



Walking-in-Place における仮想階段昇段のための 垂直運動位相一致手法

Vertical Motion Phase Matching Method
for Pseudo Stair Climbing in Walking-in-Place

猿川聖¹⁾, 岡嶋克典²⁾

Sho SARUKAWA, and Katsunori OKAJIMA

1) 横浜国立大学大学院 環境情報学府 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7, sarukawa-sho-xh@ynu.jp)

2) 横浜国立大学大学院 環境情報研究院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7, okajima@ynu.ac.jp)

概要: Walking-in-Place による仮想環境の階段昇段について, タスクに依存した装置を用いずに垂直方向の下肢運動と視覚的運動の位相を現実の昇段運動と一致させる手法を開発した. 提案手法, 位相を考慮しない手法, 提案手法と同様の視覚的運動が得られるコントローラ操作の 3 条件について, 疑似階段昇段時の歩行感を比較した結果, 一部の参加者は位相を考慮しない手法で提案手法よりも坂道上昇感を大きく知覚し, 提案手法は下肢動作や視覚的運動をより再現できることが示された.

キーワード: Walking-in-Place, 自己運動知覚, 階段歩行

1. はじめに

仮想空間を移動するためのインタフェースは, 手で操作する簡便なコントローラを始め, 用途によって多種多様な方式が存在する. その中でも, 身体を移動させることなくその場でのジェスチャーで操作する Walking-in-Place (WIP) 手法は, 現実に応じた空間や大掛かりな装置を必要としない手法として注目されている. 狭義の WIP はセンサ等で歩行動作に近い下肢動作を検出して移動入力に用いており, 手でポインティングして移動する一般的な手法よりもプレゼンスが高まることなどが報告されている[1].

一般的に, WIP の移動入力は現実の下肢動作で仮想空間の移動速度を制御する方法がとられている. 例として, 股関節外側に貼付した歪ゲージ式センサにより計測した股関節角度から仮想歩行速度を推定する WARP[2]や, すねに装着したマーカから光学式モーションキャプチャにより歩行イベントを識別する GUD WIP[3]などがある. これらの手法は歩行動作が平面的な移動として解釈される.

しかし, 現実の歩行は平面的な移動だけではなく, 階段歩行のような立体的な移動も含まれる. 前述の方法で階段を上る場合, 現実の階段昇段運動と異なり, 蹴上(階段 1 段分の高さ)まで足を上げなくても移動できる. 例えば, 数回の足踏みで視覚的に 1 段の高さを上る, また足踏みの途中で段差を上り切るようなことが起きる. そのため, 下肢運動から予想される現実の視覚的運動と仮想環境の視

覚的運動の鉛直方向成分について位相のずれが生じる. 固有受容覚と異なる感覚入力はプレゼンスを低下させるため, 位相のずれは歩行感を損ねると考えられる.

そこで本研究では, WIP による階段昇段時の現実の下肢運動と視覚的運動の位相を一致させる手法を提案する. 提案手法では下肢動作として足踏みを採用し, 足首に装着したトラッキングデバイスの位置をもとに仮想環境の視覚的運動をシミュレートする. 現実での階段昇段時の歩行感をベースラインに, 提案手法と位相を考慮しない WIP 手法, 手指で操作するが提案手法と同様の視覚的運動が得られるコントローラ手法を比較することで, 提案手法が疑似階段昇段時の歩行感に与える影響を明らかにする.

2. 方法

2.1 視点の速度制御

水平方向の速度制御は, 提案手法と位相を考慮しない WIP 手法とともに, 視点の正面方向(水平面)へ振り出し足の足首の垂直方向の速さに任意の係数 k をかけた速さで進むように設計した. コントローラ手法では, 左手側のタッチパッドに触れた位置から速度を決定し, 速さの最大値を任意の係数 k によって変更できた.

