



VR における段差への擬似的な 跳び乗り感覚提示手法の提案

A Proposal for Providing Sensation of Jumping onto Steps in Virtual Reality

小川郡平, 藤田和之, 高嶋和毅, 北村喜文

Kumpei OGAWA, Kazuyuki FUJITA, Kazuki TAKASHIMA, and Yoshifumi KITAMURA

東北大学 電気通信研究所 (〒 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1, kumpei.ogawa.r5@dc.tohoku.ac.jp)

概要: VR 空間内を移動する方法は様々な手法が考えられているが, 鉛直方向の移動に関して検討した研究は少なく, 特に跳躍動作を用いる手法はあまり検討されてこなかった. 本研究では, 一般的な VR ヘッドセットによるユーザの視点操作のみを用いて, 平坦な物理空間で擬似的に段差に跳び乗ったような感覚を与える手法を提案する. これを実現するための視点操作手法として, 跳躍動作中の上昇量と下降量に異なる倍率 (ゲイン) をかけて差を生み出すゲイン操作手法と, 上昇時間が下降時間よりも長くするように操作するピークずらし手法を設計した.

キーワード: ルームスケール VR, 跳躍動作, 視点操作

1. はじめに

バーチャルリアリティ (Virtual Reality, VR) 体験において, VR 空間内の移動は最も基本的なインタラクションの一つである. 近年では, 6DoF のトラッキングにより部屋の中を歩き回って体験することができるルームスケール VR も一般的になっている. 実際の歩行動作を用いた VR 空間内の移動は, コントローラを用いる方法に比べて臨場感が高いことが知られており [1], これを限られた物理空間内で用いるための手法 (Redirected Walking[2] など) の研究が活発に行われている.

しかしながら, 一般的に VR 体験を行うには安全のため, VR 体験に用いる実空間を障害物や段差などが無い水平面とすることが求められる. このため, 実際の歩行動作を用いる手法では VR 空間内で移動できる範囲も同一平面内に限定されてしまい, 鉛直方向の移動 (高さの異なる地点への移動) が難しいという課題がある. この課題に対して, ユーザの VR 空間上での水平移動量を操作することで坂道を歩いているような感覚を与える手法 [3] や, 鉛直方向への視点操作に加えて足裏への触覚提示を行うことで階段を昇降している感覚を与える手法 [4] なども提案されている. しかし, これらの手法には昇降のため水平方向の長い移動が必要であったり, 実空間へのオブジェクトの配置が必要となるなど, 実空間の広さや利用の自由度に制限が生じる.

鉛直方向の移動を実現可能な身体動作としては, 歩行動作以外にも跳躍動作 (跳び乗り・跳び降り動作) が考えられる. 跳躍動作は, エンタテインメント性が高くゲームなどでもよく用いられ, 坂道や階段の昇り降りに比べて短時間かつ少ない水平方向の移動で鉛直方向の移動を実現できるため, VR 空間内に適用することでよりカジュアルに鉛直方

向の移動を実現可能になると期待される. 一方で, VR 体験では実空間の視界は遮断されており, 大きな跳躍を行わせると危険が伴うことから, VR 空間内の鉛直方向の移動手段として跳躍動作はあまり検討されてこなかった. 数少ない例として, ユーザをワイヤで上方から牽引することで低重力下での跳躍を再現した研究の中で異なる高さへの跳び乗り動作が検討されている [5]. しかし, この研究は低重力環境という特殊な状況の再現に主眼を置いており, それゆえワイヤ牽引のための大掛かりな装置を必要としている.

一般的な VR セットアップのみを用いて VR 空間内での跳躍動作について検討した代表的な研究として, Redirected Jumping (RDJ) [6] が挙げられる. RDJ は, ユーザの実際の跳躍の距離や高さ・回転量にゲイン (倍率) をかけ, これらの量を増幅または減衰させた動きを VR 空間内で提示する手法である. この手法を用いることで, 外部の装置を用いずとも, 視点操作のみでユーザの跳躍動作を拡張して提示することが可能であり, 特に鉛直方向 (跳躍高さ) の視点操作は距離や回転量の操作に比べて気づかれにくいことが示された. この手法では跳躍による鉛直方向の移動については検討されていないが, このアイデアを拡張することで, 異なる高さへの跳び乗り感覚を提示することができると考えた.

