



# 装着型力覚提示装置を用いた階段昇降における 着地感覚の検証

Verification of landing sensation when climbing stairs using a wearable force feedback device

小倉 栞太<sup>1)</sup>, 杉野 智孝<sup>1)</sup>, 澤橋 龍之介<sup>1)</sup>, 西濱 里英<sup>2)</sup>, 中村 太郎<sup>3)</sup>

Kanta OGURA, Tomotaka SUGINO, Ryunosuke SAWAHASHI, Rie NISHIHAMA, 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, a21.demg@g.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 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, nakamura@mech.chuo-u.ac.jp)

**概要:** 本研究では、階段歩行時の VR 体験向上のため、MR 流体ブレーキ搭載の下肢外骨格装置を用いて階段歩行時の着地感覚提示手法を提案した。VR 空間で階段を昇降する際、現実では平地を歩行する。提案手法は平地歩行中のユーザの下肢に対し抵抗力を付与することで着地感覚を想起させる。遊脚から立脚時における足ぞこの着地感覚に注目し付与条件(一定波、台形波、サイン波)を変化させた場合、各条件間でユーザの有意な差は認められなかったが、現実感においては台形波を印加した場合比較的高いスコアが得られた。一方で、付与トルクと視覚情報との間に生じる感覚の不一致が、違和感を増大させた。

**キーワード:** 移動感覚, 力覚・体性感覚, 身体性認知, ウェアラブル

## 1. はじめに

近年バーチャルリアリティ (VR) 技術が発展し、医療やスポーツなど多様な分野で応用されている。ヘッドマウントディスプレイ (HMD) は視覚と聴覚に刺激を与えることでユーザに VR 空間を認識させることができる。VR 技術の向上により、ユーザの移動範囲が広域化し、下肢を使った動作が求められるようになった。しかし HMD のみでは VR 空間内のバーチャル物体に触れた際の反力を提示できない。生活空間は三次元的に広がっており、水平移動だけでなく、垂直移動も VR 空間のリアリティを向上させる上で不可欠な要素である。中でも、自身の身体で行う垂直移動として最も基本的かつ日常的な行為が、階段昇降と言える。この感覚提示を行うことで、より全身で体感するコンテンツの実現に繋がると考える。

階段昇降は、次の 3 つの区間に大別できる。(1)立脚期前半: 階段に接地し身体バランスを安定させる着地動作、(2)立脚期中期から後期: 地面を蹴り出して体を持ち上げる推進動作、(3)遊脚期: 脚を持ち上げて振り上げる。階段昇降は、平地歩行に比べて下肢関節に極めて大きな関節トルクを要する[1]。既存研究では、様々な力覚提示手法を用いて階段昇降感覚が再現されている。簡便な手法として、足元に小さな突起物を配置することで、ユーザの歩行に伴い受

動的な触覚フィードバックを行う手法[2]が提案されている。この手法は、非常にシンプルかつ低コストで実装可能であるが、物理的な設置の制約が多く、状況に応じて動的に対応することが難しい。16cm 程度の昇降が可能な靴型デバイスも開発されている[3]。これらは、VR 内の階段に合わせて装置が上昇することで、階段昇降感覚を提示可能である。一方、平地の移動では靴よりも大きくて重いため不自然に感じられるという課題がある。靴型ではなく、関節にトルクを付与可能な装着型装置も提案されている。人工筋肉を用いた装置[4]は、平地歩行中に階段昇降時の筋力発揮パターンを再現する力覚フィードバックを与えることで、階段昇降感覚を提示する。軽量で装着しやすいため、動きが妨げられにくいというメリットがある。一方、外骨格系を持たずアクチュエータが空気圧人工筋肉であるため、足裏の着地感覚のような衝撃力を含んだ力覚表現は難しい。また、力覚の提示は膝関節のみに限定されている。

そこで本研究では、階段昇降時における遊脚期から立脚期における足底部の着地感覚の提示に着目した力覚提示手法について検証する。本手法を実現するための提示デバイスとして多様な力覚が提示可能な磁気粘性流体ブレーキ (Magnetorheological fluid brak, 以下 MRB) を用いた外骨格型デバイスを用いる[5]。MRB は高速に応答し、動

