



THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

# 実空間歩行における視覚刺激の速度操作と歩行速度変化の関係性

谷崎充<sup>1)</sup>, 松本啓吾<sup>1)</sup>, 葛岡英明<sup>1)</sup>, 雨宮智浩<sup>1,2)</sup>, 廣瀬通孝<sup>2,3)</sup>

1) 東京大学 大学院情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, tanizaki, matsumoto, kuzuoka@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学 バーチャルリアリティ教育研究センター (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, amemiya@vr.u-tokyo.ac.jp)

3) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1, hirose@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 混雑緩和や停留防止に対する一つの解決策として歩行速度の操作は社会的要請と言える。こういった歩行速度操作の手法について、トレッドミル歩行中の歩行速度は、オプティカルフロー (OF) 変調により変化することが報告されている。一方で、空間移動を伴う実空間歩行の場合、得られる視覚情報、前庭系情報、固有受容感覚が変化し、その寄与の割合が異なる可能性がある。そこで、本研究では実空間を歩行中にヘッドマウントディスプレイを通して OF の速度と中心視野を変化させたバーチャル環境を提示し、歩行速度の変化を調べた。その結果、実際の歩行での歩行速度も先行研究同様、視覚情報によって変調される可能性が示唆された。また、この変化は中心視野の OF の効果や自己主体感が影響する可能性が示唆された。

**キーワード:** 基礎分野: 行動・認知, 感覚・知覚, 視覚, 移動感覚, HMD

## 1. はじめに

人間の歩行運動は歩行の向きと歩行の速度に分けて考えることができ、歩行運動を操作する場合、このそれぞれを対象とした方策を試みることができる。歩行運動の向き・速度を操作することは実用上重要であり、歩行の向きは案内や誘導に、歩行速度は混雑や停留の緩和に効果がある。通常、歩行方向や歩行速度は記号や矢印、音声によって誘導・案内されているが、従来の方法には環境的な制約による限界がある。こうした限界を克服するため、歩行運動の操作方法が数多く研究されてきた。

歩行の向き及び速度の操作を試みる場合、歩行運動が視覚情報、前庭情報、固有受容感覚に基づくこと [1] に鑑みると、これら 3 つが操作対象として想定される。視覚情報とは周辺景色の変化、前庭系情報とは揺れや傾きなどの加速度、固有受容感覚とは地面との接触等、物体としての感覚に基づいた情報のことである。実際にこれらを操作した先行研究は複数存在している。歩行方向の操作として、前庭系を刺激することで自己運動感覚を生じさせ、これにより実験参加者を移動方向と逆向きに歩行する感覚を生じさせたという報告がある [2]。また、歩行速度の操作として、靴型インターフェースを用いて固有受容感覚に刺激を与えることで引き込み効果により歩行周期を変化させ、歩行速度に影響を与える実験も知られている [3]。一方で、視覚情報の操作としてはオプティカルフロー (OF) に基づいた研究が多い。3 つの情報入力の中で、視覚情報が優位であると提唱されている [4] ためであると考えられる。OF とは、歩行運動に伴って網膜に投射される像の速度場のことである。自身が前進すると、進行方向の中心から放射状に拡大するような速度場となることが知られている。OF の速度を操

作することで視覚的に知覚する相対速度を変調することが可能であり、これにより速度感覚に影響することが知られている。ヘッドマウントディスプレイ (HMD) と振動デバイスをを用いた歩行誘導効果に関する研究 [5] や実際の歩行方向と 90 度の方向に動く模様を提示することで歩行者を誘導する研究 [6] などが報告されている。また、歩行速度に関する研究も行われており、知覚する OF の速度が遅いと歩行速度が速く、逆に OF の速度が速いと歩行速度が遅くなる傾向にあることが判明している [7]。これに対し本研究では OF の速度を 3 条件のみとしており、OF の速度変化は離散的である。

ここまでは OF の速度に関する先行研究について述べた。次に、知覚する OF に影響を与えるもう一つの要因でもある OF の空間的な情報について述べる。OF の空間的な情報としては空間周波数や、歩行者が視覚する視野範囲が挙げられる。前者に関しては、視覚認知する環境の空間周波数と歩行速度の関係について、トンネル状スクリーンの中を潜って進むことで周辺視野に OF を提示し OF の速度・空間周波数と進行速度の関係調べた研究からは空間周波数が進行速度に影響を与えることが示唆されている [1]。後者に関しては、周辺視野が歩行運動感覚において支配的であることが知られている。しかし一方で、こうした実験環境では実空間情報と、提示する OF の情報とが混在しているという問題がある。このため通常の歩行と同様に視覚情報が統一された条件で視覚情報を操作することが必要である。そこで本研究では HMD を使用しバーチャル空間を活用することで、視野全体に OF を提示することを可能にした。

