとは一概に言えなくなった。例えば、Cohen (1967) はプリズム順応中の視覚情報の与え方により、両手間転移効果が変わることを報告している。彼は、被験者を2群に分け、一方の群の被験者は順応中に常に自分の手先が見えるようにしたが、他方の群の被験者はターゲット付近でしか自分の手先を見ることができないようにした。Cohenは前者の実験条件を連続視覚フィードバック (continuous visual feedback) , 後者の実験条件を終端視覚フィードバック (terminal visual feedback) と名付けたが、プリズム残効における両手間転移効果は、終端視覚フィードバック条件でのみ見られた。

さらに、Taub & Goldberg (1973)は訓練スケジュールによって、両手間転移効果が変わることを報告している。彼等も被験者を2群に分け、一方の群の被験者には、連続して指差し運動の訓練を行わせた (集中訓練 "massed training") が、他方の被験者には休みをいれながら訓練を行わせた (分散訓練 "spaced training") 。両手間転移効果は後者の訓練スケジュールでのみ確認された。Cohen (1973) は、Taub & Goldbergの実験が、両手間転移効果の起こりやすい終端視覚フィードバックで行われていたことを考慮し、連続視覚フィードバックでも同様の実験を行った。それによると、連続視覚フィードバックでは集中訓練でも分散訓練でも両手間転移効果が見られなかった。終端視覚フィードバックでは、Taub & Goldbergの実験によって示された通り、集中訓練では両手間転移効果が確認されなかったが、分散訓練では両手間転移効果が確認された。

視覚運動学習を調べるもうひとつの代表的な方法は鏡映描写であるが、鏡映描写では非

常に高い両手間転移効果が報告されている。Cook (1933)は課題遂行にかかる時間で学習の程度を調べた場合、75%の両手間転移率が得られたと報告している。また、Bray (1928)は課題遂行中の誤りの回数で学習の程度を調べた場合、30%の両手間転移率が得られたと報告している。

このように、両手間転移率は視覚運動課題の種類やさまざまな実験条件によって変化する。以上に述べたようなさまざまな研究が行われてきた理由のひとつは、両手間転移現象が学習の理論を考える上で鍵となるからである。両手間転移に関して一般的に知られている理論としてWelch (1978)の中枢 (central) , 末梢 (peripheral) 説がある。彼は両手間転移に結び付く学習は、ルールやストラテジーのような高次に認知的なレベル学習であり、両手間転移に結び付かない学習は、筋感覚と運動司令の連合のような末梢的なレベルの学習であると述べている。しかし、「中枢」「末梢」という区別は、生体における運動制御のメカニズムが詳細に明らかになってきた今日では、あまりにも漠然としている。例えば、外部座標における軌道計画は認知的なルールやストラテジーではないが、前節で述べた通り、右手と左手で共有できると予想できる。

#### 2. 1. 4 実験の概要

外部座標レベルと身体座標レベルのプログラミングという枠組みに基づき、つぎのような予想を立てることができる。1) ある視覚運動学習が外部座標レベルでおきていれば、その学習成果は右手を使う運動でも、左手を使う運動でも共通である。従って、非常に高い両手間転移率が得られるはずである。2) 学習が身体座標レベルでおきていれば、学習

成果は使う手が異なると共有できないので、低い両手間転移率が得られるはずである。3) 学習が身体座標レベルと外部座標レベルの両方でおきているならば、中程度の両手間転移率が得られるはずである。

このような論理に基づく実験では、被験者が日常生活であまり用いることがなく、適度な難しさの視覚運動課題を用いて学習を調べる必要がある。課題があまりに難しすぎても、易しすぎても、短時間の実験中に学習効果を調べることができない。既に序章で述べた通り、視覚環境を変換するさまざまな方法が提案されている。本研究では予備実験としてデジタイザとCRTを用いて、手先とCRT画面との間で対称変換と回転変換などのさまざまな線形変換を試みた。その結果、Cunningham (1989)が行った回転変換 (図1. 3 参照, p.5) のうちで90° 回転が、対称変換に比べて難しく、しかも短時間の訓練で顕著な学習効果が得られることが解った。従って、両手間転移を調べる実験では、変換の回転角を90° にして学習を調べた。このような外部座標での回転変換は、式1. 3 (p.18) が

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 90^\circ & \sin 90^\circ \\ -\sin 90^\circ & \cos 90^\circ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y \\ -X \end{pmatrix} \quad 2. 1$$

となる場合である。この変換は外部座標において線形であるが、身体座標の変換としては、式2. 2に示すように複雑で非線形な変換になる。

$$\begin{aligned} \theta_2^* &= \arccos\{\sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) - \cos \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)\} \\ \theta_1^* &= \arctan\left\{\frac{-l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}\right\} - \arctan\left(\frac{l_2 \sin \theta_2^*}{l_1 + \sin \theta_2^*}\right) \end{aligned} \quad 2. 2$$

ここで、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ は変換前の肩と肘の関節角、 $\theta_1^*$ 、 $\theta_2^*$ は変換後の肩と肘の関節角を示している。

この章では、上記の予測を検討するために3つの実験を行った。実験1では、さまざまな回転変換角において、到達運動課題の難しさがどう変化するか調べ、Cunningham (1989)の実験を支持する結果を得た。実験2では、もっとも難しい90°回転変換条件下で、学習が起きるかどうかを検討し、学習が起きることを確認した。最後に、実験3で両手間転移効果を調べた。

これらの実験課題で用いた回転変換は、Cunninghamが行った実験と基本的には同様の課題であるが、以下のような点において異なる。Cunninghamの実験では被験者は時間の制約なしに、ターゲットまでの到達運動を行っていた。被験者にとっての課題は、「なるべくまっすぐな手先軌道で手先をターゲットまで到達させる」ことであった。従って、実験結果に関する考察は、変換の回転角に応じて軌道の冗長性がどう変化するかなど、空間的な特性に終始していた (Cunningham & Vardi, 1990)。本章の実験では、空間的な特性が学習とともにどう変化するかはもちろん、運動時間などの時間的特性や、速度、加速度などの時空間特性がどう変化するかを調べることを目的とした。従って、被験者の課題は「なるべくまっすぐな手先軌道で、なるべく早くターゲットまで手先を到達させる」こととした。また、学習効果を調べる測度としては、軌跡の冗長性ではなく、スタートの合図から、被験者の手先がターゲットに到達するまでの時間（以後「課題完了までの時間」と呼ぶことにする）を用いた。

## 2. 1. 5 一般的な方法

### 【装置】

第2章におけるすべての実験で、パーソナルコンピュータ（NEC PC98 VM）とそれに接続されたデジタイザとCRT画面を用いた。図2. 3 aに示したように、被験者の前にはデジタイザを水平に置いた。被験者が人さし指の先で、デジタイザを軽く押しながら、指先を移動させると、画面上のカーソルも連動して動いた。デジタイザと指先の摩擦を少なくするため被験者の指先にプラスチックのキャップをはめさせた。また、人さし指の先以外は、デジタイザに触らないようにあらかじめ注意を与えた。デジタイザの記録領域と画面の表示領域は等しく、例えば、デジタイザの上で指を1 cm動かすと画面上のカーソルも1 cm動いた。図2. 3 bに示したように、カーソルの出発地点（スタート領域）は常に画面の中心であり、回転変換はデジタイザの中心を回転の中心としているので、出発点

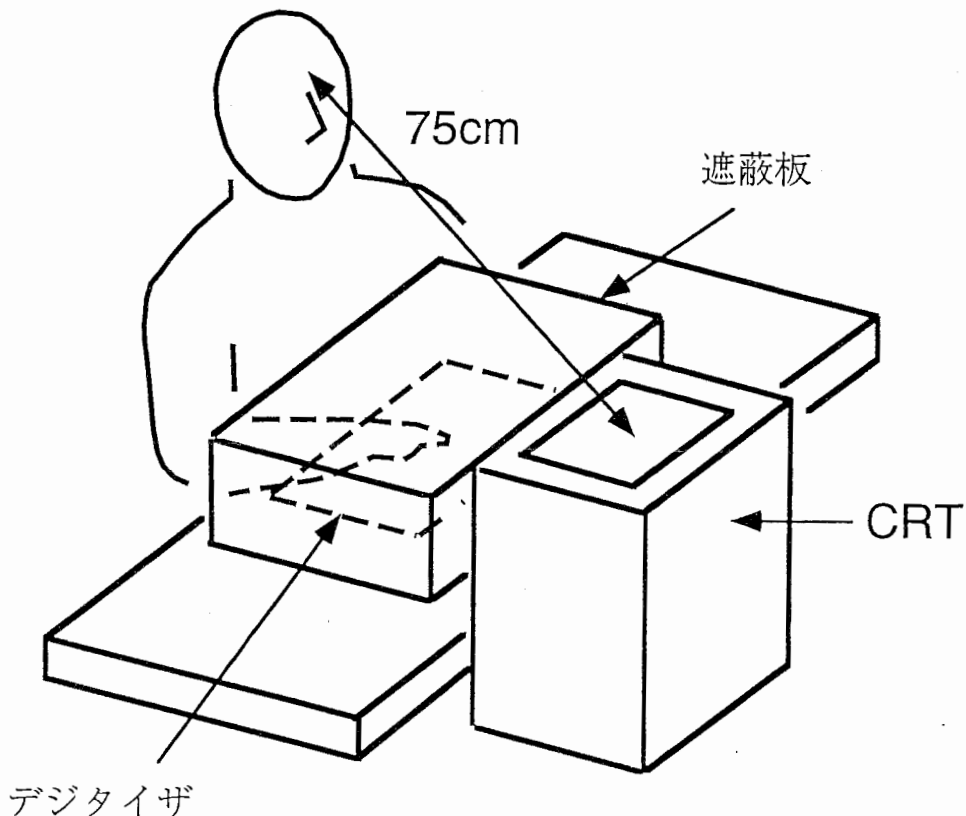


図2. 3 a 第2章での実験装置の配置図。被験者を斜め前から見たところ。デジタイザと被験者の手先の上に遮蔽版を置き、被験者が自分の手先を見えないようにした。図中に示すように被験者の目と画面の中心との距離は75cmであった。CRTモニターは画面がほぼ水平となるように置いた。被験者の肩の位置が動かないように、背もたれの高い椅子に深く座らせた。被験者はデジタイザの上に人さし指を置き、指先を動かすことで画面上のカーソルを動かした。

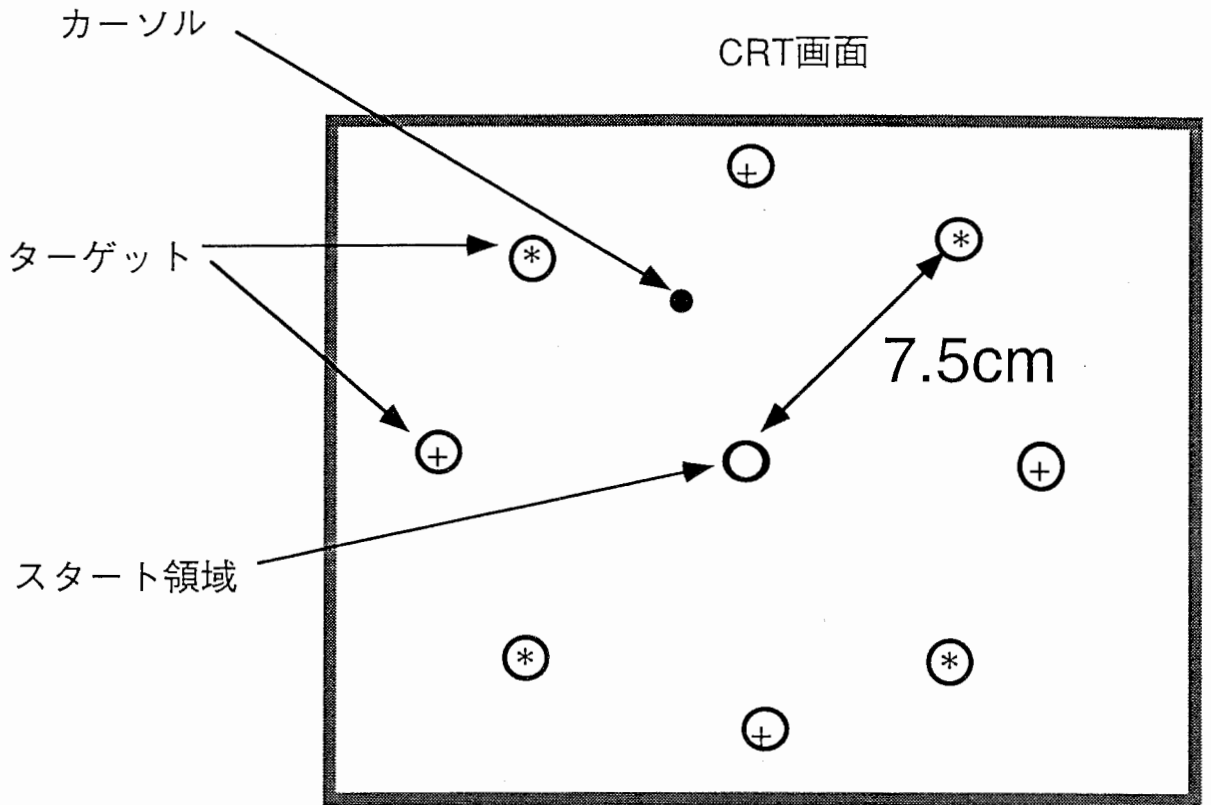


図2. 3 b ターゲットの配置をCRT画面上で示した図. 実験1では, \*で示した4つのターゲットを用い, 実験2~3では, \*と+で示した8つのターゲットを用いた. 一回の試行でいずれかひとつのターゲットがランダムに出現する. スタート領域は常に画面の中央であった. スタート領域に現れるカーソルをターゲットまで移動させることが被験者の課題であった. 背景画面の色は黒で, カーソルは画面上で直径0.5mmの白く塗りつぶした円, ターゲットは直径5mmの白い円であった.

では常に無変換であった. 実験1では図2. 3 bに\*で示したような4つのターゲットを, 実験2と3では+と\*で示したような8つのターゲットを, 各試行にひとつランダムな順番で提示した.

#### 【手続き】

各試行の手続きは以下のように進行した. まず, 被験者がデジタイザの中心を人さし指の先で軽く押すと, 画面上にカーソルが表われる. 1.0秒後にコンピュータがクリック音を出し, 同時にターゲットが画面上に表われる. それが被験者にとってはスタートの合図

であり、なるべくまっすぐな軌道で、なるべく早く、カーソルをターゲットまで移動させることが被験者の課題であった。カーソルがターゲットの円内に入った時点で1試行は終了した。被験者の指先の位置は、試行中65 msごとに記録された。

## 2. 2 行動実験1：回転変換を用いた視覚運動課題の性質

### 2. 2. 1 目的

さまざまな回転変換角において、到達運動課題を遂行するのにかかる時間がどう変化するか調べる。

### 2. 2. 2 方法

#### 【被験者】

被験者は男女5人（被験者ON, OHが女性）。年齢は20~25歳で、東京大学文学部心理学科学生（YO, ON）、または、同大学人文科学研究科大学院生（TA, DA, OH）であった。視力（矯正を含む）および上肢運動機能は正常で、全員右手利きであった。また、実験の目的は知らせていなかった。

#### 【手続き】

実験は、7変換回転角×4ターゲット位置×5回繰り返し=140試行から成り、およそ40分かかった。上の3つの要因はすべてランダムな順番で提示された。変換の回転角は

一試行ごとに異なり、しかも被験者は回転角を予め知らされていなかったため、指先を動かして見るまで回転角は解らなかった。例えば、 $0^\circ$  変換の場合、被験者の指先が動く方向とカーソルの動く方向は一致する（図1.3参照, p.5）。しかし、他の変換角条件下では、両者の方向は異なっている。デジタイザの中心を回転の中心として、時計と逆方向に $0, 30, 60, 90, 120, 150, 180^\circ$  回転する変換が用いられた。回転変換はデジタイザによって検出した座標をパーソナルコンピュータで実時間で変換し、CRT画面上のカーソルとして示した。

実験開始前に被験者に対して「なるべくまっすぐな手先軌道で、なるべく早くターゲットまでカーソルを移動させる」ように教示した。課題完了までの時間（スタートの合図から、ターゲットにたどり着くまでの時間）を課題の難しさの尺度として選んだ。課題完了までの時間は、反応時間（スタートの合図から、指先を動かすまでの時間）と運動時間（指先を動かしてから、ターゲットにたどり着くまでの時間）を含んでいる。先に述べたように手先の位置を65ms毎に記録していたので、計測時間の最小単位は65msであった。

### 2. 2. 3 結果と考察

図2.4は、各被験者の課題完了までの時間を、変換角の関数として示している。課題完了までの時間は、 $0^\circ$  と $180^\circ$  で短く、 $90^\circ$  または $120^\circ$  で長くなっている。また $0^\circ$  から $90^\circ$  までは次第に増加し、 $120^\circ$  から $180^\circ$  までは、次第に減少している。この傾向は全ての被験者で一致している。7変換角×4ターゲット方向の繰り返しのある分散分析で、変換角の主効果は有意 ( $F(6, 24)=3.37, p<.025$ ) であったが、ターゲット方向の主効



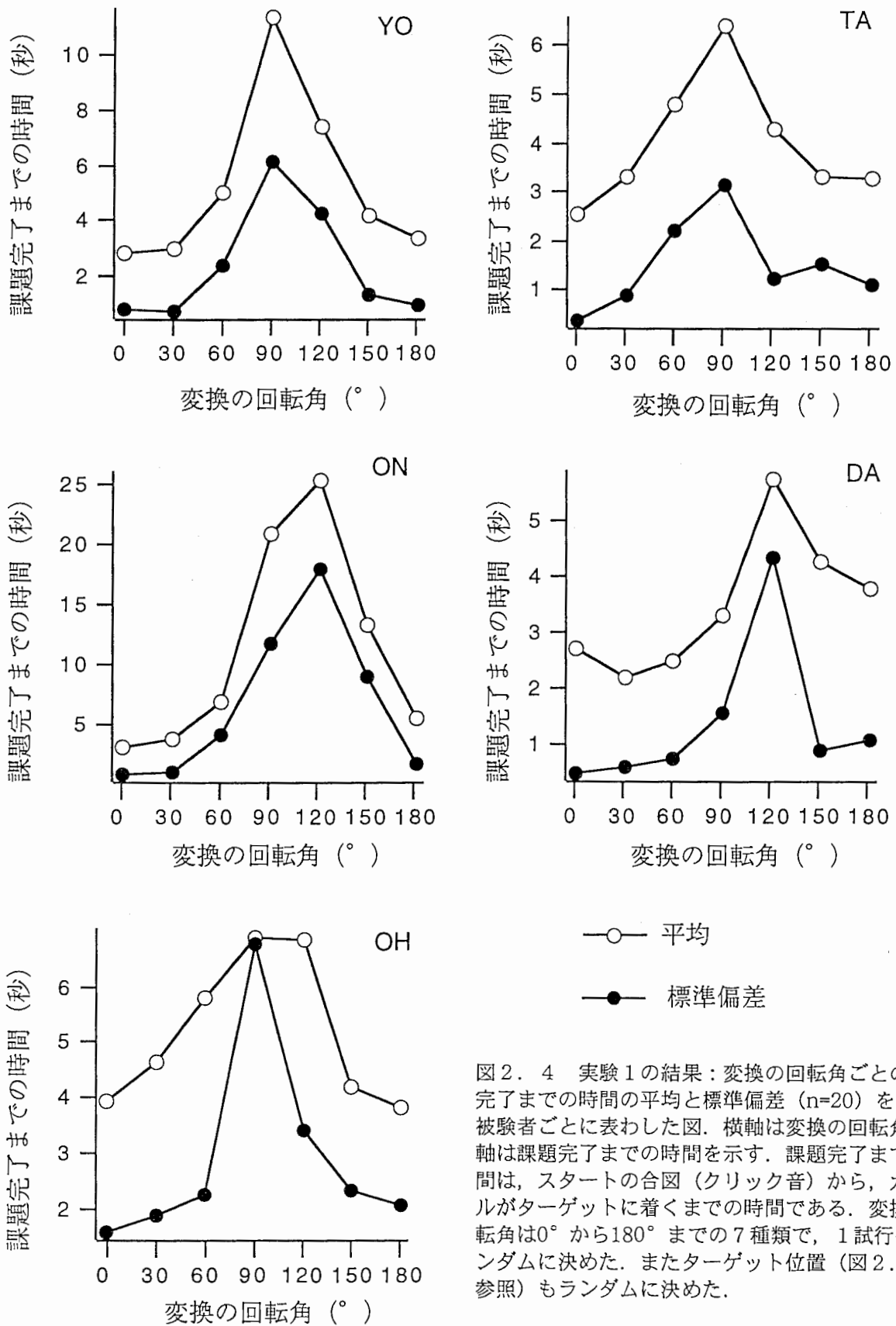


図2. 4 実験1の結果：変換の回転角ごとの課題完了までの時間の平均と標準偏差 (n=20) を、各被験者ごとに表わした図。横軸は変換の回転角、縦軸は課題完了までの時間を示す。課題完了までの時間は、スタートの合図（クリック音）から、カーソルがターゲットに着くまでの時間である。変換の回転角は0° から180° までの7種類で、1試行毎ランダムに決めた。またターゲット位置（図2. 3b 参照）もランダムに決めた。

果および交互作用は有意ではなかった（それぞれ $F(3, 12)=.16$ と $F(18, 72)=.53$ ）。さらに多重比較法を用いて各変換角どうしの課題完了までの時間に差があるかどうか調べたが、 $90^\circ$ と全ての変換角（ $120^\circ$ は除く）の間で有意差が見られた（Tukey HSD multiple comparisons,  $p<.05$ ）。

Cunningham(1989)は、本論文の実験とは異なり、被験者に対して「なるべく早く」という教示を行わず、単に「なるべくまっすぐな軌跡で」ターゲットに到達することを被験者に要求し、変換の回転角と軌跡の冗長性の関係を調べた。その結果は、 $90^\circ$ から $120^\circ$ の間で軌跡は最も長くなった。軌跡が長いということは、通常の到達運動における軌跡（スタートとターゲットを結ぶようなほぼ直線の軌跡）からずれており、到達運動が困難であったことを示唆している。本論文の実験では、課題完了までの時間を測度として、回転変換条件下での到達運動の難しさを調べたが、上記の結果のように課題完了までの時間は、 $0^\circ$ と $180^\circ$ で短く、 $90^\circ$ または $120^\circ$ で長くなっていた。従って、本論文の実験の結果が示唆するところはCunningham(1989)の実験結果とおおむね一致している。

本論文の実験では被験者に回転角を教えず、しかも回転角は一試行ごとランダムに決められたので、被験者は手先を動かすまで変換の回転角を知ることができなかった。そこで、 $90^\circ$ から $120^\circ$ の回転変換変換では、到達運動を遂行すること自体が困難であったのではなく、回転角を発見するのに時間がかかったのではないかという推測もできる。しかし、Cunningham (1989)の実験では、被験者に一試行毎の回転角を予め教えていたが、上記のように、 $90^\circ$ から $120^\circ$ の間で軌跡が最も長くなっていた。このことは、たとえ回転角が解っていても、 $90^\circ$ から $120^\circ$ の回転変換では到達運動を遂行すること自体が難しいことを示唆している。このような理由から、次の実験2では $90^\circ$ 回転変換を用いる。

Cunninghamはこの現象を以下のように説明している。視覚と運動のマッピングにおいて、運動方向は「双方向」ベクトルによって表わされている。180°変換が0°変換と同様に易しいのは、視覚的に与えられるターゲットの方向と手先の運動方向が、同一の双方向ベクトル上にあるからである。他の変換角条件においては、視覚的に与えられるターゲットの方向と手先の運動方向は、双方向ベクトル上でも一致しない。変換角が90°のとき、両者の角度差は最大になる。以上のようなCunninghamの理論は90°変換がなぜ難しいかについては説明しているが、この視覚運動課題の学習についてはなにも予測していない。

実際、0°と180°の回轉變換下における到達運動が同様に容易であるということは、Cunninghamのようなモデル（双方向ベクトルの運動表象）を仮定しなくても、学習という観点から説明することも可能である。すなわち、日常生活において、対象物の運動方向に対して180°反対方向に手先を動かすことを学習していた可能性がある。例えば、飛んでくる球を打ち返す場合や、自分から遠ざかる対象物を引き留めたりする場合、対象物の運動方向（視覚的な方向）と逆方向の力をかける必要がある。また、0°の回轉變換は視覚的な方向と運動方向が一致している場合であるから、これはもっとも良く慣れている場合である。従って、0°と180°の回轉變換は、日常生活においてすでに学習しており、0°からも180°からも離れている90°の回轉變換条件下での到達運動が最も難しいのではないかと考えられる。

そこで、次の実験では、もっとも到達運動遂行に時間がかかった変換角のひとつである90°回轉變換において、繰り返し到達運動の訓練を行い、学習が起きるかどうかを調べる。また、実験1ではさまざまな変換の回転角がランダムな順番で予告なしに出現したの

で、被験者は実際に手先を動かしてみるまで、回転角が解らなかったが、次の実験では、Cunningham(1989)の実験と同様に被験者に予め回転角を教える。実験1の90°回転変換条件下における課題完了までの時間と、次の実験の訓練前の課題完了までの時間を比較することにより、回転角の知識を与えることが課題完了までの時間に影響を及ぼすかどうかも検討する。

## 2. 3 行動実験2：回転変換を用いた視覚運動学習

### 2. 3. 1 目的

到達運動課題を遂行するのに最も時間がかかる変換のひとつである90°変換において、繰り返し到達運動の訓練を行い、課題完了までの時間が減少するかどうかを調べる。

### 2. 3. 2 方法

#### 【被験者】

被験者は男女4人（被験者OS, FUが女性）。東京大学教養学部学生で、年齢は20歳前後であった。視力（矯正を含む）および上肢運動機能は正常で、全員右手利きであった。また、実験の目的は知らせていなかった。

#### 【手続き】

実験は、10試行を1ブロックとして、各被験者12ブロック（合計120試行）連続して到

達運動課題を行った。それぞれのブロック内では、図2. 3 bに示されるような8つのターゲットが、ランダムに1～2回出現した。

実験開始前に被験者に対して、

- 1) 手先の運動方向とカーソルの運動方向の間に、常に $90^\circ$ のずれがある。
- 2) 課題は「なるべくまっすぐな軌道で、なるべく早くターゲットまでカーソルを移動させる」ことである。

という2点を教示した。

### 2. 3. 3 結果

【課題完了までの時間、反応時間、運動時間】

図2. 5に課題完了までの時間と反応時間の各ブロック毎の平均と標準偏差を表わす。課題完了までの時間と反応時間はブロック数が増すにつれて減少していた。連続する2つのブロックを1グループとして、繰り返しのある分散分析を行った結果、グループの主効果は有意 ( $F(5, 15)=14.11, p<.005$ ) であった。さらに多重比較を行うと、最初のグループと他の全てのグループの間で、また最後のグループと最後から2番目3番目を除く他の全てのグループの間で有意差が見られた ( $p<.001$ )。また、傾向分析 (Kepple, 1982) を行うと、1次式で近似できる要因と2次式で近似できる要因がそれぞれ有意 ( $F(1, 471)=147.12, p<.0001$ ;  $F(1, 471)=47.79, p<.0001$ ) で、グループ間の分散の93.4%がこの2つの要因によるものであることを示していた。これらの結果は、課題完了までの時間が、試行回数が増えるにつれて、線形に減少したことを示している。また、2次式で近似

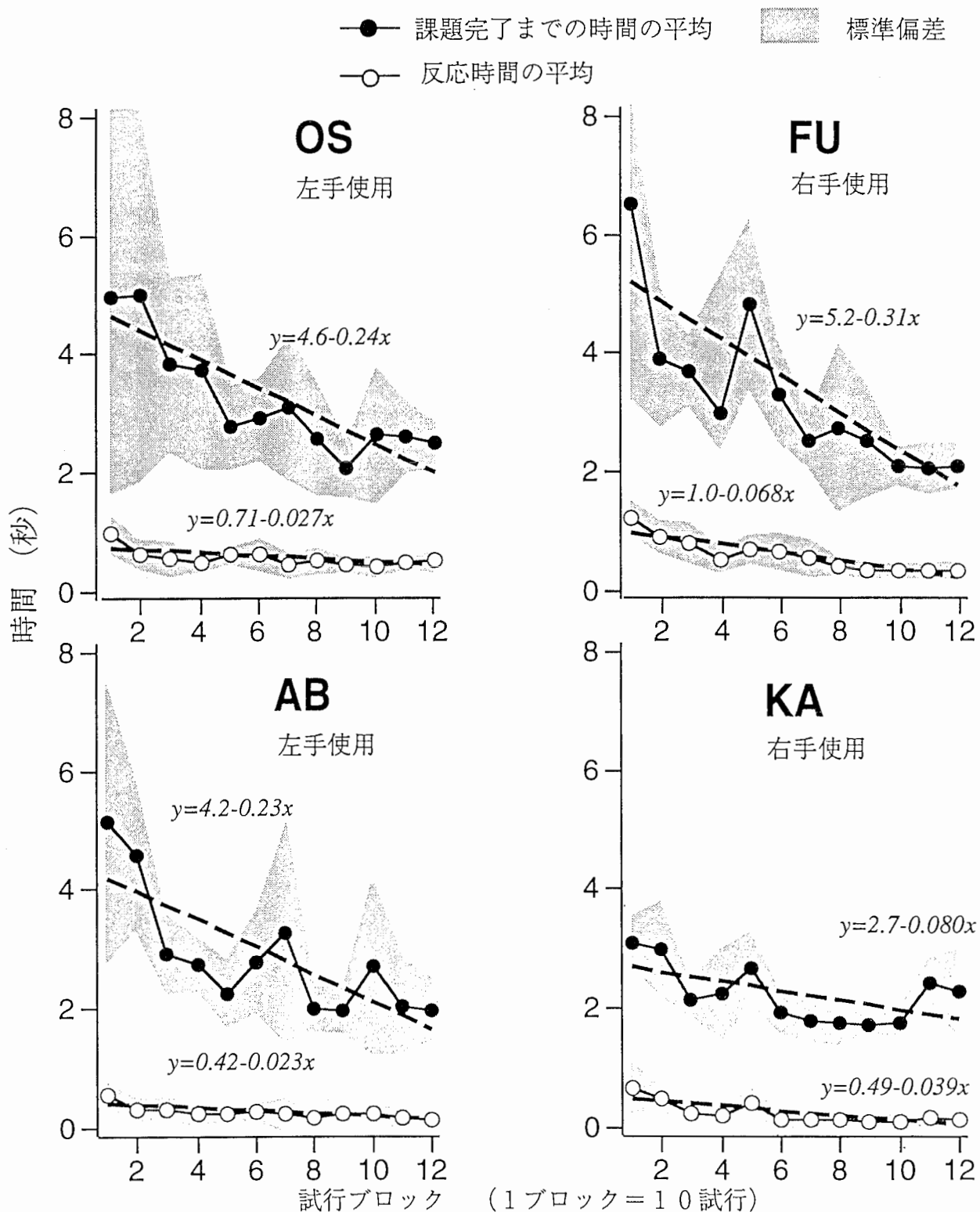


図2. 5 実験2の結果：90°回転変換条件下で繰り返し到達運動の訓練を行ったときの学習過程。試行ブロックごとの課題完了までの時間および反応時間の平均と標準偏差 (n=10) を示す。課題完了までの時間はスタートの合図からカーソルがターゲットに着くまでの時間、反応時間はスタートの合図から手先が動き始めるまでの時間である。図中の破線は、各ブロックごとの平均値について、最小自乗法を用いて求めた回帰直線を示す。どの被験者も右手利きであるが、OSとABは左手を、FUとKAは右手を用いて到達運動を行った。

できる要因が有意であったことは、実験の後半で天井効果（これ以上試行回数を増やしても学習が進まない状態）が表われていたことを示している。

実験1とは異なり、回転変換の変換角は常に一定であったので、被験者はターゲットが画面上に現われた時点で、実際に手先を動かす前に、正しい移動方向が予測できたはずである。従って、試行回数が増えるにつれて反応時間（ターゲットが画面上に現われてから、手先が動き出すまでの時間）が減少することが予測できる。ここでは、ターゲットが画面上に現われてから、手先の運動の接線速度（Tangential Velocity）<sup>2</sup>が始めて8.3 mm/s以上になった時点を手先が動き出した時点と定め、各試行毎に反応時間を算出した。8.3 mm/sという値は、本実験の装置を用いて検出できる最小の接線速度であった。図2.5に示す通り、反応時間は試行回数が増えるにつれて減少していた。反応時間も課題完了までの時間と同様、連続する2ブロックを1グループとして、繰り返しのある分散分析を行った結果、グループの主効果は有意（ $F(5, 15)=14.38, p<.005$ ）であった。多重比較では、最初のグループと他の全てのグループの間で、また最後のグループと最後から2番目3番目を除く他の全てのグループの間で有意差が見られた（ $p<.001$ ）。

#### 【軌道】

図2.6はひとりの被験者（FU）における、実験開始時の手先軌道（#1～4試行）と実験終了間際（#117～120試行）の手先軌道を示している。実験開始時には軌道は多くの場所で曲がっており、被験者が視覚フィードバックを用いて何回も軌道の修正を行っていたことを示している。しかし、実験終了間際には、軌道はほぼ直線になっていた。

<sup>2</sup>接線速度（tangential velocity）は以下の式で定義される。

$$\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$$

ただし、 $\dot{x}$ 、 $\dot{y}$ はx軸方向の速度、y軸方向の速度を表わす。

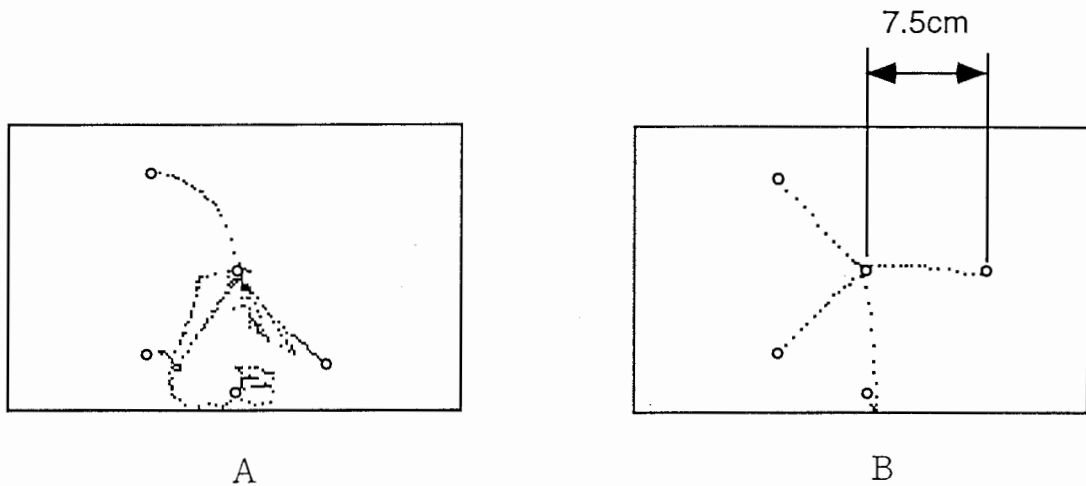


図2. 6 実験2の結果：ひとりの被験者（FU）における，実験開始時の手先軌道（A：#1～4試行）と実験終了間際（B：#117～120試行）の手先軌道を示す．軌道は65ms毎に（15.4Hzで）記録された．外側の長方形はデジタイザの枠に相当する．中心の丸はスタート領域，周辺の丸はターゲットを示す．

### 【速度波形】

図2. 7は被験者全員について，実験開始時（#1～4試行），実験中程（#58～61試行），実験終了間際（#117～120試行）の速度波形を示している．実験開始時には速度波形は多くの頂点と谷を持つ複雑な波形をしているが，実験中程から終了間際へと試行回数が増えるにつれて，ひとつの頂点をもつ「ベル型」の波形となった<sup>3</sup>．このように，速度波形中の頂点と谷の数は，試行回数が増えるにつれて減少し，波形は滑らかになった．

## 2. 3. 4 考察

以上の結果は，第一に，課題完了までの時間が試行回数とともに減少したことを示している．しかし，それだけではなく，軌道や速度波形も変化していることから，運動の

<sup>3</sup> 実験終了間際では，ベル型波形の尾が切れている理由は，ターゲット領域内に入った時点（ターゲット領域を示す境界線を越えた時点）で記録を終了したためである．従って，ターゲット領域を通過した場合も終了とみなされた．



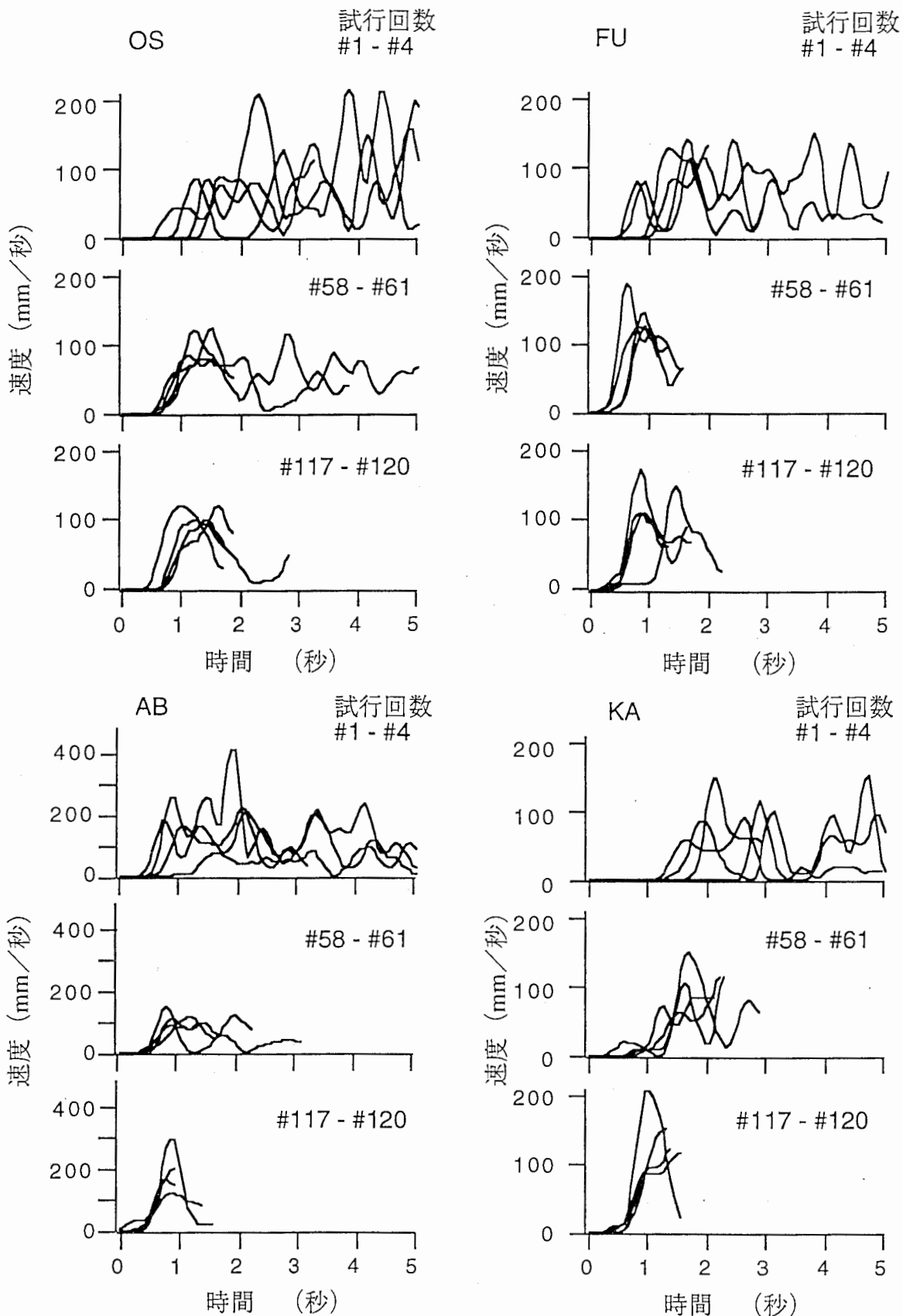


図2. 7 実験2の結果：90°回転変換条件下で繰り返し到達運動の訓練を行ったときの手先の速度波形の変化。実験開始時（#1～4試行），実験中程（#58～61試行），実験終了間際（#117～120試行）の速度波形を各被験者毎に示す。手先が単位計測時間（65 ms）内に動いた距離を算出することにより，接線速度を求めた。このようにして得た速度波形を，5点移動平均を用いて平滑化した。横軸の時間が0の時にスタートの合図（クリック音）がコンピュータから出た。

質も変化したことを示している。Woodworth (1899) は目標に対して到達運動を行う際、1回の到達運動の中に、2つの様相があると述べている。第1の様相は"initial impulse phase"と呼ばれ、手先の現在位置から目標近くまでの素早い運動から成っている。第2の様相は"secondary adjustments"と呼ばれ、目標近辺における細かい修正運動から成っている。同様の区別はFlower (1975) にも見受けられ、Woodworthの区分法で言う"initial impulse phase"は、弾道運動 ("ballistic movement") , "secondary adjustments"は修正運動 ("corrective movement") と呼ばれている。また、制御工学の分野では弾道運動はフィードフォワード制御、修正運動はフィードバック制御と呼ばれている (p. 13参照) 。多くの研究者が、弾道運動の速度波形はひとつの頂点をもつ「ベル型」になることを指摘している (Beggs & Howarth, 1972; Kelso, Southard & Goodman, 1979; Abend, Bizzi & Morasso, 1982; Atkeson & Hollerbach, 1985) 。また、弾道運動の計算モデルからも、同様の速度波形が予測されており (Flash & Hogan, 1985; Uno, Kawato & Suzuki, 1989) , 一般に弾道運動の指標と考えられている。

先に述べた通り、速度波形は実験開始時には速度波形は多くの頂点と谷を持つ複雑な波形をしているが、実験中程から終了間際へと試行回数が増えるにつれて、ひとつの頂点をもつ「ベル型」の波形へと変化していた。このことは、実験開始時にはほとんどの運動が、多くの不正確な弾道運動や修正運動から成っていたが、実験試行回数が増えるにつれて弾道運動が正確になり、1回の弾道運動で修正運動を行うことなく、ほぼターゲット内に入ってきたことを示している。

最後に実験1との比較であるが、実験1でも90°回轉變換条件下での課題完了までの時間を調べた。その結果を実験2のはじめのブロック (学習前) と比較すると、実験1の

