

# 自由落下 / 上昇する物体の 軌道予測と追跡眼球運動に与える重力方向の評価

## Evaluation of effects of gravitational direction on the orbit prediction for a free-falling/rising object and smooth pursuit eye movement

平田 貴士<sup>†,1</sup>, 平田 豊<sup>#‡,2</sup>, 川合 伸幸<sup>†‡,3</sup>  
Takashi Hirata, Yutaka Hirata, Nobuyuki Kawai

<sup>†</sup>名古屋大学大学院情報学研究科 心理・認知科学専攻, <sup>#</sup>中部大学大学院工学研究科 ロボット理工専攻,  
<sup>‡</sup>中部大学 創発学術院

<sup>†</sup>Cognitive and Psychological Sciences, Graduate School of Informatics, Nagoya University

<sup>#</sup>Robotic Science and Technology, Graduate School of Engineering, Chubu University

<sup>‡</sup>Academy of Emerging Sciences, Chubu University

<sup>1</sup>. hirata.t@cog.human.nagoya-u.ac.jp, <sup>2</sup>. yutaka@isc.chubu.ac.jp, <sup>3</sup>. kawai@is.nagoya-u.ac.jp

### 概要

投擲されたボールなどの運動物体を眼で追う際には、滑らかな追従性眼球運動 (Smooth Pursuit : SP) が発生する。SP は運動物体を随意的に網膜中心窩上に捉えようとするフィードバック制御系であるが、過去の運動物体の軌道から位置を予測して眼を動かす予測機能も有することが知られている。SP の追従性能には上下非対称性が存在し、上昇運動に比べ下降運動において、より高い性能を示す。こうした非対称性には、地上の上下を規定する重力方向または身体軸の上下方向が寄与し、SP の予測性能に影響を与えている可能性がある。そこで本研究では、座位 (重力軸と体軸が一致) と仰臥位 (両者が直交) において 1G (9.81 m/s<sup>2</sup>) の等加速度で下降または上昇運動する物体に対する SP を評価する。また同時に、その運動物体が目標位置に達するタイミングを予測するボタン押し課題も実施し、SP 性能との関係を吟味する。これらの実験により、上下方向の物体運動予測における、重力軸 (allocentric) と体軸 (egocentric) の関係性が明らかになるものと考えられる。

キーワード: 眼球運動, 滑動性眼球運動, 軌道予測, 重力, 重力加速度

### 1. はじめに

地球上の物体運動は常に重力の影響を受ける。たとえば、自由落下中の物体の速度は一定ではなく、約 9.81 m/s<sup>2</sup> (1G) の等加速度運動をする。こうした重力の影響下にある物体の運動に対し、我々は無意識下にその軌道を予測して、適切なタイミングで落下物をキャッチすることができる。このような落下物の軌道予測を可能にしている主な感覚器官は眼である。

我々は、木から落下する果物や投擲されたボールなどを滑動性眼球運動 (Smooth Pursuit : SP) により網膜中心窩上に捉え続けることができる。物体を追従する際に発生する SP の性能は、物体の運動方向や加速度に依存する。これまでの研究により、地上の重力加速

度 (1G) に従って落下する物体を追従する際に発生する SP の精度は、異なる加速度 (0G や 2G) で落下する物体に比べて高いことが示されている [1, 2, 3, 4]。また、物体が下方向へ移動する際の速度認識精度は、上方向に比べ正確であることも示されている [1, 2, 3, 4]。さらに、視標が等加速度 (1G) で上・下・左・右の 4 方向いずれかに一定距離移動する際の移動時間を推定する課題では、上方向に比べ下方向への移動時間推定がより正確になることが示されている [5]。この研究では、映像あるいは被験者自身を重力軸に対して 45° 傾斜させた状態においては、上下方向の移動時間推定精度の差が小さくなることも示されている。これらの知見は、ある方向に移動する物体の速度や時間推定の精度ならびに SP の追従性能が、重力軸や体軸との一致度合いによって変化することを示唆している。

物体追従時に発生する SP は、随意的に注視物体を網膜中心窩に捉えようとするネガティブフィードバック制御系であるが、このフィードバックには視覚一運動変換に要する 100 ミリ秒程度の遅れを伴う。したがって、運動物体を追従中に 100 ミリ秒以上物体が消失すると SP による眼球運動は停止することになるが、追従中の物体の運動軌跡が予測可能な場合、予測的に SP が持続することが示されている [6, 7]。たとえば、等速で移動する視標が一時的に消失した際には、消失後の視標の軌道を予測するようにほぼ等速の SP が観測される [7]。一方、こうした予測性 SP と重力あるいは身体軸との関係性については殆ど未知である。そこで本研究では、重力方向とその逆方向に加速度 1G (9.81 m/s<sup>2</sup>) で移動する物体に対する SP と、その運動物体が目標位置に達するタイミングの予測精度を評価するための実験をデザインし、座位 (重力軸と体軸が一致)

