

平成 10 年度
修士論文

お手玉の運動制御メカニズムに関する研究

電気通信大学大学院 情報システム学研究科
情報ネットワーク学専攻
ヒューマンインターフェイス学講座

9751035 山近 慎二

指導教官

阪口 豊
栗田 泰市郎
福田 豊

平成 11 年 2 月 3 日提出

目次

1	はじめに	3
2	お手玉の運動制御	6
2.1	お手玉の運動特性	6
2.2	初心者と熟練者の違い	7
2.3	運動制御に必要な視覚情報	9
2.4	視覚にもとづく随意的制御	10
2.5	動きを感知する感覚神経	10
2.5.1	感覚の種類	10
2.5.2	お手玉の運動制御に関わる感覚器	12
3	実験	13
3.1	実験装置	13
3.2	実験1：お手玉をしているときの眼球運動	14
3.2.1	実験方法	14
3.2.2	実験結果	15
3.2.3	考察	19
3.3	実験2：お手玉をしているときの腕の動き	21
3.3.1	お手玉における到達運動	21
3.3.2	実験方法	23
3.3.3	実験結果	24
	玉を受け取る手の軌道計算	24
3.3.4	考察	24
	腕の軌道計算	24
	腕の運動軌跡	27
	腕の軌道修正	30
3.4	実験3：視覚情報の制限によるパフォーマンスへの影響	32

3.4.1	実験方法	32
3.4.2	実験結果	33
3.4.3	考察	37
3.5	実験 4 : 視覚情報の制限による玉の受取誤差への影響	38
3.5.1	実験方法	38
	実験条件	39
3.5.2	実験結果	39
	被験者 KM の結果	42
	被験者 KY の結果	47
3.5.3	考察	52
4	まとめ	53
4.1	実験のまとめ	53
4.2	お手玉における脳と感覚器の役割	54
4.3	お手玉の情報処理	57
A	玉の軌道データを曲線近似する方法	62
A.1	3 次関数による曲線近似	62
A.2	曲線近似の係数	63

第 1 章

はじめに

脳は外部に対して働きかけることができる手足という装置を持ち、それを素早く自在に操ることができる。しかし、視覚の補助なくしては精度の要求される運動を行うことは難しい。人間が感覚器を通じて外界から取り入れる情報の中でも、特に視覚情報は重要な役割を果たしており、日常的に行われている動作の多くには視覚情報が利用されている。自分の手先を目標に到達させる到達運動 (reaching movement) は、外界に働きかける運動の中でも基本的な動作であり、通常は視覚から得られた目標の位置情報をもとに目標までの軌道を決定している。また、目標に手を近づけたときの誤差を修正するために視覚情報が利用されている。これは視覚フィードバックと呼ばれ、正確な動作を行う上で必要である。

人間は外界情報の多くを視覚から得ているわけだが、脳はどのようにして視覚情報を利用し運動制御を行っているのだろうか？ 本研究では、運動制御における視覚情報の働きを解明するために、お手玉を例題として実験を行う。お手玉は手の数よりも多い玉を地面に落さないように次から次へと空中に投げ上げ・受け取るという運動だが、このような処理を限られた時間内に行わなければならない。したがって目的に応じた情報を、注意を用いて選択的に獲得・処理する必要がある。特にお手玉のように様々な制約を持つ運動の中では、選択的情報処理の特徴が顕著に現れるはずである。

人間は注意のメカニズムを用いて、目的に応じた適切な感覚情報のみを選択的に処理することにより、効率的に外界を理解していると考えられる [11]。このような感覚情報処理の特徴は、限られた時間の中で必要な運動指令を計算しなければならない運動制御の場面で特に有効に機能していると考えられる [12, 13]。

お手玉に限らず、飛んでくるボールを受け取るときボールに視線を向けるということが重要なのかという問題がある。特に、ボールの軌道で特定の部分を隠したときの受け取りパフォーマンスについて調べられている。Whiting らの研究によると、ボールの軌道を部分的に隠すことで受け取りのパフォーマンスに影響があることがわかっている [17, 18]。しかし、何人かの被験者では、ボールの軌道を 100 msec ほど見せるだけで、ボールを受け取

ることができたという。最近の研究で、ボールの軌道に見える部分が固定であるため、ボールの投げ方によって見える時間量と見えない時間量が異なる可能性があることを Sharp と Whiting が指摘している [19]。Sharp らの研究によると、ボールが投げられてから 650 msec ほどの見えでうまく受け取れるという。また McLeod らは、野球の野手が飛んでくるボールを受け取る時に、まず玉が投げ上げられてから 数 100 msec で前と後のどちらに進むべきか判断し、その後受け取るまで野手がボールを見上げたときの角度で受け取りの位置を微調節していることを示した [7]。これらの結果は、部分的なボールの軌道から得られる視覚情報にボールを受け取る時に必要な情報が含まれていることを表している。最近ではこのような catching skill の研究成果を、juggling などより複雑な運動の研究に応用しようとする試みがある。このことについては、2章で詳しく説明する。

運動制御メカニズムの研究では、多関節腕の視覚到達運動などを例として随意運動制御を扱うことが多い。到達運動、物を手でつかむための把握運動といった運動は誰にでもできる反面、他の様々な要因が影響している可能性があるため運動課題自体を単純化することが多い。そのため、その課題自体を説明することはできても、複雑な運動や課題が合わさった場合にも同じ考えを適応できるとは考えにくい。

このような問題意識にもとづき、運動制御においてどのように視覚情報が獲得され、利用されているのかを明らかにするため、まずお手玉を実行している被験者の振舞いを調べた。お手玉では、玉を投げる・玉を見る・玉を受け取る・玉を受け渡すといった動作のいくつかを同時に行わなければならない。つまり、複数の運動スキルや感覚器が協調し並列的に働かせ、実時間内に処理を行わなければならないため、その個々の動きや内部処理がどのように行われているかということは大変興味深い。そこで、お手玉というスキルがどのような特徴を持っているか調べるために、まず実験 1 ではお手玉をしている被験者の眼球運動を計測した。

お手玉という運動の見方を変えると、玉の頂点軌道から視覚情報を獲得し玉の落下位置を予測を行い、そして予測した落下位置に対して手先を移動させるという到達運動であるとみなすこともできる。通常、到達運動は視覚で目標位置を確認してから行う運動であるが、お手玉の場合は感覚器から得られた情報から玉が落下する位置を計算し、その予測落下位置に対して到達運動を行う。実験 2 では、玉を受け取る手の軌道が視覚情報によってどのように修正されているか調べるために、手の位置計測を行った。

実験 1, 2 の結果から、投げ上げられる玉に対してサッカードという眼球運動が起こり注目する対象を次々と変更していること、またその眼球運動はある一定の時刻に生じているわけではなく状況に応じた視覚情報の獲得が行われており、その情報をもとに玉を受け取る手の軌道を微妙に修正していることがわかった。

なお、実験 1, 2 は別々の章で構成されているが、実験は玉の動き計測・眼球運動計測・

腕の位置計測，この3つの計測を同時に行った．実験の説明，考察等の事情から2つの章に分けているが，これらの実験結果は同時に記録したものである．

次に実験3, 4では，視覚情報を制限することによりどのような影響がでるかを調べる実験を行った．具体的には，実験3では玉の軌道を部分的に見えなくすることにより，運動制御に必要な箇所が軌道のどのあたりなのかを調べるのが目的である．実験4では玉を受け取るときの誤差に注目して，視覚情報の制限により誤差がどのように変化するか調べた．

これらの実験から，視覚情報の部分的な制限は軌道のどの部分を制限してもパフォーマンスを低下させるが制限する場所にはあまり差がないことから，一定の軌道部分から必要な視覚情報を得ているわけではないこと，玉の動きから得られる奥行き情報が玉を受け取るときの軌道を修正させるのに重要な役割を果たしていることがわかった．お手玉の運動制御を行う上で用いられる情報は複数存在するが，これらのうち1つだけが常に使用されているわけではない．状況に応じて複数の情報を取捨選択し運動制御を行っているのである．本研究で行った実験の成果は，視覚が関与する運動制御のメカニズム解明に役立つと考えている．

第 2 章

お手玉の運動制御

2.1 お手玉の運動特性

お手玉という遊びは紀元前の時代から行われていたようで、およそ紀元前 1994 年から 1781 年まで続いた古代エジプト中王国時代の墓に描かれているものが最古のものだと言われている。日本で一般に「お手玉」と呼ばれているものは juggling の技の一つでシャワー (shower) という名前がある。juggling の最も一般的な技は カスケード (cascade) という 8 の字を描くようなパターンである (図 2.1)。juggling の技でも一番簡単なものは cascade で、個人差はあるが数 10 分ほどの練習で数回できるようになる初心者もいる。

お手玉や juggling のような運動は一般に “ball skill” と呼ばれ、手の数よりも多い玉を空中に投げて、受け取り、投げるという動作の繰り返しである。これらの動作には正確な投げ上げと視覚による受け手の微妙な位置調整が重要であり、これら技術の習得には長い学習時間を必要とするが、野球などの ball skill の経験がある場合は上達が早いと言われている。おそらく投球や捕球の動作によりお手玉に必要な投げ上げの安定性や玉と重力との関係についてあらかじめ学習がされているからなのだろう。

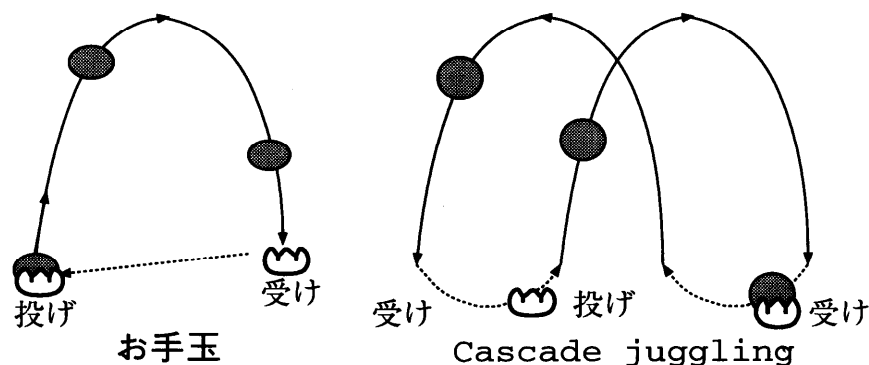


図 2.1: お手玉と Cascade juggling の軌道

お手玉を練習し始めた初心者をよく観察してみると、その学習過程はかならずしも同じであるとは限らないことに気づく。初心者には人それぞれの学習アプローチがあり、ある程度上達するまでは個人差のある運動安定戦略が用いられている。大きく二つに分けると、玉を高く投げ上げて時間を稼いでその間の動作を間に合わせようとするタイプと、玉を低く投げて落下位置の誤差を少なくしてなるべく同じ動作で運動を継続させようとするタイプに分けられる。玉を高く投げると時間に余裕ができるが、放り投げる角度が2~3度違うだけでも落下位置は数10cmもの誤差になる。逆に玉を低く投げると、投げから受けまでの時間が短くなるので不正確な動作を行ったときの修正が困難になる。

2.2 初心者と熟練者の違い

お手玉を連続して行うには、正確な投げ上げ・玉の受け取り・一定の運動周期が大切である。初心者はこれらの事を素早く、そして確実に行うことを学習しなければならない。上級者はこれら3つの動作を確実に行うことができるため、様々な技でより多くの玉を操作することができるが、玉と手の動きの組合せにより実際に人間が行うことのできるパターンは限られている。Claude E. Shannon が定式化した juggling 方程式は、玉と手の運動の関係を簡潔に表している [5]。

$$\frac{t_b}{t_h} = \frac{N}{H}$$

t_b は玉の1サイクル時間、 t_h は手の1サイクル時間を表している。この式は玉と手の1サイクル時間の比が、玉の数 (N) と手の数 (H) の比と同じであることを意味しており、この式から実際に実行可能なパターンを導き出すことができる。手が玉を持っている平均時間を t_l 、手が玉を持っていない平均時間を t_u 、玉が空中にある平均時間を t_f とすると t_b, t_h は次のように表せる。

$$t_h = t_l + t_u$$

$$t_b = t_l + t_f$$

juggling 方程式さえ満たしていれば、玉を持っている時間と持っていない時間のある程度は変化させることができる。手が玉を持っている時間が長ければ、手が何も持っていない時間と玉が空中にある時間を稼げさえすれば、運動を継続させることは可能である。しかし、いつ玉を投げる・受け取るかということは非常に重要で、特に初心者のうちは一定のタイミングで動作を行うことが大切である。

Beek らは一定の運動周期を保つ上で重要なタイミングに着目し, cascade juggling に対する上達の目安として次のような指標を用いている.

$$k \equiv \frac{t_l}{t_l + t_u}$$

k は 1 周期のうち手が玉を持ち運んでいる時間の割合を意味している. 通常, 初心者は k が 0.75 よりも大きい, 上達するためには, まず, $k = 0.75$ になるように訓練を続ける必要がある. 実際, 熟練者が三つの玉を使って juggling をするときには, k の値は, 0.75, もしくはそれよりも若干小さい値に保たれている. このことから, cascade juggling では運動のタイミングが重要な役割を果たしていることがわかる [1].

また Beek らは, 初心者が 3 ball cascade juggling を学習していく過程を 3 段階に分けた [2]. 学習の第 1 段階では, 運動を安定させるために手の動きと玉の動きがうまく同調するタイミングを探索している段階で, 次の 2 段階では手と玉の動きが同調しはじめ, 1 サイクル中の玉を運ぶ割合が 0.75 に近づき, 3 段階では k の値が 0.75 に固定されはじめ上達の早い者は 0.75 以下の値を示すようになる. しかし, 一定の k 値でしか juggling を行えないというわけではなく, 熟練者になると自分の意志で k の値を変えることができるようになる. 3 段階に見られる k の値を低くするということは, 玉が手の中にある時間が少なくなることを意味し, 4, 5 ball juggling に移行するときに必要な条件でもある.

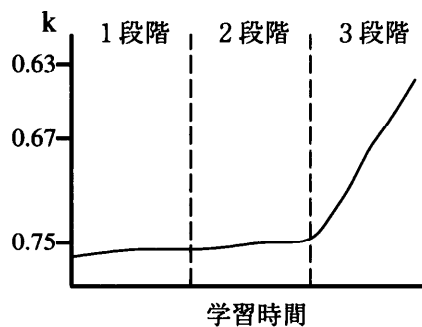


図 2.2: cascade juggling の 3 段階学習 (Beek, 1992)

2.3 運動制御に必要な視覚情報

お手玉を含め、ほとんどの運動では熟練するほど動作全体に余裕ができる。例えば、中級者の juggler はボール以外の物に視線を合わせたままでも 3 ball cascade を行うことができる。初級者・中級者の juggler は視覚に頼りがちだが、上級者の juggler は手の触覚に頼るようになり、更に極めて熟練すると数分間目隠しした状態でもボールを落すことはないという。

最終的には視覚情報は必要ないわけだが、視覚は学習を含め正確な運動を行う上で不可欠であることはいうまでもない。多くの juggler は、視覚情報を制御のために利用しているだろうし、目隠ししてもできる熟練者であっても通常は視覚を玉のモニタ的な役割として使っているはずである。それでは、玉の軌道から得られる視覚情報のうち重要な部分はどこなのだろうか？

Santvoord と Beek は、3 ball cascade をしている被験者に対し液晶シャッター眼鏡をかけさせて視覚情報を制限し、手の動きとボールの見えとの関係を調べる実験を行った [15]。液晶シャッター眼鏡は、340 msec の間隔で閉じたり開いたりし、初期状態として開いている時間を 200 msec 閉じている時間を 140 msec に設定し、液晶が開いている時間をどんどん短くしていった (図 2.3)。その結果、ボールの頂点を液晶が開いている時間に同調させるような傾向があった。また、液晶の開いている時間が平均 87 msec (標準偏差 49 msec) だけで続けることができたと報告している。ただ、液晶が開いている時間にボールの頂点をもっていくことができたのは3人の被験者中1名だけであり、他の2名はうまく玉の頂点を開いている時間にもっていくよう調整することはできなかった。このことは、被験者の熟練度によって juggling の運動制御戦略が異なっていることを意味しているのではないだろうか？ したがって、実験を行う上で被験者のスキルに対する熟練度を考慮する必要がある。

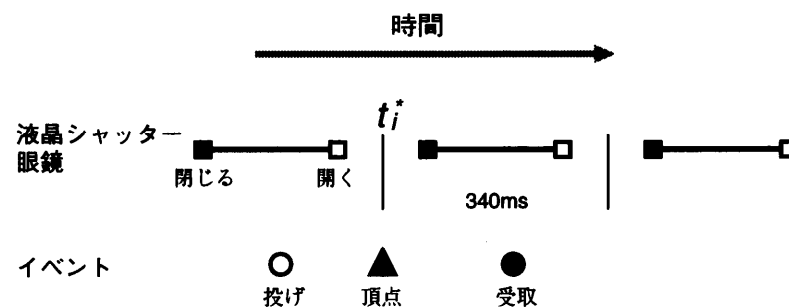


図 2.3: 手の動きとボールの見えとの関係 (Santvoord & Beek, 1994). 白と黒の四角が液晶シャッターの開いている状態と閉じている状態に対応している。 t_i^* は液晶が開いている時間の中心を表しており、ボールの頂点がある中心にくるように投げと受けのイベントが起こっている。

2.5.2 お手玉の運動制御に関わる感覚器

お手玉に必要な感覚器は、主に視覚・触覚・深部感覚の3つであるといえる。その中でも、視覚は運動制御のみならず、学習においても非常に重要な役割を果たしていることはいうまでもない。触覚や深部感覚は、お手玉が上達するにしたがって徐々に重要性が増すといわれているが、おそらく視覚を通じて学習していくうちに体性感覚が磨かれていくのだろう。

もちろん、体全体の姿勢制御には平衡感覚が役立っているし、お手玉の繰り返し動作をリズムカルに行うための調整や学習には意外にも聴覚から得られるタイミング情報が働いているという。タイミングがお手玉の学習に重要な意味を持っている例としては、初心者がお手玉のリズムを覚えるのにメトロノームなどを利用することがあげられる。Beekの実験[1]が示すように、初心者がまず覚えなければならないのは投げや受け取りの動作のタイミングである。これらの動作を一定の間隔で行うことができるようになるためにタイミングの指標が大切なのだろう。

お手玉に限らず大抵の運動スキルの学習・実行には、一つの感覚器だけが主に働いているのではなく、複数の感覚器から得られる様々な情報を選択・統合して運動が行われている。しかし、感覚器から得られる情報だけで常に複数の玉を時々刻々監視し、制御を行うことは難しい。通常の間人が扱える玉の数よりも多くの玉を実時間内に制御しなければならないため、感覚器から得られる情報も十分であるとはいえない。玉がどこにあり、どのように動くのかといったことは予測のもとに行われている可能性が高いのである。お手玉が上手になるというのは単に腕の動きが正確になるだけではなく、このような予測を行うために脳の中に内部モデルが形成される必要がある。つまり、お手玉のような時間的制約のある運動を行うにはその限られた時間内に目的の玉から感覚器を通して情報を獲得し、その後は内部モデルも用いて玉の動きを予測しなければならない。

そこで、本研究では特に視覚に注目して、視覚と運動制御との関わりについてお手玉を例題として実験を行う。

第 3 章

実験

3.1 実験装置

実験で使用した計測装置の配置を図 3.1 に示す。なお装置は、玉の軌道計測装置、腕の位置計測装置、玉の受け取り誤差計測装置の 3 種類から構成されており各実験ではこれらの装置をすべて使用して計測を行った。図にはないが、眼球運動を計測する装置として眼電位を計測し生体アンプで増幅させる眼球運動計測装置がある。これらの装置の詳しい説明はそれぞれの実験の節で説明してある。



図 3.1: 実験装置の構成

3.2 実験 1：お手玉をしているときの眼球運動

人が物を見ているとき、目を観察してみると意外に眼球はよく動いていることがわかる。人間の周辺視野は横方向で $180^{\circ} \sim 210^{\circ}$ の広がりをもつが、網膜のうち感度が高く細部までよく見える部分は視角にして $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ ほどで中心窩と呼ばれている。したがって、この部分で物を見るために眼球運動 (eye movement) が生じているのである。様々な眼球運動のうち、情報の獲得に重要なものはサッカードと呼ばれている。

お手玉をしているときの被験者を観察すると、玉の動きに対して視線が左右に動いていることがわかる。このような眼球運動はお手玉の熟練度に関係なく共通にみられるが、被験者自身は左右の眼球運動を行っているという自覚は少ないようで、どちらかという玉の頂点付近を見つめているという意見のほうが多い。

また手の動きを観察してみると、玉を投げる側の手はある程度同じ動作の繰り返しであるのに対し、玉を受け取る側の手は投げ上げ時の微妙な誤差から生ずる落下位置のずれを修正するため、毎回受け取る位置が異なっている。これは頂点付近から得られる視覚情報が、玉を受け取るという運動制御に重要な役割を果たしている可能性が高く、そのときの眼球運動から視覚情報獲得のメカニズムが推測できるのではないかと考えられる。

しかし、注視点はどこに視線を向けているか、どこに注目しているかということを示しはするが、注視箇所や対象のどの範囲までが認知されているのかは示しはしない。また、注視点を移動させなくても注意を移動させることができるため、視線を向けている対象がそのまま注意の対象になっているとは言い切れない。それでも、どこに視線を向けているかということ調べることで、いつ・どこを・どのようにして対象から視覚情報を得ているかなどといった手がかりにはなる。眼が玉の軌道のどの部分から選択的に視覚情報を得ているか調べるために、お手玉をしている被験者の眼球運動と玉の動きを時間的に同期させて計測を行った。