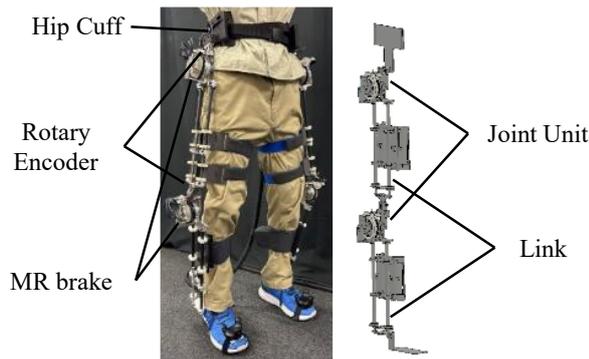


図 1 下肢外骨格型力覚提示装置

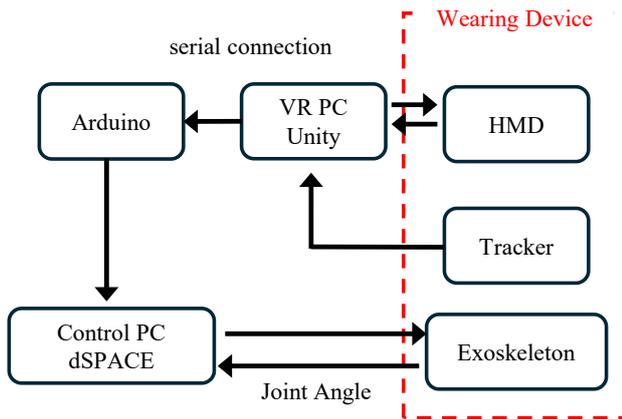


図 2 システムの全体像

的なトルク制御が可能である。加えて、本装置では膝関節と股関節の両方へのトルク付与により脚全体に着地感覚を提示する。提案手法では、着地動作におけるトルクを下肢外骨格装置を通じて関節に印加することで、階段昇降時の着地感覚を疑似的に再現する。本稿では、初期検討として、着地時に発生するトルクを一定トルクと仮定し、立脚期前半後期におけるトルク特性を変化させたときのユーザの主観評価に与える影響を検証した。

## 2. 階段昇降時の着地感覚の提示方法

### 2.1 下肢外骨格型力覚提示装置

本研究で使用する装置[5]を図 1 に示す。本装置の下肢関節部（膝、腰）には、MRB が内蔵されており、関節の回転に合わせて MRB が回転方向とは逆向きトルクを発生させることができる。これまでにボールの重さ感覚[5]や水中の抵抗感[6]の提示の実績がある。

装置は大きく分けて関節ユニットとリンク部から構成される。関節ユニットは、MRB（中空型、ER テック社）およびロータリエンコーダ（E6A2-CW3C 500P/R 0.5M, オムロン社）から構成されている。装置を脚に固定するためのカフとベルトをリンクに接続し、関節ユニットからの出力トルクを脚全域に伝達する。リンク部はユーザの身長に合わせて長さを調整できる。

MRB は、印加電流に応じて内部流体の粘性が増加し、抗力を生じさせるパッシブアクチュエータであり、高出力

密度かつ応答性が高いという特徴を持つ。MRB は電流により印加トルクを制御できる。印加電流 ( $x$ ) とトルク ( $y$ ) の関係は特性試験より次式で表される。

$$y = -38.1x^3 + 29.4x^2 + 6.9x + 0.6 \quad (1)$$

この MRB は、0.6 Nm 程度の基底トルクを持ち、最大で 7Nm 程度の出力が可能である。

### 2.2 システム構成

本装置のシステム構成を図 2 に示す。本装置のシステムは VR PC, Control PC, Arduino で構成される。VR PC は、HMD (VIVE Pro 2, HTC Corporation) とトラッキングデバイス (VIVE Tracker, HTC Corporation) から得た現実世界の情報を VR 空間にレンダリングする。VR 空間の構築にはゲームエンジンである Unity を用いた。トラッキングデバイスは足先に装着して VR 空間内の靴と動きをリアルタイムで同期させる。Control PC は、MATLAB/Simulink で作成した制御モデルを実行する。この制御信号は、Control Desk を介してモータドライバ (JW-143-2, Okatech Co., Ltd.) に送られ、接続された MRB に電流が印加される。印加のタイミングは VR PC からシリアル通信で Arduino を介して Control PC に送られる情報に基づいて決定される。

