

お手玉の運動制御における視覚情報の役割

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、お手玉を例題として実験を行なった。実験1では、被験者の眼球運動と玉の軌道を同時に計測し、その関係から制御に必要な視覚情報がどの段階で獲得されているかを検討した。実験2では、液晶シャッター眼鏡を用いて、お手玉をしている最中の視覚情報を動的に制限し、お手玉のパフォーマンスに与える影響を調べた。その結果、運動制御において視覚情報は予測を補間する形で機能していること、視覚情報の獲得や処理は状況ごとに能動的に行われていることを示唆する結果が得られた。お手玉を行なっている最中の脳内での情報処理の流れを検討した。

キーワード 運動制御, 視覚情報獲得, 視覚フィードバック, お手玉, 眼球運動, 能動的認識

Role of Visual Information in doing Ball-Juggling

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 The authors investigated the role of visual information in doing Japanese ball-juggling (Otedama), in order to clarify how our brain obtains and utilizes the visual information in motor control. In Experiment 1, the eye movements were measured when a subject did ball-juggling. The result showed that the eyes repeated saccadic movements and pursuit movements alternatively synchronizing with the ball movement. In Experiment 2, the authors manipulated the visual information during the movement. Subjects wore a LCD shutter eye glasses, which were closed with synchronized with the ball movement. The result showed that the subject's performance dropped most when the shutters were closed at the later part of ball movements. The schematic model was discussed to explain the experimental results.

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

1 はじめに

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いる。そして、そのような視覚の働きが、対象を認識する場面だけでなく、運動制御においても重要であることはいうまでもない。

それでは、脳は運動制御においてどのようにして視覚情報を利用しているのでしょうか？人間は、注意のメカニズムに用いて、目的に応じて適切な感覚情報のみを選択的に処理することより、効率的に外界を理解していると考えられる [1]。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 [2, 3]。

このような問題意識に基づき、本研究では、運動制御においてどのようにして視覚情報が獲得され、また、利用されているのかを明らかにするため、運動課題を実行している際の被験者の振舞いを調べた。具体的な運動課題としては「お手玉」を採用した。お手玉を行う際、脳は複数の玉を連続的に取り扱う必要があり、一つの玉の処理に視覚系が費やすことのできる時間が厳しく制限されており、上で述べた選択的な情報処理の特徴が明確に現われてくる可能性が高い。お手玉の熟練者は、重要な視覚情報はいつどうやって獲得すべきかを経験的に習得しており、それが安定した運動制御を行う上で重要な役割を果たしていると考えられる。

具体的には、まず、お手玉をしている被験者の眼球運動を計測し、被験者の眼の動きと玉の動きの関係を検討した。次に、お手玉の動きに同期して閉閉する液晶シャッター眼鏡を用いてお手玉をしている最中の視覚情報を動的に制限し、それがお手玉のパフォーマンスに与える影響を調べた。

2 お手玉の運動特性

お手玉や juggling のような運動は一般に “Ball skill” と呼ばれ、通常、手の数よりも多い玉を空中に投げて、受け取り、また投げるといった動作の繰り返しである (図 1)。

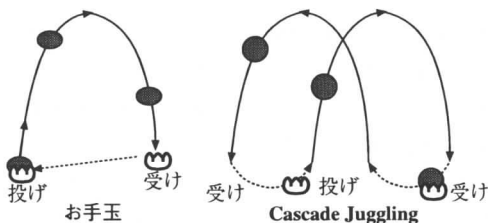


図 1 お手玉の軌道

これらの動作は一見すると単純そうに見えるが、その遂行には、正確な投げ上げと視覚による微妙な調整が必要で、技術の習得には長い学習時間を必要とする。

Beek ら [4, 5] は、cascade juggling に関して系統的な実験を行ない、その特性について詳細な報告を行なっている (図 1 に示すように、cascade juggling では、お手玉と若干異なり、投げと受けの動作を左右両方の手で交互に行なわれる)。例えば、彼らは、juggling 上達の目安として、次の指標を提案している。

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

ここで、 t_l は手が玉を運んでいる状態の平均時間、 t_u は手が玉を持たないでいる状態の平均時間である。つまり、 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 よりも大きいのが、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、ball skill においては、運動のタイミングが重要な役割を果たしている。

Beek らは、cascade juggling における視覚情報の働きについても言及している。例えば、プロの juggler は、ボールの軌道のごく一部分だけの視覚情報を与えれば、juggling を充分安定に行なうことができることを報告している。この事実は、視覚情報はあくまで補佐的な役割しかしていないことを意味しているが、逆に、その中に本質的な視覚情報が含まれていると考えることができる。

