

視覚と触覚の感覚統合

小池 康晴

東京工業大学精密工学研究所, JST CREST
〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259-R2-15

1. はじめに

人間には五感と呼ばれる感覚機能が備わっているとされている。細かくはもっと分かれるが、視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚等がよく知られている。この中で脳内での情報処理も含めて最もよく調べられている感覚は視覚であろう。視覚では、色や形の情報と位置や速度などの情報は脳の中では別の経路で処理されていることも分かっている。これらの感覚には、単独に刺激が与えられることもあるが、一般的には同時に色々な情報が刺激として入ってくる。

それでは、体に直接物が触れる場合はどうであろうか。体性感覚として物が触れたという情報は神経を通して脳に届けられる。同時に物が触れた場所を見ていれば、網膜から神経を通して情報は脳に届けられる。しかし、脳の中での情報処理にかかる時間が異なるため、視覚と触覚の情報が統合されるまでにはどちらが早く起こったのか厳密に知るのには難しい。しかし、例えばテニスをしているとき、ボールが何時、何処に飛んでくるのが分かるため、ラケットのスイートスポットにうまくボールを当てることができ、さらに、ボールの飛ぶ角度をコントロールすることができるのである。このような動的な環境では、脳は視覚から環境の情報を読み取り、自分の運動系の制御と連携し、適切なタイミングでボールとラケットが接触するようにしているのである。このように現実の世界では、物理的な現象は同時に情報が発信されるため、ボールとラケットが衝突すれば、体のすぐ近くで起きている現象なので、視覚も触覚もほぼ同時にその刺激は脳に到達する。仮想世界の

中では、物理の法則に反して様々な状態を仮想的に作り出すことができるため、遠くで落ちた雷の稲妻と雷鳴を同時に聞かせることで、逆に雷が落ちたことを強烈に印象づけることもできてしまう。実際に、凸凹を触るときに、手の動きと面から生じる力の方向は物理的に一意に決まる。しかし、仮想環境の技術を用いて、手の動きに対して異なる向きと大きさの力を与えると手の動きは凹の面なのに凸の面を感じる事が分かっている¹⁾。

人は生まれながらに環境の物理的な拘束などを知っているのではなく、一般的には学習により獲得する。本報告では、現実世界では起こりにくい環境を作ったときに、人はその環境に適応できるのかについてボールを受け取るタスクを用いて調べた結果について述べる。このとき、ボールとラケットのように、両方が動く場合は得られる結果の解釈が複雑になってしまうため、止めている手にボールが衝突する環境を本研究では対象とする。

2. ボールキャッチングタスク

ボールが衝突するまでの時刻 (Time-to-Contact) を推定する研究は古くから行われている²⁻⁵⁾。視覚情報だけにより物体に接触した時刻を答えさせる研究や、実際に物体が衝突したときの体性感覚を与える研究などである。また、外部環境の変化を予測して制御していることを示す例としても筋電信号を同時に計測し、物体が衝突する前から筋肉が活動していることを示した例もある⁶⁾。

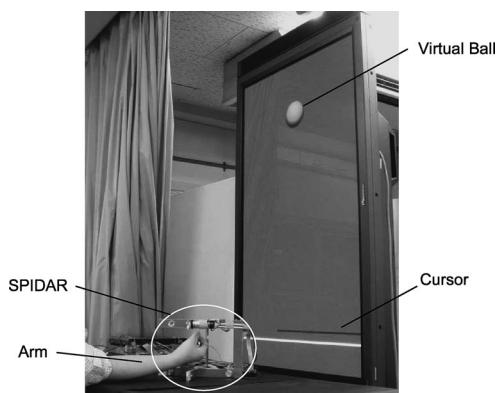


図1 実験環境.

2.1 実験装置

人のキャッチング特性を調べるために、現実では実現できない複数の加速度環境や接触時の力提示をバーチャルリアリティ技術を用いて構築した。図1にシステムの構成を示す。6自由度の位置計測と3自由度の力の提示が可能な力覚装置 SPIDAR を用いた。4個のモータ (Maxon DC motor, RE025-055, 定格出力 20W) を搭載した SPIDAR ではモータからの4本の糸をボールに取り付ける。そして、各モータに接続されたロータリエンコーダを用いて、1 KHz のサンプリングレートで糸の長さを計測することにより、手先の位置を計算できる。その糸の張力をトルク制御し、手先に力覚情報を与えることができる。外部座標系の変化だけでなく、内部座標系の変化を調べるために筋電信号を計測した。銀塩化銀表面電極を長掌筋、長橈側手根伸筋の2ヶ所に貼り付け、差動増幅した筋電信号を1 KHz, 16 bit でサンプリングした。そして、計測された筋電信号を全波整流してから10点間平均を取り、最大値と最小値を用いた正規化(0~1)を行った。被験者に落下する物体を表示するためにプラズマディスプレイ (PDP503-CMX, 50", Pioneer 社) を縦に設置し、必要な落下距離を確保した。

