

修士論文

視覚的到達運動のメカニズムに関する研究

電気通信大学大学院 情報システム学研究科  
情報ネットワーク学専攻

9451004 井口 謙太郎

指導教官 阪口 豊  
出澤 正徳  
安田 稔

1996年2月6日 提出

第1章	はじめに	1
第2章	実験	4
2.1	実験装置の構成	4
2.2	方法と手続き	6
2.3	単純なリーチング運動	8
2.3.1	目標位置の獲得と運動計画	8
2.3.2	運動目標を合図と同時に提示したとき	9
2.4	経由点のあるリーチング運動	16
2.4.1	運動のみきわめ	16
2.4.2	目標への運動計画	19
2.4.3	軌道計画の違いによる影響	21
2.4.4	運動目標を注視できないとき	23
2.5	繰り返し運動を行うとき	27
2.6	実験結果のまとめ	26
第3章	考察	31
第4章	おわりに	33
	参考文献	34

## 第1章 はじめに

### 研究の背景

ふだん我々は、ものを考えたり、記憶したり、腕を動かしたり、走ったりと、それらがごく当たり前のように生活している。これらのことを我々はいとも簡単に行ってしまうので、意識することもない。

では、我々がさまざまな活動を行っているとき、脳のなかで一体どの細胞が活動し、どのように情報が伝達され、脳で処理され、あるいは運動という形で表面に現れてくるのだろうか。これらのことは我々の複雑な脳機能を解明していくうえで、非常に興味深い研究対象である。そして遙か昔より脳の理解のために多くの研究者が力を注いできた。

人間の脳を一種の超高性能コンピュータとみなすことができる。視覚や聴覚、触覚などの各種センサーからの情報を収集・処理し、運動という形で出力される。この超高性能コンピュータの性能をまねて、人間のように振る舞うことのできるロボットを作ろうという考え方はごく自然であろう。そして、多くの研究者が研究に従事してきた結果、決まった動きをするロボットは人間の性能をはるかに上回るものが完成されているが、未だ、人間のように、さまざまな複雑な動きを、すばやく、かつ滑らかに動作するロボットは完成していない。

従来の研究では、人間の情報処理を感覚情報処理、運動計画、運動制御等々、分割して理解しようという方法論があった。しかし、分割された領域を最終的に1つにまとめあげたときにうまく人間の振る舞いが理解できる、という手法はうまく行かないことがわかってきた。運動制御においても、どのような感覚情報が運動に利用され、その情報はどのように表現されているのかを理解しなければならない。

### 従来 of 運動に関する研究

随意運動は自らが外界の対象に働きかける運動である。視覚的到達運動(Visually Guided Reaching Movement:リーチング運動)は、視覚で得られた目標に自分の手を

到達させるという明確な目的をもった、もっとも基本的な動作である。ここで随意運動を行うために必要な計算について述べる。

机上のものに手を伸ばすという場合を例にとってみると、まず、目標とする対象がどこにあるのか視覚系から情報を獲得する。次に、手を伸ばすのにもっとも望ましい軌道を決定する。次に、決定された軌道を筋肉の長さや関節角といった身体座標に座標変換を行う。最後に、身体座標で表現された軌道を実際に実現するために筋肉の張力を発生する制御を行う。随意運動には軌道生成、座標変換、制御の少なくとも3つの問題が解決されなければならない。

これら3つの問題については、精力的な研究の結果成果が上げられ、軌道計画、運動学習については、人間の振る舞いをうまく説明する計算論的モデルが提案されてきた。<sup>1) 2) 3)</sup>

## 本研究の目的

従来の研究では視覚フィードバックを含まない運動制御系の議論が中心であった。

我々はふだん運動するときは視覚に頼っていることが多い。細かな作業をするときには対象をじっと見ながら作業していることもあれば、机の上のコップを取るときのようにつかむ寸前にしか眼を向けないときもある。つまり運動と視覚は密接な関係があると考えられる。

視覚から情報を参照する場合、どのような情報を参照しているのでしょうか。また獲得された情報を運動にどのように利用しているのでしょうか。これらを知るとは運動制御のメカニズムを知るうえで重要な手がかりを与えてくれるものである。本研究の目的は、随意運動中の視覚情報参照のメカニズムを探ることを通じて運動制御における視覚情報がいかに利用されているかを明らかにすることである。具体的にはリーチング運動を題材として、上肢運動と眼球運動を同時に測定し、その時間的関係を検討することで上記の目標へのアプローチを試みた。

## 本論文の構成

本論文の構成は、以下、第2章でリーチング運動を題材とした実験の結果について述べる。第3章で実験結果の考察と、運動制御における視覚情報参照機構について検討を行う。第4章で本研究のまとめを述べる。

本論文中で用いている「運動計画」という単語は、前述の軌道計画、座標変換、制御を含んでいるものと定義する。

## 第2章 実験

### 2. 1 実験装置の構成

実験装置は図1に示すように、目標位置提示盤、腕先位置計測部、眼球位置計測部および制御用コンピュータから構成されている。

**目標位置提示盤** 水平に置かれた透過型スクリーンにビデオプロジェクタと光学系を用いて、コンピュータの画面を盤面下方から投影したものである。これによって被験者に運動目標の提示、および運動開始、終了の指示を行う。

**腕先位置計測部** 「マニピュランダム」と呼ばれる方式を用いている。2つの自由に回転する関節をもつリンク機構の先端部のハンドルを被験者に握らせることにより、被験者の腕先の位置を関節角度から求める。マニピュランダムの可動範囲は水平面上に限定され、被験者の腕の動きも水平面上に限定される。

**眼球位置計測部** 眼球位置の計測はEOG (Electro-Oculography)法を用いて、右眼眼球の水平、垂直方向の視線方向を計測する。生体信号は生体アンプを介してコンピュータに入力される。使用した生体アンプは日本光電製AM-621Gである。

**制御用コンピュータ** 目標位置提示盤の制御のほか、腕先位置、眼球位置を示す信号をデジタル変換して収集する。実験ではサンプリング周波数を100Hzとした。

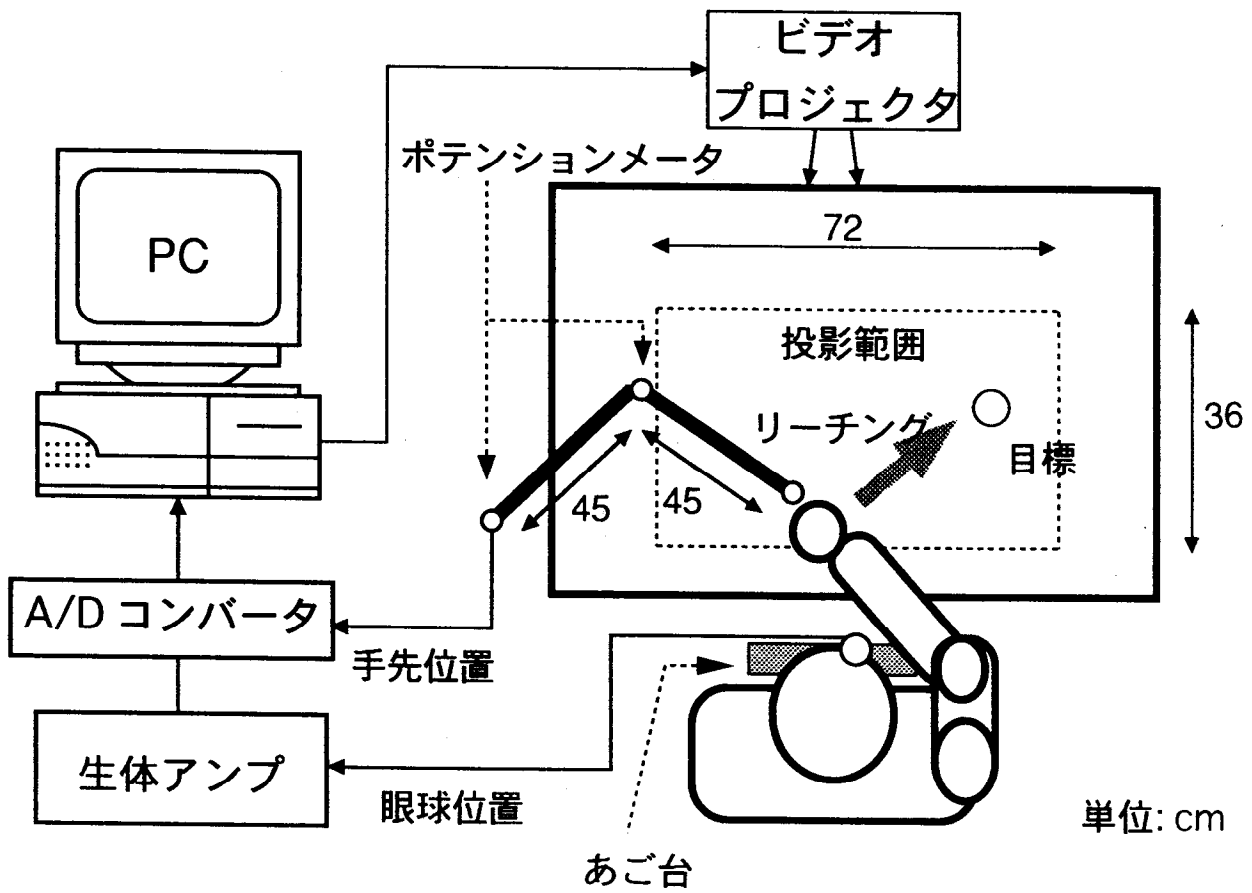


図1 実験装置の構成

## 2. 2 方法と手続き

被験者は、目標提示盤の前に固定された椅子に腰掛け、あご台によって頭部を固定された状態で、右腕でリーチング運動を行う。

運動開始の合図は注視点の色を変えることで与えた。

運動課題は、提示された目標へできるだけ速く、かつ正確に腕を到達させることである。

課題実行の手順は以下の通りである。

- 1) 試行開始の合図として、運動始点が赤色で提示される。  
この間に運動始点に腕をもっていく。
- 2) 500 msec後、運動始点、運動目標が黄色で提示される。  
課題に応じて経由点が提示される場合がある。  
要求される課題に応じて、経由点あるいは目標を注視する。  
注視時間は1 secであるが、条件によって異なる場合がある。
- 3) 黄色で表示されている点が赤色に変わる。  
運動始点を注視する。
- 4) 1 sec後、赤色から緑色 (go signal) に変わる。  
被験者は視覚で合図を確認した後、課題を実行する。

以上の手順を連続して行う。試行間の間隔は1 secから2 secである。

図2に示したのは、上肢と眼球の動きを時間を横軸として概略的に表したものである。go signalが与えられた後、眼球運動が生じ、運動視点から目標に視線が移動する。その後、目標へ向かって到達運動が始まる。

今回の実験で眼球運動の計測に用いたEOG法では、検出角度の限界が低いこと



と、ドリフトの影響が大きいことから正確な視線方向の検出は容易でない。このため実験では眼球運動の時刻に着目し、被験者の視線方向の校正は行っていない。実験ではgo signalからの眼球運動の潜時、上肢運動の潜時と運動時間、眼球運動の潜時から上肢運動の潜時までの間隔等、各運動の時間的關係に特に着目した。