### 2.3 着地感覚の提示方法

VR 空間内で階段昇降を表現する場合、足が階段高さまで上がった時に階段に上ったという判定をするが、現実空間では足が接地していない状態となる。このため、VR 空間内で足が接地してから現実世界で足が接地するまでのタイムラグが存在する。加えて、階段昇降では、膝・腰関節ともに立脚期前半の屈曲方向のトルクが平地歩行に比べて大きいという特徴がある。提案手法では、この着地時の VR 空間内と現実における接地のタイムラグにおける違和感と階段昇降における着地直後から立脚期前半のトルク増大に着目し、VR 空間内で着地した瞬間から一定時間下肢関節にトルク印加与することで、VR 空間内の階段歩行の現実感を高めることができると考えた。今回は初期検討として、着地直後から一定のトルク印加を検証した。しかし、着地時に一定トルクを印加するだけでは動作の連続性が損なわれ、リアリティを低下させる可能性がある。そのため、着地から次の一歩を踏み出す動作へ違和感なく繋げるために、左右の膝関節と股関節に立脚期前半後期における特性の異なる 3 条件のトルク波形を印加した。詳細を以下に示す。

#### 1) コンスタント

着地後、一定トルクを関節に印加する。

#### 2) 台形波

着地後、一定トルクを一定時間 (1.2 秒間) 印加した後、線形に減少するトルクを指令する。

#### 3) サイン波

着地後、トルクが時間経過に伴い変化するサイン波を指令する。これは、コンスタントの急な力の消失や台形波が持つ線形的な変化を抑えた抵抗条件である。

着地後の経過時間と各条件の関係を図 3 に、コンスタ

— Constant(Actual) — Trapezium(Actual) — Sin(Actual)  
 - - Constant(Comand) - - Trapezium(Comand) - - Sin(Comand)

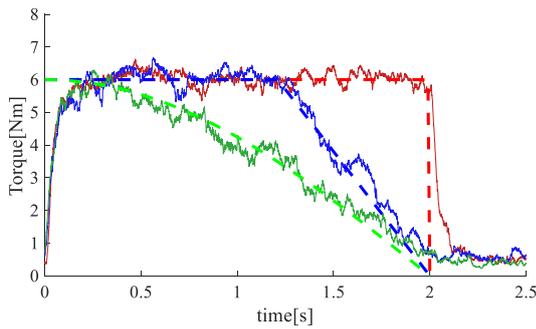


図 3 提示条件

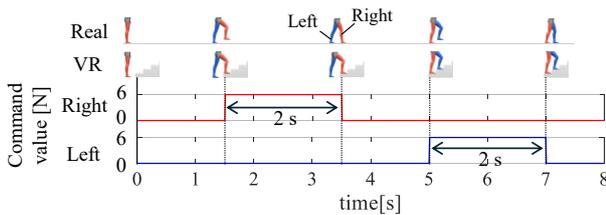


図 4 コンスタント条件における両脚への提示イメージ

ントの場合の両脚への印加イメージを図 4 に示す. 全ての条件において, VR 空間内でユーザの足が段差に着地した瞬間を  $t=0$  とし, 2 秒間トルクを印加する. この 2 秒間は現実空間内の遊脚期後半と立脚期の前半に相当し, この間にユーザは踵が地面に接地し, 重心を前方に移動し, 次の脚を挙上する準備をする. 腰関節, 膝関節ともに伸展するため, MRB は屈曲方向にトルクを発生させる. なお, 印加時間については事前検証により 1, 2, 3 秒を比較し, 最も違和感の小さかった 2 秒を選定した. 印加トルクは, 装置の最大出力に近い 6Nm とした.

次章の実験では, 階段昇降におけるこれらの提示条件の違いがユーザの主観評価に与える影響を検証した.

### 3. 階段昇降実験

#### 3.1 . VR 映像

実験の様子を図 5 に示す. VR 空間は, 階段, 簡易的な壁, 靴オブジェクトから構成されている. 被験者の足の動きを反映するために, 靴オブジェクトは, 被験者の足先に装着したトラッカーの位置および姿勢とリアルタイムに同期する. さらに, 被験者が階段を上る際に, 靴オブジェクトが段差の高さ (右: 0.15 m, 左: 0.30 m) に到達すると, その鉛直方向の位置が段差分だけ自動的に補正されるようにした. これに合わせて, 装置に指令信号が送信される. これにより, ユーザは自身の足が仮想的な階段を正確に昇っているかのような映像を体験する.