画面上には、白色の初期位線、SPIDAR から計測された被験者の手先の位置を示す黒いバー、ある高さで赤いボールが表示される。また、そ

のボールは、試行開始の合図から1~3秒の間のランダムな時刻に落下する。一方、被験者は椅子に座り、腕を椅子に付いている台に乗せる。そして、SPIDAR のグリップを軽く握った状態で、画面に表示される初期位置線に手先の位置を示す黒いバーを合わせてから手首を使ってバーチャルボールを受け止める。手の位置を表しているバーが落下するボールと接触するとき、SPIDAR を通して加速度や初期速度によらず一定の力を提示した。被験者には、手が初期位置からなるべく離れないように課題を行ってもらった。

2.2 加速度を変えた実験

純粋に加速度だけが変化する複数の加速度環境でのボールキャッチング実験を通して、ヒトが持つ接触タイミング予測について調べた。

2.2.1 実験方法

複数の加速度環境を創るために、合計6個の加速度をパラメータとして用意した(5.8~11.8 m/s^2 (Step 1.0 m/s^2)). そして、純粋に加速度の変化に応じた作業課題遂行能力と接触タイミング予測 (TTC) の変化を調べるために、加速度以外の要素(重さ、落下距離、初期速度)は次のように固定した。SPIDAR により提示される力は4.9 N (500 g 相当)、落下距離は80 cm、初期速度は0 m/s である。

被験者が加速度と落ち始める瞬間を予測できないようにボールの加速度をランダムに一つ選び、任意の瞬間でボールを落下させた。各加速度ごとに30回ずつ、合計180回の試行を行った。本実験では6人の被験者(男性5人、女性1人、24~31才)が参加した。全被験者の平均と標準偏差を用いて結果を解析する。

ボールが落下する距離、落下速度などの物理パラメータが異なるとき、各環境での手の運動開始時刻も異なる。従って、接触タイミング予測調節能力の解析において重要なパラメータは、ボールが手に落ちる前に力を入れた時刻であり、筋肉が活性化し始める時刻を運動開始とした。そして、もう一つは、被験者がボールを受け取ろうとしてからボールがいつ手に当たったのか

である。そこで、我々は、図2に示すように計測した筋電信号からキャッチングを開始するタイミングを表す時刻 (t_c) その時刻から実際にボールが手に触れるまでの時間 (Δt)を求め、各環境における接触タイミング予測の特徴を調べた。

2.2.2 実験結果

図3は、試行最初の各加速度におけるキャッチング開始時刻とボールの接触時刻を表している。最初の試行では、どの加速度においても

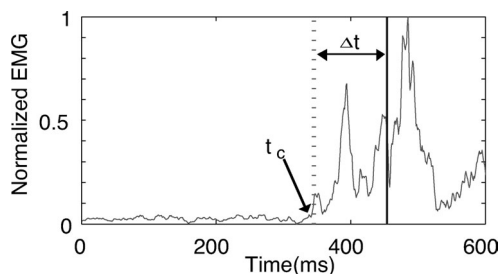


図2 評価関数のパラメータ。

9.8m/s^2 と同じタイミングで筋電信号が立ち上がっており、視覚によらずこれまでに学習したタイミングでボールをキャッチしようとしていることが分かる。

図4は、全被験者から得られた各加速度におけるキャッチング開始時刻の平均と標準偏差を表している。横軸は各加速度を、縦軸はボールが落下し始めてからの時刻を表しており、破線はボールが高さ80cmから落ち始め、手の初期位置線までかかる落下時間の理論値である。我々はキャッチング開始時刻の特徴を強く表している最初の5回(黒いバー)と最後の5回(白いバー)の試行を選び、計測されたキャッチング開始時刻を用いて解析する。

まず、最初の5回の計測結果を見ると、分散分析の結果、すべての加速度におけるキャッチング開始時刻に有意な差は見られなかった(ANOVA, $F(0.05, 5, 30)=0.91, p=0.48$)。これは、加速度における主効果は見られなかったこ