方が課題完了までの時間が長い場合があった。すなわち、実験1では、 $90^\circ$  回転変換条件下での各被験者の課題完了までの時間（平均）が、12.0(被験者YO), 6.4(TA), 25.5(ON), 5.7(DA), 7.1(OH)秒であったのに対して、実験2の最初のブロックでは、5.1(OS), 6.4(FU), 5.1(AB), 3.2(KA)秒であった。実験1と実験2では被験者が異なるので、単純には比較できないが、これは先にも述べた通り、実験1ではさまざまな回転変換角がランダムな順番で現れ、被験者は手先を動かしてみるまで回転角が解らなかったのに対して、実験2では予め $90^\circ$  の回転角であることを教示したことが主な原因であると推測できる。従って、実験1と実験2の $90^\circ$  回転変換条件下（学習前）で課題完了までの時間が異なるのは、回転変換角に関する知識の有無の差であると考えられ、このような認知的な知識は、課題完了までの時間に影響を及ぼす。しかし、実験2における学習過程全体を通して見れば、回転角の知識が始めから与えられているに関わらず、課題完了までの時間は徐々に減少し、さらに視覚運動学習が進行していることを示唆している。

これまでの結果から、もっとも難しい変換角（ $90^\circ$ ）においても、学習がおきることが確認できた。また、速度波形の形状変化は学習が進むにつれ不正確な弾道運動や修正運動から、正確な弾道運動へと運動の質も変化することを示唆していた。 $90^\circ$  以外の変換角では学習が起きるかどうかはいまのところ不明であるが、 $90^\circ$  回転変換条件下では、課題完了までの時間が120試行以内で、顕著に減少することが確認できた。以上の結果を基にして、次の実験3では本章の最終目的であるところの視覚運動学習がおきるレベルについて調べる。

#### 2. 4 行動実験3：回転変換における両手間転移効果

### 2. 4. 1 目的

両手間転移効果を調べることにより、外部座標で線形な変換に対する学習が外部座標レベルで学習されるか身体座標レベルで学習されるかを調べる。

### 2. 4. 2 方法

#### 【被験者】

被験者は男女18人（被験者SU, ON, SAが女性）。東京大学人文科学研究科大学院生（KM, IM, MZ）または東京大学教養学部生で、年齢は18～25歳であった。視力（矯正を含む）および上肢運動機能は正常で、全員右手利きであった。また、実験の目的は知らせていなかった。

#### 【手続き】

ここでは、両手間転移効果を調べるため、いわゆる「プレテスト/ポストテスト」法を用いた。実験3は3つのセッションから成っていた。始めのセッションは、「プレテスト」で、被験者に一方の手を用いて課題を行わせて初期状態を調べる。次のトレーニングセッションでは、課題を行う手を換えて繰り返しトレーニングを行う。最後のセッションは、「ポストテスト」で、始めの「プレテスト」と同じ手で同じことを行わせて、トレーニング中の学習効果が、どれくらい転移しているかを調べる。

被験者は無作為に2群（グループAとグループB）に分けられた。グループAの被験者

は、プレテストとポストテストにおいて非利き手（被験者全員が右利きであるので左手）を用い、トレーニング中は利き手（右手）を用いた。グループBの被験者はその逆である。

プレテストおよびポストテストは、10回の試行から成っていた。1試行の手続きは実験2と同じである。テストの回数を決めるにあたって、テスト中に学習が進行するほど長くないこと、しかも、信頼できる平均値が得られることを考慮し、試行回数を10回に決めた。トレーニングセッションでは、連続する10試行のうち9試行において課題完了までの時間が3秒以下であるという規準を設け、規準に達した時点で終了とした。従って、トレーニングセッションの回数は被験者ごとに異なった。規準に達するまでの回数はグループAの平均が97.6回（最小29回，最大219回）で、グループBの平均が86.9回（最小36回，最大143回）であった。

プレテスト、トレーニング、ポストテストを通して、ターゲットの位置は実験2と同じで、毎試行ランダムに決められた。変換角も実験2と同じく $90^\circ$ で一定とした。実験開始前に、実験2と同様、被験者に対して、1) 手先の運動方向とカーソルの運動方向の間に、常に $90^\circ$ のずれがある、2) 課題は「なるべくまっすぐな軌道で、なるべく早くターゲットまでカーソルを移動させる」ことである、という2点を教示した。

#### 【解析方法】

両手間転移効果を知るため、A) プレテスト10試行、B) トレーニング開始時の10試行、C) トレーニング終了間際の10試行、D) ポストテスト10試行における課題完了までの時間を比較した（図2.8参照）。もし、学習効果が両手間完璧に転移するな

らば、片方の手を用いたトレーニング終了間際の遂行成績は、他方の手を用いたポストテストに持ち越されるので、D) の値はC) と等しくなるはずである。またこの場合、図2.8左に示したように、課題完了までの時間はL字型のプロファイルとなることが予想される。一方、学習効果が両手間で全く転移しない場合、一方の手を用いてトレーニングを受けても他方の手には何ら影響を与えない。従って、トレーニングを受けていない状態でポストテストを受けねばならないので、D) の値はA) と等しくなるはずである。またこの

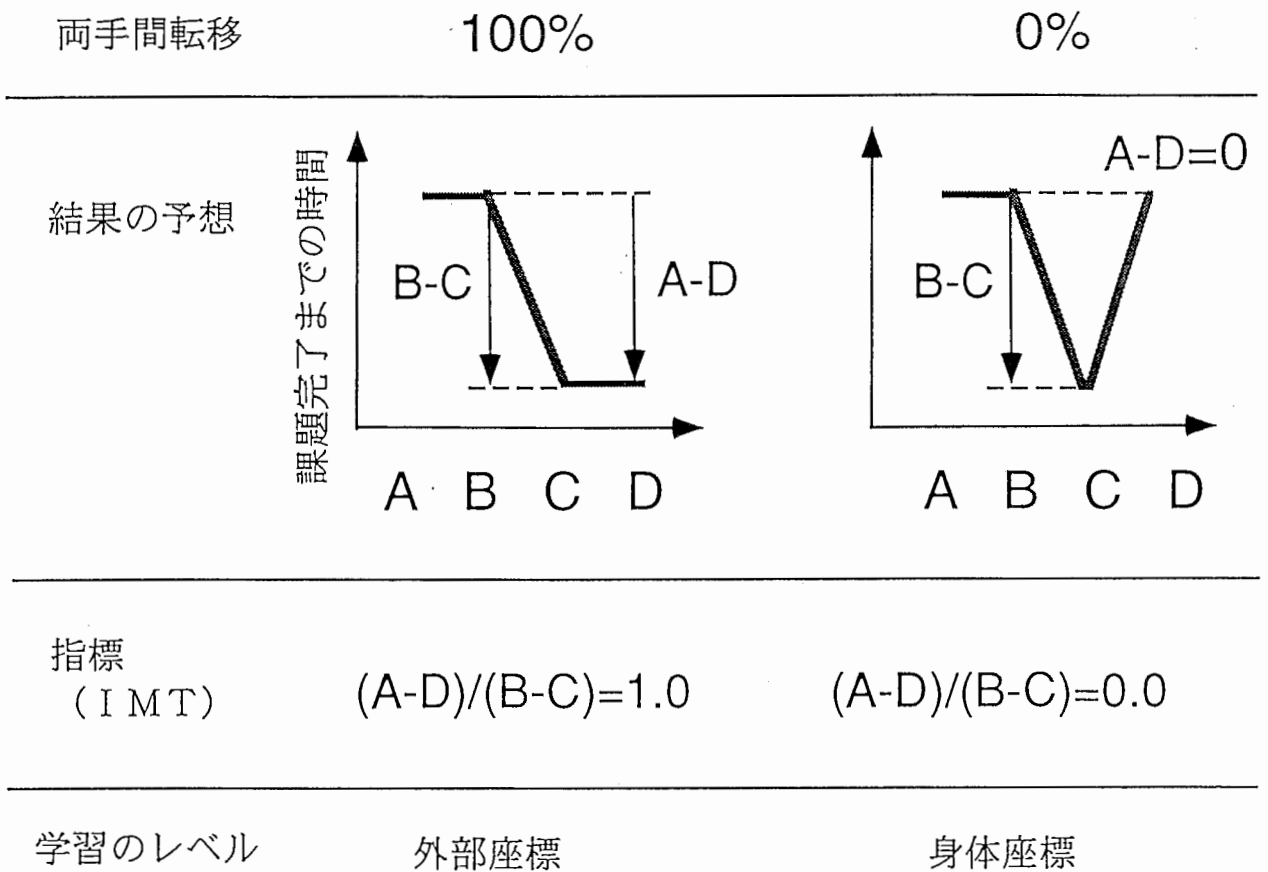


図2.8 実験3における結果の予想と導かれる結論を示す図。A) プレテスト10試行, B) トレーニング開始時の10試行, C) トレーニング終了間際の10試行, D) ポストテスト10試行における課題完了までの時間を比較する。両手間転移を定量的に表わすため、図の中で定義したようなIMTという指標を用いる。AとBの値はほぼ等しいとして、仮に両手間転移が100%おきるならば、CとDも等しく、IMT指標は1.0に近い値になる。一方、両手間転移が全くおきないならば、AとDが等しくなるので、IMT指標は0に近い値になる。

場合、図2. 8右に示したようにV字型のプロファイルとなることが予想される。

以上のような、両手間転移現象を数量的にとらえるため、次のような指標を計算した。

$$IMT = (A - D) / (B - C) \quad 2. 1$$

分母はトレーニングセッションにおける学習量を表わし、分子はプレテストポストテスト間の差を表わしている。もし、両手間転移がないならば、分子は0になり、IMT指標は0.0になるが、両手間転移が完璧であるならば、分子は分母と等しくなり、IMT指標は1.0になるはずである。

### 2. 4. 3 結果

図2. 9は、A, B, C, Dにおける課題完了までの時間を各被験者毎に示している。まず、学習が起きていたかどうかを調べるため、各被験者ごとに、トレーニング開始時の10試行(B)と終了間際の10試行(C)における課題完了までの時間で有意差があるかどうか調べた。それによるとグループAではほとんど(9名中7名)の被験者において、グループBでは全員の被験者において、有意差が見られた(Mann-Whitney U test,  $U < 27, p < .05$ )。

次に、両手間転移については、図2. 9に示されるように、どちらのグループの被験者のプロファイルも先に述べたようなL字型になっており、両手間転移率を表わすIMT指標はかなり高い値であることが予測できる。実際、IMT指標を算出すると、図2. 10aに示す通り、グループAでは平均1.57、グループBでは平均0.91であり、ほぼ1.0であるかまたはそれ以上であった。

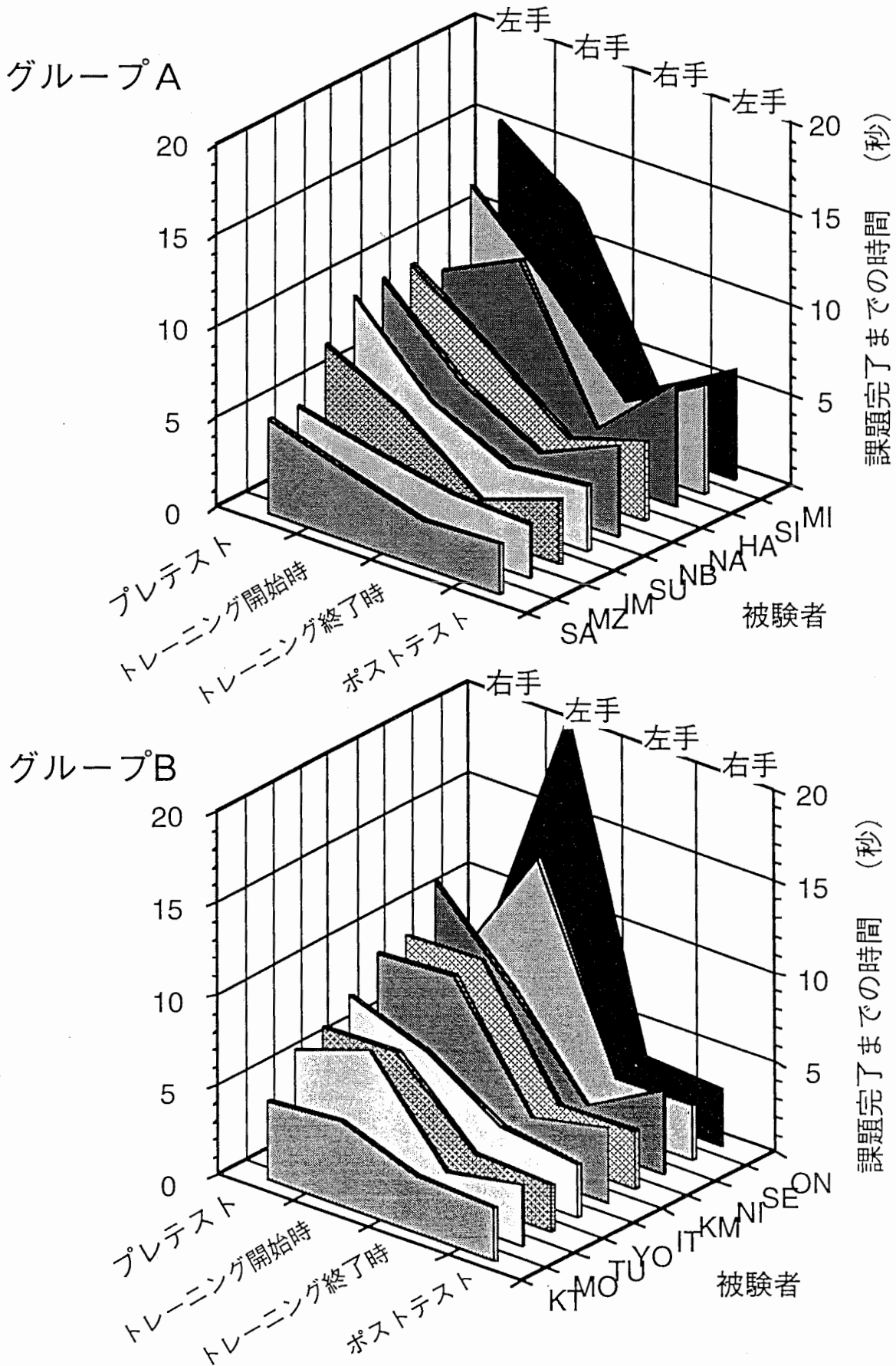


図2.9 実験3の結果：プレテスト，トレーニング開始時，トレーニング終了時，ポストテストにおける課題完了までの時間の平均値 (n=10) を被験者ごとに示した図。上の図は右手でトレーニングを行い左手でプレ (ポスト) テストを行ったグループAの被験者の結果。下の図は左手でトレーニングを行い右手でプレ (ポスト) テストを行ったグループBの被験者の結果。



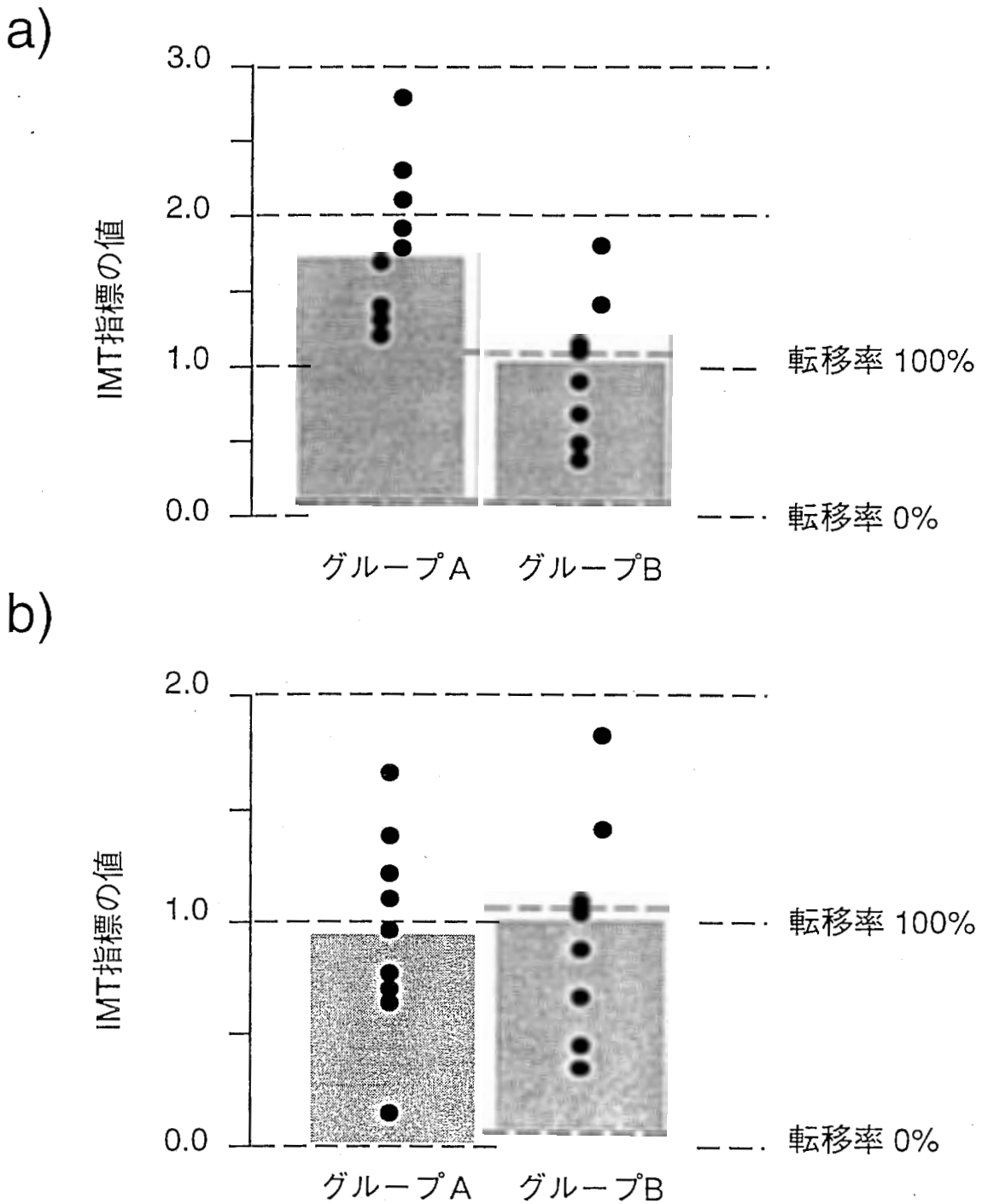


図2. 10 実験3の結果：各グループ毎の両手間転移率を示す図。グループAの被験者はトレーニング中に右手を用い、プレ（ポスト）テスト中には左手を用いた。グループBの被験者はトレーニング中に左手を用い、プレ（ポスト）テスト中には右手を用いた。黒丸（●）は各被験者のIMT指標の値に対応している。棒グラフは、各グループのIMT指標の平均値を示す(n=9)。a) 図2. 8に示したIMT指標の定義式にしたがって計算した結果。b) グループAのIMT指標の分母を1.68倍することによって、IMT指標の計算式の分母の大きさ（トレーニング中の学習量）を揃え、右手と左手の学習量の差をなくした場合の結果。

#### 2. 4. 4 考察

以上の実験結果は、両手間転移がほぼ完璧であること、従って「外部座標レベル」で学習がおきていたことを示唆している。

グループAとBでは、両手間転移率に有意差があった（U test,  $U=27, p<.02$ ）。グループBよりもグループAの平均値が大きいことから、利き手から非利き手へ学習効果が転移する方が、その逆よりも大きいことを示唆しているように思われる。しかし、この他にもつぎのような要因が考えられる。1) 右手を使ったときと左手を使ったときではトレーニングにおける学習量（式2. 1の分母）が異なっていた。2) 図2. 9から分かるようにグループBには、特に両手間転移率の低い2人の被験者（ONとSE）が含まれていた。

まず第一の点についてであるが、式2. 1の分母が大きいということは、相対的にIMT指標の値が小さくなるということである。図2. 9から分かるように、トレーニングにおける左手の学習量（グループB）の方が、右手の学習量（グループA）よりも大きい。実際、IMT指標の分母は、グループAで平均3.9（標準偏差=2.8）、グループBで平均6.6（標準偏差=4.7）であった。従って、トレーニング中の学習量は、左手を使ったときの方が、右手を使ったときの1.68倍大きかったことになる。グループAのIMT指標の分母を1.68倍することによって、分母の大きさを揃えると、図2. 10bに示す通り、グループAのIMT指標の平均は0.93となり、ほぼグループBの平均と等しく、両者の間で有意差は見られなくなった（U test,  $U=38.5, p>.1$ ）。いずれにしても、IMT指標の値が1.0に近いことには変わりない。

第2の点については、グループBから2人の被験者（ONとSE）を除外して、IMT指標の平均値を求めると1.08となり、やはりグループAとの間で有意な差は見られなくなった（U test,  $U=15.5$ ,  $p>.05$ ）。

以上の結果は、利き手から非利き手への両手間転移でも、その逆でも両手間転移がほぼ100%に近いことを示しており、学習が「外部座標レベル」で起きていたことを示唆している。

## 2. 5 考察

### 2. 5. 1 結果のまとめ

本章で述べた一連の実験1～3は、以下のように要約できる。まず実験1では、回転変換では90°から120°が最も難しいというCunningham (1989)の結果を確認した。次に実験2では、最も難しい変換角のひとつである90°変換を用いて、学習が起きるかどうかを検討した。その結果学習が起きることを確認した。最後に実験3では、その学習の両手間転移率が、利き手で学習しても非利き手で学習してもほぼ100%であることを発見した。

### 2. 5. 2 外部座標レベル以外での学習の可能性についての検討

ほぼ100%の両手間転移率は、外部座標で線形な変換に対する学習は「外部座標レベル」

で成立していたことを示唆しているが、以下のような可能性についてもここで検討する必要がある。1) 視覚環境の変換に対応する内部モデルが変更されたのではなく、単に認知的なストラテジーの変更により遂行成績が向上していた可能性。2) 100%の両手間転移率が、過去に報告された両手間転移効果を高める要因で説明できる可能性。

まず、第1の点について述べる。人間が、車の運転など複雑な運動技能を習得するとき、遂行成績の向上は意識的、認知的なレベルでの変化による場合が多い（例えば、レバーを操作する順番を覚えるなど）。この実験で用いた視覚運動課題も、無意識のレベルでおきる「外部座標レベル」の学習ではなく、認知的なストラテジーの学習により遂行成績が向上した可能性も考えられる。Cunningham & Vardi (1990) は、視覚フィードバックを回転変換した場合、被験者は弓状または螺旋状に手先を動かすことにより、ターゲットに容易に到達できると報告している ("arc strategy")。実験3で、被験者はプレテスト時には "arc strategy" に気付いていなかったが、トレーニング中に気付き、ポストテストでは "arc strategy" を用いていたとすれば、トレーニング終了間際の遂行成績とポストテストにおける遂行成績は等しくなり、IMT指標は1.0に近くなる。この場合、100%の両手間転移率は「外部座標レベル」での学習ではなく、単に認知的なストラテジーの変更のために生じたことになる。

被験者が "arc strategy" を用いていたかどうかは、軌道が弓状または螺旋状に曲がっているかどうかを調べれば分かる。図2. 11はグループAとBにおいて最もIMTが高かった被験者 (SUとYO) と低かった被験者 (HAとON) について、手先の軌道を示している。軌道の形状は、まず被験者によってだいぶ異なっているが、トレーニング終了間際の10試行とポストテストにおいて、被験者ONを除いて弓状または螺旋状に曲がってい

プレテスト

トレーニング中頃

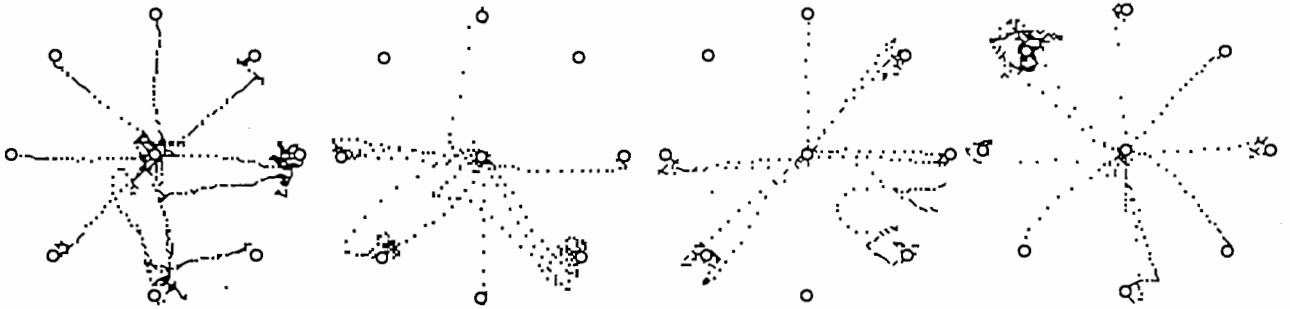
トレーニング終了間際

ポストテスト

SU IMT=2.8 グループA

#44 - #53

#88 - #97



YO IMT=1.8 グループB

#48 - #57

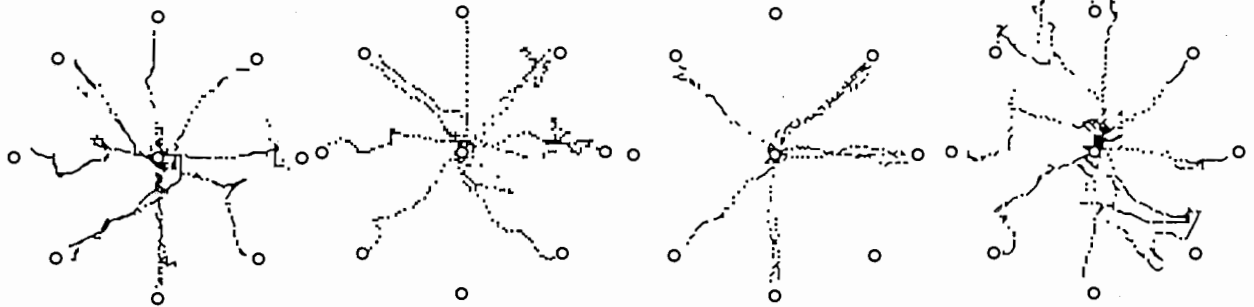
#95 - #104



HA IMT=0.21 グループA

#62 - #71

#124 - #133



ON IMT=0.27 グループB

#69 - #78

#138 - #147



図2. 11 実験3：プレテスト，トレーニング中頃，トレーニング終了間際，ポストテストにおける手先の軌道。グループAとBにおいて最もIMTが高かった被験者（SUとYO）と低かった被験者（HAとON）の軌道のみを示す。中心の丸（○）はスターと地点，周辺の丸はターゲットを表わす。軌道は65msごとに記録された。いずれの図も10試行の軌道を重ね書きしてある。

る形跡は見られない。特に I M Tが高かった被験者SUとYOでは、軌道はむしろポストテストにおいて直線的である。このことを量的に明らかにするために、Cunningham & Vardi (1990)と同様の方法で軌道の解析を行ったが、その結果は上に述べた観察を支持していた(補遺2. 1, p.59)。従って、100%の両手間転移率は認知的なストラテジーの変更のために生じたものではない。

第2に、過去に報告された両手間転移効果を高める要因(「2. 1. 3 両手間転移効果の研究史」p.24参照)で、100%近い両手間転移率を説明できるかどうか検討する。

●訓練スケジュール Taub & Goldberg (1973)は、プリズム順応において分散訓練(spaced training)の方が集中訓練(massed training)よりも高い転移率を生じさせると報告した。分散訓練では1試行行うごとに、30秒の休息を置いたが、それでも両手間転移率は59%であった。今回の実験2～3では課題は異なるが、試行間に1秒以上の休憩を入れることなく、連続して訓練を行ったが、ほぼ100%近い両手間転移率が得られた。

●視覚フィードバックの仕方 Cohen (1967)は、プリズム順応において連続視覚フィードバック(continuous visual feedback)では両手間転移は起こらないが、終端視覚フィードバック(terminal visual feedback)では両手間転移がおきると報告した。今回の実験では、カーソルはスタートからターゲットに入るまで表示しており、Cohenの分け方而言えば、連続視覚フィードバック条件であったが、ほぼ100%近い両手間転移率が得られた。

以上のように、今回の実験条件は訓練スケジュールにおいても、視覚フィードバックの仕方においても、両手間転移効果が起こりにくい条件で行われたが、ほぼ100%の両手間転移率が得られた。これは主として、過去の研究がプリズム順応における両手間転移を調

べて来たのに対し、本研究はデジタイサとCRT画面を用いた視覚運動変換課題を用いたことに原因があると考えられる。訓練スケジュールと視覚フィードバックの要因が、本研究で用いたような視覚運動学習の両手間転移に、どのような影響を与えるかを調べることは今後の研究課題である、

### 2. 5. 3 計算論, 生理学, 行動実験に共通の枠組み

「外部座標レベル」「身体座標レベル」という枠組みは、計算理論のモデルにおいて、視覚運動学習がどのレベルで起きているかということ特定するのに役立つ。一方、神経生理学の分野においても、「外部座標レベル」「身体座標レベル」という区別を支持する知見が得られている。

生体における運動制御機構を考えると、「制御」と「学習」は理論的には独立に考えることができる。運動を「制御」する場面において、「外部座標レベル」「身体座標レベル」の両方が必要であることは先にも述べたが、本章において報告した一連の実験は、視覚環境を外部座標において線形変換したとき、到達運動の「学習」がどちらのレベルでおきているかということ調べた。一方、「制御」において外部座標レベルの表象と、身体座標レベルの表象が存在するということは生理学的にも確かめられている。Tanji, Okano & Sato (1987) は、サルの1次運動野の神経細胞の発火頻度は、反対側の腕の筋肉の張力に比例するが、補足運動野や運動前野の細胞の発火頻度は特定の筋肉の張力とは関係がないことを示している。1次運動野の細胞は、反対側の腕を用いて運動を行うときにしか発火しないが、補足運動野や運動前野の細胞はある特定の運動課題（この場合ボタン

を押すという動作)を行うとき、右左どちらの腕を用いて運動を行っても等しい頻度で発火する。従って、1次運動野の細胞は「身体座標レベル」で運動を表象し、補足運動野や運動前野の細胞は「外部座標レベル」で運動を表象していると考えられる。

しかし、運動「学習」について「外部座標レベル」と「身体座標レベル」の表象が存在するかどうか、神経生理学的にはまだ解っていない。運動学習には運動野などの大脳皮質よりも、小脳や基底核など皮質下の構造が重要な役割を果たしていると考えられているが(例えば、Ito, 1989)、これらの構造において「外部座標レベル」と「身体座標レベル」を区別するような知見はまだ得られていない。生体がある運動課題を学習するとき、例えば学習の基礎となる神経細胞のシナプス伝達効率の変化が「外部座標レベル」でおきるか「身体座標レベル」でおきるか調べることは、運動学習の階層性を計算論的に明らかにするためにも重要なことであると思われる。

両手間転移現象は、心理学において古くから調べられてきたが、学習の両手間転移を可能にするメカニズムを計算論や生理学の立場から明らかにする試みは、まだ行われていない。これはまず心理学、計算論、生理学に共通する枠組みがなかったためであると考えられる。「外部座標レベル」「身体座標レベル」という枠組みはこれらの分野に共通の枠組みを提供する。

#### 2. 5. 4 結論

本章では、外部座標においては線形、身体座標においては非線形となるような視覚環境の変換条件下で、繰り返し到達運動の訓練を行った場合、外部座標のレベルで学習が成立



することを確認した。次の章では、外部座標において非線形、身体座標で線形となるような変換を用いたときに、外部座標のレベルで学習がおきるか、身体座標のレベルで学習がおきるかを調べる。

## 補遺 2. 1 実験3における軌道形状の定量的解析

各グループにおいて、IMT指標が最も高かった被験者（SUとYO）と低かった被験者（HAとON）について、ポストテストにおいて"arc strategy"を用いていたかどうかを調べるため、Cunningham & Vardi (1990)と同じ方法を用いて軌道の解析を行った。まず、図2. 12 aに示すように、手先の現在位置とターゲットを結ぶ線分と手先の現在位置における軌道の接線がなす角を $\phi$ 、手先の現在位置とターゲットの間の距離を $r$ とする。

Cunningham & Vardiは、図2. 12 bに示すように $\phi$ を $r$ の関数として表わした。被験者が"arc strategy"を用いていれば、軌道は螺旋状または弓状になる。弓状になっている場合は $\phi$ は0より大きい一定な値であり、螺旋状になっている場合は $\phi$ は単調に減少する。しかし、軌道がターゲットに向かう直線である場合、 $\phi$ は常に0となる。

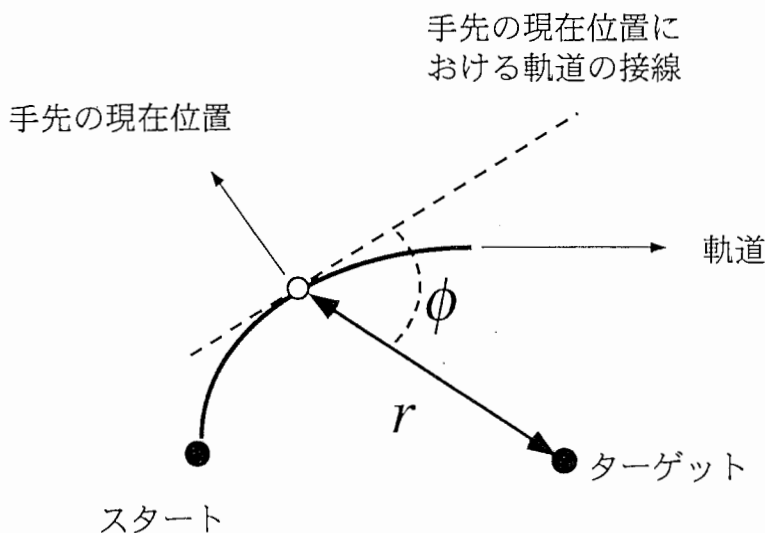


図2. 12 a 実験3での手先軌道形状の定量的解析方法を示す図。手先の現在位置とターゲットを結ぶ線分と手先の現在位置における軌道の接線（破線）がなす角を $\phi$ 、手先の現在位置とターゲットの間の距離を $r$ とする。 $r$ の値が小さくなる（手先がターゲットに近くなる）につれて、 $\phi$ の値がどのように変化するか調べる。この方法はCunningham & Vardi (1990)に準ずる。

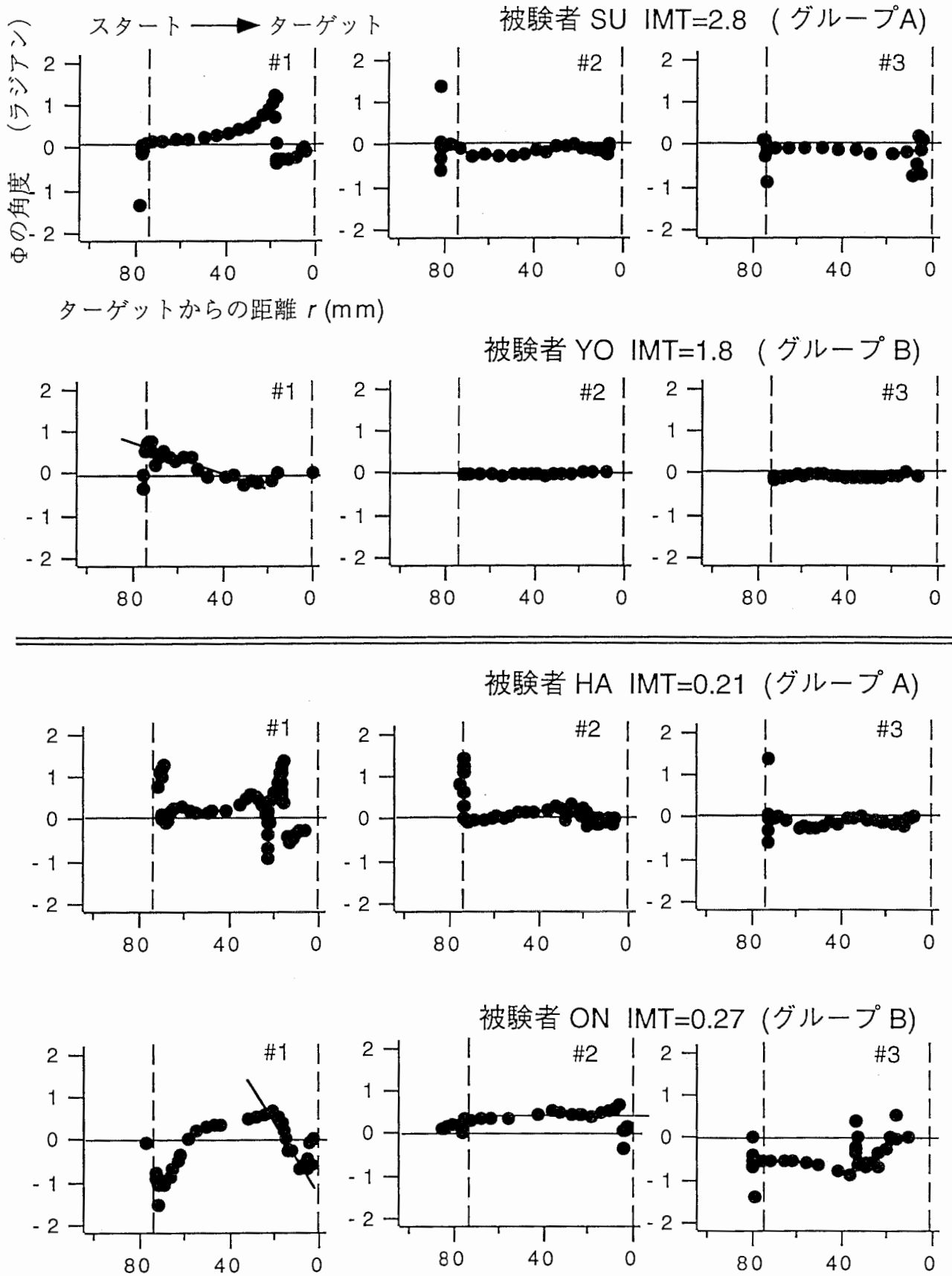


図2. 12 b 実験3：軌跡形状の定量的解析結果 ( $r$ の関数として表わした $\phi$ )。グループAとBにおいて最もIMTが高かった被験者(SUとYO)と低かった被験者(HAとON)の結果を示す。図は左からポストテスト第1試行(#1), 第2試行(#2), 第3試行(#3)の結果を示す。黒丸(●)は65ms毎に記録された軌道上の各点における $\phi$ の角度を示す。

図2. 1 2 bはポストテスト開始時の3試行について、 $r$ が減少する（手先がターゲットに近づく）につれて $\phi$ がどのように変化するかを表わしている。被験者ONの場合は、図2. 1 2 bに直線で示したように、ターゲット付近で $\phi$ が単調に減少したり（第1試行）、0より大きい一定な値となったり（第2試行）している。これは、この被験者がポストテストにおいて部分的に"arc strategy"を用いていたことを示唆している。しかし、IMT指標の高い被験者（SUとYO）においては、第1試行を除いて、 $\phi$ は常に0となっていた。このことは被験者は第1試行（課題を行う手を換えた直後）においては、"arc strategy"を用いていた、修正運動を行っていたりしていたが、第2試行以降はほぼターゲットに向かって直線的な軌道上で手先を動かしており、"arc strategy"は用いていなかった。

Cunningham & Vardi (1990)の実験において顕著であった"arc strategy"が、今回の実験では用いられなかった理由は2つ考えられる。ひとつは被験者への教示の違いと、もうひとつは被験者の学習程度が異なるということである。Cunningham & Vardiの実験では課題の遂行に関して「軌道がなるべく直線になるように」という教示のみが与えられ、今回の実験のように「なるべく早くターゲットまで移動する」とい教示は与えられなかった。また、今回の実験のように学習に焦点をあてている訳ではないので、始め数回の練習試行を行っただけで、被験者を十分トレーニングすることはしていなかった。到達運動を繰り返し練習するにつれて、手先の軌道が滑らかなになり、直線に近づくことは良く知られている (Georgopoulos, Kalaska & Massey, 1981)。またFlash & Hogan (1985)は、このような滑らかな2点間の直線軌道を説明する数理モデルを提案している。これらのことから、IMT指標の高い被験者は、十分なトレーニングを行った後では、 $90^\circ$ の回転変換下でも"arc strategy"を用いることなくごく「自然に」手先を動かしていたことがわか

る。実際、実験2では120回の練習終了間際において、課題完了までの時間は3秒以下になっている。一方、実験1においては $0^\circ$ 変換の場合の課題完了までの時間を調べているが、2.5秒以上かかっている。従って、トレーニング終了後には、無変換の場合と同等の速さで到達運動を行っていたことになる。

以上の解析と考察から明らかのように、今回の実験で得られた100%近い両手間転移効果は、トレーニング中の認知的なストラテジーの変化では説明できない。

## 第3章 身体座標の線形変換に対応する内部モデル

既に指摘したように、これまでの変換実験で用いられてきた変換は、外部座標において線形変換（または平行移動）となるものがほとんどであった。例えば、プリズム順応であれば平行移動（図1. 1参照, p.2）であり、鏡映描写であれば上下対称変換（図1. 2参照, p.3）であった。このような変換は一般に身体座標における変換としては非線形な変換となる。第2章では、このような変換が外部座標レベルで学習されることを確認した。本章では、これまでの変換実験で用いられてきた変換とは逆に、身体座標において線形、外部座標において非線形となる変換を用いて、このような変換に対応する学習がどのレベルで成立するかを調べる。

### 3. 1 論理

#### 3. 1. 1 視覚環境の変換による関節角変換

具体的には、次のような変換を行った。図3. 1は、被験者を上から見たところである。被験者は肩の高さの水平面において腕の2関節運動を行うものとし、肩の関節角を $\theta_1$ 、肘

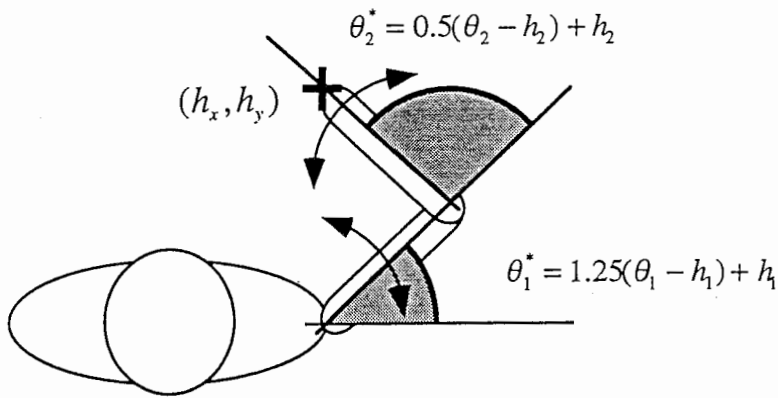


図3. 1 関節角変換の仕組みを示す図。被験者を上から見た図。被験者はほぼ肩の高さの水平面で、2関節の到達運動を行う。水平面内の一点 $(h_x, h_y)$ （図中の+印に示した点）に手先があるときの肩の関節角 $\theta_1$ の値を $h_1$ 、肘の関節角 $\theta_2$ の値を $h_2$ とする。この位置からの変位に応じて、肩の関節角を1.25倍、肘の関節角を0.5倍する。

