



視覚的に異なる重力環境における 捕球行動の適応と落下予測への波及

Adaptation of Catching Behavior and Its Spillover to Fall Prediction in Visually Altered Gravity Environments

前川朋也¹⁾, 齋木潤¹⁾
Tomoya MAEKAWA, Jun SAIKI

1) 京都大学 人間・環境学研究科（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）

概要：人間は、物体運動の予測において地球重力に従った内部モデルを用いるとされている。一方、VR空間で視覚的に異なる重力環境下にある物体を捕球する課題を行うと、その重力に対する感覚運動的な適応が生じることが報告されている。しかし、それが重力の内部モデルに対する適応なのか、単なる運動特性への反応なのかは明らかでない。本研究では、異重力下での感覚運動適応が、物体の落下時間に対する予測に波及するかどうかを検討し、この適応が重力知覚レベルに及んでいるかを明らかにする。具体的には、視覚的に重力が操作されたVR空間において、捕球課題と落下時間推定課題を実施し、行動成績と眼球運動を分析し、視覚要素の変化のみで内部モデルが変容するか評価する。

キーワード：VR, 重力, 感覚運動適応

1. はじめに

人間は、重力を前提とした運動予測や行動制御を行うための「重力の内部モデル」を脳内に構築しているとされる。この枠組みは多くの研究で支持されてきた。(Delle Monache et al., 2021; Zago et al., 2005)この内部モデルを変化させるという観点だと、視覚情報だけで内部モデルを異なる重力環境に適応させるのは難しいという見方もある(Jörges & López-Moliner, 2017)。

とはいえ近年、VR技術を活用した視覚-運動課題により、視覚的な重力変化に対しても感覚運動的な適応が可能であることが報告され始めている(Pouke et al., 2024)。しかし、重力変化への適応に際しての、眼球行動と腕の動作がそれぞれどのように適応していくか、また、適応が課題特異的なものなのか、より広い「物体運動の予測」全般にまで波及するのかわかっていない。

そこで本研究では捕球課題において重力変化に対して眼球運動と捕球行動がそれぞれどのように適応するのか、また、捕球行動に加えて落下時間を推論する課題を被験者に実施させ、課題間で共通して重力適応が観察されるかを検討することとした実験を行った。

2. 実験方法

2.1 実験空間

実験空間として、格子状の模様が入った部屋を用意した。映像はヘッドトラッキング機能を有したヘッドマウントディスプレイ(HMD)から呈示された(図1)

2.2 実験参加者

京都大学の学生28名(性別：男性18名女性10名、年齢：平均20.6歳)

2.3 実験機材

Vive Pro Eye (HMD)、付属コントローラー、Unity 2023.1.10f1、Vive OpenXR Plugin

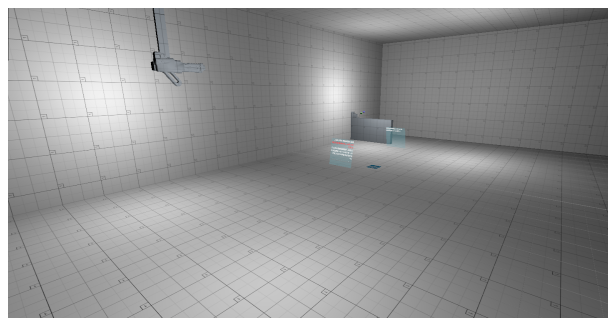


図1：実験空間

2.4 実験課題

以下の2つの実験課題を行った。

物体捕球課題：前上方から投射される球体を、コントローラー操作により捕球する。1ブロック48球(投射・到達位置の組合せ(6通り)をランダム呈示し、これを8チャンク繰り返す)。

TTC課題 (Time-to-Contact)：正面の台座を転がり、そこから落下し始めてから0.1秒で姿を消す球体が、落下ののち地面に接地する時点を予測し、ボタン押下でタイミングを報告。このとき参加者は球体の落下軌道をイメージし、目で追うように教示される。1ブロック32球(速度×落下位置の組合せ(4通り)をランダム呈示し、これを8チャンク繰り返す)。

2.5 実験条件

被験者間で、適応フェーズで物体が落下する重力を分けた。火星重力(3.7 m/s²)と地球重力(9.8 m/s²)の2条件だった。各条件で到達時間・水平方向速度・落下位置が一致するよう、投射位置と初速度を調整した。