そこで我々は, RDJ のアイデアを拡張し, 平坦な場所での跳躍動作に視点操作を加えることで, 外部の装置やオブジェクトを用いず擬似的に段差に跳び乗ったような感覚を与える視点操作手法を提案する. 平坦な場所での跳躍に対し, 跳び乗り動作では, 1) 上昇量が下降量よりも多い, 2) 上昇時間が下降時間よりも長い, という特徴がある. これらの特徴を, 平坦な場所での跳躍動作を用いて再現するた

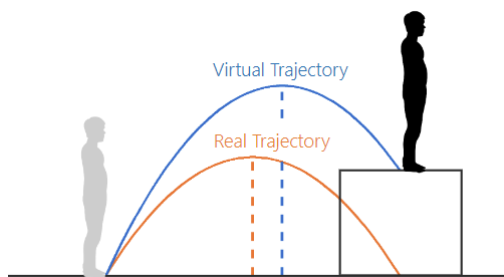


図 1: 提案手法のイメージ

め、上昇時と下降時で異なるゲインを適用することで、VR 空間内の上昇量と下降量に差を生み出すゲイン操作手法と、跳躍全体の上昇時間の割合を大きく、下降時間の割合を少なくし、跳躍開始から最高点に達するまでの時間をずらして提示することで、VR 空間内の上昇時間と下降時間に差を生み出すピークずらし手法を設計した (図 1)。

2. 提案手法

2.1 概要

本研究では、平坦な場所での跳躍に対して視点操作を行うことで、外部の装置やオブジェクトを用いずに高い場所に飛び乗ったような感覚を与える視点操作手法を提案する。これを実現するための視点操作手法として、跳躍動作中の上昇量と下降量に異なる倍率 (ゲイン) をかけて差を生み出すゲイン操作手法と、跳躍動作中の上昇時間の割合が下降時間の割合よりも大きくなるように操作するピークずらし手法の 2 つを検討する。以下では、それらの手法の設計と実装について述べる。

2.2 前提条件

高さの異なる地点への跳躍動作にはいくつかの種類が存在するが、本研究では、両足踏切での跳び乗り動作について検討する。両足踏切の跳躍を対象とした理由は、跳躍の検出などの点で実装が容易かつ、ユーザの安全性が高いと考えられるからである。跳び乗り・跳び降り動作の両方を対象としなかった理由は、同じアルゴリズムで 2 つの動作の実現が難しかったからであり、跳躍する必要性がより高い跳び乗り動作を選んだ。

もう一つの前提条件として、ユーザが跳び乗る対象の高さは既知であるとする。

2.3 手法の設計

本手法の実装要件として次の 3 つを掲げる。

- (i) ユーザによる跳躍が身体的に無理なく行え、着地時の危険を最小限に抑えること
- (ii) VR 空間内で段差に跳び乗った感覚を高いリアリティかつ少ない違和感で提示すること
- (iii) より一般的な利用を可能にするために、VR システムとして、外部のセンサや実空間のオブジェクトなどを用いずに動作すること

要件 (i) を考慮すると、着地のタイミングを操作することは避けるべきであり、現実空間と VR 空間での跳躍時間は一致することが望ましい。これを踏まえ、平坦な場所での跳躍に対して跳び乗り動作では、上昇量と下降量が異なるという点と、上昇時間と下降時間が異なるという点の 2 つの特徴を考慮し、これらを再現するための手法として次の 2 種類の視点操作手法を提案する。

1. ゲイン操作手法: 上昇時と下降時で異なるゲインを適用することで、VR 空間内の上昇量と下降量に差を生み出す。
2. ピークずらし手法: 跳躍全体の上昇時間の割合を大きく、下降時間の割合を少なくし、跳躍開始から最高点に達するまでの時間をずらして提示することで、VR 空間内の上昇時間と下降時間に差を生み出す。

一つ目のゲイン操作手法 (2.4.2 節) は前述の RDJ の考え方を応用した手法であり、RDJ の研究から高さ方向の視点操作は気づかれにくいことが示されたため、これに伴う違和感も少なく、要件 (ii) を満たすことができると考えられる。また、ゲイン操作により跳躍高さを拡張することで、現実で危険性の高い大きな跳躍を行わなくても、VR 空間内で大きな跳躍を再現できると考えられる。二つ目のピークずらし手法 (2.4.3 節) では、実際には上昇しているときに VR 空間内では下降している映像を提示することになるが、実際には下降しているリフトを上昇しているように錯覚させる Cheng らの手法 [7] のように、上昇時と下降時の体性感覚を混同させる手法も提案されていることを考えると、本手法による違和感も少なく、要件 (ii) を満たすことができると予想される。これらの手法は 2 つとも HMD の視点操作のみで実現でき、要件 (iii) を満たすことができる。これらの手法によって主観的なリアリティが高く、違和感の低い跳び乗り体験を提示することができれば、VR 空間内での移動の自由度は大きく向上し、より豊かな VR 体験が可能となると考えられる。

