

お手玉の運動制御における視覚情報の役割 (2)

山近 慎二 阪口 豊

電気通信大学大学院 情報システム学研究所
東京都調布市調布が丘1-5-1

あらまし 運動制御における視覚情報の働きを調べるため、お手玉をしている際の眼球運動、手の運動、玉の軌道を同時に計測した。玉の動きに対する眼球と手動作のタイミングを解析した結果、次の玉に視線を向けるためのサッカドが生じる時刻は必ずしも一定でないことがわかった。また、液晶シャッターを用いて視覚情報を部分的に制限すると、玉を受け取る際の誤差(手と玉の中心距離)が増大した。特に、片目の視覚情報を完全に取り除くと、奥行き方向の誤差が著しく増大することがわかった。これは、受け手への運動指令を定める上で両眼視による視覚情報が重要であることを意味する。以上の結果をふまえて、視覚情報の獲得と運動制御の関係について考察した。

キーワード 運動制御, 眼球運動, 視覚情報獲得, お手玉, 能動的認識

Role of Visual Information in doing Ball-Juggling (2)

Shinji Yamachika and Yutaka Sakaguchi

Graduate School of Information Systems, University of Electro-Communications
1-5-1, Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo 182-8585, JAPAN

Abstract In order to clarify the role of visual information in motor control, the authors measured eye, hand and ball movements during playing ball-juggling. Eye movements were approximately synchronized with ball movements, but their phase relation was not constant. Moreover, catching error (displacement between hand center and ball center) increased when visual information was restricted using LCD shutter eye-glasses. Especially, when players performed juggling monocularly, the error increased remarkably in depth direction, suggesting that binocular visual information was utilized for estimating the ball trajectory. The schematical model of visual information acquisition and its relation to motor control was discussed.

key words motor control, eye movement, visual information acquisition, ball juggling, active perception

1 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。それでは、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？本研究は、人間の運動制御メカニズムを解明するため、お手玉という運動スキルを対象とし、視覚と運動制御の関係に注目して実験を行った。

2 実験装置

実験で使用した計測装置の配置を図1に示す。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いる。図にはないが眼球運動を計測する装置として、眼電位を生体アンプで増幅して計測する眼球運動計測装置がある。ただし、今回の実験では眼球の絶対位置を計測しなかったため、視線が空間内のどこを向いているかはわからない。

3 実験1：お手玉の眼球運動

お手玉をしているときの眼球の動きを観察すると、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。視線を向けている対象がかならずしも注意の対象であるとはいえないが、どこに視線を向けているか調べるにより、どのようにして視覚情報を得ているかといった手がかりを得ることができる。

そこで2名の被験者に対してお手玉をしているときの眼球運動を計測し解析を行った。



図1 実験装置の構成

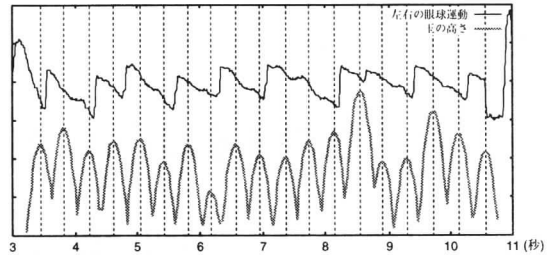


図2 お手玉が3個のときの眼球運動

3.1 実験結果

3個の玉でお手玉を行ったときの眼球運動を玉の軌道とともに図2に示す。上の部分は被験者のき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。図の下部分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。

この図からわかるように、玉が投げられると、まず右から左に向けてなめらかな動きが起り、続いて左から右にむけてサッカードが起る。ただし、サッカードが起るタイミングは一定でなく、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開始時刻のヒストグラムを作り、眼球運動のタイミングを調べた。なお、サッカード開始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)。

被験者 KM(中級者)のヒストグラムを図4に、被験者 KY(上級者)のヒストグラムを図5に示す。ヒストグラムの幅は10msで、縦軸はサッカードの起こった回数、横軸は玉の頂点時刻を0とした時間を表している。例えば、200msというのは、頂点から200ms後にサッカードが起こったことを示している。これらの図からわかるように、玉が頂点にさしかかった時と頂点より前の-180ms、頂点よりも後の150msにサッカードが起きていることがわかった。また、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800msである。なお、サッカードの起こらなかったデータは取り除いた。

