



圧覚を用いた階段昇降感覚の提示

長尾涼平¹⁾, 鳴海拓志¹⁾, 谷川智洋¹⁾, 廣瀬通孝¹⁾

1) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {nagao,narumi,tani,hirose}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: ヒトは階段を昇降する際には平地歩行の際とは異なり前足部で段差に接地することが知られている。この知見を踏まえ、本研究では平面を歩行するユーザの前足部へ圧覚を提示することで、バーチャル空間での階段による昇降感覚を提示可能であると仮説をたてた。仮説に基づき動的に前足部へ圧覚提示をするためにプロトタイプを作成し、その効果の有用性をユーザスタディにより検証した。

キーワード: バーチャルリアリティ, クロスモーダル

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) の研究分野では、広大なバーチャル空間 (VE) 内の平面上を、歩行により移動可能とする手法が多数提案されてきた。またここ数年はコンシューマ向けに、位置トラッキング機能を備えた安価なヘッドマウントディスプレイ (HMD) が発売され、数 m 四方程度の範囲であればユーザは VR 空間を歩行により自由に移動することができるようになった。その一方で、VE において階段や坂道を移動するような、歩行を伴い鉛直方向に移動することができる手法は水平方向の移動に対する手法に比べると非常に少ない。それらの手法の中でも特にデバイスにより物理的な段差を作り出し、段差による昇降感覚を提示するシステムが提案されてきた。しかし、このようなデバイスシステムは HMD を装着したユーザが使用する際には転倒して怪我をする恐れがある [1, 2]。そのため物理的な段差を作り出さず、ユーザが安全に昇降感覚を得られるシステムが必要であると考える。

そこで物理的な段差を作り出すことなく、平地を歩行するユーザに対して昇降感覚を提示するために、階段昇降に特徴的な感覚刺激を利用することを考える。ヒトの歩行においては足裏の触覚や圧力分布が歩行動作生成に重要であることが知られている [3, 4]。これらの知見を利用して、静止しているユーザの足裏に実際の歩行の特徴を反映した振動刺激を提示することで、平地を歩行する感覚をユーザに生起させるシステムが提案されている [5, 6]。

また、筆者らは段差の縁という階段昇降時の触覚的特徴に注目し、これに対応した触覚刺激をユーザの足裏に提示することで、段差を作り出すことなく階段昇降感覚を提示するシステムを研究してきた [7]。階段昇降感覚提示のためには小さな突起を床に設置し、ユーザにその突起を踏んでもらうことが必要であることが実験から確かめられた。これは突起を踏むことで、足裏の圧力分布が変化しているからであると考える。一方でこのシステムでは床に突起を固定させる必

要があり、突起を設置されたスペースに関してはコンテンツ作成に制限が生じる。

階段昇降時の足裏にかかる圧力は、平地歩行時に比べて前足部で大きくなることが知られている [8]。また、接地位置に関しても平地歩行では踵接地であるのに対して、階段昇降時は前足部で接地を行っている [9]。この平地歩行時と階段昇降時の歩行の違いに関する知見、及び突起により昇降感覚を提示するシステム [7] に注目し、本研究では平地を歩行するユーザの前足部に圧力を加えることで、階段昇降感覚を提示する手法を提案する。具体的には HMD を装着したユーザに対して階段を歩行する映像を提示するとともに、ユーザは靴の前足部に圧覚提示機構をもつサンダルを履く。動的に圧覚を提示することにより、突起を設置することで生じるコンテンツの制約の解消が期待される。本研究では足の接地を検出しユーザの前足部に圧覚を提示するプロトタイプを実装した。以上のように本研究では圧覚を用いた階段昇降感覚の提示手法の提案及び実装を行い、ユーザスタディによりその効果を検証した。

2. 関連研究

本章では VR の研究領域でこれまで行われてきた昇降感覚提示手法を紹介し、本研究との関連性を明らかにする。次にヒトの歩行においては足裏感覚が重要であるという観点から、平地歩行と階段昇降の違いを明確にし、その違いに注目することで階段昇降感覚の提示手法の構築を目指す。

2.1 歩行を伴う昇降感覚提示システム

CirculaFloor[1] と呼ばれるロコモーションインターフェースや靴底の高さを動的に変えられる靴型デバイスの Level-Ups[2] など、アクチュエータにより物理的な段差を作り出すことで、昇降感覚を提示するデバイスシステムが複数提案されている。しかし、これらのシステムでは階段のような連続した段差を提示するためには、アクチュエータにより生成した段差を一度解消する必要がある。段差の解消には一定の時間を要するためにユーザは現実のように止まることなく自然に歩行することができない。またユーザは物理的な