2.6 手続き

全参加者は指定された位置に立ち、地球重力下で両課題の練習を実施したあと、以下の流れで実験を行った。各ブロック、物体捕球課題、TTC課題の順番で行った。

- ①ベースラインブロック：両課題を地球重力下で実施
- ②適応ブロック：実験群（火星条件）は火星重力下で捕球課題を実施後、地球重力下でTTC課題を実施した。統制群（地球条件）は両課題とも地球重力だった。
- ③再適応ブロック：両条件とも再び地球重力下で両課題を実施した。

3. 結果

3.1 捕球課題成績

捕球課題における成績の変化について、各条件・各ブロックごとに検討を行った。ここでの「成績」とは、捕球の瞬間におけるコントローラーとボールとの垂直方向の距離差を指す。この成績は、1つのフェーズ（ブロック）を時系列的に8つのチャンクに分割し、チャンクごとの平均値として算出した。

分析では、投射物体とコントローラーの垂直位置差のチャンクごとの平均を従属変数とし、ブロック、条件、チャンクを要因とした線形混合モデルを用いて、感覚運動適応の過程を評価した。データの正規性については、残差およびランダム効果に対してLilliefors検定を実施した結果、いずれも $p > .05$ であり、正規性の仮定は成立していた。

モデル比較の結果、条件 × ブロック × チャンクの三重交互作用を含むモデルが最もデータに適合していた ($p < .001$)。一方、チャンクに対するランダムスロープを追加することでの適合度の向上は認められなかった ($p = .674$)。したがって、最終的には三重交互作用を含み、ランダム切片のみを持つモデルを採用した。

その結果（図2）、火星条件かつ適応ブロックにおいて、条件×ブロックの交互作用が有意に現れ ($\beta = -0.0338, p < .001$)、この条件下では捕球成績が悪化していたことが示された。さらに、交互作用の内訳を詳しく確認するため、emtrendsにより各条件・ブロックごとのチャンクに対する傾きを算出・検定したところ、以下の傾向が明らかとなった。

まず、火星条件の適応ブロックにおいては、誤差が試行を重ねるごとに有意に減少していた ($\beta = +0.00622, p = .0139$)。これは、当初負の方向に偏っていた誤差が時間とともに修正されていく過程を示している。次に、火星条件の再適応ブロックでは、逆に正の方向に偏っていた誤差が、試行の経過とともに有意に減少する（すなわち負の方向に修正される）傾向が見られた ($\beta = -0.00893, p < .001$)。一方で、火星条件のベースラインブロックおよび地球条件のすべてのブロックにおいては、誤差の変化に有意な傾向は見られなかった。

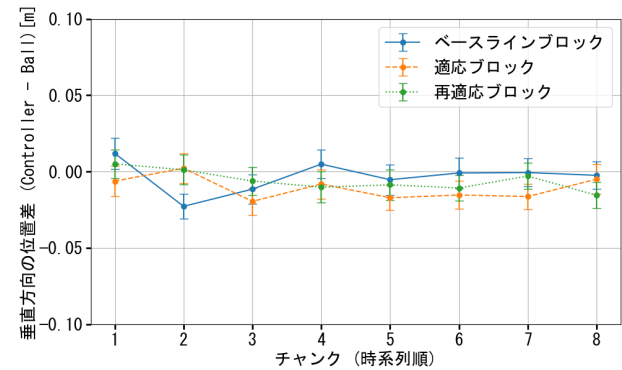
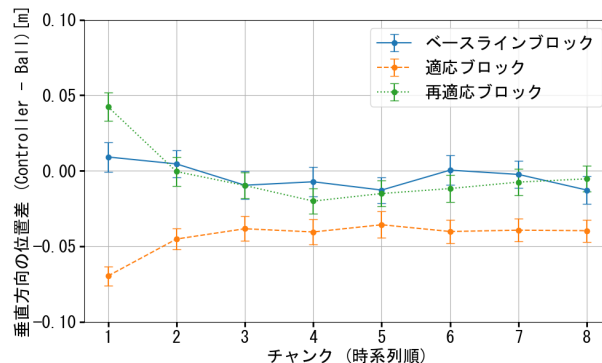


図2：上は火星、下は地球条件での捕球成績の時系列的変遷

3.2 捕球課題時の腕の速度

捕球課題時の腕の運動特性を調べるために、各試行での垂直方向の腕の最大速度と、最大速度のタイミング（球の射出からの時間）を分析した。（図3）最大速度に対するART（Aligned Rank Transform）分散分析の結果を図3に示す。その結果、主効果としてブロック（block）の効果が有意に認められ ($F(2,3800) = 9.99, p < .001$)、さらに条件×ブロックの交互作用も有意であった ($F(2,3800) = 15.87, p < .001$)。ペアワイズ比較の結果、地球条件ではベースラインブロックに比べて適応ブロックおよび再適応ブロックで最大速度が有意に減少していた ($p < .005$)。それに対して火星条件ではベースラインブロックに比べて再適応ブロックで有意に増加、適応ブロックに比べて再適応ブロックで増加していた。 ($p < .001$)

