



空気圧バルーンを用いた靴型高さ提示デバイスの 昇降動作における高さ知覚の拡張に関する研究

小林優人¹⁾, 今悠気¹⁾, 梶本裕之¹⁾

1) 電気通信大学 大学院情報学専攻 (〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {kobayashi, kon, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要: VR 空間内での歩行動作の際に生じる地形変化を現実空間にフィードバックする手法は多く研究されている。特に、地面の高さ変化においては足が接地する床面あるいは靴底を物理的に昇降させることで高低差をユーザに提示する手法がとられている。しかし、靴型デバイスは床型デバイスに比べ小型な反面、靴の重さや靴底が大きくなる問題がある。本研究ではこれらの問題を解決するため空気圧バルーンを用いた軽量な靴型 VR デバイスを開発した。本稿では靴型デバイスを用いた靴型デバイスの高さ提示に関する予備的実験の結果について報告する。

キーワード: 空気圧バルーン, 靴型デバイス, 高さ知覚, 昇降動作

1. はじめに

近年、HMD の普及により、HMD を用いた VR コンテンツが一般的になってきた。VR 空間内でリアルな体験を行うため、モーションプラットフォームや触覚提示デバイス、実際の道具を用いる研究・コンテンツは様々なものが提案されている。一方で、多くの VR コンテンツでは実空間内で歩行を行うことで、VR 空間内を歩き回ることを想定している。日常生活における「歩く」という行為において、我々は地面の凹凸や硬さ、滑りやすさ、粘着感などの様々な情報を得ることができる。つまり、完全な VR 体験の実現のためには、足への感覚提示は重要な要素の 1 つである。そのため VR 空間における歩行に関する研究は広く行われている [1][2][3][4]。ただしこれらの研究では平面の地面の表現に留まっており、それ以外の地形情報を提示するものではなかった。

これに対して VR 空間内での歩行動作の際に感じる地形情報を足に伝える研究も複数提案されている。Sugihara らの ALF は、六角形状のアクチュエータユニットを床面に隙間なく配置し、それらを駆動させることで地面の凹凸形状を提示する手法である [5]。ALF は比較的大きな凹凸を提示するものであったが、小さな凹凸面上の歩行時や物を踏んだ際に足が感じる振動を、靴内部や床に取り付けた振動子を用いて再生する提案が行われている [6][7][8]。また、Son らは MR 流体アクチュエータを用いて雪や砂などを踏みしめた際の硬柔感、およびテクスチャ感の再現を行なった [9]。

これらの提案に共通しているのは、足裏に対して地面の凹凸感や材質を提示している点である。しかし、歩行感覚の再現にはこれらの触覚提示の他に階段や坂を登るような大きな地形変化の再現も重要となる。Noma らはトレッド

ミル内に上下に稼働するステージを設けることで、坂道や段差の提示を行う歩行デバイスの提案を行なった [10]。ただしこうした環境設置型の歩行デバイスの場合、単純なトレッドミルと比較してもコストが高くなるという問題がある。これに対して Schmidt らの Level-Ups は靴底を昇降させる機構を用いて台に登ったときの高さ提示を行なうウェアラブルデバイスである [11]。このように、靴型デバイスとすることで使用状況の幅が広がると期待される。一方で Level-Ups では、次のような靴型デバイスの問題を抱えている。

- (1) 靴の重さや靴底が大きくなる。
- (2) 機構上の制約により、提示可能な高さが限られる。
- (3) 表現したい高さと同じスケールで靴底を大きく変化させることは転倒などの事故に繋がる危険性がある。

本研究では、このような靴型高さ提示デバイスの問題を解決するため、真空ポンプと空気圧バルーンからなる靴型デバイスを提案する。上記第一の問題に対しては、本デバイスは空気圧バルーンを用いることで靴型デバイスを従来のデバイスに比べ軽量化し、かつ靴底を薄くすることを可能とした。また、上記第二および第三の問題に対しては、本研究では靴型デバイスの高さ提示と HMD を用いた視覚提示を組み合わせることで、靴底を大きく変化させることなく高さ知覚を拡張させることを目指す。

本稿では空気圧バルーンを用いた靴型高さ提示デバイスの提案、および高さ提示に関する予備的実験の結果について報告する。

2. 関連研究

Nagao らは床面に階段のエッジを模した突起物を配置し、これらを踏みしめた際の足裏に対する物理的な刺激と HMD

による視覚的な刺激を組み合わせ、VR空間内で階段を登る際の昇降感覚の提示を行なった [12]. Nordahlらは靴底に埋め込んだ振動子とエレベータ内を模したVR空間において、振動と視覚刺激を用いることでエレベータに乗っているときの上昇感覚、及び下降感覚の提示を行なった [13].