また、本研究では幾何学的パターンのみでなく、HMD に提示したバーチャル空間を用いたこともあり、空間内に置か

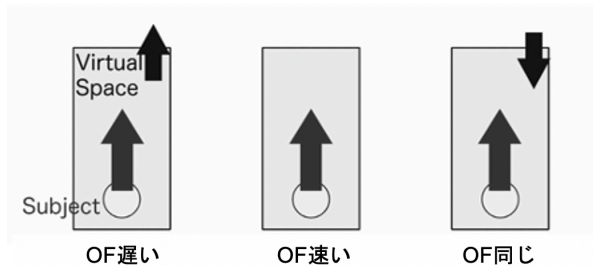


図 1: 実装の方法. 実験参加者の歩行に併せて空間も動かしている.

表 1: 実験環境と速度の条件

速度増加率 [-]	遅い	同じ	速い
実験参加者	1.0	1.0	1.0
バーチャル空間	0.3 (同方向)	0	-0.3 (逆方向)
OF	0.7	1.0	1.3

れたオブジェクトや空間内での自己主体感に起因する心理的要因が行動に影響を与える可能性がある. 実際に VR 体験ではこのような心理的効果が様々に判明しており, 例えばバーチャル空間では自分の見た目に近いアバターが自己主体感を高め, 行動を変容させることがわかっている [8]. これについても考察を行った.

以上述べたように, 本研究では, OF とバーチャル環境を変化させることで歩行速度の振る舞いを調べる. まず HMD に提示される映像において OF の速度を変化させ, 歩行速度との関係を調査する. 続いて, 中心視野の異なるバーチャル環境を用意し, OF の空間的な情報と歩行速度の関係を調査する.

## 2. 実験: OF の速度・中心視野と歩行速度の関係

OF の速度と中心視野を変化させることで, 実験参加者の歩行速度にどのような影響が現れるかを調査した. なお, 先行研究と比較して, 以下の 2 点について工夫を施した. 1 点目は実験参加者に, トレッドミルでなく, 実際の空間を歩行してもらったことである. 多くの先行研究ではトレッドミル上で実験を行ってきた. しかし, トレッドミルでは足に加わる反力や, 歩行の際に感じる加速度といった, 固有受容感覚・前庭系情報が実際の歩行と異なるという問題が指摘されている. そこで, 実際の歩行と条件を近づけるため, 実空間上で実際に歩行したことにより, 視覚情報のみが実際の歩行と異なるような条件とした. 2 点目は OF の変化を静的でなく動的なものとすることである. 先行研究では OF を予め定めておいた一定のパターンで変化させている [7] が, これは動く歩道の上を歩くような状況となっており, 予め OF が一定速度で動いていることで実験参加者にとって静的な OF 変化となってしまう. そこで本

研究ではダイレクテッドウォーキング (RDW) と呼ばれる空間知覚操作手法を参考にして, 歩行者の移動を検知し, それに伴ってバーチャル空間を動かすことで, 実験参加者が歩いた際のみその都度 OF が変調されるような環境を用意した. 実空間に OF を提示する方法や, HMD 上に映像を提示する方法とは異なり, バーチャル空間を活用する RDW の手法を用いることで, 任意の大きさ, タイミングで OF の速度を調整することが可能になる. この点で先述の通り, 静的でなく動的に OF を変化させることができる. この RDW とは, HMD を通して視覚に提示する映像を操作し実空間とバーチャル空間とで移動方向や移動量をずらすことで, 限られた実空間の中で広大なバーチャル空間の歩行を可能とする手法のことである [9]. これにより, 歩行する実験参加者にとって予めバーチャル環境が動くことのないような違和感の少ない動的 OF 変化を実現した.