2.4 実装

要件 (i) と (iii) に関連して、着地時に HMD のケーブルが干渉してしまうことを防ぐため、本研究では VR システムとしてケーブルを用いずに HMD 単体でトラッキングが可能であるオールインワン型 VR ヘッドセットの Oculus Quest 2 を用いることとした。

2.4.1 跳躍動作の検知

跳躍動作の検知を行うため、本研究でも RDJ の研究 [6] と同様、ユーザの状態を直立状態、準備状態、上昇状態、下降状態、着地状態の 5 つの状態に分けて定義する。

上記 5 つの状態のうち、上昇状態と下降状態を「跳躍 (ジャンプ) 中」と定義する。後述するゲイン操作や最高点をずらす操作は、この跳躍中にのみ行われる。Oculus Quest 2 ではユーザの腰や両足の位置を取得することができないため、跳躍動作の検知にこれらの位置を利用していた RDJ とは異なり、本手法では頭の位置 (HMD の位置) のみを基にして設計した。頭の位置の情報は、ユーザが頭を動かして周囲

を見回したりしただけでも変化してしまうため、これにより跳躍が誤検知されてしまうのを防ぐための調整を行った。具体的には上記5つの状態の中で「頭の高さが直立状態の高さと比べ一定値以上低い（高い）とする閾値を、予備テストの結果を踏まえてRDJの研究による値（0.03m）よりも大きい0.11mとした。以上により腰や両足の位置を取得するためのマーカを着用しなくとも、閾値を調整することで問題なく跳躍の検出ができることを確認した。

2.4.2 ゲイン操作手法

ゲイン操作においては、RDJと同様、各フレームでの移動量にゲインをかけることで、ユーザの跳躍高さを操作する。ここでは、Kimらの研究で提案された手法を参考に設計を行った。Kimらの手法では、下降ゲイン g_v^\downarrow の値を、上昇ゲイン g_v^\uparrow 、実際の跳躍の最高点の高さ h_{peak} 、跳び乗り対象の高さ h_{obj} に応じて、

$$g_v^\downarrow = \frac{g_v^\uparrow h_{peak} - h_{obj}}{h_{peak}} \quad (1)$$

として動的に計算していた。しかし、この計算式は、現実空間での下降している時間とVR空間内で下降している時間が同じ場合、つまり後述の最高点をずらす操作が行われていない場合の計算式であるため、本研究においては、後述のピークずらし手法を組み合わせる場合にも上式が適用できるよう、下降ゲインの計算式を次のように変更した。

$$g_v^\downarrow = \frac{h_{virtual}^\uparrow - h_{obj}}{h_{remain}} \quad (2)$$

ここで、 h_{obj} は跳び乗り対象の高さ、 h_{remain} はVR空間内で最高点に達した瞬間における現実空間でのユーザの頭の高さである。また、 $h_{virtual}^\uparrow$ はVR空間内での跳躍の最高点の高さであり、先述の閾値を $\theta_{takeoff}$ 、実際の跳躍の最高点の高さを h_{peak} 、上昇ゲインを g_v^\uparrow とすると、次式で計算される。

$$h_{virtual}^\uparrow = \theta_{takeoff} + (h_{peak} - \theta_{takeoff}) \times g_v^\uparrow \quad (3)$$

ゲイン操作手法のみを用いた場合の、現実とVR空間内の時間に対するユーザの位置の変化のイメージを図2(b)に示した。なお、簡単のため、この図においては先述の閾値などは考慮していない。

2.4.3 ピークずらし手法

次に、跳び乗り動作が持つ上昇時間と下降時間が異なるという性質を再現するため、跳躍の最高点に達するまでの時間をずらして提示することでVR空間内の上昇時間と下降時間に差を生み出すピークずらし手法について検討する。本研究の対象である跳び乗り動作の場合、VR空間内での最高点に達するまでの時間を、現実での跳躍の最高点に達するまでの時間より引き延ばして提示することで、自然な跳躍の軌跡に近づくと考えられる。これを再現するため、跳躍の上昇時について現実での跳躍動作時の頭の位置の変化（跳躍の軌跡）を記録し、HMD側の映像を毎フレーム更新するのではなく、何フレームかごとに記録した頭の位置の変化に基づいて映像を引き延ばして更新するように設計した。