3.2.1 実験方法

人間の眼球は角膜側が網膜側に対して正の電位を持っている。その電位差は mV 単位で計測可能であり眼球が動くことで電位は変化するので、これを計測することにより眼球運動を記録することができる。この電位を皮膚表面電極によって計測する方法は EOG 法 (Electro oculography) と呼ばれている。眼球運動の測定には、この EOG 法を用いてサンプリング周波数 300 Hz で、被験者の利き目に対して上下左右の動きを計測した。ただし、頭は固定されておらず、眼球計測時におけるドリフトの影響が大きいため、計測データ上で動きの激しいサッカードのみ検出を行うことにした。

ただ単に被験者の眼球運動を計測するだけでは、視線の動きが持つ意味を十分に引き出

することはできない。個々の眼球運動から視覚情報獲得のメカニズムを推測するには、玉の動きも計測する必要がある。そこで玉の動きを計測するため、被験者の正面からビデオカメラ (NTSC 30 Hz) で撮影し、その画像を画像処理ボードを経由して PC で玉の位置を検出することで玉の動きの計測を行った。

これらの計測は別々の装置を用いて記録を行うが、データの時間軸を一致させるには時間的同期を取る必要がある。2 台の計測装置の計測開始時間を同じにするため、開始時に片方の装置に開始信号を送るようにした (図 3.2)。

被験者に 3 個の玉でお手玉をしてもらうように指示し、約 2 分間計測を行った。

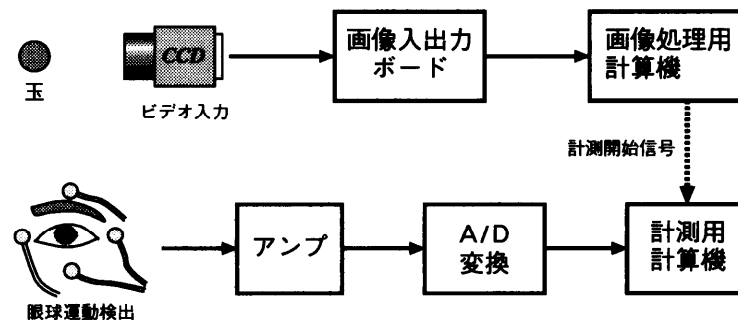


図 3.2: 実験装置の構成

3.2.2 実験結果

計測したデータの中で、なんらかの原因でデータが壊れているものやお手玉をしていない部分は取り除き、お手玉が開始されてから中断されるまでのデータを抽出した。まず、説明のために眼球運動の一部を玉の軌道とともに図 3.3 に示す。上の部分は被験者の利き目の眼球運動で図の上方向が右側に視線があることを意味し、下方向が左側に視線を向けていることを示している。図の下の方は玉の高さを計測したもので、眼球運動とともに横軸は時間の経過を表している。

この実験の前に、3 個の場合と比較を行うために 2 個の玉でお手玉をしている時の眼球運動を記録した。2 個の場合では玉を投げ上げて目の前を玉が通過するのに対し、玉の軌道を追うような右から左への追従眼球運動 (pursuit movement) のような運動が生じ、その後に視線を右側にもどすサッカードが起こっていた。

玉が 3 個の場合は、2 個とは異なる眼球運動が観察された。3 個の玉でお手玉を行ったときの眼球運動を図 3.4 に示す。

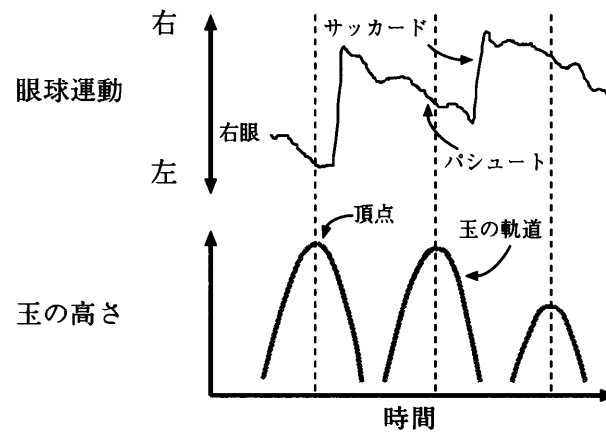


図 3.3: お手玉をしているときの眼球運動

玉が2個では1回の投げで必ず視線を右側の位置に戻す復帰動作(サッカード)が生じていたのに対し, 3個では2回以上の投げに1回のサッカードという眼球運動であった. 何らかの理由で視線を戻すことが省略されたか, あるいは特定の条件が満たされたときは視線は戻さないほうがよいということを経験的に習得しているのかもしれない.

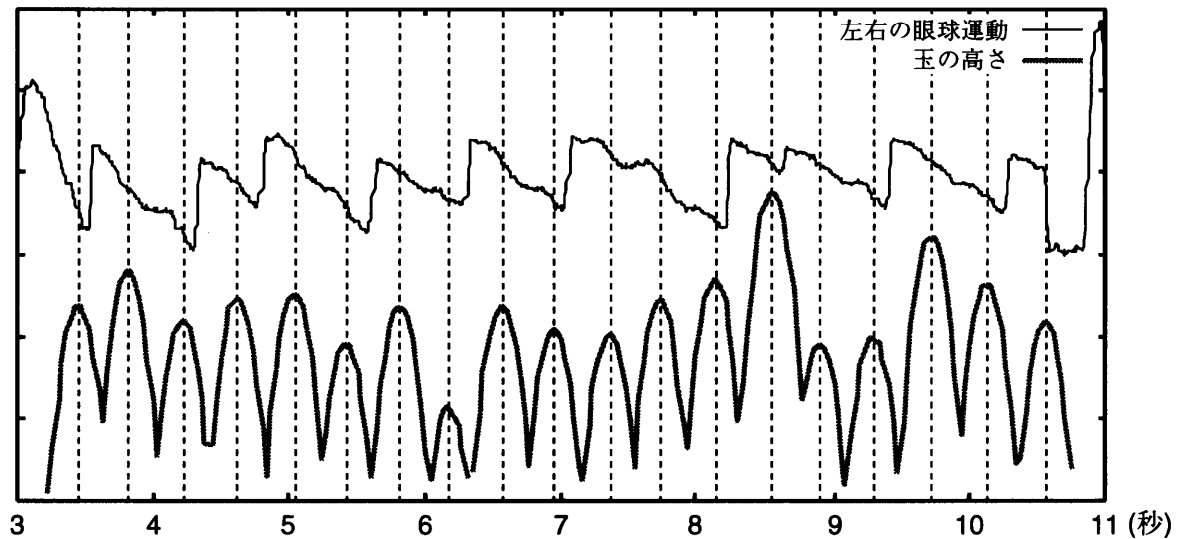


図 3.4: お手玉が3個のときの眼球運動

またサッカードが起こっている時刻も同じではなく、毎回微妙に異なっている。玉の頂点を基準にしてサッカードが起きている時刻のヒストグラムをとってみると、玉が頂点にさしかかった時と頂点より前、頂点よりも後にサッカードが起きていることがわかった。なお、サッカードが起こった時刻は視線計測した眼球運動のデータが急激に変化し始める直前とした(図 3.5)。玉の計測は 30 Hz で行っているのに対し、眼球運動は 300 Hz で記録しているため、両者のサンプリング周波数の違いが 10 倍にもなってしまう。そこで、頂点からサッカードが起こっている時刻を計算する際に、玉の計測データから中間の値を補間する形で頂点時刻を推定した。付録 A にその方法を示す。

被験者 KM のヒストグラムを図 3.6 に、被験者 KY のヒストグラムを図 3.7 に示す。ヒストグラムの幅は 20 msec で、サッカードの起こらなかったデータは取り除いた。

図の縦軸はサッカードの起こった回数を、横軸は玉の軌道の頂点を基準としてサッカードが起こった時刻を表している。時刻 0 は玉の頂点であり、例えば、200 msec というのは、頂点から 200 msec 後にサッカードが起こったことを示している。ただ、この図は玉の頂点を基準としているため、頂点よりも前の時刻を遡れば前回の頂点後の時刻に戻ってくことに注意しなければならない。玉が投げられてから受け取るまでの時間は軌道の高さにより大きく変動するが、およそ 800 msec である。

サッカードが起こっている時刻は、被験者 KM が頂点付近が最も多い。しかし、被験者 KY では頂点を過ぎた 100~200 msec が最も多く、そして頂点付近が 2 番目に多いという結果であった。サッカード発生時刻は軌道の全体にばらついているものの、被験者 2 名共に頂点付近に集中している。またヒストグラムを細かく見てみると、サッカードが起こりやすい時刻は、-180, 10, 150 msec の 3 つに集中して山があることがわかる。

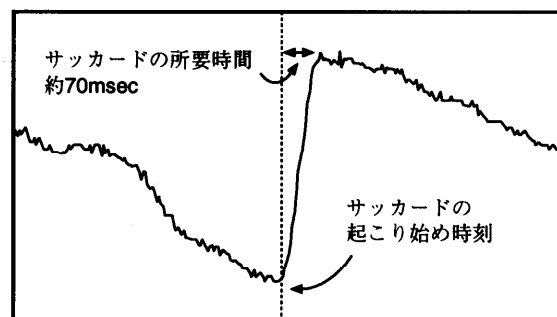


図 3.5: サッカードの起こり始め時刻

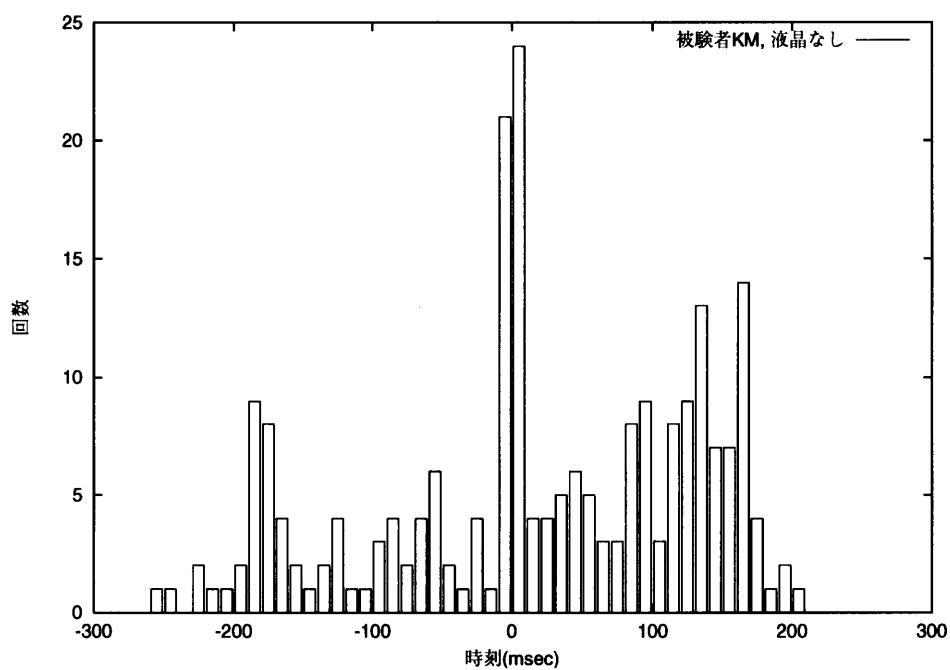


図 3.6: 被験者 KM のサッカードが起こった時刻

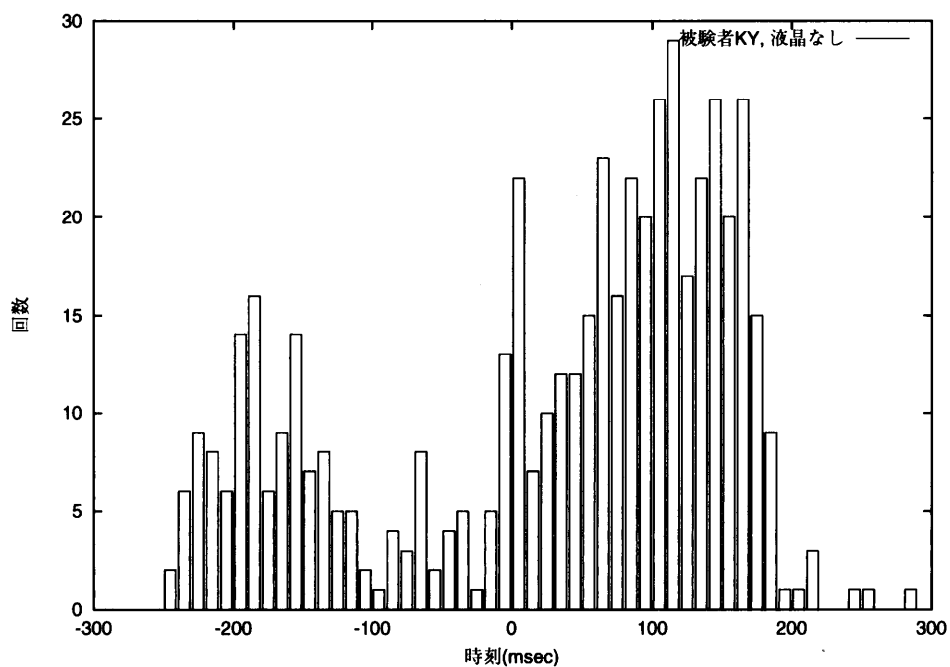


図 3.7: 被験者 KY のサッカードが起こった時刻

3.2.3 考察

玉が2個の場合、玉が右から左に動く動作に対して視線も右から左に動くパシュートのような眼球運動が起こり、そして次に投げられる玉に対して視線を向ける左から右へのサッカードが起こる。この一連の動作は1回の投げごとに起こっているが、2個の玉では視線を他のものに向けても難なくお手玉を行うことができることから、この場合の眼球運動は玉を落さないよう動作を正確に行うため玉をモニタしているという意味のほうが強いだろう。到達運動などでも、目標をよく注視したほうがしないよりも誤差が少なくなることが知られている。被験者自身がなるべく玉を落さないようにしようという意志が無意識のうち働いたため、運動に正確さを要求するようなタスクと同じような状況になり、1回の投げごとに視線が戻る眼球運動が生じているのではないだろうか？逆に、2個お手玉の最中に別のタスクを行う条件では、別の眼球運動が生じる可能性が高い。

玉が3個の条件では、サッカードで視線が右側に戻るときと戻らないときがあることがわかったが、これは何を意味しているのだろうか？通常、サッカードが起こるときというのは注目する対象を変更することが目的であり、お手玉をしている場合では次に投げ上げられる玉に注目するためにサッカードが起こっていると考えられる。しかし、サッカードした直後の視線にはまだ次の玉は現れていないことが多い。つまり通常は、投げ上げられる次の玉が視野に現れる前にサッカードで視線を右に戻しておいて、次の玉を中心窩で捕らえるために、あらかじめ玉が出現すると予測される所で視線が待機していると思われる(図3.8.a)。

サッカードが起こる時刻には大きく分けて3つに集中していることは3.2.2節で説明したが、3つとも同じ理由でサッカードが生じているとはとても考えにくい。頂点と、頂点から200 msec後のサッカードは確かに次の玉に備えるためであるが、頂点より-180 msecあたりで起こるサッカードには当てはまらない。なぜなら、サッカード潜時(約200 msec)を考慮して視線を右に戻す命令が出された時刻を推定すると、玉が投げ上げられた直後にサッカードが起こっていることになるからである。したがって頂点よりも前に起こるサッカードは、次の玉に備えるため視線を移動して待機しておくのではなく、なんらかの理由で前回の投げ上げで視線を右に戻せない状態であったため、次に投げ上げられた玉を直に見にいこうとしてサッカードが起きているのではないだろうか(図3.8.b)。そして、視線を右に戻せない状態として考えられるのは、玉の投げ上げが不安定で十分に玉を見る必要があったため、視覚情報の獲得に時間がかかり視線を右に戻せなかった、ということである。

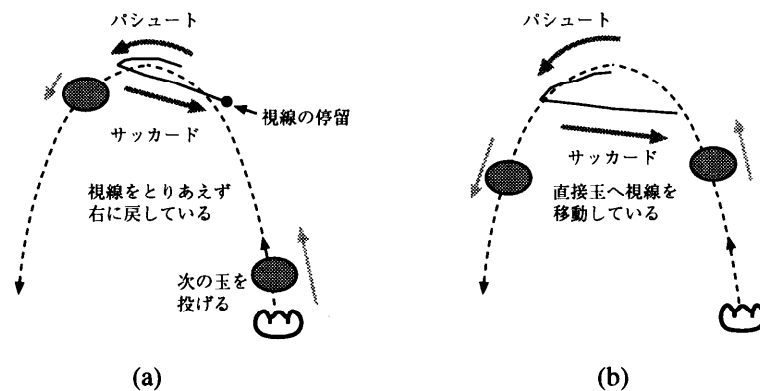


図 3.8: (a) 玉が頂点を過ぎた時刻にサッカードが起こり、次に上がってくる玉に備えるため視線が停留している。 (b) 玉が頂点に到達する前にサッカードが起こっており、玉に視線を合わせるような眼球運動が生じている。

視線を右に戻すサッカードの時刻は玉の軌道に対して3つの山に集中していた。これは逆の見方をするとサッカードが起こりにくい箇所があるということである。それは、頂点を基準にして $-100 \sim 0$ msec の区間であり、この部分ではなるべくサッカードをおこさないようにしようとする戦略が働いている可能性がある。なぜならサッカード中にはサッカード抑制と呼ばれている現象が起こるからで、このときの高速な眼球運動時に生ずる流れるような不鮮明網膜像を知覚できないようにするためであるが、この間は視覚情報が得られなくなってしまう。抑制効果は一般に、実験課題によらずにサッカードの開始より 40 msec ほど前に始まり、サッカード開始直後から 30 msec 後の間に最大となりその後徐々に抑制から回復するといわれている。この抑制は、ほんの数100 msec の運動を制御する上で非常に大きなデメリットとなるため、最も重要性の高い視覚情報(玉の軌道)が得られる時刻にサッカードをおこさないようにする戦略が、お手玉を練習している過程で獲得されていると考えられる。

お手玉は同じような単純動作の繰り返しのように見えても、感覚器から得られた情報をもとに微妙な運動制御を行う高度なスキルのようなものである。しかし、眼球運動だけでは断言することはできず、次の実験2では視点を変えて体性感覚や玉を扱う腕の制御という観点から検討を行う。

3.3 実験 2 : お手玉をしているときの腕の動き

お手玉に限らず熟練するということは、同じ動作を何度でも再現することができるという意味でもある。お手玉の場合、玉を投げる手はある程度同じ動きであるが、玉の軌道は毎回微妙に異なり、玉を受け取る手の位置は最もばらつきが大きい。これはつまり、投げるときのほんのわずかな誤差が落下するときには大きな誤差となるわけであるが、この誤差を感覚器から得られる情報をもとに修正しなければならない。情報を得るのに必要な感覚器には視覚と体性感覚があり、視覚の場合には視覚情報が運動情報へと加工されなければならないが、これは視覚運動変換と呼ばれている。

また、玉を受け取る左手は単に受け取る動作だけを行ってわけではなく、受け取った玉を左手から右手に渡す動作も行っている。したがって、次に玉を受け取る動作の初期位置は玉を右に渡し終えた場所になる。そして、左手はその位置から落ちてくる玉を直接取りにいくのであり、一度ホームポジションに戻ってから玉を取りにいくのではない。これは、ホームポジションに戻す時間的余裕がないという理由もあるが、直接玉を取りにいくことで腕の軌道計画に必要な計算が1回ですむという利点もある。

3.3.1 お手玉における到達運動

人が水平平面内の2点間を結ぶ腕の運動は、場所にもよるが基本的には直線の軌道を描く。また、手先の接線方向の速度形状は運動の負荷や速度に依存せず、ピークが1つのベル型というほぼ一定の形であるといわれている(図 3.9)。

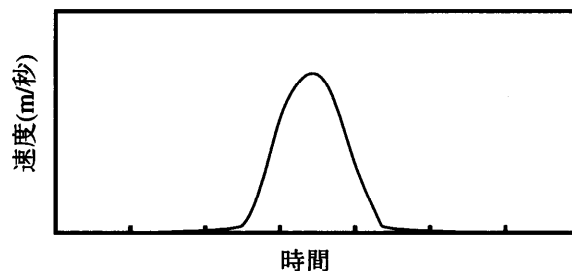


図 3.9: 2点間運動における接線方向の速度

腕を目標まで到達させるには、まず腕の軌道を計算しなければならないが、そのためにはいくつかの問題を解決する必要がある。まず最初に、視覚などにより位置がわかっている目標までの軌道を作業座標で決定しなくてはならない。次に、決定された軌道を筋肉の長さや関節角などの身体座標に変換するため、座標変換を行い、そして最後に、身体座標で表現された軌道で腕を動かすために必要なトルク・筋の張力などを制御しなければなら

ないのである。このように、手先を目標に到達させるという動作を行うときには複数の処理をしなければならず、それらの計算を行い実際に腕が動き始めるまでにはおよそ 300～400 msec ほどの時間がかかる。筋肉に指令が出されてから腕が動き出すまでには 100 msec ほどの時間がかかることを考えると、視覚情報が与えられてから運動指令が出力されるまでの時間はおよそ 200～300 msec であると言われている。

したがって、感覚器から得られた情報をもとに玉が落下する位置・時刻等を予測し、その位置に手先をもっていくように腕の軌道を決定して肩・肘・手の筋肉に指令を送り、あらかじめ予測した時刻に玉をつかむ動作を開始しなければならない。これらの処理には数 100 msec の時間がかかるが、これは玉が投げられて受け取るまでの時間の数割もかかることになる。また、筋肉に指令が出されてから実際に動き出すまでには 100 msec ほどかかるので、落ちてくる玉を受け取るために必要な情報はかなり以前に獲得していることになる。視覚情報が獲得されてから玉を受け取るまでに必要な時間を図 3.10 に示す。