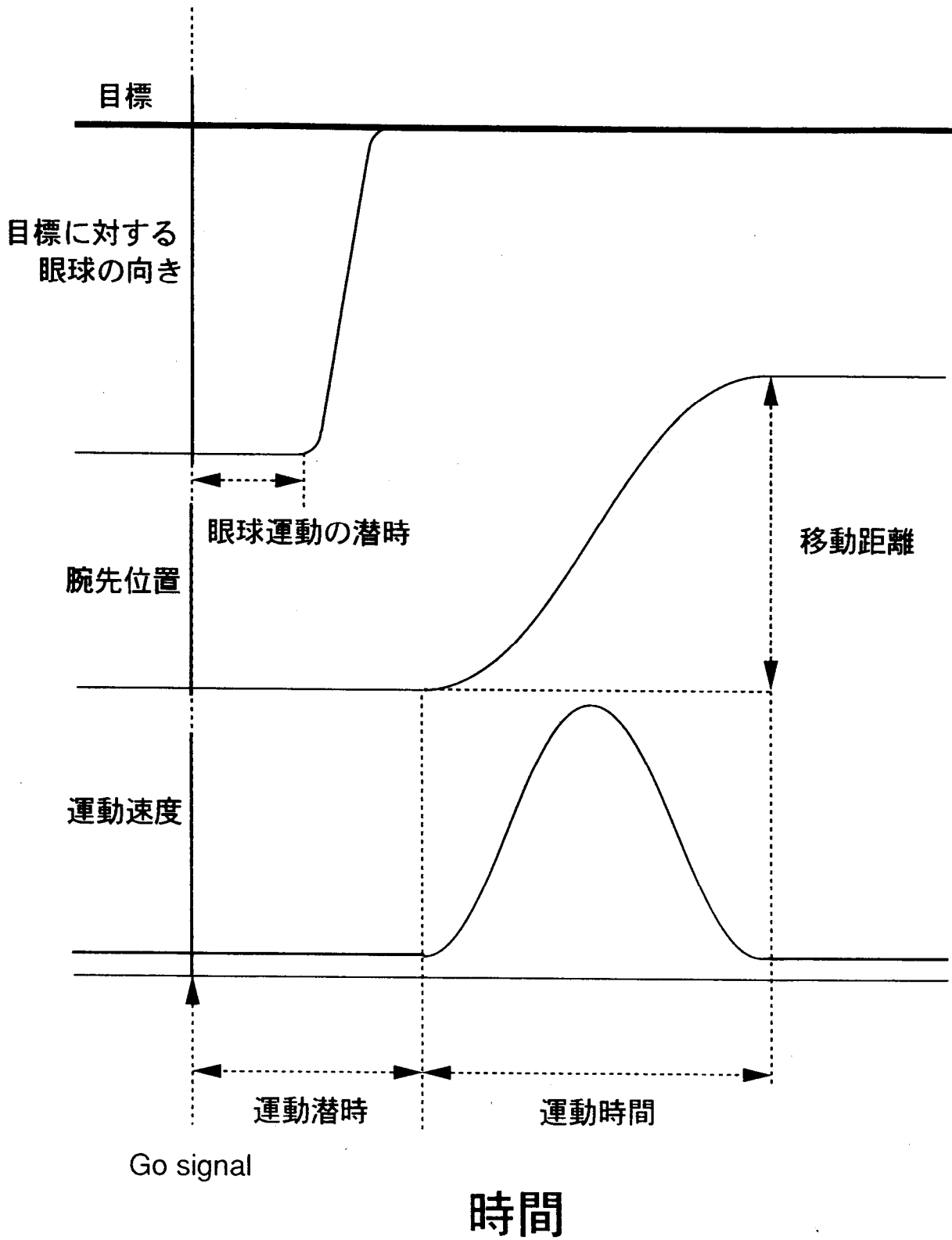


図2 リーチング運動の概略

## 2. 3 単純なリーチング運動

リーチング運動でもっとも簡単な課題である、単一の目標までのリーチング運動を課題として、眼球運動と上肢運動の性質について調べる。具体的には、目標の位置や大きさ、提示時刻を変えたときに、眼球運動の開始時刻、上肢運動の潜時に与える影響について検討する。同時に運動中も注視点から目を離してはいけない条件について検討する。運動計画に必要な位置情報の精度についても検討する。

### 2. 3. 1 目標位置の獲得と運動計画

運動計画をたてるためには目標の位置情報を獲得しなければならない。目標の位置を知るためには、目標を注視する必要があるのだろうか。あるいは注視しなくとも、周辺視で獲得できる情報が十分なのだろうか。ここでは、運動前に目標を注視することが、上肢運動と眼球運動にどのような影響を与えるのか検討する。また、運動距離や運動目標の大きさによって、上肢運動と眼球運動にどのような影響があるのかも同時に検討する。

目標の距離は運動始点から同一直線上に15、30、45 cmとし、目標の大きさを各々、直径3、6、9 cmの3通りとした。各条件とも、目標位置はある一定の範囲でランダムに移動させた。

条件Aは、目標注視時間中に目標を注視して、正確な位置情報を獲得できる条件である。

条件Bは、目標注視時間中も運動視点を固視し続けなければならない、目標の位置を周辺視で獲得しなければならない条件である。

同時に条件Cとして、目標を最初から固視した状態で運動を行う場合についても比較した。条件Cだけは直径3、9 cmだけで行った。

各条件とも、3種類の大きさと3種類の距離をランダムに10試行ずつ、90試行を行った。

## 結果と考察

結果を図3に示す。グラフはgo signalが与えられた時刻を0として運動に所要した時間の平均値を記してある。棒グラフの白い部分が上肢運動の潜時、塗り分けられた部分が上肢が目標に向かって運動している時間を示している。眼球運動が起こった時刻を●点で示した。

眼球運動の潜時はA、Bとも約200 msecであった。上肢運動の潜時は約270 msecで、条件の違い、距離や目標の大きさによらずほぼ一定であった。

運動始点を固視しているとき、目標までの距離が遠いときは、解像度の低い網膜の端のほうで画像を捉えることになる。条件A、Bとも距離、大きさに関係なく眼球運動の潜時がほぼ同じ値であることから、網膜上に映っている像に対して眼球を動かそうとするのに必要な時間は同じであり、事前に目標を注視したことによる短期記憶は眼球運動の発現に影響がないと考えられる。

一方、運動潜時も条件A、Bともほぼ同じであることから、運動計画は事前に目標を注視する必要はなく、周辺視で得られた情報に基づいて行っているといえる。運動開始後、目標を中心視して正確な位置情報を獲得してから運動に修正を加えていると考えられる。

条件Cでは、上肢運動の潜時はほぼ同じであるが、運動終了時間がA、Bよりも早くなる傾向が見られた。これは運動開始前から目標を注視していることから、目標の位置情報が運動にすばやく反映されているためと考えられる。

この結果では、条件Bの方が条件Aよりも運動が早く終了しているが、追実験の結果、条件A、Bの明瞭な差はほとんどないという結果を下した。しかし、厳密にはデータの数を増やし統計的検討が必要である。

### 2. 3. 2 運動目標を合図と同時に提示したとき

運動目標をgo signal前に提示した場合、脳は運動開始以前に運動計画を組み立てることができる。一方、go signalと同時に提示される場合には、その時点から運動計画を開始すると考えられる。ここでは、目標提示を運動開始時刻とそれ以前

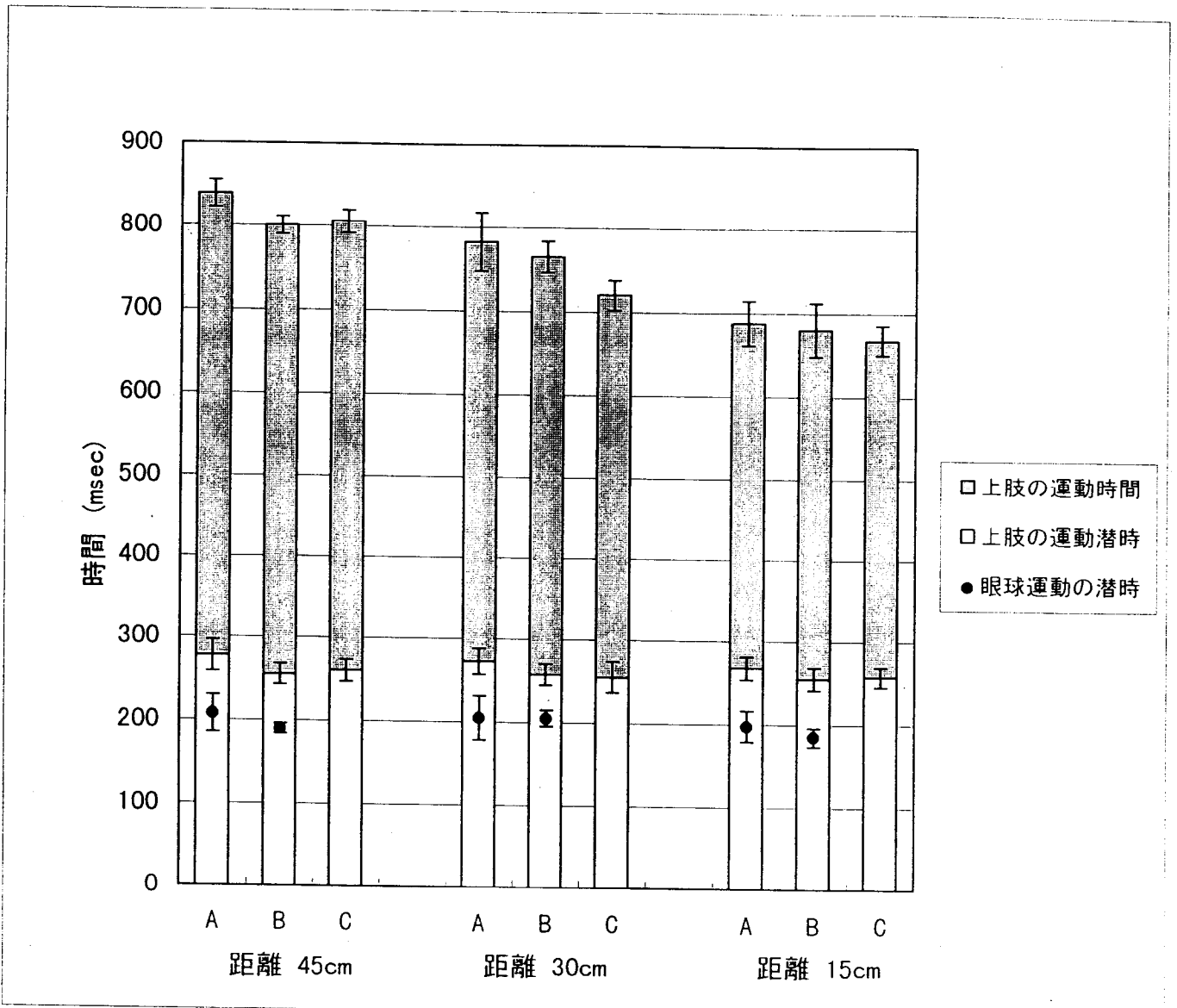


図3a 単一目標へのリーチング 目標の直径3cmのとき  
A) 事前に目標を注視できる条件  
B) 事前に目標を注視できない条件  
C) 目標を注視したまま運動する条件