また、初心者は最初、玉の軌道の頂点付近を見るように教えられているということである。cascade juggling だけでなく、お手玉をするときにも、通常、我々は、玉の軌道の頂点付近に視線を向けていることはすぐに観察できる。このことは、玉の軌道の頂点付近にお手玉を続ける上で重要な視覚情報が含まれていることを示唆する。

しかし、お手玉をしている人の眼の動きを観察すると、玉の動きに応じて眼が左右に動いていることがわかる。したがって、人は必ずしも軌道の頂点を注視している訳ではない。

よく知られているように、網膜の中で解像度が高い部分は、中心窩と呼ばれる一部分であり、おそらく、人は玉の動きを中心窩で捉えるように、眼を動かしているものと予想される (逆に周辺視野で捉えた方がよいという考え方もあり得るが、玉の動きに応じて最適な視線方向が決まるという意味では同じである)。そこで、まず、玉の動きと眼球の動きの関係を調べることで、眼が玉の軌道のどの部分を見ているかを調べる実験を行なった。

3 実験1: お手玉をしているときの眼球運動

3.1 実験方法

実験装置の構成を図2に示す。眼球と玉位置は別々の装置を用いて計測し、両者の同期をとるために、最終的に一つの装置でデータを収集した。

眼球運動は、Permobil Meditech 社の OBER2 を用い、サンプリング周波数 300Hz で計測した。一方、玉の位置は、ビデオカメラを用いてサンプリング周波数は 30Hz 測定し、画像処理によって玉の位置を抽出した。画像処理およびデータの収集は、PC9821 As を用いて行なった。

実験中、被験者にはできるだけ頭を動かさないように指示した。なお、被験者はお手玉に熟練した男性1名で、玉が2個の場合と3個の場合で約1分間計測を行なった。

3.2 実験結果

測定データのうち、まばたきが原因と思われる部分やお手玉が行なわれてないと思われる部分は取り除き、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。手と眼の動きの関係を模式的に表わしたものを図3に示す。図の下半分は玉の高さを時間軸に沿って表示したものであり、周期的に上下に動いていることが示されている。図の上半分は水平方向の眼球位置を示しており、上方向が被験者の右側を、下方向が左側を表している。正確な更正を行っていないため、ここで示すデータは、あくまで眼球運動の全般的な傾向のみを示している。

この図からわかるように、眼球は、右側から左側に向けてなめらかにパシュートの動きをしたのち、左側から右側に向けてサッカード的な動きを示す。お手玉においては、通常、玉は右手で投げられ、左手で受け取られるため、空中での玉の動きは右側から左側に向いている。したがって、左向きなめらかな動きは、玉の動きを反映したものと予想される。

1. 玉が2個の場合

図4に結果を示す。図3に示したのと同じように、右から左に向けてなめらかな動きのあとに、左から右へ向けて跳躍的な動きが見られる。

跳躍的な動きが見られるのは、通常、玉が頂点付近を通過した直後である。すなわち、被験者の視線は、玉の動きをすべて追跡するのではなく、途中で右側に戻ることになる。その後しばらくの間、視線は右側の部分で滞留し、しばらくして次の玉が登ってくるのに呼応して左側へなめらかな動きを始める。