の関節角を $\theta_2$ とする。また、水平面内の一点 $(h_x, h_y)$ に手先があるとき、関節角 $(\theta_1, \theta_2)$ が $(h_1, h_2)$ であるとする。この点を不動点として、肩の関節が1.25倍、肘の関節が0.5倍されるような変換を考える<sup>1</sup>。変換後の関節角を $\theta_1^*$ 、 $\theta_2^*$ とすると、この変換は、

$$\begin{aligned}\theta_1^* &= 1.25(\theta_1 - h_1) + h_1 \\ \theta_2^* &= 0.5(\theta_2 - h_2) + h_2\end{aligned}\tag{3. 1}$$

という式で表わされる。従って、この変換を実現するためには、まず関節角を計測する必要があるが、それは手先の位置 $(x, y)$ を計測し、逆キネマティクス変換（手先座標→関

<sup>1</sup>本章の実験では、すべてこの変換を用いている。この変換は2つの係数がどちらも1のとき、無変換となり、1との差の絶対値が大きくなるほど手先座標とCRT座標の間の歪みは大きくなる。学習効果を見るためには、なるべく1との差の絶対値が大ききな係数を用いる方が望ましいが、あまり歪みが大きくなりすぎると、人間の関節が実現できないような関節角度（肘の関節を $180^\circ$ 以上曲げるなど）をとらなければ到達できない領域や、被験者自身の体が障害物となって到達できない領域が生じる。この実験で用いられた0.5と1.25という係数の組み合わせは、人間の腕で到達出来ない領域がほとんどなく、しかも歪みが最も大きいときの係数である。

節座標) の式

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right)$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \arctan\left(\frac{l_2 \sin(\theta_2)}{l_1 + l_2 \cos(\theta_2)}\right)$$

に代入することによって求めることができる。  $l_1$  は肩から肘までの長さを、  $l_2$  は肘から手先までの長さであるが、これは被験者によって異なるので、予め計測する必要がある。このようにして求められた関節角 ( $\theta_1, \theta_2$ ) を式 3. 1 に従って変換する。その後、順キネマティクス (関節座標→手先座標) の式

$$X = l_1 \cos \theta_1^* + l_2 \cos(\theta_1^* + \theta_2^*)$$

$$Y = l_1 \sin \theta_1^* + l_2 \sin(\theta_1^* + \theta_2^*) \quad 3. 2$$

を用いて、手先の現在位置に対応するCRT画面上のカーソルの位置を計算する。

この変換を、手先座標とCRT座標の関係において示したのが、図 3. 2 である。図 3. 2 b は、被験者が手先の到達可能領域 (肩の関節が  $+90^\circ$  以上になる場合を除く) 内で、図 3. 2 a のように手先を碁盤の目に沿うようにしてまっすぐ動かした場合の画面上のカーソルの軌跡を示す。同様に、図 3. 2 c は、CRT画面においてカーソルをまっすぐ動かした場合の手先の軌跡を示す。この図から解るように、この変換は手先座標とCRT座標の関係 (外部座標の変換) においては、非線形変換となっている。

また、図 3. 2 で示した変換では、不動点において肩の関節が  $40^\circ$ 、肘の関節角が  $100^\circ$  となっている。すなわち、式 3. 1 において、 $(h_1, h_2) = (40^\circ, 100^\circ)$  の場合である。以下の実験では全てこの不動点を用いた。その理由は以下の通りである。1) 手先座標およびCRT座標で、不動点が到達可能領域のほぼ中央に位置する。2) 肩の関節が  $40^\circ$ 、



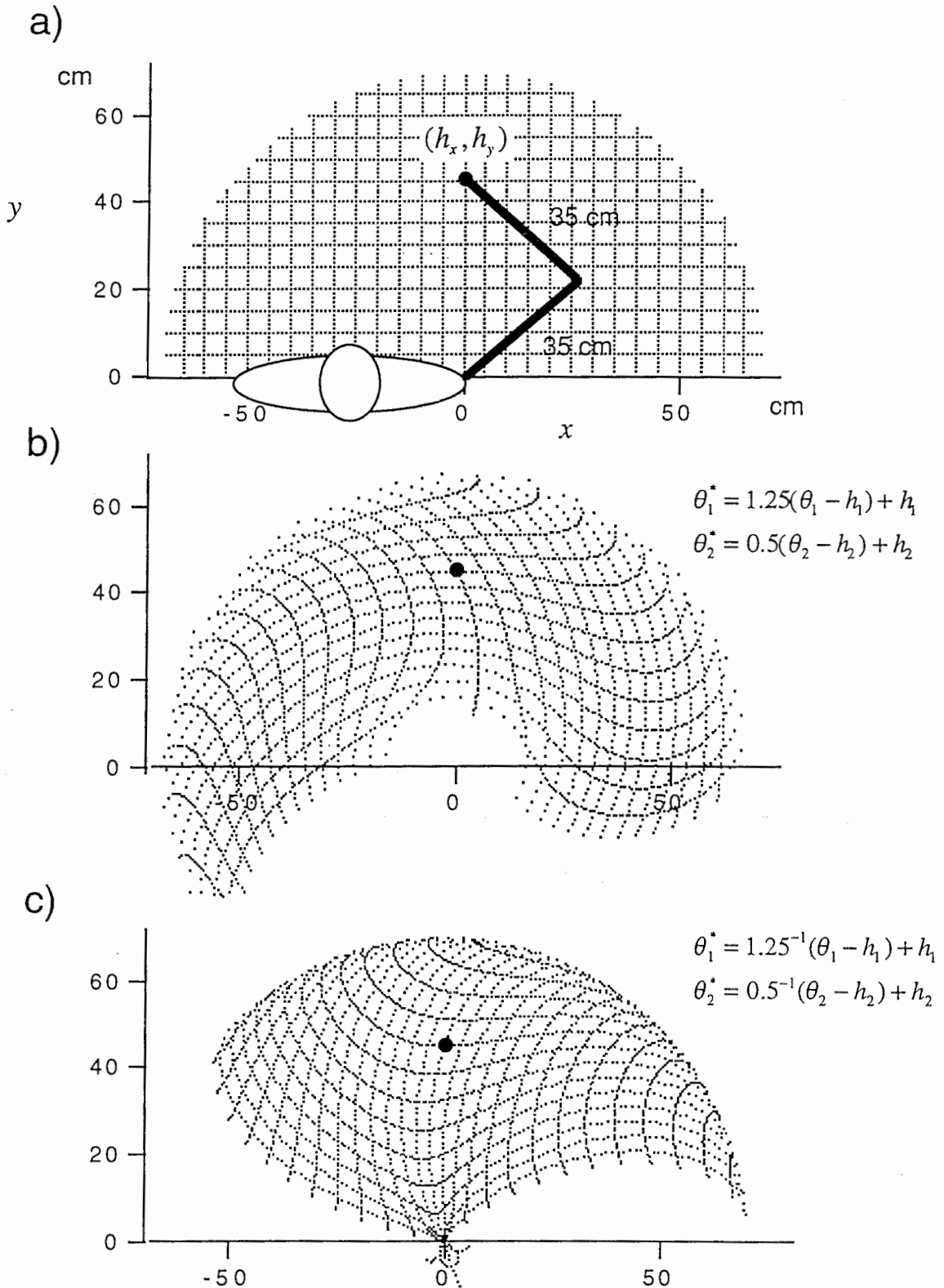


図3.2 図3.1に示したような関節角変換条件下での手先座標とCRT座標の関係. a)は到達可能領域内で5cmおきに縦横の直線を引いたところを示す. 変換条件下で, 被験者がa)のような基盤の目に沿って, 手先をまっすぐ動かしたとき, 画面上のカーソルの軌跡はb)のようになる. また, 逆にCRT画面上でカーソルをa)のような基盤の目に沿ってまっすぐ動かしたとき, 手先の軌跡はc)のようになる. 図中の黒丸(●)はこの変換における不動点(肩と肘の関節角がそれぞれ40°, 100°となるような点)を示す. b)で表わされるような変換とc)で表わされるような変換は, 互いに逆変換の関係にある.

肘の関節角が $100^\circ$ となる近辺が、筋電図の振幅が最も小さく (Schmidt, 1988) 楽な姿勢であると考えられる。

### 3. 1. 2 目的

このような変換条件下において、被験者に到達運動の訓練を繰り返し行わせるとき、2つの学習形態が考えられる。ひとつは身体座標レベルで線形な変換を学習することであり、もうひとつは外部座標レベルで非線形な変換を学習することである。この実験では、どちらの形態の学習が起きるかを調べる。仮に、中枢神経系において身体座標の内部表現が存在し、それが学習によって適応的に変化するならば、より単純な身体座標での線形変換を学習することが予想される。

### 3. 1. 3 身体座標の変換として学習されているかどうかを検討する論理

この変換が、身体座標の変換として学習されているかどうかを調べるために、次のような論理に基づいて実験を行った。図3. 3 dは手先の位置から計測した右肩の関節角を1.25倍し、右肘の関節角を0.5倍した場合を示している。しかし、この手先の位置を、肩の位置と同じである左手の手先の位置と考えて、同様の変換を行うことも可能である (図3. 3 cとa)。すなわち、実際に使っている腕と反対側の腕の変換を行うことになる。A) 実際に使っている腕の関節角変換とB) 実際に使っている腕と反対側の関節角変換は以下のような関係がある。図3. 4に示すように手先座標とCRT座標の関係 (外部座標の

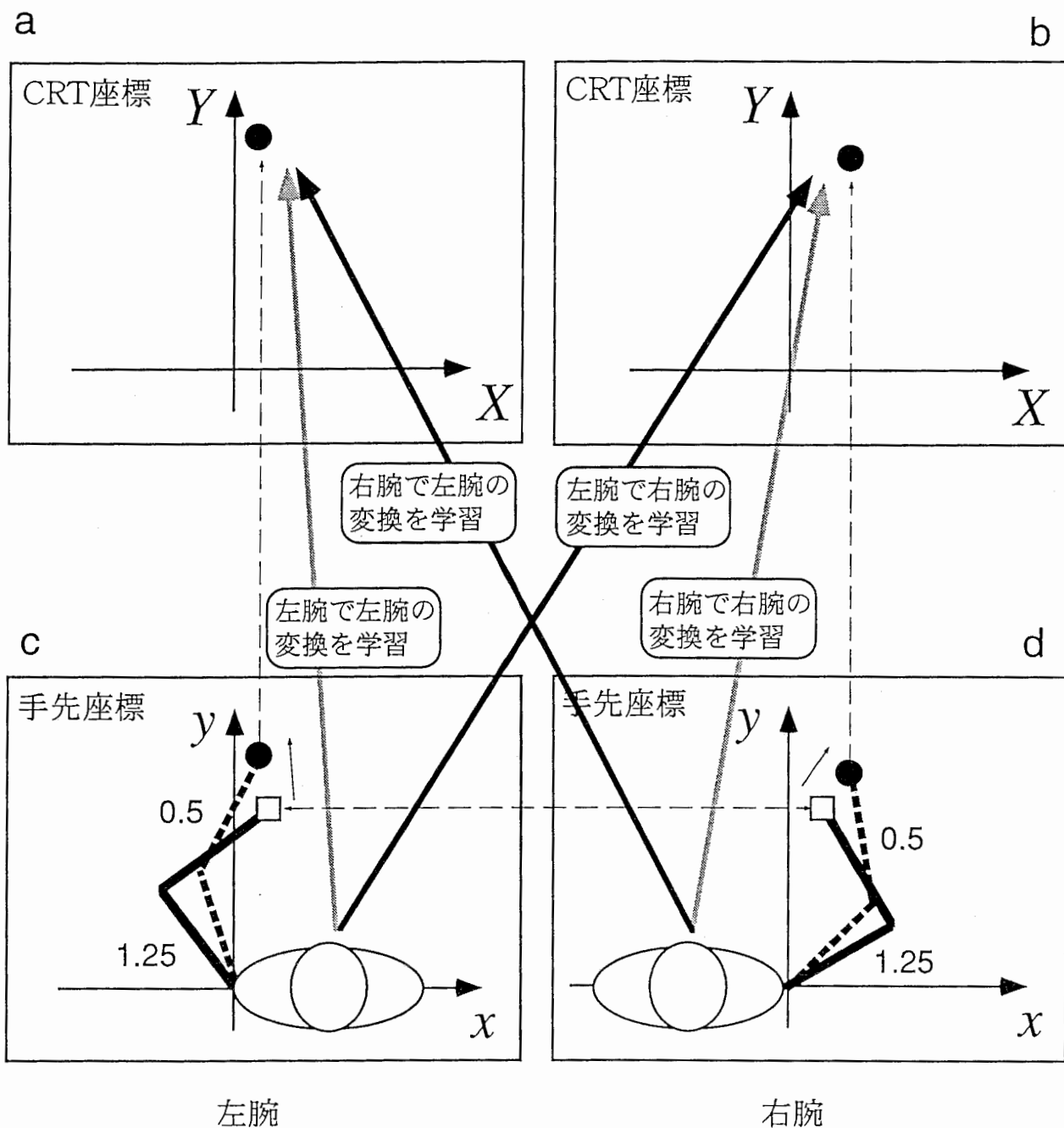


図3.3 『実際に使っている腕とは反対側の腕の変換』を示す概念図. 例えば, dに示すように右腕で到達運動をしているとき, 手先の位置 (□) に対応するカーソル (●) を, 肘の関節角を0.5倍, 肩の関節角を1.25倍したような位置に表示する (b) のが『実際に使っている腕の変換』である. しかし, dの手先の位置 (□) を左腕の手先の位置と考えて, そのときの左腕の関節角を変換し (c), 変換後の手先の位置を画面上のカーソル (●) として表示することも可能である (a). その場合, 右腕で左腕の変換を学習することになる. このような変換を本論文では『実際に使っている腕とは反対側の腕の変換』と呼んでいる.

変換) としては、両者の変換はy軸対称となり、同様の複雑さである。しかし、関節角の変換 (身体座標の変換) として考えたとき、A) は式 3. 1 (p.64) で表わされるような変換であるが、B) は、以下のような変換になる (詳細は補遺 3. 1 参照, p. 87) .

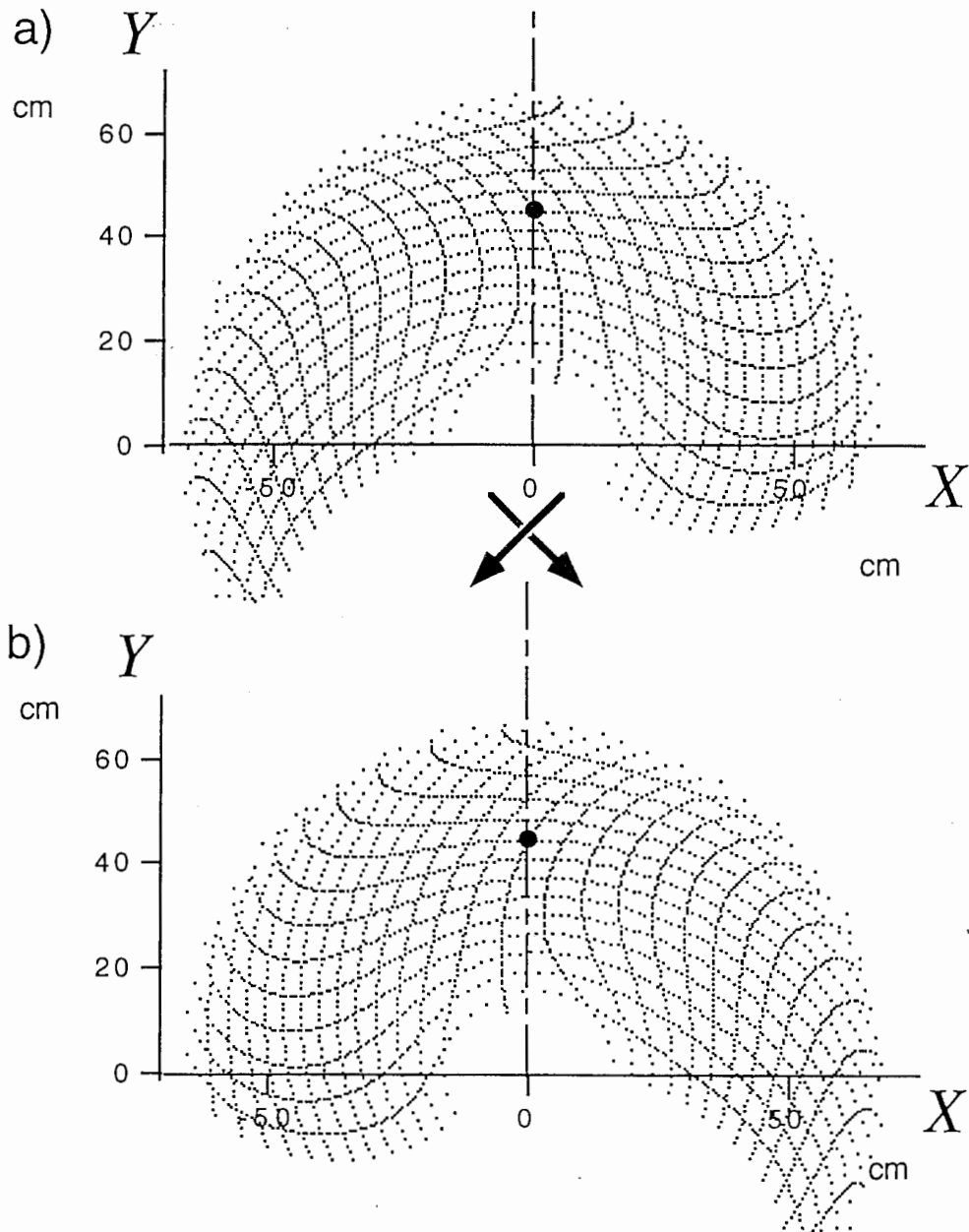


図 3. 4 右腕の変換 (a) と左腕の変換 (b) の比較. いずれも, 図 3. 2 a) に示したような基盤の目に沿って手先をまっすぐ動かした時のCRT画面のカーソルの軌道を示している. 図から解るように右腕の変換と左腕の変換はy軸対称となり, 手先座標とCRT座標の間の変換として考えると, 変換の複雑さは同等であると考えられる. 図中の黒丸 (●) は不動点を示している.

$$\theta_1^* = 1.25\theta_1 + (1 - 1.25)\pi - h_1$$

$$+ 2 \cdot 1.25 \arctan\left(\frac{l_2 \sin\theta_2}{l_1 + l_2 \cos\theta_2}\right) - 2 \arctan\left(\frac{l_2 \sin(0.5\theta_2 + h_2)}{l_1 + l_2 \cos(0.5\theta_2 + h_2)}\right)$$

$$\theta_2^* = 0.5\theta_2 + h_2 \quad 3.3$$

このように式3.1で表わされるような変換は、ある一点を不動点として、肩および肘の関節角を定数倍するような線形変換であるのに対し、式3.3で表わされるような変換は、肘の関節角に応じて肩の関節角を変化させるような複雑な変換で、しかも非線形変換である。数学的に複雑であることが、必ずしも生体にとって難しいことではないが、式3.1で表されるような変換（実際に使っている腕の関節角変換）と式3.3で表わされるような変換（実際に使っている腕と反対側の関節角変換）では、以下のような理由から、生体にとって後者の方が難しいと考えられる。第一に、仮にニューラルネットにこれらの変換を学習させようとするとき、式3.1で表わされるような変換はわずか2層のパーセプトロンで実現できるが、式3.3で表わされるような変換は3層以上のパーセプトロンが必要になり、しかも前者に較べて学習にかかる時間は非常に長くなる。第二に、神経生理学や生体工学の分野で、これまでに提案されてきた身体座標の内部表現としては、関節角の他に関節トルク、筋張力、運動司令などがあるが、式3.1で表わされる変換はどの表現で考えても、近似的には単純な定数倍の変換である。第三に、非線形な変換でも生体にとっては学習が容易であると考えられる変換（例えば、 $y=|x|$ など）もあるが、式3.3がそのような変換に相当するとは考えられない。

この2つの変換に対する学習を次の2点において比較することにより、被験者が身体座標の変換として学習しているか、外部座標の変換として学習しているかどうかを調べることができ。第一に、変換A（実際に使っている腕の関節角変換）とB（実際に使ってい

る腕と反対側の関節角変換)の難しさの比較である。外部座標の変換として学習しているならば、AとBの変換はy軸対称なので同程度の難しさであるが、身体座標の変換として学習しているならば、上記のような理由からAよりBの変換を学習する方が難しいと予想できる。第二に、片方の腕でAを学習した後、反対側の腕でAまたはBを学習させたときの転移効果である。片方の腕でAを学習した後、反対側の腕でAを学習させた場合、外部座標の変換として学習されているならば、異なる変換を学習することになるので転移効果は見られないはずである。しかし、身体座標の変換として学習しているならば、右腕と左腕の違いはあるが、同じ変換規則を適用すれば良いので正の転移効果がみられる可能性がある。また、片方の腕でAを学習した後、反対側の腕でBを学習させたとき、身体座標の変換として学習しているならば、異なる変換を学習することになるので転移効果は見られないが、外部座標の変換として学習されているならば、同じ変換を学習し続けることになるので正の転移効果がみられるはずである。

具体的には、4人の被験者に、表3.1に示すような変換の組み合わせで学習をさせ、2つの変換の難しさと転移効果を調べた。実験のデザインとしては、まず被験者YFとMYにおいて、関節角を線形変換するような視覚環境の変換条件下で、両手間転移効果があるかどうかを調べる<sup>2</sup>。次に、被験者HWとMNにおいて、実際に使っている腕の変換を学習させた後(課題1)、実際に使っている腕とは反対側の腕の変換を学習させ(課題2)、上記の理論的な予測に基づき、身体座標の変換として学習したか、外部座標の変換として

---

<sup>2</sup>ここでは、関節角度空間での両手間転移効果を調べることになるが、仮にそれが確認できたとしても、第2章実験3で調べたような視覚フィードバックを90°回転変換した条件下での両手間転移現象は、関節角度空間での両手間転移効果では説明できない。左右の肩を結ぶ線分の垂直二等分面(mid-sagittal plane)での対称変換であるならば、手先とカーソルの軌道を左右の腕の関節角で表現すると同じものになるので、関節角度空間の両手間転移効果で説明できるが、90°回転変換では特殊なターゲット方向への到達運動を除いて、手先とカーソルの軌道の関節角表現は異なる。

学習したかを調べる。

<表3. 1> 被験者毎の学習課題

		課題1	課題2
被験者	YF	左腕で左腕変換の学習 <sup>A</sup> (L L) →	右腕で右腕変換の学習 <sup>A</sup> (R R)
被験者	MY	右腕で右腕変換の学習 <sup>A</sup> (R R) →	左腕で左腕変換の学習 <sup>A</sup> (L L)
被験者	HW	左腕で左腕変換の学習 <sup>A</sup> (L L) →	右腕で左腕変換の学習 <sup>B</sup> (R L)
被験者	MN	右腕で右腕変換の学習 <sup>A</sup> (R R) →	左腕で右腕変換の学習 <sup>B</sup> (L R)

A: 実際に使っている腕の変換 B: 実際に使っている腕と反対側の腕の変換

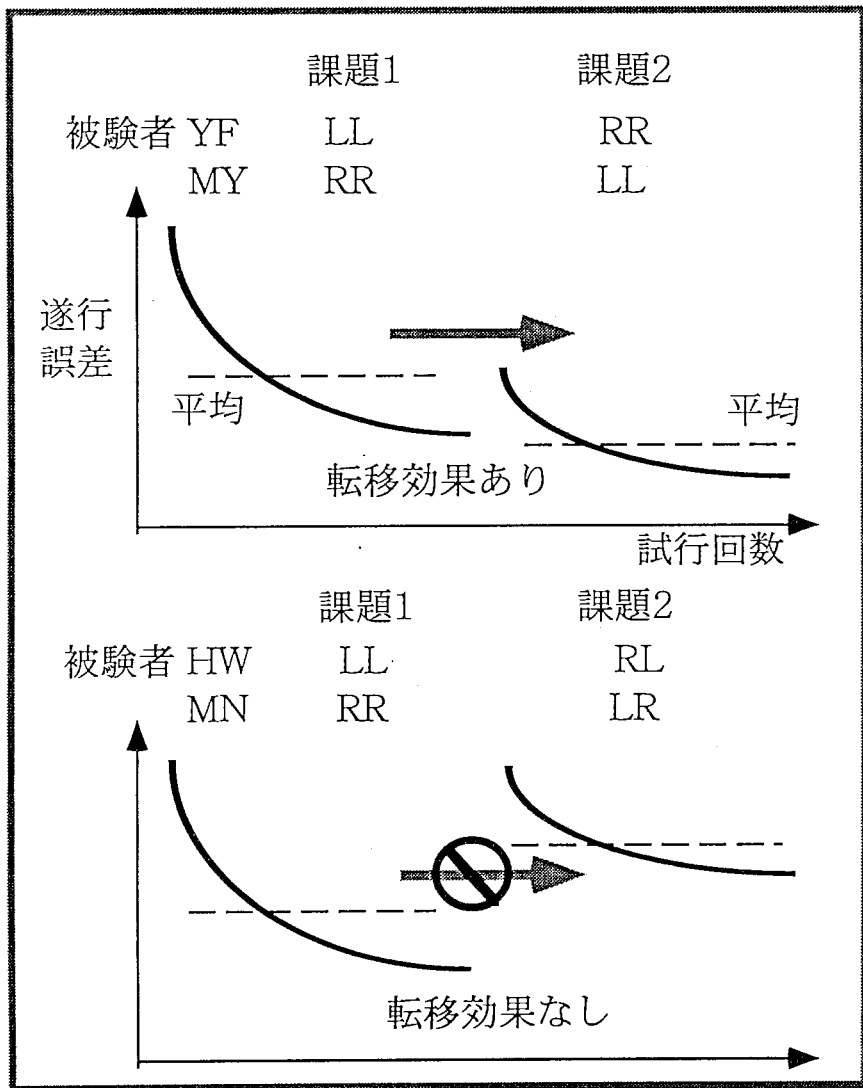
身体座標の変換において両手間転移効果があると仮定した場合に予想される結果を図3.5に示す。身体座標の変換として学習している場合、被験者YFとMYにおいて転移効果がみられ、被験者HWとMNにおいては転移効果がみられないが、外部座標の変換として学習している場合は、その逆になることが予想される。

### 3. 2 方法

#### 【被験者】

被験者は男女4人（被験者MY, HWが女性）。同志社大学の1～3回生で年齢は18～22歳であった。被験者として協力することで時給1000円が支払われた。実験の目的は知らせていなかった。視力（矯正を含む）および上肢運動機能は正常で、全員右手利きであった。また、各被験者の課題は表3. 1に示す通りであった。

関節角（身体座標）の変換として学習した場合



手先座標とCRT座標の変換（外部座標の変換）として学習した場合

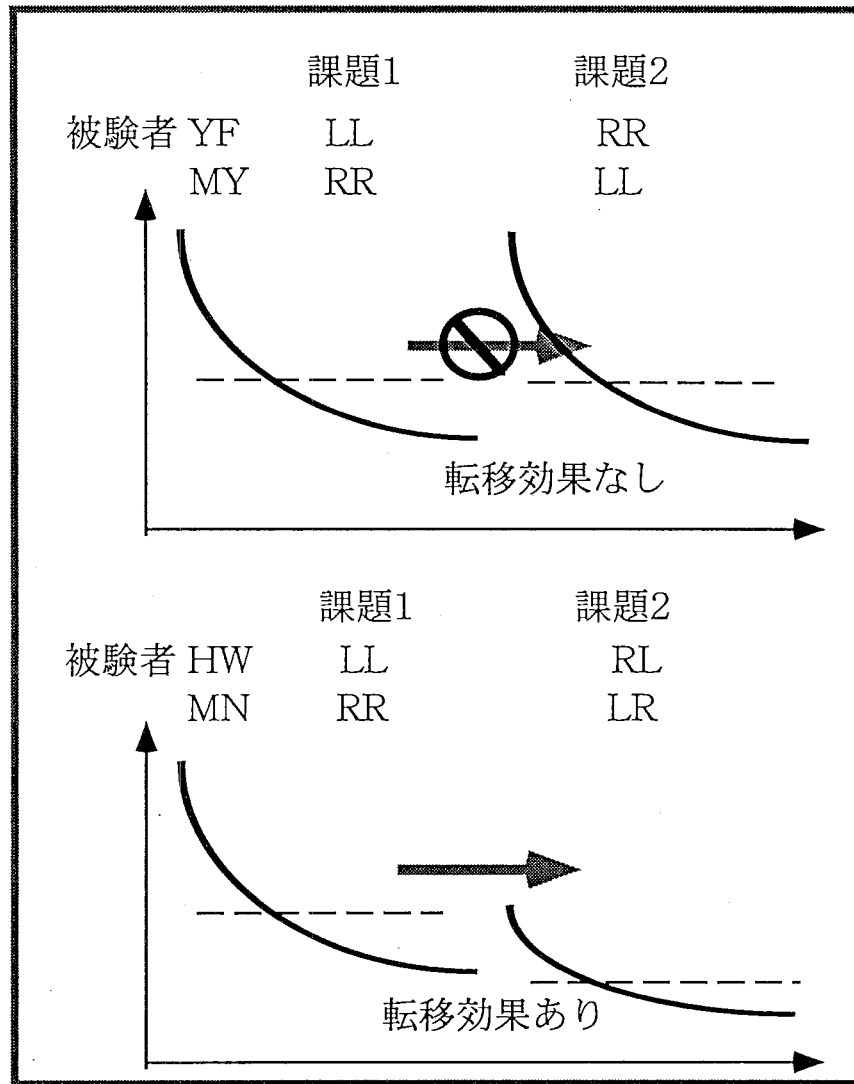


図3. 5 予想される結果を示す図。横軸に試行回数，縦軸に課題の遂行誤差をとって学習曲線を示す。被験者が身体座標の変換として学習している場合，実際に使っている腕の変換（LL,RR）のみを学習する被験者YFとMYにおいて転移効果が見られるが，外部座標の変換として学習している場合は，その逆になることが予想できる。ただし，ここでは身体座標レベルで両手間転移があることを前提としている。



### 【実験装置と刺激】

図3. 6に示すように第2章の実験と同様の装置を用いた。異なる点は、第2章の実験ではデジタイザで手先の位置を計測していたが、本章の実験ではCCDカメラによる位置計測装置（Northern Digital OPTOTRAK）を用いている点である。被験者の前には板が水平に置かれ、被験者は手先がやや板に触れるくらいの高さを保って、水平面内で到達運動を行う。被験者の手先に計測装置のマーカーを付けた。マーカーの現在位置は先に述べたような変換を経た後に画面上のカーソルとして表示された。マーカーの位置は100Hzで記録した。計測装置の空間分解能は0.1mm以上であった。

運動の始点は各被験者の手先座標において、手先が無理なく到達できる範囲内でランダムに決めた。運動の終点は、始点からの距離が150~400mmになる範囲でランダムに決めた。図3. 7はある被験者において実際に用いられた50試行分の始点と終点の組を、CRT座標と手先座標において示している。

### 【実験手続き】

#### 1) 被験者へのインストラクション

実験者は、実験前に被験者に対して変換の仕組み（変換によって肩の関節角は1.25倍、肘の関節角は0.5倍されること）を説明し、課題が「制限時間（900 ms）で、なるべくターゲットの近くまでカーソルを移動させることである」ことを告げた。

#### 2) 一試行の手続き

図3. 8は試行毎の手続きを示している。基本的な手続きは以下のようであった。まず画面にスタート（○）とターゲット（●）が現われ、被験者はスタートまでカーソルを移動させて待機した。4秒後にコンピュータからクリック音が出るので、被験者はそれを合

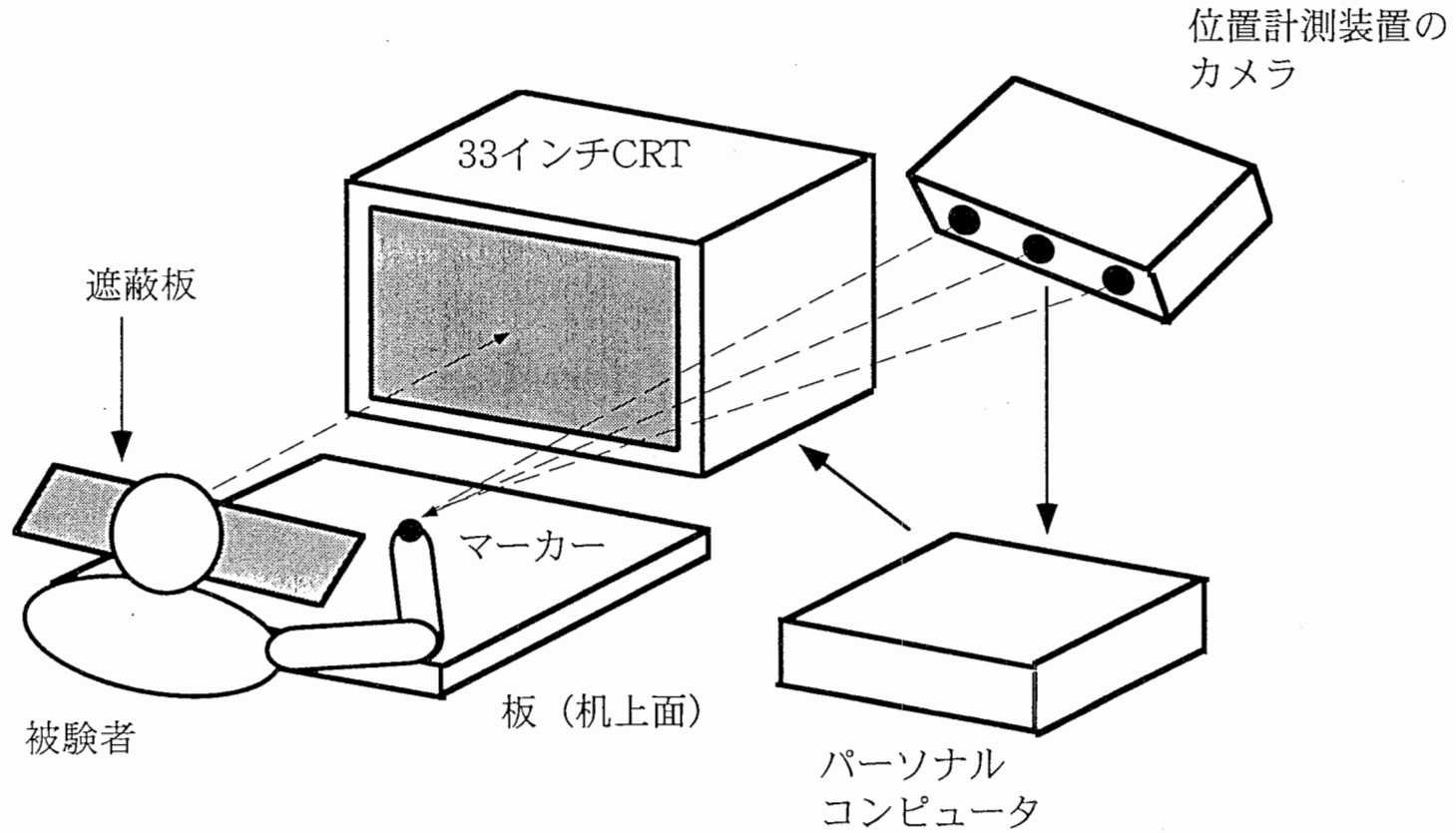


図3.6 実験装置の配置図。被験者を斜め後ろから見た図。被験者の前に置かれた机の上面はほぼ肩の高さにある。直接手先を見えないようにするため、被験者の前に遮蔽板を置いた。手首の関節を固定するため、被験者の手の甲と手首を円筒形の金具で覆い、金具の先端に位置計測装置のマーカーを付けた。また、肩の位置が動かないように、被験者の体を歯科治療用の椅子にベルトで固定した。被験者の目とCRT画面の間の距離は1.0 m。

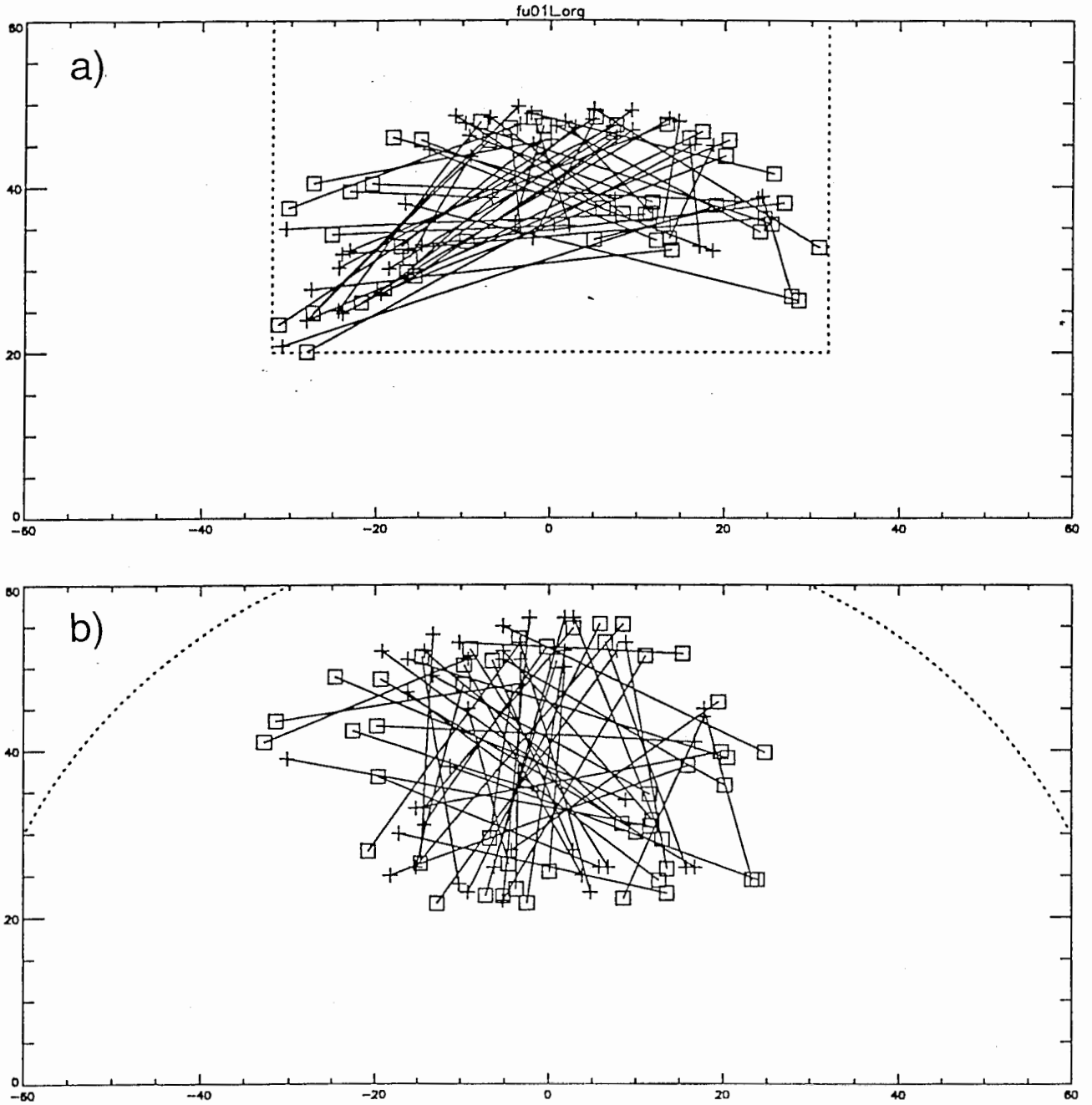


図3.7 50試行 (=1ブロック) 分の始点と終点の例. 被験者YFの課題1における第1ブロックで実際に使われた. 図a) CRT座標における始点 (+) と終点 (□). 組となる始点と終点を直線 (実線) で結んでいる. 破線はCRT画面の枠を示す. 図b) 手先座標における始点 (+) と終点 (□). 破線は被験者の手先の到達可能領域を示す. (0,0)が肩の位置である.

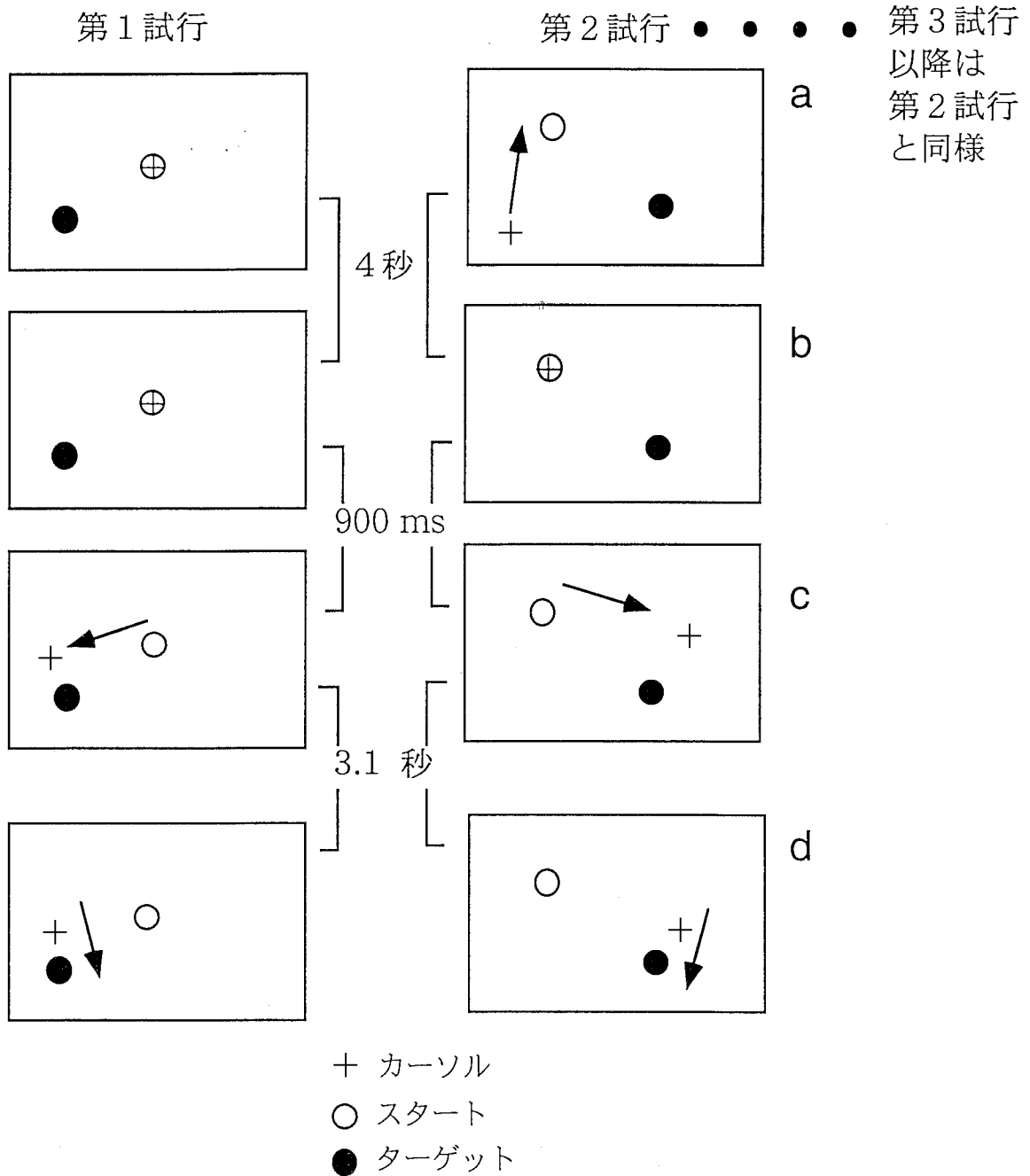


図3. 8 1 試行の手続きをCRT画面において示した図. 左の図は各ブロックにおける第1 試行を, 右の図は第2 試行以降の手続きを時間を追って示している. a) 画面にスタート位置とターゲットが現われるので, 被験者はスタートまでカーソルを移動させて待機する. b) コンピュータから出されるクリック音を合図にカーソルをターゲットまで移動させる. c) 900ms後にもう一度クリック音が鳴るので, そこで一度止めてから, d) ターゲット内までカーソルを移動させる. 第1 試行は画面の中央にスタートとカーソルが現われるのでスタートまでカーソルを移動させる必要はない.