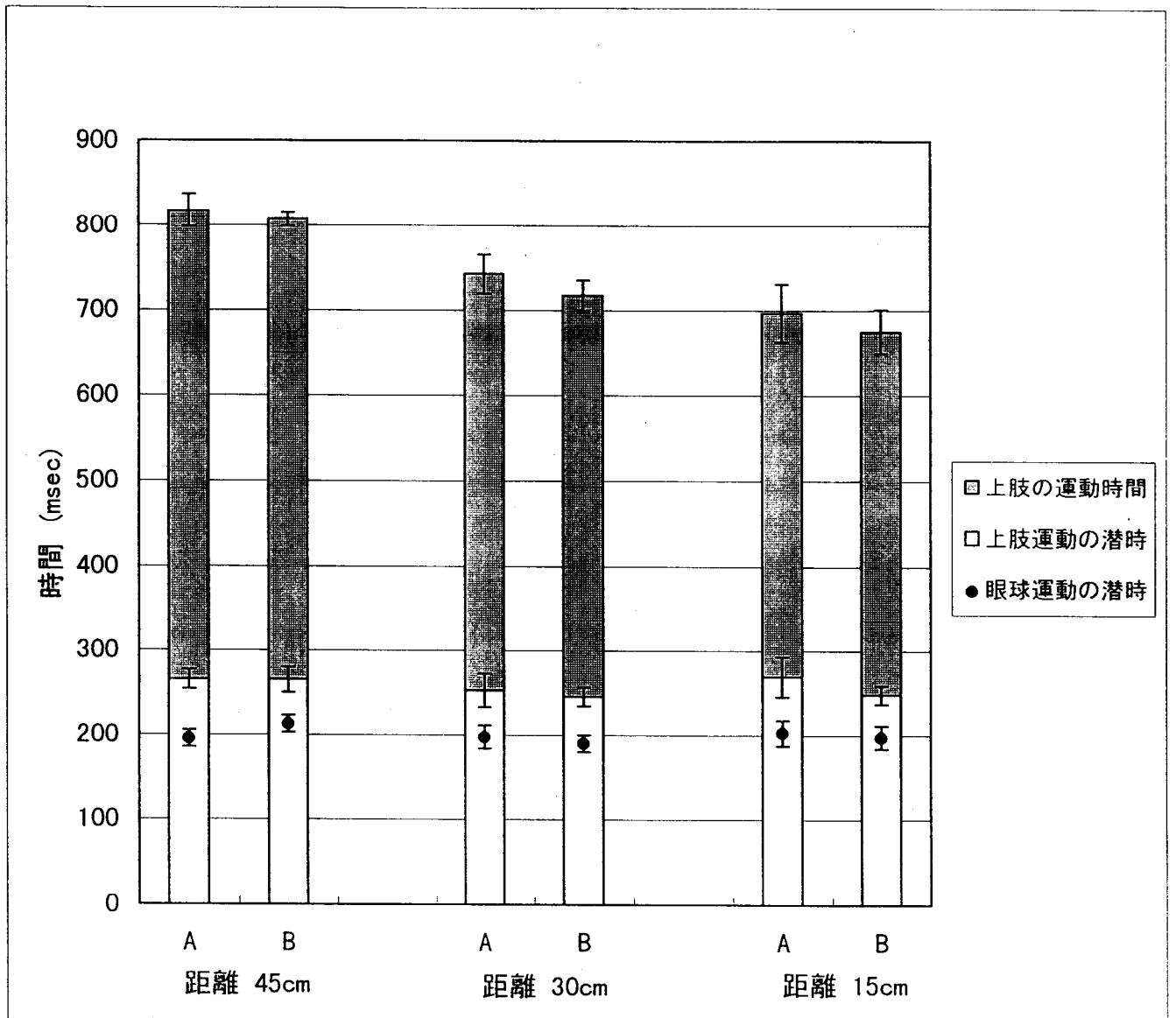


図3b 単一目標へのリーチング 目標の直径6cmのとき  
A) 事前に目標を注視できる条件  
B) 事前に目標を注視できない条件

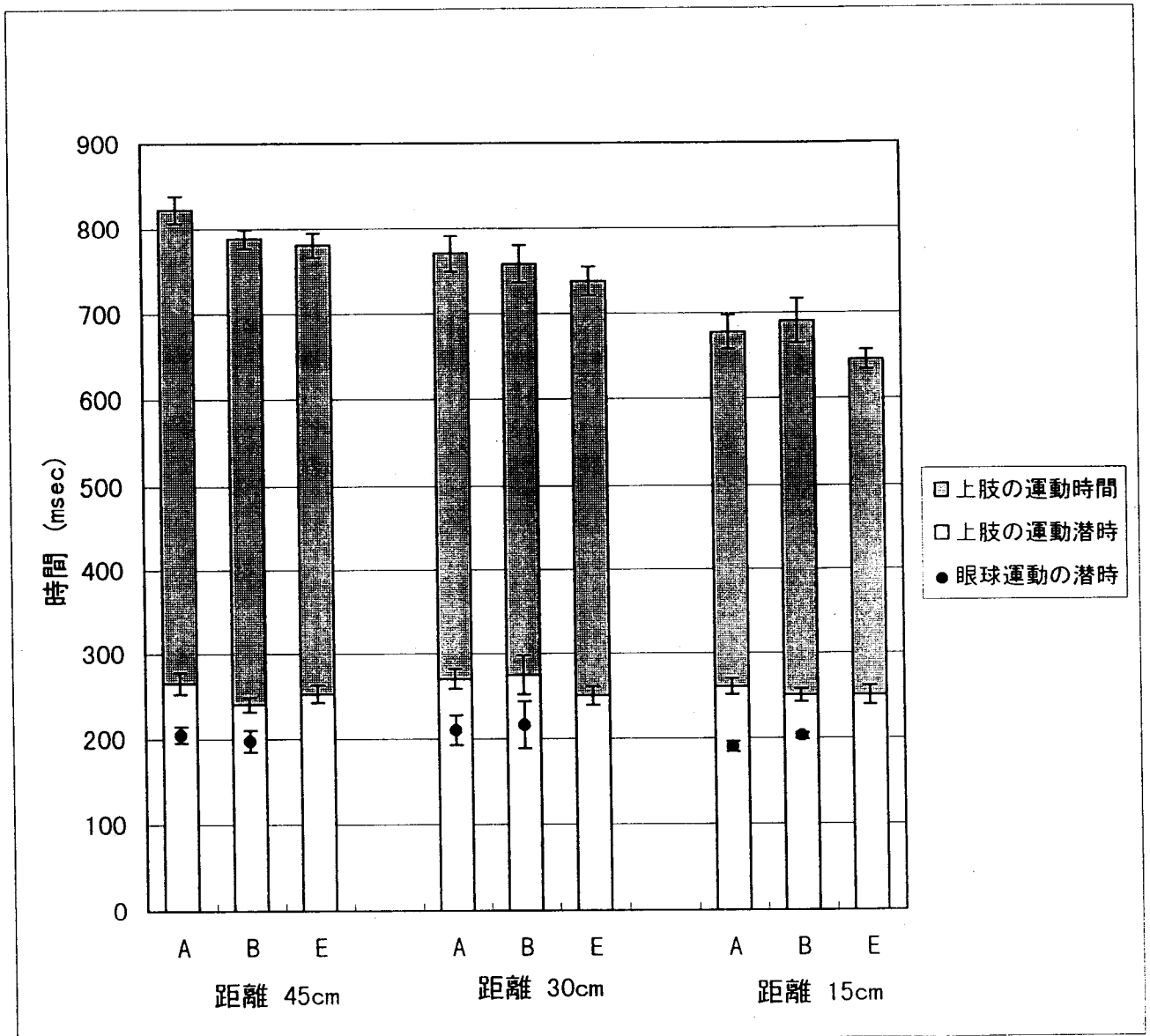


図3c 単一目標へのリーチング 目標の直径9cmのとき  
A) 事前に目標を注視できる条件  
B) 事前に目標を注視できない条件  
C) 目標を注視したまま運動する条件

の場合について、上肢運動と眼球運動の違いについて比較検討する。

目標は直径3 cmで、異なる4つの位置にランダムに提示される。被験者にはランダムに提示されることだけ伝えた。条件Aでは最初から目標が与えられ、条件Bはgo signalで目標が与えられる。被験者には両条件とも運動開始直前は運動始点を固視するよう要求した。

実験は4種類の位置に各5試行ずつ20試行を1セットとし、条件Bの後、条件Aを行った。各条件とも2度ずつ行った。

## 結果と考察

結果を図4に示す。

眼球運動の潜時は前節同様、両条件とも約200 msecであった。目標位置がランダムに変化するにも関わらず、眼球運動の潜時に大きな差が生じないのは、ぱっと現れた目標に対して反射的にそちらに視線を向けようとする、刺激誘導性のサッカーボールによるものと思われる。

一方、上肢運動の潜時は、条件Bが条件Aに比べて40～70 msec大きくなった。上肢運動に要した時間は両条件とも違いがなかったことから、視覚から得た情報で同じ運動を計画していることがわかる。潜時が大きくなったことは、運動計画を行いながら腕を動かし始めているのではなく、獲得した情報を基に運動計画が終了してから運動指令を発しているのではないかと考えられる。条件Aでは、運動計画が終了し筋肉系の準備がなされ、合図があると同時に脳は運動指令を出そうと待機している状況であろう。条件Bの場合は目標が提示されたら即座に運動計画を行って、即腕を動かそうとしているだろう。このときに筋肉系が運動指令に即座に反応して動けるように準備状態にあるのかどうか不明である。この運動潜時の差が、視覚情報を獲得してから運動計画をたてて腕が動くまでの視覚情報処理に必要な時間なのか、筋肉系の状態による差も含まれるのか、筋電を測るなどして検討が必要である。