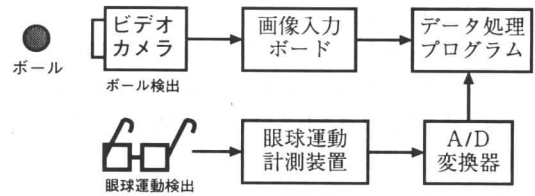


図2 実験装置の構成

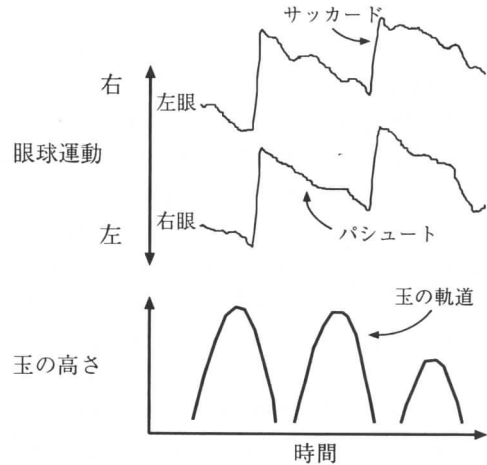


図3 お手玉をしているときの眼球運動の記録

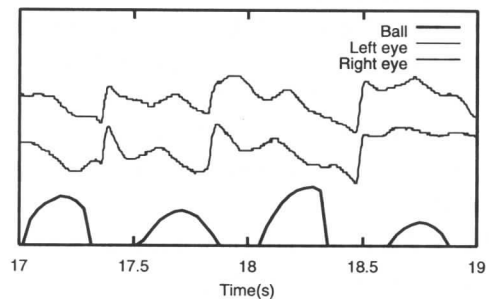


図4 お手玉が2個のときの眼球運動

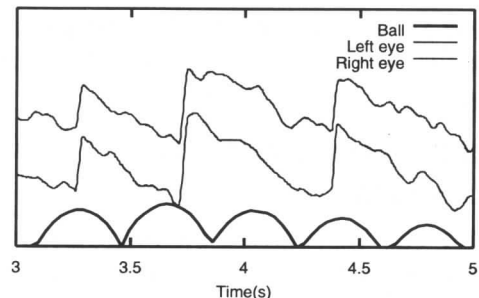


図5 お手玉が3個のときの眼球運動

2. 玉が3個の場合

図5に結果を示す。基本的な傾向は、玉が2個の場合と同じで、右側から左側へのなめらかな動きと左から右への跳躍的な動きが繰り返されている。跳躍的な動きが生じるのはやはり玉の軌道の頂点付近であることが多い。ただし、玉の2個の場合は、1回の投げに対して必ず視線を右側にもどす復帰動作が生じていたのに対し、玉が3個の場合は、かなりの頻度で2回の投げに対して1回の復帰動作という現象が見られた。

3.3 考察

以上の実験結果について、ここで考察を加えておく。

運動制御を行なう上で、単に玉の頂点の位置や速度の情報が必要なのであれば、視線を固定したまま網膜画像情報からそのような情報を得ることも原理的には可能であるが、実際には、眼球は左右に動いていたことから、視覚はそのようなメカニズムで玉の情報を獲得しているのではないことが確認された。また、視線は玉の運動軌道とは必ずしも一致せず、したがって、常に中心窩で玉を捕らえているわけではなかった。したがって、視線が左右に動くのは、そうすることが情報処理を進める上で有用であるからか、あるいは、視覚系の性質として自ずと動いてしまうためなのかは、現段階ではわからない。ただし、左向きのなめらかな眼球運動が、玉の投げ上げの前から始まっていることから、刺激誘導性の運動ではないことが示唆される。

一方、右向きの跳躍的な運動が、玉の軌道の頂点付近で生じることも興味深い。仮に、玉の軌道の視覚情報が、玉を受け取る手への運動指令を計算するために用いられるとすれば、玉の軌道の頂点付近で玉の追跡をやめたという事実は、玉の軌道の前半から運動指令の計算に必要な視覚情報が獲得されていることを意味している。すなわち、この結果は、軌道前半の視覚情報の中に運動制御に本質的な情報が含まれていることを示唆する。

さて、玉が3個の場合には、玉の投げ上げ2回に対して眼球の動きが1回しか起こらない現象が頻繁に観察されたが、これはなぜだろうか？何らかの理由により、眼球の動きが省略されたのであろうか、ある場合には視線を戻さない方が有利なのであろうか。この点については、後ほど再び議論する。

4 実験2: 視覚情報の制限によるパフォーマンスへの影響

実験1では、軌道前半の視覚情報の中に運動制御の上で重要な情報が含まれていることを示唆する結果が得られた。実験2では、この予測を確かめるために視覚情報を一時的に遮断し、パフォーマンスに与える影響を調べた。

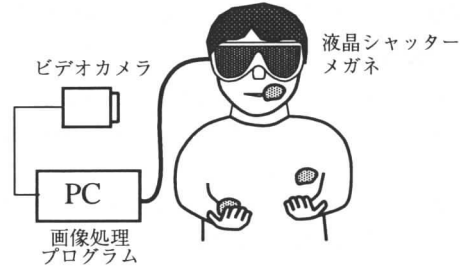


図6 実験システムの構成

4.1 実験方法

実験装置の構成を図6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からの指令にしたがって閉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、その時刻を基準として液晶を閉じる。

シャッターを閉じるタイミングとして、頂点付近、頂点より前の部分、頂点より後の部分の3箇所を設定した(図7)。液晶を閉じている時間はそれぞれ100 msecで、各区間の間に20 msecの間隔をおいた。液晶シャッターは平均して投げ上げ3回に対して1回の割合で、上の三つのいずれかのタイミングで閉じられるが、残りの2回では液晶は閉じない。どのタイミングで閉じるかは等確率でランダムに決めた。