図にターゲットに向かって到達運動を開始した。制限時間は900 msであり、900 ms経過した時点で2回目のクリック音が出た。被験者は2回目のクリック音までに手先の運動を止めるように指示されていた。さらに一度運動を止めた後、ターゲットとカーソルがずれていた場合には、3.1秒以内でターゲット内までカーソルを移動するように指示されていた。ただし、第1試行においてはスタートとカーソルは画面の中央（変換の不動点）に出現するようにしたので、始めにスタートまでカーソルを移動させる必要はなかった。変換条件下での試行では、試行のはじめ（スタートまでカーソルを移動する時点）からすべて変換がかかった状態で、被験者に手先の運動を行わせた。

### 3) 実験全体の手続き

実験は2日に分けて行われた。第1日目は、変換をかけた状態で、表3. 1に示したように、各被験者毎に決められた課題1と課題2を行った。50試行を1ブロックとして、課題1と2でそれぞれ12ブロック行った。第2日目は、コントロール実験として無変換の状態です腕と左腕でそれぞれ7ブロック行った。コントロール実験の目的は、次の【解析方法】で述べる。

#### 【解析方法】

まず、補遺3. 2 (p.89) に詳しく説明する方法で、始めの弾道的な運動<sup>3</sup>の終了地点を、曲率を用いて検出した。学習効果の測度としては、このように検出された弾道運動の終了点とターゲットの間の距離（位置の誤差）が考えられ、学習が進むにつれて位置の誤差が減少することが予想される。

しかし、前述の通りスタートとターゲットは到達可能領域内でランダムに出現するので、

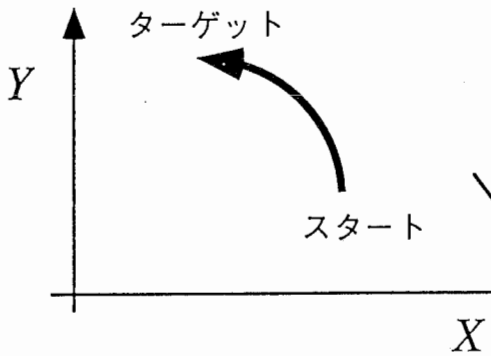
<sup>3</sup> 弾道運動については第2章実験2の考察（2. 3. 4 考察, pp.41~43）を参照。

各試行毎にスタートとターゲットの間の距離などの条件が異なる。従って、各試行毎の位置の誤差を直接に比較することは公正ではない。そこで、次式のような位置の誤差の線形モデルを仮定して、学習効果を調べた。

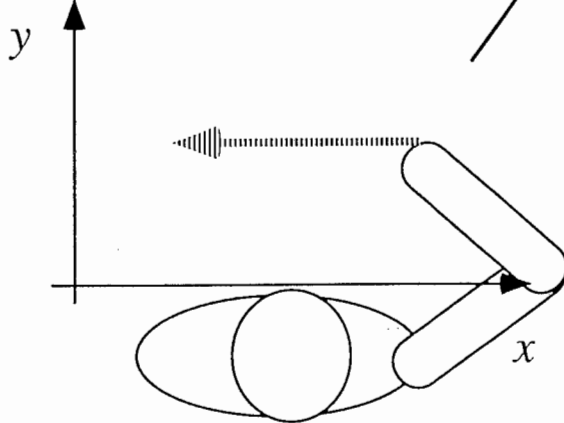
$$E = aV + bL / MT + K \quad 3.4$$

第1項目のVは、図3.9に示すように手先座標のスタート（ターゲット）とCRT座標の

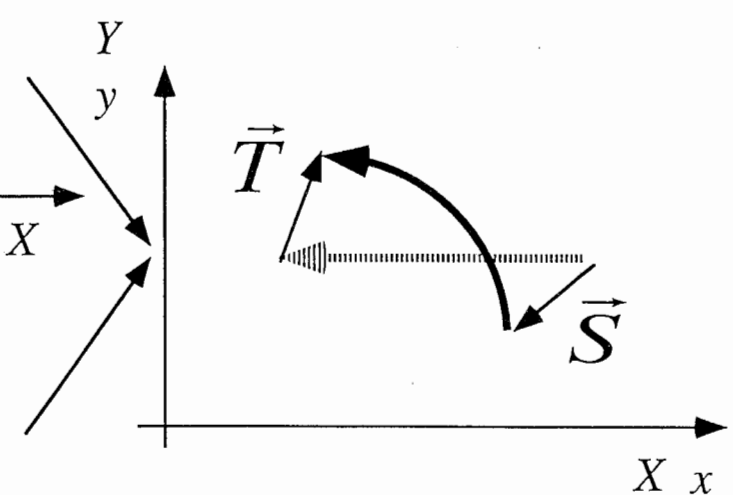
a) CRT座標



b) 手先座標



c) CRT座標と手先座標を重ね合わせた図



$$V = |\vec{S} - \vec{T}|$$

図3.9 変換によって生じるスタートとターゲットにおけるずれを示す図。図aはCRT画面上のカーソルの軌道を、図bは手先の軌道を示す。図cは図aとbを重ね合わせた図である。CRT座標のスタートと手先座標のスタートの間のずれを表わすベクトル ( $\vec{S}$ )、CRT座標のターゲットと手先座標のターゲットの間のずれを表わすベクトル ( $\vec{T}$ ) の差の絶対値を、変換による歪みを定量的に表わす指標 (V) として用いる。

スタート（ターゲット）のずれを表わしている。いま仮に被験者が図3. 9 bのように手先を動かしたときのCRT画面上の軌道が図3. 9 aであったとする。図3. 9 cは手先座標とCRT座標を重ねた様子である。変換のために一般に軌道は重ならない。スタートにおけるずれのベクトル（手先座標でのスタート位置が始点、CRT座標でのスタート位置が終点）を $\vec{S}$ 、ターゲットにおけるずれのベクトルを $\vec{T}$ （手先座標でのターゲット位置が始点、CRT座標でのターゲット位置が終点）とすると、両者の差の絶対値  $V = |\vec{S} - \vec{T}|$  が、変換による歪みを定量的に表わすための指標として用いることができる。第2項目は、運動時間（MT）、スタートとターゲットの間の距離（L）と運動誤差の関係を表わすSchmidtの法則（Schmidt et al., 1979）である。第3項目は、恒常誤差（K）である。以上の要因が位置の誤差に影響を与えらるるが、変換を学習することによって変換による歪みの影響は少なくなり、Vの係数aは減少することが予想される。コントロール実験で得られた無変換のときの位置の誤差からbとKを予め推定した後で、式3.4に表わされる回帰分析を行ってaの値を求め、課題の難しさと学習効果を評価した。Vの係数aの値を「変換による歪みの係数」と名付ける。

### 3. 3 結果

#### 1) 位置の誤差の平均値の比較

図3. 10は、各ブロック毎の位置の誤差の平均と標準偏差を示している。試行回数が増えるにつれて、ブロックごとの平均と標準偏差は減少した。被験者YFとMYでは、課題

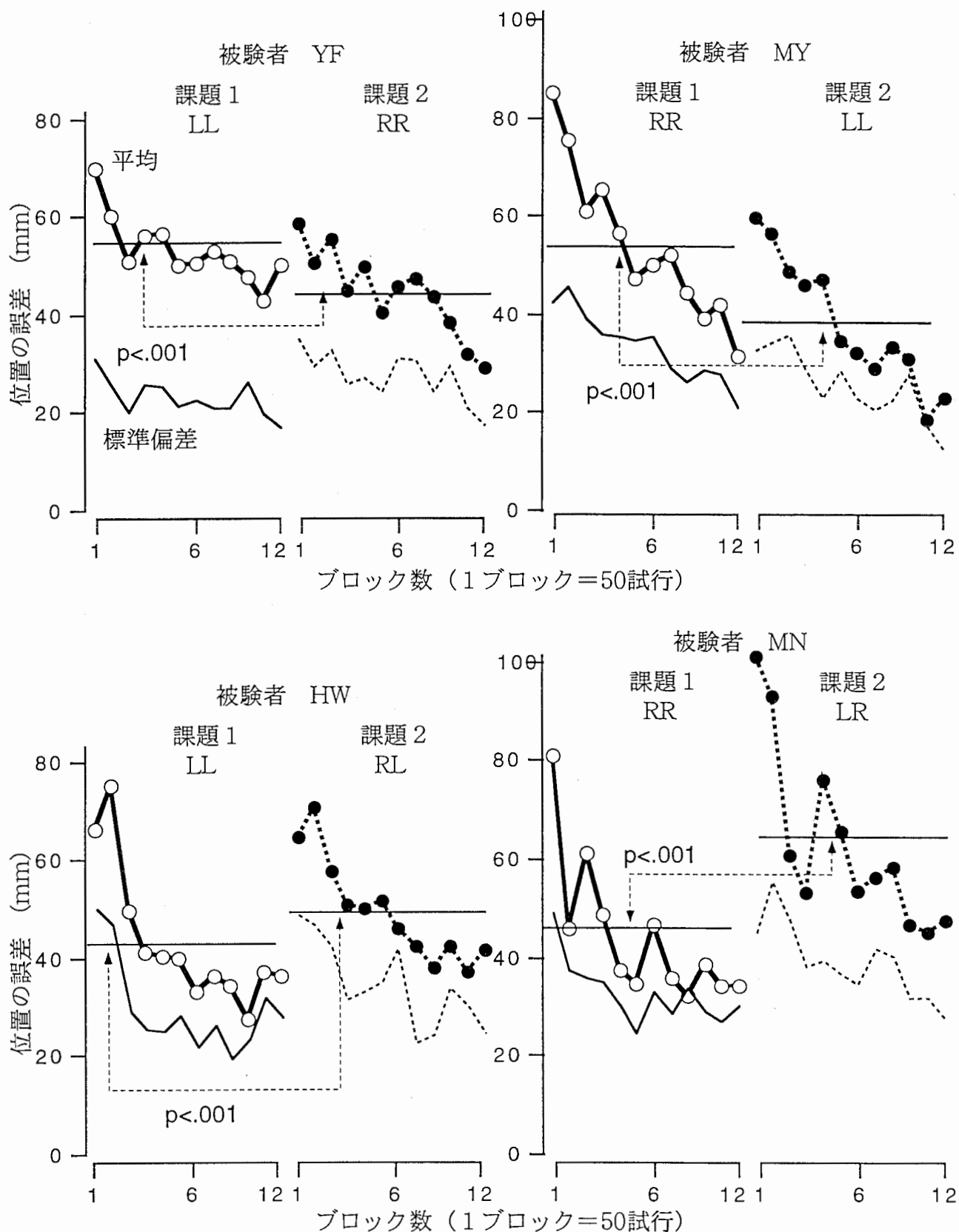


図3. 10 変換条件下での到達運動における位置の誤差の平均(太線)と標準偏差(細線)を被験者毎に示した図. 各ブロック毎に位置の誤差の平均と標準偏差( $n=50$ )を求めた. 白丸(○)は課題1, 黒丸(●)は課題2のブロック毎の平均値を示す. 図中の水平線(実線)は各課題全体の平均値を示す. 矢印付きの破線と $p$ の値は平均値の差を分散分析したときの有意水準を示す.



1よりも課題2の方が有意に位置の誤差は小さく (YF:  $F(1,1198) = 19.86$ ,  $p < .001$ , MY:  $F(1,1198) = 61.07$ ,  $p < .001$ ), 転移効果があったことを示唆している. 被験者HWとMNにおいては, 課題2の方が平均の位置の誤差は有意に大きかった (HW:  $F(1,1198) = 9.96$ ,  $p < .002$ , MN:  $F(1,1198) = 59.00$ ,  $p < .001$ ). 被験者HWとMNは変換A→Bの順番で学習したので, これは疲労の可能性もあるが, 左右の腕でAの変換を学習しつづけた被験者MYとMNでは, むしろ後の方の位置の誤差が小さくなっている. 従って疲労の可能性は否定される. 被験者HWとMNの結果は, 1) 課題1と課題2の間で転移効果がないこと, 2) 反対側の腕の変換(B)の方が, 実際に使っている腕の変換(A)より難しいことを示している.

## 2) 位置の誤差の多重回帰分析

無変換のときの位置の誤差から推定した「スタート・ターゲット間の距離(L)と運動時間(MT)の比」の係数(b)と, 恒常誤差(K)は表3. 2に示す通りである.

<表3. 2> 無変換の位置の誤差から推定したbとKの値

	右腕		左腕	
	b	K	b	K
被験者 YF	45.31***	3.66 <sup>n.s.</sup>	13.93*	19.71***
被験者 MY	44.31***	7.75*	27.35**	14.50**
被験者 HW	12.73*	16.64***	25.80**	10.10**
被験者 MN	55.65***	-3.57 <sup>n.s.</sup>	20.59**	10.66***

\*  $p < .1$  \*\*  $p < .001$  \*\*\*\*  $p < .0001$

この値を式3. 4に代入したあと, 課題ごと, ブロックごとに再び回帰分析を行った.

まず, 課題ごとに推定した変換による歪み(V)の係数(a)の値とその99%信頼区間を図3. 11に示す. 変換AとBの両方を学習した被験者HWとMNではBの方が変換によ

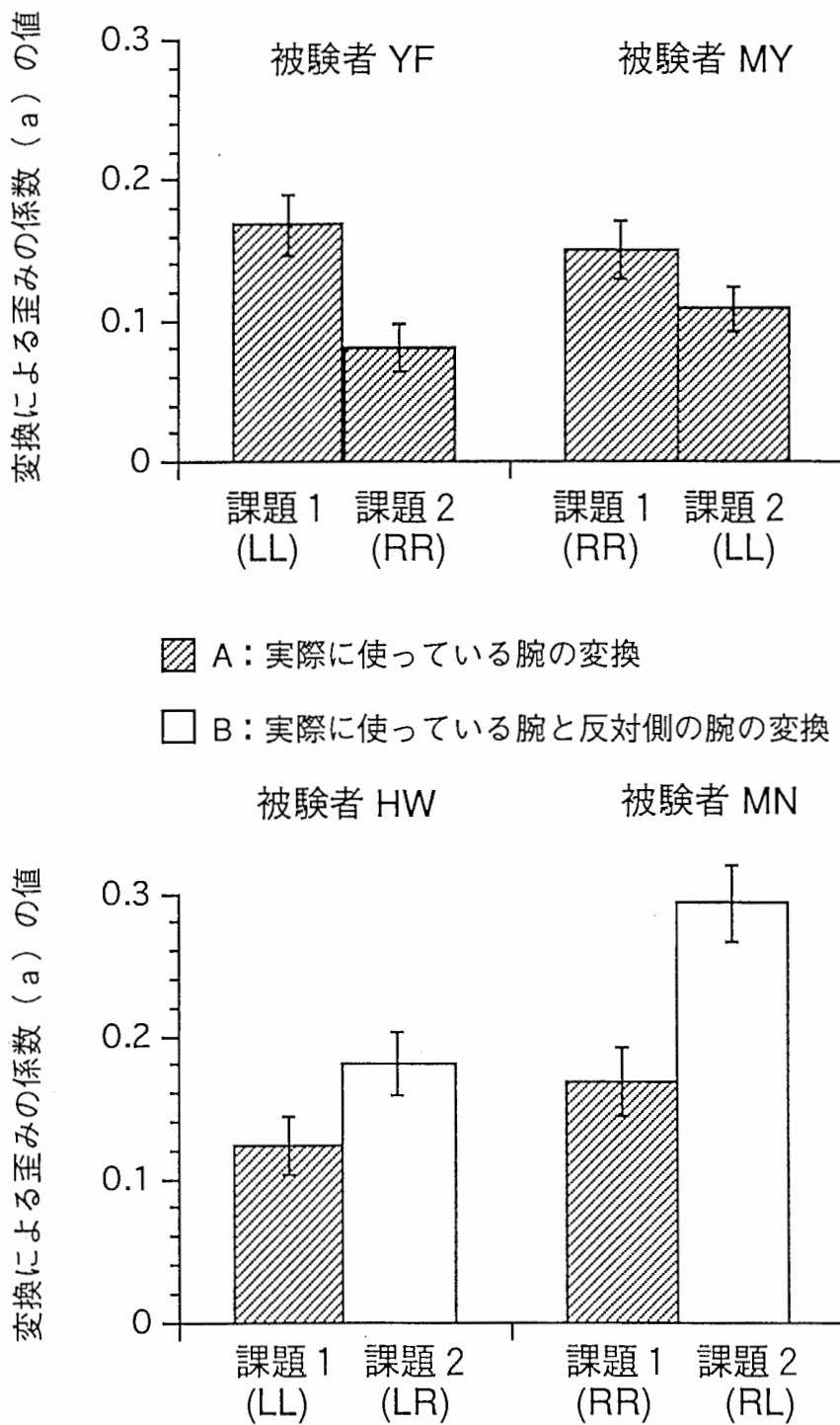


図3. 11 課題ごとに推定した変換による歪み (V) の係数 (a) の値. 変換条件下で到達運動を行ったとき, 変換による歪みが位置の誤差にどの程度影響を与えるかを, 課題毎に回帰分析を行って調べた. 図中の誤差線は各係数の99%信頼区間を示す.

る歪みの係数は大きく、変換AよりBの方が難しいことを示唆していた。

つぎに、ブロックごとに推定した変換による歪みの係数（ $a$ ）の値を図3. 12に示す。各課題内では変換による歪みの係数の値は試行回数が増えるにつれて減少し、学習がおきていたことを示唆している。学習の転移効果を調べるために、課題1の最終ブロックと課題2の始めのブロックの変換による歪みの係数の99%信頼区間が重なるかどうか調べた。

左右の腕でAの変換を学習しつづけた被験者YFでは両者の区間は重なっていた（図3.

12の斜線部）。また、同じ手続きで学習した被験者MYでは、両者は重ならないものの、課題1の最後から2番目のブロックと課題1の始めのブロックの変換による歪みの係数の信頼区間が重なっていた。このことは、左右の腕でAの変換を学習しつづけた被験者では、学習曲線はほぼ連続していることを示している。はじめにAを学習し、次にBを学習した被験者HWとMNでは両者の区間は全く重ならず、学習曲線は不連続であった。要約すると、これらの結果は、片方の腕でAを学習した後、反対側の腕でBを学習すると転移効果はないが、片方の腕でAを学習した後、反対側の腕でAを学習すると転移効果があることを示している。

以上のことから、単純に位置の誤差を学習の指標とした場合も、変換による歪みが位置の誤差に及ぼす影響を調べた場合も、つぎのことが言える。1) 実際に使っている腕とは反対側の腕の変換（B）は実際に使っている腕の変換（A）より難しい。2) Aを続けて学習した場合は両手間転移効果が見られたが、Aを学習した後反対側の腕でBの変換を学習した場合には、外部座標の変換としては同じ変換になっているにもかかわらず、両手間転移効果は見られなかった。

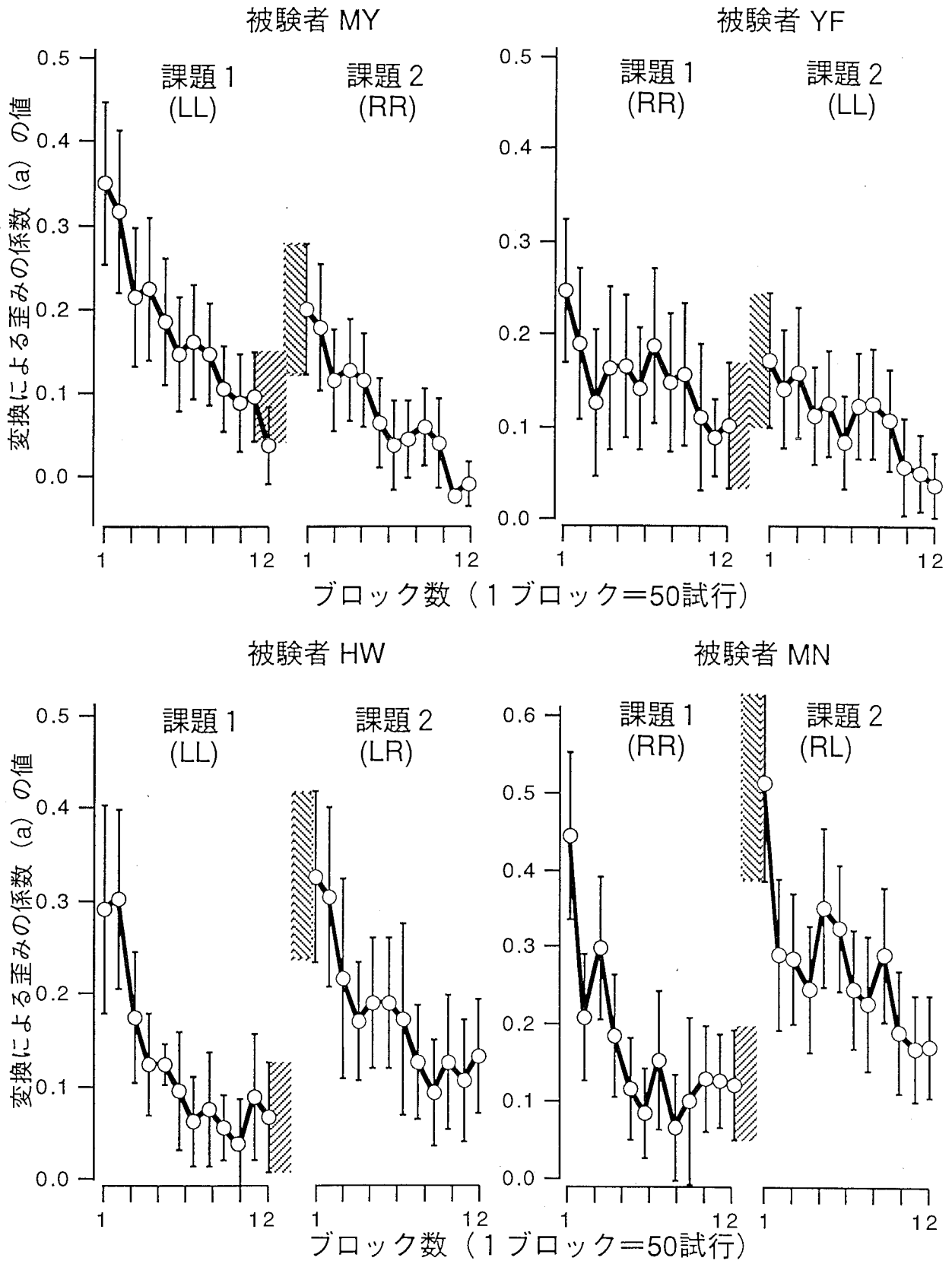


図3. 12 ブロックごとに推定した変換による歪み (V) の係数 (a) の値. 変換条件下で到達運動を行ったとき, 変換による歪みが位置の誤差にどの程度影響を与えるかを, ブロック毎に回帰分析を行って調べた. 図中の誤差線は各係数の99%信頼区間を示す. 課題1の終了間際のブロックにおける係数の信頼区間と, 課題2の第1ブロックにおける係数の信頼区間は, 学習曲線の連続, 不連続を明示するために斜線を付けて示してある.

### 3. 4 考察

以上の結果は以下の2点に要約できる。1) 身体座標における線形変換の学習では両手間転移効果が確認できたが、外部座標における非線形変換の学習では両手間転移効果は確認できなかった。2) 式3. 1 (p.64) であらわされるような変換は、外部座標における非線形な変換としてではなく、身体座標における線形変換として学習されていた。

以上のことから、外部座標においては非線形、身体座標においては線形となるような視覚環境の変換条件下で繰り返し到達運動の訓練を行った場合、身体座標のレベルで学習が成立することが確認できた。またこのことは、中枢神経系には従来の視覚運動学習研究において調べられてきた外部座標の内部モデルの他に、身体座標の内部モデルが存在し、環境の変化に応じて適応的な学習が起きていることを示唆している。

補遺 3. 1 実際に使っている腕とは反対側の腕の関節角変換

ここでは、式 3. 3 の導出過程を説明する。本文で説明したように、両腕の肩の位置が同じである（外部座標の原点にある）と考える（図 3. 1 3）。いま右腕の肩の関節角を  $R\theta_1$ 、左腕の肩の関節角を  $L\theta_1$ 、右腕の肘の関節角を  $R\theta_2$ 、左腕の肘の関節角を  $L\theta_2$  とする。一般に、右腕と左腕の長さはほぼ等しいので、肩から肘までの長さを  $l_1$ 、肘から手先までの長さを  $l_2$  として、左右の区別はつけない。右腕を使って到達運動を行うときの関節角における定数倍変換は、一般に

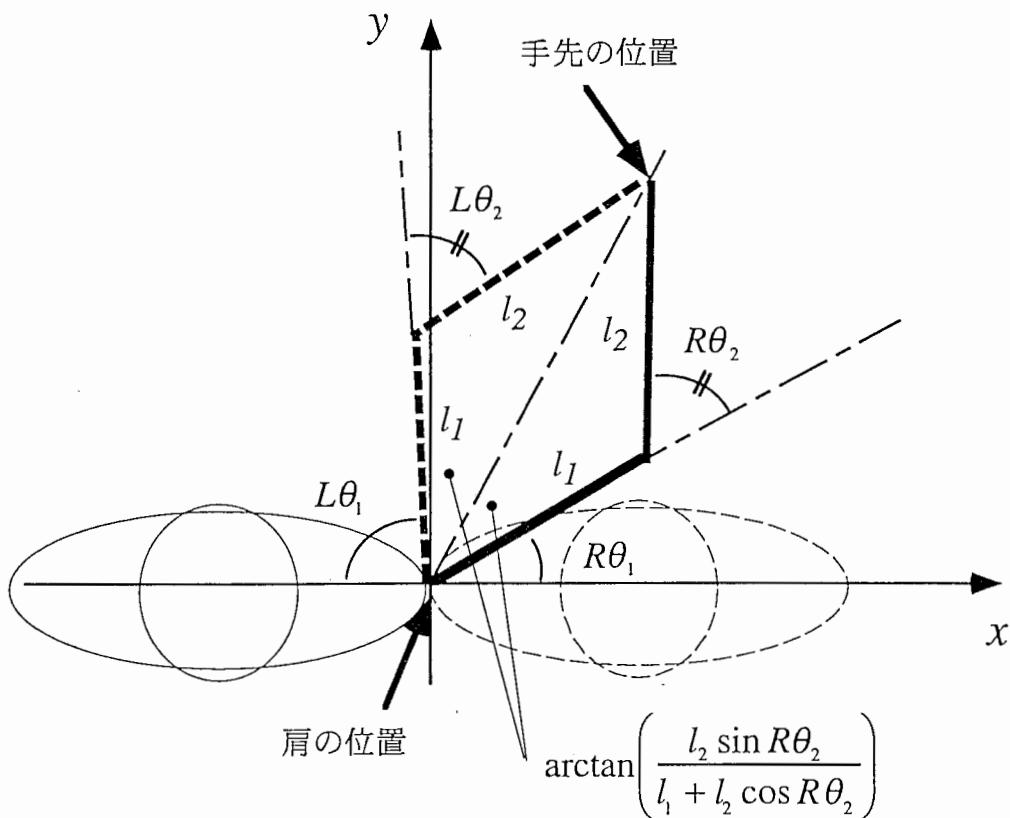


図 3. 1 3 肩の位置（原点）と手先の位置が一致しているときの右腕（実線）と左腕（破線）の関節角の関係を示す図。  $l_1$  は肩から肘までの長さ、  $l_2$  は肘から手先までの長さを示す。  $R\theta_1$ 、  $R\theta_2$  は右腕の肩と肘の関節角を、  $L\theta_1$ 、  $L\theta_2$  は左腕の肩と肘の関節角である。図で  $xy$  座標の原点は肩の位置にある。

$$\begin{aligned} R\theta_1^* &= k_1 R\theta_1 + h_1 \\ R\theta_2^* &= k_2 R\theta_2 + h_2 \end{aligned} \quad 3.6$$

という式で表わすことができる。ただし、 $R\theta_1^*$ 、 $R\theta_2^*$ は変換後の関節角、 $k_1$ 、 $k_2$ は変換倍率、 $h_1$ 、 $h_2$ は定数である。いま右の手先の位置に左手を到達させることを考える。このとき、肘の関節角は左右等しくなること、図3.13に●で示す角は、

$$\arctan\left(\frac{l_2 \sin R\theta_2}{l_1 + l_2 \cos R\theta_2}\right)$$

となることから、左腕の関節角は、

$$\begin{aligned} L\theta_1 &= \pi - 2 \arctan\left(\frac{l_2 \sin R\theta_2}{l_1 + l_2 \cos R\theta_2}\right) - R\theta_2 \\ L\theta_2 &= R\theta_2 \end{aligned} \quad 3.7$$

と表わすことができる。この左腕の関節角を式3.6と同様に定数倍変換する。

$$\begin{aligned} L\theta_1^* &= k_1 L\theta_1 + h_1 \\ L\theta_2^* &= k_2 L\theta_2 + h_2 \end{aligned} \quad 3.8$$

最後に変換した左腕の関節角を、式3.7と同様の関係を用いて、右腕の関節角に直す。

$$\begin{aligned} R\theta_1^* &= \pi - 2 \arctan\left(\frac{l_2 \sin L\theta_2^*}{l_1 + l_2 \cos L\theta_2^*}\right) - L\theta_2^* \\ R\theta_2^* &= L\theta_2^* \end{aligned} \quad 3.9$$

式3.7～3.9を順次代入し、右腕の関節角のみで変換を表現すると次のようになる。

$$\begin{aligned} R\theta_1^* &= k_1 R\theta_2 + (1 - k_1)\pi - h_1 \\ &\quad + 2k_1 \arctan\left(\frac{l_2 \sin R\theta_2}{l_1 + l_2 \cos R\theta_2}\right) - 2 \arctan\left(\frac{l_2 \sin(k_2 R\theta_2 + h_2)}{l_1 + l_2 \cos(k_2 R\theta_2 + h_2)}\right) \\ R\theta_2^* &= k_2 R\theta_2 + h_2 \end{aligned} \quad 3.10$$

以上は、腕の関節角変換を右腕で学習する場合であるが、その逆もおなじであるから、一

般に，式3. 3の関係が成り立つ．

### 補遺3. 2 始めの弾道運動の終了地点を検出する方法

始めの弾道運動の終了地点は，Kawato & Pollick (in preparation)に従い，曲率を用いて検出した．以下に詳しく説明する．図3. 14は，始めの弾道的な運動の終了地点を検出の様子を示している．実験前に900 msで運動を止めるように被験者に教示を与えたが，この間にただ1回の弾道運動を被験者が行うとは限らず，この軌道のように修正運動が入ってしまう可能性がある．従って，実験後の解析で，弾道運動の終了地点を検出する必要があった．図3. 14 a, bはある1回の試行で記録された軌道を表わしている．この軌道上の各点における曲率 ( $C$ ) を，次の式に従って求めた．

$$C = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}y}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}} \quad 3. 11$$

ただし， $\dot{x}$ ， $\dot{y}$ はx, y方向の速度， $\ddot{x}$ ， $\ddot{y}$ はx, y方向の加速度を表わしている．図3. 13 cは，式3. 11によって求めた曲率である．運動の修正が行われた地点では，曲率が



高くなる<sup>4</sup>ので、接線速度が最大になったあと、曲率が一定の閾値 ( $0.5 \text{ mm}^{-1}$ ) を超えた地点を弾道的な運動の終了地点と定義した (図3. 14 c に□で示した地点) .  $0.5 \text{ mm}^{-1}$  という閾値は、データ中のノイズを拾わない程度の最小値である. 図3. 14 d に示すように、この地点で速度波形は極小値となっている. このような方法で検出された弾道運動の終了地点とターゲットの間の距離を学習効果の測度とした (位置の誤差) .

弾道運動の終了点を検出する方法は、このほかにも速度波形の極小値を探す方法などがあるが、図3. 14 c からわかるように、曲率は速度よりも大きく変化するため、閾値による検出が容易であるという理由から、曲率を用いる方法を選んだ.

<sup>4</sup> 厳密には、方向の修正が行われた場合と行われない場合に分けて説明する必要がある. 方向の修正が行われた場合には、自明のことであるが、その地点で軌道は曲がるので曲率は大きくなる. 方向の修正が行われなかった場合、すなわち、直線軌道上を一度止まって再び動き出した場合も、曲率は大きくなる. その理由は以下の通りである. 式3. 11 をより直観的に解りやすい形にすると

$$C = \frac{|\mathbf{v} \times \mathbf{a}|}{|\mathbf{v}|^3}$$

と表わすことができる. ただし、 $\mathbf{v}$  は速度ベクトル  $\mathbf{a}$  は加速度ベクトルを表す. すなわち、速度と加速度の外積を速度の3乗で割った値が、曲率に等しくなる. 理論的には直線軌道の曲率は0になるが、人間が2次元あるいは3次元空間内で多関節の運動を行なった場合、軌跡が完全な直線となることはまずありえない. Flash & Hogan (1985) によれば、弾道運動における手先の位置は全体の運動時間を1として正規化された時間の5次式で近似できる. この式から速度、加速度を求めると、それぞれ時間の4次式、3次式になる. 従って、曲率の分母は時間の12次式、分子は時間の7次式で近似できる. 時間が0に近いとき、分母は分子に比べて非常に小さくなり、曲率は無限大になる. 開始点の時間を1、終了点の時間を0としても、Flash & Hogan (1985) のモデルについては上と同じことが成り立ち、弾道運動の開始点と終了点で曲率は無限大になる.

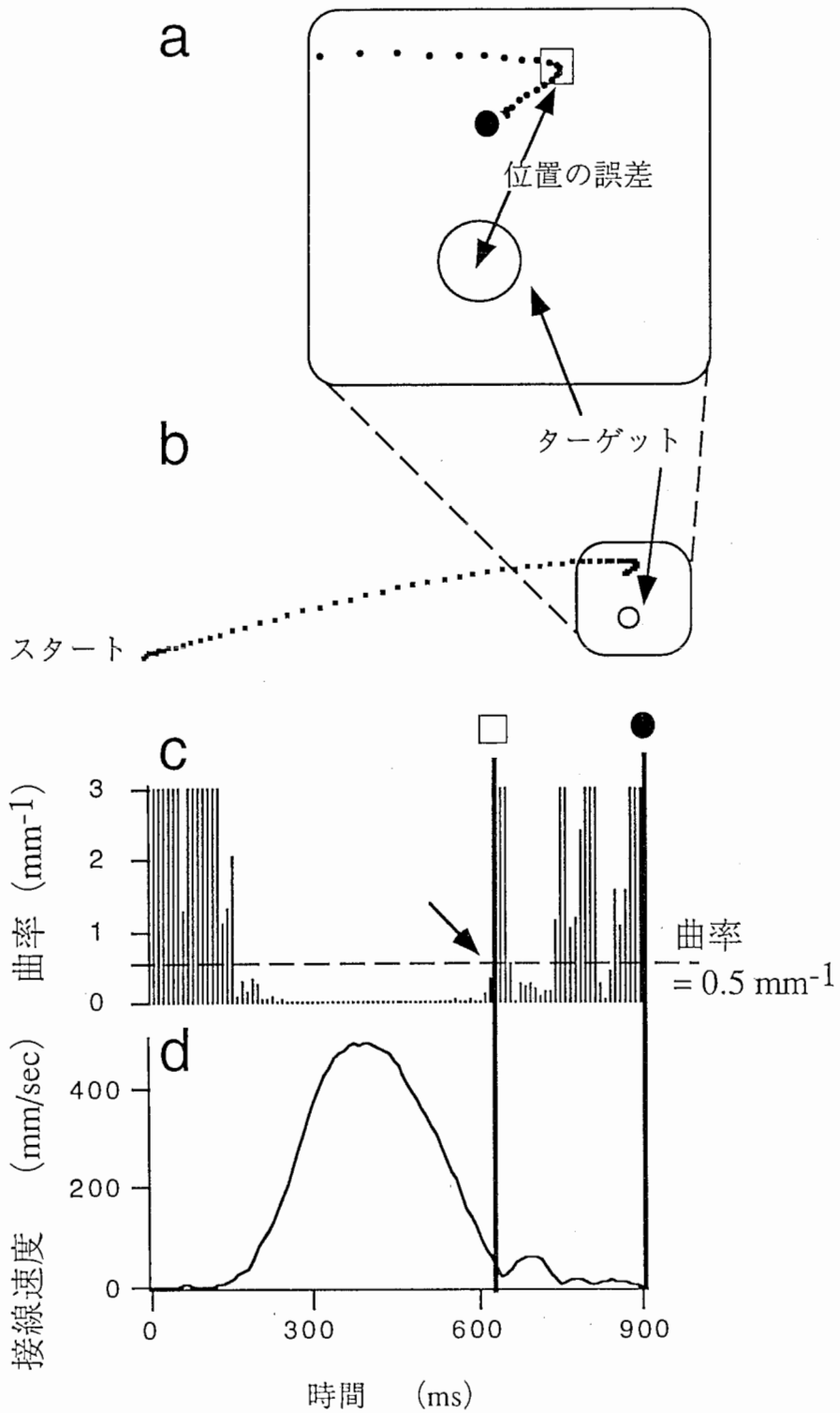


図3. 14 曲率を用いた弾道運動終了点の検出を示す図. b) は一回の試行の手先軌道を示す. a) はその軌道のターゲット付近での拡大図である. c) は横軸にスタートの合図から経過した時間, 縦軸に曲率をとって, 軌道全体の曲率変化の様子を示している. d) は, c) と同じ時間軸上で対応する接線速度を示している. 図中の四角 (□) は始めの弾道的な運動の終了地点を, 黒丸 (●) は軌道全体の終端点 (スタートの合図から900ms後に手先があった場所) を示している.



## 第4章 視覚運動学習を可能にする内部モデルの表現方法

### 4. 1 論理

ある特定の運動学習で得た経験が、他のまだ学習していない運動の遂行成績を向上させることを学習の汎化（般化）という。第2章と第3章で調べた学習効果の両手間転移も、この定義からすれば汎化に含まれる。この章では、ある限られた領域における到達運動の訓練が、他の領域の到達運動にどのような影響を与えるかを調べることにより、中枢神経系において、視覚環境の変換に対応する内部モデルがどのように表現されているかを調べる。

#### 4. 1. 1 内部モデルを構成する方法

第1章で述べたように、生体の運動制御に関する計算論的なアプローチでは、生体が滑らかで正確な制御を行うために、筋骨格系や外部環境の内部モデルを構成し、学習によってその精度を良くしているのではないかと考えられている。

計算論では、逆ダイナミクスや逆キネマティクス（第1章「1. 2. 1 到達運動制御の計算モデル」参照，pp.11～12）を構成する方法が、いくつか提案されているが、それ

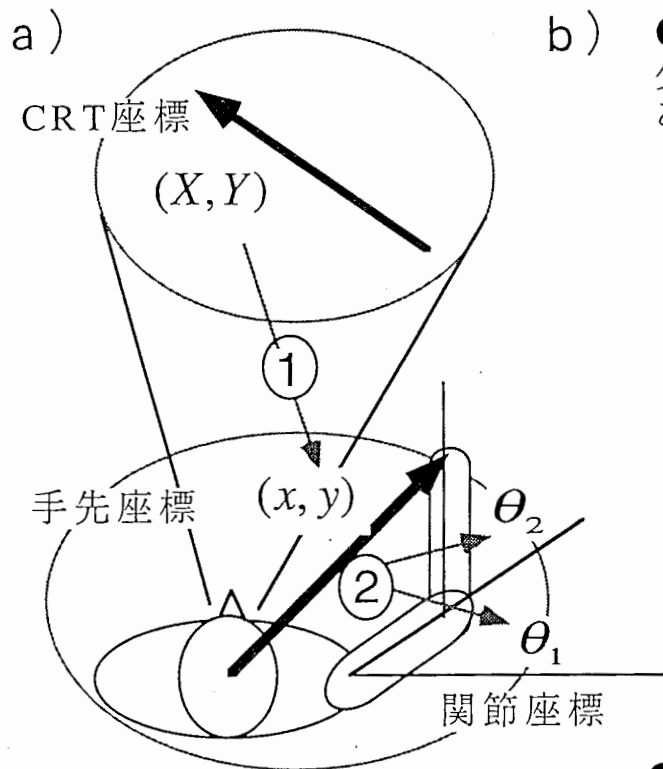
らは2つの極端な方法に代表される (Hollerbach, 1982; Atkeson, 1989) . ひとつは、物理パラメータを推定して筋骨格系や外部環境の構造に関する物理モデルを構成する方法である。もうひとつは、そのような構造を一切無視して、入出力関係の対応関係をひとつひとつ学んで行く方法である。一般的に、前者はstructured representation, 後者はtabular representationと呼ばれている。本論文で用いた実験課題に即しながら、この2つの内部モデルを構成する方法の概要を以下に述べる。しかし、当然ながらこれまでに提案された方法のすべてが、2つの方法に分類できるわけではない。これらを、混合させたような方法や、中間的な方法も提案されている。そのような中間的な方法の代表例として、多層パーセプトロンを用いたニューラルネットワークモデルにも言及する。

#### ●Structured representation

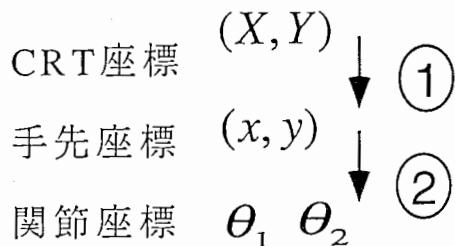
第1章で考察したように、コンピュータのマウスを操作して、画面上のカーソル目標位置まで移動させることを考える (図4. 1 a) . 第2章では、CRT画面にカーソルを表示する際に回転変換を行ったが、ここでも同様に回転変換を行っているとする。一般的にマウスを画面のX軸に平行に持てば、マウスの移動方向とカーソルの移動方向は一致するが、マウスが回転している場合、回転変換 (極端な例では、通常の持ち方とは逆方向に持つ場合は180° 回転) が入るからである。この場合、CRT画面の座標系 (X, Y) から手先の座標系 (x, y) への変換は、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos a & \sin a \\ -\sin a & \cos a \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X - b_1 \\ Y - b_2 \end{pmatrix} \quad 4. 1$$

と表わすことができる。ただし、 $a$  は回転変換の回転角、 $(b_1, b_2)$  は画面の原点が手先



キネマティクスモデル



**b) ● Structured representation**

少数の物理的に意味のあるパラメータで表現

$$\textcircled{1} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos a & \sin a \\ -\sin a & \cos a \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X - b_1 \\ Y - b_2 \end{pmatrix}$$

$$\textcircled{2} \begin{cases} \theta_2 = \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) \\ \theta_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \arctan\left(\frac{l_2 \sin(\theta_2)}{l_1 + l_2 \cos(\theta_2)}\right) \end{cases}$$

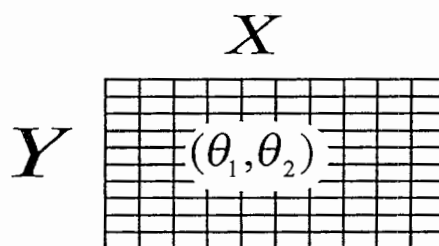
○ある限られた軌道を学習したときでも、推定が正しくなされていけば、そのモデルは他の全ての軌道に対しても利用できる（大域的な汎化）。

○物理パラメータを推定する必要がある。

**● Non-structured Non-tabular (例 多層パーセプトロン)**

**● Tabular representation**

入出力関係の表を構成



○入出力関係をひとつひとつ学習→類似の入出力関係においてのみ、汎化が見られる。（局所的な汎化）

○物理パラメータを推定する必要がない。

図4. 1 コンピュータのマウスを操作して、カーソルを目標位置まで持ってくる場合に必要キネマティクス変換 (a) と、それを実現させる計算論的な方法 (b).  $\theta_1$  は肩の関節角,  $\theta_2$  は肘の関節角,  $l_1$  は肩から肘までの長さ,  $l_2$  は肘から手先までの長さ,  $(X, Y)$  は CRT 座標におけるカーソルの位置,  $(x, y)$  は手先座標に置ける手先の位置,  $a$  は手元座標におけるマウスの回転 (画面の X 軸に平行になるようにマウスを持った場合, 回転角は  $0^\circ$  になる).