BaousiらのInflashoeでは本研究と同様に、靴底に取り付けたチューブを空気圧で膨らませることで靴底の厚みを自由に変えられるデバイスの提案を行なった [14]. Inflashoeでは靴底の厚みをユーザが調節することで、チューブが動的なインソールとして機能し、快適な歩行体験をサポートする。

3. 空気圧バルーンを用いた靴型高さ提示デバイス

3.1 デバイス概要

図1に空気圧バルーンを用いた靴型高さ提示デバイスを示す。靴型デバイスの重量は片足約430gであり、非動作時の靴底の厚みは約1.0cmであった。靴底の前方と後方部分にそれぞれ熱可塑性ポリウレタン製のバルーンが2つ配置されており、ポンプで空気を送り込むことで膨張し、靴の全高が大きくなる。反対に、ポンプで空気を抜くことでバルーンは収縮し、元の高さに戻る。本デバイスは非動作時に比べ、動作時(非負荷時)は約5.0cm、体重約60kgのユーザが乗った時(負荷時)には約3.0cm高くなった。また、バルーンが最大まで膨らむには700msecの時間を要した。

靴上部に取り付けられたトラッキングデバイス(VIVE Tracker(2018), HTC)を用いて靴の位置と傾きを計測し、VR空間に靴型デバイスの状態を反映する。図2のようにVR空間上の台の上に足が差し掛かったタイミングでバルーンは膨張する。ユーザは膨らんだバルーンを踏むことで高さの変化を知覚する。反対に足が台から離れた場合には収縮し、元の高さに戻る。

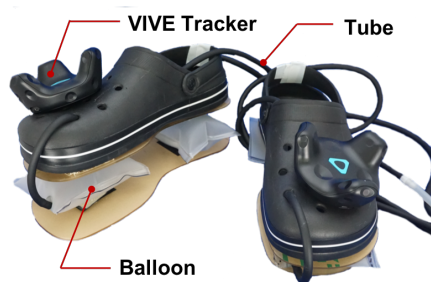


図1: 空気圧バルーンシューズ

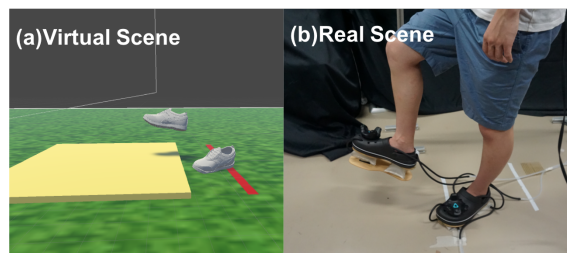


図2: 空気圧バルーンシューズの動作の様子

3.2 デバイス構成

図3に本デバイスのシステム構成を示す。本システムでは1つのバルーンに対し排気用と吸気用の2つの真空ポンプ(VP0940, 日東工器)を用いた。真空ポンプにつながった電磁弁(VX313, SMC)を制御することでバルーンの状態を変化させることができる。また、バルーンの膨らみは正圧と負圧の2種類の気圧センサとマイクロコントローラ(ESP32-DeviKitC, Espressif Systems)により制御される。