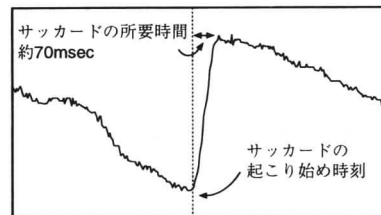


図3 サッカードの起り始め時刻

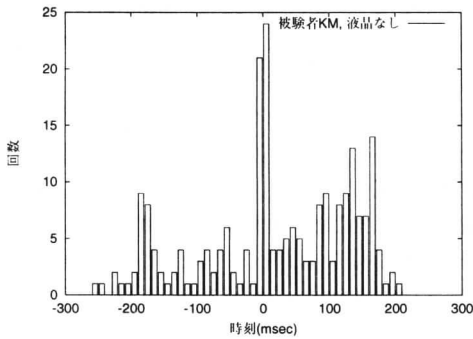


図4 被験者 KM のサッカードが起こった時刻

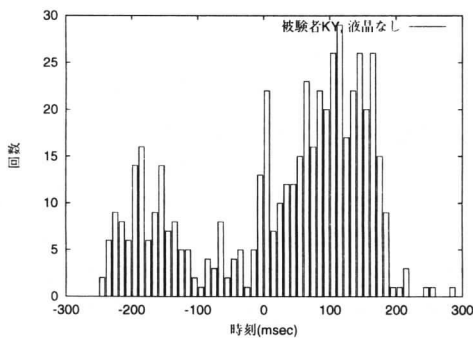


図5 被験者 KY のサッカードが起こった時刻

3.2 考察

サッカードが起こる時刻は、大きく分けて3つに集中していることがわかった。しかし、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150ms後のサッカードは次の玉に備えるためと考えられる。頂点より-180ms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200ms)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するのではなく、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接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6.(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。

ただ、実際の計測データは時間的に連続しているため、頂点より前と後の山は2つの山ではなく連続した1つの

山である可能性が高い。それでも、頂点より前に集中しているサッカードは、頂点よりも後のものとは別であると考えるのが自然である。つまり、視野に次の玉が入っている状態で、視野内には玉を見ているとは考えにくいからである。

さて、先に述べたように、視線を右に戻すサッカード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-100~0msの区間であり、この部分ではなるべくサッカードを起こさないようにする戦略が働いている可能性がある。

4 実験2：受け取り時の腕の動き

実験1では、眼球運動に焦点をあてて実験を行ったが、次の実験では視点をえて体性感覚や玉を扱う腕の制御という観点から検討する。

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。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200~300msであると言われている。

したがって、玉を確実に受け取るには、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、その位置に手先が到達するように腕の軌道を決定して肩・肘・手の筋肉に指令を送り、更に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100ms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100ms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。

玉を受け取るために左手が動き始める時刻を調べることで、運動制御に必要な情報をいつ感覚器から得ているのか推測できると考えられる。そこで、玉を受け取る手である左手の動きを対象にして計測を行った。

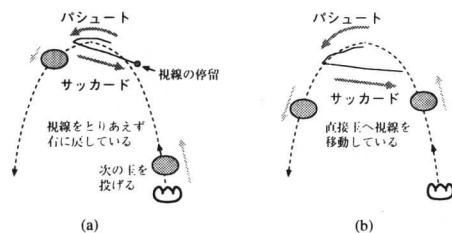


図6 (a) 玉が頂点を過ぎた時刻にサッカードが起こり、次に上がってくる玉に備えるため視線が停留している。(b) 玉が頂点に到達する前にサッカードが起こっており、玉に視線を合わせるような眼球運動が生じている。

4.1 結果

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100~180msほど後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1に、ヒストグラムを図7,8に示す。

表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

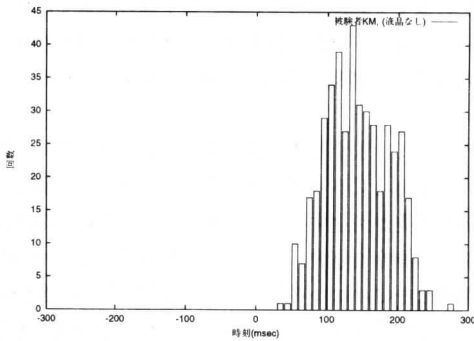


図7 被験者 K.M の左手が動き始めた時刻

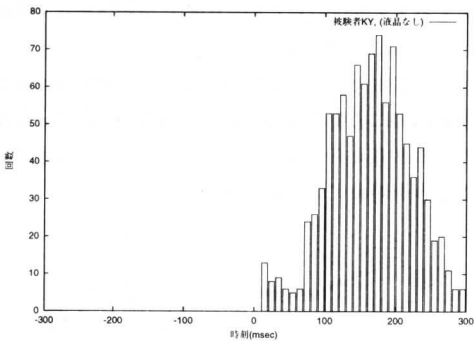


図8 被験者 K.Y の左手が動き始めた時刻

4.2 考察

サッカーとは異なり、玉の受け取り動作は一定の時刻内で開始されていることがわかった。これは、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100~180ms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。