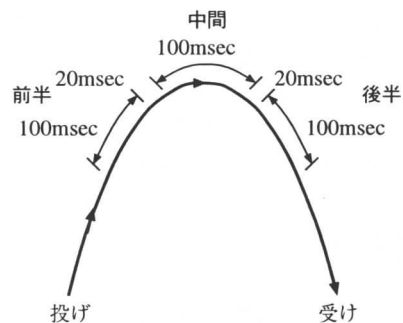


図7 液晶を閉じるタイミングと時間

お手玉の継続判定は、玉が画像に現れる間隔を基準に行なった、すなわち、その間隔が一定以上の時間あいた場合には、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。

被験者は男性2名である。1名は通常の状態でも20回以上お手玉を継続して行なうことができる熟練者で、もう1名は平均6回程度継続させることができる初心者である。1試行を約170秒として、8試行の実験を行った。

4.2 実験結果

実験の結果を図8, 表1にまとめた. 図8の縦軸は, 二人の被験者それぞれに対し, 三つのタイミングで液晶を閉じたときにお手玉が中断した割合(つまり, お手玉の失敗率)を表している. 図の右側には, 液晶シャッタを閉じない場合(統制条件)の失敗率を合わせて示した.

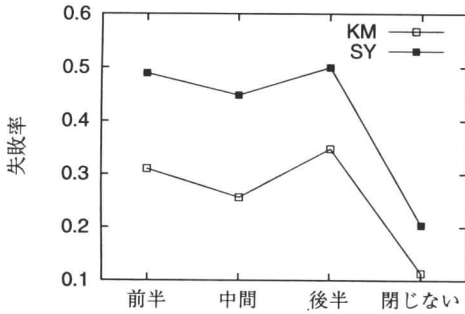


図8 液晶を閉じたときの失敗率

表1 実験2の結果

被験者	前半	中間	後半	投げた回数
KM	53/171	43/168	58/167	1482
SY	66/135	73/163	64/128	1226

液晶を閉じない条件と, 液晶を閉じた条件を比較すると, 前者の方が失敗率が格段に小さい. このことから, 100 msec 視覚を遮断するだけで, パフォーマンスが大幅に低下することがわかる.

また, 視覚を遮断した場合には, 軌道後半の視覚を遮断したときにパフォーマンスが最も低下し, 逆に, 頂点付近の視覚を遮断したときに最も影響が小さいことがわかった. この結果は, 「運動前半の視覚情報が重要である」という実験1から得られた予想とは矛盾するものである.

このような矛盾する結果が得られた理由について, 次節で細かく検討する.

5 考察

冒頭でも述べたように, Ball skill を行なう際には, 正確ですばやい動きが要求され, 同時に, 一つの玉の視覚情報処理にかけられる時間にもかなり制限が加えられる. したがって, このような運動課題を実行するには, 玉の動きを予測する内部モデルが大きな役割を果たしているものと考えられる.

このような玉の動きの内部モデルが存在していると仮定した上で, お手玉の最中での脳内での情報の流れについて考察してみる.

まず, 運動系に対して投げ上げの指令を出すのと同時に, 脳の中脳部では, 玉の運動軌道の予測が開始される. この予測が完全であれば, 予測だけに基づいて脳は玉を受け取る手の動きを定めることができるであろう. しかし, 現実には, 神経系の雑音などの影響により, 意図した通りの運動指令が出されず, その分だけ予測の中に不確実性が生じる. したがって, 視覚の最初の働きは, 玉が意図した通りの軌道を描いているかどうかを確認することであると考えられる.

そこで, 脳は玉の動きを観測するのに有利な位置に視線を移動させる. すなわち, 投げ上げの運動指令情報に基づいて, 玉が出現すると予想されるあたりに視線を動かすのである. 玉が視野に入る以前から, 玉の動きに沿うようなめらかな水平運動が生じているのは, そのようなメカニズムによるものと考えられる. このような眼球運動の制御が, 投げ上げごとの計算によって実現されているのか, それが固定的な動作として実現されているのかはわからないが, 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.

さて, 玉が視野に入り, その軌道が予測どおりであることが確認されれば, それに基づいて受け取る手への運動指令を定めることができる. 仮に, 確認に要する情報処理の負荷が軽く, 玉が頂点に達する前に完了できると考えれば, 被験者の視線が頂点付近で右側に復帰したことが納得できる. すなわち, 運動前半の視覚情報だけで運動制御に必要な情報がすべて得られたために, 次の玉を観測するための準備と解釈できる. このような場合には, 運動の後半でシャッタが閉じられても, 運動の制御には何の影響も現われない. 逆に, 運動前半, 中間でシャッタが閉じられた場合も, 視覚情報処理には短い時間しか要しないために, 受けの動作や次の玉を扱うための眼球復帰動作に及ぼす影響が小さくなると考えられる.