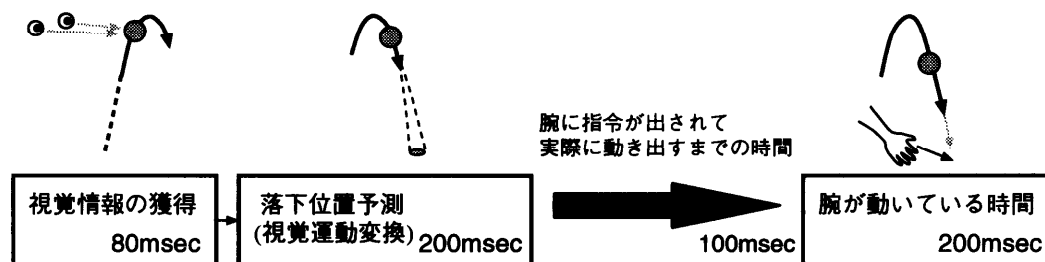


図 3.10: 玉を受け取る動作に必要な時間。視覚運動変換と腕が動いている時間との間 100 msec は、筋肉に指令を出して実際に腕が動き始めるまでの時間。

ただし、腕を制御するのに必要な情報がすべて視覚から得られているわけではないことに注意しなければならない。なぜなら、両目を閉じた状態でも方向や玉の初速度などを体性感覚から知ることができるからである。玉を投げる時点でどの位置に落下させるかという意志と、投げ上げた直後に体性感覚から得られる情報で推測される落下位置をもとにして手先の移動先をおおまかに決定しておき、視覚から得られる情報をもとにして、腕の移動前もしくは移動中に最終的な手の位置の微調整が行われていると考えられる。もし手の移動中に視覚運動変換による修正が行われているならば軌道の速度波形に何らかの影響があり、ベル型とは異なる形状の波形が観測されるはずである。

そして、手の移動中に修正が行われているか否かが明らかになれば、軌道のどの部分から主に視覚情報を得ているか、推測することができるのではないだろうか？ そこで実験 1 と同じく、玉の動きと同期させて受け手 (左手) の位置計測を行った。

3.3.2 実験方法

実験装置の構成を図 3.11 に示す。玉の位置計測には実験 1 で用いた画像処理ボードと PC で記録を行った。撮影方法などは実験 1 と全く同じである。腕の位置計測には浜松ホトニクス社のポジションセンサ C5949 を使用した。

この装置は、赤外 LED の点灯を検出することにより位置を計測しているが、LED 検出用カメラで被験者の頭上から LED を撮影しているため、LED を装着した場所は左手の手首のあたりで、玉を受け取った時に LED が真上を向くように張り付けてある (図 3.12)。なぜ手首に LED を装着したかという、玉によって隠されたり手首の捻りにより LED が別の方向を向くのを防ぐためである。玉を受け取る際や受け渡すときにやや手首が動くことがあるので、手首の LED では正確に手先の位置を計測できるわけではないし、計測結果が 2 次元データしか得られないが、おおまかな手の動きは知ることができる。

なお、計測時のサンプリング周波数は 300 Hz で、玉の動きと時間的に同期させて計測を行った。

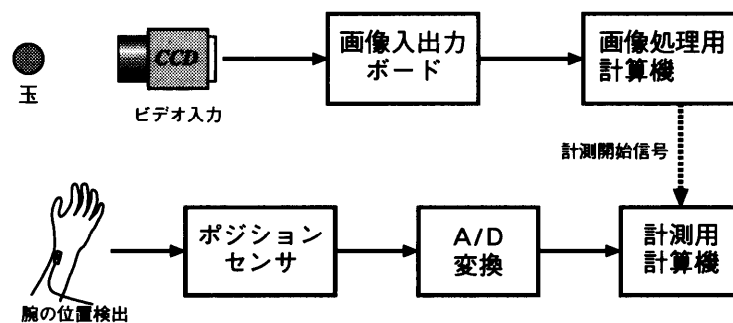


図 3.11: 実験装置の構成



図 3.12: 赤外線 LED の装着場所

3.3.3 実験結果

玉を受け取る手の軌道計算

被験者が右利きの場合，お手玉では右手で投げた玉を左手で受け取る．感覚器から玉に関する情報を受け取り，脳の中で玉が落下する予測位置の計算が行われ，そしてその計算をもとにして落下位置へ手先が移動するよう左手の筋肉に指令が出される．左手が玉を受け取ろうとして動きはじめるのは，実験1と同じように玉の頂点を基準とすると，頂点を玉が通過してから約100～180 msec ほどであることがわかった．被験者ごとの平均値と標準偏差を表 3.1 に，ヒストグラムを図 3.13, 3.14 に示す．

腕の動かしはじめ時刻は，サッカードの場合とは異なり被験者ごとに差がなかった．ただ，玉を投げる高さに応じて手の動きも調節しなければならないので，玉を高く投げれば落ちてくるまで時間があるため余裕をもって腕の動きを行うことができる．しかし，低く投げるとその分だけ早く手先を落下位置に移動する必要があるため，玉の高さによって左手が動きはじめた時刻はわずかながらばらついていた．

表 3.1: 左手が動きはじめた時刻 (msec)

被験者	平均値	標準偏差
KM	146	58
KY	165	63

3.3.4 考察

腕の軌道計算

図 3.13, 3.14 から，実験1で計測したサッカードの起こる時刻とは異なり，常に同じ時刻に集中して手が動きはじめていることがわかる．この理由は単純で，お手玉(シャワー)特有の運動パターンによる制約を受けるからである．つまり，なぜこの 100～180 msec よりも以前に手が動きはじめないのかというと，脳の内部で運動制御に必要な計算が終わっていないからではなく，単に左手に持っている玉を右手に渡す動作が終了していないからである．つまり，左手は玉を受け取るだけではなく，受け取った玉を右手に渡す動作も行わなければならないため，いくら玉が落下する位置がわかっているても他の動作が終了するまでは玉の受け取りを開始することはできない．したがって，脳では左手の動かしはじめよりも前に玉の落下位置が計算できている可能性もある．すると，左手の動かしはじめという

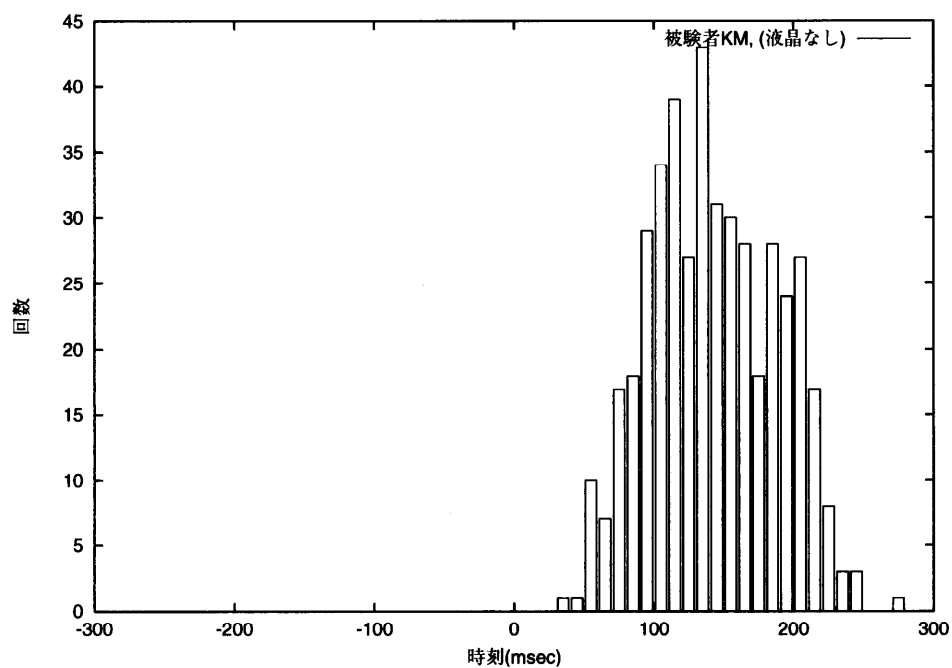


図 3.13: 被験者 KM の左手が動きはじめた時刻

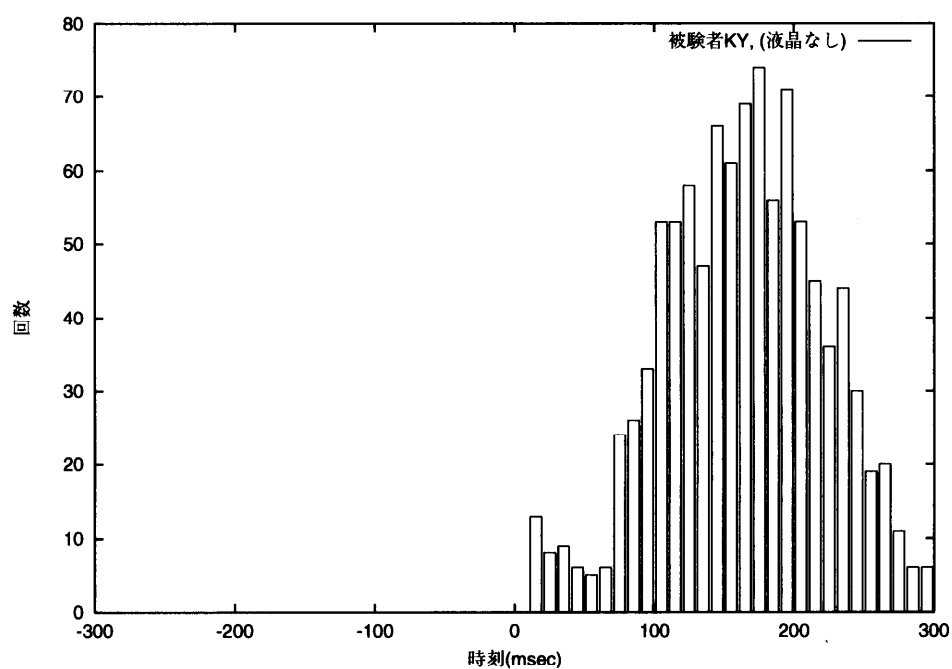


図 3.14: 被験者 KY の左手が動きはじめた時刻

イベントを、脳が玉の落下位置を予測し手の軌道計算を終えたときの目安とすることはできなくなる。

では、落ちてくる玉を受け取りにいく左手の軌道生成は、いつどのようにして計算されているのだろうか？ 玉を投げ上げる動作が機械のように正確であれば、玉を受け取る動作は毎回同じ動作を繰り返すだけよいが、それを行うのは極めて困難である。それでは腕の軌道はいつ計算されているのだろう。可能性としては次の2つが考えられる。

1. 手を動かす前に、運動指令予測・体性感覚・視覚情報から落下位置が計算できている
2. 運動指令予測と体性感覚で手を動かしておき、移動中に視覚情報で軌道修正する

1と2の違いは、視覚による軌道修正が玉を受け取りにいく前に行われているのか、受け取りにいった最中なのかということである。情報の獲得順序は明らかに体性感覚が先で、視覚情報が後であるが、落下位置が計算できた時点で手を動かしているわけではないので、右手に玉を渡し終えて玉を受け取りにいかうとしている時には、既に視覚による修正が脳の中で行われている可能性がある。また、視覚情報の獲得が長引けばそれだけ手の軌道修正が遅れるわけだから、左手を動かしている最中に視覚情報が反映される可能性も考えられる。

仮に、手の運動に関わる視覚運動変換に 200 msec、手の軌道修正に必要な視覚情報を得るのに 50 msec かかるとすると、1 の場合は図 3.15.b、2 の場合は図 3.15.c のようになる。

図 3.15.b は前半の軌道情報から視覚による軌道修正を行っており、図 3.15.c は頂点付近の軌道情報を用いていることになる。なお、図 3.15.d では後半部分の視覚情報を使っているが、玉を受け取るまでに間に合わないことを意味する。つまり、視覚による微調整が行われないため手と玉の位置の誤差が大きくなり失敗する可能性が高くなるわけであるが、あらかじめ体性感覚で玉のおおまかな落下位置は予測できているので、必ずしも運動の中断につながるとは考えにくい。

ただし、軌道修正に必要な視覚情報を得る時間が一定である必要はない。初心者などは特に前半部分から後半部分の長い間観測しているため、制御が間に合わず失敗するのではないだろうか？ 逆に、熟練者ほど制御に必要な時間が短くてすむため、次の動作に影響を与えることなく運動を継続することができると考えられる。

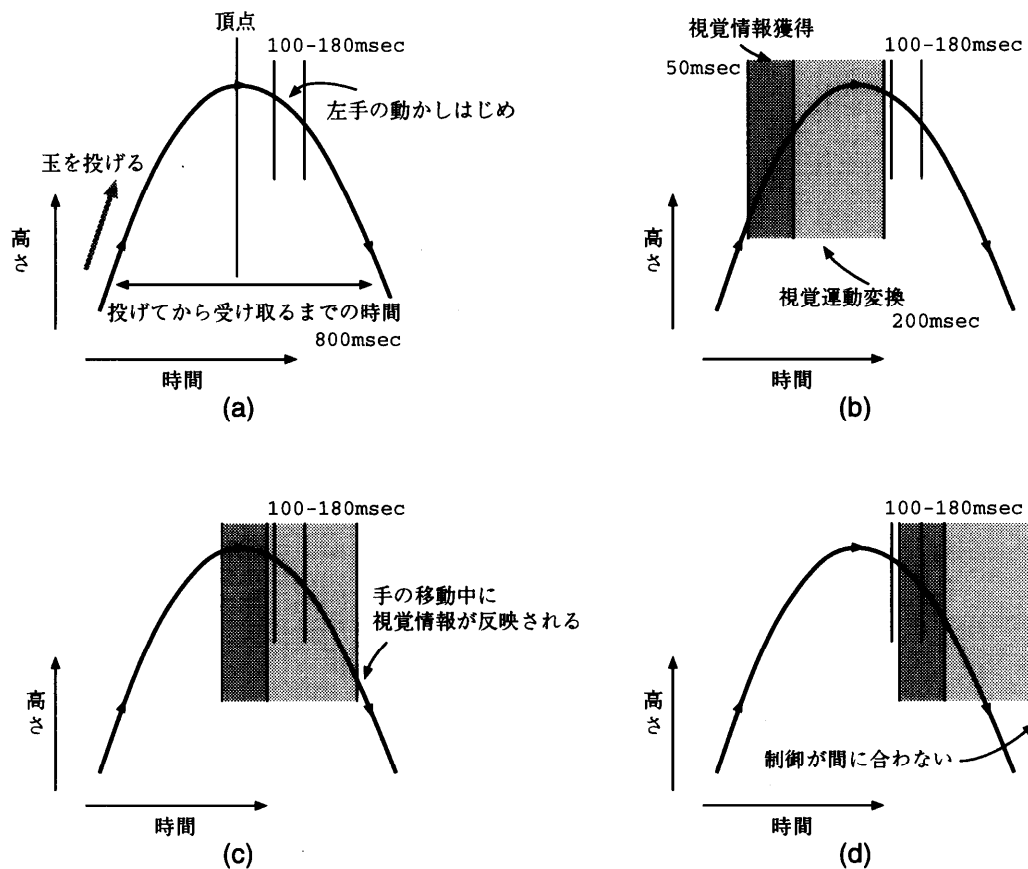


図 3.15: (a) 手の動かしはじめ時刻. (b) 手を動かす前に視覚による修正が行われている場合. (c) 手を動かしている途中に視覚情報が反映される場合. (d) 視覚による修正が間に合わない場合.

腕の運動軌跡

玉を受け取る手の動きは、視覚からの情報獲得が反映されるタイミングによって腕が異なる軌跡を描く可能性があることを示したが、実際はどのような軌道を描いて到達運動が行われているのだろうか？ 図 3.16.a, 3.17.a は、落下してくる玉を受け取ろうとして手が動きはじめてから玉を受け取るまで、左手の動きを被験者の頭上から計測したものである。図の上が被験者に対して奥側を、図の下が被験者の体がある方向を表している。1 の軌跡にはデータ中最も多く現れたものを、2 の軌跡には手の移動距離が長いと思われるものを、そして3 番目の軌跡には1 とは逆方向のデータを任意に抽出した。運動の開始点から目標点までの細線が玉を取りに行くときの軌跡で、目標点から伸びている薄い太線が受け取った玉を再び投げのために右手に渡すときの軌跡である。

次に2次元軌道の接線方向に対する速度を図 3.16.b, 3.17.b に示す。最初に現れる山の波

形は玉を受け取りにいくときの速度波形で、200 msec ほど過ぎて現れる山は玉を右手に受け渡すときのものである。ここで注目すべきことは波形の山と山との間である。左手が玉を受け取ってから受渡し動作が始まる間の速度が 0 でないことから、この二つの動作間に手の動きが止まっていないことがわかる。また、計測データからは知ることができないが 3 次元の速度波形も 0 ではない。これはつまり、手を動かし終ってから玉が落ちてくるのを待っているわけではなく、また玉を受け取ってから受渡し動作の運動計画を立てているわけではないことを意味している。

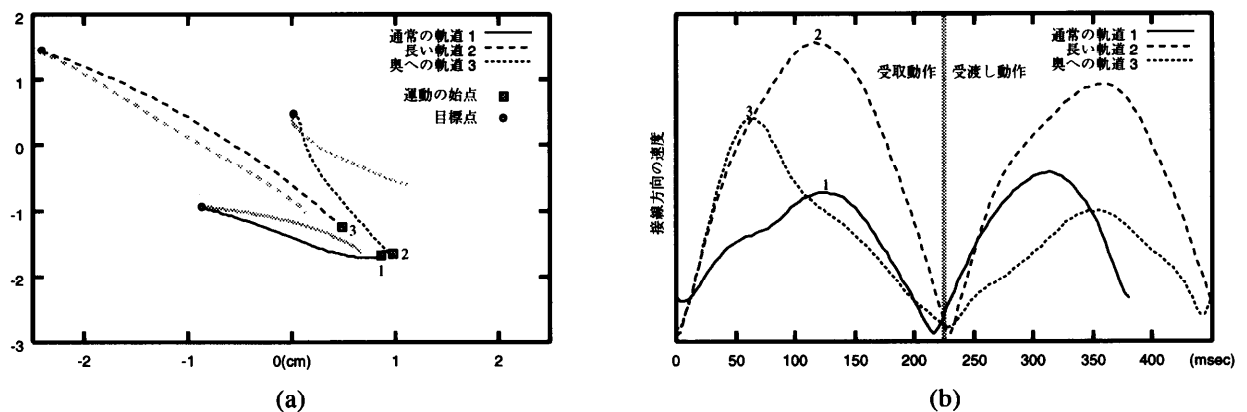


図 3.16: 被験者 KM の結果 (a) 左手の軌道。目標点は玉の落下位置と手の移動先を、それに続く線は玉を右手に渡すときの軌道を表している。(b) 運動の始点から目標点、そして玉を右手に受け渡すまでの軌道における接線方向の速度で、相対値である。

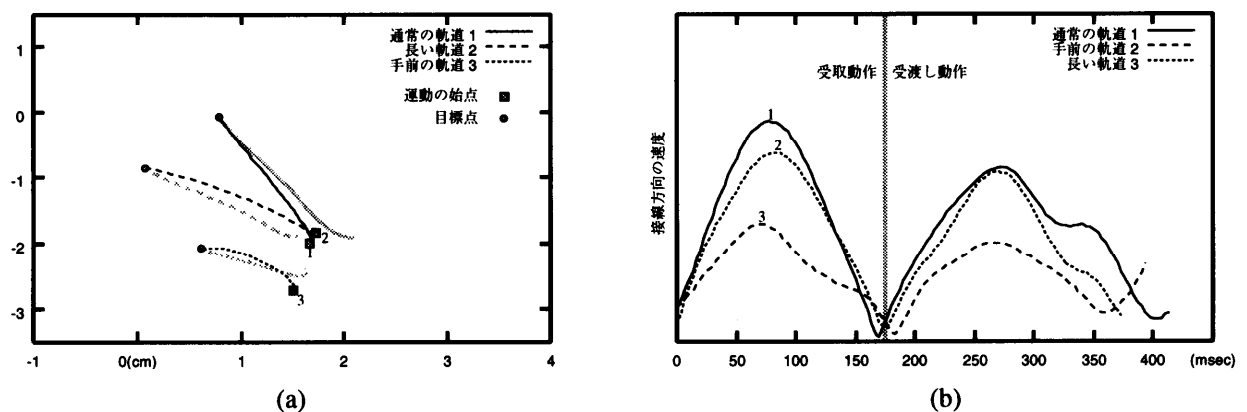


図 3.17: 被験者 KY の結果 (a) 被験者 KM と比較して、手の軌道が滑らかで曲線的な動きが多く観察された。(b) 速度波形も、全体を通して同じようなベル型の形状が多い。

以上の結果から推測すると、まず玉が落ちてくる時間があらかじめわかっていることと、手を移動させるときの軌道計画には玉を受け取り動作だけでなく、玉の受渡し動作までが含まれているのではないだろうか？ まず最初に落下時間について考察する。

落下位置がわかっている根拠として、左手が玉を受け取ってすぐに受渡しの動作が始まることだけでなく、玉が手に触れると同時につかむ動作が始まる事があげられる。玉が手に触れた、という情報を得てからつかむ動作を始めていたのではお手玉を継続するのは困難であり、空中の玉が手に接触するまでの時間を考慮して把握動作が始まっていると考えるのが自然だろう。お手玉を連続して行うためには一定のタイミングで動作を行うことが重要であり、玉の落下時間は各動作のタイミング、玉を投げたときの体性感覚、玉の頂点高さの視覚情報から得ることができる。つまり、これらの感覚器から得られる情報をもとにして脳の中で落下時刻を推測するといった予測が働いているはずである。