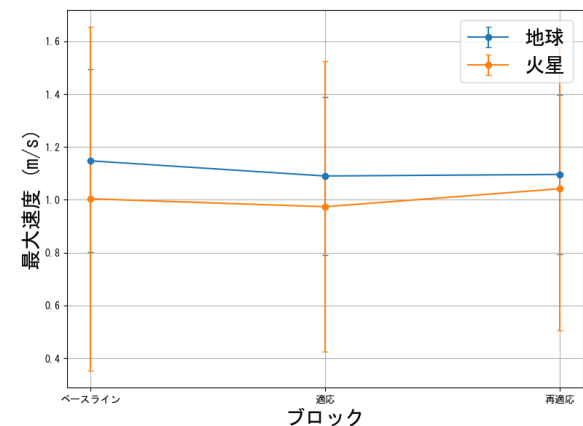


図3：捕球課題での腕の最大速度

続いて、最大速度に到達するまでの時間に対するART分析（図4）でも、ブロックの主効果 ($F(2,3800) = 12.89, p < .001$) と条件 × ブロックの交互作用 ($F(2,3800) = 7.91, p < .001$) がともに有意であった。

事後比較の結果、地球条件ではベースラインブロックにおいて、適応ブロックおよび再適応ブロックよりも遅いタイミングで最大速度に到達しており、両者の比較でいずれも有意な差が確認され ($p < .001$) 適応ブロック以後は最大速度に早く到達していた。火星条件においても、適応ブロックと再適応ブロックの間に有意差があり ($p = .0012$)、ベースラインブロックと再適応ブロックの比較でも、統計的には有意水準 ($p < .05$) に達しなかったものの、 $p = .0551$ という接近した値が得られており、再適応ブロックにおいて最大速度に早く到達する傾向が見られた。その他の比較では有意な差は認められなかった。

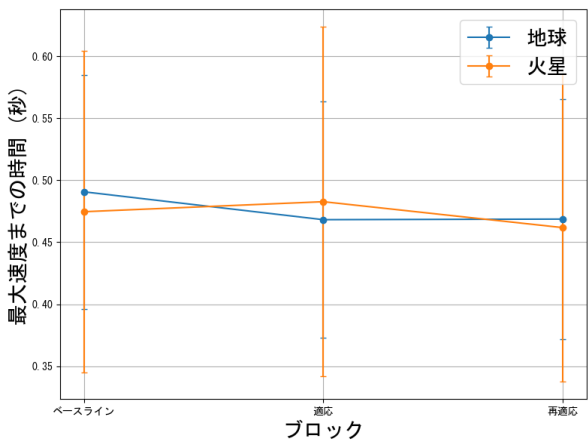


図4：捕球課題での腕の最大速度までの時間

3.3 捕球課題時の眼球運動

捕球課題時の投射物体と注視点の垂直方向での位置差を視線追跡誤差として定量化した。視線追跡誤差に対して条件およびブロックの効果を検討するため、整列ランク変換（ART）を用いたノンパラメトリック分散分析を実施した。（図5）その結果、条件主効果は認められなかったが、ブロック主効果および条件とブロックの交互作用はいずれも有意であった（いずれも $p < .001$ ）。条件間の比較では、地球条件はブロックの進行に伴い誤差が減少したのに対し、火星条件は適応ブロックで誤差が低下した後、再適応ブロックで再び誤差が増加する傾向が認められた($p < .001$)。

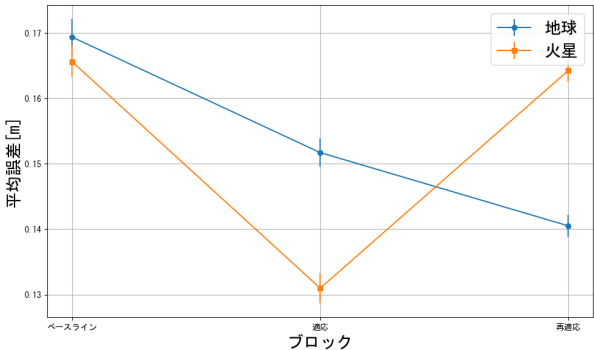


図5：捕球課題での視線追跡誤差

3.4 TTC課題成績

落下予測時間を従属変数として、ブロックと条件を要因に含めた分析を行った。（図6）データの分布に正規性があるか不明確だったため、整列ランク変換（ART）を用いたノンパラメトリック分散分析を採用した。その結果、条件、ブロック、そしてその交互作用のいずれについても、統計的に有意な効果は確認されなかった（いずれも $p > .05$ ）。

