



エアシリンダ型加速度提示装置を用いた VR 空間内での 落下感覚の提示 –着地感覚の検証–

Presentation of Falling Sensation in Virtual Space Using an Air Cylinder-Type Acceleration Display Device:
Verification of Landing Sensation

日浦仁太¹⁾, 澤橋龍之介¹⁾, 西濱里英²⁾, 中村太郎³⁾

Jinta HIURA, Ryunosuke SAWAHASHI, Rie NISHIHAMA and Taro NAKAMURA

- 1) 中央大学 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, j_hiura@bio.mech.chuo-u.ac.jp)
2) 中央大学 研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, r_nishihama@bio.mech.chuo-u.ac.jp)
3) 中央大学 理工学部 (〒113-0032 東京都文京区春日 1-13-27, nakamura@mech.chuo-u.ac.jp)

概要：本研究では、エアシリンダ型加速度提示装置を用いて、VR 空間における着地感覚の提示手法を提案する。先行研究では本装置による落下感覚の提示は検証されているが、着地時の感覚提示については十分に検討されていない。そこで本発表では、着地前後の加速度提示方法を 3 種類設定し、それぞれの提示手法が主観的な着地感に与える影響を評価・報告する。

キーワード：力覚、身体性認知、空気圧

1. 緒言

近年の VR (仮想現実) 技術の発達により、ユーザは HMD (ヘッドマウントディスプレイ) を利用して手軽に没入感の高い体験が可能となった。例えば、上昇や下降などの垂直方向の加速度を伴うコンテンツは、視覚効果のみでもある程度の現実感を与えることができるとされている[1]。しかし、HMD は視覚および聴覚の提供に限られるため、これらの情報のみでは体験のリアリティに限界がある。このため、ユーザに対してより高い没入感を提供するためには、実際の加速度を提示可能な装置が必要である。

既存の加速度提示装置として油圧リフタ[2]や設置型低重力体験装置[3]が挙げられる。これらの装置は大型かつ環境固定型であるため、ユーザの自由な動きを制限する上、急激な加速および減速の提示が難しいという課題がある。一方、比較的持ち運びが容易な支持型デバイスを用いた手法として、Virtual Super-Leaping (VSL)[4]が提案されている。また、歩行可能な装着型デバイスに関しては、JumpMod[5]が、さらに昇降感覚の提示を目的としたシステムとして、Level-Ups[6]などが開発されている。しかし、これらの装置や手法はいずれも短距離の高さ変化に基づく上昇または登板感覚を提示するものであり、長距離の上昇および落下感覚 (以下、上下動感覚) 提示は困難である。

そこで本研究では、ユーザの動きを制限せず、短い距離の上下動によって長距離の上昇・落下感覚を違和感なく提

示可能な靴型装置の開発を目指す。これは、VR 空間内で上昇・落下する映像を提示すると同時に、装置によりユーザの足元を短距離上下動させる手法である。これまでにエアシリンダ型加速度提示装置[7]を開発し、落下上昇感覚の提示が可能である[7][8]ことは確認されている。しかし、着地時の感覚については十分に検証されていない。そこで本研究では、着地感覚の提示手法を提案し、その有効性を検討した。本稿における着地感覚とは、VR 内の高所からの落下において、ユーザが地面に衝突した際に知覚する身体感覚を指す。

2. 上下動感覚の提示手法

2.1 エアシリンダ型加速度提示装置

本研究では先行研究[7]で開発された、図 1 に示すエアシリンダ型加速度提示装置を利用する。本装置はエアシリンダ (TCM32X75S : AirTAC, ストローク 75 mm, 最大出力 800 N) とそれを挟む上下のアルミ板で構成されており、上面プレートが上下に動作することによってユーザに落下動作を提示する。本装置は、ユーザの体を持ち上げるために必要な出力と上下動感覚提示に十分な加速度が提示可能であり、ユーザの感覚向上を実現している。またエアシリンダは、エアコンプレッサから送られた圧縮空気を圧力制御用 3 方向比例電磁弁 (ITV2050-213L5, SMC) 及び直動型 2 方向電磁弁 (AB21-01-1-A00B, CKD) によって制

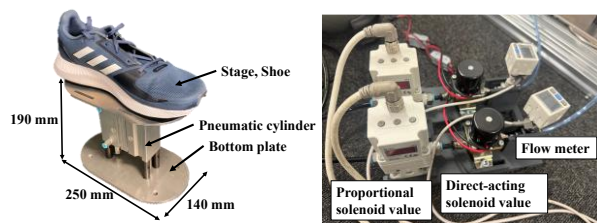


図 1：加速度提示装置と制御機器[7]