#### 3.2 実験手順

成人男性 12 名 (平均年 22.8±1.8 歳, 平均体重 64.8±8.3kg, 平均身長 164.8±10.7cm) を対象に以下の順序で実験を行った. なお, 本実験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で承認されている [管理番号:

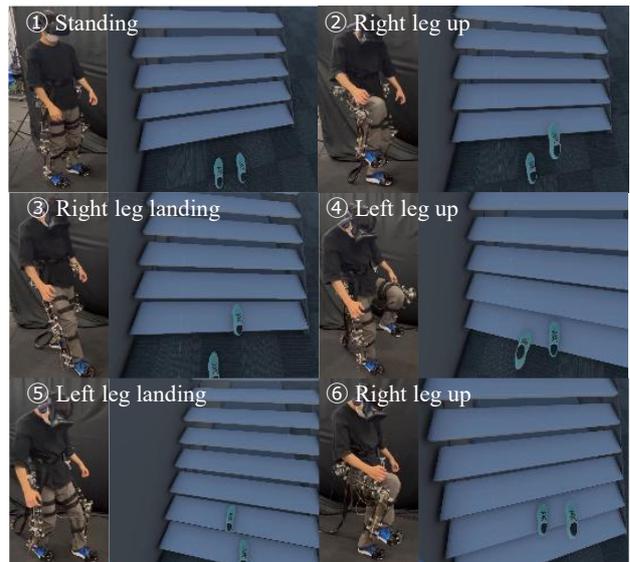


図 5 実験の様子

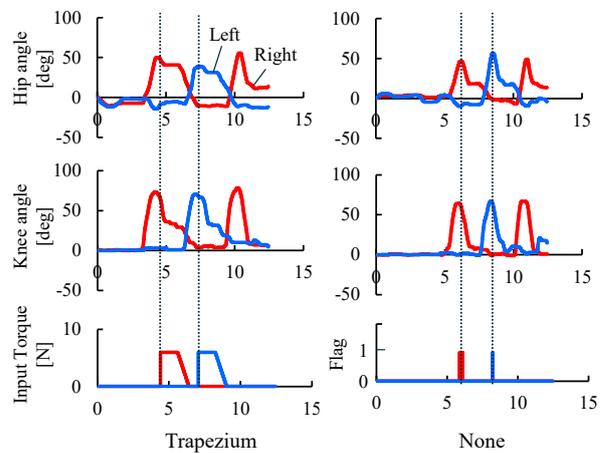


図 6 関節角度の変化 (左: 台形波, 右: 力覚なし)

2024-024 (2) ].

- (1) 被験者は実験概要と下記のアンケート項目の説明を受けた後, 外骨格装置, HMD, Tracker を装着した.
- (2) スタート位置 (VR 映像内における階段の手前) に立ち, 右脚から前方に 3 歩歩行した. このとき, 「コンスタント」, 「台形波」, 「サイン波」の 3 条件に, 装置にトルクを印加しない「力覚なし」を加えた計 4 条件をランダムな順番で提示した.
- (3) 各条件で 2 回歩行を行い, 被験者は VAS (Virtual Analog Scale) を用いたアンケートに回答し, 0-100 の値でスコア化した.

アンケートは以下の 3 項目である.

Q1: 階段を上っているように感じましたか?

Q2: 動きにくさを感じましたか?

Q3: 映像に違和感を覚えましたか?

各質問に対して解析ソフト (SPSS, IBM Corporation) を用いて有意水準 5% で Friedman 検定を実施した. 有意差が認められた場合は, Wilcoxon の符号付き順位検定による多重比較を実施し, Holm 法により p 値の補正を行った.

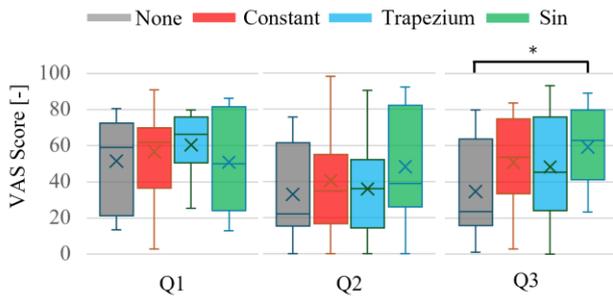


図 7 アンケート結果

### 3.3 実験結果

図 6 に実験中の関節角度の変化を示す。各関節とも関節角度が大きく屈曲したタイミングで、階段に着地したと判定された。着地後は、力覚なしでは両関節とも伸展方向に急激に変化し関節角度が 0 に近づくが、台形波では着地直後に伸展方向に急激に変化した後、緩やかな変化になった。これは、トルク印加により、関節の動きが緩やかになったためである。この遷移は、他の力覚条件でも同様であった。