次に、手の軌道計画が玉の受け取り動作だけでなく、受渡し動作まで含んでいる可能性について議論する。まず手の軌跡と速度波形から、この二つの動作が別々の運動計画ではない理由については既に説明した。もし二つの動作が一つの軌道計画のもとで行われているのなら、単に到達運動というよりもむしろ経由点を通る到達運動というほうが正しいだろう。玉を受け取る位置が経由点なのである。もちろん、感覚器から得た情報をもとにして脳が予測した玉が落下する時刻・位置に経由点を設定しなければならないのはいうまでもない。

受渡し動作の目標位置は右手であるが、受け取りの時刻・位置は投げた玉の角度や力加減によって大きく変化する。それではどのようにして経由点を決定しているのだろうか？

3.16.a の 3 番の速度波形は速度ピークが運動時間の前にあるが、ペグを穴に挿入するような高い精度を運動の終点で要求すると、速度波形が長い尾を引くといわれている [6]。また、速度ピーク以降の減速期を長くすれば、到達運動が正確になるとの報告がある [4]。したがって、このような速度波形であったときには、視覚による軌道修正が行われている可能性が高い。

生体がフィードフォワード制御で行う運動のことを弾道運動 (ballistic movement)、フィードバック制御で行う運動のことを修正運動という。修正運動を行うときには感覚器を通じてフィードバック情報を得るわけであるが、感覚フィードバックが働くにはかなりの時間遅れがあることが知られている。また、お手玉では手先は見えていない状況が多いので、視覚フィードバックというよりもむしろ視覚運動変換が行われているとみたほうがよいだろう。しかし被験者によっては玉の高さが異なる。手先と玉を視野にいれるために玉を低く投げるのである。この場合は手先が見えているので、視覚フィードバックということになる。

それでも、視覚フィードバックや視覚運動変換が有効に働くには 200~300 msec ほどかかるため、短い運動には役に立たない。しかしそれは、視覚情報獲得から運動を起こすま

での時間で、お手玉には当てはまらない。つまりお手玉の場合、腕を動かすのは早すぎても遅すぎても全体の運動サイクルを狂わせてしまうため、ある決まった時刻に腕を動かし始める必要がある。そのため、視覚運動変換に 300 msec ほどかかったとしても、腕を動かし始めの時刻がタイミング調整で遅れるために、腕を動かしている途中に視覚運動変換が効いている可能性がある。

腕の軌道修正

手先をある目標点に移動させる運動を考えてみる。この場合、腕が多関節であるため目標点までの軌道が無数に存在することになる。したがって、運動を行う前には可能な軌道が無数にあるにもかかわらず、運動後には 1 つの軌道が確定するといえる。このような現象に対して最適化の方法を身体運動に適応する研究では、あらかじめ軌道の選択がされており、さらに選択された軌道はある評価によって最適であるという立場をとる。

しかし、最適化理論を身体運動に用いることに対して実際の運動現象と矛盾する場合がある。最適化理論は運動の開始から終了までを 1 つの関数を用いて評価することから、その間の運動が事前に計画された 1 つの運動単位として考えられている。したがって、その運動はフィードフォワード系で制御されることになるので、制御側は運動が開始されたら終了まで感覚情報を取り入れないことから、その間の環境の変化には適応できない。しかし、速い到達運動においても途中で軌道が変更されることがある [3]。

最初に体性感覚のみで計算された手の軌道が、途中で視覚による修正を受けた場合にはどのような波形が得られるのであろうか？ 被験者に「玉を投げ上げた後、直ちに玉が落下すると予測される位置に移動し始めるように」と指示をして、玉 1 個で投げ上げ・受け取りの動作を行ってもらったときの接線方向の速度波形を図 3.18 に示す。投げ上げる前にどのように投げるかを想定し、その予測のもとに手を取りあえず動かしてもらおうという意味である。ただし、玉が 1 個の場合だとタスクが異なるため同等に比較はできないが、軌道の修正が行われたときの目安にはなる。

この図から、到達運動の間に軌道修正が行われたときの接線速度波形には、2 つピークがある場合と長い尾を引いているような 2 種類の特徴があることがわかる。3 個でのお手玉で計測される接線方向の速度波形は尾を引くような波形のみであったが、3 個では手を動かしてから目標位置に到達するまでおよそ 200 msec ほどの時間で運動が終了しているのに対し、1 個だけの玉では 400 msec 以上かかっている。これはもちろん、手の移動距離がほぼ等しい条件で、1 個の玉の場合では投げ上げ動作の後すぐに左手を動かし始めているため、それだけ手の移動速度を遅くして時間がかかっているわけである。つまり 3 個も玉があると、手の移動も短い時間内に行わなければならないため、二つのピークがある波形は現れにくいのではないかと考えられる。

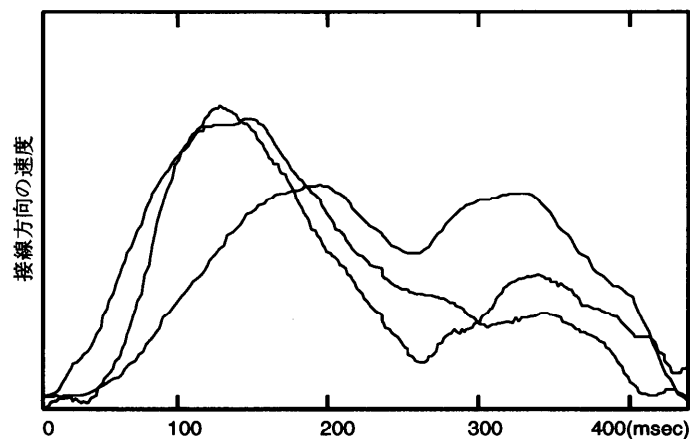


図 3.18: 接線方向の速度

図 3.15.d から、軌道の後半を見ていたのでは修正が間に合わないことを説明したが、では軌道のどのあたりを見て、どのような情報をいつ得ているのだろうか？まず、投げた位置がわかっているれば玉の頂点位置から落下位置を推定することができ、運動全体のサイクルを維持する上で必要なタイミング情報を軌道の頂点から得ているはずである。実験 1 で、頂点を基準としてサッカードが起こる時刻について計測を行ったが、よく観察してみると頂点から 200 msec 以降のサッカード頻度が極端に少ないことがわかる。視覚フィードバック制御が間に合わない時間以降からはサッカードが起こっていないことを考えると、頂点以降のサッカードはもう視覚情報を得る必要がないという意味で起こっている根拠になるのではないだろうか？このことについては、最後の章で詳しく検討する。

3.4 実験3：視覚情報の制限によるパフォーマンスへの影響

実験1,2の結果は、運動制御に必要な視覚情報は軌道の前半から頂点付近のあたりが重要であることを示唆するものであった。玉の動きから得られる運動制御に必要な視覚情報には、玉の頂点高さ、左右の動き、奥行き方向の動きなどが考えられるが、これらの情報から玉の落下位置、落下までの時間が計算されているはずである。

実験1ではサッカードが起こった時刻を調べたが、その分布には偏りがあり、サッカードが起こる頻度が低いのは玉の頂点に対して $-100 \sim 0$ msec の軌道であった。この結果から仮説を立てると、頂点前半 100 msec と後半 100 msec の視覚情報を制限するのでは、前半の方がより影響が大きいはずである。したがって、この重要だと思われる玉の軌道を制限することによりパフォーマンスに影響がでると予測される。

実験3では、この予測を確かめるために視覚情報を部分的に制限し、パフォーマンスに与える影響を調べた。

3.4.1 実験方法

実験装置の構成を図3.19に示す。この装置は、玉の動きを撮影するビデオカメラ、玉の画像を処理して軌道を計算するPC、およびPCからの命令にしたがって開閉する液晶シャッター眼鏡から構成される。PCは、投げ上げ直後の数フレームから玉が頂点に達する時刻を予測した上で、その時刻を基準として液晶を閉じる命令を出すようになっている。なお、実験1,2で使用した装置で同時に眼球運動と腕の位置計測を行った。

液晶シャッターを閉じるタイミングとして、玉の頂点よりも前の部分と後の部分を設定した。液晶を閉じている時間はそれぞれ 100 msec で、投げ 3 回に対して 1 回の割合で前半か後半のどちらか液晶が閉じるようになっている (図 3.20)。

お手玉の継続判定は、玉が画像に現れる間隔を基準にして行った。すなわち間隔が一定以上の時間があいた場合には、玉を受け損なったか、被験者自身の意志でお手玉を中断したか、にかかわらず失敗したと判定した。

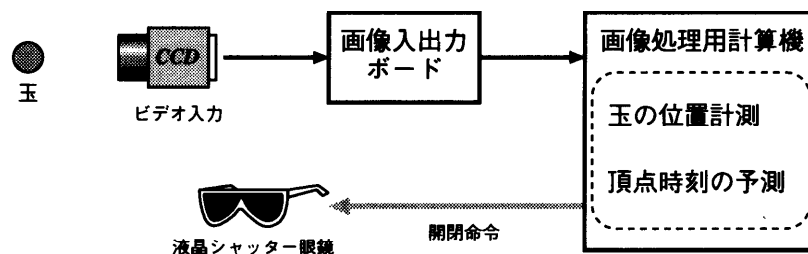


図 3.19: 実験装置の構成

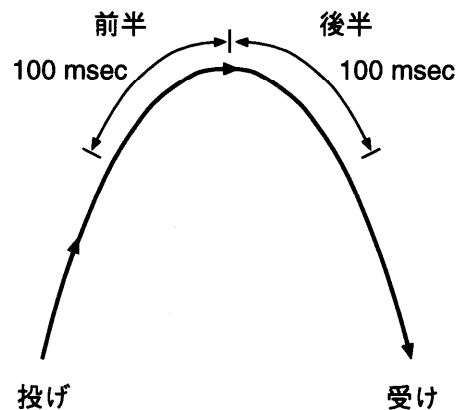


図 3.20: 液晶を閉じるタイミングと時間

3.4.2 実験結果

実験の結果を図 3.21 に示す。図の縦軸は前半と後半に液晶を閉じた場合と閉じない場合にお手玉が中断した率を表している。被験者 KM ではわずかに前半の閉じのほうに失敗率が高くなっているものの、被験者 KY では差が見られなかった。しかし、液晶を閉じないときの失敗率が閉じたときよりもかなり低いことから、視覚情報を制限することで確実にパフォーマンスが低下していることがわかる。つまり閉じる場所には依存しないが、確実に視覚情報制限によるパフォーマンスへの影響はあるということである。

次に、実験 1, 2 と同様、サッカードが起こり始める時刻と左手がいつ受け取り動作を開始しているか、玉の頂点を基準にして解析を行った。サッカードが起こる時刻のヒストグラムを図 3.22, 3.24 に、左手が受け取り動作を開始する時刻を図 3.23, 3.25 に、受け取り動作開始時刻の平均値と標準偏差を表 3.2 に示す。なお比較のため表 3.1 に視覚情報の制限がない結果も載せておいた。サッカードが起こり始める時刻、受け取り動作の開始時刻ともに、視覚情報を制限した場合とそうでない場合とではおおきな差がないことが図からわかる。

表 3.2: 左手が動きはじめた時刻 (msec)

被験者	液晶	平均値	標準偏差
KM	なし	146	58
	あり	150	58
KY	なし	165	63
	あり	165	65

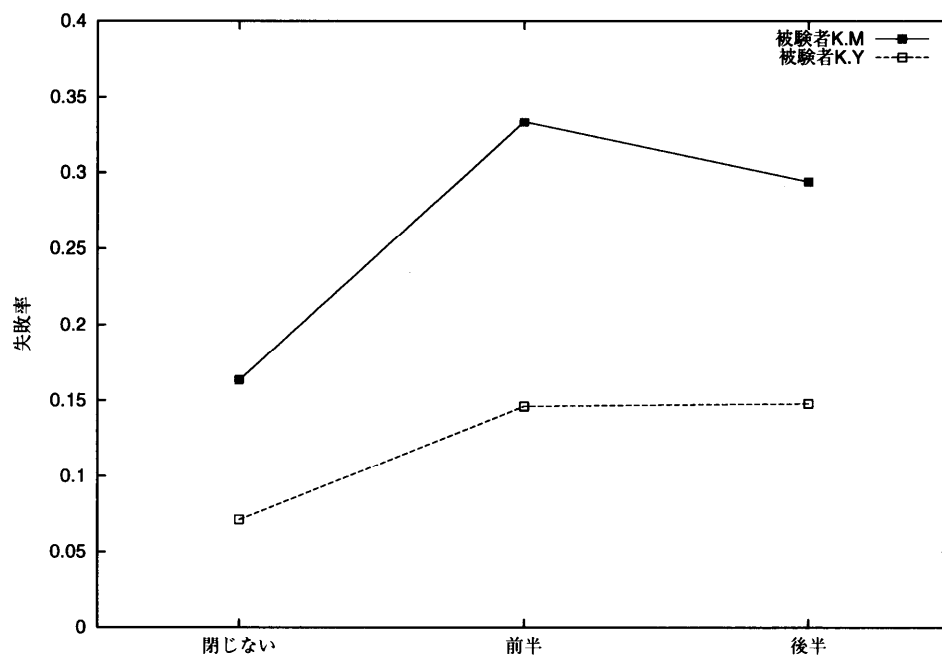


図 3.21: 液晶を閉じたときの失敗率. 失敗率が低くなるほど, ほんの数%の違いが継続回数に大きく影響することに注意しなければならない.

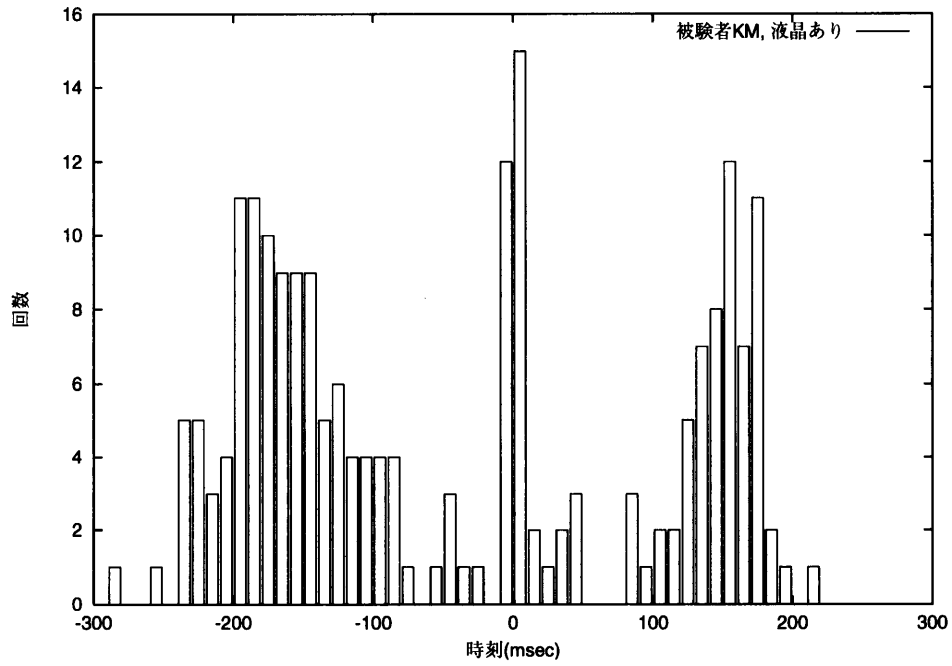


図 3.22: 被験者 KM のサッカードが起こった時刻

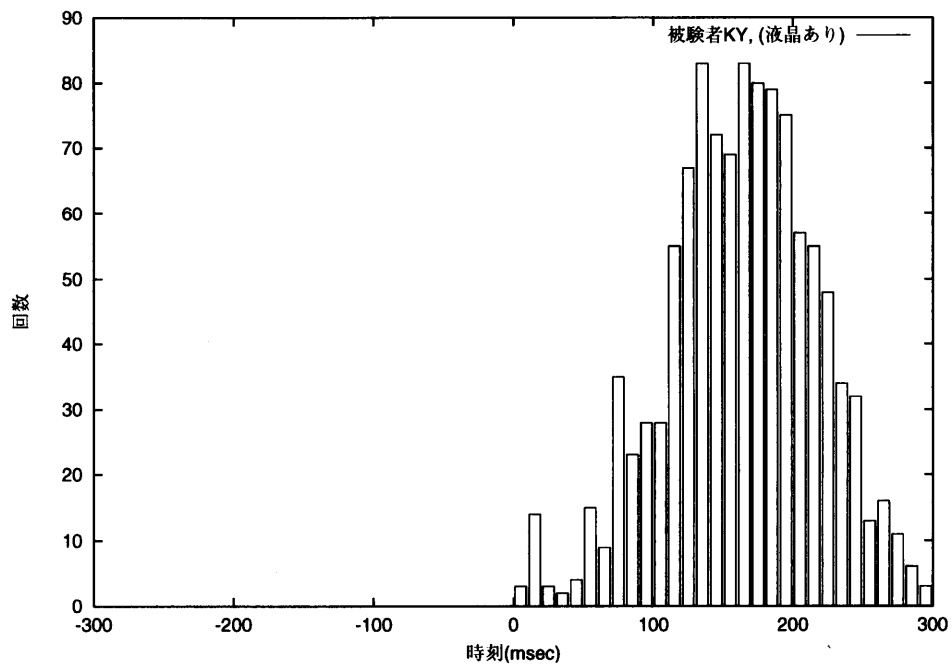


図 3.23: 被験者 KM の左手が動きはじめた時刻

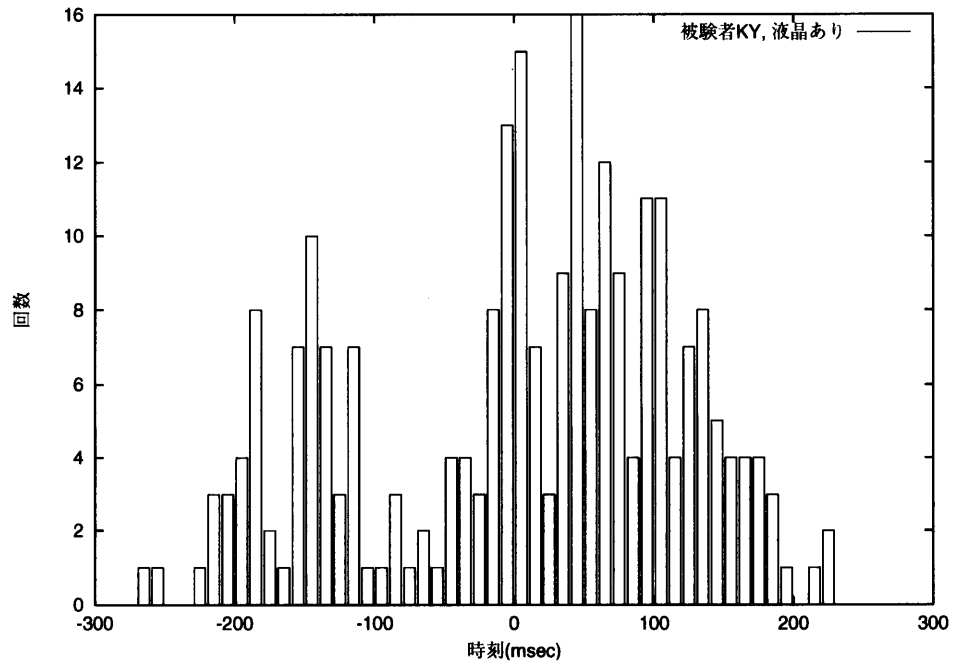


図 3.24: 被験者 KY のサッカードが起こった時刻

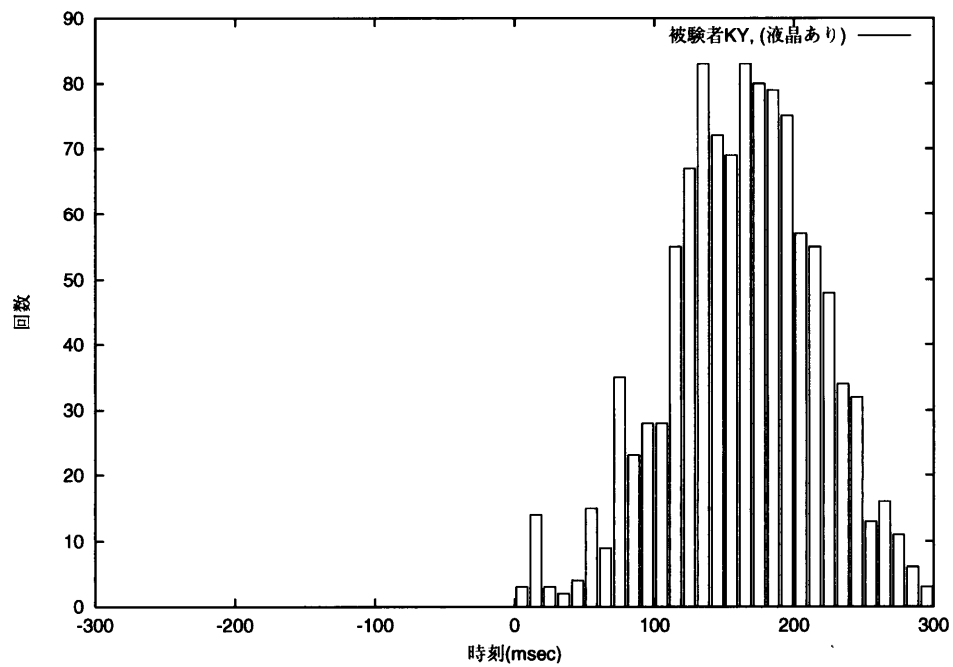


図 3.25: 被験者 KY の左手が動きはじめた時刻

3.4.3 考察

液晶シャッター眼鏡を使用して視覚情報を部分的に制限することによるパフォーマンスの差は、とても大きいといえるものではなかった。つまり、玉の軌道に対して同じ時間どこを閉じても、同じくらいパフォーマンスが低下したのである。おそらく、玉の軌道が一部分でも見えていれば制御は可能であるが、制御の精度は大きく低下するのではないかと考えられる。