それでは、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、人間がそのような動作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、遠心性コピーに基づく予測、投げ上げ時の体性感覚、及び視覚情報に基づく落下位置の計算が終っている
2. 遠心性コピーによる予測と体性感覚に基づいて手を動かしておき、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、受け取りにいつている最中なのかということである。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、既に視覚による目標情報の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ことから、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(図10)。しかし、どちらが正しいのか、あるいは状況に応じて戦略が変化しているのか、以上の結果からだけでは判断できない。

左手の軌道計算には、視覚からの情報獲得が反映されるタイミングによって2つの可能性が考えられることを示したが、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9.aは、左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、図の下が手前側を表している。1番は実験中最も多く現れた典型的な軌道、2番には手の移動距離が比較的に長いと思われるものを、そして3番には奥行き方向に手先が移動する

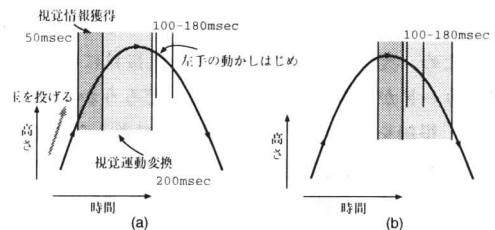


図10 (a) 手を動かす前に視覚による修正が行われている場合。(b) 手を動かしている途中に視覚情報が反映される場合。

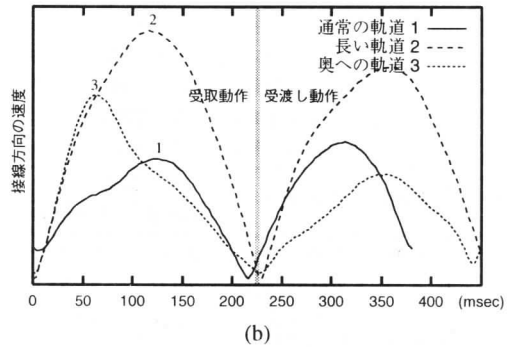
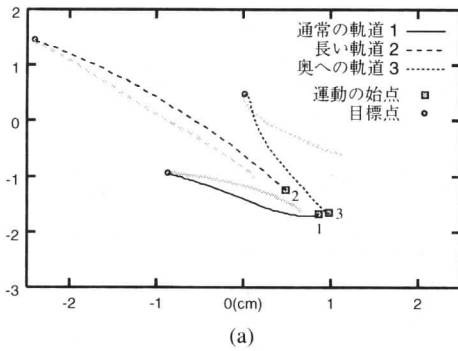


図9 被験者 KM の結果 (a) 左手の軌道. 目標点は玉の落下位置と手の移動先を, それに続く線は玉を右手に渡すときの軌道を表している. (b) 運動の始点から目標点, そして玉を右手に受け渡すまでの軌道における接線方向の速度で, 相対値である.

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濃い線分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線分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 9.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, 200 ms 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, 今回の計測では, 2 次元の動きしか計測できなかったため 3 次元の速度波形を知ることはできないが, 玉の受け取り時に手は鉛直方向にも動いている. 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.

以上の結果から推測すると, まず玉が落ちてくる時刻があらかじめわかっていること, そして, 手先を移動させるときの運動計画には受け取り動作だけでなく, 玉の受渡し動作までが含まれる経由点を通る到達運動であると考えられる.

まず, 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玉を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. したがって, 玉をとりに行く動作と玉を右手に渡す動作は, 1 つの運動として計画されていると考えられる.

5 実験 3: 視覚情報の制限が玉の受取誤差に与える影響

玉の受け取り動作に関わる脳の処理過程は, 次のような流れに沿って行われていると考えられる. まず, 玉の投げ動作における遠心性コピーからおおまかな落下位置が計算され, 次に視覚情報を用いて手の運動指令が修正されることにより受け取り動作の精度が高められている (図 11). 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手先の運動を修正していると考えられる.

もし運動制御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玉の落下位置推定がうまく行われなくなるため, 玉を受け取るときの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利用されているならば, 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情報が獲得しにくく, 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.

これら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.