Ryohei NAGAO, Takuji NARUMI, Tomohiro TANIKAWA, and Michitaka HIROSE

段差の上を歩行するため HMD を装着して利用する際には転倒による怪我の可能性があると考える。

これに対して筆者らは階段の段差の縁という階段の触覚的特徴に注目し、これに対応した触覚刺激を現実空間に配置された小さな突起により提示することで、階段による昇降感覚を提示する手法を提案した [7]。突起を踏むことで足裏の圧力分布が変化し、階段を昇降するような感覚を得ることができる。この手法では物理的な段差を作り出さないため、HMD を装着したユーザでも安全に使用することができる。また、複雑なデバイスを使用しないため非常に低コストである。一方で床に突起を設置したスペースは階段のモデルを常時表示する必要があり、突起と VE で表示する段差の縁の位置を合わせる必要があるなど、コンテンツ側に制約が生じてしまう。

2.2 平地歩行と階段昇降

ヒトの歩行においては足裏感覚が重要であることが知られている。先行研究では実験参加者の足裏を氷で冷やし、入力される感覚情報を鈍くすることで、実験参加者の圧力中心や歩行パターンが大きく変化すると報告されている [3, 4]。これらの知見から歩行時の足裏感覚に影響すると考えられる、足の接地位置と圧力分布の観点から平地歩行と階段昇降の違いを明確にする。

Riener らの研究ではヒトの歩行において、平地歩行では踵接地であるのに対して、階段昇降では前足部接地であることが実験から確かめられた [9]。昇段時は前足部接地をすることで踵接地時に比べ相対的に小さな力で昇段できるとされ、降段時は前足部接地をすることで、足首の回転範囲が増加し、より効果的に重力エネルギーを足首周辺で吸収できるとされている。この研究から階段昇降では前足部接地かつ前足部離地のため、平地歩行時よりも大きな圧力が前足部に分布すると考える。また、堀江らの研究では足圧の情報から平地歩行、階段昇降、坂道歩行を推定している [8]。この研究では坂道歩行と階段昇降では前足部の圧力が増加していること、また階段昇降では前足部接地であるのに対し坂道歩行時は踵接地であることなどの特徴を利用し歩行種別の推定を行っている。

本研究では階段昇降時の特に接地位置と圧力分布に注目し、平地歩行をするユーザに対して階段昇降時の特徴である前足部の圧力増加という情報をフィードバックすることで階段昇降感覚を提示する手法を提案する。

3. 圧覚を用いた昇降感覚提示手法

3.1 提案手法

本研究では HMD を用いた階段昇降の映像提示に加えて、前足部への圧覚提示により平地を歩行するユーザに対して階段昇降時の圧力分布を感じさせ、階段昇降感覚を提示できると考えた。2.2 での議論を踏まえて階段昇降時は前足部接地し、前足部離地しているため、ユーザが VE で階段を昇降する際には接地時に前足部に圧覚を提示する。これにより突起を設置する手法 [7] 同様に前足部の圧力が相対的に上昇

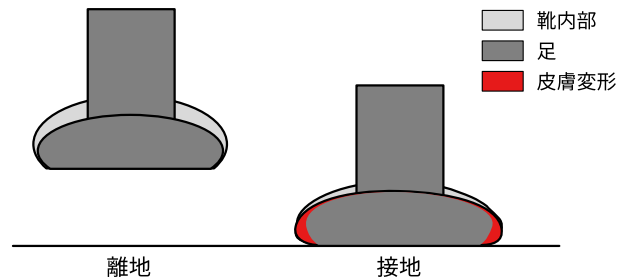


図 1: 接地時の皮膚変形による靴内部の圧力上昇

し、平地を歩行するユーザに対して、階段を昇降している際の足裏感覚を提示できると考えた。動的に圧覚を提示することにより、従来手法で存在した床に接地する突起の位置合わせや、突起を設置したスペースとの整合性の取れたコンテンツを制作しなければならないという制約などの問題が解消されると期待する。

また、2.2 で述べたように階段昇降の接地時には平地歩行時に比べると前足部に大きな荷重がかかるため、図 1 に示すように平地歩行時に比べて前足部の足裏周辺の皮膚が大きく変形し横に広がり、足裏だけでなく靴の前足部全体の圧力が上昇していると予想する。そのため足裏だけでなく足の甲部や側部も含めた前足部全体の圧力を高めることでより効果的に昇降感覚を提示できると考える。また大きな荷重がすでにかかっている足裏に対して、知覚可能な圧覚をアクチュエータにより提示するためには大きな出力が必要であり、設計の観点からも荷重のかかっていない前足部の甲部や側部への圧覚提示は有効であると考えた。