実験1と実験3では眼球運動を計測したが、視線が右に戻るサッカードは一定の部分に集中しているわけではなかった。液晶をとじる部分によって差が出にくいのは、確率的にあるいは別の要素が関係し運動制御に必要な視覚情報が毎回異なる部分から獲得されているため、ある特定の部分でパフォーマンスが大きく低下するのではなく、どこを閉じても同じくらいのパフォーマンスの低下があるのではないだろうか？

Santvoord と Beek の行った実験では平均 87msec ほど玉の頂点軌道を見せるだけで、juggling を行うことができることが示されている [15]。しかし、Santvoord らの実験とは制限する視覚情報に大きな違いがある。Santvoord らは運動制御に必要な視覚情報をなくしていくことで、juggling を行う最小限の視覚情報獲得時間を調べた。それに対して、本研究で行ったのは運動制御に必要であると思われる視覚情報を獲得できなくすることでパフォーマンスに影響が出るかを調べ、他の部分よりも大きくパフォーマンスが低下する玉の軌道部分を視覚情報獲得に必要な場所であると特定するものであった。Santvoord らの実験では一部分しか見えないので、視覚情報から手の位置を調節するというよりも、むしろタイミングを一定に保つために、頂点位置を液晶の開いているところにもっていつている可能性がある。逆に、本研究では一部分を見えなくするため、他の部分で制御を行うことができるが、制御の精度が低下するため全体的なパフォーマンスは落ち、そしてタイミングをうまく保つことが難しくなるのだろう。

また、実験時の体調や熟練度、実験の最中にお手玉の運動学習が進んでいる、などの理由によりパフォーマンスが大きく変動するため、視覚情報を制限する部分ごとにどのくらいの影響がでるかということを調べるのは難しいと思われる。つまり、視覚情報の制限によりパフォーマンスに影響がでるか否かを調べるためには、運動が継続できたできなかったという失敗率という尺度で判断する方法には問題がある。パフォーマンスに影響があったとしても、それが即、失敗につながるわけではない、その時点では全体のサイクルを狂わすくらいの影響でしかなかったとしても、数回先の運動に影響を及ぼしているからである。

そこで次の実験4ではパフォーマンスを測る新しい尺度として、玉を受け取るときの誤差に焦点をあてて実験を行った。

3.5 実験 4：視覚情報の制限による玉の受取誤差への影響

これまでの実験結果をふまえて、お手玉の運動制御における脳の処理過程を玉の受け取り動作に注目して仮説を立てると次のようになる。まず玉の投げ動作における体性感覚からおおまかな落下位置が計算されており、次に視覚情報を用いて手の運動計画を修正し受け取り動作の精度が高められている(図 3.26)。当然人間の手は、広げることでかなりの落下位置誤差を許容することができるので、その許容範囲内になるように視覚情報を使って誤差を減少させていると考えられる。

もし運動制御、特に受け手の微調整に視覚が関わっているならば、視覚情報を制限することにより受け手の落ちてくる玉に対する誤差が大きくなるはずである。また運動制御に両眼視などの奥行き情報が重要な役割を果たしているのならば、片目の視覚情報を制限することにより玉の奥行き方向の運動が知覚されにくくなるため、玉を受け取るときに奥行き方向の誤差が増すことが予測される。また熟練度により運動制御の方法が変わり、体性感覚と視覚情報の比率が異なることが考えられるため、熟練度に差がある被験者同士の結果を比較する必要がある。

この仮説を検証するために、視覚情報を制限し玉の受け取り誤差がどのように変化するか計測を行った。

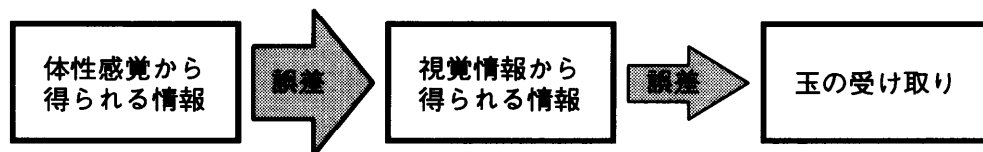


図 3.26: 体性感覚から計算した落下位置の誤差が、視覚情報を得ることにより減少する。

3.5.1 実験方法

実験 1, 2, 3 と同様に、玉の位置計測を行うため被験者の正面からカメラで撮影し、その画像をもとに液晶シャッター眼鏡の開閉を行う。また玉の受け取り誤差を計測するために被験者の斜め上から左手と玉をビデオカメラで撮影し、その映像に対して玉の位置計測結果をもとに玉を受け取った直後の画像を抽出してから玉と手の中心との誤差を計算した。手の中心は中指の第 1 関節あたりとした、図 3.27 に基準とした中心位置を示す。なお、玉の受け取り時の位置がカメラをおおきくはずれ、誤差計測が不可能なデータは除いてある。

実験条件

次の3つの条件を設定した。

1. 視覚情報をまったく制限しない。
2. 玉が頂点に達する時刻を基準に、その前半と後半のどちらかを 100 msec の時間だけ視覚情報の制限を行う。
3. 左目を隠し、片目の視覚情報を制限することで奥行き情報を得られなくする。

計測時間は2分間で、その間に可能な限り連続してお手玉を行ってもらった。

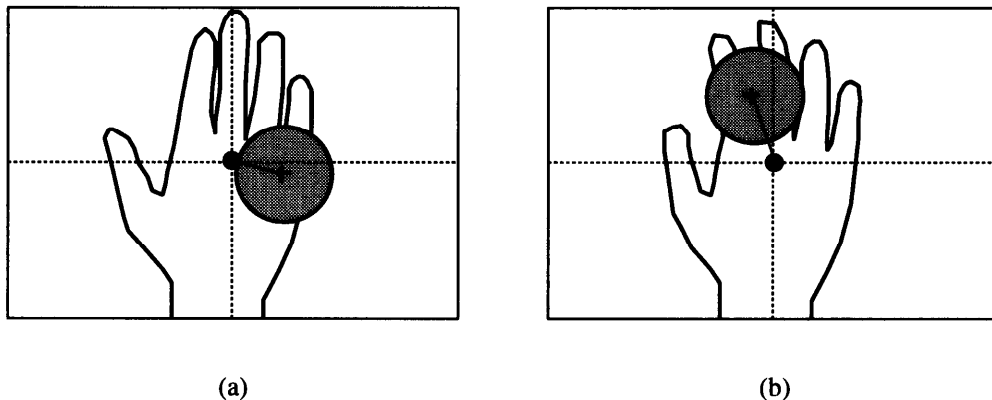


図 3.27: 玉の受け取り位置の誤差。黒丸が手の中心を表しており、それと玉の中心との差で受け取りの誤差を計算している。(a) 被験者に対して左右の誤差が生じた場合の例。(b) 奥行き方向の誤差が大きい場合の例。

3.5.2 実験結果

被験者 KM の結果を図 3.30～3.32 に、被験者 KY の結果を図 3.44～3.46 に示す。図 3.30, 3.44 は視覚情報の制限がない場合の、手の中心と玉とのずれを表している。 x, y 座標が 0 の位置が図 3.27 で説明した手の中心を示しており、(0, 0) の座標から離れていればいるほど玉を受け取るときに誤差が大きかったことを意味している。

視覚情報を制限しない場合の結果は 3.30, 3.44 である。このデータは、玉を受け取った瞬間に手の中心に対して玉がどの位置にあるかを表している。図の上方向が手先の方向、図の下方向が手首の方向である。100 msec の視覚情報を制限する場合の結果が図 3.31, 3.45 で、片目の視覚情報を制限する場合の結果が図 3.32, 3.46 である。図 3.33, 3.47 は、主成分分析で求めた $\sqrt{\text{固有値}}$ と固有ベクトルをもとにして各条件別にプロットしたもので、図 3.34, 3.48 は 100 msec の視覚情報を制限した条件で、前半・後半・閉じないときの主成分分析結果を表している。また、図だけではわかりにくいので、表 3.3 に受け取り誤差の平均値と標準偏差を示す。

そして、手の中心から玉の距離の時系列データを各条件別に示す。線の切れ目は玉を落したか、あるいは自発的に中断したことを意味する。被験者 KM は図 3.35～3.37 に、被験者 KY は図 3.49～3.51 である。なお、誤差が変化する様子をわかりやすくするため、これらのデータを曲線に変換したものも加えてある。図 3.28, 3.29 に例を示す。

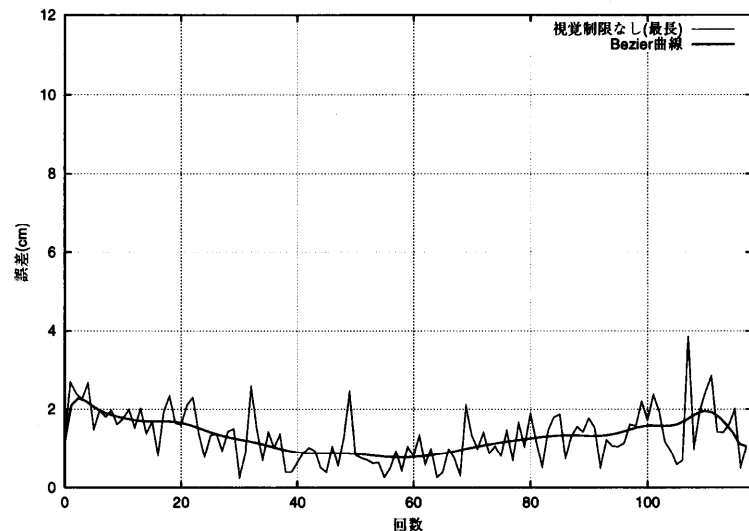


図 3.28: 被験者 KY の最も長く続いたときの時系列誤差 (視覚情報の制限がない条件)。この誤差は手の中心から玉までの距離を表し、 $\sqrt{x^2 + y^2}$ で求めた値である。激しく上下している線が実データを、なめらかな曲線が Bezier 曲線で近似したものである。近似曲線から誤差がほぼ一定に保たれていることがわかる。

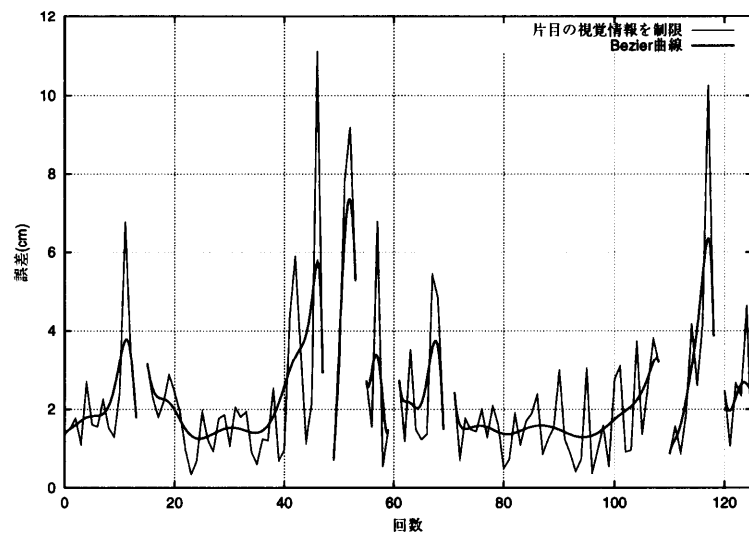


図 3.29: 被験者 KY の片目の視覚情報を制限したときの時系列誤差。視覚情報を制限しない場合と比較して誤差が大きく、変動が激しい。近似曲線から誤差が増えていく傾向があることがわかる。誤差が急激に増大し、玉を落す直前に減少しているのは玉を落したときに次の玉が投げられており、その玉を受け取ったことを意味している。

表 3.3: 被験者 2 名の受け取り誤差の平均値と標準偏差。誤差とは手の中心から受け取った玉の中心までの距離で、別に x, y 軸方向の平均値と標準偏差ものせておいた。実験条件は、1 が視覚情報の制限がない場合、2 が 100 msec の時間ほど視覚情報の制限を行う場合 (そして 2 の中で液晶を閉じた部分と閉じない部分の比較)、3 は片目の視覚情報を制限する場合である。平均回数は平均何回お手玉を継続することができたかを表す。

被験者	実験条件	誤差		平均値		標準偏差		平均回数
		平均値	標準偏差	x	y	x	y	
KM	1	1.683	0.942	0.478	0.240	1.331	1.294	14.5
	2	2.471	1.584	-0.049	-0.406	2.021	2.097	12.3
	2-なし	2.353	1.461	0.148	-0.538	1.825	2.018	
	2-前半	2.492	1.258	-0.533	-0.097	2.099	1.801	
	2-後半	2.997	2.359	-0.175	-0.323	2.641	2.789	
	3	3.376	1.973	1.049	0.048	2.101	3.137	7.0
KY	1	1.196	0.622	0.287	-0.266	0.900	0.926	32.3
	2	1.457	0.697	0.383	-0.283	1.080	1.105	32.3
	2-なし	1.417	0.651	0.502	-0.383	0.959	1.059	
	2-前半	1.544	0.806	-0.225	-0.138	1.255	1.199	
	2-後半	1.515	0.747	0.496	-0.072	1.148	1.151	
	3	2.476	1.911	-0.044	0.942	1.534	2.561	13.6

玉の受け取り誤差は、全体的に被験者 KM よりも被験者 KY の方が少なかった。平均継続回数に注目すると KY の方が圧倒的に多いことから、熟練度が高くなるほど誤差が少なくなるようである。実験条件 3 では被験者別にあまり差がみられないのに対し、実験条件 2 では KY は液晶シャッター眼鏡による影響が KM よりかなり少ない。これは熟練度によって、複数の感覚器から得られる情報の中でどれが主に使われているか異なる可能性があることを示唆している。つまり、被験者 KM は視覚情報をから微妙な手先の位置調整をしているため部分的な視覚情報の制限の影響を受けるが、被験者 KY では投げ上げが安定しており、また投げたときの体性感覚から得られる情報で精度の高い落下位置計算ができるため、視覚情報が部分的に制限されてもあまり影響を受けないことを意味している。

次は実験条件別の結果だが、実験条件 1, 2 では、x 方向と y 方向の誤差が同じくらいなのに対し、実験条件 3 では y 方向の誤差が x 方向と比較してもかなり大きいことがわかる。人間の手は縦長の形状であるため、ある程度の y 方向誤差でも運動を継続することができるが、平均回数からわかるように奥行き情報の制限はパフォーマンスに大きな影響を及ぼしていることがわかる。

被験者 KM の結果

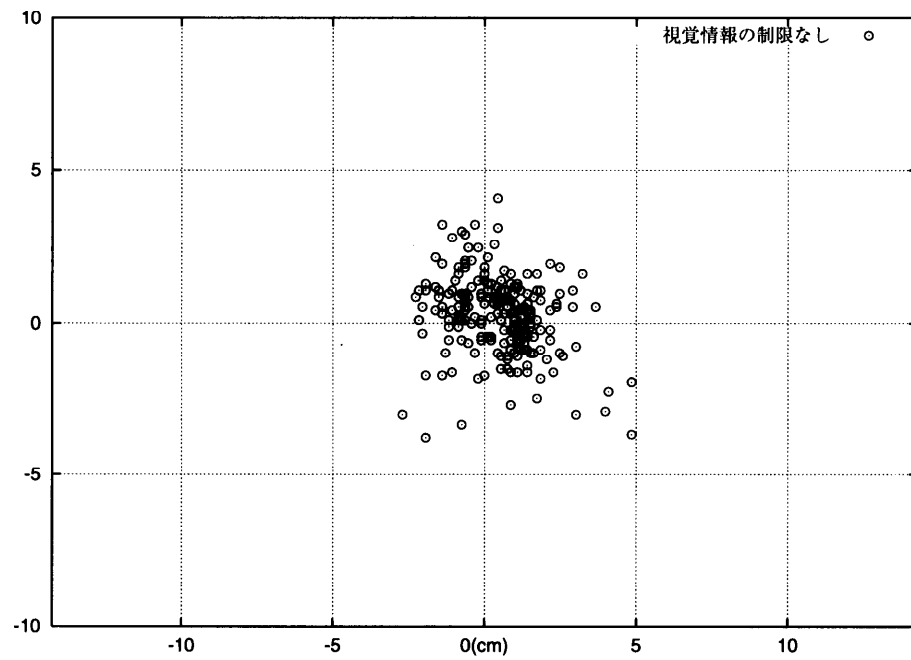


図 3.30: 視覚情報の制限がない場合の受け取り位置 (KM)

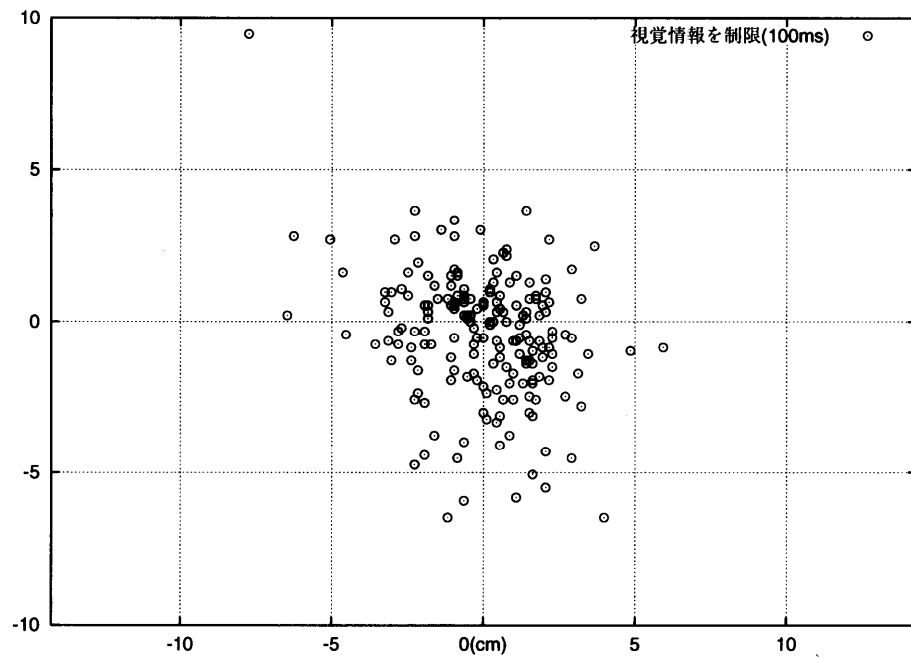


図 3.31: 100 msec 視覚情報を制限したときの受け取り位置 (KM)

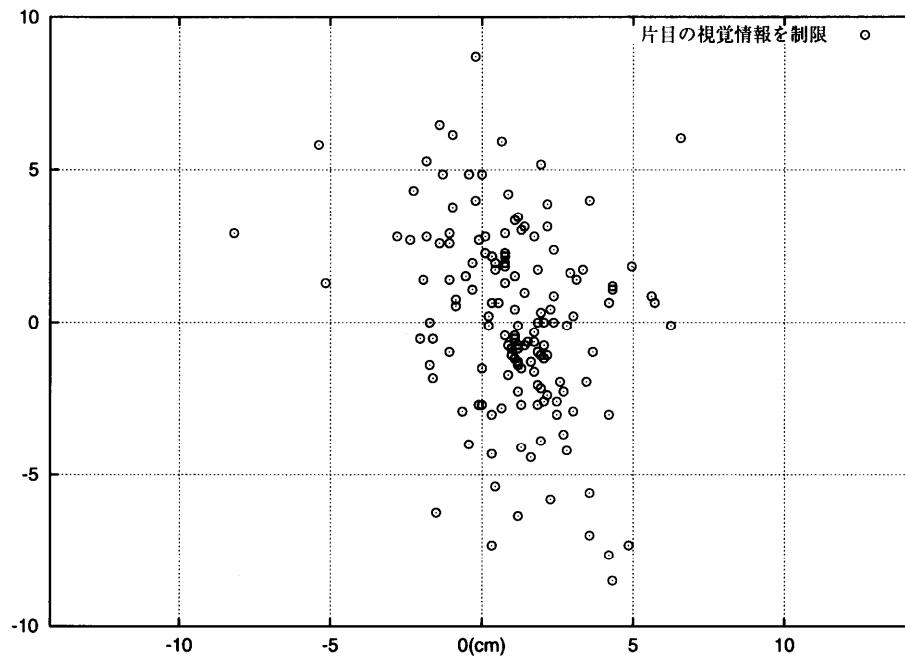


図 3.32: 片目の視覚情報を制限したときの受け取り位置 (被験者 KM)