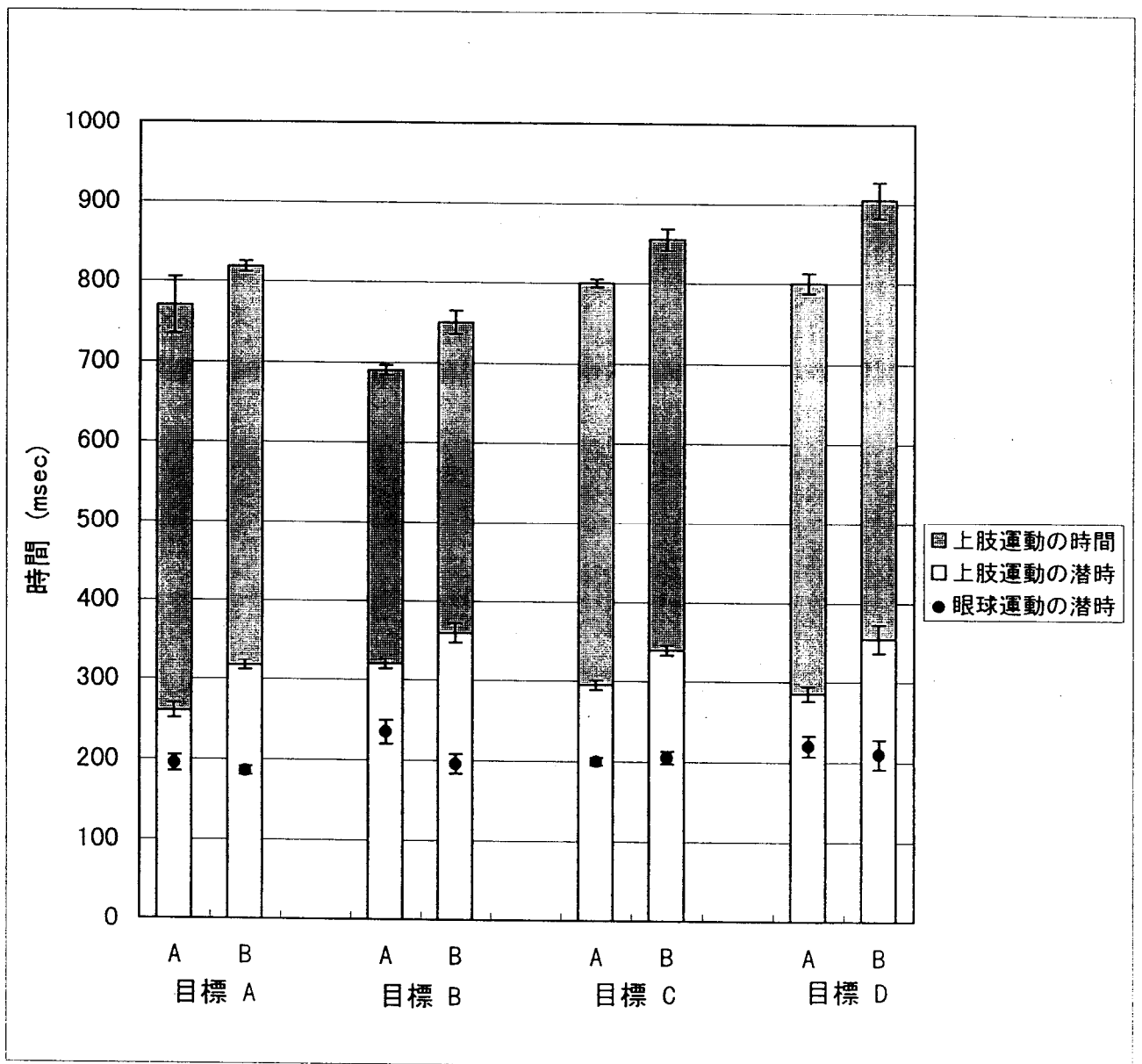


図4 目標がランダムに提示されるとき  
A) 目標は最初から提示  
B) 目標は go signalで提示

## 2. 4 経路点のあるリーチング運動

単一目標へのリーチング運動では、go signalの後眼球運動は目標に向かって視線を移動した後、目標を固視したままになる。運動中の腕の動きを常に追従するような眼球運動は、いかなる条件においても見られなかった。単一のリーチング運動では運動に必要な情報は目標の位置のみであり、腕が描く軌道には制限がなく、腕が目標円内に正しく到達できるように視覚フィードバックして腕の動きを修正するだけでよいからである。従って視覚情報獲得過程に差が表れるのは、一つの課題の完了を確認した後、次の課題に必要な情報を入手しなければならない状況である。そのような状況の中で最も簡単な運動として経路点のあるリーチング運動を設定した。

経路点のあるリーチング運動で脳がしなければならないことは、経路点に腕が到達したことを確認しなければならないこと、新しい目標の位置情報を獲得しなければならないこと、経路点から目標までの軌道計画を行わなければならないこと、が考えられる。このような状況に置いて、運動中にはどのような視覚情報獲得の戦略をとっているか、視覚情報がどのように運動に利用されているか検討する。

### 2. 4. 1 運動の見きわめ

経路点があるリーチング運動では、経路点に腕が到達したことを確認してから、目標へ向かう運動に移行すると考えられる。それでは、経路点の到達の確認はいつ行われているのだろうか。これは経路点から視線が移動し次の目標に向かった時刻が、フィードバックを終了し経路点到達を確認した時刻であると考えられる。ここでは経路点の大きさを変えたときに、この時刻がどのように変化するか比較検討する。

経路点の大きさは、直径3、6、9 cm、目標の大きさは、直径3、6、9 cmとした。経路点と目標は運動開始前に与えられている。経路点、目標の大きさはある一定範囲でずらした。実験は目標の大きさを一定にして経路点の大きさをランダムに変化させ、各々の経路点の大きさに対して20試行ずつ行った。

## 結果と考察

目標の直径が6 cmのときの結果を図5に示す。棒グラフは下から順に、上肢運動の潜時、経由点へ向かう上肢の運動時間、経由点での上肢の停留時間、経由点から目標へ向かう上肢の運動時間を示す。経由点での上肢の停留時間は、腕先が経由点の円内に入った時刻から円外に出た時刻であり、上肢の速度が0になった時間ではない。眼球運動は下の●点が運動始点から経由点に視線が移動した時刻、上の●点が経由点から目標に視線が移動した時刻（以下この時刻を第2サッカードと呼ぶことにする）を示す。▲点は腕先の速度が運動開始後極小になった時刻を示している。

経由点が3 cmのとき、第2サッカードの時刻は腕先が経由点に到達してから、約250 msec後であった。同様に経由点が6 cmのときは約160 msec後、9 cmのときは約130 msec後であった。速度の極小時刻から第2サッカードまでの時間は3 cmのとき約160 msec、6 cmのとき約70 msec、9 cmのとき約30 msecであった。眼球運動を行おうとして運動指令を発して、実際に眼球が動くまで180~200 msec必要であったから、経由点が大きいくほど脳は腕が経由点に到達する以前に、経由点内へ到達できることを予測して運動を行っていると考えられる。また、経由点が大きいくほどオーバーシュートしても経由点から飛び出さないが、経由点が小さいほどオーバーシュートを抑えねばならないことから、経由点が小さいほどフィードバックに必要な視覚的負荷が大きく、時間が多くかかっていると考えられる。

第2サッカードを起こす要因であるが、視界に入る腕の像を基にしているのか、腕の速度や筋肉の利用度合いなどの身体情報を基にしているのか、あるいはその両方であるのか、この条件では明瞭な解答が得られない。実験条件を変えて検討する必要がある。

目標の大きさが3、9 cmの場合も、上肢運動、眼球運動とも差は生じなかった。このことは次の運動の難易度が、実行中の運動と視覚情報参照に影響を与えていないことを意味している。

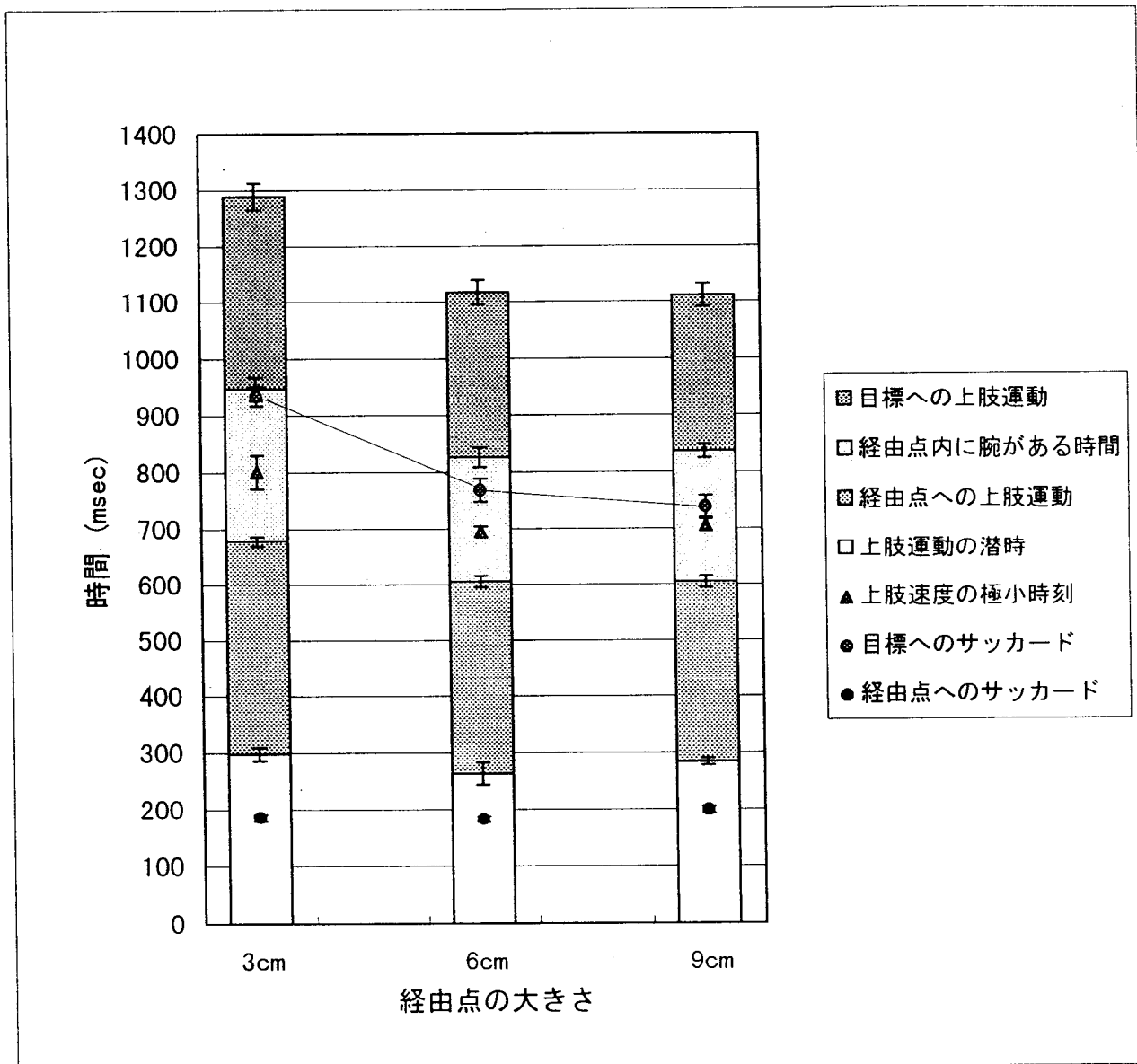


図5 経路点の大きさを変えたとき  
目標の大きさ6cm

## 2. 4. 2 目標への運動計画

経路点のあるリーチング運動では、目標の位置を獲得し、経路点から目標への運動計画を立てなければならない。目標への運動計画は運動のどの時点で行っているのだろうか。経路点、目標の位置、大きさ、試行回数の条件は前節と同じとし、目標はgo signalと同時に提示されるとした。この条件では運動開始前には経路点までの運動計画のみしか行えず、目標までの運動計画は運動開始後になる。このときの眼球運動と上肢運動の変化から、目標までの運動計画をどの時点で行っているのか検討する。