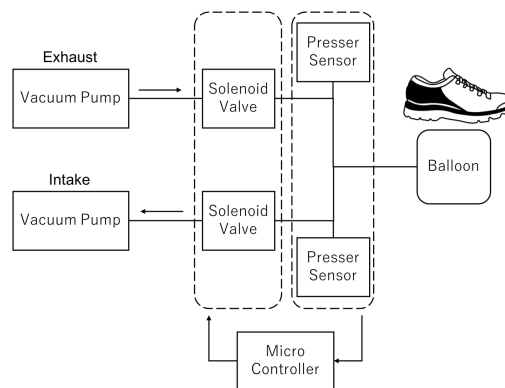


図3: 空気圧バルーンシューズのシステム構成

4. 実験

4.1 実験概要・条件

提案デバイスを用いて、VR空間上の台を昇降動作する際の歩行感覚を調べる実験を行った。本実験では、触覚刺激として、「高さ提示なし(Nothing)」、「提案デバイスによる高さ提示(Balloon)」、「実物の台(Real Step)」の3条件で実験を行った。いずれの条件においても被験者は実験デバイスを装着した状態で実験を行った。また、デバイスの駆動音による影響を遮断するため、ヘッドホンでホワイトノイズを聞いた状態で実験を行った。

また、負荷時のデバイスの高さ約3.0cmを基準として、厚さ1.0cmの亚克力を3枚重ねた高さ3.0cmの台を「実物の台」として実験を行った。同様に、視覚刺激としてVR空間上に高さ3.0cmの台を配置し実験を行った。いずれの条件においてもVR空間上で視覚的に足が台に接地するタイミングと実空間上で足が物理的に接地するタイミングは同じになるように調節された。

各被験者に対して3種の高さ提示条件を各5回ずつの合計15試行をランダムな順序で提示した。

4.2 実験手続き

本実験の被験者は8名(男性6名, 女性2名, 21-24歳)であった。図4に実験の様子を示す。被験者は提案デバイスとヘッドマウントディスプレイを装着し、安全のため手すりや体を支えながら実験を行った。図2(a)のように、台から約20cm手前に引かれた赤線をスタート地点として実験を行った。被験者はスタート地点から歩いて台に向かい、自身の歩幅に適した距離から昇降動作を行った。実験環境上の問題で、台を降りるときには後ろ向きのまま降りるよ

うに指示した。また、被験者には各試行中に1度は両足とも台に登った状態になるように指示した。

各施行の終わりに被験者はスタート地点へ戻り、以下の3つの項目について7段階のリッカートスケールで回答した。

- 昇降動作のリアルさ
- 体験の楽しさ
- 体験の自然さ

昇降動作のリアルさとは台に登り降りする際の高さ提示のリアリズムを評価する項目であり、体験の自然さとは体験を通して違和感がなかったかを評価する項目である。

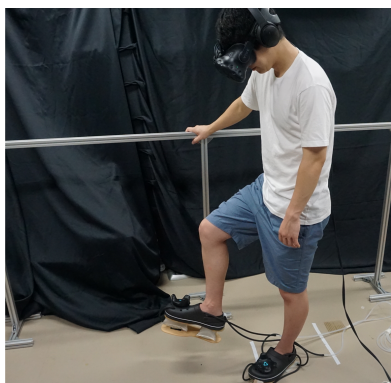


図 4: 実験の様子

4.3 実験結果

図 5 に各条件における昇降動作のリアルさについての結果を示す。Kruskal-Wallis 検定を行った結果、主効果が確認された ($\chi^2(2) = 90.314, p < .001$)。Dunn-Bonferroni 検定による多重比較の結果、Nothing-Balloon 間、Nothing-Real Step 間、Balloon-Real Step 間において有意差が見られた ($p < .001$)。この結果より、実物の台、バルーンによる高さ提示、高さ提示なしの順で昇降動作のリアリズムが高くなることが確認された。

図 6 に各条件における体験の楽しさについての結果を示す。同様に Kruskal-Wallis 検定を行った結果、主効果が確認された ($\chi^2(2) = 64.038, p < .001$)。Dunn-Bonferroni 検定による多重比較の結果、Nothing-Balloon 間、Nothing-Real Step 間で有意差が見られた ($p < .001$)。また、Balloon-Real Step 間においても有意差が見られた ($p < .01$)。この結果より、Balloon を用いた昇降体験が最も楽しいという結果となった。また本回答項目においても Nothing が一番低い評価となった。