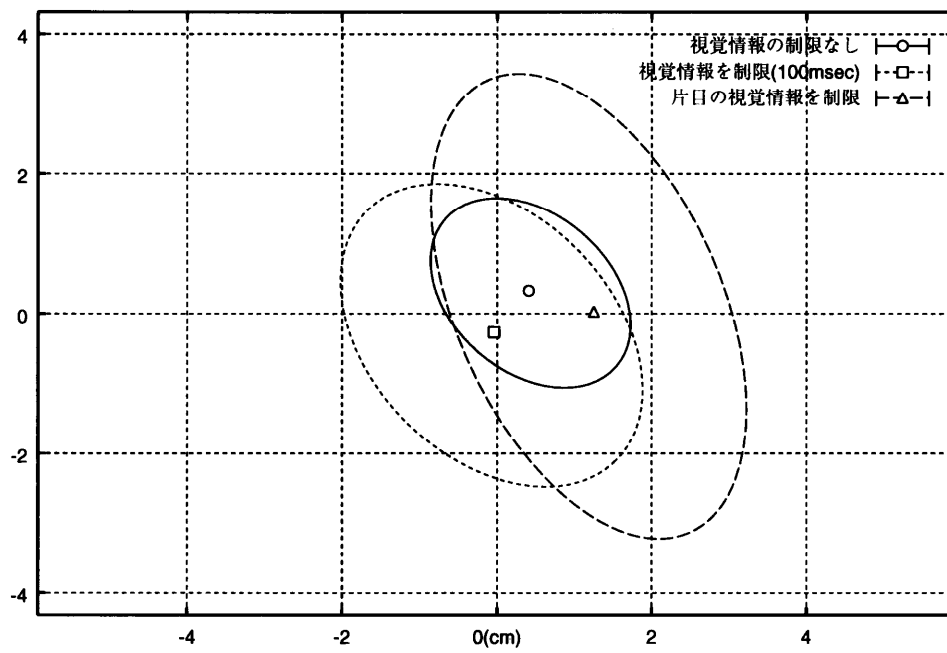


図 3.33: 各条件ごとの平均値と標準偏差 (被験者 KM)

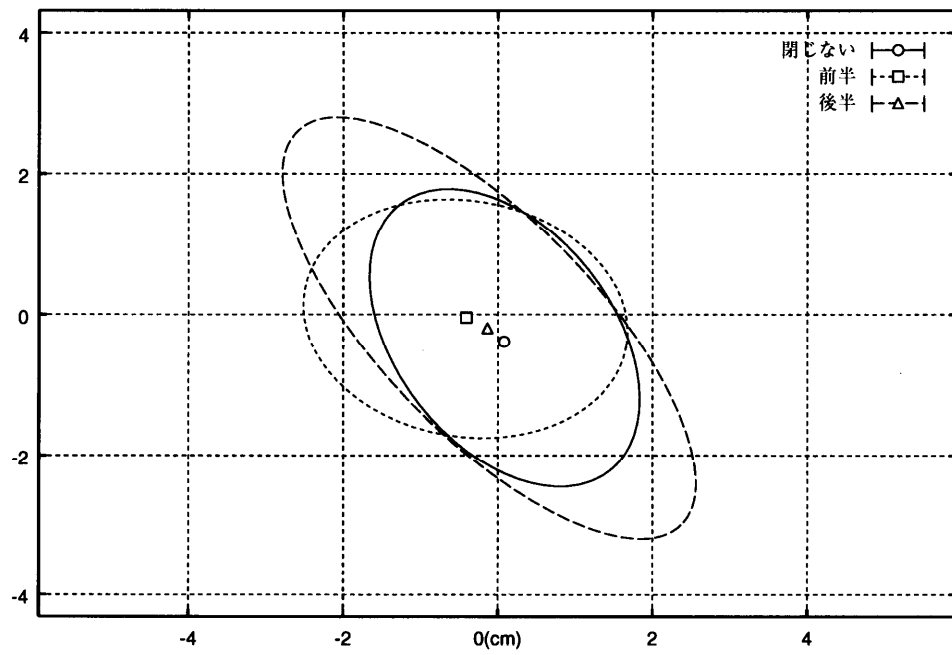


図 3.34: 液晶を閉じた条件での平均値と標準偏差 (被験者 KM)

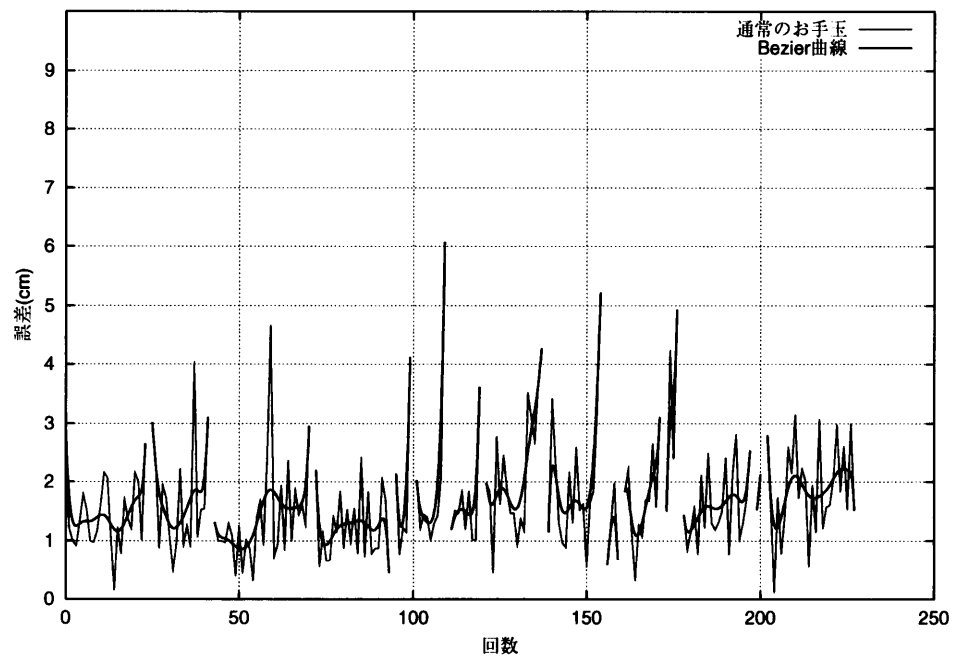


図 3.35: 視覚情報の制限がない場合の時系列誤差 (被験者 KM)

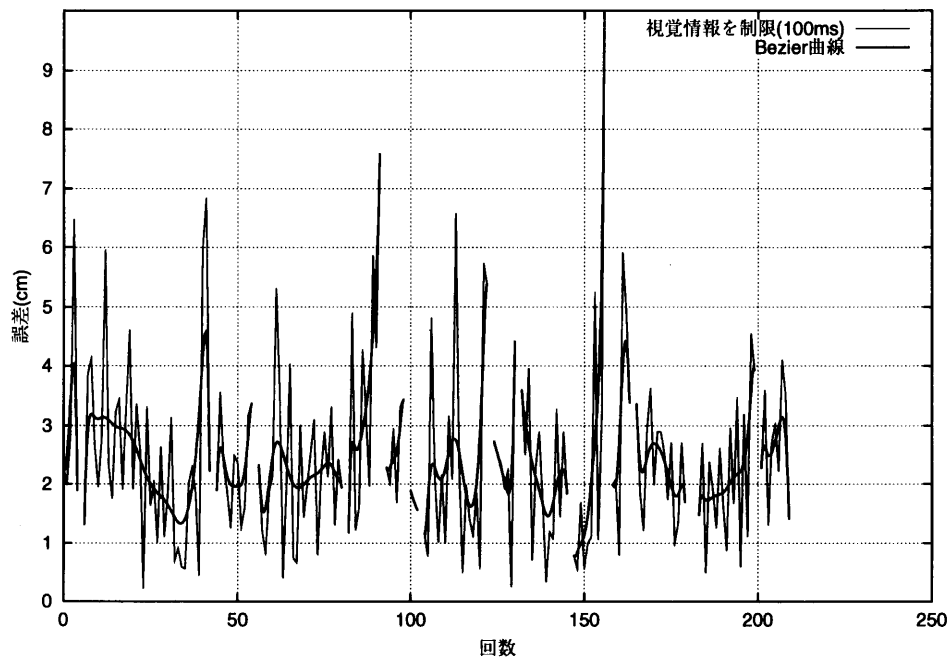


図 3.36: 100 msec 視覚情報を制限したときの時系列誤差 (被験者 KM)

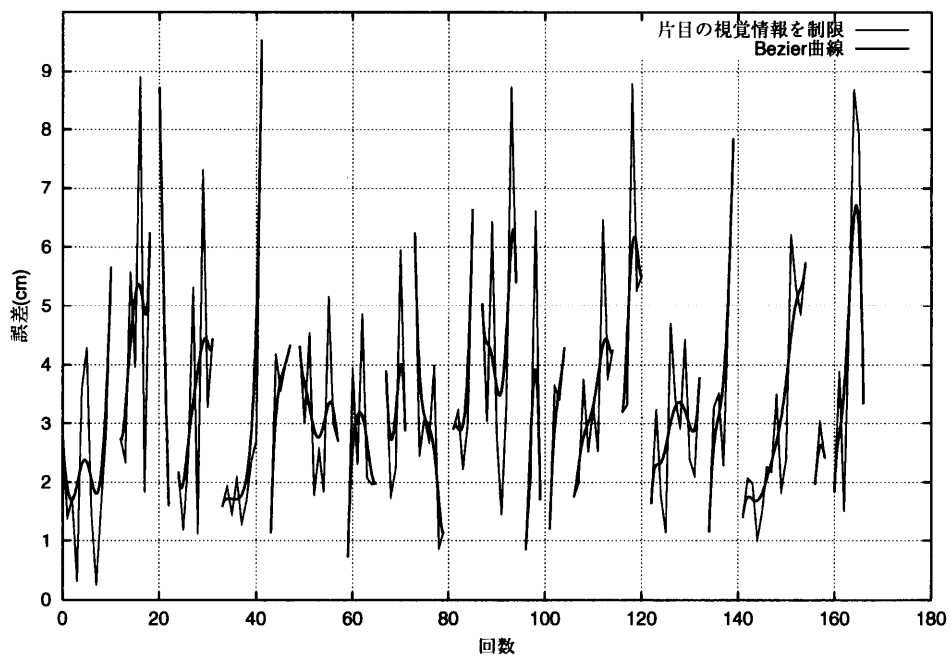


図 3.37: 片目の視覚情報を制限したときの時系列誤差 (被験者 KM)

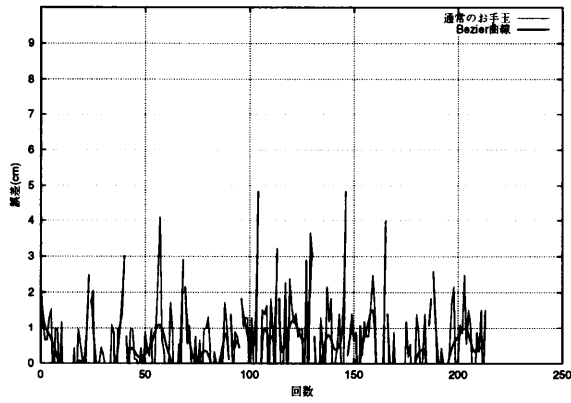


図 3.38: 視覚情報を制限したときの x 方向時系列誤差 (被験者 KM)

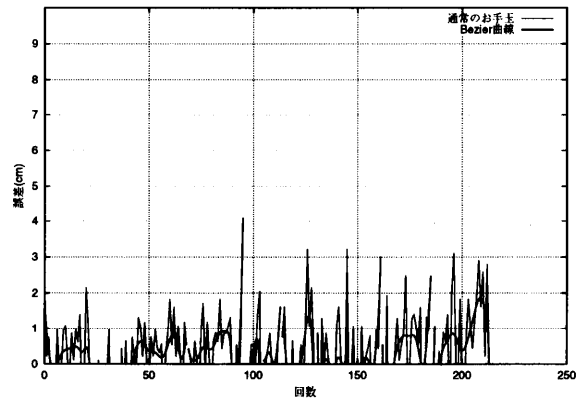


図 3.39: 視覚情報を制限したときの y 方向時系列誤差 (被験者 KM)

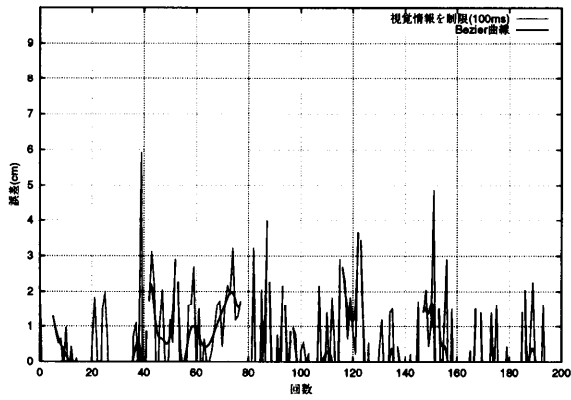


図 3.40: 100 msec 視覚情報を制限したときの x 方向時系列誤差 (被験者 KM)

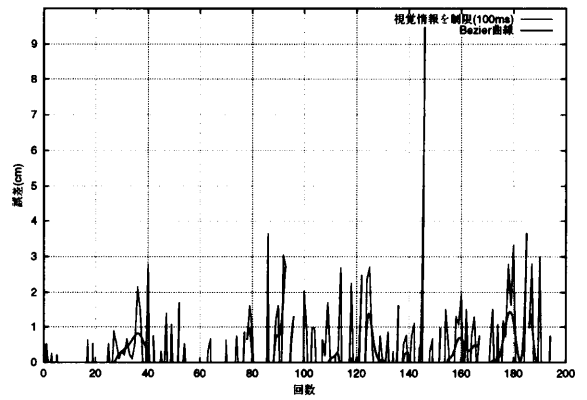


図 3.41: 100 msec 視覚情報を制限したときの y 方向時系列誤差 (被験者 KM)

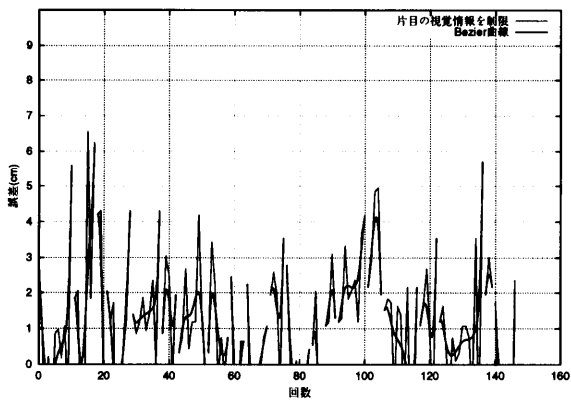


図 3.42: 片目の視覚情報を制限したときの x 方向時系列誤差 (被験者 KM)

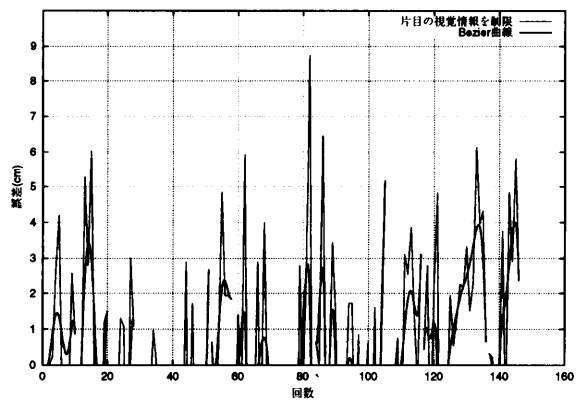


図 3.43: 片目の視覚情報を制限したときの y 方向時系列誤差 (被験者 KM)

被験者 KY の結果

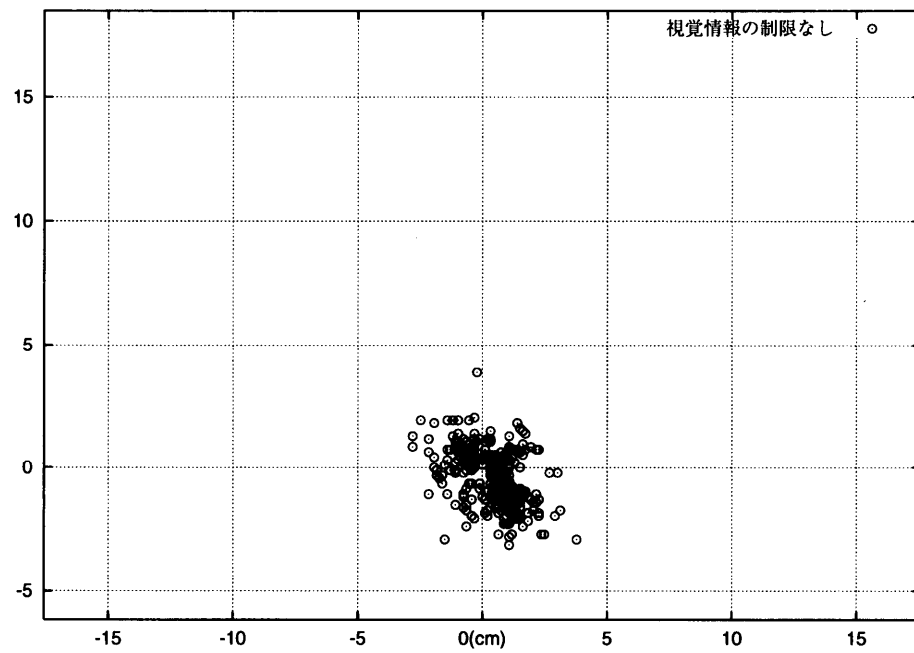


図 3.44: 視覚情報の制限がない場合の受け取り位置 (被験者 KY)

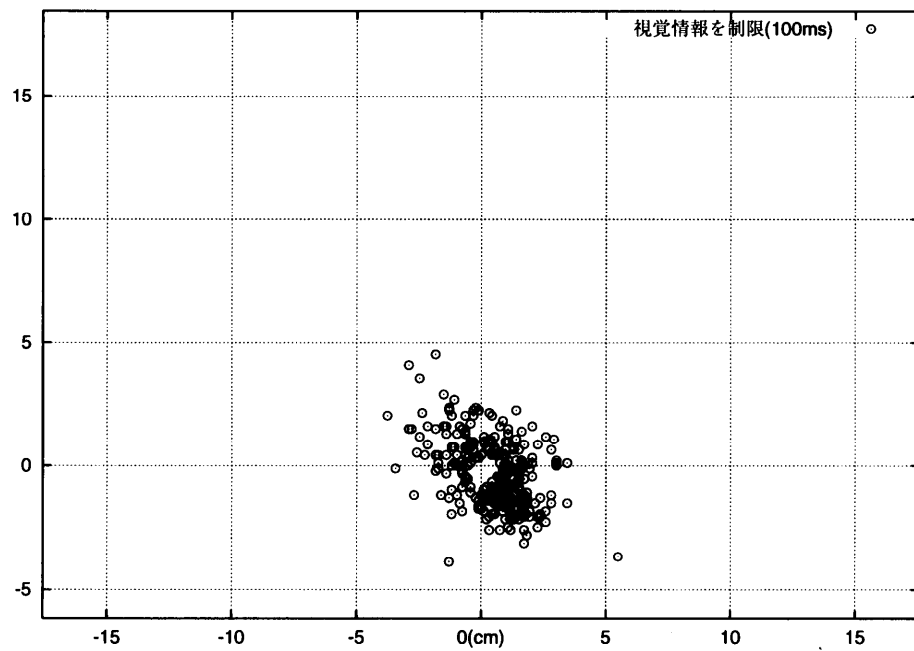


図 3.45: 100 msec 視覚情報を制限したときの受け取り位置 (被験者 KY)

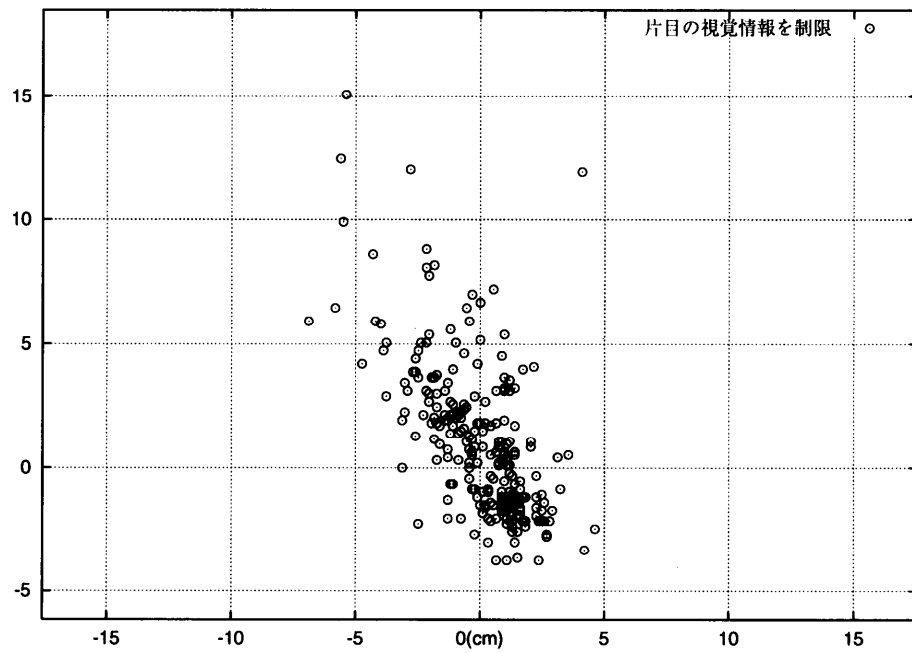


図 3.46: 片目の視覚情報を制限したときの受け取り位置 (被験者 KY)