### 結果と考察

結果を図6に示す。前節の結果と比較してみる。

始点から経路点までの運動に所要した時間、経路点から目標までの運動に所要した時間はほぼ同じであった。経路点での停留時間が若干大きくなる傾向が見られた。

眼球運動については振る舞いが前節と同様で、go signalの180～200 msec後に経路点に視線が向かっていた。go signalで与えられた目標を、上肢運動を開始する前にその位置を確認する眼球運動は見られなかった。経路点内に腕がある時間に大きな差がないことから、経路点に到達する以前に目標への運動の計画は出来上がっており、その計画に必要な情報は周辺視による情報に基づいていると考えられる。

### 目標の提示時刻をさまざまに変えた場合

go signalと同時に目標が与えられた場合には、経路点に到達するまで時間がかかるので、運動に平行して運動計画を立てるのに十分な時間があるのではないかと考えられる。この点を検討するために目標を提示する時刻を遅らせてみた。実際には、運動開始前、go signalと同時に、go signalから100、200、300、400 msec後とした。経路点の大きさは直径3 cmで、位置条件が先の実験と異なる。

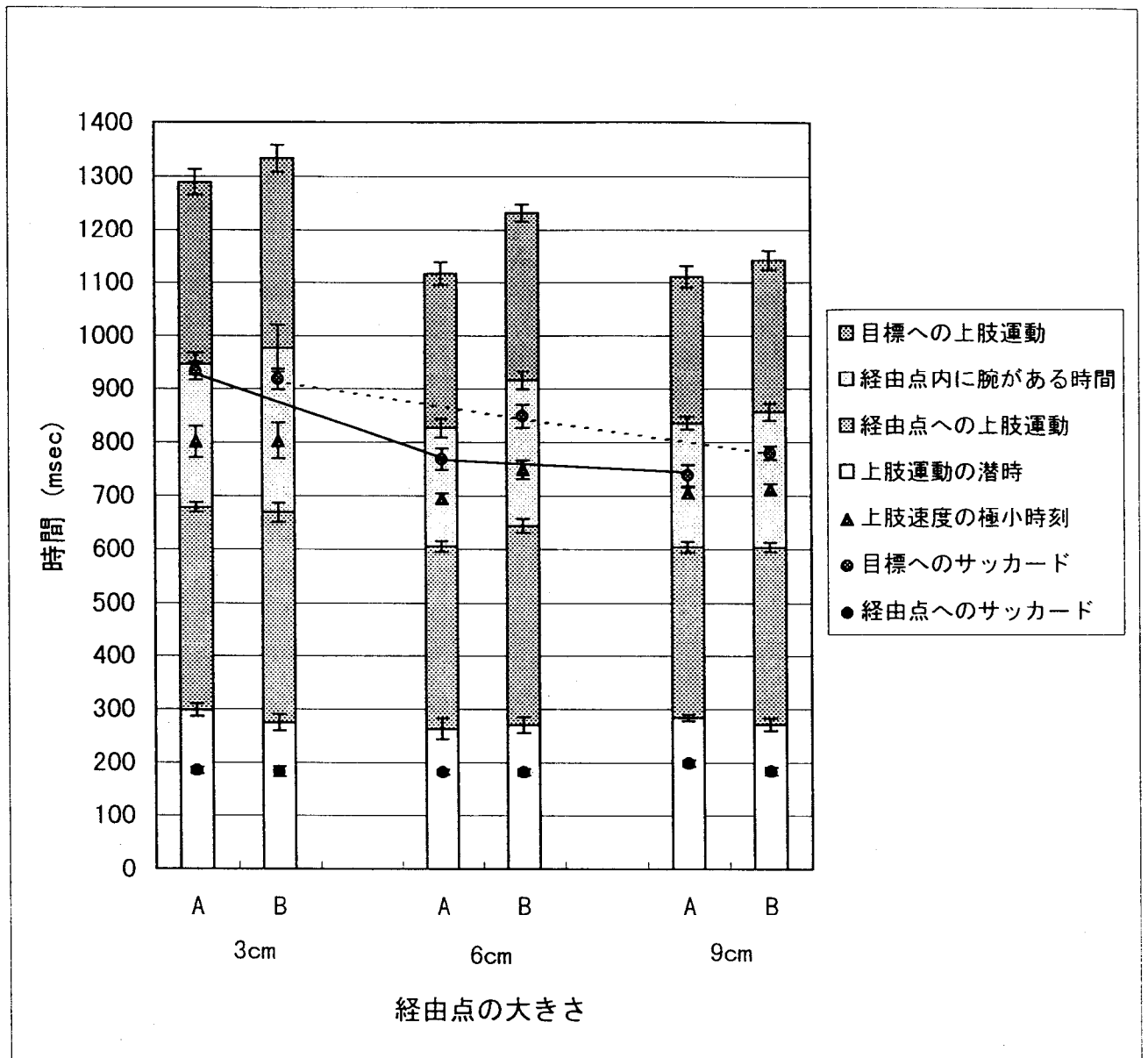


図6 目標の提示時刻を変えたとき  
A) 目標を最初から提示  
B) 目標を go signalで提示

実験は提示時刻をランダムに変化させた。経由点の位置は一定で、目標の軌道を記憶することが無いよう、目標の位置は異なる位置に3カ所ランダムに提示されたとした。各提示時刻について15試行ずつ90試行を行った。経由点に腕が到達した時刻に目標が提示される条件についても検討した。

## 結果と考察

結果を図7に示す。グラフは経由点の到達時刻を基準として、経由点から腕が離脱した時刻と目標までの運動時間、サッカードの時刻を示している。結果から、経由点到達前に目標が提示される場合は、提示時刻の違いによる大きな差が認められなかった。経由点に到達した時刻に目標が与えられる場合は、経由点到達から約180 msec後に眼球運動が見られた。経由点から離脱した時刻は若干遅く、運動に所要した時間は約50 msec大きかった。

これらのことから、目標への運動計画は周辺視による情報に基づき、かつ運動中でも並行に行え、ごくわずかな時間見えていれば計画ができると考えられる。

### 2. 4. 3 軌道計画の違いによる影響

運動開始以前に経由点、目標を提示し、十分に軌道計画できる時間が与えられているとする。このとき、目標への軌道計画は、始点から経由点、経由点から目標との2軌道に分けて軌道計画を行う場合と、経由点を始点から目標までの1軌道上の1点としてみなし、全体として1軌道として軌道計画を行う2つの場合が考えられる。両者の違いは軌道の他に、経由点での腕の速度である。課題実行において腕の速度の違いが視覚情報参照に与える影響について検討する。

1軌道の運動を条件A、2軌道の運動を条件Bとする。経由点の大きさは直径3、6、9 cm、目標の大きさは3 cmで位置は一定とした。経由点の位置は3カ所の設定のうちいずれかがランダムに選択され、大きさもいずれかがランダムに選択される。両条件とも3種類×3カ所を各10試行ずつ、90試行を行った。

1軌道の運動では、経由点で速度を落とさないように被験者に要求した。

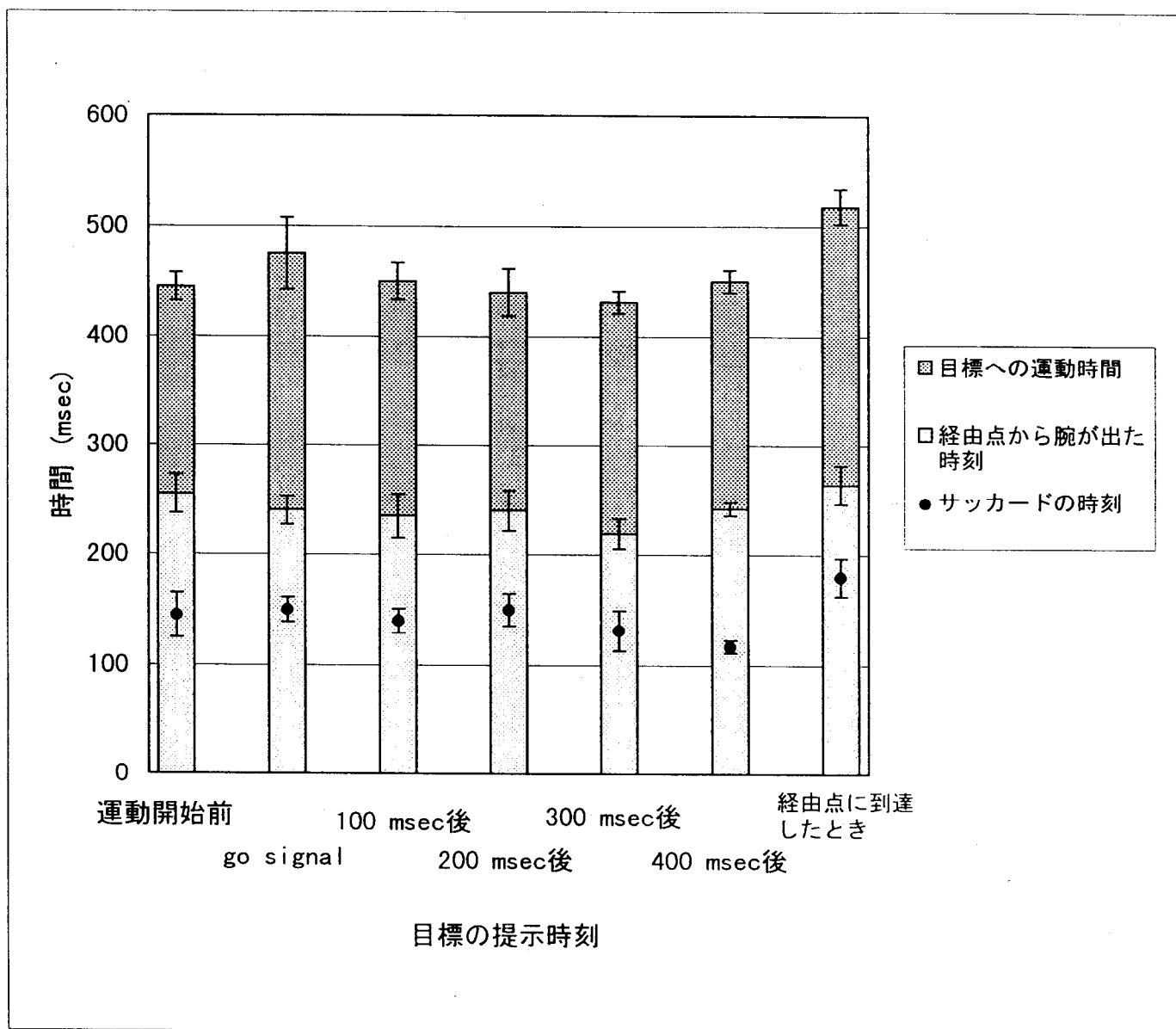


図7 目標の提示時刻を変えたとき  
経由点の大きさ 3cm



## 結果と考察

結果を図8に示す。

1軌道での運動の場合、経路点が3cmのとき、腕が経路点を通過して約60 msec後に第2サッカードが生じており、経路点に到達したことを確認していることがわかる。6cmのときはばらつきがあり、経路点の通過中前後に第2サッカードが生じている。9cmのときは、腕が経路点に到達する前に第2サッカードが生じている。