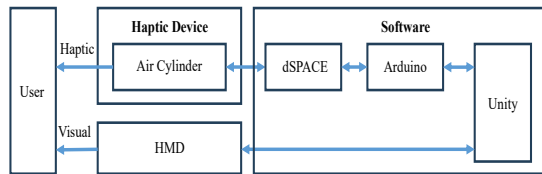


図 2：システム概要

御することで動作している。それぞれの電磁弁は装置に送る空気の圧力制御および管路の開閉の制御に使用される。チューブは外径 6mm、内径 4 mm のものを使用した。

2.2 システム概要

図 2 に上下動感覚提示システムの概要を示す。HMD には VR 用 PC から映像が送信される。提示される VR 映像はゲームエンジン Unity によって作成した。加速度提示装置の制御は制御用 PC の dSPACE を用いて行われる。VR 用 PC と制御用 PC の動作の同期は Arduino を介したシリアル通信によって接続されている。

2.3 装置の駆動モデルと着地時の視覚効果

図 3 に先行研究[7][8]により提案された上昇落下提示における本装置の高さおよび速度変化を示す。ユーザは VR 空間内でエレベーターに乗った状態で上昇落下を体験する。最初に人が知覚可能な垂直加速度 0.07 m/s^2 [9]以上の加速度で上昇し、一定の高さで停止する。停止後、映像の上昇は続くが、ベクション効果[10]を利用して長距離の上昇感覚を提示することが可能である[8]。一方、落下については、下記の条件(2)における初期落下区間と着地区間を設けて加速度を 2 回提示することで、長距離の落下感覚を提示することが可能である[7]。しかし、着地区間の有無による検証は行われておらず、着地区間をなくすことができれば装置の小型化に繋がる。また着地区間では下向きの加速度と着地の衝撃を与えているが、より強い衝撃や地面との接触による反発を表現し、さらにこの反発の表現に合わせて映像を工夫することにより、体験の臨場感が増すと考えられる。以上より下記の 3 種類の動作モデルと 1 種類の映像演出を比較評価した。なお、条件(1)～(3)は着地の瞬間に VR 映像を暗転させる演出を用いた。

条件(1)：初期落下，着地後暗転映像

VR 空間内での落下開始のタイミングに合わせて、装置で最初の落下動作のみを提示し、その後は VR 映像のみで落下感覚を提示する。着地動作は行わないため、装置の稼働距離をさらに抑えつつ、落下感覚の提示が可能になる。

条件(2)：初期落下＋着地，着地後暗転映像

先行研究で提案された手法であり、装置によって落下開始時と着地時の両方に動作を提示することで、落下感覚の提示を行う。

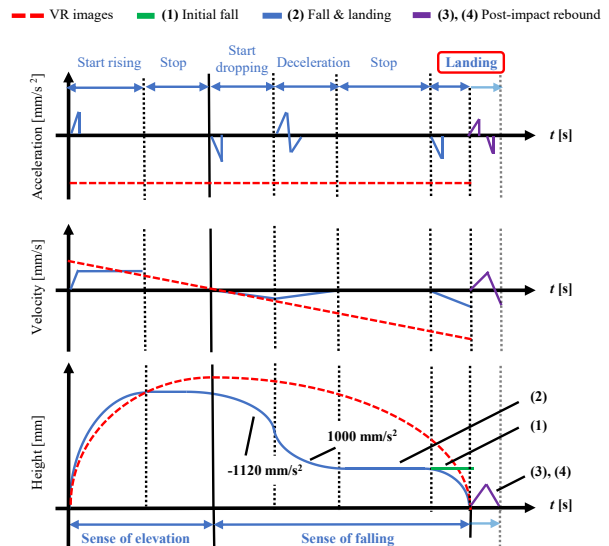


図 3：装置の駆動モデル

条件(3)：初期落下＋着地＋着地後反発，着地後暗転

着地までは条件(2)と同一であるが、着地の瞬間に装置をごく短時間上方向に上昇させ上向き加速度を提示する。この際、短時間の上昇動作を加えることで、物体が落下後にバウンドするような運動を再現し、より現実感のある落下体験を生み出す。これにより、ユーザに対する恐怖感や迫力をさらに高めることが期待される。