3.2 プロトタイプ

本研究では歩行時に接地を検出し、ユーザの前足部へ動的に圧覚を提示するプロトタイプを制作した。ベルトをモータで巻き取ることで触感を提示する Gravity grabber[10]を参考に、前足部に巻かれた紐をモータにより巻き取ることで圧覚提示することを考えた。プロトタイプはサーボモータ (Pallalex 社 Standard Servo)、赤外線測距センサ (SHARP GP2Y0A21YK0F)、マイクロコントローラ (Arduino Leonard) から構成されており、それらをサンダルに装着する。ユーザのくるぶし下の位置に取り付けられた測距センサにより、ユーザが歩行する際の接地と離地を検出する。ユーザはサーボモータと 2 本のパラコードが内部に取り付けられたサンダルをパラコードが前足部の周囲を巻くように装着する。接地時に前足部に巻かれた 2 本の直径 4mm のパラコードをサーボモータにより巻き取り、離地時に巻き取った量をリセットすることで接地している間、継続的に圧覚を提示する。このプロトタイプによる圧覚提示に加えて、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) によりユーザに階段を昇降する映像を提示する。

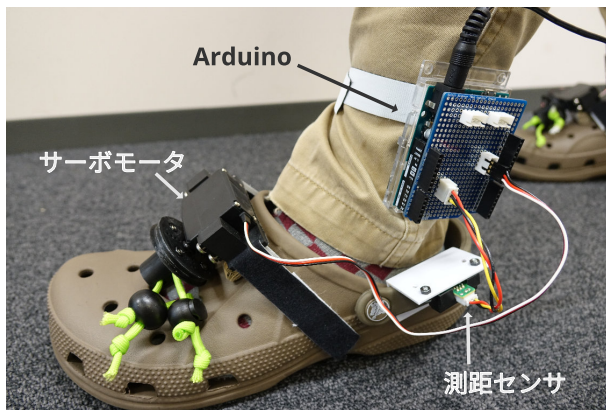


図 2: 動的な圧覚提示のためのプロトタイプ

4. ユーザスタディ

本章では提案システムに関する基礎的な検討として、圧覚提示の昇降感覚への有効性を検証した。3.2 で作成したプロトタイプによる圧覚提示を、床に小さな突起を設置する手法 [7] 及び映像提示のみの手法の 2 つを比較対象として現実感と昇降感覚を評価する。

4.1 実験概要

実験参加者は Lenovo 社の HMD である MirageSolo を装着し、VE の階段を昇降する。Mirage Solo はモーショントラッキング機能を内蔵しておりユーザの移動に応じて映像をレンダリングすることができる。HMD を通してユーザには Unity3D でレンダリングされた階段が設置された VE を提示する。先行研究 [7] とは異なり、靴としての足の位置は VE で表示されない。ユーザスタディの参加者は平均年齢 23.5 歳の健康な男女 8 名であった。実験条件はベースラインとして用意した映像提示のみの手法 (None 条件)、比較対象として用意した床に設置された突起を踏む手法 (Passive 条件)[7]、及び 3.2 の動的に圧覚を提示するプロトタイプ (Active 条件) の計 3 条件であり、各条件で VE の階段を昇降する。いずれの条件においても、ユーザはプロトタイプで使用したサンダルと同種のサンダルを履き、本試行ではランダムに各条件を 1 回ずつ行う。この 3 回の本試行の前に VE や実験手順へ慣れるために、None 条件で試行を 1 回行った。本試行ではユーザは各試行を「現実感」、及び「昇降感」を Visual Analog Scale (VAS 法) で評価する。VAS 法とは一直線上に縦線を引くことでその時点での主観的な判断を数値的に評価する手法である。本研究ではすべての項目において長さ 100[mm] の直線上に縦線を引くことで回答を求めた。「現実感」の左端には「全く階段ではない」、右端には「階段そのものである」として評価を行う。「昇降感」の左端には「全く昇降感がない」、右端には「非常に強い昇降感」として評価を行う。また、ユーザスタディの最後に評価の理由やユーザスタディの感想などを自由記述により回答を求めた。

4.2 実験結果

図 3 は各条件においてユーザが VAS 法で回答した「現実感」と「昇降感」の結果を箱ひげ図として表したものであ

図 3: VAS 法で測定した現実感と昇降感

る。グラフの横軸は 3 つの実験条件であり、縦軸は VAS 法から得られた [0,100] の値である。Shapiro-Wilk の正規性検定を実行した結果、いずれの指標においても正規性の仮定が棄却されたため、Friedman 検定を実行した。有意差が認められた場合、Holm 法による p 値の補正を行い、Wilcoxon の符号順位検定による多重比較を実行した。