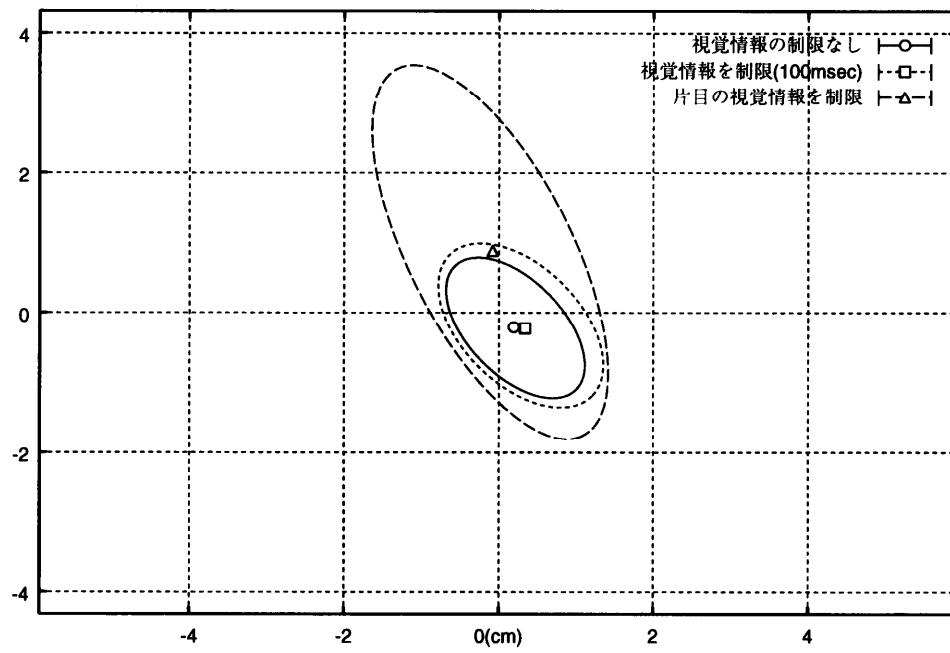


図 3.47: 各条件ごとの平均値と標準偏差 (被験者 KY)

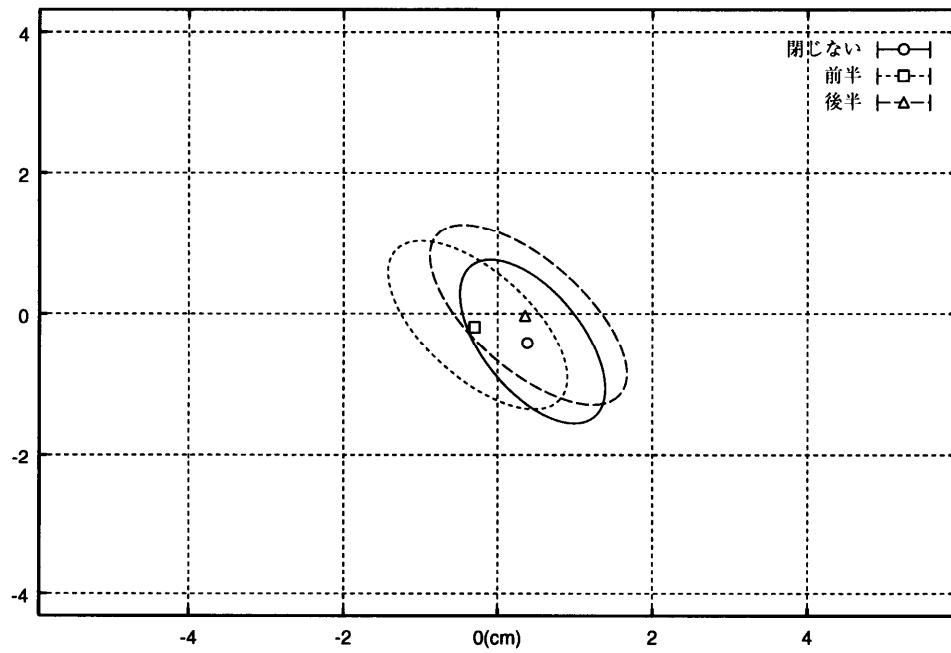


図 3.48: 液晶を閉じた条件での平均値と標準偏差 (被験者 KY)

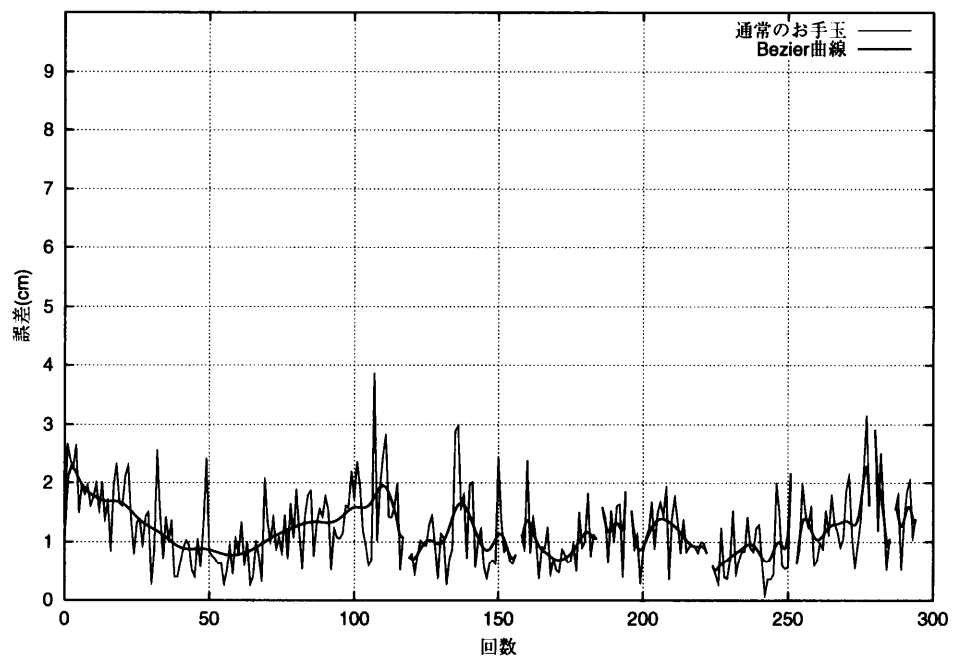


図 3.49: 視覚情報の制限がない場合の時系列誤差 (被験者 KY)

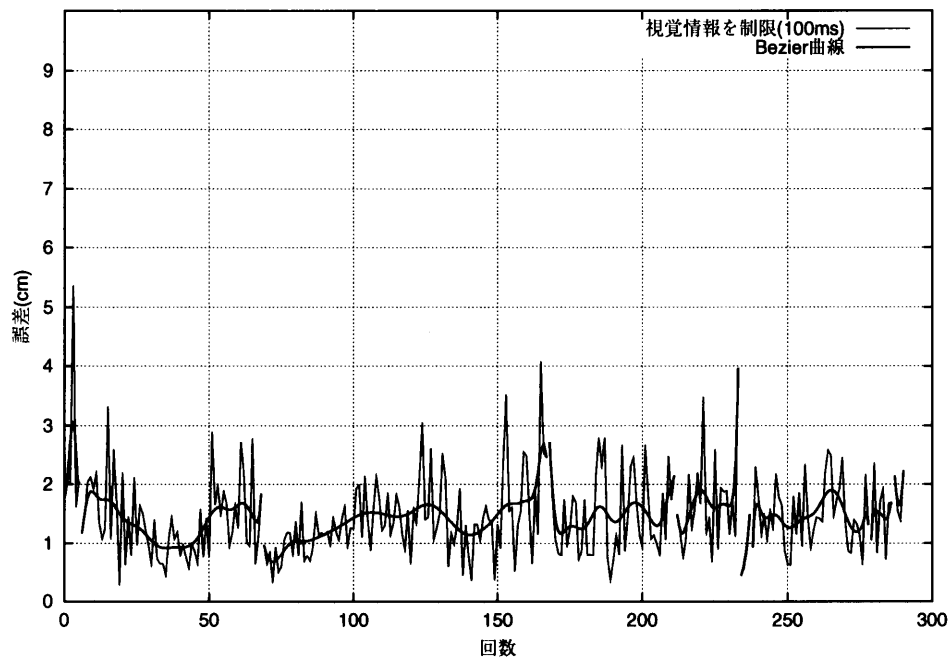


図 3.50: 100 msec 視覚情報を制限したときの時系列誤差 (被験者 KY)

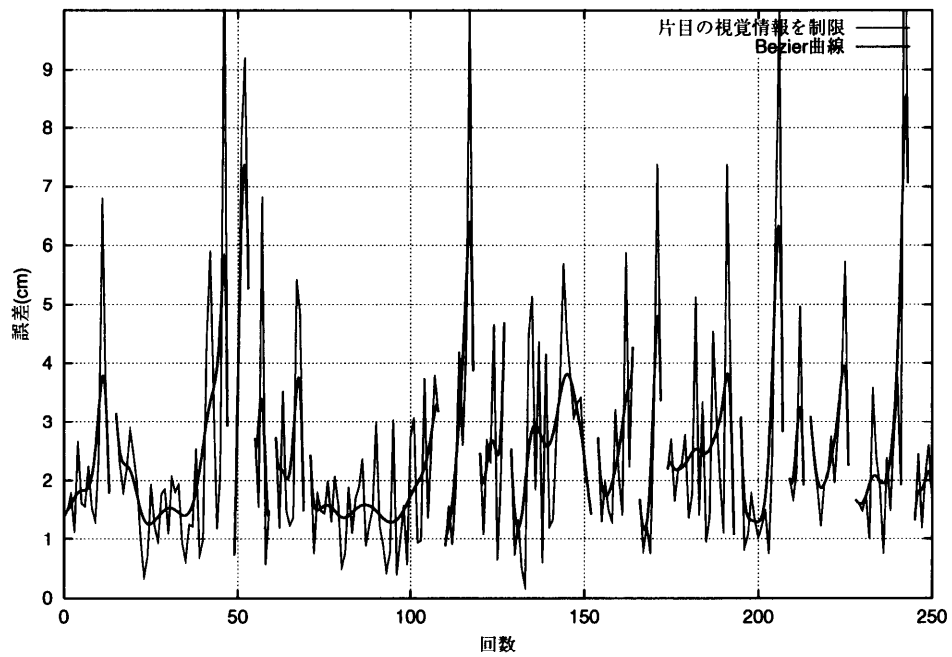


図 3.51: 片目の視覚情報を制限したときのの時系列誤差 (被験者 KY)

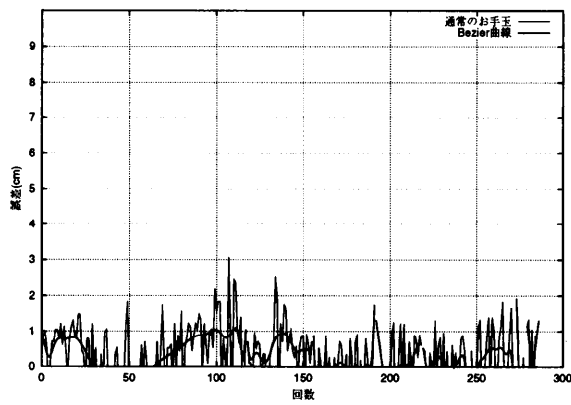


図 3.52: 視覚情報を制限したときの x 方向時系列誤差 (被験者 KY)

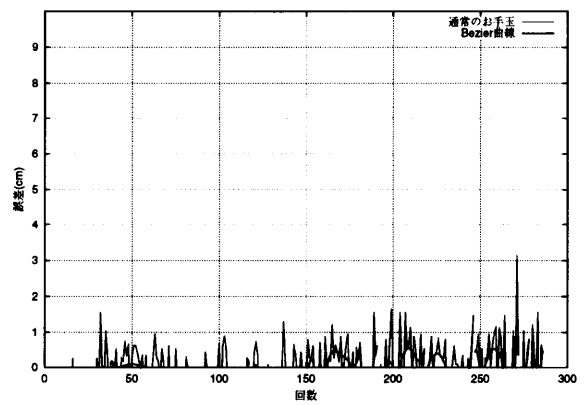


図 3.53: 視覚情報を制限したときの y 方向時系列誤差 (被験者 KY)

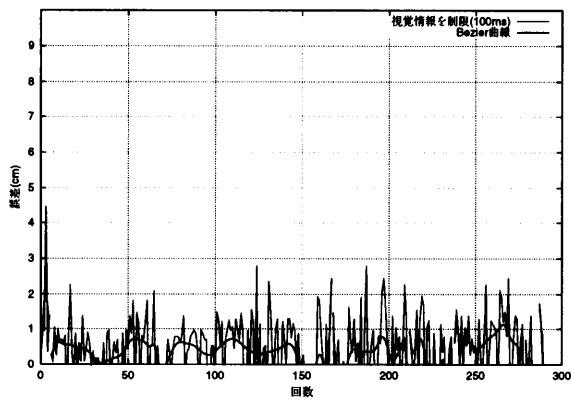


図 3.54: 100 msec 視覚情報を制限したときの x 方向時系列誤差 (被験者 KY)

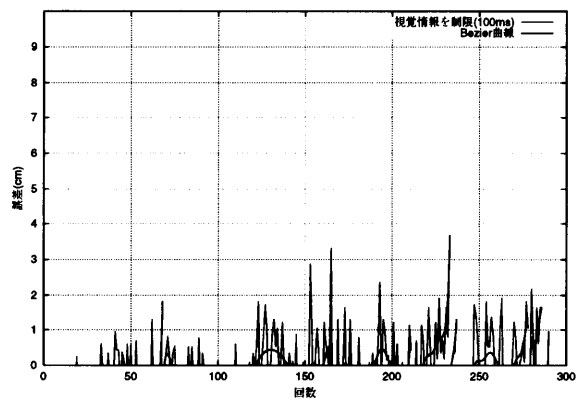


図 3.55: 100 msec 視覚情報を制限したときの y 方向時系列誤差 (被験者 KY)

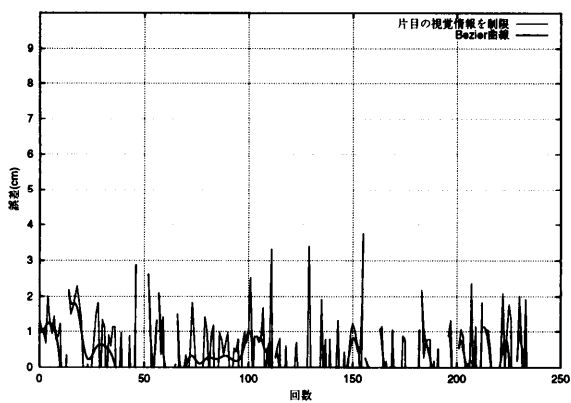


図 3.56: 片目の視覚情報を制限したときの x 方向時系列誤差 (被験者 KY)

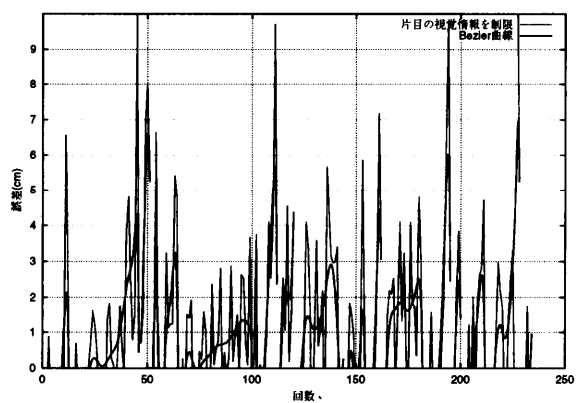


図 3.57: 片目の視覚情報を制限したときの y 方向時系列誤差 (被験者 KY)

3.5.3 考察

まず、視覚情報を制限しない条件の受け取り誤差を基準にして他の条件と比較する。

実験条件 2 では 100 msec の視覚情報制限で玉の受け取り位置の修正に必要な情報、例えば玉の速度や玉の高さなどから得られるタイミング情報などが十分に得られないために x, y 方向ともに誤差が増えるはずである。しかし、熟練者ほど視覚情報の獲得が短い時間ですむ、そしてどの軌道からでも必要な情報が得られ、視覚に頼らない(体性感覚を重視)等の理由により不安定な投げに対して柔軟に対応できるため、熟練度が高くなるほど影響が少なくなるといえる。

また片目の視覚情報を制限する場合では奥行き情報が得られないため奥行き方向に誤差が大きくなる、これは両眼網膜像の速度差などから奥行き方向の位置修正を行っているということになる。しかし実験結果には現れていないが、時系列でデータをながめると、いきなり誤差が大きくなるのではなくて、徐々に奥行き方向の誤差が大きくなるが多かった。つまり、1 つの投げに対して奥行き情報による受け取り位置修正が行われているだけでなく、片目の視覚情報を制限することにより内部モデルのパラメータ修正がうまく行えず徐々に奥行きの誤差が増大してる可能性がある。誤差が徐々に大きくなるということは最初は視覚情報に頼らず主に体性感覚のみで制御が行えるが、前の不安定な投げが次の運動に影響を及ぼしており、視覚情報でその誤差を減少させていると考えられる。視覚情報を制限しない場合では、誤差は一定の値以下に保たれているのに対し、視覚情報を制限する場合では誤差が増える傾向があったからである。

また、部分的な視覚情報の制限ではほとんど影響が見られなかった被験者 KY でも、片目の視覚情報を制限すると受け取りの誤差が大きくなり、継続回数も少なくなるなどのパフォーマンスの低下があった。これはつまり視覚情報に基づく運動の修正が上級者でも行われていることを示唆している。

しかし、熟練した juggler には視覚情報を全く遮断した状態でお手玉を行うことができる者もいる。これは投げ上げ時の体性感覚だけで精度の高い受け取り位置計算ができるからなのだろう。しかし、開眼の状態で練習を続けていたのではいつまでたっても盲目状態でお手玉をすることはおそらくできないはずである。つまり眼を開いた状態では、誤差が大きくなったときに視覚情報を使って補うので、投げ上げの精度を高めるための学習よりもむしろ視覚を使って誤差を修正する学習が主に行われているのかもしれない。目隠しをした状態でお手玉を行えるようになるには、やはり目隠しをした状態で強制的に視覚以外の感覚器から得られる情報だけで学習を行う必要があるのではないだろうか？

第 4 章

まとめ

4.1 実験のまとめ

実験の結果から、お手玉の運動制御において視覚情報が使われていることがわかった、しかし注意しなければならないのは、視覚は常に必要ではなく誤差を修正するためにたまに使われるということで、また熟練度により情報獲得の目的や能力 (情報獲得に必要な時間など) が大きく異なってくる。このような理由で、熟練するほど視覚情報制限の影響を受けにくくなるのだろう。したがって、液晶シャッター眼鏡で部分的に視覚情報を制限する実験では、制限する時間や部分、その他の実験条件などで結果が大きく変わる可能性がある。

実験 3, 4 の結果では、頂点を基準にした 100 msec 前半と後半の視覚情報制限では閉じる場所でのパフォーマンスの違いは見られなかったが、どちらも視覚情報を制限しない条件よりはパフォーマンスの低下があった。これはつまり、頂点付近が運動制御に重要な役割を果たしているが、軌道のどの部分が大事というわけではなく軌道の一部分が見えさえすれば、精度が低下するが制御可能であることを示唆している。また、熟練するほど運動制御に必要な見えの情報は少なくてすむため、部分的な視覚情報制限の影響を受けにくいはずである。

では、なぜ玉の頂点付近が大事なのだろうか？ 空中に投げ上げられた玉は、重力によって落下していく。水平方向の速度は等速度であるが、垂直方向は頂点付近はほぼ速度 0 で、地面に近づくほど速い速度で移動している。人間がパシュートで目標を追従できる速度には限界があり、動いている物体の速度が 30 度以下であれば、眼球は滑らかに追従する。それ以上の速度ではサッカードが生じてしまうので、もしパシュートという眼球運動によって視覚情報が獲得されているならば、あまり高速で移動していない部分を見る方が賢明である。しかし、周辺視や網膜上の像がどのくらいの速度で移動しているかといったことから、いくつかの情報を引き出すことができるので、必ず頂点付近から情報を得なければならないというわけではない。ただし、視覚運動変換によって手の軌道修正が反映されるに

は時間がかかるため、頂点よりも後半の軌道はあまり重要ではないと思われる。

また視覚情報から得られる情報は単に玉を受け取るときに必要な手先の位置修正だけでなく、運動全体のサイクルを一定に保つためのタイミング情報も獲得している。なぜなら、玉を受け取るとき玉が手に触れた直後に把握動作が開始されているからである。これは触れたという情報を得てから閉じるという解釈では動作が早すぎるわけで、あらかじめ玉が手に触れる時間が予測されているものと思われる。人が対象物をつかむときに手の形を対象物にあわせることを pre-shaping というが、対象物の大きさや形、機能に応じて事前に手形状を形成しているのである。しかし、この動作もまた必ず起こるというわけではない。視覚情報を制限した場合には正確な玉の落下位置がわからないために、玉の受け取り時に手を広げてなるべく落さないようにする戦略が働くことがある。

このように、わずかな条件の違いにより運動制御の方法が微妙に変化するのである。したがって、個々のデータを比較しながら検討を行うのでは問題の本質がなかなか見えてこない。そこで、実験結果をもとにして脳が行っている処理と各感覚器との情報のやりとりについて仮説を立てることにした。

4.2 お手玉における脳と感覚器の役割

お手玉では複数の玉を扱うため、1つの玉にかけられる時間にもかなりの制約が加えられる。このような運動課題を行うには玉の動きを予測する内部モデルが重要な役割を果たしていると考えられる。そこで、このような内部モデルがあると仮定した上で、お手玉を行うために脳内で起こっている情報の流れについて考察する。

まず最初に、運動系に対して投げ上げの指令を出すと同時に、脳の中枢部では玉の運動軌道予測が開始される。この予測が完全であり、なおかつ指令どおりに玉を投げ上げることができたならば、予測だけで玉を受け取るときの運動計画を立てることができるだろう。しかし、実際は意図したように正確には投げ上げることはできず、玉が落下する位置や時間には誤差が生ずる。したがって、まず体性感覚フィードバック、そして視覚情報によって玉が意図した軌道を描いているが確かめることが必要である。

そのとき、脳は玉の軌道から有用な情報を獲得するために、視線を移動させる。これには2つの可能性が考えられるが、1つはあらかじめ玉が出現すると予想される位置に視線を動かしておいて玉が現れるのを待っている場合と、もう1つは玉が上がってくるのに対し直接玉に視線を向ける場合があると考えられる。自発的な眼球運動による網膜像変化は運動知覚をひきおこさないが、眼球運動の移動も、網膜像の変化も、運動の知覚に関係する。上級者では他の物体に視線を向けることで意図的に眼球運動を抑制することができるが、なぜ通常の状態で玉に視線を向けるのか理由はわからない。おそらく有用な情報を獲得するために眼球を動かしていると考えられる。