### 2.1 提案手法: 動的な OF 操作

動的な OF 操作を実現するための座標変換について説明する. この座標変換は RDW の並進ゲインに類似した操作である [10]. 実験参加者が歩行運動した際に HMD の中で実験参加者の移動量を  $T_{\text{real}}$  とおき,

$$T_{\text{real}} = P_{\text{cur}} - P_{\text{pre}} \quad (1)$$

のように, 前のフレームにおいて計測した座標  $P_{\text{pre}}$  と現在のフレームで計測した座標  $P_{\text{cur}}$  の差を用いてフレーム間の移動量を算出した. そして実験参加者の移動量  $T_{\text{real}}$  にゲイン  $G$  を乗じた値を以下のように求める.

$$T_{\text{virtual}} = T_{\text{real}} \times G \quad (2)$$

HMD に提示されるバーチャル空間をこの  $T_{\text{real}}$  の分だけ平行移動する. こうして実験参加者が歩くたびに, 歩行しているバーチャル空間も並進することになる. これにより, 実験参加者が歩く際にバーチャル空間の移動の向き (歩行者と同方向/逆方向) によって実験参加者とバーチャル空間との相対速度が変化し, 知覚する OF の速度が変化するという仕組みである. この HMD を用いた実装方法により, 先行研究にはない動的な OF 操作環境を構築した.

### 2.2 実験環境

OF の操作には実空間上ではなく HMD に提示したバーチャル空間を使用した. HMD には OculusQuest を用いた. 参加者は付属するコントローラを右手に持ち HMD を装着した. 実験参加者に歩行してもらったバーチャル空間は図 2 のようになっており, 正面の壁の有無のみが異なる 2 種類の実験環境を用意した. 環境 A は目の前に壁がある空間とし, 環境 B は壁がなく通路が延々と続く形状とした. どちらの環境も壁の模様等は同一である. 直方体の部屋の中にスタートラインを設置し, 壁あり条件ではゴールライン上に壁が設置され, 壁なし条件では見えない壁が設置されている. スタートラインからゴールラインまでの距離は 6.0 m と設定した.



図 2: 実験参加者が歩行した実験環境。環境 A は壁が設置されている一方で、環境 B には壁が設置されていない。

### 2.3 実験条件

4 名の実験参加者（女性 1 名、男性 3 名、平均年齢 23.5 歳）に対して実験を行った。いずれの参加者も視覚・前庭感覚障害はなかった。バーチャル空間を動かす上でのゲインは 0.3 とし、各実験参加者に対してバーチャル空間の操作方向は逆向き、操作なし、同方向のように、表 1 の条件で行なった。実験参加者の速度と、操作するバーチャル空間の速度から導かれる相対速度を考慮して、実験参加者が知覚する OF の速度は通常の歩行状況に対してそれぞれ 1.3 倍、1.0 倍、0.7 倍の速い、同じ、遅いという 3 条件となる。

実験は OF の速度と中心視野の 2 要因参加者内計画とした。OF の速度は上述の通り 3 水準、中心視野は進行方向正面に壁の有無のみ異なるバーチャル環境の 2 水準とした。この視覚刺激の条件下で、実験参加者には実空間を歩行させ、その際に HMD を通してバーチャル空間を視覚提示した。ユーザの頭部座標および速度は HMD に内蔵されているインサイド・アウトトラッキングシステムを用いて取得・算出した。

実験参加者はスタートラインに立ったのち、3 秒間のカウントダウンを行い、スタート音が鳴ったら歩行を始める。壁あり条件では手に握っているコントローラがゴールライン上に設置されている壁に触れると試行が終了する。壁なし条件では手に握っているコントローラがゴールライン上にある透明な壁を超えると試行が終了する。参加者は 6 条件を各 1 試行ずつ計 6 試行を行った。

### 2.4 実験結果

実験参加者の速度グラフの例を図 3、図 4 に示す。縦軸が移動速度、横軸がスタートからの経過時間を表している。OF の速度 { 速い・同じ・遅い } × 中心視野 { 壁なし・壁あり } の 2 要因 6 条件における平均歩行速度を図 5 に示す。対応のある 2 元配置分散分析を行なったところ、交互作用、主効果ともに有意差は認められなかった。

### 2.5 考察

まず、OF の速度と歩行速度の関係について考察し、次に、中心視野と歩行速度の関係について議論する。

OF の速度と歩行速度の関係について、その振る舞いは先行研究と同様の傾向を示した [7]。すなわち OF の速度が遅くなると歩行速度は速まり、逆に OF の速度が遅くなる