条件(4)：落下＋着地＋着地後反発，着地後反発映像

条件(3)のように着地時に上向き加速度を提示する場合には、VR 映像を暗転させる演出は装置の動きと映像にずれが生じる。そこで、着地の瞬間にユーザを乗せたエレベーターが反発係数 0.1、傾斜角 10 度で前方方向に跳ね上がった後（着地から 0.4 秒後）に映像を暗転させる演出を加えた。これは、人間が高所から落下した際、垂直方向だけでなく前方方向にも移動が生じる可能性を想定し、より自然で想像しやすい着地感を被験者に提示することを意図している。

次節で、条件(2)と(3)における装置の動作を検証し、4 章でこれらの動作および映像演出が主観的な落下感覚および感情面に与える影響を検証した。

本研究は、中央大学における人を対象とする研究倫理審査委員会の倫理審査（2025-011）を受け、承認を得た。

3. 装置の動作検証

3.1 駆動方法

装置の上に 70 kg の重りを設置し、装置高さをシリンダの最大ストロークである 75 mm に設定した後、落下動作を開始させた。条件(3)では、着地直後に装置下部（ヘッド側）から加圧を行った。加圧の指令値は本装置における最大印加圧力 0.9 MPa とし、圧力の印加時間は人間が力覚を知覚する時間に基づき 100 ms とした。加圧後は、指令値を 0 MPa とし、速やかに排気した。条件(2)と(3)は着地直後の加圧以外は同じようにエアシリンダを駆動させた。得られた変位と加速度のデータには、時定数を 0.05 としてローパスフィルタを適用した。

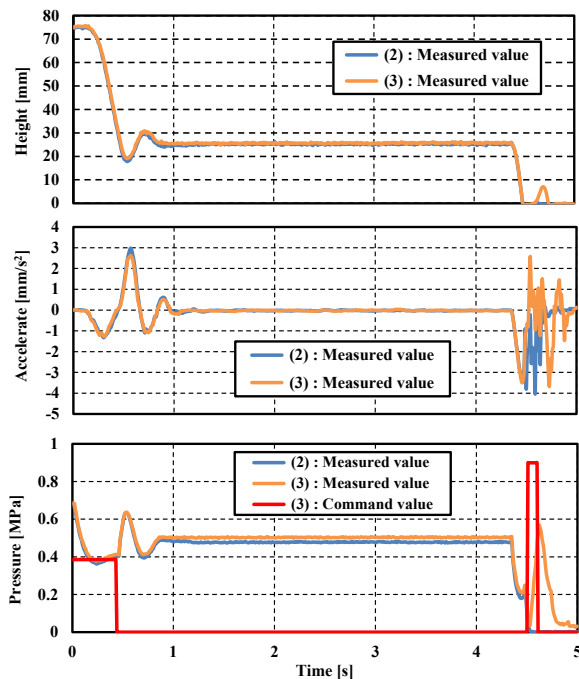


図4：装置の変位・加速度および圧力の計測結果

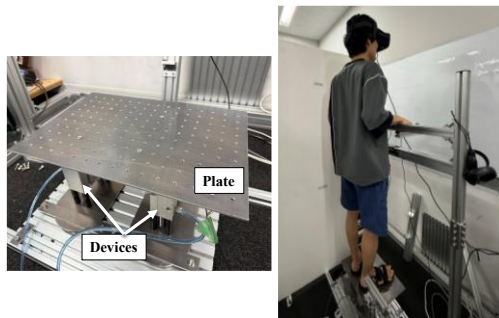


図5：実験環境

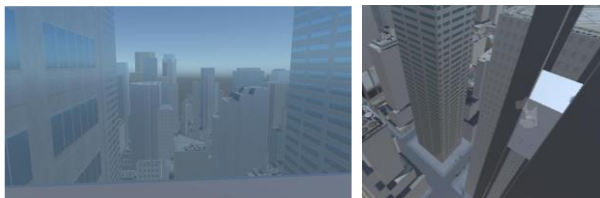


図6：VR内の映像

3.2 実験結果

装置の変位、加速度、圧力の変化を図4に示す。図より着地直後に上向きの加速度を提示する条件では、着地後の4.5~5.0 sの間に装置が6 mmの範囲で上下動し、最大2.58 m/s²の加速度が確認された。このことから、上向き加速度を提示および反発動作を模擬した変位応答が可能であることが示された。一方で、指令圧力に対して実際の出力が十分に達しておらず、応答性の限界により目標圧力に到達できなかったことが示唆される。対策として、空圧チューブの大口径化による応答性の改善が考えられる。