座標に移される点である。次に、手先座標から関節角への変換であるが、これは第1章で説明したように、肩の関節角を $\theta_1$ 、肘の関節角 $\theta_2$ とすると、一般に、

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right)$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \arctan\left(\frac{l_2 \sin(\theta_2)}{l_1 + l_2 \cos(\theta_2)}\right) \quad 4. 2$$

という関係で表わされる。ただし、 $l_1$ は肩から肘までの長さ、 $l_2$ は肘から手先までの長さを表わしている。

式4. 1と式4. 2が、中枢神経系において実現されていれば、視覚環境を回轉變換した状況で到達運動を行うことができる。しかし、これらはいくつかの物理パラメータを含んでおり ( $a, b_1, b_2, l_1, l_2$ )、これらのパラメータを推定しなければ、実際の制御を行うことはできない。従って、structured representationを用いて、逆ダイナミクスや逆キネマティクスに相当する内部モデルを構成する際に問題となるのが、どのように物理パラメータを推定するかということである。例えば、逆ダイナミクスに関しては、An, Atkeson and Hollerbach (1988)がロボットアームの慣性項を推定する方法を考案した。その方法によれば、わずか数回アームを動かすだけで慣性項を推定することができる。structured representationの利点は、物理パラメータが正しく推定できれば、限られた領域の軌道を学習したときでも、そのモデルは他の全ての軌道に対して利用することができることである。すなわち、広い範囲での学習の汎化が可能である。

#### ● Tabular representation

式4. 1と式4. 2で表わされるキネマティクス変換は、入力信号 (CRT座標での目

標位置  $(X, Y)$  ) と出力信号 (関節座標での目標位置  $(\theta_1, \theta_2)$  ) の関係をあらわす表を構成することによっても実現することができる。tabular representationは、筋骨格系や外部環境の物理構造に関する知識を必要としない。複雑な計算を行わなくてすむので、実時間で制御を行いたいときには有効な方法である。

しかしながら、単純なtabular representationを複雑なシステムに利用しようとするとき、いくつかの問題が生じる。第一に、入力信号の種類の数に応じて、表の大きさは指数関数的に増大する。例えば、入力信号の数が  $n$  個で、そのそれぞれが  $m$  個の値を取り得るときに、 $m^n$  の組み合わせを記憶しなくてはならない。第二に、個々の入力信号と出力信号の関係は、独立に決められるために、特定の軌道において学習されたことは、他の軌道を実現する際に役立てることができない。

Albus (1975)は、tabular representationにいくつかの工夫をすることにより、逆キネマティクス逆ダイナミクスを表現する内部モデルを考案した。このモデルでは、表の内容は分散的な方法 (複数の重みの組み合わせ) で表現されているため、記憶容量はさほど大きくなくて済む。また、類似の入力信号は共通の重みづけを利用するため、狭い範囲での学習の汎化は可能である。

#### ●Connectionist representation

Connectionist representationでは、入力信号と出力信号の関係は、神経細胞を模した非線形な計算要素の組み合わせで表現されている (Rumelhart, 1986) 。structured representationのように物理パラメータを陽 (explicit) に表現することはしないが、シナプス荷重の状態という形で陰 (implicit) に表現している。式 4. 1 と 4. 2 で表わさ



れるキネマティクス変換は、数学的には

$$\begin{aligned}\theta_1 &= f(w_1, w_2 \cdots w_n, X, Y) \\ \theta_2 &= g(w_1, w_2 \cdots w_n, X, Y)\end{aligned}\tag{4.3}$$

で表わすことができる。関数  $f$  と  $g$  の形は、ネットワークモデルの構造により異なる。この方法では、シナプス荷重というパラメータを用いてはいるが、個々のシナプス荷重は物理パラメータと対応しているわけではないので、structured representationではない。一方、入力信号と出力信号の局所的な連合ではないので、tabular representationでもない。近年、connectionist representationを用いて、逆ダイナミクスと逆キネマティクスを表現する方法がいくつか提案されている (Kawato, Furukawa & Suzuki, 1987; Jordan, 1990 など)。

#### 4. 1. 2 汎化と内部表現

視覚環境を変換した条件下で、空間内のある一点に目標を置き、繰り返し到達運動のトレーニングをする。さらにトレーニング終了後に目標の位置を様々に変えて到達運動のテストを行うことを考える。ここでは以下のような論理で、学習の汎化の様子から、キネマティクス変換に対応する内部モデルが、どのような方法で表現されるかを推定する。もし structured representationに近い方法で表現されているとすれば、トレーニングした目標の位置とは関係なく、広い範囲で一様な学習の汎化が見られるはずである (大域的な汎化)。一方、tabular representationに近い方法で表現されているとすれば、トレーニングした目標の近辺でのみ、学習の汎化が見られるはずである (局所的な汎化)。もし単純

なstructured representationやtabular representation以外の方法で表現されているとすれば、中間的な結果が見られるはずである。学習の汎化の様子は、トレーニング前後に様々な目標の位置で、目標に到達するまでの時間や運動の正確さを測り、両者を比較することで検討する。

#### 4. 1. 3 一般的な方法

行動実験では、第2章の実験と同様の装置を用いた（図4. 2 a）。異なる点は、第2

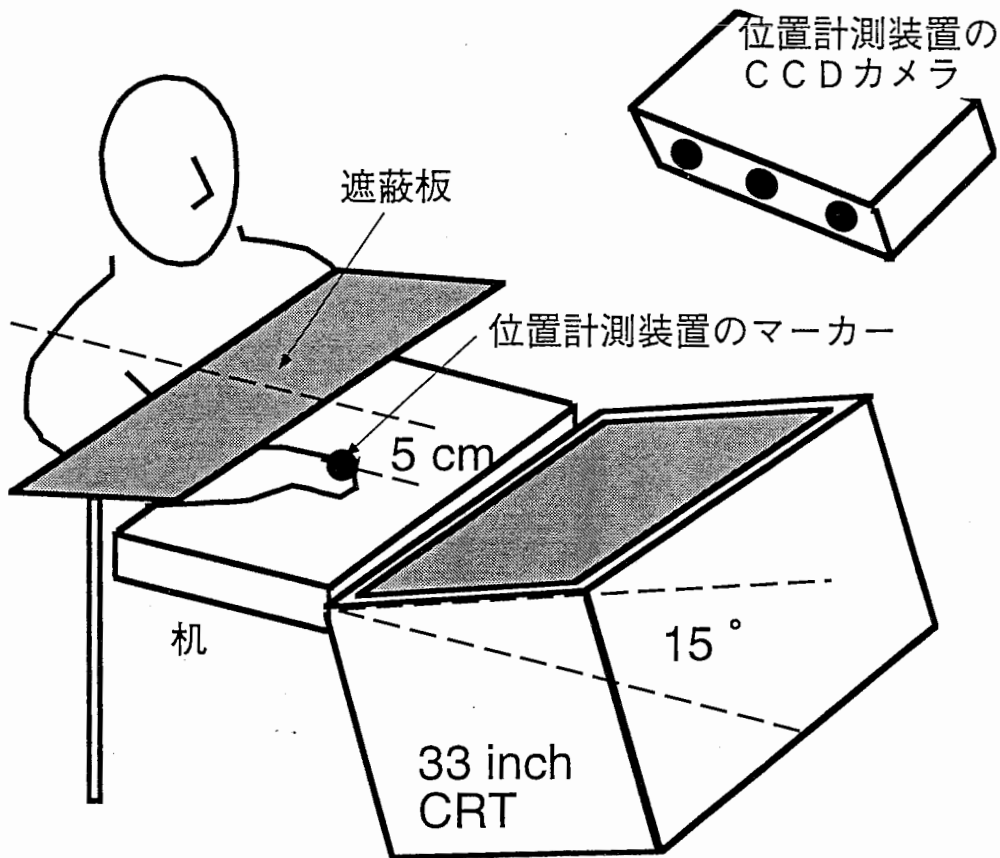


図4. 2 a 第4章における実験装置の配置図。被験者のななめ前から見たところ、被験者の前にある机の上はほぼ肩の高さ（正確には肩の上部から5cm下）にある。直接手先を見えないようにするため、被験者の前に遮蔽板を置いた。手首の関節を固定するため、被験者の手の甲と手首は円筒形の金具で覆い、金具の先端に位置計測装置のマーカを付けた。CRTモニタは画面がほぼ水平になるように置いたが、被験者に見やすくするため、15°ほど被験者側へ傾けた。

章の実験ではデジタイザで手先の位置を計測していたが、本章の実験ではCCDカメラによる位置計測装置（Northern Digital OPTOTRAK）を用いている点である。被験者の前には板が水平に置かれ、被験者は手先がやや板に触れるくらいの高さを保って、水平面内で到達運動を行う。被験者の手先に計測装置のマーカを付け、マーカの現在位置が画面上のカーソルとして表示された。第2章の実験と同様にカーソルは画面の中心を回転の中心として回転変換された位置に表示された。図4. 2 bに示すように回転変換の回転

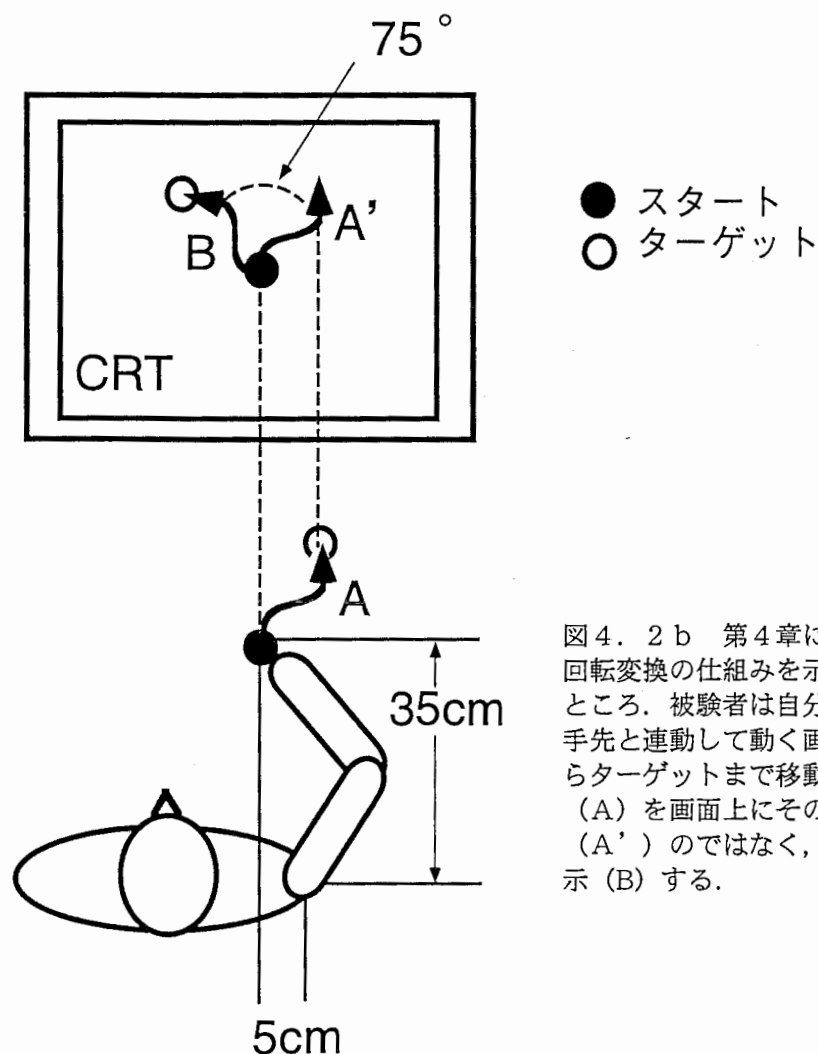


図4. 2 b 第4章における実験装置の配置図と75°回転変換の仕組みを示した図。被験者の頭上から見たところ、被験者は自分の手先が直接見えない状態で、手先と連動して動く画面上のカーソルを、スタートからターゲットまで移動させる。その際、手先の軌道（A）を画面上にそのまま平行移動して表示する（A'）のではなく、75°の回転変換を行ってから表示（B）する。

角は $75^\circ$ を用いた。これはいちばん難しい $90^\circ$ から（第2章 実験1：図2.4参照，p.34），やや角度をずらして課題を易しくし，実験時間を節約するためである。手先に付けられたマーカの位置は100Hzで記録された。計測装置の空間分解能は0.1mm以上であった。CRT画面の背景は黒で，カーソルは直径0.9 mmの円，ターゲットは5 mmの円として表示された。マーカとカーソルの移動比は1 : 1になるように設定されている。すなわち，手先を $x$  cm動かすと，画面のカーソルも $x$  cm動く。

一般的な手続きとしては，まず図4.3上に示すような8方向の到達運動を被験者に行わせ（プレテスト），次に一方向の到達運動を繰り返し訓練する（トレーニング），最後にプレテストと同じ8方向の到達運動を行わせ，その結果をポストテストと比較する。また，プレテストとポストテストの間の差が，一方向のトレーニングによるものであり，テスト中の学習や，単なる時間経過によるものではないことを示すために，実験群被験者とは別にコントロールとして，トレーニングには参加せず，その間休息する被験者を用意した。

実験1では，フィードフォワード制御による運動（弾道運動）<sup>1</sup>とフィードバック制御による運動（修正運動）を区別せずに，到達運動全体としての学習を調べた。すなわち，運動時間は制限せずに，スタートからターゲットまでなるべく早く移動することを被験者の課題とした。学習の測度としては，スタートの合図からターゲットに到着するまでの時間（課題完了までの時間）を用いた。

実験2では，弾道運動の正確さを知るため，運動できる時間を短く制限し（600 ms），制限時間内でなるべくターゲットの近くまで移動することを被験者の課題とした。学習の測度としては，始めの弾道運動の終了点とターゲットの間の距離（位置の誤差）を用いた。

---

<sup>1</sup>弾道運動と修正運動については，第2章実験2の考察（「2.3.4 考察」p.41~43）を参照。

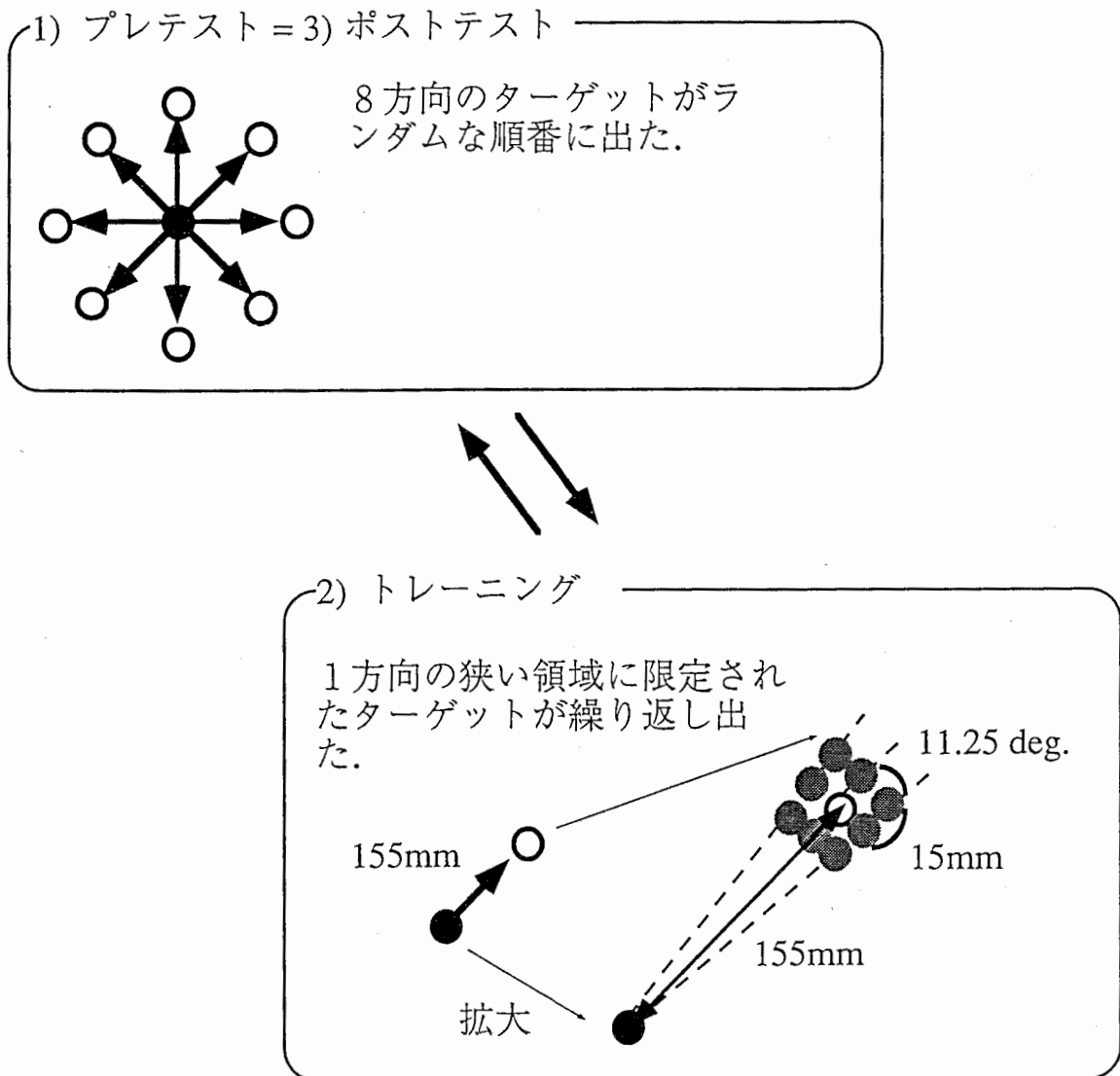


図4. 3 第4章の実験における一般的な手続きを示す図. 白丸 (○) はターゲット, 黒丸 (●) はスタート地点, 矢印は手先の運動方向を示す. 上図のように始めに8方向の大域的なターゲットを用いて, 初期の遂行成績を調べる (プレテスト). 次に下図のように8つのターゲットのいずれかひとつの周辺の狭い領域に限定された9つのターゲット (灰色に塗りつぶされた丸と白丸) を用いて繰り返しトレーニングを行う. 最後にプレテストと全く同じことを行い (ポストテスト) その結果を, プレテストと比較することにより, 学習の汎化の様子を調べる.

## 4. 2 行動実験1：修正運動と弾道運動における学習の汎化

### 4. 2. 1 目的

修正運動と弾道運動を区別せずに学習の汎化の様子を調べる。

### 4. 2. 2 方法

#### 【被験者】

被験者は男女5人（被験者TF, HK, ESが女性）。奈良女子大生（TF, HK, ES）または同志社大学生（XO, JH）で年齢は20歳前後であった。被験者として協力することで時給1000円が支払われた。実験の目的は知らせていなかった。視力（矯正を含む）および上肢運動機能は正常で、全員右手利きであった。

#### 【装置と刺激】

装置の配置は図4. 2 a に示す通りであった。先に述べた通り、8方向の到達運動を被験者に行わせ（プレテスト）、次に一方向の狭い範囲に限定されたターゲットに対して到達運動を繰り返し訓練し（トレーニング）、最後にプレテストと同じ8方向の到達運動を行わせた。

まず、プレテストとポストテストで用いたターゲットは、図4. 4左のT1～T8に示す通り、画面の中心を中心として半径155 mmの円周上に45° 間隔で配置されていた。

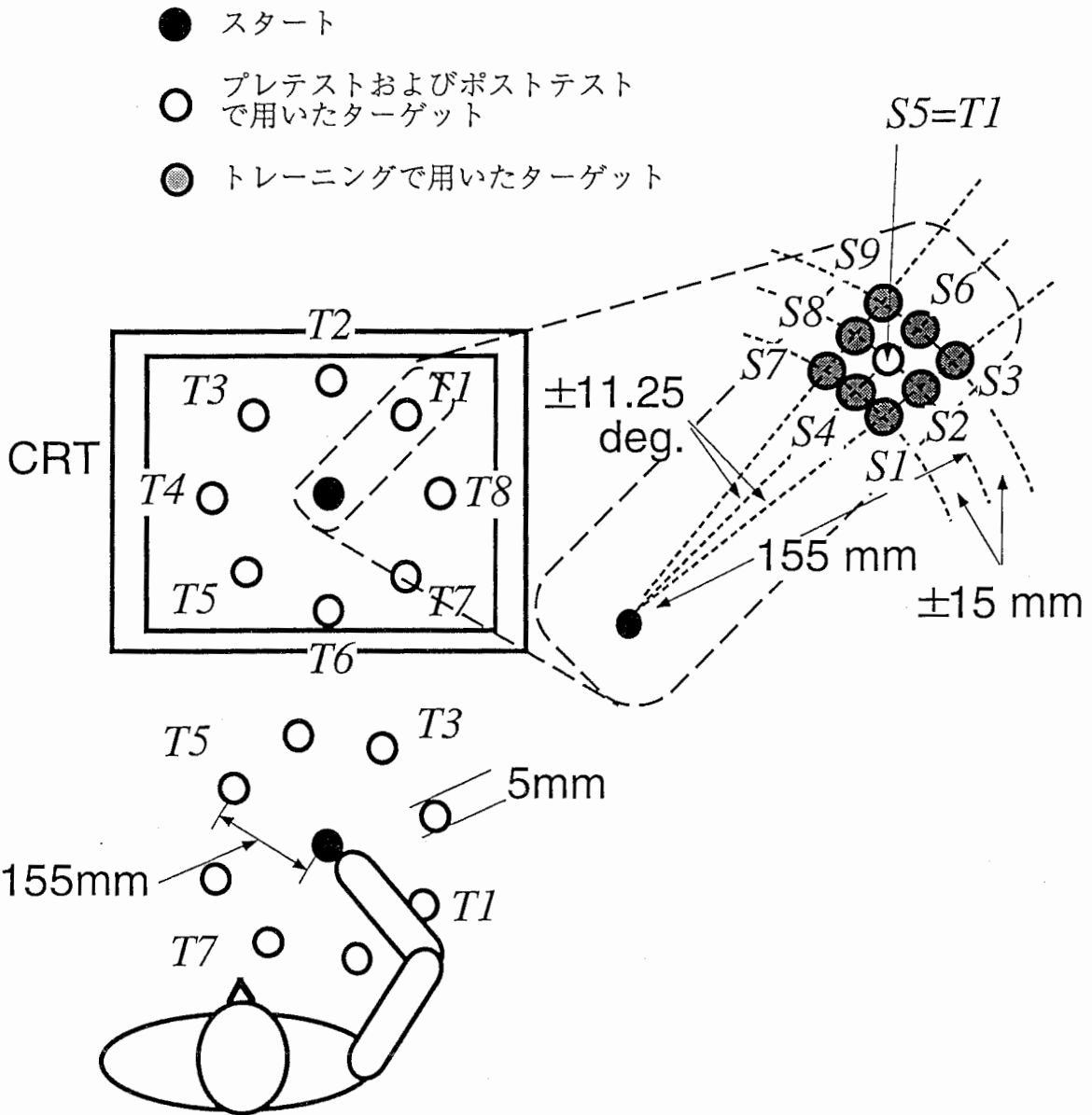


図4. 4 ターゲットの詳細な位置を示す図. 図4. 2bと同様に被験者と実験装置を上から見たところ. 左の図は, プレテストおよびポストテストにおけるターゲットの位置をCRT画面(上)と被験者の手先の位置(下)で示している. 右の図はトレーニング中のターゲットの位置を示すため, CRT画面の一部を拡大して表示している. プレテストおよびポストテスト中には, 図中にT1~T8で示された, 大域的な8つのターゲットが用いられた. トレーニング中にはプレ(ポスト)テスト用のターゲットのうちのひとつ(この図ではT1)の周辺の狭い領域に限定された9つのターゲット(S1~S9)が用いられた.

トレーニングで用いたターゲットは次のように決めた。実験のデザインから見れば、ひとつのターゲットでトレーニングをするべきであるが、ひとつのターゲットに限定した場合、以下のような問題が起きる。1) 被験者が内部モデルを構成するのではなく、自己受容感覚に基づき、特定の運動パターンを単純に記憶する可能性がある。2) 仮に structured representation を構成する場合、式 4. 1 と式 4. 2 (pp.94, 96) には推定しなくてはならないパラメータ (未知数) が 5 つある。従って、最低 5 つの異なる入力と出力の関係を示さなければならない。3) ひとつにターゲットを限定した場合、変換の種類が一意に決まらない (一般に、回転変換の回転角が  $a^\circ$  であるとき、 $a/2^\circ$  方向に对称軸のある対称変換と区別できない)。以上のような問題を避けるために、トレーニングで用いたターゲットは、プレテスト/ポストテストで用いた 8 方向のターゲットの近辺に、角度にして  $\pm 11.5^\circ$ 、画面の中心からの距離にして、 $\pm 5\text{ mm}$  の狭い範囲で分散させた (図 4. 4 右の S 1 ~ S 8)。

テスト中もトレーニング中もターゲットの位置は毎試行ランダムに決めた。

#### 【手続き】

実験開始前に被験者に対して、

- 1) 手先の運動方向とカーソルの運動方向の間に、常に  $75^\circ$  のずれがある。
- 2) 課題は、スタートからゴールまでなるべく早く移動することである。

という 2 点を教示した。

それぞれの試行の手続きは以下のように行われた。まず、実験者が被験者の腕を持ち、机上のスタート地点まで移動させる。2 ~ 3 秒後にスタート地点にカーソルが、画面の周



辺のどこかにターゲットがひとつ出現した。さらに2秒後、コンピュータからクリック音が鳴り、その音を合図に被験者は手先を動かし始めた。カーソルがターゲットに到着し、ターゲット内に100 ms以上留まると、再びクリック音が鳴り、1試行が終了したことを告げた。同時にカーソルとターゲットは画面から消えた。位置計測装置の計測時間は最长で8秒であり、それ以上時間をかけてもターゲットに着けない場合は、8秒経過した時点でその試行は中止とした<sup>2</sup>。

実験時間はひとりの被験者につき、およそ2時間かかった。先に述べたとおり、実験はプレテスト/トレーニング/ポストテストという3つのセッションから成っていた。プレテストとポストテストはそれぞれ、56試行(=8つのターゲット×7回)から成っており、およそ20分かかった。各試行の時間間隔は5秒以上あけないようにした。56試行という回数は、テスト中に学習が起こらないようにあまり回数を増やさないことと、信頼できる平均値が得られるだけ十分な回数を行うという制約条件のもとに決定した。

トレーニングは54試行(=狭い範囲に限定された9つのターゲット×6回)を1ブロックとして、7ブロック(合計378試行)行い、およそ90分かかった。各ブロックの間には5分の休憩時間を設けた。ただし、トレーニングに参加したのは、5人のうちの4人(実験群被験者:TF, XO, HK, ES)で、残りのひとり(コントロール被験者:KT)は、トレーニングにかかる時間だけ休息していた。実験群被験者においてトレーニング方向は、各被験者ごとに予め決められていた(TF→T3, XO→T7, HK→T1, ES→T5)。

#### 【解析方法】

マーカーの位置は100Hzで記録された。x, y方向の速度は5点微分法を用いて以下の

<sup>2</sup>そのような試行の数は全ての被験者を通して3試行のみであった。

式により計算した。

$$z_i = \frac{z_{i-2} - 8z_{i-1} + 8z_{i+1} - z_{i+2}}{12\Delta t} \quad 4.4$$

ただし、 $z_i$ は*i*フレーム目のデータで、 $\Delta t$ はデータ間の時間間隔である。この実験では100 Hzで位置を記録していたので、 $\Delta t = 10$  msであった。このようにして求めたx, y方向の速度から接線速度<sup>3</sup>を計算した。

学習の測度として、課題完了までの時間（スタートの合図からカーソルがターゲットに到着するまでの時間）が用いられた<sup>4</sup>。統計解析は以下のように行われた。まず、プレテストとポストテストに関しては各被験者毎に、全試行の平均の「課題完了までの時間」を算出する。次に、個々の試行の課題完了までの時間から各被験者毎の平均を引き、各被験者の平均の課題完了までの時間が0になるようにする。このようにして計算した課題完了までの時間に対して2要因（テストの種類×ターゲット方向）の分散分析を行った。ただし、この場合のテストの種類とはプレテスト/ポストテストの区別である。実験群被験者では、ターゲット方向は、トレーニングを行った方向からの角度差に換算してある。すなわち、トレーニングを行った方向が0°で、左隣が45°、右隣が-45°である。コントロール被験者では、トレーニングを行っていないので右斜め上のターゲット方向（T1）を仮に0°とした。

トレーニング中の課題完了までの時間も、各被験者ごとに平均値が0になるようにしたあと、2要因（試行ブロック数×狭い範囲に限定されたターゲットの位置）の分散分析を

<sup>3</sup>接線速度の計算方法は、第2章脚注2（p.40）参照。

<sup>4</sup>前述のようにマーカーの位置は100Hzで計測したので、課題完了までの時間の最小単位は10msであった。

行った。

#### 4. 2. 3 結果と考察

##### ●トレーニング中の学習過程

###### 【課題完了までの時間】

図4. 5に各試行ブロック毎の課題完了までの時間の平均と標準偏差を示す。各被験者のグラフ右上には、それぞれの被験者のトレーニング方向を手先座標とCRT座標において示している。試行回数が増えるにつれて、平均も標準偏差も減少している。分散分析によれば、試行ブロック数の効果は有意 ( $F(6, 1446) = 116.31, p < .0001$ ) であった。さらに多重比較 (Tukey HSD multiple comparisons) の結果では、第1ブロックと他の全てのブロックとの間に、第7ブロック (最終ブロック) と他の全てのブロックとの間に有意な差 ( $p < .05$ レベル) が見られた。以上の結果は学習が起きていたことを示唆している。

分散分析によれば、トレーニング中の狭い範囲に限定された9つのターゲット位置の効果は有意であった ( $F(8, 1446) = 3.60, p < .001$ )。しかし、多重比較によりどの組み合わせが有意であったかを調べると、S4とS9 (図4. 4右参照, p.104) だけが有意 ( $p < .0001$ ) であった。全ての組み合わせが36 (9つのものから2つとる組み合わせ) であること考えると、トレーニング中にはターゲット位置の効果はほとんど無いと言える。

###### 【軌道と速度波形】

図4. 6 a, bはひとりの被験者 (TF) の、トレーニング開始時 (No. 1~9) と終了時 (No. 370~378) における軌道を示している。トレーニング開始時においては、軌道は複雑な形をしており、被験者が視覚フィードバックを用いて修正運動を繰り返していた

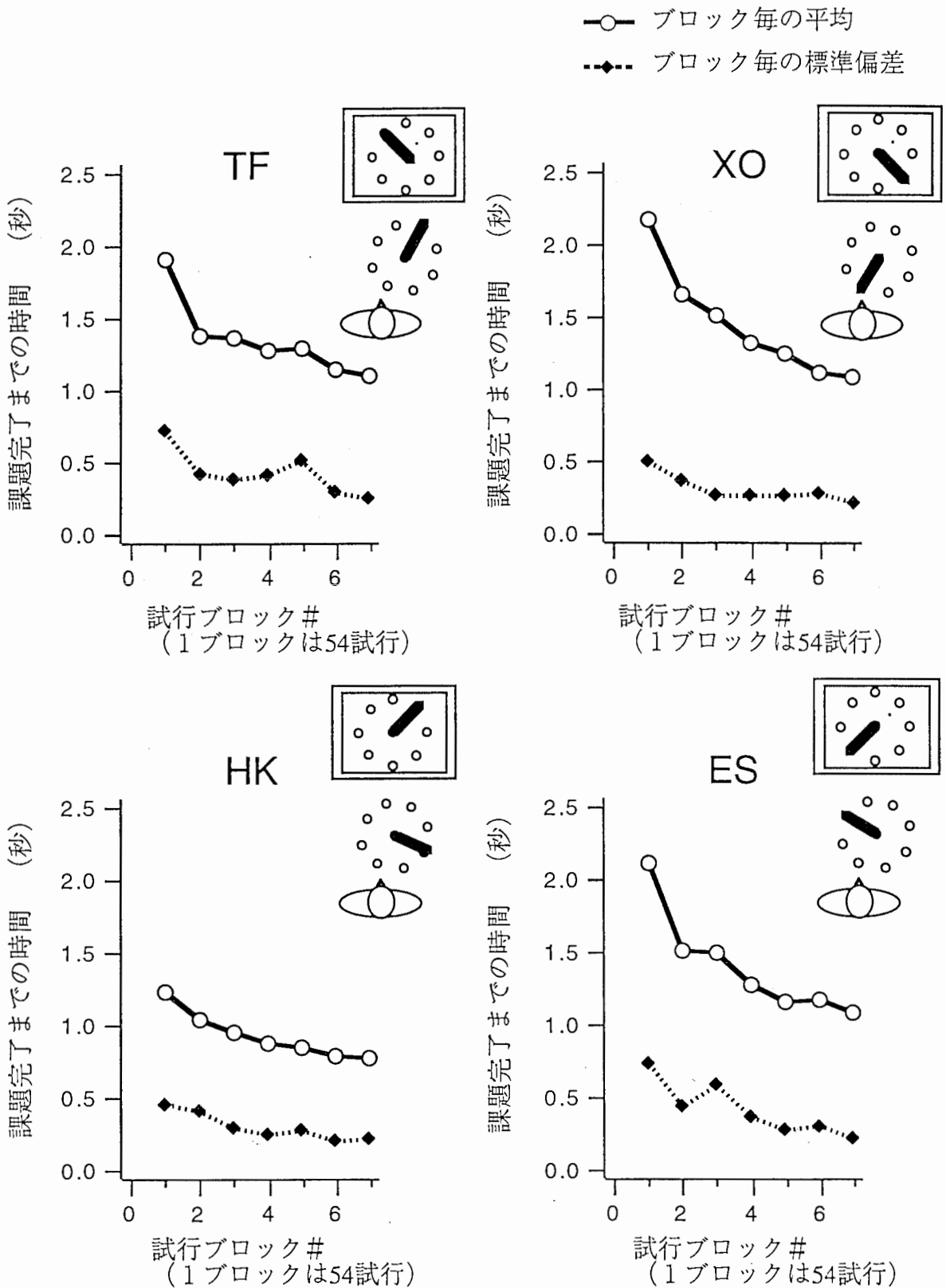


図4. 5 実験1の結果：トレーニング中の学習過程。横軸に試行ブロック数，縦軸に各試行ブロック毎の課題完了までの時間の平均と標準偏差(n=54)をとって学習曲線を示す。被験者は一方向の狭い範囲に限定されたターゲットに対して繰り返し到達運動のトレーニングを行った。各被験者のグラフ右上のイラストは，それぞれの被験者のトレーニング方向を手先座標（下）とCRT座標（上）において示している。イラスト中の白丸（○）はプレテストおよびポストテストにおけるターゲットを，黒く太い線は各被験者のトレーニング方向を示している。

ことがわかる。しかし、トレーニング終了時には軌道はほぼ直線となっていた。図4. 6 c, dはそれぞれの軌道に対応する接線速度波形 (tangential velocity profile) を示している。トレーニング開始時には、速度波形は多くの頂点をもつ複雑な波形をしているが、トレーニング終了時には、前半はほぼひとつの頂点をもつベル型になっている。

到達運動の訓練とともに、手先の運動は滑らかになることは良く知られている

(Georgopoulos, Kalaska & Massey, 1981). Morraso (1981)によれば、良く習熟した到達運動では、軌道はほぼ直線で、速度波形はベル型になる。生体におけるフィードフォワード制御の数理モデル (例えばFlash, 1987やUno, Kawato & Suzuki, 1989) でも、このような運動が説明できる。以上のことから、トレーニング中の軌道や速度波形の変化は、フィードバック制御による運動 (修正運動) からフィードフォワード制御による運動 (弾道運動) に変化していたことを示している。

#### ●プレテストとポストテストの比較

【課題完了までの時間】

図4. 7は、課題完了までの時間の平均と標準偏差を、ターゲットの方向ごとに示している。レーダー図の軸の方向は、手先座標におけるターゲットの方向に対応している (コントロール被験者の図を参照)。四角で囲まれた軸の方向が、各被験者のトレーニング方向である。実験群被験者においては、ポストテストの平均 (実線) の方がプレテストの平均 (破線) より低くなっているが、コントロール被験者においては、両者の間でほとんど差が見られない。

分散分析の結果でも、実験群被験者ではテストの種類 (プレテストまたはポストテスト)

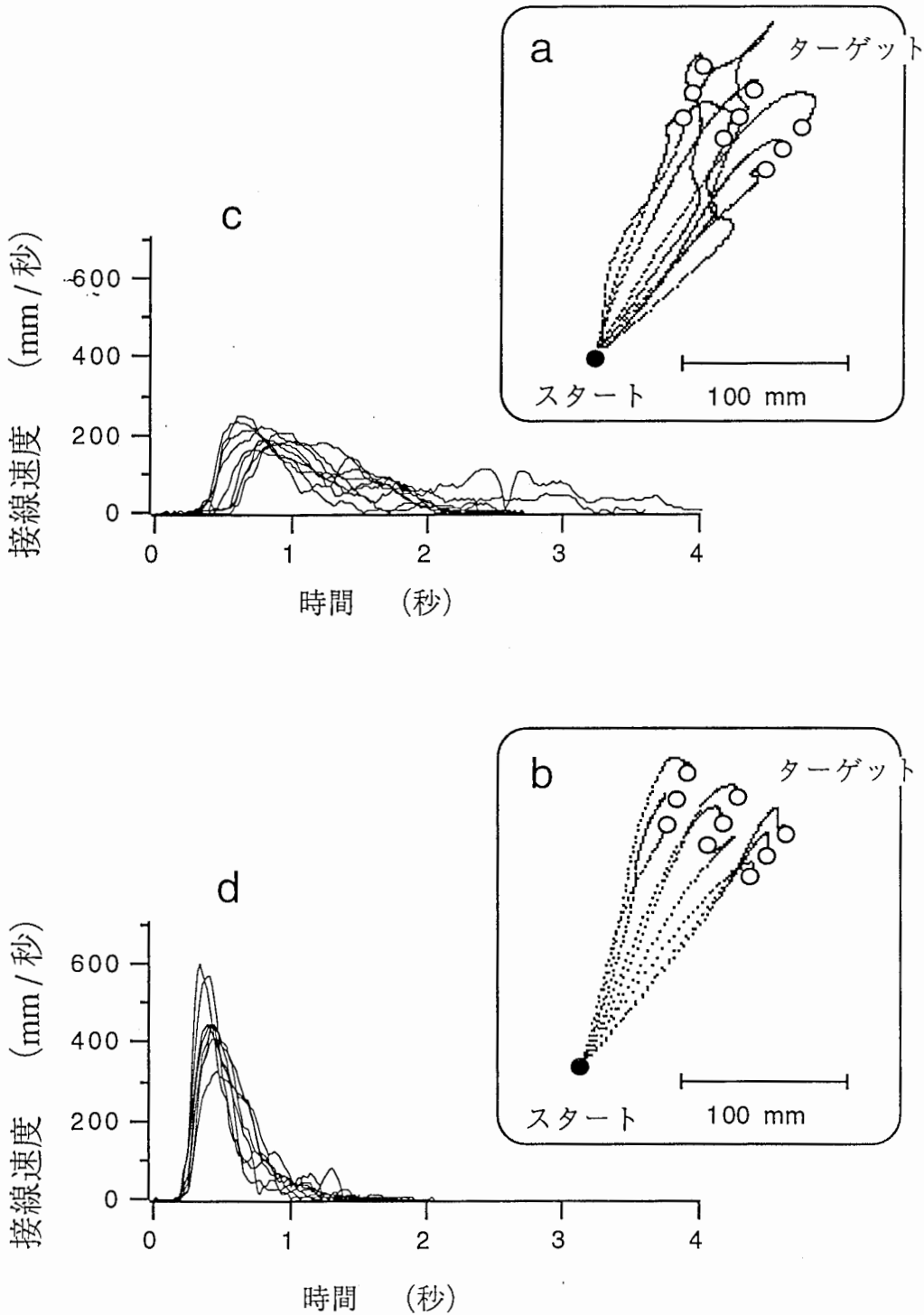


図4. 6 実験1の結果：トレーニング前後の手先の速度波形と軌道（被験者：TF）．被験者は一方向の狭い範囲に限定されたターゲット（aおよびb中の白丸○）に対して繰り返し到達運動のトレーニングを行った．

- a) トレーニング開始時 (No. 1~9) の軌道
- b) トレーニング終了時 (No. 370~378) の軌道
- c) トレーニング開始時 (No. 1~9) の速度波形
- d) トレーニング終了時 (No. 370~378) の速度波形

被験者の手先の位置は100Hzで記録された．被験者の課題は手先（カーソル）をスタート地点から，なるべく早くターゲット（○）の近くまで移動させることであった．

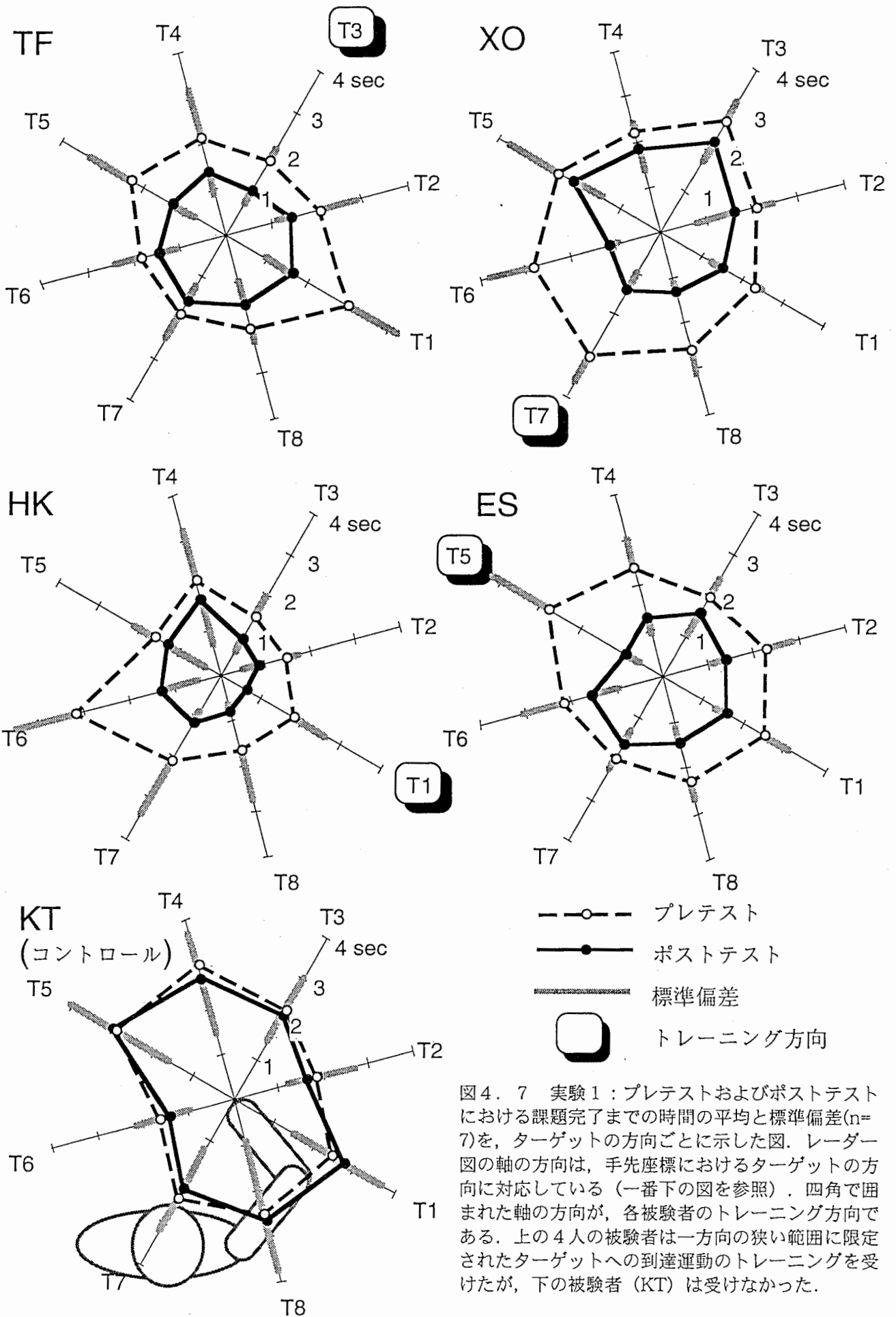


図4. 7 実験1：プレテストおよびポストテストにおける課題完了までの時間の平均と標準偏差(n=7)を、ターゲットの方向ごとに示した図。レーダー図の軸の方向は、手先座標におけるターゲットの方向に対応している（一番下の図を参照）。四角で囲まれた軸の方向が、各被験者のトレーニング方向である。上の4人の被験者は一方向の狭い範囲に限定されたターゲットへの到達運動のトレーニングを受けたが、下の被験者（KT）は受けなかった。

の効果が有意 ( $F(1,413)=145.29, p<.0001$ ) であったのに対して、コントロール被験者では、有意ではなかった ( $F(1,96)=.28, p=.59$ )。テストの種類とターゲット方向（トレーニング方向からの角度差に換算）の交互作用は、実験群被験者では有意 ( $F(7,413)=3.55, p<.001$ ) であったのに対して、コントロール被験者では有意ではなかった ( $F(7,96)=.084, p=.99$ )。これらの結果は、実験群被験者においては学習の効果があり、また、この効果はトレーニング方向からの角度差に応じて異なっていたことを示唆している。多重比較を用いて、トレーニングの方向からの角度差毎にプレテストとポストテストで差があるかどうか調べた。結果は表4. 1に示す通り、1) トレーニング方向以外の広い範囲で有意差が見られた、2) トレーニング方向からの角度差が少ないほど有意な学習効果が見られた。

<表4. 1> トレーニング方向からの角度差とプレテスト/ポストテスト間の有意差

有意水準	トレーニング方向からの角度差 (°)							
	-135	-90	-45	0	45	90	135	180
$p<.10$	n.s.	*	*	*	*	*	*	*
$p<.05$	n.s.	n.s.	*	*	*	*	n.s.	n.s.
$p<.01$	n.s.	n.s.	*	*	*	*	n.s.	n.s.