図 7 に各条件における体験の自然さについての結果を示す。Kruskal-Wallis 検定を行った結果、主効果が確認された ($\chi^2(2) = 71.961, p < .001$)。Dunn-Bonferroni 検定による多重比較の結果、Nothing-Real Step 間、Balloon-Real Step 間で有意差が確認された ($p < .001$)。この結果より、Nothing と Balloon のどちらの条件とも Real Step 条件に比べて有意に体験が不自然であるという結果となった。

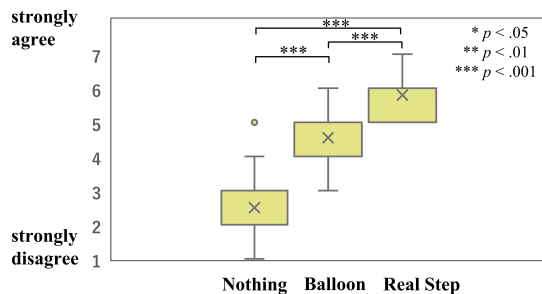


図 5: 昇降動作のリアルさについての回答結果

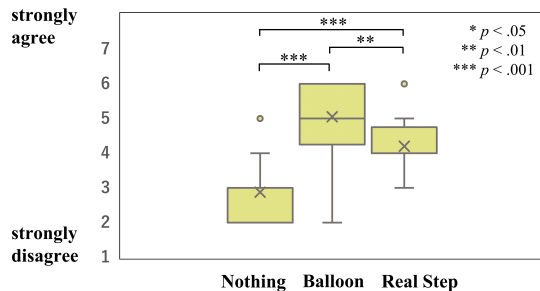


図 6: 体験の楽しさについての回答結果

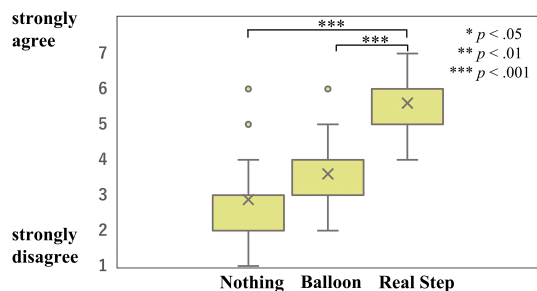


図 7: 体験の自然さについての回答結果

4.4 考察

図 5 の結果より、Nothing-Real Step 間で大きな差が確認された。つまり、視覚刺激と同様の高さ提示を行うことで、体験のリアリズムが大きく向上したといえる。一方で、バルーンシューズによる高さ提示は実物の台と比べて昇降動作のリアリズムは低下するが、Nothing 条件より有意にリアリズムが高くなるという結果となった。つまり、片方の足を踏み出したときに生じる高さギャップが昇降動作におけるリアリズムを向上させたと考えられる。しかし、足を台から戻す際にバルーンの収縮が間に合わず、少し空気が残ったバルーンを踏んでしまい違和感が生じたというコメントした被験者が数人いた。そのため、バルーンシューズを用いた高さ提示は実物の台と比べ低い評価になったと考えられる。

図 6 に示した体験の楽しさについての回答結果では、Balloon 条件が一番高い評価となった。体験を楽しいと評価した被験者からは、バルーンシューズによる高さ提示条件では、台に触れた際の触覚の変化が大きく体験に楽しさを感じたとコメントがあった。つまり、触覚の変化が少ない他の 2 つの条件に比べ、バルーンシューズを用いた高さ提示

条件では触覚の変化が大きく、体験の楽しさが向上したのではないかと考えられる。

図7に示した体験の自然さについての回答結果では、Nothing条件とBalloon条件のどちらともReal Step条件に比べ体験が不自然であるという結果となった。

Balloon条件がReal Step条件に比べ評価が低くなった原因として、負荷時にバルーンが変形するためだと考えられる。本デバイスはバルーンの形状、及びシステム上の問題で、バルーンに負荷をかけるとバルーンが大きく変形してしまう問題がある。数人の被験者からは膨らんだバルーンシューズはバランスが悪く、柔らかい高反発な地面の上に立っているような感覚であるとコメントがあった。つまり、バルーンシューズの不安定さが体験の自然さを低下させた原因であるといえる。