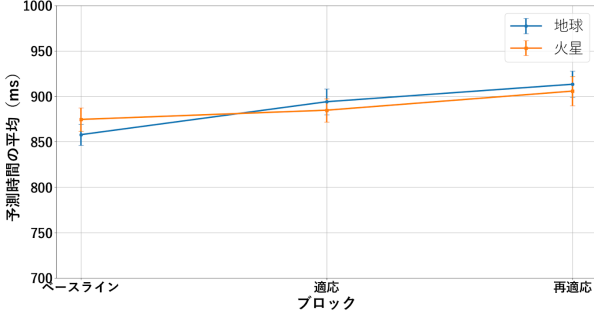


図6：TTC課題での落下予測時間

3.5 TTC課題時の眼球運動

時間判断課題における眼球運動の違いについて検討した。まず各試行において、物体の落下開始からボタン押下までの間の視点の位置を、投射台に沿った物体の移動方向平面上の二次元座標として記録し、それに対して線形回帰を行った。得られた回帰係数は、被験者ごと・ブロックごとに平均化した。その上で、落下予測時間を従属変数とし、ブロックと条件を要因とした統計分析を行った。（図7）データの分布に正規性があるか不明であったため、整列ランク変換（ART）を用いたノンパラメトリック分散分析を採用した。その結果、条件・ブロック・およびその交互作用のいずれにおいても統計的に有意な効果は認められなかった ($p > .05$)。

以上の結果から、時間判断課題においては、判断時間だけでなく、眼球運動の指標にもブロック間の明確な変化は見られなかったことが示された。

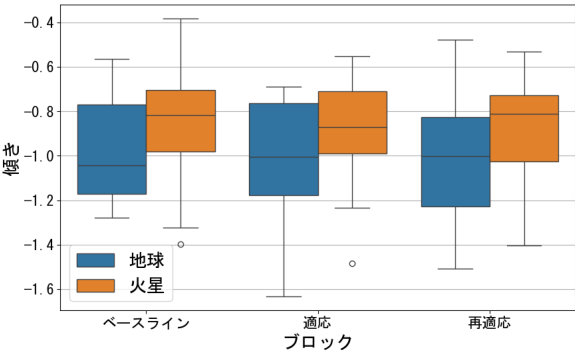


図7：TTC課題でのイメージ軌道の線形回帰係数

4. 考察

4.1 捕球行動の変化

捕球課題では、火星条件において適応ブロックで負の方向への成績の悪化が見られた。また、再適応ブロックで正の方向に偏った成績となっており、ひとつ前のブロックの重力方向へのずれが見られた。さらに、成績の変化は最初の数球で急激に起こっている。これらの結果は、地球重力を基準として、調整を加えることで異なる重力に対応したとする先行研究(Zago et al., 2005)とも一致する。

この調整の要因を検討するために腕の運動特性に注目した。先行研究(Russo et al., 2017)において捕球行動における腕の最高速度が、投射物体の速度に合わせて変わる、つまり、投射物体が速い速度であるほど垂直方向の腕の最高速度が早くなることが示唆されている。また、最高速度のタイミングに言及した先行研究(Zago et al., 2005)では、低重力で落下する物体に対応する際に、最高速度タイミングが早くなることが示唆されている。

今回の結果において、まず、地球条件では、適応ブロックにおいて最高速度は遅くなり、最高速度タイミングも早くなった。これは、試行を続けることで慣れが生じた結果であると考えられる。

次に火星条件では、再適応ブロックにおいて最高速度が早くなり、最高速度タイミングが早くなった。慣れの効果と考えると最高速度が上がったことの説明がつかない。そのため、適応ブロックで火星重力に従う物体への捕球を繰り返すことで、重力予測の調整が行われ、その結果、再適応ブロックで予想よりも速い加速度で落下する物体を、本来よりも速く見積もってしまい、最高速度が上がった可能性が考えられる。また、最高速度タイミングは、内部重力モデルが火星重力へ一部調整されているため、少し早くなった可能性がある。

さらに、火星重力への調整の要因を検討するために、捕球課題時の眼球運動から、投射物体の追跡成績を分析した。その結果、地球条件ではブロックを通して誤差の減少傾向が見られた。これは試行を経ることで学習が進んだ影響だと考えられる。