一方, 玉が予想と異なる軌道を描いている場合は, 受けとり側の手の運動指令を生成するために, より長い時間の視覚情報が必要になると思われる. すなわち, 運動が継続できる限界の時間まで玉の軌跡を追うことによって, 落下位置の予測と腕の位置修正をしていると考えられる.

このような状況で, 運動後半にシャッタが閉じられると, 受け手の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. 運動前半や中間が閉じられたときも, 視覚情報が利用できる時間が短くなるために失敗率は上がるものの, 後半の視覚情報を用いて体制を立て直すことが可能になるため, 後半を閉じる場合に比べて失敗率が低く抑えられるものと考えられる.

わかりやすく説明すると, 一週間後が締め切りの仕事に

対して、最初の3日が別の仕事で全く作業が行えない場合と、終りの3日が作業が行えない場合とでは、仕事の中断をあらかじめ知ることができなかつたのであれば後者の方が致命的である。不測の事態に備えて確保しておいた時間が、なんらかの要因により使用できないときお手玉は継続困難になるのではないだろうか。

中間付近で液晶を閉じる影響が小さかった理由としては、中間部分では玉の垂直方向の動きが小さく、そこから得られる情報量は他の部分よりも少ないことが挙げられるが、断言することはできない。

上の考察を図に整理してまとめたものが、図9である。さらに、実際のお手玉のように次から次へと玉を制御しなければならない状態を想定して、情報処理の流れを図示したものが図10である。

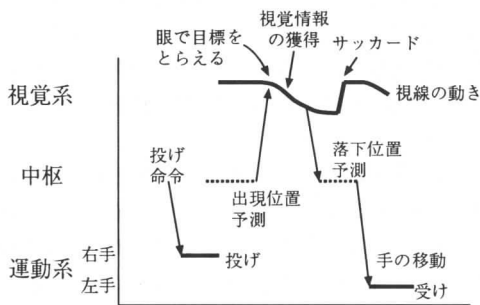


図9 視覚系と運動系間情報の流れ

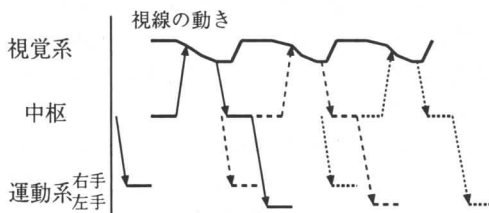


図10 連続した運動の場合の資源使用状況

この図に示したように、脳の中では、複数のプロセスが同時並行的に進んでおり、その一つに支障が生じると、全体的に大きな影響を及ぼす。すなわち、何か異常が生じた際には、全体的な情報処理の流れを乱さない範囲で例外処理をしないと、お手玉の動きは中断してしまうことになる。これが、Ball skillの難しさの本質ではないかと思われる。

熟練者が多数の玉を同時に扱える最大の理由は、玉の投げ上げが安定していて、例外処理の負担がそれほど大きくないことにあるといえる、それと同時に、異常が生じたときに、それをもとにもどすための制御戦略が確立されているためとも考えられる。

6 まとめ

本稿では、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に二つの実験を行なった。その結果、玉の投げ上げが正常に行なわれた場合、視覚はそれを確認する程度の役割しか果たしていないこと、また、玉の投げ上げに異常が生じた場合、その後の運動制御に視覚情報を処理するのにかなりの時間が必要であることを示唆する結果が得られた。これらの結果は、運動制御において視覚情報は脳内での予測を補完する形で機能していること、また、視覚情報の獲得や処理は状況に応じて能動的に行なわれていることを意味している。

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、さらに詳しい検討が必要である。今回の実験では、手先の動きを計測していないために、視覚情報がどのようにして手先の動きに反映されているかについては、明確なデータが得られていない。今後、玉を受け取る手の動きと目の動きの関係を調べることで、手先の運動制御と視覚情報獲得の関係を明らかにしたいと考えている。また、考察で述べた内容を検証するため、液晶シャッターを閉じたときの眼球の動きを計測する実験も行ないたいと考えている。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金奨励研究(A)課題番号09780319、および(財)中山隼雄科学技術文化財団による研究助成を受けて行なわれた。

[参考文献]

- [1] 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。
- [2] 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。
- [3] 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，NC93-141，1994。
- [4] Beek, P. J. and Turvey, M. T.：“Temporal patterning in cascade juggling”，*Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 934-947, 1992。
- [5] 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。
- [6] 三浦利章：行動と視覚的注意，風間書房，1996。
- [7] 苧阪良二，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。