4. 着地時加速度提示の主観評価実験

4.1 実験手順

以下の手順を各条件で1回ずつ、計4回実施した。

1. 被験者に対して実験内容の説明を行う。
2. 実験開始前に被験者の体重を測定。

3. 図5のように装置上に立ち、HMDを装着。
4. 手すりに軽くつかまり、自由に視点を動かす。この際、手すりには体重を預けず、左右の体重の偏りは可能な限り均等になるよう注意する。
5. 図6に示すVR空間内でエレベーターが上昇し、装置高さが75 mmに到達した後、実験者が任意のタイミングで落下指令を与え、VR空間内での落下および装置による落下動作が提示される。
6. 落下完了後、被験者はHMDを外し、提示された条件に関するアンケートに回答する。

条件(3),(4)では3.2章と同様の指令圧力・印加時間を使用した。落下開始時と着地時には異なる衝撃音を再生した。本実験でのVR空間内での落下の条件は、高さ200 m、落下加速度19.62 mm/s²、落下動作は自由落下である。

実験の参加者は22歳から28歳の健康な成人男女16名（男性13名、女性3名）で、平均体重は61.45kg (SD = 10.38)であった。参加者は各条件終了後に以下の6つの質問事項にVAS (Visual analog scale)を用いて回答した。

- Q1. 実際に落下しているように感じましたか
- Q2. 映像通りに自分も着地したと感じましたか
- Q3. 現実と比較して、VR内での着地時にどの程度違和感を感じましたか
- Q4. この体験にどれくらい迫力を感じましたか
- Q5. このVR落下体験に対して恐怖を感じましたか
- Q6. このVR落下体験は好みに合いましたか

得られた結果には、全群間を対象にWilcoxonの符号付き順位検定による多重比較を行った。多重比較によるp値の補正にはBonferroni法を適用した。すべての検定において、有意水準は5%に設定した。上記の統計処理はIBM SPSS Statisticsを用いた。

4.2 実験結果

評価実験のQ1~Q6のアンケート結果を図7に示す。Q1, Q2, Q4~Q6に示す各項目はスコアが高いほど、Q3はスコアが低いほど落下体験において良い感覚が得られていることを示す。全項目において、条件(1)よりも着地ありの条件(2)~(4)が高いスコアを示し、有意な差を示した。この結果から、装置動作を初期の落下提示のみに制限し、着地を省略した場合、落下感覚や感情的刺激が弱まることが確認された。一方で、着地動作を含めた提示がユーザの知覚的体験を大きく向上させることが明らかとなった。Q3において着地後反発提示があった方がややスコアが向上したことから、着地後反発提示が着地感覚を高める可能性が示された。一方、Q1, Q2, Q4~Q6では、条件(2)と(3)のスコアの差は小さく、今回の着地後反発提示が感情面に及ぼす影響は限定的であった。200 mからの落下演出では、着地時の衝撃は体験全体の中で相対的に小さな要素であり、落下体験自体が十分な感情的刺激を提示していると考えられる。今後、圧力付加時間の延長や、大口径チューブの使用により、反発をより大きくすれば感情面への影響も期待できるが、転倒リスクや靴型装置への応用性を踏まえた検討が必要