5.1 実験方法

これまでの実験と同様に, 玉の位置計測を行うため被験者の正面からビデオカメラで撮影し, その画像をもとに液晶シャッター眼鏡の開閉を行った. 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

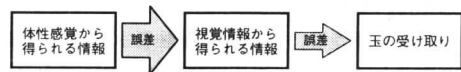


図 11 体性感覚から計算した落下位置の誤差が, 視覚情報を得ることにより減少する.

表2 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示しておいた。実験条件は、1が視覚情報の制限がない場合、2が100msの時間ほど視覚情報の制限を行う場合、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。なお、平均回数を除くすべての単位はcmである。

被験者	実験条件	誤差		平均値		標準偏差		平均継続回数
		平均値	標準偏差	x	y	x	y	
KM	制限なし	1.683	0.942	0.478	0.240	1.331	1.294	14.5
	100ms 制限	2.471	1.584	-0.049	-0.406	2.021	2.097	12.3
	片目を制限	3.376	1.973	1.049	0.048	2.101	3.137	7.0
KY	制限なし	1.196	0.622	0.287	-0.266	0.900	0.926	32.3
	100ms 制限	1.457	0.697	0.383	-0.283	1.080	1.105	32.3
	片目を制限	2.476	1.911	-0.044	0.942	1.534	2.561	13.6

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12に基準とした中心位置を示す。

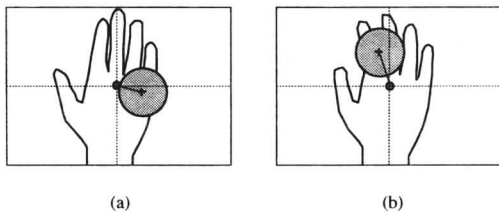


図12 玉の受け取り位置の誤差。黒丸が手の中心を表しており、それと玉の中心との差で受け取りの誤差を計算している。(a)被験者に対して左右の誤差が生じた場合の例。(b)奥行き方向の誤差が大きい場合の例。

実験条件として、次の3つを設定した。

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100msの時間だけ両目の視覚情報制限を行う。
3. 左目を常に閉じた状態にし、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。なお、玉の受け取り時の位置がカメラを大きくはずれ、誤差計測が不可能なデータは取り除いた。

5.2 実験結果

表2に受け取り誤差の平均値と標準偏差を示す。図13, 14に、誤差楕円を示す。

玉の受け取り誤差は、全体的に被験者KMよりも被験者KYの方が小さかった。平均継続回数は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。また、実験条件3では被験者間で大きな差が見られないのに対し、実験条件2ではKYは液晶シャッ

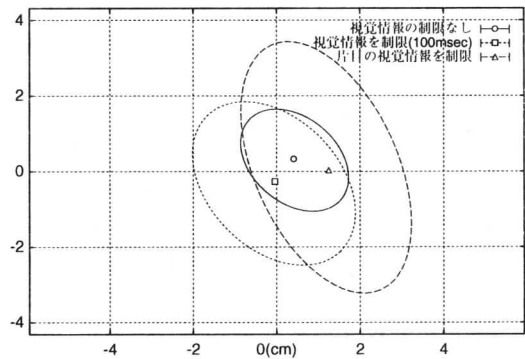


図13 被験者KMの誤差楕円

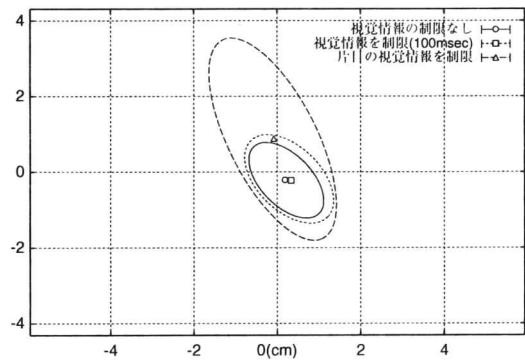


図14 被験者KYの誤差楕円

タ眼鏡による影響がKMよりかなり小さい。これは熟練度によって頂点付近の視覚情報への依存度が異なっていることを示唆している。

実験条件別の結果を比較すると、実験条件1,2では、左右方向と奥行き方向の誤差が同じくらいであるのに対し、実験条件3では奥行き方向の誤差が左右方向と比較してかなり大きいことがわかる。人間の手は縦長であるため、ある程度の奥行き方向の誤差があっても運動を継続するこ

とができると思われるが、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も明確に現れている。

5.3 考察

視覚情報を制限しない条件 1 の受け取り誤差を基準にして他の条件を比較してみると、実験条件 2 では、100 ms 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が十分に得られないために左右、奥行き方向ともに誤差が増えるはずである。しかし、熟練者では、ほとんど影響がない結果が得られた。これは視覚情報の獲得が短い時間ですむ、あるいは軌道のどの部分からでも必要な情報が得られる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と考えられる。