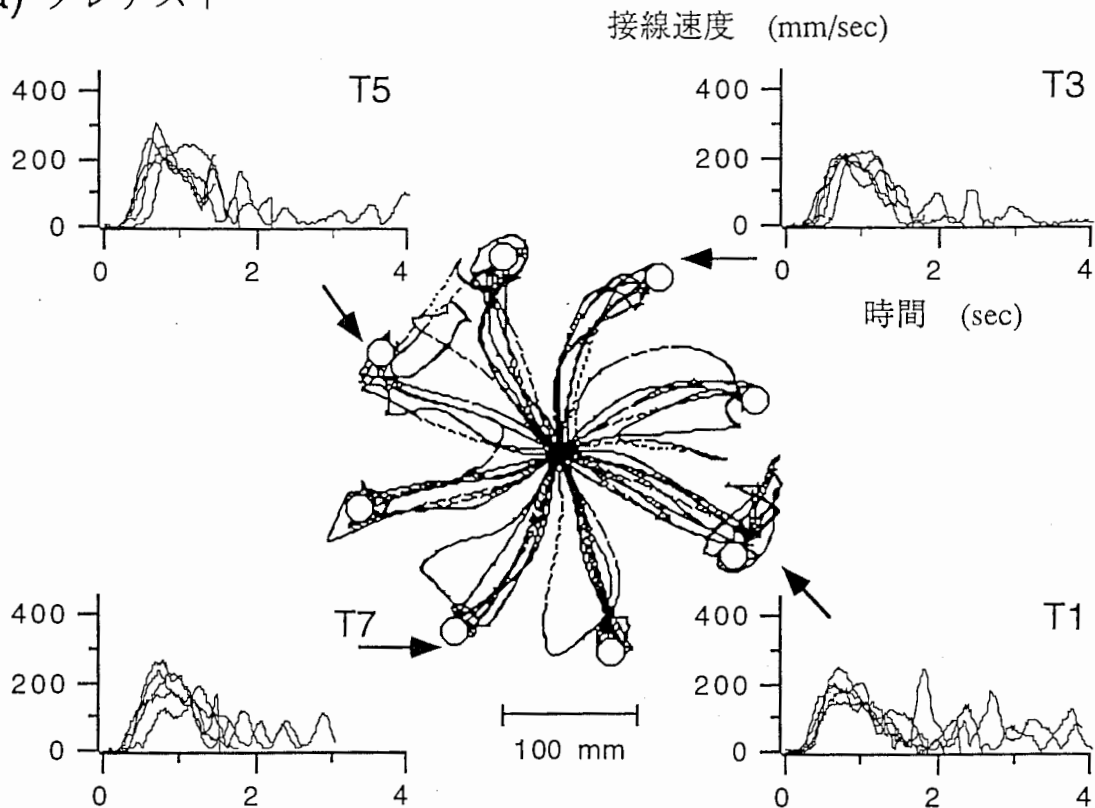
n.s. 有意差無し    \* 有意差有り

#### 【軌道と速度波形】

図4. 8は、ひとりの被験者 (TF) について、プレテストとポストテストにおける軌道と速度波形を示している。この図で軌道は手先座標において示されている。この被験者 (TF) では、図4. 8 bに示すようにT3がトレーニング方向であった。



a) プレテスト



b) ポストテスト

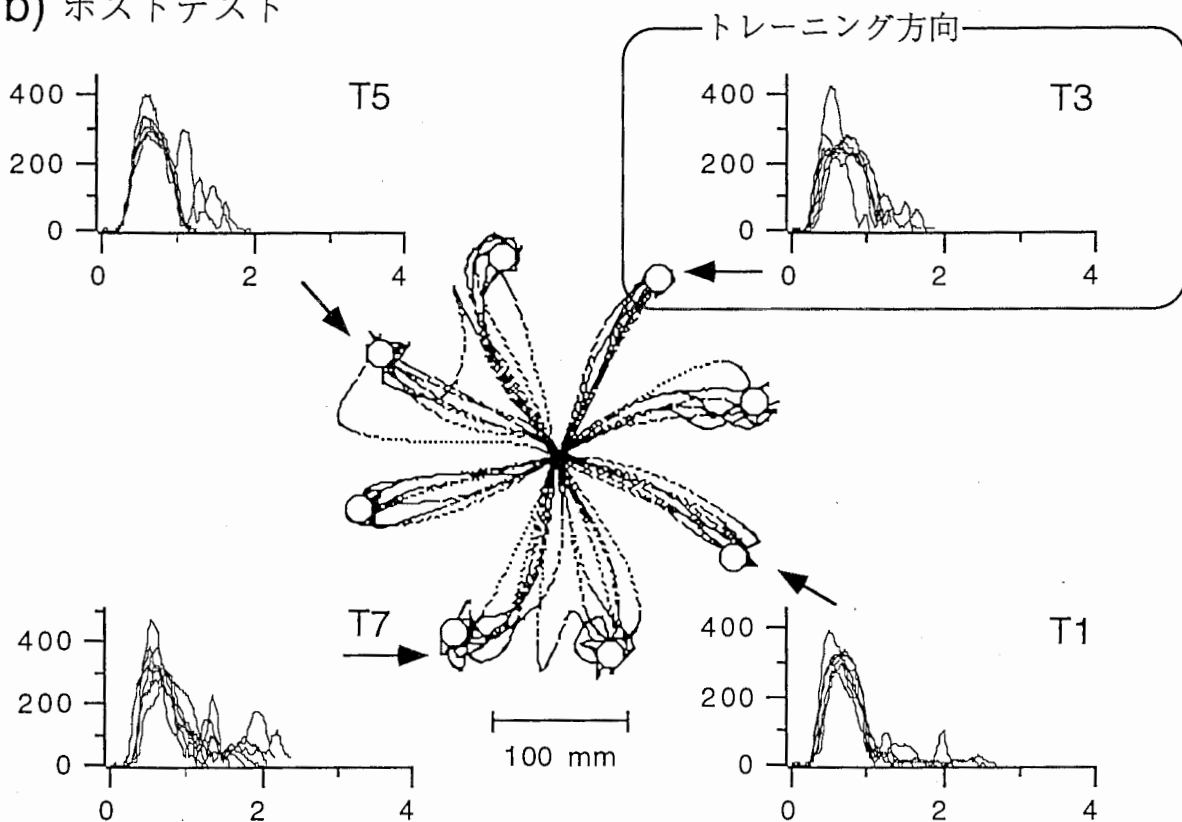


図4.8 実験1の結果：ひとりの被験者 (TF) の、プレテスト (a) とポストテスト (b) における手先軌道と速度波形を示す図。それぞれの図の中央は手先軌道を示している。図中の白丸 (○) はターゲットを示す。手先軌道の周辺には矢印で示したターゲットへの到達運動を行ったときの速度波形を示している。被験者の手先の位置は100Hzで記録された。

プレテストでは（図4. 8 a）, 軌道は多くの点で曲がった複雑な形で, 速度波形は多くの頂点を持つ。これらの特徴は, トレーニング開始時の軌道と速度波形（図4. 6 a, c）と共通している。ポストテストでは, 軌道は直線に近くなっているが, 特にトレーニング方向に到達運動を行うときの軌道が最も直線に近い。ポストテストにおける速度波形はどの方向でも, ひとつの頂点をもつベル型になっている。

#### 【最高速度】

さらに, プレテストとポストテストにおいてターゲット方向ごとに最高速度を調べた。図4. 6および図4. 8に示された速度波形を見ると, ほとんどの場合, 速度の最大値は初めの弾道的な運動の頂点に等しい。従って, 仮に移動距離が同じであるとすれば, 最高速度が高くなればなるほど弾道運動中に移動する距離が長くなり, それに続く修正運動中の移動距離は短くなる。図4. 6に示されるように, トレーニング終了時の最高速度は, トレーニング開始時の最高速度の3倍ほどになり, フィードバック制御からフィードフォワード制御へと移行したことを示している。このように, 最高速度は一回の到達運動のなかで, フィードフォワード制御（弾道運動）がどれくらい優位であるかを示す指標となり得る。

図4. 8に示すように, トレーニングした方向もトレーニングしなかった方向も同様に, 速度波形の頂点は, プレテストよりもポストテストの方が, はるかに高くなっていた。プレテストとポストテストにおける速度波形の頂点の高さ（最高速度）を図4. 7と同様の方法で表わしたのが図4. 9である。図4. 8から予想されたように, 最高速度は, どの方向でもポストテストの方が高く, プレテストとポストテストの差はトレーニング方向とは関係なくどの方向でも一様であった。課題完了までの時間を統計解析した時と同様な方

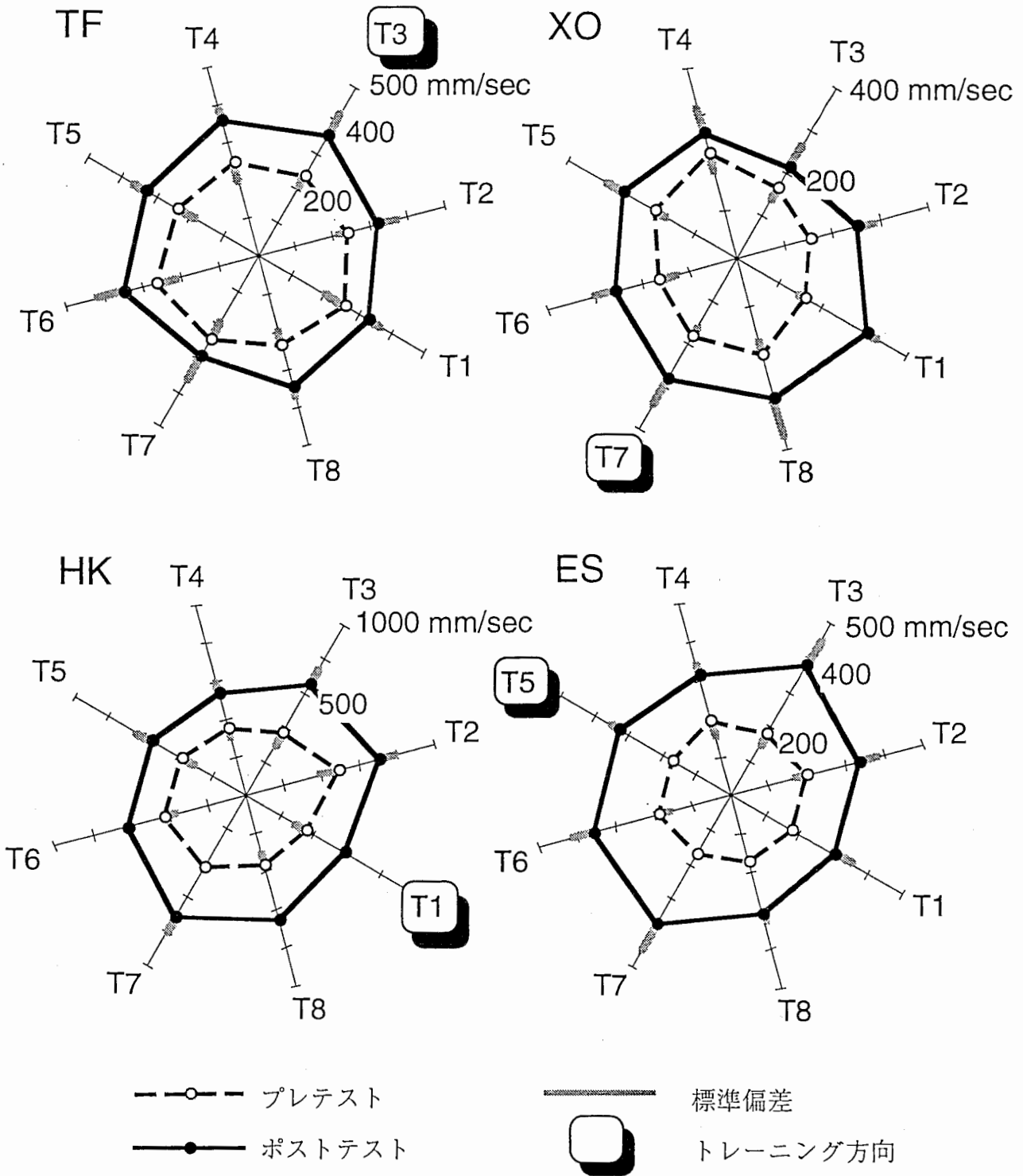


図4. 9 実験1の結果：プレテストとポストテストにおける速度波形の頂点の高さ（最高速度）をターゲットの方向ごとに示した図。試行ごとに速度波形の頂点の値を調べ、ターゲットの方向ごとに平均と標準偏差(n=7)を求めた。図4. 7と同様、レーダー図の軸の方向は、手先座標におけるターゲットの方向に対応している。四角で囲まれた軸の方向が、各被験者のトレーニング方向である。

法で、2要因（テストの種類×ターゲット方向）の分散分析を行った。その結果、テストの種類とターゲット方向の主効果は有意 ( $F(1, 413) = 3.89, p < .0005$ ;  $F(7, 413) = 700.25, p < .0001$ ) であったが、それらの交互作用は有意ではなかった。

これらの結果から、ポストテストでは、トレーニング方向とは無関係に、全ての方向で運動がフィードフォワードに行われていたことが推定できる。しかしながら、フィードフォワード制御による弾道運動が、実際にどれくらい正確であったかということは、実験1の結果からでは不明である。従って、実験2では、弾道運動の正確さを計測できるように、到達運動課題を変えた。

さらに、到達運動課題を変えるもうひとつ理由がある。それは、図4.6aからわかるように、トレーニングの開始時においては軌道が多くの変な方向に曲がっている。このことは、ターゲットを一方向に限定したにもかかわらず、微視的にはトレーニング中に（特にトレーニング開始時に）さまざまな方向の運動を経験していたことになる。したがって、トレーニング開始前から軌道が直線になるような拘束条件を到達運動課題に予め含める必要がある。

### 4.3 行動実験2：弾道運動における学習の汎化

#### 4.3.1 目的

到達運動時間を短く制限することにより、弾道運動における学習の汎化の様子を調べる。

#### 4.3.2 方法

**【被験者】**

被験者は男女4人（被験者MOが女性）．全員同志社大学1～3回生で年齢は18～21歳であった．被験者として協力することで時給1000円が支払われた．実験の目的は知らせていなかった．視力（矯正を含む）および上肢運動機能は正常で，全員右手利きであった．

**【装置と刺激】**

実験1とおなじ装置と刺激を用いた．

**【手続き】**

実験開始前に被験者に対して，1）手先の運動方向とカーソルの運動方向の間に，常に75°のずれがある，2）課題は600 msという制限時間内でカーソルをなるべくゴールの近くまで移動させることである，という2点を教示した．

それぞれの試行の手続きは以下のように行われた．まず，実験者が被験者の腕を持ち，机上のスタート地点まで移動させた．2～3秒後にスタート地点にカーソルが，画面の周辺のどこかにターゲットがひとつ出現した．さらに2秒後，コンピュータからクリック音が鳴り，その音を合図に被験者は手先を動かし始めた．ここまでは実験1と同じである．次に実験2では，スタートの合図である始めのクリック音から600 ms後に，再びクリック音が鳴り，被験者はこの2回目のクリック音で運動を止めなければならなかった．被験者は，実験開始前に16回の練習試行を行い，この間に600 msという時間間隔を覚えるように教示された．

実験時間はひとりの被験者につき、およそ3時間かかった。プレテストとポストテストはそれぞれ、112試行（=8つのターゲット×14回）から成っており、およそ20分かかった。各試行の時間間隔は5秒以上あけないようにした。

トレーニングは54試行（=狭い範囲に限定された9つのターゲット×6回）を1ブロックとして、10ブロック（合計540試行）行い、およそ150分かかった。各ブロックの間には5分の休憩時間を設けた。ただし、トレーニングに参加したのは、4人のうちの3人（実験群被験者：MO, TS, SI）で、残りのひとり（コントロール被験者：JH）は、トレーニングにかかる時間だけ休息していた。実験群被験者においてトレーニング方向は、各被験者ごとに予め決められていた（MO → T3, TS → T5, SI → T7）。

実験1と同様、プレ（ポスト）テスト中もトレーニング中も、ターゲット位置は毎試行ランダムに決めた。

#### 【解析方法】

学習効果の測度として、課題完了までの時間の代わりに、始めの弾道的な運動の終了地点とターゲットの間の距離（位置の誤差）を用いた以外は、解析方法は実験1と同じである。始めの弾道的な運動の終了地点を見つける方法は、第3章の補遺3.2（p.89）に説明した通りである。統計解析の方法も、実験1と同様であるが、 $\text{平均値} \pm 2 \times \text{標準偏差}$ （=95%信頼区間）以上の位置の誤差は外れ値として除外した。このような外れ値の数は、プレテスト112回のうちで最高7回（被験者MO）、ポストテスト112回のうちで最高6回（被験者SI）であった。

#### 4. 3. 3 結果と考察

## ●トレーニング中の学習過程

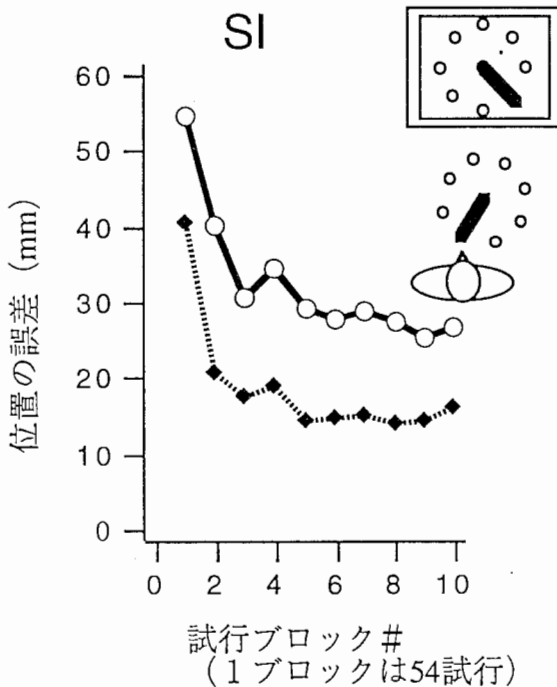
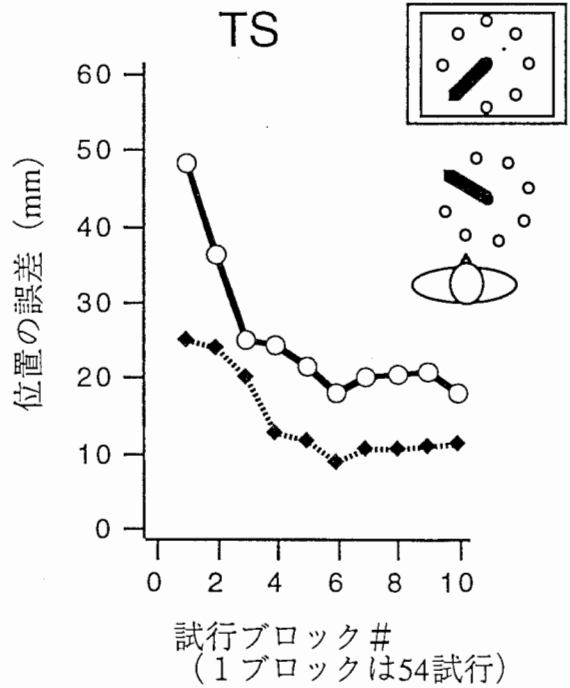
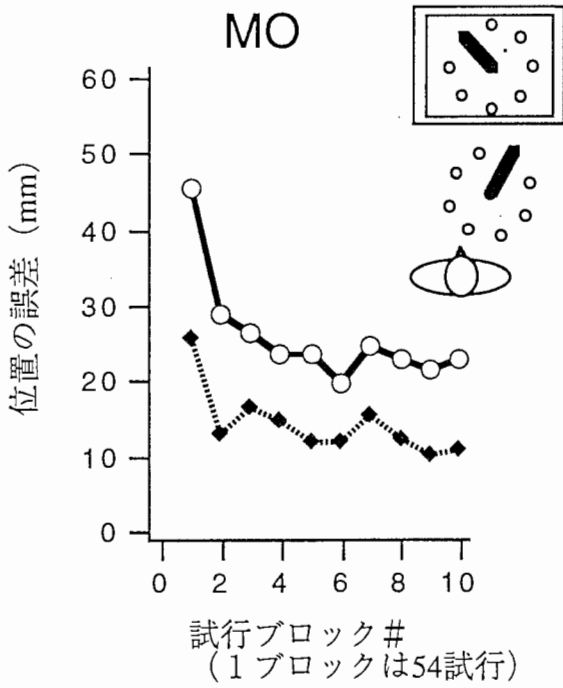
### 【位置の誤差】

図4. 10は、トレーニング中の位置の誤差の平均と標準偏差を試行ブロック毎に示している。平均も標準偏差も試行ブロック数が増えるとともに減少している。分散分析では、試行ブロックの効果は有意 ( $F(6, 1528)=42.35, p<.0001$ ) であった。さらに多重比較 (Tukey HSD multiple comparisons) で各試行ブロック同士に差があるかどうか調べたところ、第1ブロックと他のすべてのブロックの間に、最終ブロックと他のすべてのブロックの間に有意な差が見られた ( $p<.001$ )。以上のことは、トレーニング中に学習が起きていたことを示唆している。

トレーニング中の、狭い範囲に限定されたターゲット位置の効果は有意 ( $F(8, 1528) = 6.41, p<.0001$ ) であった。しかし、多重比較によれば、36組の組み合わせのなかで有意 ( $p<.05$ ) であったのは、わずか3組 (S3とS4, S3とS7, S3とS8 ; 図4. 4右参照, p.104) であった。従って、S3以外では、ほとんどトレーニング中のターゲット位置の効果はなかったものと考えられる。

### 【軌道と速度波形】

図4. 11 a, bはひとりの被験者 (MO) における、トレーニング開始時 (No. 1~9) と終了時 (No. 531~540) の軌道を示している。図4. 11 c, dは、それぞれの軌道に対応する接線速度波形を示している。軌道の終端点は補遺3. 2 (p.89) において説明した方法で検出した弾道運動の終了地点であり、図4. 11 a, bには修正運動の軌道は含まれていない。図4. 11 c, dの○も同じく弾道運動の終了地点を示している。実



○— ブロック毎の平均  
◆- - ブロック毎の標準偏差

図4. 10 実験2の結果：トレーニング中の学習過程。横軸に試行ブロック数，縦軸に各試行ブロック毎の位置の誤差の平均と標準偏差(n=54)をとって学習曲線を示す。位置の誤差は，始めの弾道運動の終了地点とターゲットの間の距離である。図4. 5と同様，各被験者のグラフ右上のイラストは，それぞれの被験者のトレーニング方向を手先座標（下）とCRT座標（上）において示している。各被験者はイラストに示されたような一方向の狭い範囲に限定されたターゲットに対して繰り返し到達運動のトレーニングを行った。被験者の課題は画面の中心に現れるカーソルを，短い制限時間（600ms）内なるべくターゲットの近くまで移動させることであった。



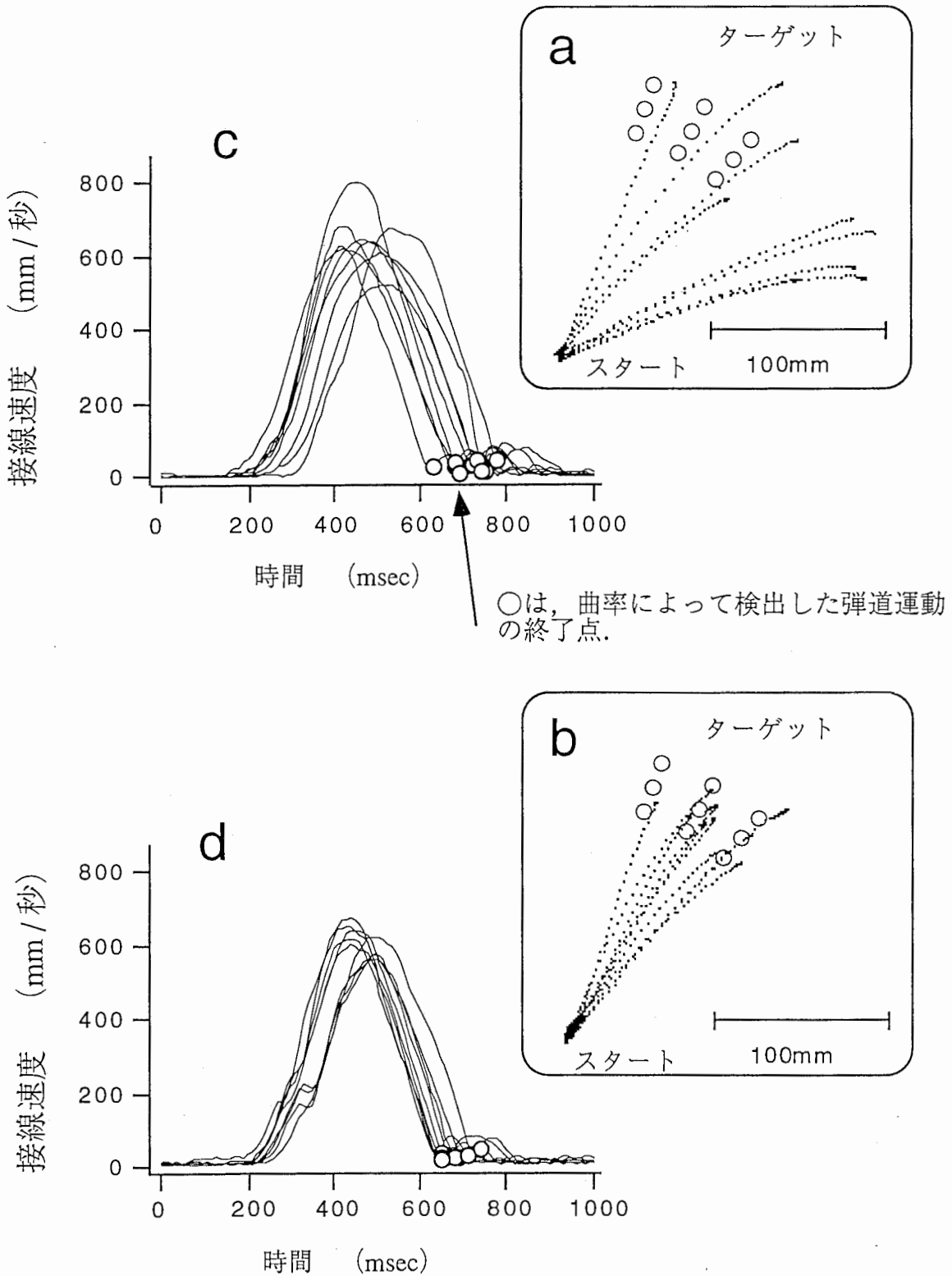


図4. 11 実験2の結果：トレーニング前後の手先の速度波形と軌道（被験者：MO）．被験者は一方向の狭い範囲に限定されたターゲット（aおよびb中の白丸○）に対して繰り返し到達運動のトレーニングを行った．

- a) トレーニング開始時（No. 1～9）の軌道
- b) トレーニング終了時（No. 531～540）の軌道
- c) トレーニング開始時（No. 1～9）の速度波形
- d) トレーニング終了時（No. 531～540）の速度波形

被験者の手先の位置は100Hzで記録された．被験者の課題は手先（カーソル）をスタート地点から、短い制限時間（600ms）内でなるべくターゲット（○）の近くまで移動させることであった．

験1とは異なり、トレーニング開始時も終了時も、軌道はほぼ直線、速度波形はひとつの頂点を持つベル型であり、トレーニング開始時から弾道運動が行われていたことを示唆している。しかし、トレーニング開始時では、弾道運動の終了地点は広い範囲に分散しているのに対し、終了時にはターゲット領域の近辺に集中している（図4. 11 a, b）。速度波形も、トレーニング開始時では、時間潜時と最高速度がまちまちであるのに対して、終了時にはほぼ一定の値である。以上のことは、フィードフォワード制御が、次第に正確になり、また安定してきたことを示唆している。

#### ●プレテストとポストテストの比較

##### 【位置の誤差】

図4. 12 a, bはプレテストとポストテストにおける弾道運動の終了地点の分布の様子を示している（被験者: MO）。軌道はどちらのテストにおいても、ほぼ直線なので、図には示していない。弾道運動の終了地点は、プレテストにおいては広い範囲にまばらに分布しているが（図4. 12 a）、ポストテストにおいては、それぞれのターゲットの近辺に収束している（図4. 12 b）。速度波形に関しては、どちらのテストでもひとつの頂点をもつベル型であるが、ポストテストでは時間潜時と最高速度が一定の値に安定している。

図4. 13は、図4. 7と同様の方法で、ターゲットの方向毎に位置の誤差の平均と標準偏差を表わしている。まず実験群被験者について述べる。プレテストにおける位置の誤差は、ターゲット方向によって様々に異なるが、ポストテストではほぼ一定の値になっている。さらに、ポストテストでは、ほとんどどの方向に関しても、プレテストの平均値よ

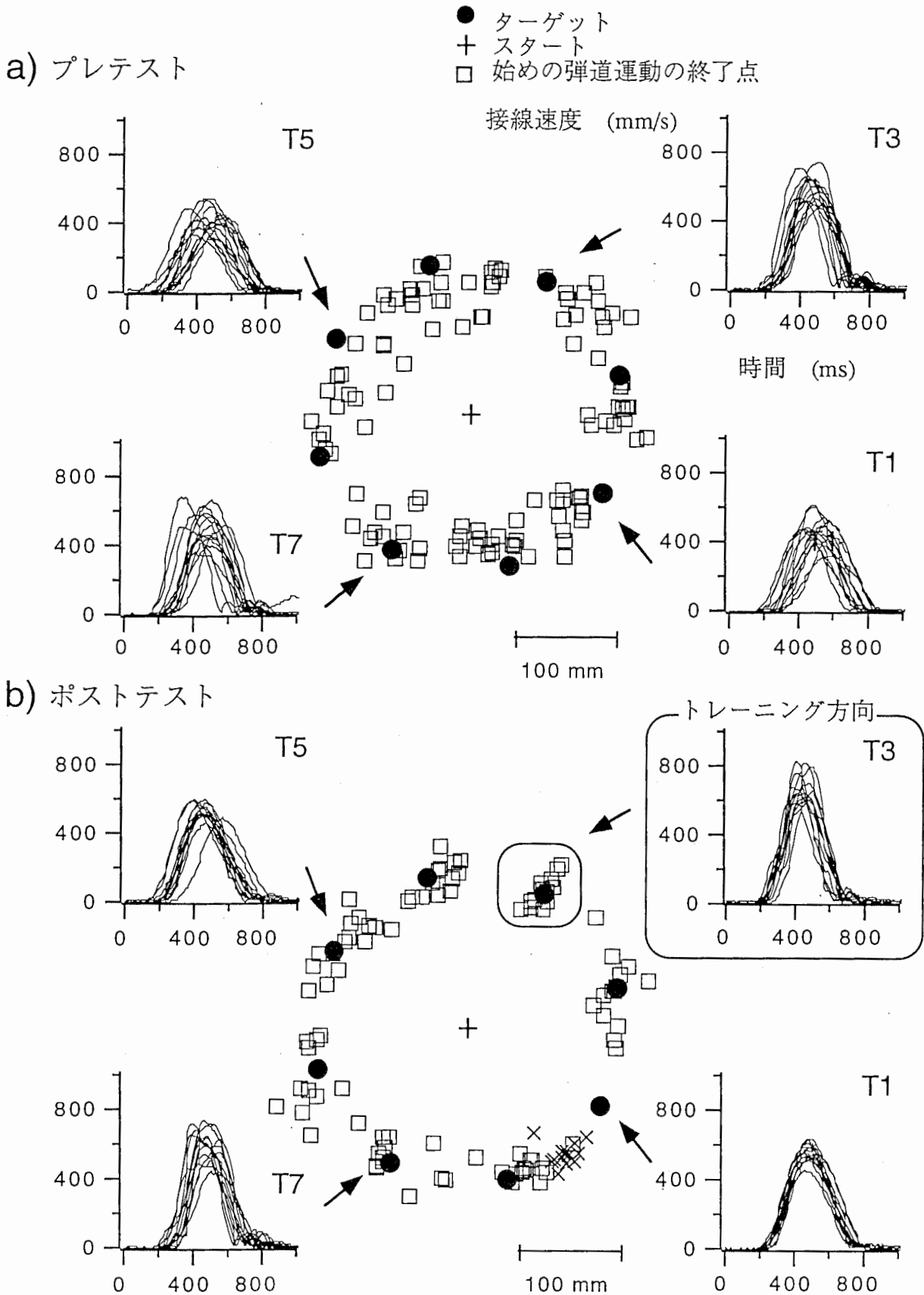


図4. 12 実験2の結果：ひとりの被験者 (MO) の、プレテスト (a) とポストテスト (b) における弾道運動の終了地点分布の様子を示す図。それぞれの図の周辺には矢印で示したターゲットへの到達運動を行ったときの速度波形を示している。被験者の課題は、トレーニングと同様、画面の中心に現れるカーソルを、短い制限時間 (600ms) 内なるべくターゲットの近くまで移動させることであった。

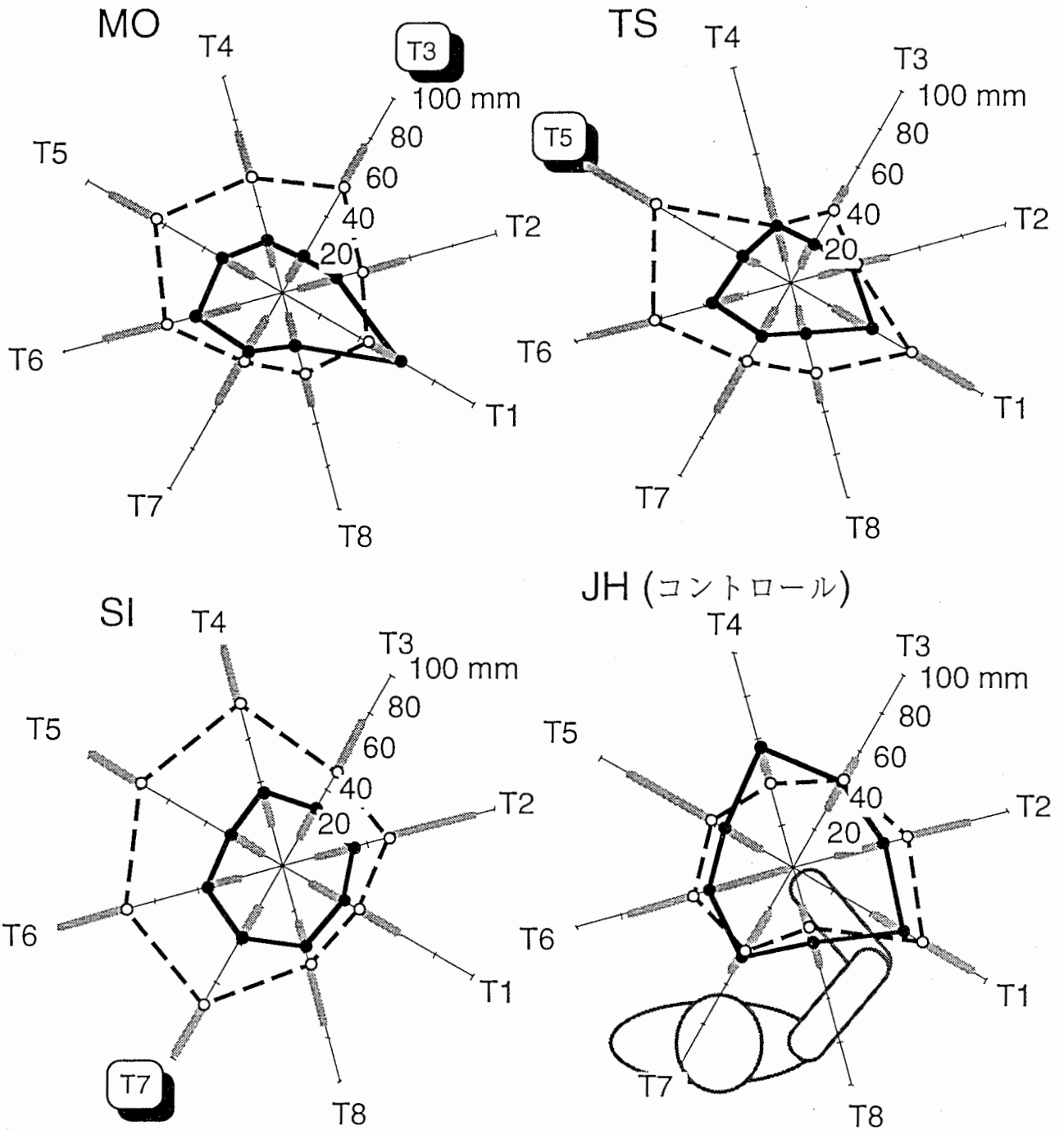


図4. 13 実験2：プレテストポストテストにおける位置の誤差の平均と標準偏差を、ターゲットの方向ごとに示した図。図4. 7と同様、レーダー図の軸の方向は、手先座標におけるターゲットの方向に対応している（右下の図を参照）。四角で囲まれた軸の方向が、各被験者のトレーニング方向である。3人の被験者（MO、TS、SI）は一方向の狭い範囲に限定されたターゲットへの到達運動のトレーニングを受けたが、ひとりの被験者（JH）はトレーニングを受けなかった。

- プレテスト
- ポストテスト
- ▨ 標準偏差
- トレーニング方向

りも下がっている。分散分析によれば、テスト種類（プレテストまたはポストテスト）の主効果は有意（ $F(1, 626) = 129.07, p < .0001$ ）であった。一方、コントロール被験者については、プレテストとポストテストの間でほとんど変化がなく、分散分析でもテスト種類の主効果は有意ではなかった（ $F(1, 206) = 0.17, p = .68$ ）。

ひとつ例外的な場合として、被験者MOがターゲットT 1に到達運動を行った場合がある。図4. 1 3からわかるように、この場合に限ってポストテストにおける位置の誤差が、プレテストにおけるそれよりも、はるかに大きくなっている。その理由は図4. 1 2 bにを見つけることができる。ターゲットT 1に対して到達運動を行ったときの弾道運動の終了地点が、図には×印で示されている。図からわかるように、弾道運動の終了地点はT 8の方向（時計周りの方向）にほぼ一定の角度（平均  $22.65^\circ$ ）ずれている。このような一定のずれが、何らかの理由でポストテストでのみ生じたため、ポストテストにおいてT 1方向の位置の誤差が大きくなったと考えられる。

テストの種類とトレーニング方向からの角度差に換算したターゲット方向の交互作用は実験群被験者においては有意であった（ $F(7, 645) = 1.99, p < .06$ ）。一方、コントロール被験者では、有意ではなかった（ $F(1, 206) = 1.71, p = .32$ ）。多重比較を用いてトレーニング方向からの角度差毎に、プレテストとポストテストで差があるかどうか調べた。表4. 2にその結果を示す。この表からわかるように、学習効果は多くの方向で見られた（ $p < .10$ では8方向のうちで7方向、 $p < .05$ では8方向のうちで5方向、 $p < .01$ では8方向のうちで2方向）が、それは一様な効果ではなかった。

さらに、被験者MOがターゲットT 1に到達運動を行った場合（MOの場合、T 1のトレーニング方向からの角度差は $-90^\circ$ ）の位置の誤差を除外して多重比較を行うと、表4.