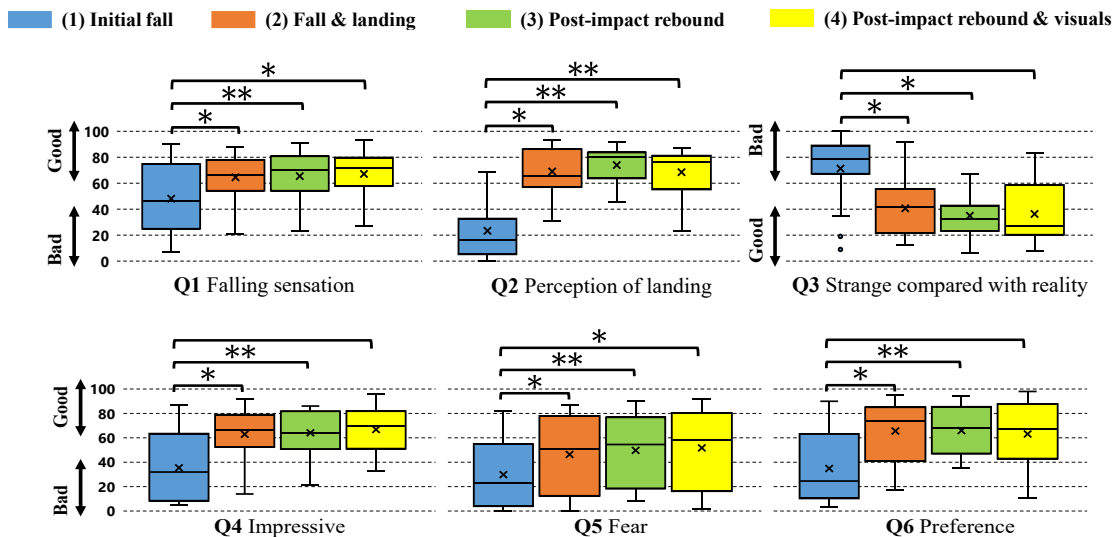


図 7：Q1~Q6 に対するアンケート結果 (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$)

要である。映像の工夫の有無による比較では、全設問でスコアの差は小さかった。体重の重い被験者からは「映像の違いが分からなかった」「映像のパクだと思った」といったコメントがあった。これは上向き加速度が十分に提示できず、現実の体感と VR 映像の齟齬が影響した可能性がある。一方で、「臨場感が増した」との肯定的意見もあり、被験者の体格や動作に応じた映像表現の最適化により、さらなる没入感や感情的反応の向上が期待される。

5. 結言

本研究では、VR 環境内における落下から着地までの感覚の向上を目的に、エアシリンダ型加速度提示装置による着地の提示および着地直後に反発を提示した際の、落下感覚および感情的反応の変化を評価した。その結果、着地提示により、落下感覚および感情的反応が有意に向上することが確認された。また、着地直後の反発提示は、着地感覚の向上に寄与する可能性が示唆された。一方、反発提示の効果は小さく、映像演出や圧力制御の工夫が課題だと考える。今後は圧力印加時間や映像表現を工夫し、より没入感の高い落下体験の実現を目指す。

参考文献

- [1] T. Hachisu, M. Koge, H. Kajimoto, "VisuaLiftStudio: Using an Elevator as a Motion Platform by Modulating Perceived Direction with a Visual Illusion", TVRSJ vol. 23, No. 3, pp. 81-90, 2018.
- [2] Jen-Hao Cheng; Yi Chen; Ting-Yi Chang; Hsu-En Lin; Po-Yao Cosmos Wang; Lung-Pan Cheng, "Impossible Staircase: Vertically Real Walking in an Infinite Virtual Tower", 2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 27 March 2021 - 01 April 2021.
- [3] MyoungGon Kim, SungIk Cho, Tanh Quang Tran, Seong-Pil Kim, Ohung Kwon, and JungHyun Han, "Scaled Jump in Gravity-reduced Virtual Environments", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.23, No.4, April 2017
- [4] Tomoya Sasaki, Kao-Hua Liu, Taiki Hasegawa, Atsushi Hiyama, Masahiko Inami, "Virtual Super-Leaping: Immersive Extreme Jumping in VR", Augmented Human International Conference 2019, March 11-12, 2019, Remis France
- [5] Romain Nith, Jacob Serfaty, Samuel G Shatzkin, Alan Shen, Pedro Lopes, "JumpMod: Haptic Backpack that Modifies Users' Perceived Jump", CHI Conference on Human Factors in Computing System, Article No 82, Pages 1-15, April 23-28, 2023, Hmburg Germany
- [6] Dominik Schmidt, Rob Kovacs, Vikram Mehta, Udayan, Umapathi, Sven Kohler, Lung-Pan Cheng, Patrick Baudisch, "Level-Ups: Motorized Stilts that Simulate Stair Steps in Virtual Reality", Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, April 2015, Pages 2157 - 2160
- [7] Y.Ishida, R.Sawawashi, R.Nishihama, T.Nakamura, "Shoe-Type-Force-Feedback Device and Falling Sensation with Two-Step Dropping", IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2023), October 1-4, 2023, Oahu, Hawaii, USA.
- [8] 日浦仁太, 石田祐己, 西濱里英, 中村太郎, "エアシリンダ型加速度提示装置を用いた VR 空間内での上昇感覚の向上", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2025 年, 2A2-M07, 2025
- [9] Alessandro Nesti, M. Barnett-Cowan, H. Bühlhoff, "Human sensitivity to vertical self-motion", Experimental Brain Research, Volume 232, pages 303-314, Oct 25 2013
- [10] T. Seno, "Vection and its Recent Stream," Cognitive Studies: Bulletin of the Japanese Cognitive Science Society, vol. 21, no. 4, pp. 523-530, 2014, doi: 10.11225/jcss.21.523.