それに対して火星条件では適応ブロックで誤差が減少し、再適応ブロックで再び誤差がベースラインブロック程度にまで戻った。

適応ブロックでは垂直方向の加速度が小さいため、目で追うことが容易であり、追跡成績が向上したと考えられるが、再適応ブロックの追跡成績の悪化には二通りの説明が考えられる。まず、学習が消失した場合である。ベースラインブロックでは地球重力に従い物体が投射されたため、地球・火星条件ともに学習が進んだと考えられる。しかし火星ブロックでは適応ブロックでは異なる重力で物体が投射されたことにより、ベースラインブロックでの学習効果がなくなり、再適応ブロックで再びベースラインブロックと同じ成績になった可能性がある。

しかし捕球に関して過去の学習が持続する(Zago et al., 2005)という先行研究から、適応ブロックを経ることで学習効果が消えるとは考えづらい。そのため、もう一つの説明として、ベースラインブロックで学習が進んだが、適応ブロックにおいて火星重力への学習が進み、結果として打ち消す形でベースラインブロックと同じような成績になった可能性がある。この説明は、重力の内部モデルを一部火星重力に調整するという説明に合致する。

これら腕の運動と眼球運動を合わせて火星条件の捕球成績を検討すると、重力が変化した段階（適応ブロック）では予測が正確になるが、腕の運動は変わらないため成績は負の方向にずれる。それと同じく地球重力に戻った際は物体の軌道予測が試行経過による学習と内部モデルの調整によりベースラインブロックと変わらないが、腕の運動が一部火星重力に調整されているために成績が正の方向にずれる。

しかしこの分析は腕や眼球運動の時系列的な変遷を検討していないため、今後はより複数の腕の運動要素を用いた検討や、腕や眼球の運動の時間的な変遷を分析し、課題成績との対応関係から重力要素への調整の要因を検討することが必要である。また、学習の効果を排除するためにより練習を増やした状態で課題を行う必要がある。

4.2 メンタルイメージの変化

メンタルイメージへの波及を検討したTTC課題においては、重力認識の調整による効果は見られなかった。このことから、重力認識の調整はあくまでも課題特異性があり、重力要素一般の調整ではないことが示唆される。

ただ、本研究では視覚刺激のみを用いており、物体衝突時の振動によるフィードバックや、衝突音の呈示など、複数モダリティによる刺激呈示は行っていない。実際、運動学習においては多感覚フィードバックの有用性がいくつかの研究で指摘されているため(Melo et al., 2024)、触覚フィードバックの欠如により学習が進まず、メンタルイメージにまで波及しなかった可能性がある。そのため、今後の実験では感覚要素を増やし、より現実として妥当な条件下での重力に対する適応を検討する必要がある。

引用文献

1. Delle Monache, S., Indovina, I., Zago, M., Daprati, E., Lacquaniti, F., & Bosco, G. (2021年). Watching the Effects of Gravity. Vestibular Cortex and the Neural Representation of “Visual” Gravity. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 15, 793634. <https://doi.org/10.3389/fnint.2021.793634>
2. Zago, M., Bosco, G., Maffei, V., Iosa, M., Ivanenko, Y. P., & Lacquaniti, F. (2005年). Fast Adaptation of the Internal Model of Gravity for Manual Interceptions: Evidence for Event-Dependent Learning. *Journal of Neurophysiology*, 93(2), 1055–1068. <https://doi.org/10.1152/jn.00833.2004>
3. Jörges, B., & López-Moliner, J. (2017年). Gravity as a Strong Prior: Implications for Perception and Action. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 203. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00203>
4. Pouke, M., Uotila, E., Center, E. G., Timperi, K. G., Chambers, A. P., Ojala, T., & Lavalley, S. M. (2024年). Adaptation to Simulated Hypergravity in a Virtual Reality Throwing Task. *ACM Transactions on Applied Perception*, 21(2), 1–23. <https://doi.org/10.1145/3643849>
5. Russo, M., Cesqui, B., La Scaleia, B., Ceccarelli, F., Maselli, A., Moscatelli, A., Zago, M., Lacquaniti, F., & d’Avella, A. (2017年). Intercepting virtual balls approaching under different gravity conditions: Evidence for spatial prediction. *Journal of Neurophysiology*, 118(4), 2421–2434. <https://doi.org/10.1152/jn.00025.2017>
6. Melo, M., Goncalves, G., Monteiro, P., Coelho, H., Vasconcelos-Raposo, J., & Bessa, M. (2022年). Do Multisensory Stimuli Benefit the Virtual Reality Experience? A Systematic Review. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 28(2), 1428–1442. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2020.3010088>