5. まとめと今後の展望

本研究では、従来の靴型触覚デバイスの課題であった高さや厚さの問題を解決する手法として空気圧バルーンと真空ポンプを用いた靴型デバイスを提案した。また、物理的に大きな高さ提示を行うことは、デバイスが大掛かりになる問題や転倒時の危険性が増す問題がある。そこで本研究では、提案デバイスを用いて高さ提示を行い、視覚的な高さ提示を組み合わせることで高さ提示の拡張を行うことを目的とした。本稿では、研究の第一段階として空気圧バルーンシューズの高さ提示に関する実験を行った。実験では、何も提示がない条件、提案デバイスによる高さ提示条件、実物の台による高さ提示の3条件の比較を行った。結果として、本提案デバイスは高さ提示が可能であり、昇降動作のリアリズムが向上するという結果が得られた。しかし、実物の台と比べ、提案デバイスであるバルーンシューズは形状が不安定であり、体験が不自然になってしまうという問題が発覚した。一方で、バルーンシューズを用いた体験は楽しさの評価が一番高いという結果となった。さらに、本デバイスは動的に高さ提示を行うことができるため、VRコンテンツへの様々な応用が可能であると考えられる。

今後は本デバイスの改良を行い、本研究の目的である高さ知覚拡張に関する調査を行う。

謝辞 本研究はJSPS科研費JP18H04110の助成を受けたものである。

参考文献

[1] H. Iwata: The torus treadmill: Realizing locomotion in VEs, IEEE Computer Graphics and Applications Volume:19 Issue:6, pp.30-35,1999.
 [2] H. Iwata, H. Yano, H. Fukushima and H. Noma: CirculaFloor[locomotion interface], IEEE Computer Graphics and Applications Volume:25 Issue: 1, pp.64-67,2005.
 [3] Virtuix Omni, <http://www.virtuix.com/>

[4] S. Razzaque, Z. Kohn and M. C. Whitton: Redirected walking, Proceedings of EUROGRAPHICS Vol. 9, 2001.
 [5] T. Sugihara and T. Miyasato: The Terrain Surface Simulator ALF (ALive! Floor), Proceedings of VRSJ ICAT' 98, pp.170-174,1998.
 [6] T. Kim and J. R. Cooperstock: Enhanced Pressure-Based Multimodal Immersive Experiences, Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference, 2018.
 [7] R. Nordahl, A. Berrezag, S. Dimitrov, L. Turchet, V. Hayward and S. Serafin: Preliminary Experiment Combining Virtual Reality Haptic Shoes and Audio Synthesis, International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, pp. 11 - 16, 1997.
 [8] Y. Visell, A. Law and J. R. Cooperstock: Touch Is Everywhere: Floor Surfaces as Ambient Haptic Interfaces, IEEE Transactions on Haptics Volume:2 Issue:3, pp.148-159, 2009.
 [9] H. Son, H. Gil, S. Byeon, S. Kim, J. R. Kim: RealWalk: Feeling Ground Surfaces While Walking in Virtual Reality, In Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, D400 pp.01-04, 2018.
 [10] H. Noma, T. Sugihara, T. Miyasato: Development of Ground Surface Simulator for Tel-E-Merge System, IEEE-Virtual Reality 2000 Conference, pp.217-224, 2000.
 [11] D. Schmidt, R. Kovacs, V. Mehta, U. Umaphathi, S. Köhler, L. Cheng and P. 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, pp.2157-2160, 2015.
 [12] R. Nagao, K. Matsumoto, T. Narumi, T. Tanikawa and M. Hirose: Ascending and Descending in Virtual Reality: Simple and Safe System using Passive Haptics, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics VOL.24, Issue 4, pp.1584-1593, 2018.
 [13] R. Nordahl, N. C. Nilsson, L. Turchet and S. Serafin: Vertical Illusory Self-motion Through Haptic Stimulation of the Feet, 2012 IEEE VR Workshop on Perceptual Illusions in Virtual Environments, pp.21-26,2012.
 [14] K. Baousi, N. Fear, C. Mourouzis, B. Stokes, H. Wood, P. Worgan and A. Roudaut: Inflashoe: A Shape Changing Shoe to Control Underfoot Pressure, Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.2381-2387, 2017.