と仰臥位（両者が不一致）において実施した。

## 2. 方法

### 2.1. 参加者

本実験の趣旨を十分に説明し、インフォームドコンセントが得られた 20 代の男性 2 人が実験に参加した。

### 2.2. 実験環境

図 1 に実験環境の概略図を示す。本実験では、座位（重力軸と体軸が一致）と仰臥位（両者が不一致）いずれかの姿勢で映像提示ならびに眼球運動計測を行った。座位では、眼球運動計測時に参加者の頭部動揺を抑制するため、顎台を設置した。仰臥位では、参加者はベッドの上で仰向けになった。参加者への映像提示ならびに眼球運動計測は、ヘッドマウントディスプレイ（HMD: VIVE Pro Eye, HTC VIVE）を用い、サンプリング周波数 50Hz で記録した。両姿勢において、実験で使用するテンキーを参加者の利き手側に設置した。

### 2.3. 視覚映像

図 2 に HMD 内に投影する視覚映像を示す。本実験では、リアルタイム 3D 開発プラットフォーム Unity (Unity Technologies) を用いて視覚映像を作成した。参加者には、Fall (図 2 A) と Rise (図 2 B) の 2 種類の映像を提示した。Fall では、参加者の前方 13m の地点において、正面（画面中央）を基準 (0m) として、上 5.5 m の位置（視角 22.9 deg）に追従視標である直径 0.4 m の球を設置し、下 5.5 m (-5.5m, 視角 -22.9 deg) の位置に目標地点 (的) を設置した (図 2 A)。Rise では、Fall の球と的の位置を入れ替えて提示した (図 2 B)。映像に提示される球は、重力加速度 1G で的に向かって下方向もしくは上方向に等加速度運動するように設定した。

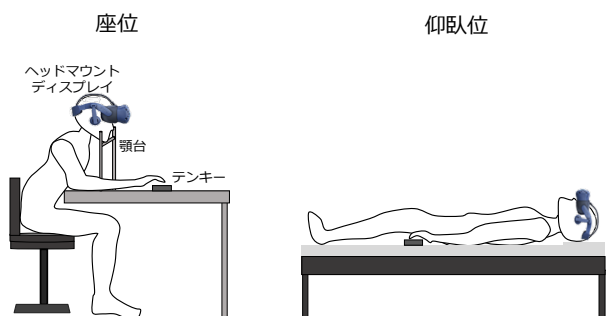


図 1. 実験環境概略図

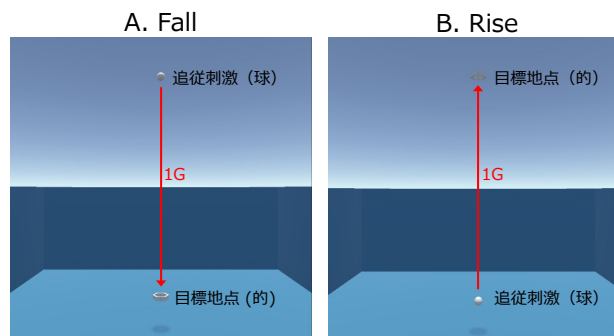


図 2. 視覚映像

### 2.4. 実験構成

実験は休憩を挟み前半と後半の 2 回に分けて行った。前後半では、それぞれ座位もしくは仰臥位のいずれかの姿勢をとった。追従条件は、前述の Fall と Rise の 2 つであり、各々は、以下の 2 つのフェーズ (Study と Test) で構成した。

#### ① Study

参加者は、動く球を常に眼で追い、目標地点に球が到達するタイミングを見計らいテンキーの「0」を利き手の人差し指で入力した。キーが入力されるとその地点で球はしばらく停止し、その後初期位置に再提示された。一回の球の移動を 1 セッションとし、これを 5 回繰り返した。これを 1 試行とし、Fall または Rise いずれかの条件で 5 試行連続して繰り返した。その直後に、以下の Test を 1 回実行した。

#### ② Test

この課題では、球の始動後 0.87 秒 (3.7m 移動後) で球を消失させた。前述の Study と同様に、参加者は Fall または Rise 条件において目標地点に向かって移動する球を SP により追従し、球消失後もその運動軌跡を予測して SP を続けるよう指示された。また、この時、目標地点に到達するタイミングを予想して、テンキーの「0」を利き手の人差し指で入力した。①Study で述べた通り、本課題の 1 試行は、Study 課題の各試行後に行われた。