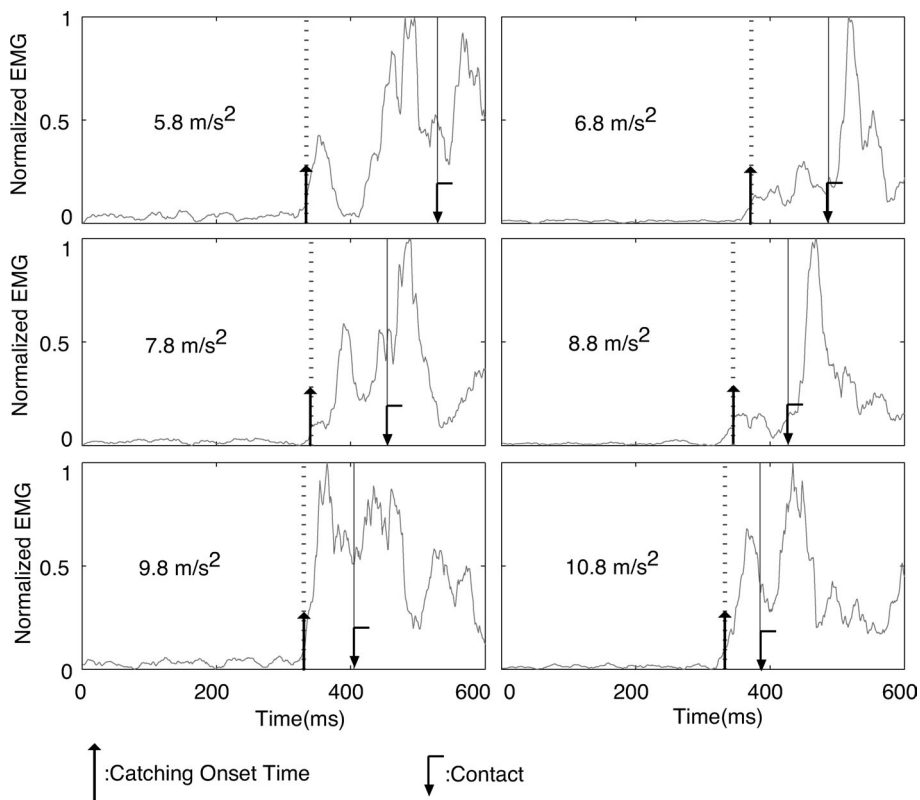


図3 試行初期のキャッチング開始時刻と加速度との関係。

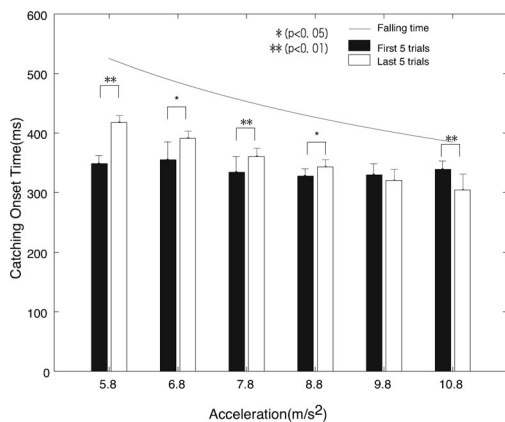


図4 キャッチング開始時刻と加速度との関係。

とを意味している。一方、最初の5回の計測結果と最後の5回の計測結果のt検定を行った結果、 9.8 m/s^2 以外の加速度では、有意な差があり (t-test, $t(5) > 7.71$, $p < 0.05$), 最後の5回で、被験者は各加速度ごとに異なる時刻でキャッチングを開始したことが分かる (ANOVA, $F(0.05, 5, 30) = 39.98$, $p < 0.01$). この結果から、 9.8 m/s^2 を基準として、それより加速度値が低くなると、キャッチング開始時刻は初期の5回に比べて遅くなり、加速度値が 9.8 m/s^2 より高くなるとキャッチング開始時刻は早くなること分かる。

2.3 タイミングをずらしたときのキャッチング

見た目が同じであっても動きの情報から正しく加速度の違いを識別でき、どの加速度でも正しく受け取ることができるようになった。さらに、加速度の違いにより、ボールの色を変えたところ、より早く学習できるようになった。この実験では、視覚の情報と触覚(体性感覚)との間に整合性があるが、仮想環境の技術を用いるとこの間の関係はどのようにも変化させることができる。例えば、画面上は手にボールがぶつかっているが、手には力がかからず、しばらく遅れて力がかかる、あるいは逆に、手にボールがぶつかっていないのに、手には力がかかるなどである。