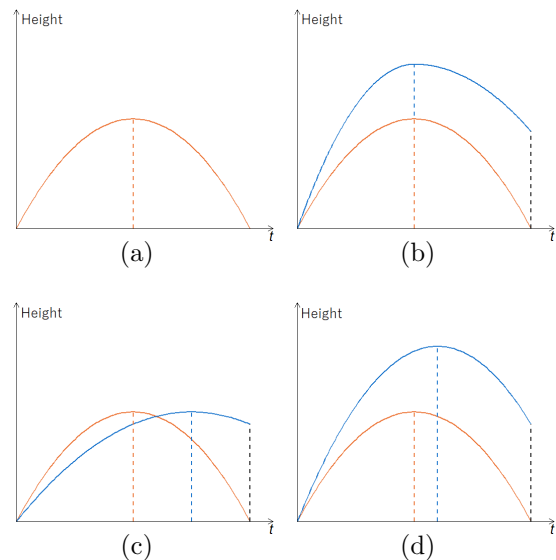


図2: 提案手法を用いた跳躍を行ったときのユーザの位置の変化のイメージ

オレンジ色：現実の跳躍の位置変化

青色：VR空間内の跳躍の位置変化

(a) 実際の跳躍

(b) ゲイン操作手法のみ ($g_h^\uparrow = 1.5$)

(c) ピークずらし手法のみ ($ps = 1.5$)

(d) 両手法の組み合わせ ($g_h^\uparrow = 1.6$, $ps = 1.2$)

どの程度最高点をずらすかは、以下の計算式で定めた変数ピークシフト (ps) を用いて表す。

$$ps = \frac{t_{virtual}^\uparrow}{t_{physical}^\uparrow} \quad (4)$$

ピークシフトが ps のとき、 ps 回に1回フレームの更新を行うように実装することで、ピークずらしを実現した。ここで、 $t_{virtual}^\uparrow$ はVR空間内での上昇時間、 $t_{physical}^\uparrow$ は現実空間での上昇時間である。すなわち、ピークシフトは「VR空間内で最高点に達するまでの時間が、現実空間でのそれに対して何倍か」を表す値となる。

ピークずらし手法のみを用いた場合の、現実とVR空間内の時間に対するユーザの位置の変化のイメージを図2(c)に示した。ゲイン操作手法のみの図(b)と同様、閾値は考慮していない。VR空間内の跳躍（青色）は、実際の跳躍（オレンジ色）を左右に引き伸ばしたような形状になっており、最高点の高さは両者で変わっていないが、最高点に達するまでの時間や、着地する高さが異なっている。先述したゲイン操作手法と組み合わせると、(d)のように、最高点の高さも変化する。図(b)と図(d)を比較すると、図(b)では上昇時と下降時に提示される加速度の大きさが異なる（下降時のほうが移動距離が短くなるようにゆっくり提示される）のに対し、図(d)では上昇時間を引き延ばすことで、提示される加速度の大きさを同程度とすることで自然な跳躍の軌跡を実現している。

3. おわりに

本研究では、平坦な場所での跳躍に対して視点操作を行うことで外部の装置やオブジェクトを用いずに高い場所に跳び乗ったような感覚を与える手法として、ゲイン操作手法とピークずらし手法の2つを提案し、その実装について述べた。今後は、これらの手法を用いてリアリティが高く違和感の低い跳躍が提示できるかを調査するためのユーザスタディを行う予定である。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 (19KK0258) の補助を受けた。

参考文献

- [1] Martin Usoh, Kevin Arthur, Mary C. Whitton, Rui Bastos, Anthony Steed, Mel Slater, and Frederick P. Brooks. Walking >Walking-in-Place >Flying, in Virtual Environments. In *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 359–364, 1999.
- [2] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, and Mary C Whitton. Redirected Walking. In *Proceedings of Eurographics*, pp. 289–294, 2001.
- [3] Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Walking Uphill and Downhill: Redirected Walking in the Vertical Direction. In *ACM SIGGRAPH Posters*, p. 37, 2017.
- [4] Ryohei Nagao, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Ascending and Descending in Virtual Reality: Simple and Safe System Using Passive Haptics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1584–1593, 2018.
- [5] MyoungGon Kim, Sunglk 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, pp. 1360–1368, 2017.
- [6] Daigo Hayashi, Kazuyuki Fujita, Kazuki Takashima, Robert W. Lindeman, and Yoshifumi Kitamura. Redirected Jumping: Imperceptibly Manipulating Jump Motions in Virtual Reality. In *Proceedings of IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 386–394, 2019.
- [7] Jen-Hao Cheng, Yi Chen, Ting-Yi Chang, Hsu-En Lin, Po-Yao Cosmos Wang, and Lung-Pan Cheng. Impossible staircase: Vertically real walking in an infinite virtual tower. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 50–56, 2021.