階段昇段時の鉛直方向の速度制御は, 3 つの手法でそれぞれ異なる. 提案手法では, 振り出し脚の足首の高さ y_a の最高点 y_{top} が蹴上 r 以上となった場合, $y_a \leq r$ の間に振り出

し脚を下ろした距離だけ視点が上がるように設計した。視点の速度の鉛直成分 v_y は式(1)で示される。

$$v_y = \begin{cases} 0, & \text{if } y_{top} < r \text{ or } y_a > r \\ -v_a, & \text{if } y_{top} \geq r \text{ and } y_a \leq r \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 v_a は振り出し脚の足首の速度の鉛直成分である。位相を考慮しない WIP 手法では、鉛直速度は水平速度に比例して直線的な運動となる。コントローラ手法では、1段ごとに $v_y = 0$ となるタイミングを周期的に発生させることで、提案手法と同様の視覚的運動パターンを再現した。

2.2 装置

仮想環境は Unity (Unity Technologies 社 Unity personal ver2021.3.19f1) によって作成し、視覚提示には HMD (HTC 社 VIVE Pro Eye, 解像度: 片目あたり 1440×1600px, リフレッシュレート: 90 Hz, 視野角: 最大 110°) を使用した。足首の追跡には、図 1 のように VR トラッカー (HTC 社 VIVE Tracker) を伸縮性のサポーターにワイヤで固定し、足首に巻いて使用した。コントローラ操作では左右の手それぞれにコントローラ (HTC 社 VIVE Controller) を持って行った。

現実の階段は、幅 140 cm, 踏面 30 cm, 鼻の出 3 cm, 蹴上 17 cm (1 段目), 17.5 cm (2-10 段目), 19.5 cm (11 段目) であり、図 2 のように仮想環境で再現した。仮想環境でのタスクは研究室室内にて立位で行われた。

2.3 実験参加者

参加者は 21-23 歳の男性 11 名、裸眼または矯正で正常な視力を有し、正常な身体的運動機能を有していた。また、参加者全員に VR の使用経験があった。

2.4 実験手順

参加者は、現実の階段 (real) および 3 つの手法で仮想環境の階段を上り、それぞれで計 4 回アンケートに回答するという説明を受けた。次に、共通の回答項目となる歩行感アンケートの内容を確認した。確認後、1 度だけ現実の階段を上り、研究室室内で歩行感アンケートに回答した。その後、3 つの操作方法のいずれかで仮想環境の階段を上るタスクを行った。操作手法は、提案手法 (match)、位相を考慮しない WIP 手法 (mismatch)、手指で操作するが提案手法と同様の視覚的運動が得られるコントローラ手法 (controller 条件) で、順番は各回でランダムに並び替えた。タスクでは、位置のキャリブレーションと水平方向の速度制御に関する係数 k を主観に基づいて調整した。調整した値を用いて仮想環境の階段を上った試行を評価対象として、歩行感アンケートおよび操作感アンケートに回答した。残りの手法についてもタスクとアンケートを行い、最後にランク付けを行った。以上を 1 名あたり、2 日に分けて 2 回行った。

歩行感アンケートは、7 項目 7 段階リッカート尺度 (1: 全く感じない-7: 非常に感じる) で評価項目は表 1 のようになっている。操作感アンケートは、System Usability Scale



図 1: WIP 手法の装備

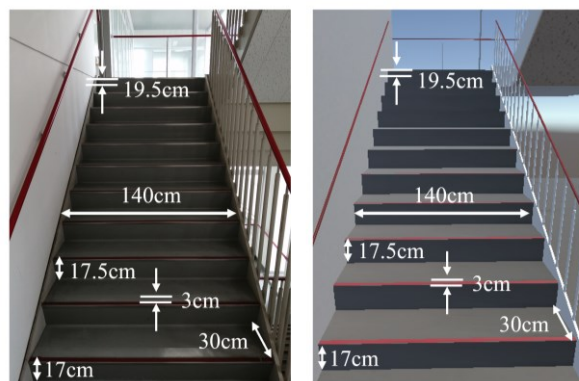


図 2: 現実の階段 (左) と仮想階段 (右)

表 1: 歩行感アンケート評価項目

上昇感 (自分の身体が上昇していると感じた)
操作主体感 (運動を引き起こしているのは自分であると感じた)
肉体疲労感 (タスク前よりも身体に疲れを感じた)
身体的不安定感 (身体がふらついているように感じた)
視覚的不安定感 (視界が安定していなかった)
坂道上昇感 (坂道を昇っていると感じた)
階段昇段感 (階段を昇っていると感じた)

(SUS) [4]を和訳して使用した。SUS は 10 項目 5 段階リッカート尺度 (1: 全く同意できない-5: 非常に同意できる) で 100 点満点のスコアに換算され、スコアが高いほどシステムのユーザビリティが高いことを意味する。ランク付けは、「どの操作方法が仮想環境の階段を上るタスクにおいて好ましかったか」(好ましさ)、「どの操作方法が現実の階段昇段を再現していたか」(再現度)の 2 問について 3 つの操作方法を順位付けし、理由も回答した。