2の括弧内に示すような結果が得られ、全てのレベルで有意な差が見られた。

<表4. 2> トレーニング方向からの角度差とプレテスト/ポストテスト間の有意差

有意水準	トレーニング方向からの角度差 (°)							
	-135	-90	-45	0	45	90	135	180
$p < .10$	*	n.s. (*)	*	*	*	*	*	*
$p < .05$	*	n.s. (*)	*	*	*	*	n.s.	n.s.
$p < .01$	n.s.	n.s. (*)	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	n.s.

n.s. 有意差無し \* 有意差有り

何れにしても以上の結果は、1) トレーニング方向以外の広い範囲で有意差が見られたこと、2) トレーニング方向からの角度差によって異なる学習効果が見られたことを示唆している。

#### 4. 4 考察

##### 4. 4. 1 結果のまとめ

2つの行動実験を通して、視覚環境の変換に対応する内部モデルが、どのような方法で表現されているか調べた。実験1では、「なるべく早くターゲットまで移動する」という教示以外は時間の制約を設けず、弾道運動と修正運動を区別しないで、学習効果の汎化の様子を調べた。実験2では、弾道運動の正確さを知るため、被験者の課題と学習効果の測

度を変えて、弾道運動における学習の汎化の様子を調べた。

実験1と2の結果は以下の2点において共通する。

- 1) トレーニング方向以外の広い範囲で学習効果が見られた。
- 2) その効果は一様なものではなく、トレーニング方向からの角度差によって異なっていた。

第1の点は、学習効果が局所的なものではなく、tabular representationのような形で表現されていないことを示唆している。一方、第2の点は、structured representationのような形で表現されていないことを示唆している。従って、2つの行動実験で見られたような学習の汎化は、structured representationまたはtabular representationという極端な分類には当てはまらないことを示唆している。以上のことから、中枢神経系は感覚入力と運動出力を局所的に連合しているのでも、物理パラメータを陽（explicit）に表現することによって内部モデルを構成しているのでもないと考えらる。

しかし、これまでの議論はすべて、内部モデルがごく単純なtabular representationやstructured representationであることを前提としている。しかし、tabular representationやstructured representationが単純でない場合、局所的でも大域的でもない学習の汎化が見られる可能性がある。この点について次節で検討する。

#### 4. 4. 2 単純でないtabular およびstructured representationの汎化特性

第一に、tabular representationであっても、入出力を工夫することで、ある程度の範囲で学習を汎化させることができる。例えば、トレーニング期間中に提示された入出力信

号の組 ( $S_1-R_1, S_2-R_2 \dots S_n-R_n$ ) をメモリに蓄えて置く。これだけでは純粋なtabular representationと同じであるが、これまでに出会ったことのない新たな入力信号 ( $S_x$ ) が入って来たときに、メモリの中にある入力信号のうちで最も近いものをいくつか探し出し ( $S_a, S_b, S_c \dots$ ) , それぞれに対応する出力信号 ( $R_a, R_b, R_c \dots$ ) の平均値を出力すれば、ある程度の範囲で学習を汎化させることができる。このような内部モデルの特徴は、トレーニング中に与えられた入力信号に対しては適切な出力信号を出す、新たな入力信号がトレーニング中に与えられた信号から離れれば離れるほど、誤った出力信号を出す確率が高くなることである。これまでに提案された計算モデルのなかで、RBF (Radial Basis Function: Poggio and Girosi, 1990) やK-mean neural network (Duda and Hart, 1973) と呼ばれるものはこのような汎化特性を示す。

第二に、structured representationであっても、不適切な構造やパラメータ値を持つ場合には、特定の領域の入力信号に対しては適切な出力信号を出す、他の領域の入力信号では不適切な出力信号を出す可能性がある。行動実験では、予め被験者に対して75°の回転変換であることを教えたが、内部モデルがそのように構成されるとは限らない。回転変換の他に平行移動や拡大縮小が含まれていたり、学習したパラメータの値が不適切であった場合には、上記のように特定の領域の入力信号に対しては適切な出力信号を出せなくなり、structured representationの特徴である一様な汎化が実現できなくなる可能性がある。

以上のように、単純でないtabular およびstructured representationでは、局所的でも大域的でもない学習の汎化が見られる可能性がある。次に、このようなモデルで実験データが説明できるかどうかを検討する。



## 4. 4. 3 単純でないtabular representationの検討

先にも述べたように、このモデルの特徴は、トレーニング中に与えられた入力信号に対しては適切な出力信号を出す、新たな入力信号がトレーニング中に与えられた信号から離れれば離れるほど、学習効果を汎化できなくなることである。このような現象は "graded response" と呼ばれているが、実験データにこのような傾向が見られるかどうかを検討した。

図4. 14は、実験2のポストテストにおいて、CRT座標でのターゲットの位置を始点、手先座標での弾道運動の終了地点を終点とするベクトルを示している。このようなベクトル場は、図4. 13に示したようなターゲット方向毎の位置の誤差よりも、被験者がどのような変換を学習したかということを直接的に表わしている。図4. 15はこのようなベクトルの大きさ ( $|\Delta\bar{x}|$ ) と回転角 ( $\Delta\theta$ ) をプレテストとポストテストにおいて示している。弾道的な運動の終了地点がターゲットと一致している場合は、 $|\Delta\bar{x}|$  が188.7mmで $\Delta\theta$  が75°になる。プレテストにおいては $|\Delta\bar{x}|$  も $\Delta\theta$  もさまざまな値に分散しているが、ポストテストでは全般的に、 $|\Delta\bar{x}|$  が188.7mm、 $\Delta\theta$  が75°に近い値になっている。また、ポストテストにおいて、トレーニング方向からの角度差が増えれば増えるほど、 $|\Delta\bar{x}|$  および $\Delta\theta$  の値がずれる傾向は見い出せず、"graded response" は確認できなかった。このことは、ある程度の範囲で汎化がおきるような工夫をしたtabular representationでも、実験結果は説明できないことを示唆している。

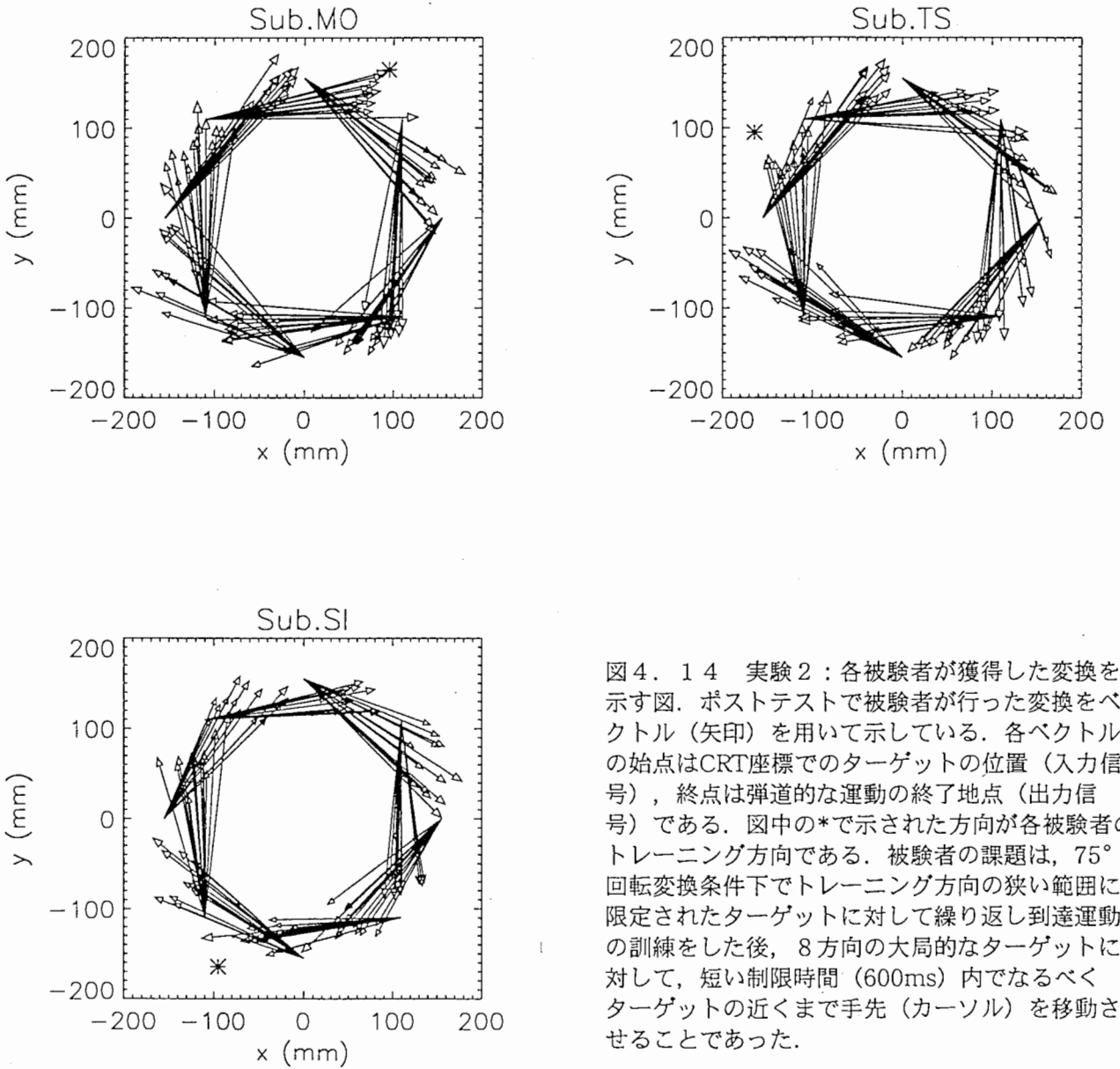


図4. 14 実験2：各被験者が獲得した変換を示す図。ポストテストで被験者が行った変換をベクトル（矢印）を用いて示している。各ベクトルの始点はCRT座標でのターゲットの位置（入力信号），終点は弾道的な運動の終了地点（出力信号）である。図中の\*で示された方向が各被験者のトレーニング方向である。被験者の課題は、75°回転変換条件下でトレーニング方向の狭い範囲に限定されたターゲットに対して繰り返し到達運動の訓練をした後、8方向の大局的なターゲットに対して、短い制限時間（600ms）内なるべくターゲットの近くまで手先（カーソル）を移動させることであった。

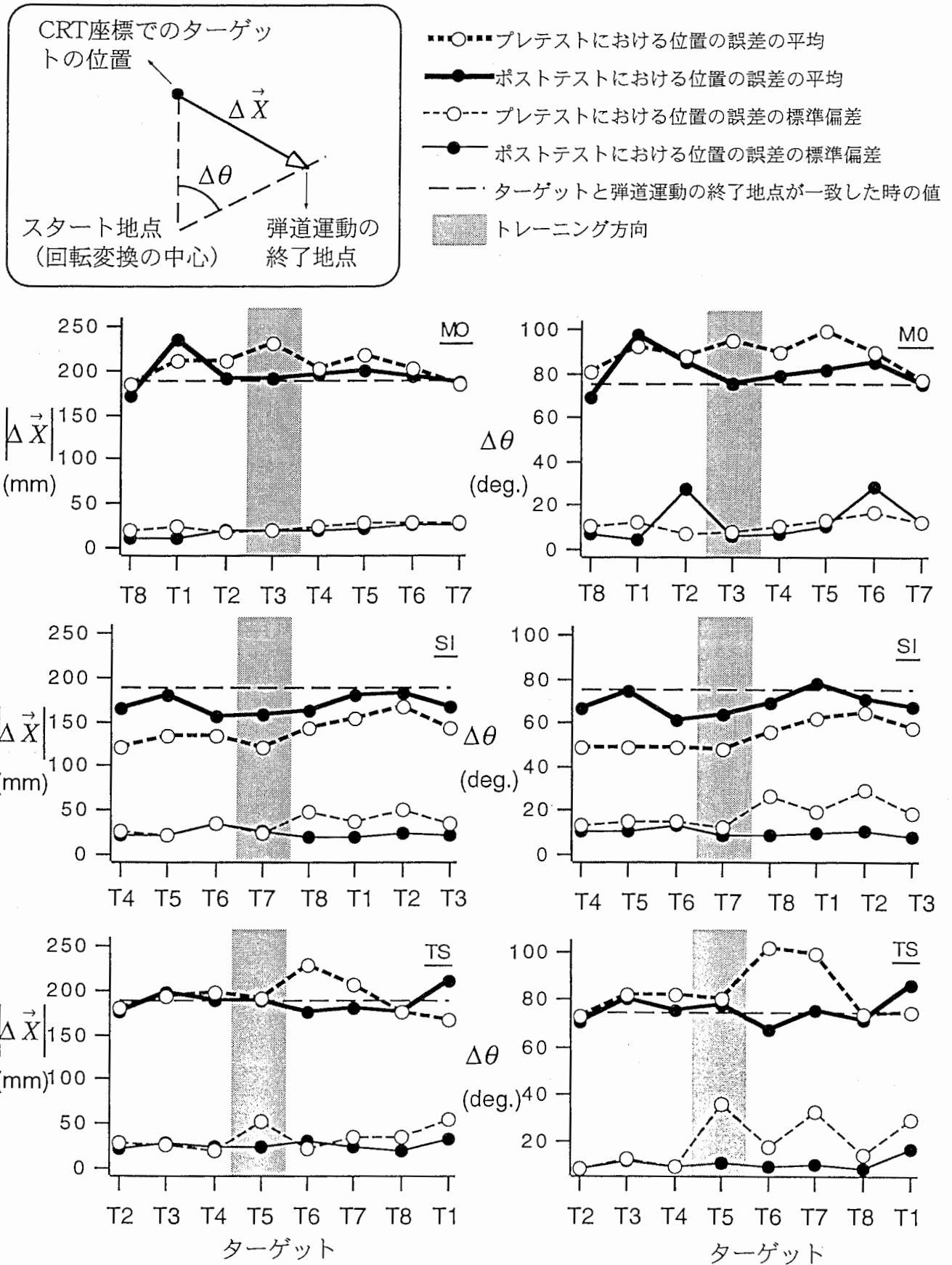


図4. 15 実験2：プレテストとポストテストにおいて被験者が行った変換に対応するベクトルの大きさ $|\Delta \vec{X}|$ (左図)と変換の回転角 $\Delta \theta$ (右図)をターゲット毎に示した図。一番上の図はベクトルの大きさと回転角の定義を示す。図4. 14に示したベクトル(ポストテストのデータ)のひとつひとつについて、大きさとそれに対応する回転角を求め、ターゲット方向毎に平均と標準偏差を求めた。プレテストについても同様のことを行った。

## 4. 4. 4 単純でないstructured representationの検討

次に、不適切な構造やパラメータ値を持つstructured representationで、実験結果が説明できるかどうか、以下に述べるような3つのモデルについて検討した。第1番目のモデルは、回転角 ( $a$ ) と  $x, y$  方向の平行移動 ( $b_1, b_2$ ) のパラメータを含んでいる。数式で表現すれば、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos a & \sin a \\ -\sin a & \cos a \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X - b_1 \\ Y - b_2 \end{pmatrix} \quad 4. 1 \text{ (前出)}$$

という形になる。第2番目のモデルは、第1番目のモデルに拡大縮小のパラメータ ( $\lambda$ ) を加えたもので、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} \cos a & \sin a \\ -\sin a & \cos a \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X - b_1 \\ Y - b_2 \end{pmatrix} \quad 4. 5$$

という形で表現できる。以上の2つのモデルは、回転、平行移動、拡大縮小といった単純な幾何的な意味を持つ（距離の次元で線形性を保つ）変換であり、structured representationであると考えられる。非線形で多くのパラメータを持つモデルを用意すれば、実験結果をより良く説明できるのは当然であるが、ここでは第3番目のモデルとして、一般的な線形変換を想定した。すなわち、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} \quad 4. 6$$

というモデルである。このモデルは特殊な場合を除いて、個々のパラメータ ( $p_1, p_2, p_3,$

$p_4$ ) が単純な幾何的意味を持たないので、structured representationであるとは言えない。

以上3つのモデルが実験2の結果を説明できるかどうかを、以下のような方法で検討した。始めに、実験2のポストテストで得られたデータを用いて、それぞれのモデルのパラメータ値を推定した。具体的には、CRT座標でのターゲットの位置を入力信号とし、手先座標での弾道運動の終了地点を出力信号として、最急降下法 (Bryson and Ho, 1975; 補遺4.1参照, p.150) を用いてパラメータ推定を行った。表4.3は、このような方法で求めた各モデルのパラメータ値を示している。次に、これらのパラメータ値を用いて各モデルが予想する弾道運動の終了地点を求めた。最後に、各モデルによって予想された弾道運動の終了地点と、実験2のポストテストで実際に被験者が到達運動を行ったときの弾道運動の終了地点の間で相関を調べ、どのモデルが一番良く実験結果を説明できるか評価した。具体的には、x, y方向ごとに1) モデルが予想した弾道運動の終了地点とターゲットの間の距離 (モデルが予想した位置の誤差)、2) 被験者が行った弾道運動の終了地点の平均値とターゲットの間の距離 (実際に計測された位置の誤差) を求め、1) と2) の間で相関を調べた。

<表4.3 : 最急降下法によって求めた各モデルのパラメータ値>

a) 第1番目のモデル

被験者	a: 回転角度 (°)	$b_1$ : x方向の並進 (mm)	$b_2$ : y方向の並進 (mm)
MO	-78.89	-2.96	-0.51
SI	-68.65	-0.87	-0.02
TS	-75.34	-2.22	-1.34

(次ページに続く)

## b) 第2番目のモデル

被験者	a: 回転角度( $^{\circ}$ )	$b_1$ : x方向の並進 (mm)	$b_2$ : y方向の並進 (mm)	$\lambda$ : 拡大縮小
MO	-78.89	-3.07	-0.49	0.95
S I	-68.65	-0.86	-0.08	0.91
T S	-75.34	-2.28	-1.36	0.95

## c) 第3番目のモデル

被験者	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$q_1$	$q_2$
MO	0.20	0.86	-1.00	0.15	0.98	-3.01
S I	0.32	0.83	-0.86	0.34	-0.20	-0.96
T S	0.22	0.91	-0.93	0.25	1.16	-2.15

図4. 16は、各モデルごと、各被験者ごとに1)と2)の相関を示している。すべての被験者に共通して、ピアソンの相関係数は、第3番目のモデルで最も高い値となっている。このことは、第3番目のモデルがもっとも良く実験結果を説明できることを示唆している。しかしこの場合、各モデルに含まれるパラメータ数が異なるので、単にモデルの出力とデータの相関を調べるだけでは不十分である。なぜならば、一般にモデルに含まれるパラメータ数が多ければ多いほど、そのモデルは良くデータを説明することができるからである。ここでは、パラメータ数を考慮してモデルを評価する方法として、赤池の情報量規準 (Akaike's Information Criterion; 補遺4. 2参照, p.151) を用いた。その結果は、図4. 16に示した通り、AICの値で調べても、第3番目のモデルが最も実験結果を良く説明できていた (AICの値は小さいほど良い)。また、表4. 3に示したように、第3番目のモデルの始め4つのパラメータ値 ( $p_1, p_2, p_3, p_4$ ) は単純な幾何学的意味を持たな

a) 第1番目のモデル

b) 第2番目のモデル

c) 第3番目のモデル

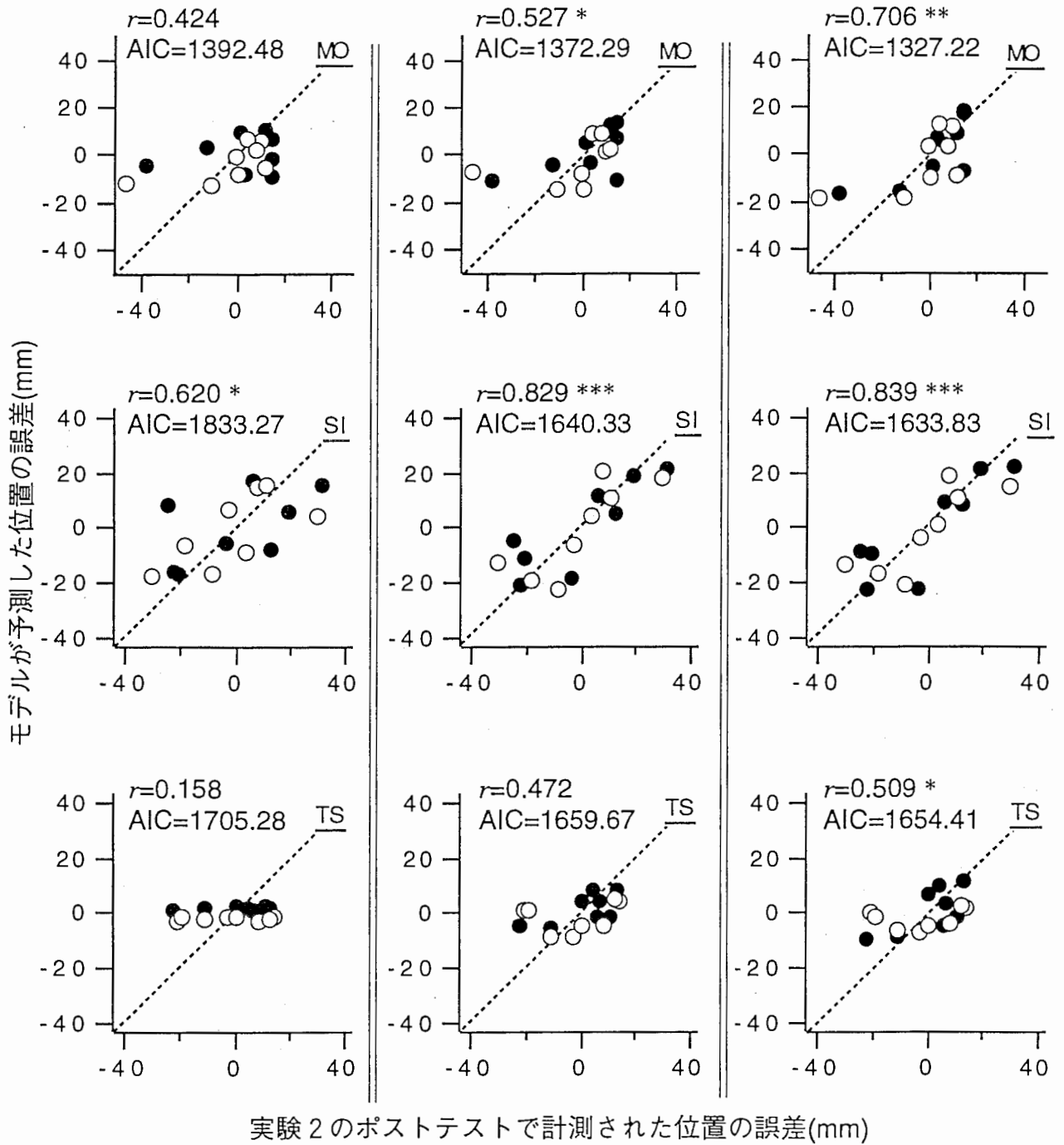


図4.16 モデルが予測した位置の誤差と実験2のポストテストで計測された位置の誤差の相関を示す図. 最急降下法により各モデルのパラメータ値(表4.3参照)を求めた後,各モデルにCRT座標におけるターゲットの位置を入力し,弾道運動の終了地点を予測した.これと手先座標でのターゲットの位置とのずれをx,y方向について計算し,モデルが予測する位置の誤差を求めて縦軸にプロットした.また実験2のポストテストで被験者が行った弾道運動の終了地点の平均をx,y方向について求め,横軸にプロットした.白丸(○)はx方向の位置の誤差を,黒丸(●)はy方向の位置の誤差を示している.各図の左上に,ピアソンの相関係数(r)とその有意水準(\* $p < .05$ , \*\* $p < .01$ , \*\*\* $p < .001$ )および赤池の情報量規準(AIC)を示す.

い。例えば被験者MOの場合、回転変換を表わす行列として解釈しようとする、 $p_1$ の値は0.20で、この値は $\cos(78.21^\circ)$ に相当するが、 $p_2$ の値は0.86で、この値は $\sin(59.03^\circ)$ に相当し、同じ行列内の要素であっても回転角度は一致しない。このように、第3番目のモデルは、実験2における課題の構造を反映するstructured representationであるとは言えない。

以上の結果は、不適切な構造やパラメータ値を持つstructured representationで、実験結果が説明できないことを示唆している。

#### 4. 4. 5 connectionist representationにおける学習の汎化

これまでに、提案された計算論的なモデルの中で、このようなnon-tabularかつnon-structuredな表現として、多層パーセプトロンが考えられる。多層パーセプトロンは個々のパラメータ、すなわちシナプス荷重が物理的な意味を持たないという点で、structured representationではない。また、入出力関係の局所的な連合ではないという点で、tabular representationではない。

connectionist representationにおける汎化の特性は、いくつかの理論的な研究により明らかにされている。例えば、Baum & Hausler (1989) はネットワークの大きさと汎化能力の関係について論じている。Poggio & Girosi (1990) は、ニューラルネットワークは、いくつかの例から入出力関係を学ぶという点において、古典的な近似方法と良く似ていることを指摘している。彼等の理論によれば、ネットワークはスプライン補間と同等であるだけでなく、補間課題における古典的な基底関数と非常に関係が深い。



connectionist representationにおいて、物理パラメータは、数多くのシナプス荷重という形で陰 (implicit) に表現されている。そして、シナプス荷重の数はネットワークの中間層の数によって決まる。ネットワークの出力の誤差は、バイアスとバリエーションに分けることができる。Geman, Bienenstock & Doursat (1992) によれば、中間層の数が少なすぎる場合、バイアスが大きくなり、ネットワークの性能は低下する。中間層の数を増やせば、バイアスは減らすことができるが、今度はバリエーションが大きくなり、膨大な数のトレーニングデータを必要とする。彼等は、これをバイアス/バリエーションのジレンマと呼んでいる。

何れにしても、今回の実験のように、狭い範囲に限定されたトレーニングデータから入出力関係を学習するとき、パラメータの数を増やすことによってバイアスは減らすことができるが、バリエーションは減らすことができない。従って、トレーニング領域以外の広い範囲で汎化が見られるものの、全ての領域で入出力関係を正しく推定できるという保証はない。このような汎化特性は、トレーニング方向以外の広い範囲で学習効果が見られたが、その効果は一様なものではないという行動実験の結果と良く一致している。

しかし、行動実験の結果を再現できるようなネットワークを構成できるかどうかということは不明である。この問題は『4. 5 行動実験に基づく計算機シミュレーション』で扱う。

#### 4. 4. 6 実験1と2における汎化の違いについて

実験1と2の結果で共通している点は、これまでに述べた通りであるが、2つの実験で

異なる点は以下のように要約できる。実験1では、トレーニング方向からの角度差が少ないほど学習効果は顕著であった。すなわち角度差が減少するにつれて学習効果が単調に増加する傾向が見られたが、実験2でこのような傾向は顕著ではなかった。

このような2つの実験の差は、各実験のポストテストにおける遂行成績を調べると、さらに明瞭になる。図4.17 a, bは、各被験者のプレテストとポストテストにおける課題完了までの時間（実験1）または位置の誤差（実験2）が0になるようにしたあと、トレーニング方向からの角度差ごとに、平均と標準偏差を求めた結果である。一般的にプレテストにおける課題完了までの時間も位置の誤差も、ポストテストのそれよりは、低くなるので、図4.17の平均値は負になっている。実験1では、課題完了までの時間の平均も標準偏差も、 $-135^{\circ}$  から  $0^{\circ}$  に向かって単調減少し、 $0^{\circ}$  から  $180^{\circ}$  に向かって単調増加している。実験2では、位置の誤差の平均と標準偏差は、 $-90^{\circ}$  で飛び抜けて大きくなっているが、これは前述のように被験者MOが、T1に到達運動を行った場合の恒常的なエラー（詳細はp.126）のせいであり、このデータを除外すると（図中の破線）、トレーニング方向からの角度差によって位置の誤差はあまり変動しなくなる。従って、2つの実験に共通してトレーニング方向以外の広い範囲で学習効果が見られたが、実験2の方が、より広い範囲で学習の汎化が起きていたと考えられる。

実験1と2では、学習効果の測度として異なる指標を用いているので、直接に比較することはできないが、仮に実験2の方が、より広い範囲で学習の汎化が起きていたとすれば次のような理由が考えられる。

第一に、2つの実験で異なる点は、修正運動が含まれているかどうかである。速度波形からわかるように（図4.6 (p.111) と図4.8 (p.114) ）、実験1では、運動の前

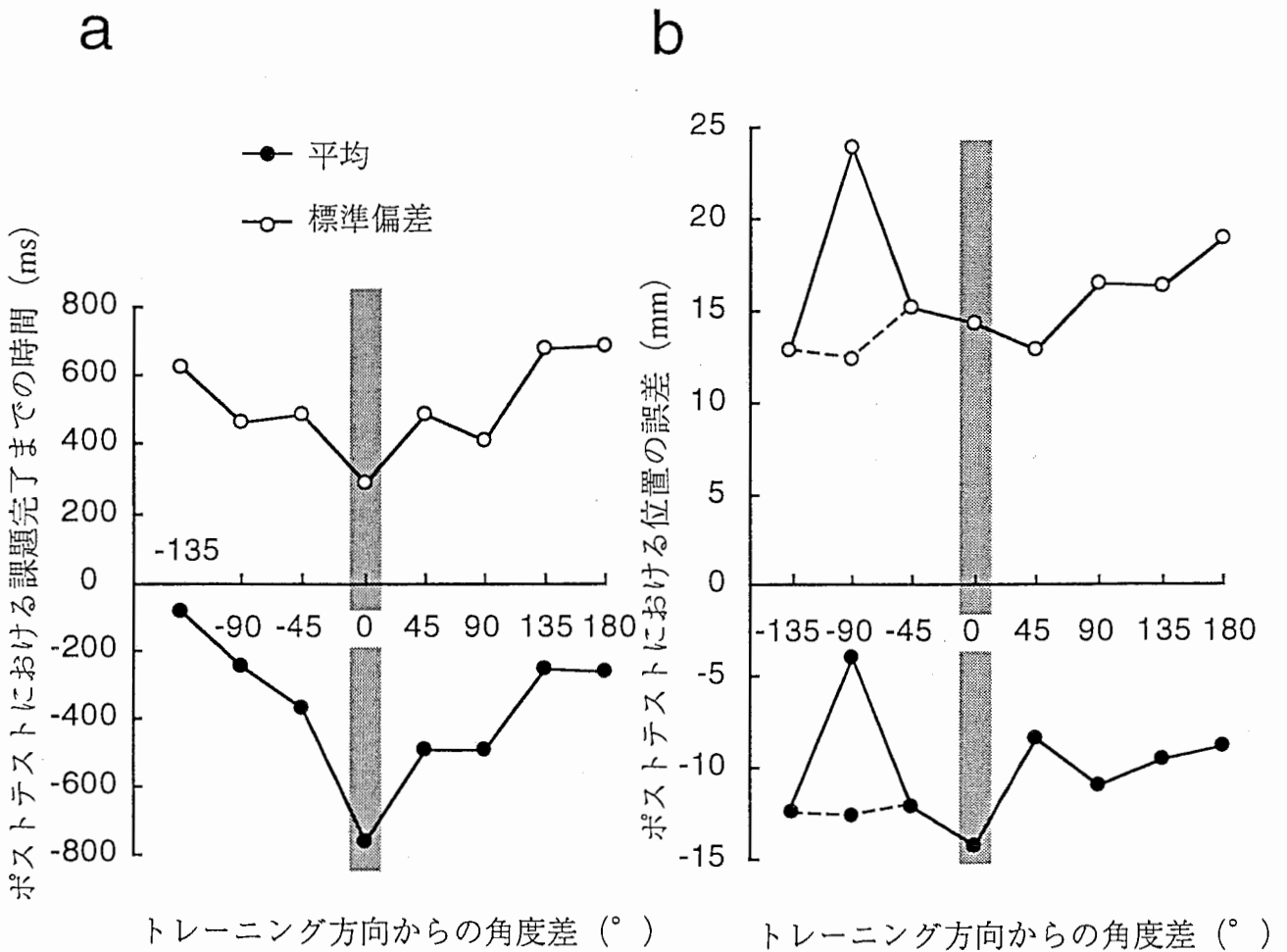


図4. 17 a) 実験1のポストテストにおける課題完了までの時間. b) 実験2のポストテストにおける位置の誤差. 各被験者のプレテストとポストテストにおける課題完了までの時間, または位置の誤差の平均が0になるようにしたあと, トレーニング方向からの角度差ごとに, 平均と標準偏差を求めた. 一般にプレテストとポストテストでは, 後者の方が課題完了までの時間および位置の誤差の値は小さいので, プレテストとポストテストの平均が0になるようにすると, ポストテストの平均値 (図中の黒丸●) は0以下になる. 図bの破線は, 被験者MOがT1に到達運動を行った場合のデータを除外した場合.

半は弾道運動（フィードフォワード制御），後半は修正運動（フィードバック制御）になっている。しかし，実験2ではほとんど弾道運動である。したがって，実験1と2の違いは，フィードバック制御とフィードフォワード制御の差によると考えられ，フィードフォワード制御の方がより広い範囲で，汎化がおきると推測できる。

第二に，実験1で比較的汎化の範囲が狭かったことに関しては，ポストテストとプレテストにおける到達運動の速さの違いが関与しているとも考えられる。これまで，視覚環境の変換，すなわち，キネマティクス変換に対応する内部モデルに焦点をあてて考えてきた。しかし，実際の運動を行うためにはダイナミクス変換に対応する内部モデルも必要である。生体が，キネマティクスとダイナミクスそれぞれに対応する内部モデルを独立に構成しているとは限らない。キネマティクスとダイナミクスを同時に解く内部モデルを構成している可能性もある。その場合，ターゲット方向と運動速度<sup>5</sup>の交互作用を考える必要がある。実験1では，トレーニング後半に速い速度で特定方向の到達運動を繰り返し練習していたが，速い速度で他の方向に到達運動することは学習していなかったと考えられる。それに対して，実験2では運動時間は，プレテストでもポストテストでもほぼ一定に保たれていた。

#### 4. 4. 7 行動実験から導かれる結論

2つの実験は，視覚環境の変換に対応する内部モデルは，tabular representationのよ

<sup>5</sup> 手先の軌跡が同じでも，通過速度（時間変化）が異なれば，慣性項などのダイナミクスが異なる。これまで考えてきたキネマティクスモデル（数式表現するならば式4.1と4.2，pp.94~96）は，時間変化に関しては普遍的であるが，ダイナミクスモデルを構築する際には時間変化を考慮する必要がある。キネマティクス，ダイナミクスに関しては第1章脚注4（p.12）参照。

うな形でも, structured representationような形でも表現されていないことを示唆している. つまり, 中枢神経系は感覚入力と運動出力を局所的に連合したり, 物理パラメータを陽に表現することによって内部モデルを構成しているのではない. これまでに, 提案された計算論的なモデルの中で, このようなnon-tabularかつnon-structuredな表現として, 多層パーセプトロンが考えられる. 今回の実験結果で得られた結果は, 多層パーセプトロンが狭い範囲に限定されたトレーニングデータの入出力関係を学習するときに予想される汎化の様子と良く似ている.

## 4. 5 行動実験に基づく計算機シミュレーション

### 4. 5. 1 目的

これまでの理論的な考察を実証するため, 多層パーセプトロンを用いて行動実験2の結果を再現できるかどうか確かめる.

### 4. 5. 2 方法

#### 【ネットワークの構造】

計算論的な可能性を確かめるシミュレーションなので, ネットワークの構造, 学習則, 入出力信号が, 最も単純になるようにした. また, ネットワークへの入出力は実験2に対応するように, 入力はCRT座標におけるターゲットの位置  $(X, Y)$  で, 出力は手先座標

における弾道運動の終端点  $(x, y)$  とした。具体的には、図4. 18に示すような3層のパーセプトロンを用いた。中間層の数は10で、学習則はバックプロパゲーションを用いた。また中間層の初期状態は乱数により決定した。

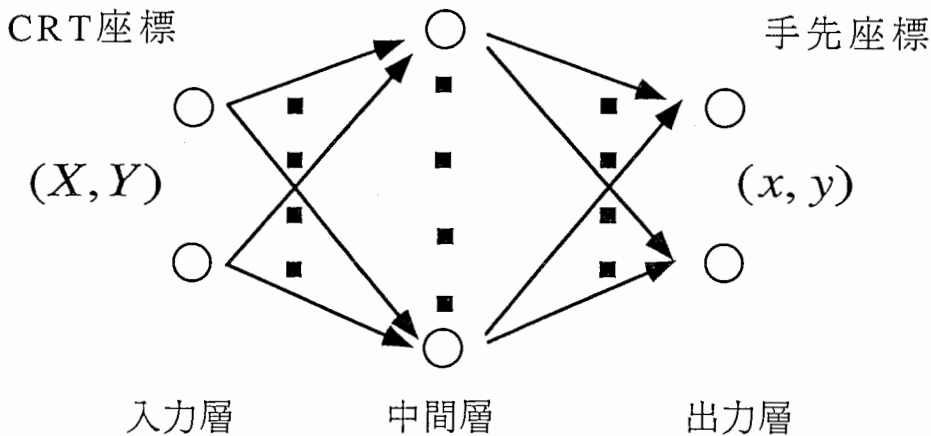


図4. 18 計算機シミュレーションで用いた3層パーセプトロンの構造を示す図。中間層の数は10で、入力はCRT座標におけるのターゲットの位置、出力はそれに対応する手先座標の位置、学習則はバックプロパゲーションを用いた。

#### 【シミュレーションの手続き】

初めに、ネットワークにCRT座標から手先座標への恒等変換<sup>6</sup>を学ばせる点を除いては、行動実験と同様の手続きであった。トレーニング中に入力と教師信号にノイズを入れた場合と入れない場合の2通りの方法でシミュレーションを行った。その理由は次に述べる通りである。トレーニング中にノイズを入れない場合、比較的少ない回数のトレーニングで、トレーニング方向に関してはほとんど完全に学習する（出力誤差が0になる）ことを予備的なシミュレーションで確認した。しかし、行動実験では、学習曲線がほぼ漸近線に達しても位置の誤差が0にはならない（図4. 10参照, p121）。そこで、入力と教師信号

<sup>6</sup>行動実験の場合、被験者はすでに長年の生活経験から恒等変換（無変換）は学習していると考えられる。

にノイズを入れることで学習を不完全にし、より行動実験に近いシミュレーションを行わないと真にモデルがデータ予測力を持つかどうか評価できない。実験結果はどちらのシミュレーションも基本的には同じ手続きをとった。以下に具体的な手続きを示す。

### 1) CRT座標から手先座標への恒等変換の学習

図4. 19 aに示すように、CRT座標の中心を(0, 0)として、x軸方向とy軸方向に±20.0 cmの領域内に9×9の格子点を設けた。この領域の大きさは、行動実験で用いたターゲットの全てが充分はいる大きさである。格子点の座標を入力値(=教師信号)として、恒等変換を学ばせる。学習回数は1,000回で、学習後のネットワークの出力は図4. 16 aに示す通りで、ほぼ完璧に恒等変換を学ぶことができた。

### 2) プレテスト

行動実験で用いた8方向のターゲット(p.104, 図4. 4左:T1~T8)の座標を入力してその出力を見た(図4. 19 b)。

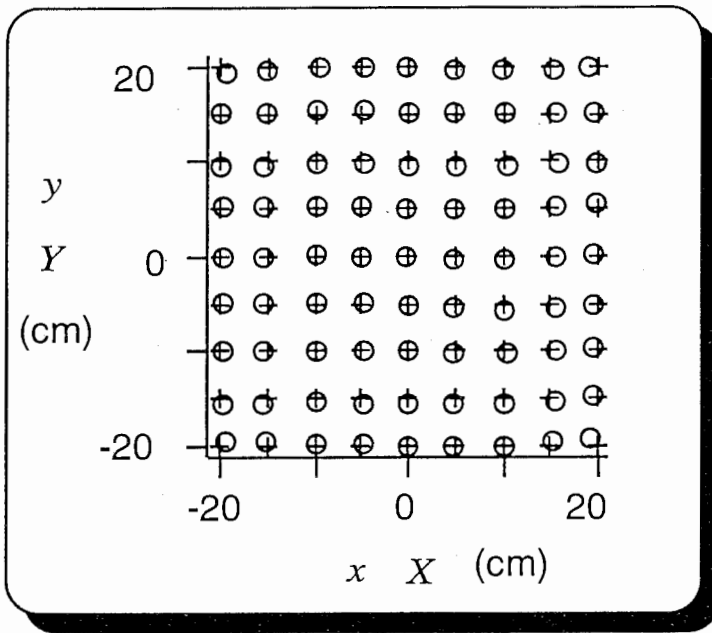
### 3) トレーニング

実験1と同様に、8方向のターゲットのうち、いずれかひとつのターゲット(T1, T3, T5, T7)周辺の狭い範囲に限定されたターゲット群を用いて、ネットワークに75°回転変換を学ばせた(図4. 19 c)。学習回数は10,000回であった。ノイズを入れる場合には、教師信号と入力に±5.0cmの範囲でランダムノイズを入れた。

### 4) ポストテスト

プレテストと全く同じことを行った。

a) CRT座標から手先座標への  
恒等変換を学習



+ 入力 (X, Y)  
o 出力 (x, y)

b) プレテスト  
= d) ポストテスト

c) トレーニング

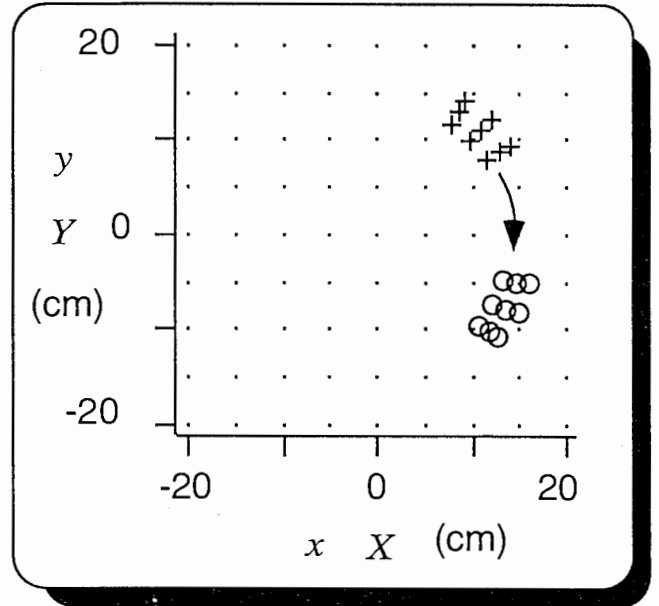
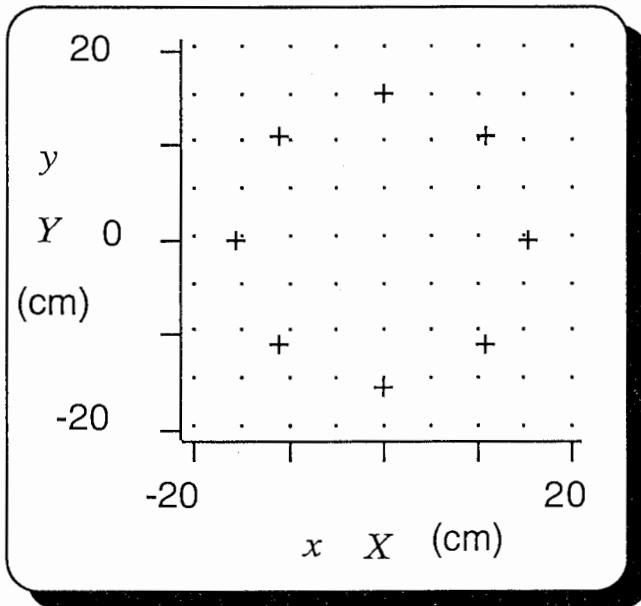


図4. 19 シミュレーションの手続きを示す図. a) 始めにネットワークにCRT座標 (X, Y) から手先座標 (x, y) への恒等変換を学習させた. 図は恒等変換学習後の入出力 (入力信号: +, 出力信号: o) 関係を示している. b) 図に示したような大域的な8つの入力信号に対応する出力信号を調べた. 8つの入力信号は行動実験のプレ (ポスト) テストで用いたターゲット位置と同じであった. c) 狭い範囲に限定された9つの入力信号, それらを75°回転変換した座標を教師信号として, ネットワークをトレーニングした. 9つの入力信号は行動実験のトレーニングで用いたターゲット位置と同じであった. 図はトレーニング終了後の入出力関係を示している. d) 最後にc) と同じことを行った.