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。奥行き情報は単眼からでも得ることができるが、片目を隠すことで誤差が増えたということは、両眼立体視が特に重要な役割を果たしていることを意味する。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が少なくなるなど、パフォーマンスの低下があった。これはつまり、上級者でも奥行き情報に基づいて運動の修正していることを意味している。

客観的なデータは示さないが、誤差の時間的変化を調べると、奥行き誤差はある時点を境に、徐々に増加することが多かった。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に制御が行えるが、何らかの原因で運動が不安定になった時点で視覚による運動修正の効果が効いてきていることを示唆している。視覚情報を制限しない場合では、視覚情報を使うことで誤差は一定の値以下に保つことができるのに対し、視覚情報を制限する場合は誤差が増えて行くことになる。

6 全体的考察

以上の実験から、お手玉の運動制御において視覚が一定の役割を果たしていることを示す結果が得られた。しかし、注意しなければならないのは、視覚は恒常的に用いられているわけではなく、誤差を修正するためにたまに使われるということである。視覚情報を制限しても極めて正確に玉の受け取れることがあるということは、視覚以外の感覚器からの情報をもとにして制御が行われていることを意味する。

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 の結果では、頂点を基準にした 100 ms 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が低下した。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。人間がバ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 deg/sec 以上になるとサッカーボールが生じてしまう。もしバ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。

視覚情報から得られる情報は単に受け取り位置の決定だけでなく、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。先に述べたように、玉を受け取る時に手を閉じる動作は、玉が手に触れた直後に開始されているが、触れたという感覚情報を得てから閉じるのではなく、あらかじめ玉が手に触れる時間を予測して閉じていることを表している。これは時間を含めた玉の軌道予測が重要であることを意味している。

人が対象物をつかむときに事前に手の形を対象物にあわせることを pre-shaping というが、これと同じことがお手玉を行う際にも起こっていると考えられる。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、お手玉では多数の因子が相互に関連するた

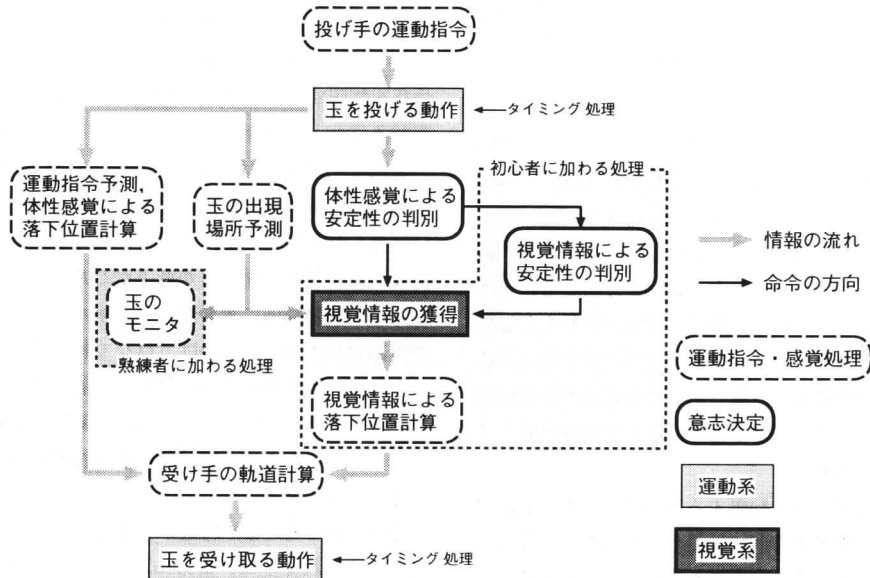


図 15 お手玉の運動制御処理の流れ図。

め、個々の実験データを検討するだけではメカニズムの全体像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た。

これまで繰り返し述べてきたように、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を図15のように図式化してみた。この図は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されていると思われる。

例えば、玉を投げる動作からは、遠心性コピーや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と考えられる。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

げ上げが不安定であると判断されれば、視覚情報を獲得し手の軌道を修正すると考えられる。また、今回は玉の受け取り位置だけを調べたが、受け取りのタイミングも重要である。

このように、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。特に、腕や玉の位置を3次元的に記録することにより、更に細かい運動メカニズムを明らかにできるだろう。これらは今後の課題である。

[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] 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.
- [4] 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研究報告, NC 97-130, 1998.