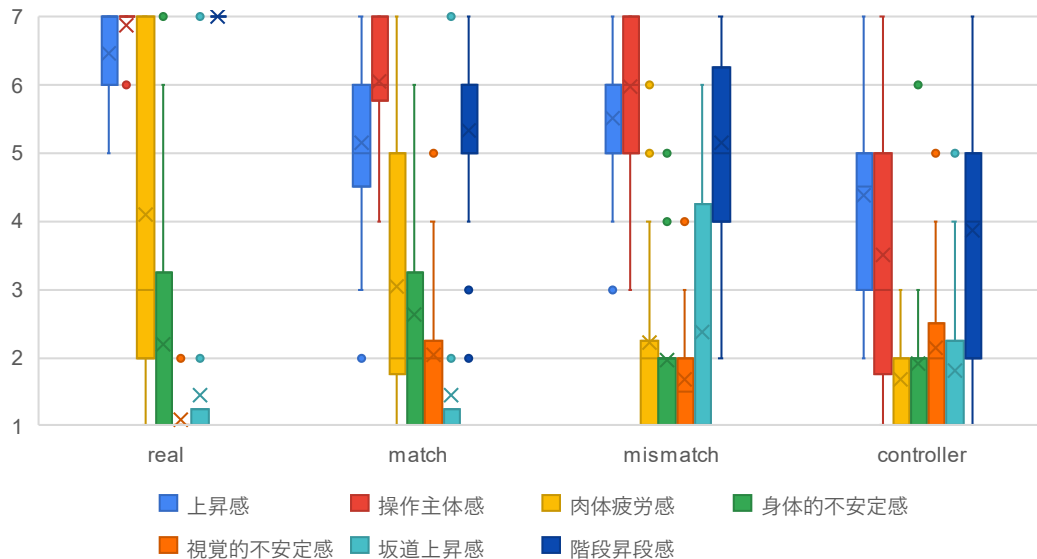


図 3: 参加者 11 名 × 2 回分の歩行感アンケートの結果

3. 結果と考察

現実の階段および 3 つの操作方法で仮想環境の階段を上ったときの歩行感アンケートの結果を図 3 に示す。各項目について Friedman 検定を行ったところ、身体的不安定感、坂道上昇感には有意差が見られなかった ($p > 0.05$)。有意差のあった 5 項目についてそれぞれ Holm 法 (全体有意水準 $\alpha = 0.05$) で 2 群比較を行ったところ、real 条件と match 条件間で上昇感、操作主体感、視覚的不安定感、階段昇段感、real 条件と mismatch 条件間および real 条件と controller 条件間で 5 項目すべて、match 条件と mismatch 条件間で肉体疲労感、match 条件と controller 条件間で上昇感、操作主体感、肉体疲労感、階段昇段感、mismatch 条件と controller 条件間で上昇感、操作主体感でそれぞれ有意差が見られた ($p < 0.05$)。以上の結果より、match 条件や mismatch 条件では上昇感や操作主体感は real 条件よりも低く、controller 条件よりも高く知覚されやすい傾向にあり、下肢運動や体性感覚の違いが影響する評価項目と考えられる。また、match 条件における肉体疲労感のバラつきが大きく (SD 1.89)、mismatch 条件と有意差が見られたのは、振り出し足を蹴上よりも高く上げるため、足首の最高点が mismatch 条件よりも高く、下肢動作が大仰になる傾向があったためだと考えられる。有意差の見られなかった坂道上昇感について、平均と標準偏差を比較すると、real 条件 1.46 (SD 1.30)、match 条件 1.46 (SD 1.30)、controller 条件 1.86 (SD 1.15) と一貫して低い評価に対し、mismatch 条件 2.36 (SD 1.97) ではバラつきが大きい。そこで、個人ごとの各条件間の評価の差を見るため、すべての条件で坂道上昇感を 1 と回答した 9 回のデータを除く 13 回の結果を図 4 に示す。図 4 の実線で示した 6 回で、match 条件よりも mismatch 条件の評価値が 2 以上高い。一方、図 4 の点線で示したデータを含む 16 回で、match 条件よりも mismatch 条件の評価値が 2 以上高くなることはなかった。