### 2.5. データ解析

データ解析は、VIVE Pro Eye で記録される眼球運動時系列データを MATLAB (Mathwork 社) に読み込み、オフラインで解析した。

### 3. 結果

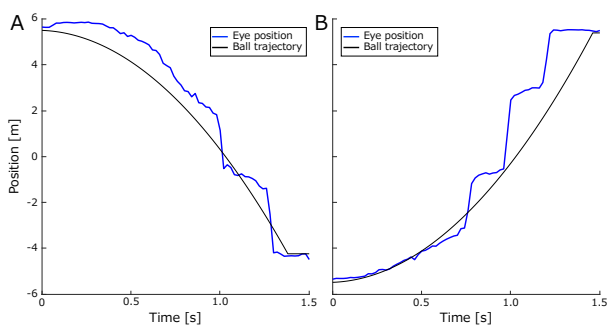


図3. 被験者Aの座位時 Study 課題1 試行目最後の Fall・Rise 条件における球追従時の眼球運動。A: Fall, B: Rise. 青色波形: 眼球位置, 黒色波形: 球の軌跡 (高さ)。

図3に参加者1人分の座位時 Study 課題1 試行目最後の Fall (図3 A) と Rise (図3 B) 条件における球追従時の眼球運動を示す。各図の青色波形は物体追従中の眼球位置を表し、黒色波形は、球の軌跡 (高さ) を示す。図の横軸は球が移動開始してからの時間を表す。

Fall 条件 (図3 A) では、球の軌道に近い滑らかな SP が約1秒間持続した。その後、球に追いつくためのキャッチアップサッカードが2回発生している。

一方、Rise 条件 (図3 B) では、球の軌道に近い滑らかな SP の持続時間は約0.7秒と、Fall 条件より短かった。また、その後サッカードが3回生成されており、いずれもキャッチアップサッカードではなく、球の位置を大きく行き過ぎた位置に着地し、球が近づいてくるのを待つようなものであった。

### 4. 考察

本研究では、重力方向とその逆方向に加速度 1G (9.81 m/s<sup>2</sup>) で移動する物体に対する SP と、その運動物体が目標位置に達するタイミングの予測精度を評価するための実験をデザインし、座位 (重力軸と体軸が一致) と仰臥位 (両者が不一致) において実施した。

実験の結果、座位中の下方向 (Fall) と上方向 (Rise) に移動する物体を追従する Study 課題において、Fall 条件での SP による追従時間が Rise 条件時よりも長いことが見いだされた。また、移動物体追従時のサッカードの発生回数や着地位置にも両者で差異が見いだされた。これらの結果は、自然法則に従って下向きに 1G で自由落下する物体に対する SP が、重力に反して上向きに 1G で移動する物体に対するものよりも追従性能が高

いという従来知見[1, 2, 3, 4]を指示するものと考えられる。

現在、目標位置到達タイミング予測結果の評価、ならびに仰臥位条件の結果をまとめている。本実験では、1G の他、0.5G ならびに 1.5G で等加速度運動する球を用いた実験も実施しており、今後は参加者数を増やすと同時に、これらの結果と合わせて、SP ならびに運動物体軌道予測精度に対する重力軸と体軸の関係性を明らかにしていく。

### 謝辞

本実験のためのシステム構築に協力頂いた中部大学大学院工学研究科情報工学専攻進士裕介氏に感謝致します。

### 文献

- [1] Gallagher, M., Torok, A., Klaas, J., and Ferre, E. R., "Gravity prior in human behavior: a perceptual or semantic phenomenon?", *Experimental Brain Research*, 2020.
- [2] Delle Monache, S., Lacquaniti, F., and Bosco, G., "Eye movements and manual interception of ballistic trajectories: effects of law of motion perturbations and occasions", *Experimental Brain Research*, vol. 233(2), pp. 359-374, 2014.
- [3] Bjorn, J., and Joan Lopez-Moliner., "Earth-Gravity congruent motion facilitates ocular control for pursuit of parabolic trajectories", *Scientific Reports*, 2019.
- [4] Monache, S. D., Lacquaniti, F., and Bosco, G., "Oculatracking of occluded ballistic trajectories: Effects of visual context and of target law of motion", *Journal of Vision*, vol. 19(4), pp.1-21, 2019.
- [5] Moscatelli, A., Lacquaniti, F., "The weight of time: Gravitational force enhances discrimination of visual motion duration", *Journal of Vision*, vol. 11(4), pp.1-17, 2011.
- [6] Woon, Ju, Park., Kimberly, B, Schaunder., Oh-Sang, Kwon., Losia, Benneto., and Duej, Tadin., "Atypical Visual Motion-Prediction Abilities in Autism Spectrum Disorder", *Clinical Psychological Science*, pp. 1-17, 2021.
- [7] 岡部陽三, 瀧口哲也, 長山郁生, 宮崎為夫, 梅田良三, "滑動性眼球運動と予測性", *耳鼻臨床*, vol.79(10), pp.1567-1572, 1986.