第2サッカードがおきた時刻の手先の位置を図9に示す。9cmのときはほぼ同じような軌道計画を行っているが、小さくなるほど計画した軌道にばらつきがある。図9c)より明らかなように、9cmのとき第2サッカードが起こった時刻には、腕先は運動始点からわずかしき移動していない。このことから、9cmのときには計画した軌道が円内を通過することを予測した上、フィードフォワード制御で運動していることを示している。

また、この結果で興味深い点は、経路点が大きく、予測による運動が可能であるにも関わらず、経路点を一度参照してから目標に視線が移動している点である。このことから推測されることは、事前に軌道計画を行ってはいるが、運動開始後改めて経路点の位置を参照してより正確な軌道計画に変更している、経路点に腕が間違いなく到達することを判断するために確認している、もしくは眼球を向けることで、運動制御に有用な情報が得られる、などが考えられるが今後の詳しい検討が必要である。

### 2. 4. 4 運動目標を注視できないとき

前節で、運動する際に視線を向けることで、運動制御に有益な何かを得ているのではないか、という疑問が生じた。では、運動中に運動目標となる経路点を注視できないときでは、運動に何らかの影響が出るのではないかと思われる。

以上のことから、経路点付近に注視点を設け、注視点を見つけて運動しなければならない条件を設定した。このことが運動にどのような影響を及ぼすか検討する。

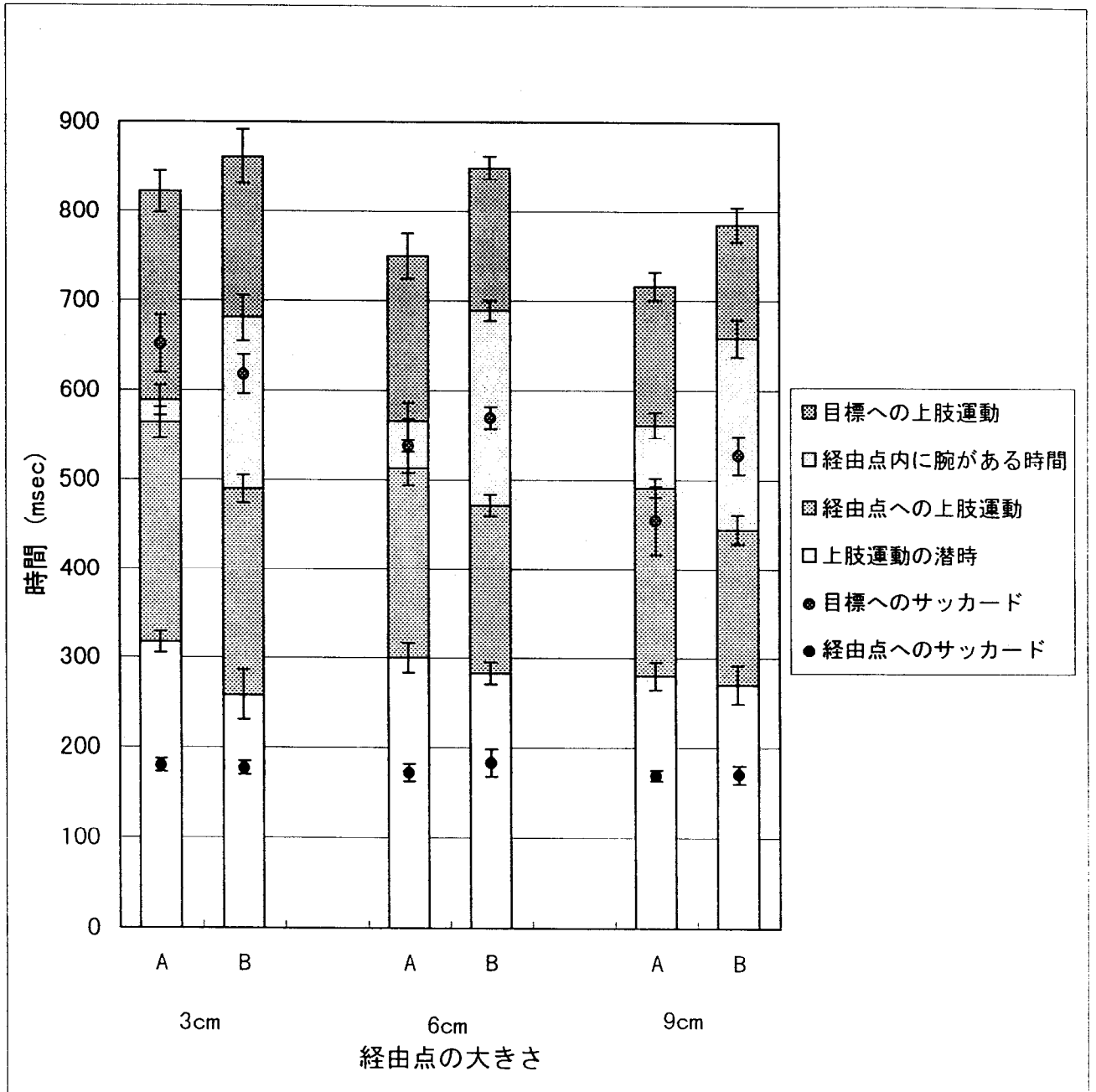


図8 軌道計画の違い  
 A) 1軌道として運動  
 B) 2軌道として運動

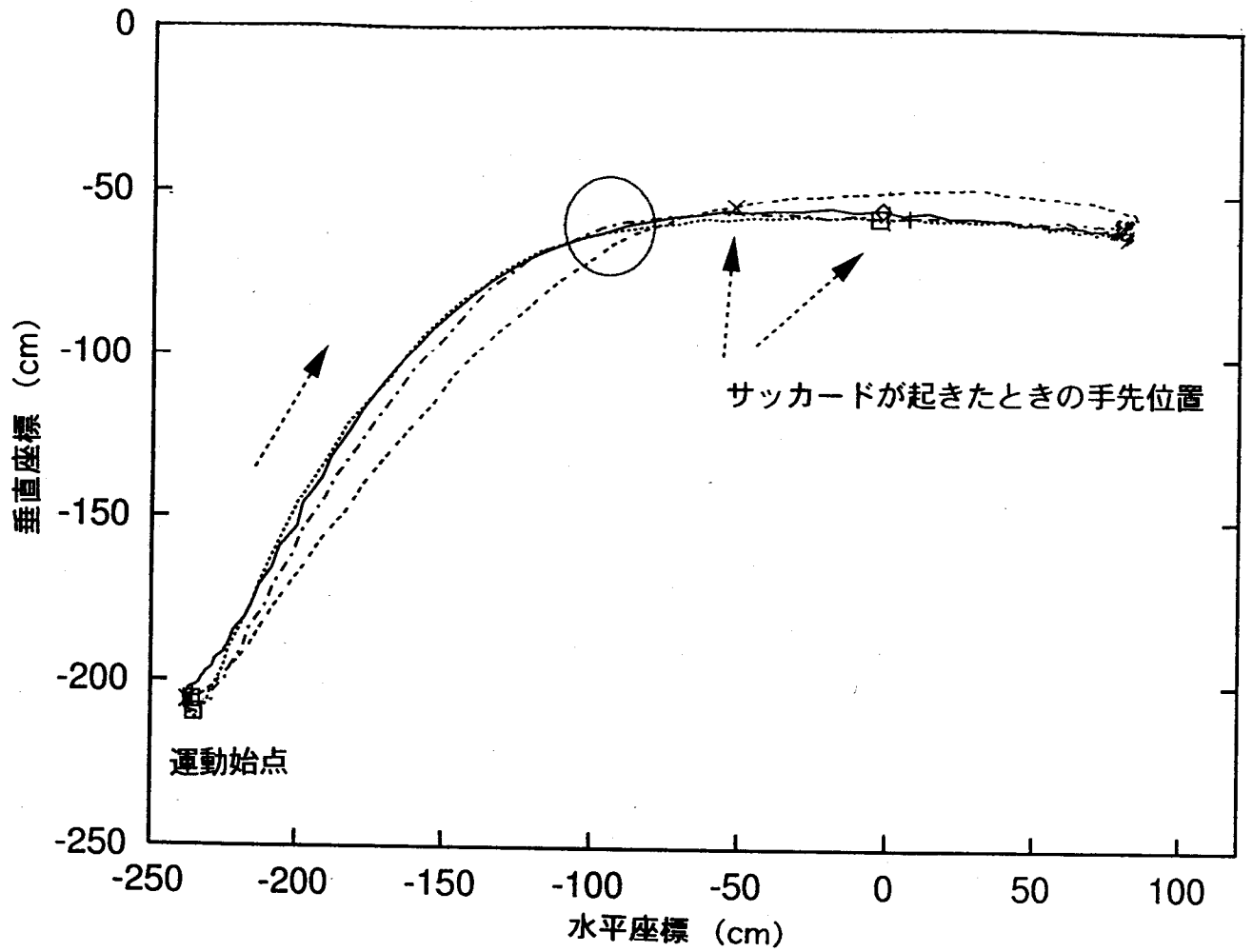


図9a) 1軌道の運動 経由点 3 cm のとき

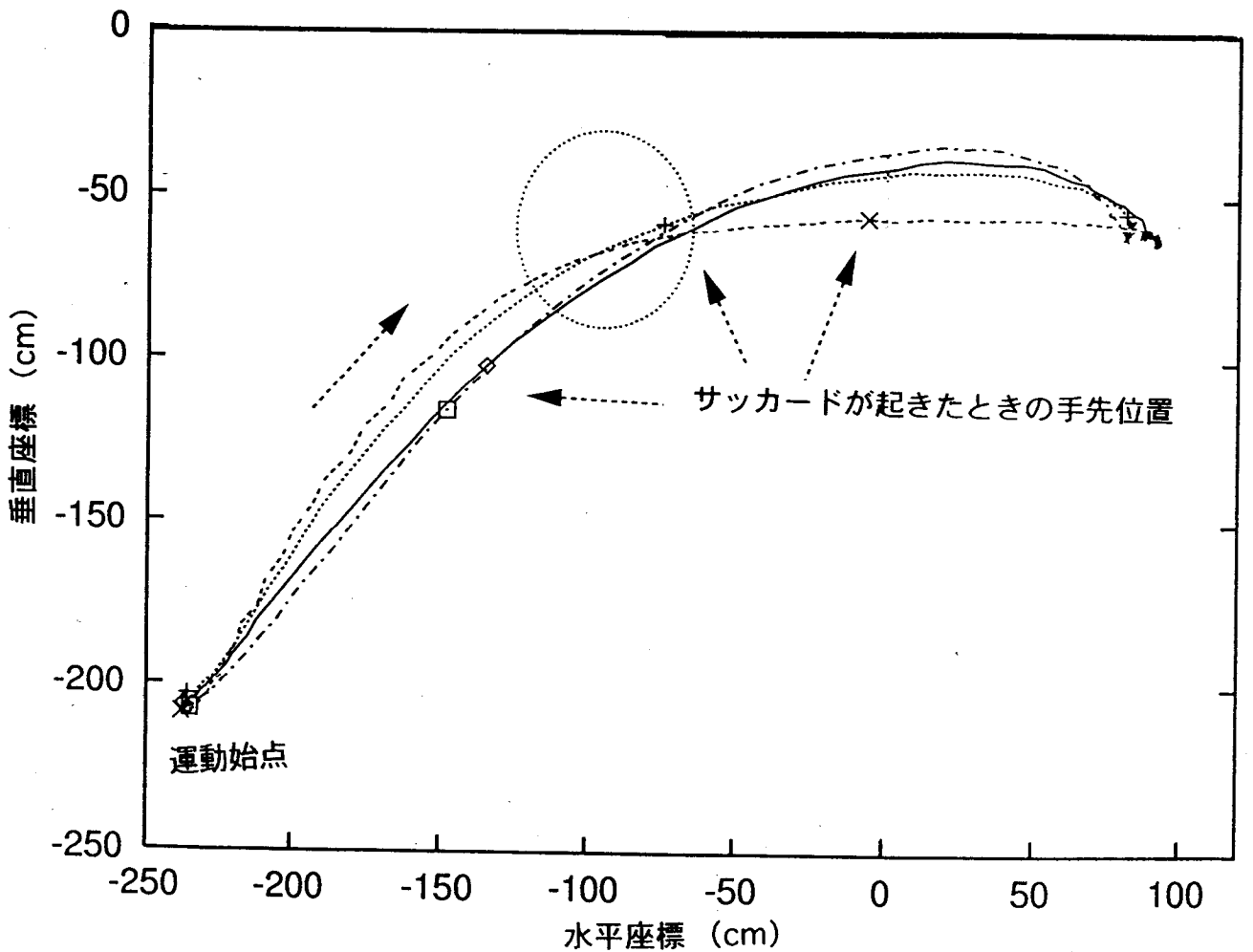


図9b) 1軌道の運動 経由点 6 cm のとき