眼で玉を捕らえる前には、すでに体性感覚フィードバックによって玉のおおまかな落下位置は予測できているはずである。これは完全に視覚を遮断した状態でも、投げ上げたときの体性感覚でだいたいの落下位置が計算できるからである。

玉が視野に入り、その軌道が予想通りであることが確認できれば、玉を受け取る手への運動指令を決定することができる。この場合は、もう視覚情報を獲得する必要がないという理由で、玉が頂点付近で視線が右に戻る動作が起こっている。このような状況の場合、視覚情報の制限による影響が少ないものと考えられる。

一方、玉が予想と異なる軌道を描いている場合は、体性感覚から生成された運動指令を修正するために、より長い時間の視覚情報が必要になると思われる。玉の投げ上げが不安定であったときの熟練者の戦略として、玉を高く投げる方法が頻繁に用いられる。すなわち玉が空中にある時間を長くし、運動が継続できる限界の時間まで玉を追うことによって、落下位置の予測と腕の軌道修正をしているものと考えられる。このような状況で、視覚情報が制限されると運動制御に必要な視覚情報が得られないために、お手玉を継続することが難しくなる。

図 4.1, 4.2は、視覚系や運動系が脳の予測のもとにどのような働きをしているかを、初心者と熟練者に分けて表したものである。ただし、1つの玉にのみ着目しているので、実際には複数の玉が連続的に重なっており、少なくとも視覚系と運動系に関しては1つの玉に動作が割り当てられている場合には同時に他の玉の処理は行えないが、中枢については複数の処理が同時に行われる可能性がある。

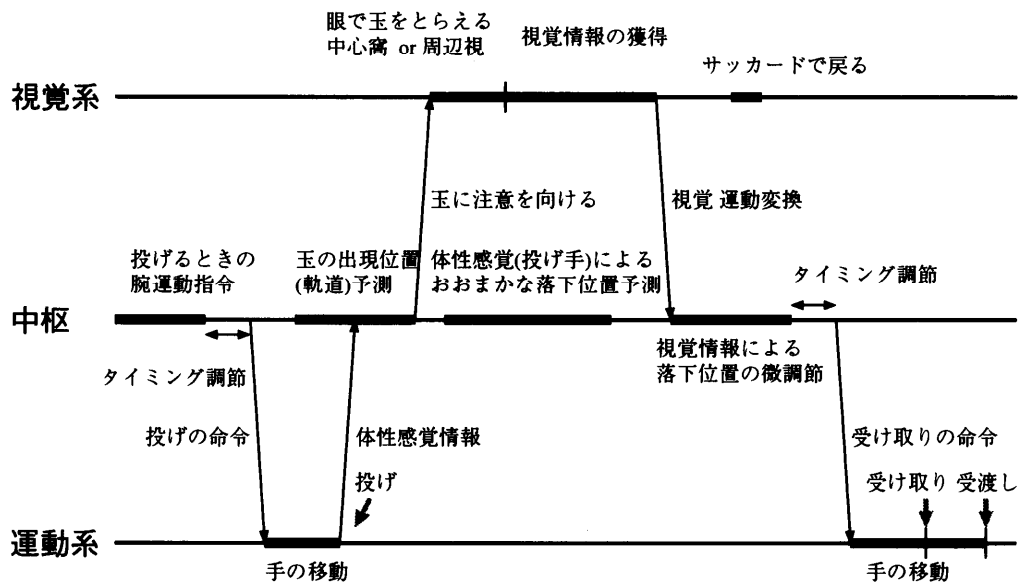


図 4.1: 初心者の視覚系と運動系の情報処理過程

初心者と熟練者の違いはこうである。まず初心者は視覚から得られる情報を主に制御を行っているのに対し、熟練者では玉が予測通りの軌道を描いているかといった確認の意味でしか視覚を使っていないことである。おそらく、熟練者の場合でもたまに視覚を使って玉の受け取り微調節を行っているのだろうが、それは玉の投げ上げが極端に不安定な場合や、特殊な技や技の切替えなど特別な場合のみ使われているのだろう。技の切替えのときなど、視覚情報を獲得しやすくするためわざと1つだけ玉を高く投げ上げたりするにはこういう理由があるからなのかもしれない。

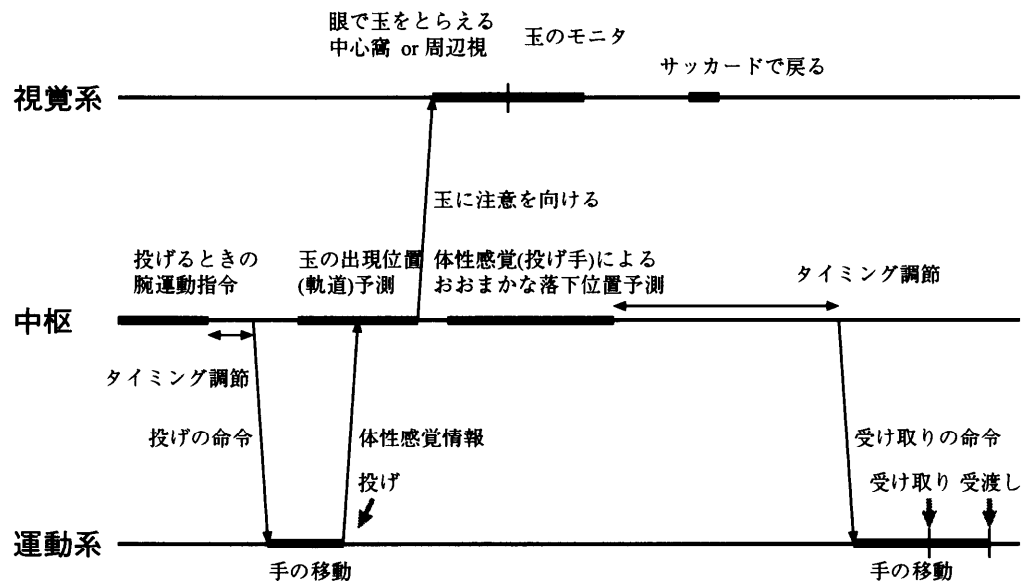


図 4.2: 熟練者の視覚系と運動系の情報処理過程

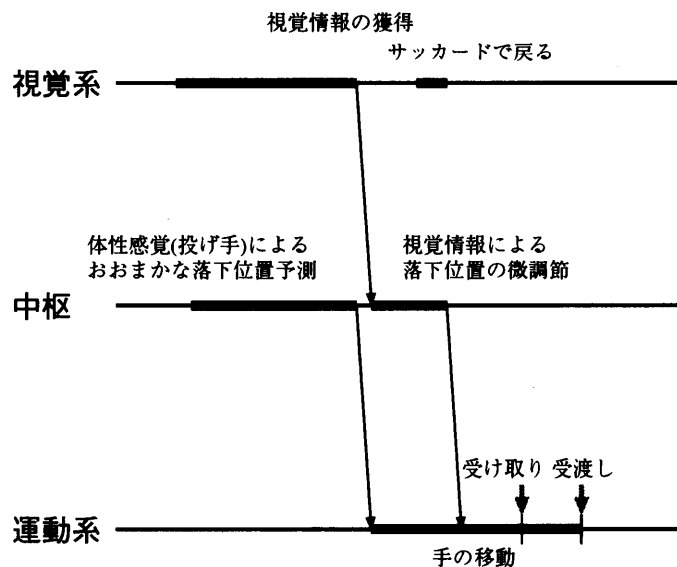


図 4.3: 手の移動中に視覚運動変換が行われている場合

図 4.1では、体性感覚で精度の低い落下予測が行われた後、視覚情報からより正確な受け手の位置修正が行われていることになっている。これは図 4.3のように、体性感覚のみで手の軌道計算がとりあえず終了して運動計画が立てられ手が移動しているとき、視覚運動変換による微調節が行われるということも十分考えられる。

お手玉の場合、投げや受け取りの動作を単に速くすればいいというわけではなく、お手玉のサイクルを狂わせないようにタイミングで各動作を実行しなければならない、図のタイミング調節はそのような理由で必要である。

4.3 お手玉の情報処理

お手玉の運動制御は複数の感覚器から得られる情報をもとにして行われており、その時間的な処理の流れについて説明した。しかし、これまでの説明では各処理がどのように関係し情報のやりとりを行っているかということには触れなかった。そこでお手玉に必要な情報処理を、情報の流れに注目して図式化したのが図 4.4である。

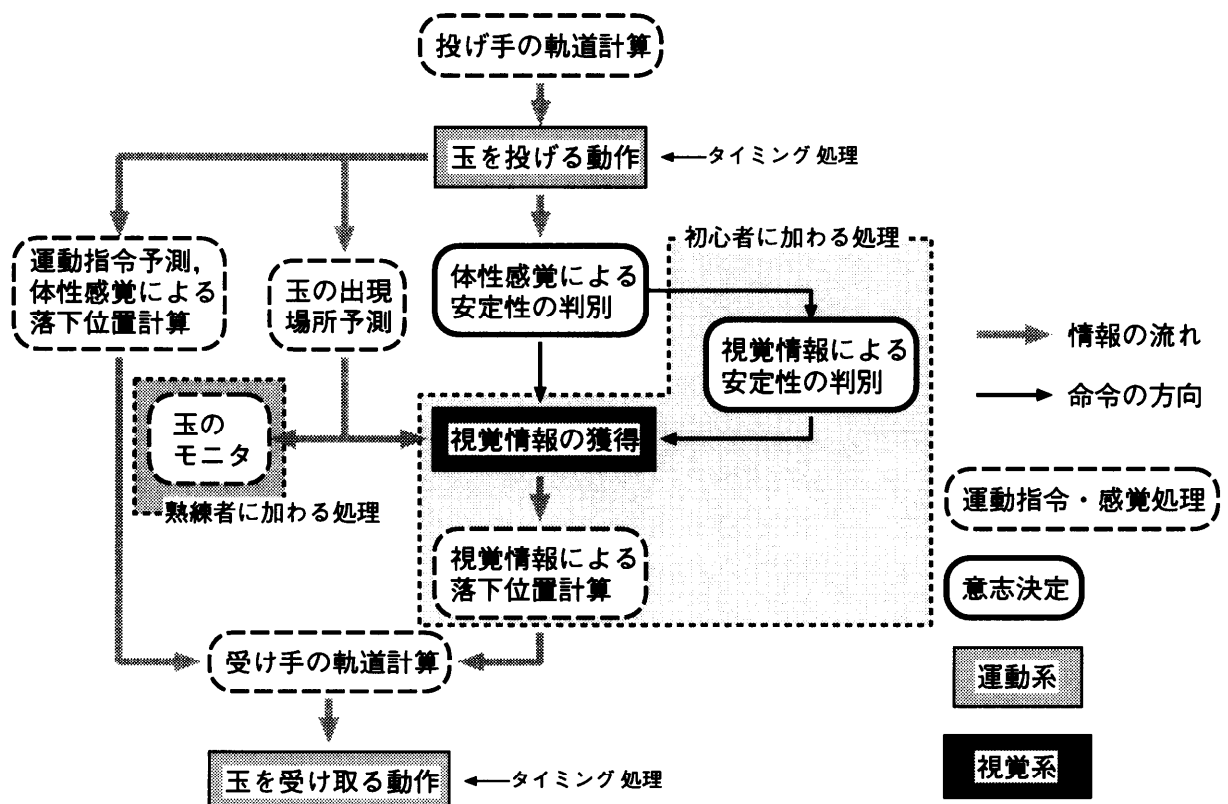


図 4.4: お手玉の運動制御処理の流れ図。上から下に時間が流れている。これらの各事象はお手玉の動作を一定に保つためのタイミングに支配されている。なおこの図には玉の受渡し動作が省略されているが、玉を受け取る動作から次に玉の受渡し動作、そしてまた玉を投げる動作の繰り返しである。このタイミングは感覚器から得られた情報をもとに調整がされていると思われる。

例えば玉を投げる動作からは、体性感覚による落下位置計算、玉の出現位置予測、体性感覚による安定性の判別に情報が流れ、それらはこの情報をもとに処理を行っているわけである。また、受け取り手の軌道計算では、体性感覚による落下位置計算、視覚による落下位置計算の結果を受け取り、玉を受け取る運動計画を行っている。

初心者の場合、常に視覚情報を獲得し腕の動きに反映させなければ、玉を受け取る時の誤差が許容範囲以上になり失敗してしまう。また、熟練者の場合でも体性感覚で投げ上げが不安定であると判断されれば、まず視覚で確認しそれでも不安定であれば視覚情報を獲得し手の軌道を修正することが考えられる。

つまり、初心者は視覚に頼りがちということになる。視覚を用いた運動制御は時間がかかりすぎて短い時間の運動はうまく行うことができない。つまり、上達するにつれ視覚情報の重要性が低くなって、視覚情報制限の実験でどこを液晶シャッター眼鏡で閉じても場所により差がでなくなるのではないだろうか？

そして、図 4.1, 4.4 で示したように、脳の中では複数のプロセスが並列的に働いておりその 1 つに不具合が生じると、全体に影響を及ぼす。何か異常が起きたときに、全体的な情報処理の流れを乱さないようにうまく補わないと、お手玉は中断してしまう。熟練者が多くの玉を同時に扱えるのは、玉の投げ上げが安定し、不安定な動作から安定な動作に復帰させることができるという制御戦略が学習により獲得されているからだといえる。

お手玉には複数の要素が相互に影響しているため、その全体のメカニズムを明らかにするには更に詳しい検討が必要である。本研究では、お手玉を例題として運動制御における視覚情報の役割を調べるため 4 つの実験を行った。今回の実験では、腕の位置を 2 次元データとして記録した、しかし人間の腕は 3 次元方向に動かすことが可能なため、お手玉における手先の運動を必ずしも正確に記録できたとはいえない。腕の位置を 3 次元で記録することにより、本質的な手先運動の特徴が明らかになる可能性がある。また、玉の動きを記録する装置もより正確に記録しようとするならば、NTSC(30 Hz) よりも高速なハイスピードカメラで撮影し PC の処理能力を高める必要がある。それらは今後の課題であるといえるだろう。

参考文献

- [1] Beek, P. J. and Turvey, M. T. : “Temporal patterning in cascade juggling”, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **19**, 934–947, 1992.
- [2] Beek, P. J. and van Santvoord, A. A. M. : “Learning the cascade juggle : A dynamical systems analysis”, *Journal of Motor Behavior*, **24**, 85–94, 1992.
- [3] Bullock, D. and Grossberg, S. : “Neural Dynamics of planned arm movements : Emergent invariants and speed-accuracy properties during trajectory formation”, *Psychological Review*, **95**, 49–90, 1998.
- [4] Desmurget, M., Rossetti, Y., Prablanc, C., Stelmach, GE. and Jeannerod, M. : “Representation of hand position prior to movement and motor variability.”, *Can J Physiol Pharmacol*, **73**(2), 262–72, 1995.
- [5] Horgan, J. “Profile : Claude Shannon”, *Scientific American*, **262**, 22–22B, 1990.
- [6] 川人光男 : “脳の計算理論”, 産業図書, 1996.
- [7] McLeod, P. and Dienes, Z. : “Do fielders know where to go to catch the ball or only how to get there ?”, *Human Perception and Performance*, **22**, 531–543, 1996.
- [8] 三浦利章 : “行動と視覚的注意”, 風間書房, 1996.
- [9] 苅阪良二, 古賀一男, 中溝幸夫 編 : “眼球運動の実験心理学”, 名古屋大学出版会, 1993.
- [10] 大山正, 今井省吾, 和気典二 編 : “感覚・知覚 心理学ハンドブック”, 誠信書房, 1994.
- [11] 阪口豊 : “触知覚における感覚統合と能動的認識”, 電子情報通信学会誌, **76**, 11, 1222–1227, 1993.
- [12] 阪口豊 : “動きの予測を伴う能動的認識のアルゴリズム”, 日本ロボット学会誌, **12**, 5, 708–714, 1994.

- [13] 阪口豊, 中野馨: “「注意」を考慮した随意運動制御のモデル”, 電子情報通信学会技術報告, NC 93-141, 1994.
- [14] 阪口豊: “到達運動制御における視覚情報の役割”, 電気通信大学大学院, 第5回 IS シンポジウム, Sensing and Perception, 60-71, 1998.
- [15] van Santvoord, A. A. M. and Beek, P. J.: “Phasing and the Pickup of Optical Information in Cascade Juggling”, *Ecological Psychology*, **6**(4), 239-264, 1994.
- [16] 山近慎二, 阪口豊: “お手玉の運動制御における視覚の役割”, 電子情報通信学会技術報告, NC 97-101~138, 1998.
- [17] Whiting, H. T. A., Alderson, G. J. K. and Sanderson, F. H.: “Critical time intervals for viewing and individual differences in performance on a ball-catching task”, *International Journal of Sport Psychology*, **4**, 155-166, 1973.
- [18] Whiting, H. T. A., Gill, B. and Stephenson, J.: “Critical time intervals for taking in flight information in a ball-catching task”, *Ergonomics*, **13**, 265-272, 1970.
- [19] Whiting, H. T. A. and Sharp, R. H.: “Visual occlusion factors in a discrete ball catching task.”, *Journal of Motor Behavior*, **6**, 11-16, 1974.

謝辞

本研究を進めるに当たり，いろいろと御指導をいただいた阪口豊 助教授，そして数々の助言をしていただいた出澤正徳 教授に深く感謝いたします。本研究に協力していただき，またお手玉について多くのアドバイスをしてくださった前田和宏さん，日本大学大学院理工学研究科の柳川一貴さんには心から感謝いたします。そしてヒューマンインターフェース学講座のみなさまに深く感謝いたします。

付録 A

玉の軌道データを曲線近似する方法

実験 1, 2 では眼球運動や腕の動きが起こる時間を, 玉の頂点軌道を目安として表している. しかし, 両者のサンプリング周波数が 300, 30 Hz と 10 倍もの差があるため, 玉の頂点を軌道内の最も値が高い時刻としただけでは 30 msec もの誤差が生じてしまう可能性がある. 300 Hz で記録したデータと計算を行うには, ある程度の精度まで高める必要があるが, 玉のデータは重力に影響を受けて放物線を描いているので, 時間と軌道の垂直成分で構成される 2 次元データを曲線近似することで玉の頂点を 300 Hz の精度で求めることができる.

まず, 頂点が含まれる 2 点の時間を検出し, その 2 点を含む周辺 4 点から 2 点間を曲線近似した. この 4 個の点から 3 次関数を決定しその結果を利用して, 2 点間の値が最も高い時刻を頂点時刻とした.

A.1 3 次関数による曲線近似

N 個の点を通る関数は $n - 1$ 次の式になるが, 頂点を近似するには頂点付近の 2 点間が近似されればよい. 図 A.1 を例にして説明すると, 2 番目から 3 番目までを近似したい場合, 1 から 4 番目までの 4 個の点を用いて 3 次の関数を決定し, その結果から 2 番目から 3 番目までを近似していく方法がとられる. そして 2 点間の各値は次の式から求めることができる.

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^4 x_i B_i(t) = x_1 B_1(t) + x_2 B_2(t) + x_3 B_3(t) + x_4 B_4(t) \\ y = \sum_{i=1}^4 y_i B_i(t) = y_1 B_1(t) + y_2 B_2(t) + y_3 B_3(t) + y_4 B_4(t) \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

$x_1 \sim x_4, y_1 \sim y_4$ は、曲線を近似するための点座標値である。この関数は混合関数と呼ばれ、 $B_1(t), B_2(t), B_3(t), B_4(t)$ はその方程式の係数を表している。この係数をどのように決めるかによっていくつかの曲線近似の方法があるが、係数を理論的に求めるのは難しくなるのでここでは実験で用いた係数のみ解説する。

A.2 曲線近似の係数

玉の頂点を推定するときに用いた係数を式(A.2)に示す。なお、式(A.1)から近似される曲線は $x_2 \sim x_3$ の間であり、 t は、 x_2 と x_3 間の補間点位置 0~1 を表している。つまり、 t が 0.5 だった場合、 x_2 と x_3 の中間点を表していることになる。実験のデータ処理では、疑似的に玉のサンプリング周波数を 300 Hz にしなければならないため、 t のきざみ幅を 0.1 とした。

$$\begin{cases} B_1(t) = \frac{-t(t-1)(t-2)}{6} \\ B_2(t) = \frac{(t+1)(t-1)(t-2)}{2} \\ B_3(t) = \frac{-(t+1)t(t-2)}{2} \\ B_4(t) = \frac{(t+1)t(t-1)}{6} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

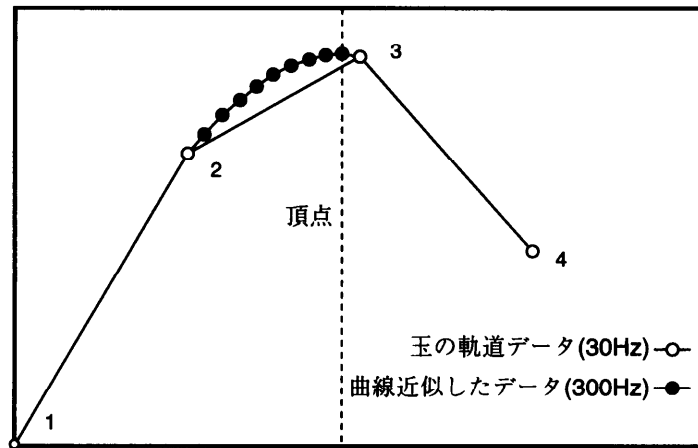


図 A.1: 玉の軌道を曲線近似した例。頂点が含まれる 2 点間を曲線近似し、曲線内のピーク点を頂点とする。