### 4. 5. 3 結果と考察

図4. 20は、トレーニング中にノイズを入れなかった場合の結果を、図4. 21は、トレーニング中にノイズを入れた場合の結果を示している。プレテスト（破線）とポストテスト（実線）においてネットワークの出力した手先座標とターゲットの間の距離（位置の誤差）をターゲット方向ごとに示している。軸の方向は手先座標におけるターゲットの方向を示し、四角で囲まれた軸の方向が、それぞれのネットワークのトレーニング方向である。2つのシミュレーションの結果は次の2点において、行動実験の結果と一致する。第一に、どのネットワークでもトレーニング方向以外の広い範囲で学習効果が見られた。第二に、トレーニング方向からの角度差によって異なる学習効果が見られた。

特に第二の点に関しては、必ずしも角度差が減少するにつれて学習効果が単調に増加するという傾向は見られず、どの方向でどの程度汎化が起きるかは、ネットワークによってかなりの差が見られ、この点も実験2の結果とよく一致している。例えば、ノイズを入れなかった場合、T7方向をトレーニングしたネットワーク（図4. 20右下）では、180°逆方向のT3でもかなり学習効果が見られたが、T5方向をトレーニングしたネットワーク（図4. 20左下）では、ほとんど学習効果が見られなかった。ノイズを入れた場合も、T1方向をトレーニングしたネットワーク（図4. 21左上）では、180°逆方向のT5でもかなり学習効果が見られたが、T3方向をトレーニングしたネットワーク（図4. 21左上）では、180°逆方向付近のT6やT7であまり学習効果が見られなかった。従って、どの方向でどの程度汎化が起きるかは、ネットワークの中間層の初期状態に依存すると

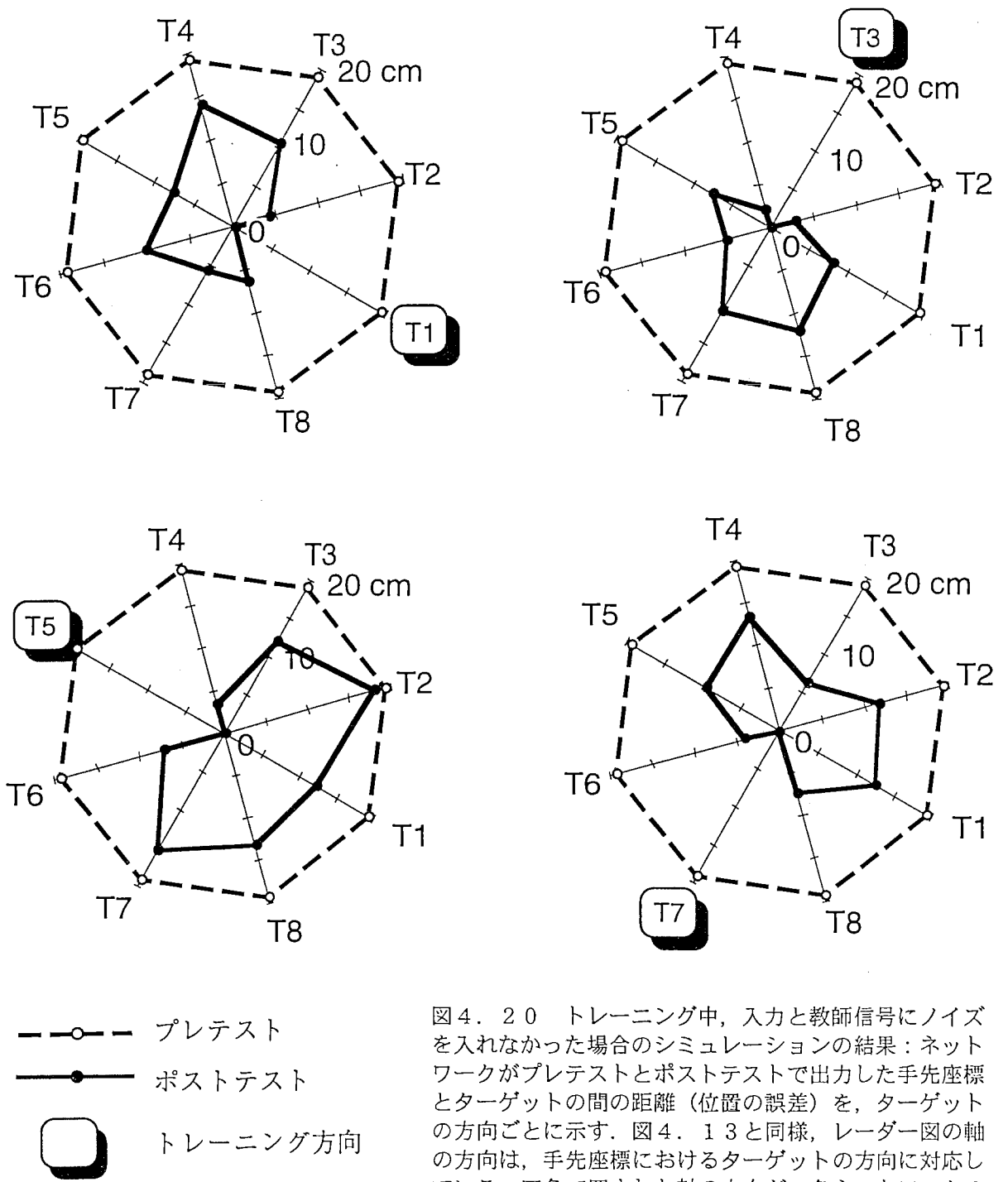


図4. 20 トレーニング中，入力と教師信号にノイズを入れなかった場合のシミュレーションの結果：ネットワークがプレテストとポストテストで出力した手先座標とターゲットの間の距離（位置の誤差）を，ターゲットの方向ごとに示す．図4. 13と同様，レーダー図の軸の方向は，手先座標におけるターゲットの方向に対応している．四角で囲まれた軸の方向が，各ネットワークのトレーニング方向である．

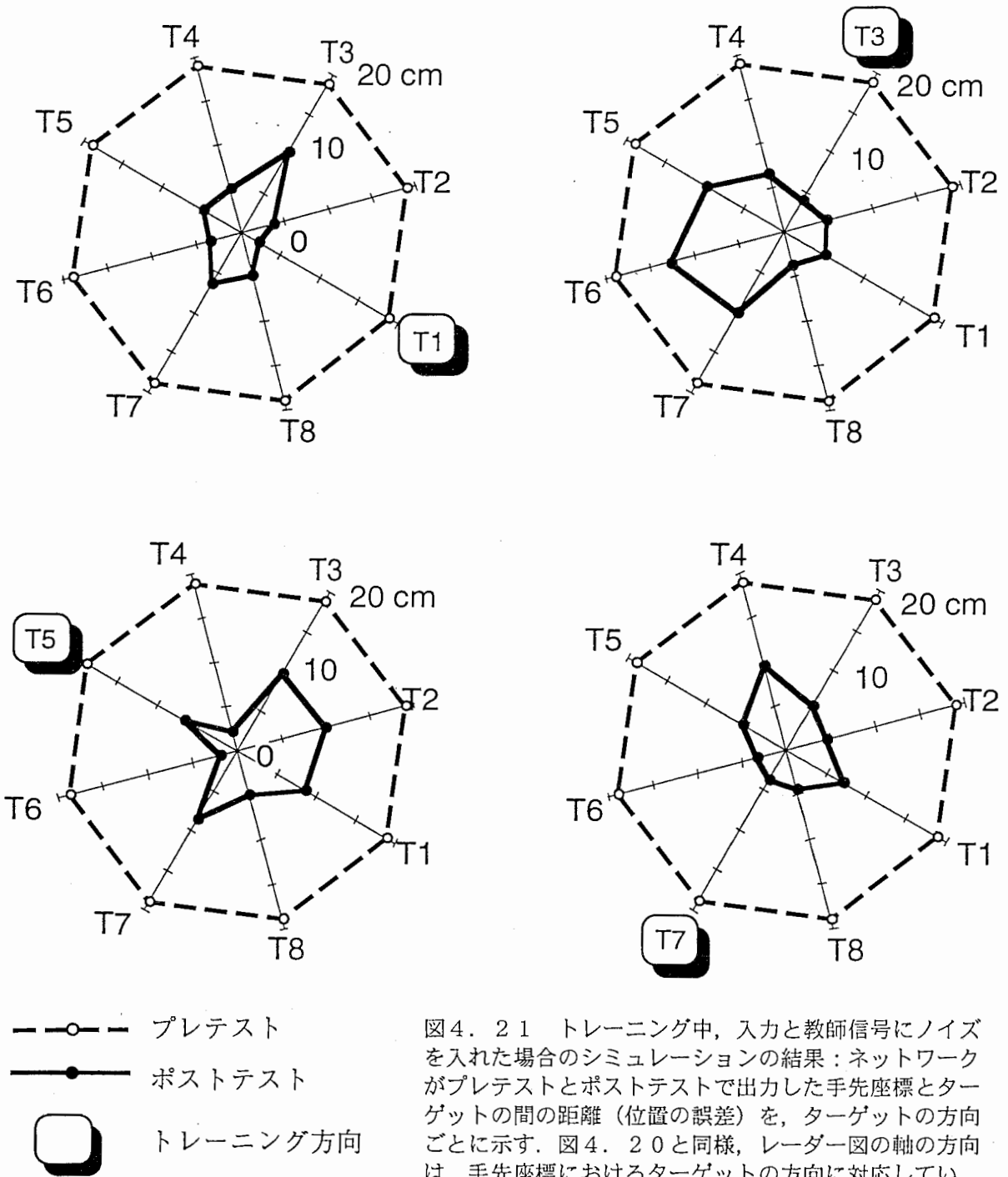


図4. 21 トレーニング中，入力と教師信号にノイズを入れた場合のシミュレーションの結果：ネットワークがプレテストとポストテストで出力した手先座標とターゲットの間の距離（位置の誤差）を，ターゲットの方向ごとに示す．図4. 20と同様，レーダー図の軸の方向は，手先座標におけるターゲットの方向に対応している．四角で囲まれた軸の方向が，各ネットワークのトレーニング方向である．図4. 20に結果を示したシミュレーションと異なり，トレーニング中の入力と教師信号に±5.0mmの範囲でランダムノイズを入れた．

考えられる。トレーニング中にノイズを入れた場合と入れなかった場合で、最も大きな差はトレーニング方向の位置の誤差が0になるか、またはならないかであり、定性的な違いはほとんど見られなかった。

以上のように、多層パーセプトロンが狭い範囲に限定されたトレーニングデータの入出力関係を学習するときの汎化の様子は、行動実験2で得られた結果と良く一致している。先にも述べた通り、計算論的な可能性を確かめるためのシミュレーションなので、ネットワークの構造、学習則、入出力信号が、最も単純になるようにした。実際の脳が今回のシミュレーションで用いた3層パーセプトロンよりはるかに複雑であることを考えると、シミュレーションと行動実験には大きなギャップがあることは事実である。また、中間層の数を増減させたり、異なる学習則を用いた場合に、以上のような結果が得られるかどうかは、現時点では必ずしも保証されていないので、今後の課題である。今回のシミュレーションでは、tabular representationやstructured representationでは説明できなかった行動実験の結果の定性的な特徴を、ごく単純な多層パーセプトロンで実現できることを確認した。

## 補遺 4. 1 最急降下法を用いたパラメータ推定

第1番目のモデル（本文参照：式4. 1, p.133）を例として、どのようにして実験データからパラメータ推定を行ったかを説明する。最急降下法のアルゴリズムはBryson and Ho (1975)に基づいた。実験2のポストテストでは112試行の到達運動を行ったので、実験データとして、112組の入力信号（CRT座標でのターゲットの位置： $X, Y$ ）と出力信号（手先座標での弾道運動の終了地点： $x, y$ ）が得られた。第1番目のモデルによれば、 $i$ 番目の入出力信号の関係は以下のような式で表わされる。

$$\begin{aligned}x_i &= (X_i - b_1)\cos a + (Y_i - b_2)\sin a \\y_i &= -(X_i - b_1)\sin a + (Y_i - b_2)\cos a\end{aligned}$$

ここでの目的は、112組の入出力信号に最も良くフィットするパラメータの組（ $a, b_1, b_2$ ）を見つけることである。このことは次の式で定義されるような誤差関数（ $E$ ）を最小化することと同義である。

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{112} \left\{ (x_i^M - x_i)^2 + (y_i^M - y_i)^2 \right\}$$

ここで、 $x_i^M$  と  $y_i^M$  は、 $i$ 番目の入力に対するモデルの出力である。以下に述べるような計算を繰り返し行うことで、 $E$ を最小にするパラメータの組（ $a, b_1, b_2$ ）を見つけることができる。

始めに局小解に陥らないような（ $a, b_1, b_2$ ）の値を適当に選んで、 $E$ の値を計算する。次に以下のような規則に従って、それぞれのパラメータの値を少しずつ変えて行く。

$$a^{k+1} = a^k - \varepsilon \cdot \frac{\partial E}{\partial a^k}, b_1^{k+1} = b_1^k - \varepsilon \cdot \frac{\partial E}{\partial b_1^k}, b_2^{k+1} = b_2^k - \varepsilon \cdot \frac{\partial E}{\partial b_2^k}$$

ここで  $a^k$ ,  $b_1^k$ ,  $b_2^k$  は  $k$  番目の繰り返し計算における各パラメータの値で,  $\varepsilon$  は発散が起こらない程度に十分小さい値 ( $10^{-5} \sim 10^{-8}$ ) である. 10,000回の繰り返し計算で, それぞれのパラメータ値は収束した.

#### 補遺 4. 2 赤池の情報量規準

赤池の情報量規準 (AIC: Akaike's Information Criterion) はパラメータ数を考慮してモデルを評価する方法である. Akaike(1974)によれば, この情報量規準は以下のよう  
に定義される.

$$AIC = -2 \log L(\hat{\theta}) + 2(k+1) \quad 4. 7$$

ここで,  $L(\hat{\theta})$  は任意のモデル  $F_{\theta}$  の最大尤度,  $k$  はモデルのパラメータ数である. 従って, 右辺第1項は与えられたデータに対する適合度 (goodness of fit) を測る量であり, 右辺第2項はパラメータを増やすことに対するペナルティーと解釈することができる. AIC が小さいモデルほど望ましいモデルであるということになる. モデルの入力信号が

$w_1, w_2 \dots w_i$  を, 出力信号を  $F_{\theta}(w_1), F_{\theta}(w_2) \dots F_{\theta}(w_i)$ , 実験で得られたデータを

$z_1, z_2 \dots z_i$  とすると,  $i$  番目の入力信号に対するモデルの誤差は,

$$\varepsilon_i = z_i - F_\theta(w_i)$$

と表わすことができる。仮に誤差が、平均が0で分散が $\sigma$ の正規分布に従うとすれば、モデルの確率密度関数 $P$ は

$$p(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(z_i - F_\theta(w_i))^2}{2\sigma^2}\right\}$$

と表わすことができる。このとき尤度関数 $L(\theta)$ は

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(z_i - F_\theta(w_i))^2}{2\sigma^2}\right\}$$

であり、この関数は $\sigma$ が、実験で得られたデータの分散 $\hat{\sigma}$ に等しくなるとき最大となる。

つまり、最大尤度 $L(\hat{\theta})$ は、

$$L(\hat{\theta}) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\hat{\sigma}} \exp\left\{-\frac{(z_i - F_\theta(w_i))^2}{2\hat{\sigma}^2}\right\}$$

となる。この式を式4.7に代入すると、

$$AIC = -2n \log \frac{1}{\sqrt{2\pi}\hat{\sigma}} + \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(z_i - F_\theta(w_i))^2}{\hat{\sigma}^2} \right\} + 2(k+1)$$

この式を用いて各モデルごとに、AICの値を求めた。

第一に、モデルの誤差の平方和（上式右辺第2項の分子）を求めた。被験者が行った弾道運動の終了地点を $(x_i, y_i)$ 、モデルが予想した弾道運動の終了地点を $(x_i^M, y_i^M)$ とすると、

誤差の平方和は

$$\sum_{i=1}^n \left\{ (x_i - x_i^M)^2 + (y_i - y_i^M)^2 \right\}$$

である。ここでは誤差がx, y方向互いに独立に決まることを前提としている。第二に、実験データの分散 ( $\hat{\sigma}$ ) を求めた。被験者が行った弾道運動の終了地点  $(x_i, y_i)$  と、手先座標におけるターゲットの位置  $(x_i^T, y_i^T)$  の間の距離を  $\rho$  とすると、

$$\rho = \sqrt{(x_i - x_i^T)^2 + (y_i - y_i^T)^2}$$

である。  $\rho$  の平均と分散を、それぞれ  $\bar{\rho}$  と  $\sigma_\rho$  とする。両者は実験データから直接求めた値を用いた。





## 第5章 全体考察

### 5. 1 知見のまとめ

以上、第1章では、始めに心理学における感覚運動学習の研究史を概観した。従来の研究においては感覚運動学習が成立するための要因分析が主であり、感覚運動学習を可能にする中枢神経機構がどのようなものであるかを直接に問う研究はなされていないことを指摘した。そこで、本論文では、視覚運動学習を可能にする機構が、1) 中枢神経系のどのレベルに存在し、2) どのような方法で表現されているかを調べることにより、それがどのようなものであるかを行動実験から推定することを目的とした。この目的のために、学習の「転移」や「汎化」という、心理学では古くから取り扱われているパラダイムを計算理論の枠組みと結び付け、そこから導き出される理論的な予測を実験によって検証した。

第2章と第3章では、1) の問いに答えるために、中枢神経系における運動学習のレベルを外部座標レベルと身体座標レベルに分けて、視覚環境を変換した条件下での到達運動の学習がどちらのレベルで成立するかを調べた。学習効果の両手間転移現象を学習レベルを調べるための有効な手段として用いた。第2章では、従来の視覚運動学習研究で用いられてきた外部座標の線形変換を用い、第3章では、身体座標の線形変換を用いた。その結果、視覚運動学習のレベルは変換の種類により異なっていた。すなわち、外部座標において線形で身体座標において非線形な変換を学習した場合には、外部座標レベルで学習が起きていたが、外部座標において非線形で身体座標において線形な変換を学習した場合には、

身体座標レベルで学習が起きていた。

第4章では、2)の問いに答えるために、視覚環境を変換した条件下での到達運動の学習の汎化の様子を調べた。視覚運動課題を行うために必要なキネマティクス変換を表現する方法は、計算論的には2つの代表的な方法が提案されている。ひとつの方法は、structured representationと呼ばれ、外界の物理構造を反映したモデルに基づく。もうひとつの代表的な方法は、tabular representationと呼ばれ、入出力関係の表を構成する方法である。前者の方法は、特定の入出力関係を学習した時でも、広い範囲で一様な学習の汎化が見られるが、後者の方法は入出力関係を局所的に連合させて行くので、狭い範囲でしか汎化は見られない。視覚環境を変換した条件下で、特定の方向の到達運動を繰り返し訓練した後で学習の汎化の様子を調べたところ、1)訓練した方向以外の広い範囲で学習の汎化が見られたが、2)その汎化は一様なものではなかった。この結果は、structured representationもtabular representationも支持しない。従って、中枢神経系は外界の物理構造を陽 (explicit) に表現したり、入出力関係を局所的に連合させたりして、視覚運動学習に対応する内部モデルを構成しているのではないということがわかった。これまで提案された計算論的なモデルのなかで、このようにstructured representationにもtabular representationにも属さない、中間的な表現の代表的な例は多層パーセプトロンである。実際、3層のパーセプトロンを用いて行動実験の結果が再現できるかどうかを検討したが、上記1), 2)の点において行動実験の結果を再現することに成功した。

## 5. 2 視覚運動学習を可能にする内部モデルの意味

### 5. 2. 1 学習レベルの多様性

第2章と第3章の結果から明らかにされたことは、変換の種類が異なれば、学習のレベルが異なるということである。既に述べたように、従来の視覚運動学習研究においては、外部座標における線形変換（または平行移動）が用いられてきた。このような変換は一般的に身体座標では非線形で複雑な変換となる。第2章の実験結果から示唆されるように、外部座標において線形な変換は外部座標レベルにおいて学習される。従って、従来の視覚運動学習研究の対象となってきたのは、外部座標レベルで成立する学習機構であるということが出来る。しかし、本論文の第3章では、従来の研究とは逆に、身体座標において線形で外部座標において非線形な変換を用い、そのような変換では身体座標において学習が成立することを明らかにした。

以上の結果は、視覚運動学習の内部モデルについて、従来の研究で明らかにされていなかったことを示唆している。すなわち、視覚運動学習のレベルは外部座標だけ、または身体座標だけではなく、課題の種類によって、どちらのレベルでも学習は成立しうる。さらに、「線形変換としても非線形変換としても学習が可能である場合、中枢神経系は線形変換として学習する」という仮説を立てることが出来る。この点に関しては、第2章の実験では外部座標で回転変換であることを、第3章の実験では身体座標で関節角を定数倍するような変換であることを、被験者に告げてあった。従って、どちらの実験でも、被験者は線形変換となるように学習することを、認知的には方向づけられていたことは確かである。しかし、第1章で言及したように（pp.9~10）、感覚運動学習のすべてが認知的なスト

ラテジーの習得で説明できるものではないので、このような認知的な方向づけが学習にどのような影響を与えるかは明らかではない。これまでの計算論的なアプローチでは、このような意識的な知識が、学習に対してどのような影響を及ぼすかという問題は、ほとんど扱われてきていない。この点は、本研究の今後の課題であると言える。

この仮説は、第4章において考察した、感覚運動学習を可能にする内部モデルがどのような方法で表現されているかという問題とも深く関係している。すなわち、第4章では、中枢神経系は多層パーセプトロンのような中間的な表現を用いているということを行動実験と計算機シミュレーションで明らかにしたが、少なくとも線形関数では、多層パーセプトロンは中間層の数を増やせば任意の連続関数をいくらでも精度良く近似できることが理論的に明らかにされている (Funahashi, 1989)。ただし、生体が線形変換となるような学習をしても、生体内部で線形変換が行われているという訳ではない。また「生体が線形になるレベルを選択する」といっても、そのような選択機構が必要であるということを主張している訳でもない。

視覚運動学習のレベルが多様であるということに関して、表現方法は多様であるかどうかという疑問が生じる。第4章においては、外部座標で線形となる変換を用いて視覚運動学習を成立させ、その学習の汎化の様子を調べることにより、中枢神経系における表現方法を調べた。しかし、身体座標において線形な変換を用いた場合にどのような学習の汎化が起きるのか、内部モデルの表現方法は異なるかということは、今後の課題である。

## 5. 2. 2 脳における変換のメカニズム

到達運動を行うときに、中枢神経系が行わなければならないことは、まず手先の軌道を外部座標で計画し、それを関節の角度や筋肉の張力といった身体座標に変換することであった。運動の制御に限らず、中枢神経系が行う最も重要な作業は情報の変換であると言える。例えば、ものを見るときに、中枢神経系は網膜に与えられた2次元の情報から3次元情報を復元しなくてはならない。これも情報の変換である。

本論文では視覚環境を人為的に変換した場合に、それに対応して変化する中枢神経系のメカニズムがどのようなものであるかを理論的に考察し、その考察が正しいかどうかを行動実験によって調べた。既に述べたように、このような変換条件下での到達運動の学習は、個体発生における感覚運動学習と必ずしも一致しない。しかし、仮に学習が起きる生理学的な場所は異なっても、どちらも神経回路によって行われる変換過程であるために、基本的な動作原理が大きく異なるとは考えられない。従って、従来の視覚運動学習や本論文での実験結果から導出されたいくつかの原理——外部環境や生体の構造に何らかの変化が起きて、これまで生体を用いて来た変換規則が適応的でなくなったとき、生体は新たな変換規則を学習するが、その際、1) 生体は複数の座標表現を持ち、課題に応じて異なる座標表現（レベル）で学習すること、2) 外界の物理構造を陽に表現したり、入力と出力を局所的に連合したりして変換を表現するのではなく、多くの単純な情報要素を相互に結合させて変換を表現すること——は、視覚環境の変換に対応する内部モデルの原理であるだけでなく、脳における変換の基本的な原理であると考えられるであろう。

### 5. 2. 3 到達運動以外の視覚運動学習について

目の前にあるものに手を伸ばすという到達運動は、私たちが外部環境に対して働きかけるとき、最も単純で基本的な行為であり、手先を目標物まで到達させるという明確な目標がある。従って、目標物の位置と実際に手先が到達した位置との間の距離や、手先が目標物に届くまでの時間などの尺度で、学習の程度を定量的に評価することができる。また、2次元平面内で肩と肘のみが動く2リンクのロボットアームであると考えれば、簡単な三角関数で数理モデルを構成することができる。このような理由から、本論文では視覚環境を変換した状況で到達運動の学習過程を調べてきた。

しかしながら、私たちにとって可能な行為は到達運動だけではない。多くの日常的な行為は、肩と肘のみを動かして行われるわけではなく、体中にある数え切れないほどの関節や可動部分を協調させて行う。また、体そのものが外界に固定されておらず、自由に動き回ることができる。従って、本論文で前提としたような、「外部座標=外界に原点をもつデカルト座標系」、「身体座標=肩と肘の関節角で表わされる座標系」という単純な図式では他の運動を考える上で、明らかに不十分である。同じ外部座標であっても、頭部に固定された座標系や、胴体に固定された座標系、さらには身体から独立な環境座標系など様々な座標系が考えられる。また、同じ身体座標であっても、関節のトルクや筋の長さをいった複数の座標系が考えられる。実際、行動実験や神経生理学の研究によって、網膜または頭部に固定された座標系 (Zipser and Andersen, 1988) , 肩に固定された座標系 (Soechting and Flanders, 1989) など、さまざまな座標系の表現が中枢神経系に存在していることが明らかになってきている。

このような多数の座標系にそれぞれ対応する表現が存在しているということは、外界や生体構造の変化に柔軟に対応できることを示唆している。到達運動の以外の運動について

も、転移効果や汎化の様子を調べることにより、どの座標系に対応する表現で学習が起きているかを推定し、生体の感覚運動学習のより全体的な機構を解明することができると考えられる。





## 引用文献

- Abend, W., Bizzi, E. & Morasso, P. (1982) Human arm trajectory formation. *Brain*, No. 105, 331-348.
- Akaike, H. (1974) A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-19, No. 6, 716-723.
- Albus, J. S. (1975) A new approach to manipulator control: the cerebellar model articulation controller (CMAC). *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 97, 220-227.
- An, C. H., Atkeson, C. G. & Hollerbach, J. M. (1988) *Model-based control of a robot manipulator*. Cambridge, Mass: MIT press.
- Atkeson, C. G. (1989) Learning arm kinematics and dynamics, *Annual Review of Neuroscience*, No. 12, 157-183.
- Atkeson, C. G. & Hollerbach, J. M. (1985) Kinematic feature of unrestrained vertical arm movements, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 5, 2318-2330.
- Baum, E. B. & Haussler, D. (1989) What size net gives valid generalization? *Neural Computation*, Vol. 1, 151-160.
- Beggs, W. D. A. & Howarth, C. I. (1972) The movement of the hand towards a target. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 24, 448-453.
- Bennet, D. J., Hollerbach, J. M., Xu, Y. & Hunter, W. (1992) Time-varying stiffness of human elbow joint during cyclic voluntary movement. *Experimental Brain Research*, Vol. 88, 433-442.
- Bizzi, E., Acconero, N., Chapple, W. & Hogan, N. (1984) Posture control and trajectory formation during arm movement. *The Journal of Neuroscience*,

- Vol. 4, No. 11, 2738-2744.
- Bray, C.W. (1928) Transfer of learning. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 11, 443-469.
- Bryson, Jr. A. E. & Ho, Y. (1975) Parameter optimization problems. In Bryson & Ho, *Applied Optimal Control* (pp. 1-41), New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Cohen, M. M. (1967) Continuous versus terminal visual feedback in prism aftereffects. *Perceptual and Motor Skills*, Vol. 24, 1295-1302.
- Cohen, M. M. (1973) Visual feedback, distribution of practice, and intermanual transfer of prism aftereffects. *Perceptual and Motor Skills*, Vol. 37, 599-609
- Cook, T. W. (1933) Studies in cross education. I. Mirror tracing the star-shaped maze. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 16, 679-700.
- Cunningham, H. (1989) Aiming error under transformed spatial mappings suggests a structure for visual-motor mappings. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 15, No.3, 439-506.
- Cunningham, H. & Vardi, I. (1990) A vector-sum process produces curved aiming paths under rotated visual-motor mappings. *Biological Cybernetics*, Vol. 64, 117-128.
- Duda, R. O. & Hart, P. E. (1973) Unsupervised learning and clustering. In Duda & Hart, *Pattern classification and scene analysis*. (pp. 189-260), New York: John Wiley & Sons.
- Fitts, P. M. (1954) The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 47, 381-391.
- Flash, T. & Hogan, N. (1985) The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience*,

Vol. 5, 1688-1703.

- Flash, T. (1987) The control of hand equilibrium trajectories in multi-joint arm movements. *Biological Cybernetics*, Vol. 57, 257-274
- Flower, K. (1975) Ballistic and corrective movements on an aiming task: Intention tremor and Parkinsonian disorders compared. *Neurology*, Vol. 25, 413-421.
- Funahashi, K. (1989) On the approximate realization of continuous mapping by neural networks. *Neural Networks*, Vol. 2, 183-192.
- Geman, S., Bienenstock, E. & Doursat, R. (1992) Neural networks and bias/variance dilemma. *Neural Computation*, Vol. 4, 1-58.
- Georgopoulos, A. P., Kalaska, J. F. & Massey, J. T. (1981) Spatial trajectories and reaction times of aimed movements: Effects of practice, uncertainty and change in target location. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 46, 725-743
- Gomi, H., Koike, Y. & Kawato, M. (1992) Human hand stiffness during discrete point-to-point multi-joint movement. *Proceedings IEEE EMBS*, Paris, 1628-1629.
- Harris, C. S. (1963) Adaptation to displaced vision: Visual, motor or proprioceptive change?, *Science*, Vol. 140, 812-813.
- Hein, A. & Held, R. (1962) A neural model for labile sensorimotor coordinations. In *Biological prototypes and synthetic systems*, Vol. 1, New York: Plenum Press.
- Held, R. & Efstathiou, A. Green, M. (1966) Adaptation to displaced and delayed visual feedback from the hand. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 72, No. 6, 887-891.
- Held, R. & Gottlieb, N. (1958) Technique for studying adaptation to disarranged hand-eye coordination. *Perceptual and motor skills*, Vol. 8, 83-86
- Helmholtz, H. (1962) *Treatise on physiological optics*. (Originally published 1866)

- Vol. 3, (Translated & Edited by Southall, J. P.) New York: Dover.
- Hogan, N. (1984) An organizing principle for a class of voluntary movements. *The Journal of Neuroscience*, Vol. 4, 2745-2754.
- Hollerbach, J. M. (1982) Computers, brains and the control of movement. *Trends in Neurosciences*, Vol. 56, No.6, 189-192.
- Hollerbach, J. M. (1990) Fundamentals of Motor Behavior. In Osherson, D. N. et al. (Eds.) *Visual Cognition and Action Vol.2*, Cambridge, Mass: MIT Press, 153-182.
- Imamizu, H. & Shimojo, S. (1990) Arm reaching under inversion, reversal, rotation and delay of visual feedback. *Proceedings of 22nd International Congress of Applied Psychology*, 304.
- Imamizu, H. & Shimojo, S. (in press) The locus of visual-motor learning at the task or manipulator level: Implications from intermanual transfer. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*.
- Imamizu, H., Uno, Y. & Kawato, M. (1993) Generalization of Visuo-Motor learning. *Proceedings of Society for Neuroscience 23rd Annual Meeting*, 1594
- 今水寛・宇野洋二・川人光男 (1993a) 視覚運動学習における軌道の汎化. *日本心理学会第57回大会発表論文集*, 658.
- 今水寛・宇野洋二・川人光男 (1993b) 視覚運動学習における軌道の汎化と内部表現. *第8回生体生理工学シンポジウム論文集*, 389-394.
- Imamizu, H., Uno, Y. & Kawato, M. (1994) Learning and trajectory planning in kinematic alteration of joint angles. *Proceedings of Society for Neuroscience 24th Annual Meeting*, 1409.
- 今水寛・宇野洋二・川人光男 (1994a) 関節角変換における軌道計画と運動学習. *日本心理学会第58回大会発表論文集*, 969.
- 今水寛・宇野洋二・川人光男 (1994b) 到達運動における身体座標内部表現の適応. 第

9回生体生理工学シンポジウム論文集, 335-338.

- Imamizu, H., Uno, Y. & Kawato, M. (in press) Internal representation of the motor apparatus: Implications from generalization in visuo-motor learning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*.
- Ito, M. (1989) Long-term depression. *Annual Review of Neuroscience*, Vol. 12, 85-102.
- 伊藤宏司・伊藤正美 (1991) 生体とロボットにおける運動制御. 計測自動制御学会.
- Jordan, M. I. (1990) Motor learning and the degree of freedom problem. In Jannerod, M., (Ed.), *Attention and Performance, XIII*. (pp. 796-836) Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Katayama, M. & Kawato, M. (1993) Virtual trajectory and stiffness ellipse during multi-joint arm movement predicted by neural inverse models. *Biological Cybernetics*, Vol. 69, 353-362.
- Kawato, M. (1994) Unidirectional versus bi-directional theory for trajectory planning and control. *ATR Technical Reports*, TR-H-068.
- Kawato, M., Furukawa, K. & Suzuki, R. (1987) A hierarchical Network Model for motor control and learning of voluntary movement. *Biological Cybernetics*, Vol. 57, 169-185.
- Keel, S.W. & Posner, M.I. (1968) Processing of visual feedback in rapid movements. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 77, 155-158.
- Kelso, J. A. S., Southard, D. L. & Goodman, D. (1979) On the nature of human interlimb coordination. *Science*, Vol. 203, 1029-1031.
- Keppel, G. (1982) Analysis of Trend. In *Design and analysis: A researcher's handbook*, Prentice-Hall, Inc. 127-141.
- Kholler, I. (1964) The formation and transformation of the perceptual world. (Translated by Fiss, H.) *Psychological Issues*, Vol. 3, No. 4, 1-173.

- Marr, D. (1982) *VISION — A computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information* — W. H. Freeman & Company. 乾敏郎・安藤広志 (訳) (1987) *ビジョン — 視覚の計算理論と脳内表現*. 産業図書
- Milner, B., Corkin, S. & Teuber, H. L. (1968) Further analysis of the hippocampal amnesic syndrome: 14-year follow-up study of H. M. *Neuropsychologia*, Vol. 6, 215-234
- Morasso, P. (1981) Spatial control of arm movements. *Experimental Brain Research*, No. 42, 223-227.
- Lackner, J. R. & Dizio, P. (1992) Rapid adaptation of arm movement endpoint and trajectory to Coriolis force perturbations, *Society for Neuroscience Abstract*, No. 22.
- Poggio, T. & Girosi, F. (1990) Regularization algorithms for learning that are equivalent to multilayer networks. *Science*, Vol. 247, 978-982.
- Rumelhart, D. E. (1986) *Parallel Distributed Processing*, Cambridge MA: MIT Press.
- Saltzman, E. (1979) Levels of sensorimotor representation. *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 20, 91-163.
- Saltzman, E. (1987) Skilled actions: a task-dynamic approach. *Psychological Review*, Vol. 94, No. 1, 84-106
- Soechting, J. F. & Flanders, M. (1989) Sensorimotor representation for pointing to targets in three-dimensional space. *Journal of Neurophysiology*, Vo. 62, 582-94.
- Schmidt, R. A. (1975) A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, Vol. 82, 225-260.
- Schmidt, R. A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J.S. & Quinn, J.T. (1979) Motor output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological*

*Review*, vol. 86, 415-451.

Schmidt, R. A. (1988) *Motor control and learning*, Human Kinetics Publishers, Inc.

Shadmehr, R. & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994) Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *The Journal of Neuroscience*, Vol. 14, No. 5, 3208-3224.

Sippola, E. M. (1935) Studies in mirror drawing. *Psychological Monograph*, Vol. 46, No. 6, 66-77.

Strach, D. (1910) A demonstration of the trial and error methods of learning. *Psychological Bulletin*, Vol. 7, 20-23.

Stratton, G. M. (1896) Some preliminary experiments on vision without inversion of the retinal image. *Psychological Review*, Vol. 3, 611-617.

Stratton, G. M. (1897) Vision without inversion of the retinal image. *Psychological Review*, Vol. 4, 341-360.

Tanji, J., Okano, K. & Sato, K. C. (1987) Relation of neurons in the nonprimary motor cortex to bilateral hand movement. *Nature*, Vol. 327, 18, 618-620.

Taub, E. & Goldberg, I. A. (1973) Prism adaptation: Control of intermanual transfer by distribution of practice. *Science*, Vol. 180, 755-757.

Uno, Y., Kawato, M. & Suzuki, R. (1989) Formation and control of optimal trajectory in human arm movement: minimum torque-change model. *Biological Cybernetics*, Vol. 61, 89-101.

Welch, R. B. (1978) *Perceptual Modification*. New York: Academic Press

Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1993) On the role of extrinsic coordinates in arm trajectory planning: Evidence from an adaptation study. *MIT Computational Cognitive Science Technical Report*, No. 9308,

Woodworth, R. S. (1899) The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review Monograph (Suppl.)* 3, No.3 : Cited in Flowers (1975) and Beggs &



Howarth (1972).

Wundt, W. (1898) Zur Theorie der raumlichen Gesichtswahrnehmungen. *Phil. Stud.*, Vol. 14, No. 11. Cited by Day, R. H. & Singer, G. (1967) Sensory adaptation and behavioral compensation with spatially transformed vision and hearing. *Psychological Bulletin*, Vol. 67, 307.

Zipser, D. & Andersen, R. A. (1988) A back-propagation programmed network that simulates response properties of a subset of posterior parietal neurons. *Science*, Vol. 331, 679-684.

## 後記

本論文は、東京大学人文科学研究科博士課程、およびATR人間情報通信研究所第3研究室で行った研究をまとめたものである。

東京大学在学中とその後にわたり、下條信輔助教授は筆者の指導のために貴重な時間を費やし、数多くの激励を与えて下さった。また、ATR人間情報通信研究所では、川人光男第3研究室長と宇野洋二主任研究員に、計算理論の知識と貴重な助言をいただいた。本論文にまとめた一連の研究は3人の先生方のご指導がなければ存在しないものであり、ここに心から感謝を申し上げたい。

第2章の内容の一部は、Imamizu & Shimojo (1990)およびImamizu & Shimojo (in press)で発表した。第3章の内容の一部は、今水、宇野と川人(1994a)、Imamizu, Uno & Kawato(1994)、および今水、宇野と川人(1994b)で発表した。第4章の内容の一部は、今水、宇野と川人(1993a)、Imamizu, Uno & Kawato (1993)、今水、宇野と川人(1993b)およびImamizu, Uno & Kawato (in press)で発表した。