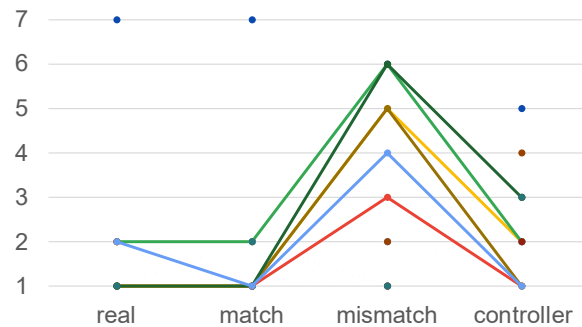


図 4: 坂道上昇感の個人内比較 (すべての条件で 1 のデータを除く 13 回)

これは、予備実験において参加者が mismatch 条件での視覚的運動が直線的であることを「階段というよりも坂道を上っている気がした」と表現しており、今回の実験でも一部の参加者から坂道上昇感として知覚されたためだと考えられる。

操作感アンケートより算出された SUS スコアの平均は、match 条件 76.4 (SD 18.4)、mismatch 条件 81.0 (SD 14.1)、controller 条件 76.4 (SD 15.0) で、Friedman 検定の結果、各スコア間に有意差は見られなかった ($p > 0.05$)。したがって、ユーザビリティの差による歩行感アンケートへのバイアスは小さいと考えられる。

ランク付けでは好ましき、再現度ともに match 条件で中央値 2 最頻値 2、mismatch 条件で中央値 1 最頻値 1、controller 条件で中央値 3、最頻値 3 となった。ランク付けの理由では、上りやすさや動きのスムーズさについて 8 件、動作の再現度や足の感覚について 7 件、視界の動きの再現度について 3 件ほど言及があった。最も好ましいという回答が得られたのは mismatch 条件が 22 回中 13 回、次いで match 条件が 6 回であった。mismatch 条件が好まれた主な理由は、下肢動作に制約がなく視覚的運動がスムーズであるた

めである。頭部運動と視覚的運動は非整合のため、加速度が大きく変化する **match** 条件や **controller** 条件では視覚前庭の競合が生じ、視覚的運動がスムーズに知覚されなかった可能性が高い。一方で、最も再現しているという回答が得られたのは **mismatch** 条件が 22 回中 12 回、**match** 条件が 10 回と差は小さかった。足の感覚や上りやすさを重視した参加者は **mismatch** 条件を、動作や視界の動きの再現度を重視した参加者は **match** 条件を最も再現していると評価する傾向にあった。この傾向は、**match** 条件は現実の下肢動作や視覚的運動を **mismatch** 条件より再現していても、WIP と現実で階段を上りやすいと知覚される下肢動作が異なることが原因と考えられる。

4. 結論

本研究では、WIP による階段昇段時の現実の下肢運動と視覚的運動の位相を一致させる手法について、疑似階段昇段時の歩行感に与える影響を調べた。その結果、一部の参加者は位相を考慮しない手法で提案手法よりも坂道上昇感を大きく知覚しており、提案手法は下肢動作や視覚的運動をより再現していると評価された。しかし、提案手法は振り出し足を蹴上よりも高く上げるという下肢動作の制約が他の手法よりも肉体疲労感を上昇させ、階段の上りや

すさにも悪影響を与えた。

今後は、視覚的運動に合わせてカメラを回転させることで視界を安定化させて視覚と前庭の競合を抑制することや、現実の階段昇段時と疑似階段昇段時の下肢動作のマッピングを見直すことで、WIP による疑似階段昇段時の歩行感の向上を目指す。

参考文献

- [1] M. Slater, M. Usoh, and A. Steed, "Taking steps," *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 2, no. 3, pp. 201–219, Sep. 1995.
- [2] 雨宮慎之介, 八木寿浩, 塩崎佐和子, 藤田欣也, 渡部富士夫, "足踏式空間移動インタフェース(warp)の開発と評価," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 6, no. 3, pp. 221–228, 2001.
- [3] J. D. Wendt, M. C. Whitton and F. P. Brooks, "GUD WIP: Gait-Understanding-Driven Walking-In-Place," 2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR), Boston, MA, USA, 2010, pp. 51-58.
- [4] Brooke J: SUS: A "quick and dirty" usability scale, usability evaluation in industry, pp. 107-114, 1996.