アンケート結果を図 7 に示す。Q1：現実感では、群間内で有意な差は認められなかった ( $p=0.659$ )。全体的にスコアが高く、「力覚なし」でも 50.6 であった。これは、VR 体験において視覚情報がリアリティの知覚に与える影響が支配的であったことを示唆している。つまり、力覚提示の有無や種類によらず、階段を昇っているという視覚情報によって、全ての被験者が一定水準以上のリアリティを知覚していたと考える。一方で、有意な差がない中でも「台形波」のスコアが最も高い数値を示した。一部の被験者から「台形波だと次の足へと行く間が遷移しやすい」という意見を得られた。階段着地時の床反力は着地のピークを境に線形的に減少する[7]。これは、台形波の波形が段差への着地と次の一歩を踏み出す動作の推移と類似していたためだと考える。

Q2：抵抗感においても群間に有意な差は認められなかった ( $p=0.140$ )。しかし「力覚なし」の平均値が最も低いことから、提示トルクが、被験者によっては動作を妨げる力とネガティブに解釈され、スコアを高めていると考える。

次に Q3：映像の違和感では、群間に有意な差が認められた ( $p=0.022$ )。各群間を比較すると、「力覚なし」と「サイン波」の間に有意な差が認められた ( $p=0.020$ )。「サイン波」の印加により、映像の違和感が増加したことを確認した。これは、被験者がイメージする着地の鋭い衝撃と実際に印加したサイン波の滑らかで連続的な抵抗感の間に、感覚の乖離が生じたためだと考える。これは、トルクの強さや印加時間が全被験者で固定だったため、人によってトルクが強すぎたり、抵抗を感じる時間が長すぎたためだと考える。

今回は初期検討のため、単純な力覚条件であったが、今後は、実際のトルク変化や視覚情報と整合性の高い力覚条件の設計や、今回肯定的な傾向が見られた「台形波」の印加時間やトルク強さを調整することで、ユーザの主観評価

の向上を目指す。

## 4. むすび

本研究では、階段昇降時の着地に着目した力覚提示手法について検討し、着地後のトルク条件がユーザの知覚に与える影響を評価した。力覚と映像の乖離が大きな違和感を生じさせることがわかった。また本研究で提案した波形の中では、台形波が他の条件と比べて平均的にスコアが高い傾向にあることが示された。今後は、力覚条件の設計や、今回肯定的な傾向が見られた台形波を最適化することで、自然な力覚提示を目指す。また、被験者の体重や身長、関節角度に応じた提示手法を考案する必要がある。

## 参考文献

- [1] Robert Riener, Marco Rabuffetti, Carlo Frigo, "Stair ascent and descent at different inclinations.", *Gait & Posture*, Volume 15, Issue 1, February 2002, Pages 32-44.
- [2] 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 Trans Vis Comput Graph*, vol. 24, no. 4, pp. 1584–1593, Apr. 2018, doi: 10.1109/TVCG.2018.2793038.
- [3] Q. T. Le et al., "RedirectedStepper: Exploring Walking-In-Place Locomotion in VR Using a Mini Stepper for Ascents," in *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, Association for Computing Machinery, Apr. 2025. doi: 10.1145/3706598.3713313.
- [4] T. Okumura and Y. Kurita, "Cross-modal effect of presenting visual and force feedback that create the illusion of stair-climbing," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 7, Apr. 2021, doi: 10.3390/app11072987.
- [5] T. Shimizu, R. Sawahashi, and T. Nakamura, "Weight Sensory Presentation Considering Impulsive Force of Ball Kicking by a Force Feedback Exoskeleton using MR Fluid Brakes," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. doi: 10.1109/ICIT58233.2024.10540821.
- [6] R. Sawahashi, T. Masuda, T. Shimizu, R. Nishihama, M. Okui, and T. Nakamura, "Presentation of Underwater Sensation by Drag in Knee Motion with a Lower Limb Exoskeleton Using MR Fluid Brakes," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/ISIE51358.2023.10227941.
- [7] M. Grimmer et al., "Lower limb joint biomechanics-based identification of gait transitions in between level walking and stair ambulation," *PLoS ONE*, vol. 15, no. 9 September, Sep. 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0239148.