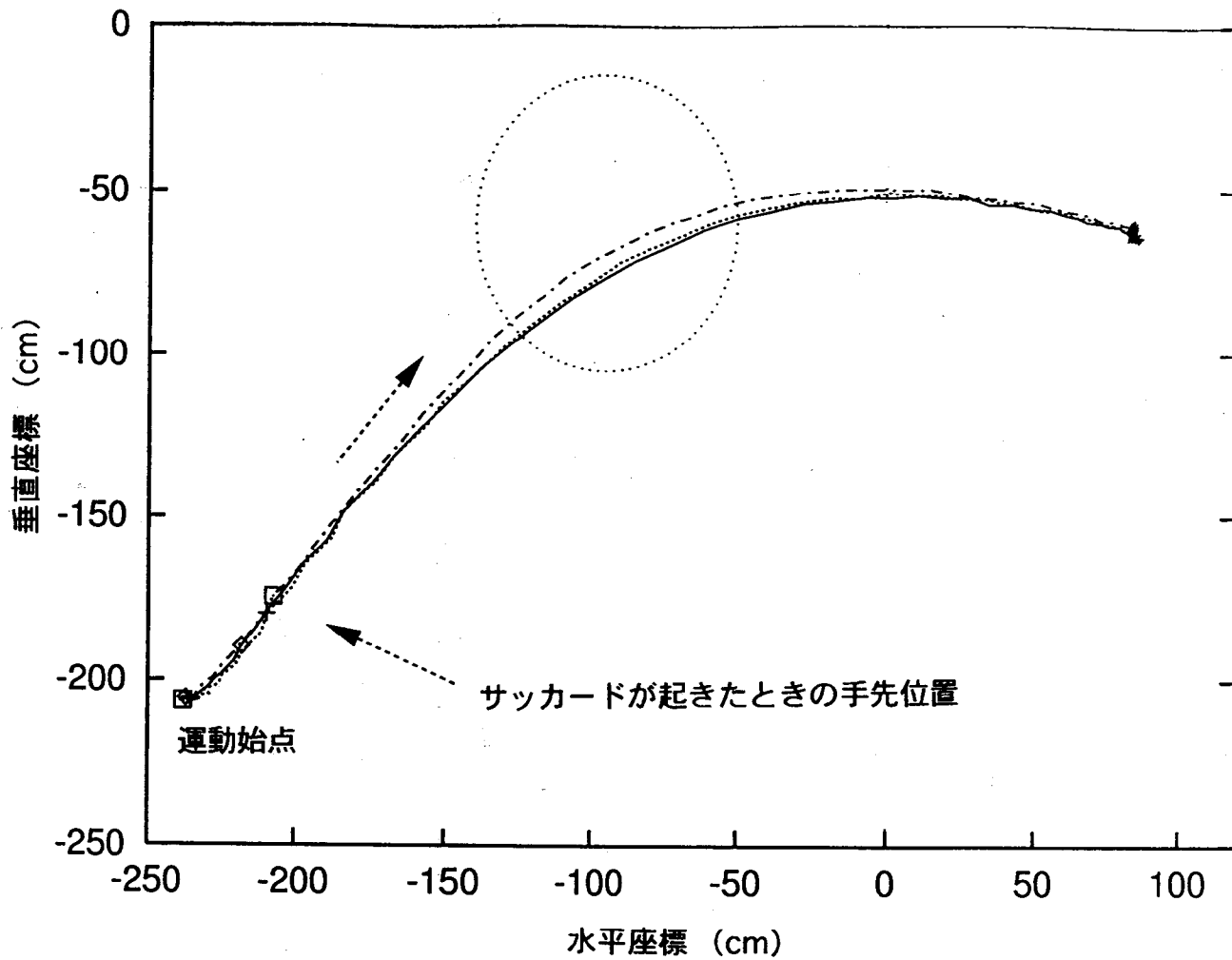


図9c) 1軌道の運動 経由点9 cmのとき

直径 3 cm の経路点の中心から上下左右 5 cm 離れた位置に、1 辺が 1 cm の十字型の注視点を配置した。注視点が配置される場所、注視点の有無はランダムに決定される。経路点、目標、注視点とも運動開始前に与えられ、被験者は注視点がある場合には、注視点を見続けたまま経路点までリーチング運動を行わなければならない。腕が経路点に到達したと思ったら注視点から視線を移動してよいとした。

## 結果と考察

運動目標である経路点を注視するときと、運動目標以外を注視するときとに分けて結果を図 10 に示す。

運動目標以外を注視点するとき、経路点での腕の停留時間が大きくなる傾向がみられた。また経路点に到達後、目標を参照する眼球運動の起こる時刻が遅くなる傾向がみられた。経路点から目標に運動するのに要した時間はほぼ同じであった。

これらの傾向は、解像度の良い中心窩で運動目標と腕先位置を捉えることができなかったことで生じたと解釈することもできるが、以上の結果からだけではそのような結論を下すことはできない。また運動潜時が大きくなったことの原因についても不明である。

運動目標と注視しているときの視野角がどのように変わると運動に影響が生じるのか、より厳密な条件設定が必要である。また目標を注視することの重要性について明らかにするためには、さらに検討が必要である。

### 2. 5 繰り返し運動を行うとき

同じ運動を繰り返して行う際には、運動目標の位置や運動指令に対する身体の動きに関して短期記憶が形成されると考えられる。運動指令を毎度計画を行う必要がなくなり、運動指令がパターン化され運動に要する時間が短くなると考えられる。これに伴って眼球運動のタイミングにも変化が予想される。ここでは、運動の慣れによって、このような変化が生じるか検討する。