Friedman 検定の結果、「現実感」の指標において条件間に有意差が認められた ($\chi^2 = 9.75, p = .007$)。多重比較から「現実感」においては、None-Passive 間、及び None-Active 間のそれぞれ間に有意差が認められた ($p = .043, p = .043$)。一方で Passive-Active 間では有意差は認められなかった ($p = .207$)。「昇降感」の指標においても同様の統計処理を行った結果、条件間に有意差が認められた ($\chi^2 = 6.20, p = .045$)。多重比較の結果「昇降感」においては、None-Active 間に有意差が認められた ($p = .043$)。一方で None-Passive 間、及び Passive-Active 間では有意差は認められなかった ($p = .152, p = .735$)。

4.3 考察

「現実感」及び「昇降感」のいずれの指標においても Active 条件が足へ何もフィードバックをしない None 条件に比べて評価値が上昇することが分かった。また、Active 条件と Passive 条件の間には有意差が認められなかったことから、先行研究と比較してもある程度の昇降感覚をユーザに提示可能であることが示唆された。一方で試行回数やサンプル数が少なく、また Active 条件に合わせて有線で動ける範囲内で検証を行ったため、Active 条件と Passive 条件の効果を比較するためにはさらなる検証が必要だと考える。

また、自由記述のアンケートでは「Active 条件の出力が小さい」といった旨の意見が複数得られた。Passive 条件では自重の反力として足裏への圧力がフィードバックされるため、提案手法をデバイス化する要件として高出力、高速に圧覚を提示する必要があると考える。また「足の位置が見えないため階段との接触位置が分かりづらい」という意見も得られた。その一方で「現実感」の指標では圧覚を提示する 2 つの条件 (Passive および Active) が None 条件に比べ高い評価値を示している。足のように注視する機会が少ない身体部位の表示が VR 体験においてどの程度重要であるかに関しては今後検証していきたいと考えている。

5. まとめと今後の展望

本研究では階段昇降時には平地歩行時に比べて前足部圧力が上昇するという特徴に注目し、平面を歩行するユーザに階段昇降感覚を提示する手法を構築した。動的な圧覚提示のためのプロトタイプを実装し、その効果を検証するためにユーザスタディを行った。ユーザスタディの結果から提案手法により、従来手法と同じく昇降感覚が提示可能であることが示唆された。

ユーザスタディで得られた効果の有用性をもとにプロトタイプの実装方法を再度検討することで、小型化や高出力化を進めていくことを考えている。基礎検討のためプロトタイプは有線を実装したが、自然な歩行のためにはワイヤレス化も不可欠である。また、坂道歩行においても前足部で圧力が上昇していることが知られており、圧覚提示のタイミングやモータで巻き取るコードの本数を増やし複数の締め付けトルクのパターンを実装・検討することで、坂道を歩行する感覚も提示可能だと考える。

謝辞 本研究の一部は科研費 若手研究 (A) (16H05866) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Hiroyuki Fukushima, and Haruo Noma. CirculaFloor. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 25, No. 1, pp. 64–67, Jan 2005.
- [2] Dominik Schmidt, Rob Kovacs, Vikram Mehta, Udayan Umapathi, Sven Köhler, Lung-Pan Cheng, and Patrick Baudisch. Level-Ups. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '15*, Vol. 1, pp. 2157–2160, 2015.
- [3] Eric Eils, Susann Behrens, Oliver Mers, Lothar Thorwesten, Klaus Völker, and Dieter Rosenbaum. Reduced plantar sensation causes a cautious walking pattern. *Gait and Posture*, Vol. 20, No. 1, pp. 54–60, 2004.
- [4] Matthew A. Nurse and Benno M. Nigg. The effect of changes in foot sensation on plantar pressure and muscle activity. *Clinical Biomechanics*, Vol. 16, No. 9, pp. 719–727, 2001.
- [5] Yon Visell, Jeremy R. Cooperstock, Bruno L. Giordano, Karmen Franinovic, Alvin Law, Stephen McAdams, Kunal Jathal, and Federico Fontana. A Vibrotactile Device for Display of Virtual Ground Materials in Walking. In *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, pp. 420–426. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [6] Ernst Kruijff, Alexander Marquardt, Christina Trepkowski, Robert W. Lindeman, Andre Hinkenjann, Jens Maiero, and Bernhard E. Riecke. On Your Feet! In *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction - SUI '16*, pp. 149–158, New York, New York, USA, 2016. ACM Press.
- [7] 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.
- [8] 堀江直正, 満田隆, 川村貞夫. 足圧情報による歩行状態の推定法. *生体医工学*, Vol. 44, No. 4, pp. 621–627, 2006.
- [9] Robert Riener, Marco Rabuffetti, and Carlo Frigo. Stair ascent and descent at different inclinations. *Gait and Posture*, Vol. 15, No. 1, pp. 32–44, 2002.
- [10] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. *ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies*, p. 8, 2007.