2.3.1 実験方法

この実験では、画面上は重力加速度である 9.8 m/s^2 でボールは落下する。そして、力を手

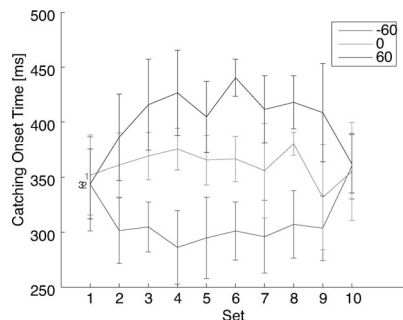


図5 タイミングの変化。

にかけるタイミングを3通り用意して、そのときの力を入れるタイミングの変化を調べた。位置試行は、80cmの高さより落下してくるボールをなるべく手を動かさないように受け取るタスクである。試行は100回連続して行う。最初の10回はボールがカーソルに画面上で接触すると同時に力を提示する。その後80回時間をずらした試行を行う。このときの時間のずれは、 -60 msec , 0 msec , $+60\text{ msec}$ であり、80回の試行中は同じ時間のずれになっている。 $+60\text{ msec}$ の場合は、ボールがカーソルに画面上で接触してから力を提示する。 0 msec の場合は、ボールがカーソルに画面上で接触すると同時に力を提示する。 -60 msec の場合はボールが基準線に画面上で接触する前に力を提示する。最後の10回(91~100回目)は、ボールがカーソルに画面上で接触すると同時に力を提示する。これは、学習した環境を忘れるためのものである。

2.3.2 実験結果

図5に実験結果を示す。最初の10回は時間差がないので、どの条件でも時間差がないときと同じタイミングでキャッチングを行っている。その後20回程度タスクを続けていると徐々に与えた時間差に応じて力を入れるタイミングがずれていく。そして、50回程度学習するとほぼ正しくボールを受け取れるようになった。最後の10回では、時間差のある環境を忘れ、最初の10回と同じタイミングで力を入れるように元に戻っていることが分かる。

3. 考 察

これまで人間の感覚は物理的に因果関係が決まった環境に接していた。このため、これらの因果関係を正しく認識するように適応してきた。したがって、視覚、触覚、聴覚などの感覚器を通してある事象を観察した後、脳の中でおこる感覚器による処理系の違いによる時間差を吸収して同時に物事が起こったと認識できるようになったと思われる。

地球上において、重力加速度は 9.8 m/s^2 であるが、月へ行けば 1/6 程度の大きさに減少する。このように、たまたま地球上の重力加速度に適応しただけだと考えることができる。また、手にボールが接触した瞬間は、視覚と触覚の因果関係によって決まる物で、脳の中での処理の順序を決める物ではない。今回の実験では、脳の情報処理機構を解明するために視覚情報や触覚情報を別々に操作してそのときの反応を調べた。視覚情報を操作した実験において、人は 1.0 m/s^2 の加速度の違いを見極めて、反応できることが分かった。6つの加速度を識別できたからといって、絶対的な量として加速度を識別していることにはならないが、少なくとも加速度の大きさの違いは識別できる能力を持っていることが分かった。

また、力のタイミングを変化させることにより、物理的に間違った環境においてどのような関係を学習するかを調べた。その結果、視覚ではなく、触覚の情報を基に学習することが分かった。この実験の結果と、更なる追加実験として物体が落ちる高さを変えた実験から、視覚とは異なる加速度環境を学習したことを示唆する結果が得られた。

今後は、どの程度学習効果が続くかなど調べ、

無意識に学習してしまった環境の影響などについて調べていきたい。

謝辞 本研究は文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現」および、科学技術振興機構 CREST（研究代表者:櫻井芳雄）の補助を受けている。

文 献

- 1) G. Robles-De-La-Torre and V. Hayward: Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch. *Nature*, **412**, 445–448, 2001.
- 2) D. A. Rosenbaum: Perception and extrapolation of velocity and acceleration. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and Performance*, **1**, 395–403, 1975.
- 3) N. L. Port, D. Lee, P. Dassonville and A. P. Georgopoulos: Manual interception of moving targets. i. performance and movement initiation. *Experimental Brain Research*, **116**, 406–420, 1997.
- 4) D. M. Merfeld, L. Zupan and R. J. Peterka: Humans use internal models to estimate gravity and linear acceleration. *Nature*, **398**, 615–618, 1999.
- 5) J. McIntyre, M. Zago, A. Berthoz and F. Lacquaniti: Does the brain model Newton's laws? *Nature Neuroscience*, **9**, 149–159, 1989.
- 6) F. Lacquaniti and C. Maioli: Adaptation to suppression of visual information during catching. *Journal of Neuroscience*, **9**, 149–159, 1989.