1 辺が 20 cm の正三角形の頂点に経路点をおいた場合（条件 A）と、各辺が 45、

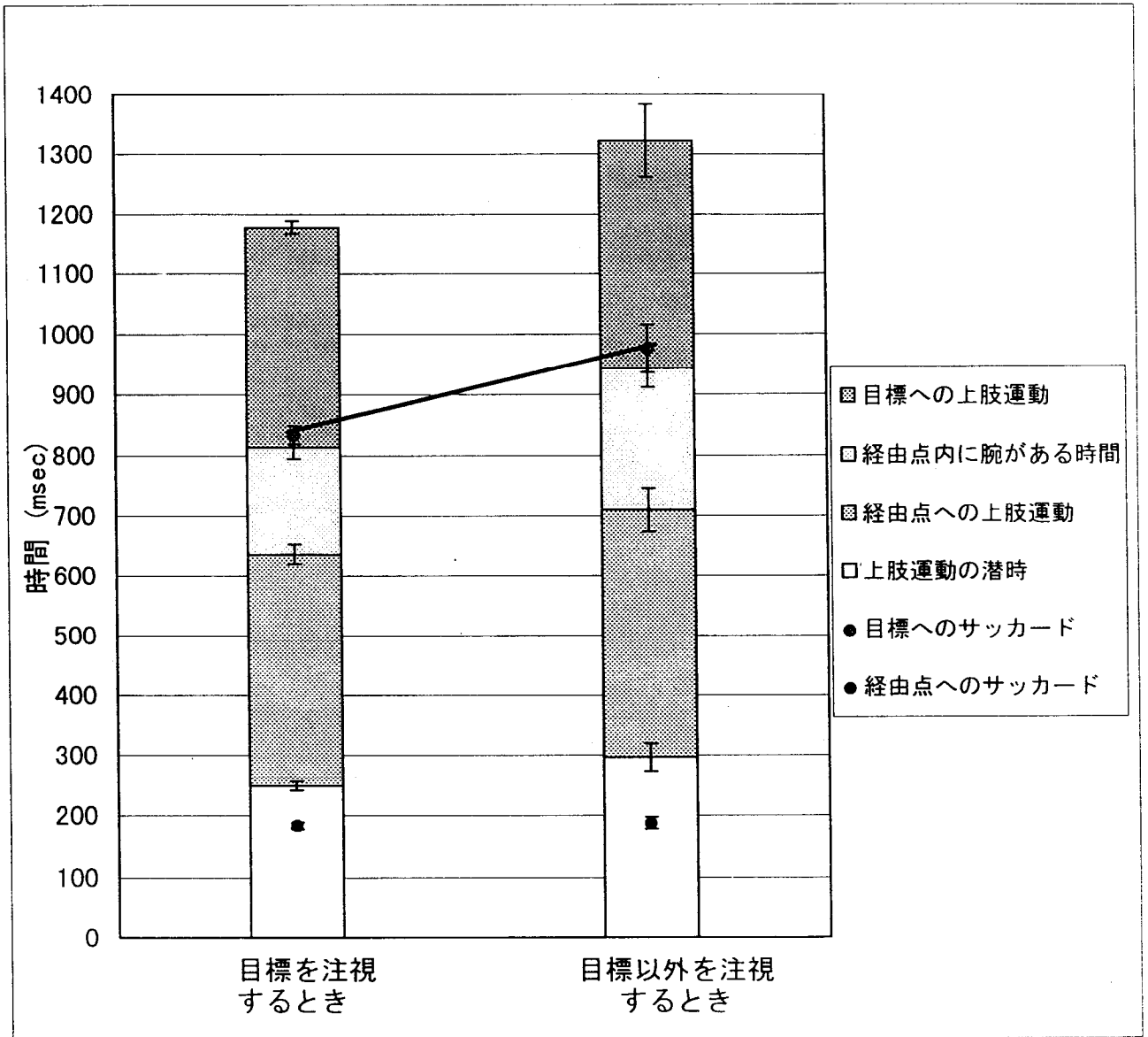


図10 目標注視の可否による影響  
経由点の大きさ 3cm  
目標の大きさ 3cm

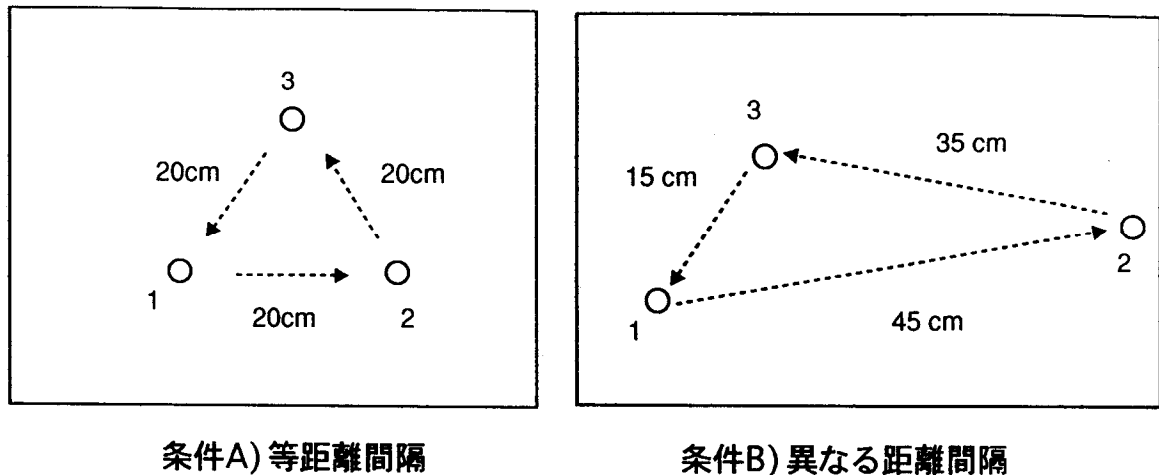


図11 3点の位置

35、15cmの三角形の頂点に経由点をおいた場合（条件B）の2条件について検討した。経由点の大きさは3cm、9cmとした。運動の方向は反時計回りで10回連続して運動するようにした。9試行を1セットとして3セットずつ行った。

#### 結果と考察

等距離間の点を運動する条件Aでは、3cmのとき、円内に到達し腕が次の軌道に移ってから約30msec後に次の目標を参照する眼球運動が起こっていた。9cmのときでは、次の運動に入る30～60msec前に次の目標を参照する眼球運動が起こっていた。回数を重ねても、眼球運動が生じるタイミングが極端に早くなったり、遅くなったりすることはなかった。

異なる距離の点を運動する条件Bでは、3cmのとき点3の位置に腕が到達し、点3から点1へ視線移動する眼球運動の起こる時間はほぼ同じか、やや眼球運動が遅れて起こるのに対し、点2ではこの遅れが点1、3に対してやや大きくなる傾向が見られた。9cmのとき、点3では点1へ向かう眼球運動が早く起こる傾向がやはり見られた。3cmのときに見られた点2での眼球運動発現の遅れはあまり顕著ではなかった。

点3から点1へは距離が短く、運動にかからないため、サッカー道間の時間を取れないため、眼球運動は早く起こる傾向にあるのではないかとと思われる。点

1 から点 2、点 2 から点 3 へは、2 点間の距離が大きいことから運動に要する時間が大きくなる。このため、眼球運動が遅れて起こっても、腕が目標に到達する前に待ちかまえていることができる。このことが腕が眼球運動に先行する理由ではないかと思われる。

3 cm、9 cm とも、眼球運動は周期的で、極端に遅れたり、早まったりすることはなかった。9 cm のときでは試行を重ねるにつれて、点 3 では速度を落とさなくなるような変化見られたが、前節で示した 1 軌道のときの眼球運動のように、眼球運動の発現が早まるような変化は見られなかった。眼球運動もパターン化されているのではないかと考えられるが、憶測の域を出ず、今後の検討が必要である。

## 2. 6 実験結果のまとめ

本章の実験で得られた結果をまとめる。

運動の初期の軌道計画は、目標を注視して正確な情報を獲得する必要はなく、周辺視で得られる情報に基づいていることがわかった。

経路点のあるリーチング運動で眼球運動のタイミングから、経路点が多いときは、実際はフィードフォワード制御で予測を利用して運動を行っていることがわかった。

視覚フィードバックには目標を中心視することが有意義であることがわかった。

リーチング運動では、腕の動きが先行しても、視線は常に腕の動きに先行してフィードバックのために目標で待ちかまえていることがわかった。

以上の結果から、次章で視覚情報参照機構を含んだ運動制御系について考察する。



### 第3章 考察

前章から得られた結果をもとに、視覚情報参照機構を含んだ運動制御系について考察する。

随意運動を行うためには目標の位置を把握しなければならない。実験では、運動開始前に目標位置情報を注視して獲得する条件と周辺視で獲得する条件を設定した。目標を注視する、しないに関わらず、運動に差がみられなかったことは、運動計画をたてるうえで、はっきりとした情報が獲得されてから運動計画を始めるのではなく、目標のある方向やだいたいの位置といった大まかなレベルで弾道運動の計画をたてていると考えられる。そして運動開始後、目標を中心視して捉えることで修正運動に必要な情報を獲得して運動制御に反映していると考えられる。経路点がある時のリーチング運動の実験で、周辺視での運動計画は運動に並列に行うことができることも明らかになった。

腕先の位置を視覚フィードバックできない状況でも、運動目標を注視することによって、正しく到達運動ができることが報告されている<sup>10)</sup>。このことは運動制御において目標と腕先の位置を画像として得るだけでなく、目標を注視することが重要であることを示唆している。運動目標を注視することで、運動制御に眼筋からの情報を利用することができると考えられる。以上のことは、視覚フィードバックといっても運動の段階によって性質が異なり、その利用の仕方も異なることを示唆する。

経路点のあるリーチング運動では、目標点を参照する眼球運動が起こるのは、目標点の提示される時刻に関わらず経路点への運動が終了してから（あるいは、到達するであろうという予測がたってから）であった。このことは、先に述べたように、運動中に運動計画をたてることができるために、わざわざ時間がかかる眼球運動を行ってまで前もって位置確認する必要はない、つまり現在の運動の修正運動に必要な情報収集に重点を置き、次の運動に必要な情報は後で必要になり次第補おうとする視覚情報参照の戦略が現れているものと考えられる。

経路点を通過点とみなして1軌道として運動する課題を与えたとき（実験2. 4. 3）、経路点が大きいときは視覚フィードバックなしで弾道運動を行っても、経路

点を経由するという課題は達成されるような状況であった。つまり、経由点をわざわざ見に行かなくても良さそうなのに、被験者は運動開始後経由点を確認してから目標点に視線を移す振る舞いを見せた。このような振る舞いは一様な視覚フィードバックをするロボットビジョンでは説明できず、人間（動物）特有の振る舞いであるように思われ興味深い。この振る舞いの理由として、運動開始前に位置がわかっても、それを確かな記憶として内部モデルに持っておらず、運動開始後に確認し直している、事前に計画した軌道が課題を満足していることを確かめて、内部モデルの信頼度を向上させている、などが考えられる。

運動を行う際には、同じ運動を何度も練習することによってスキルの向上が見られる。このとき運動の上達に従って、視覚情報参照にも変化が現れるのではないかと考えられる。実験で連続した運動について検討したが、スキルの向上に伴う眼球運動の変化は明確でなかった。目標を参照しない運動も変化として現れたが、ごくまれであった。眼球運動を伴わない運動はどのようなときであろうか。記憶を参照して運動するときであろうか、上肢の運動に眼球運動が間に合わなかったときであろうか。今回の課題の設定が各点に正確に到達すること、であったので上記の運動が現れなかった可能性がある。今後更なる検討が必要である。

また、プリズムメガネを付けたとき、今までの経験則が使えなくなり、新しい環境に適応しようとする作用が働く。このとき視覚情報参照にもなんらかの変化が見られるのではないだろうか。適応と視覚情報参照の変化についても検討してみたい。

## 第4章 おわりに

運動制御における視覚情報参照機構解明のために実験的検討を行った。本研究では運動中の視覚情報参照の時間的側面に特に着目して実験を行った。

本研究の結果、主に次の三つのことが明らかになった。まず第一に、運動初期の軌道計画は周辺視による情報に基づいて行っており、運動開始後に対象を注視することで運動を修正していることがわかった。第二に、経路点を伴う運動の実験結果から、経路点が大きいときほど目標点を参照する眼球運動の起こるタイミングは早くなり、眼球運動の潜時を考慮すると、視覚フィードバックが可能な条件でも実際はフィードフォワード制御を行っていることがわかった。第三に、到達運動では目標を眼で捉えることよりも、目標を中心視すること自体が重要であることがわかった。

これらの結果は、視覚的到達運動においては、運動の各段階において異なる視覚情報が組み合わされて利用されていることを示唆するものである。

以上の結果、視覚的到達運動のメカニズムの解明に向けて1つの手がかりが得られたと思われる。

今後運動と視覚がうまく結びついたモデルが提案され、さらに脳機能について研究が進むことを期待したい。そして複雑な脳機能の全貌が解明されることを期待したい。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、手厚く御指導頂きました阪口 豊助教授に厚く御礼申し上げます。また、助言を頂いたヒューマンインターフェース学講座の出澤 正徳教授、助手の施 衛富さんに感謝いたします。同講座の学生の皆様にも感謝いたします。

## 参考文献

- 1) T.Flash and N.Hogan: "The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model", *J.Neurosci.*, **5**, 1688-1703, 1985.
- 2) Y.Uno, M.Kawato and R.Suzuki: "Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement - minimum torque-change model-", *Biol.Cybern.*, **61**, 89-101, 1989.
- 3) M.Kawato: "Optimization and learning in neural networks for formation and control of coordinated movement", In D.Meyer and S.Kornblum, Eds., *Attention and Performance XIV*, 821-849, MIT Press, 1993.
- 4) 川人: "神経回路と運動制御", ニューロコンピューティングの基礎理論, 6章, 177-234, 海文堂出版, 1991.
- 5) 伊藤, 伊藤: 生体とロボットにおける運動制御, 計測自動制御学会, 1991.
- 6) 川人, 佐々木, 三嶋, 丹治, 酒田, 藤田: 岩波講座認知科学4 運動, 岩波書店, 1994.
- 7) 今泉: "運動制御と視覚・自己受容感覚", 認知心理学1 知覚と運動, 9章, 217-247, 東京大学出版会, 1995.
- 8) 阪口, 中野: "「注意」を考慮した随意運動制御のモデル", 信学技報, NC93-141, 1994.
- 9) 阪口, 中野: "内部モデルの信頼度を考慮した学習運動系のモデル", 信学技報, NC92-121, 1993.

10) C.Prablanc and D.Pelisson: "Gaze Saccade Orienting and Hand Pointing are Locked to Their Goal by Quick Internal Loops", In M.Jeanerod, Eds., *Attention and Performance XIII*, 653-676, Lawrence Erlbaum Associates, 1990.