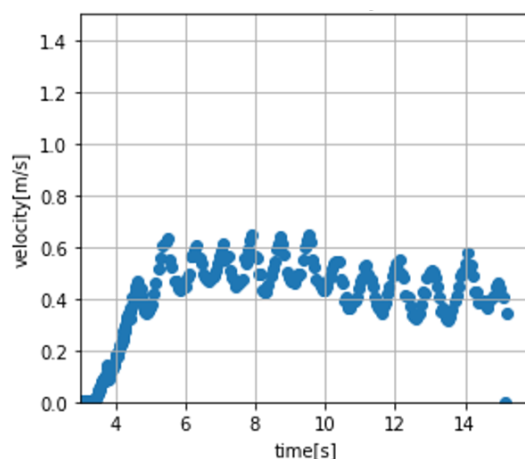


図 3: OF1.0 倍、壁あり条件において算出した速度グラフの例。縦軸がその時間での移動速度、横軸が準備できてからの経過時間を表す。

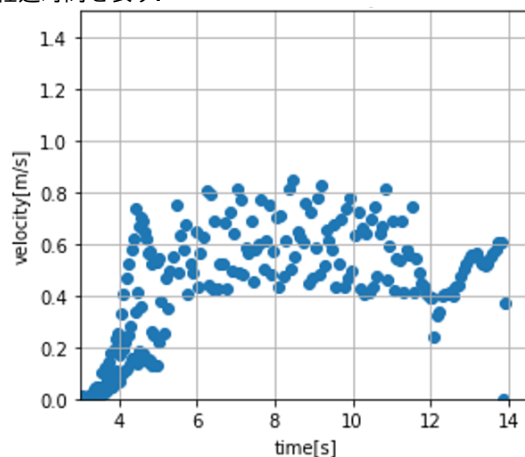


図 4: OF1.0 倍、壁なし条件において算出した速度グラフの例。

と歩行速度は速くなった。先行研究においてはトレッドミル上の歩行であったので、本研究によって実際の歩行においても同様の傾向があることが示唆された。前庭系の情報、固有受容感覚を実際の歩行と同じ条件にしても同様の傾向が見られたことより、歩行運動において視覚が優位に働くという先行研究とも整合性のある結果が得られたことになる。

このような OF 速度と歩行速度の関係が見られた理由について考察する。OF の速度と歩行速度とが互いに逆の関係

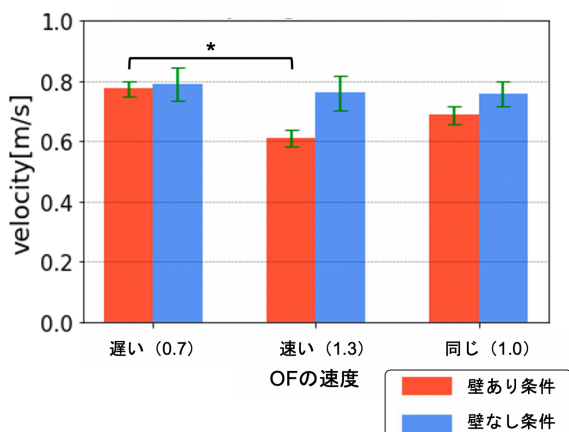


図 5: OF の速度・中心視野と平均歩行速度. 色の違いは実験したバーチャル環境の違いを表す.

にあることより、人間は歩行運動において無意識に普段自身が知覚している OF の速度を維持しようと歩行速度を調整している可能性がある。

次に、中心視野と歩行速度の関係について考える。本研究では2種類の異なるバーチャル空間を用意して実験を行なった。空間情報として、周辺視を含めて提示することで速度感覚が増強されることが判明している。一方で本実験においては、壁の有無によって変化するのは中心視野であり、周辺視野情報の領域は大きく変化したとは考え辛い。むしろ、中心視野に存在する壁の影響で周辺視野の OF の速度知覚が変化した可能性がある。これについて、歩行者の視点を一点に固定して実験を再度行う必要がある。また、単純な幾何学的パターンを用いていないため、今後視野範囲や空間周波数を独立変数として実験を行う必要がある。

また、壁が目前にあることで、衝突を防ごうと無意識に速度を調整した可能性がある。加えて、ゴールの判定が環境 A では「壁に触れること」と実験参加者に告知していたのに対し、環境 B では「歩き続ければ途中で終了する」と告げていたため、ゴールするにあたり心理的な要因が影響した可能性もある。いずれにせよ、ゴールまでの距離や終了の方法など、心理的な側面が環境間の違いにおいて歩行速度との関係に影響したことも示唆された。これについても今後、検討を進める余地がある。

### 3. おわりに

本研究では歩行速度操作において、その寄与が大きいと言われる視覚情報に着目した。視覚情報の中でも、OF に伴い生じる自己運動感覚を HMD を用いて実験参加者の歩行に合わせて動的に操作させることで、知覚する相対速度の変化が、どのように歩行速度に影響を与えるのか調べた。特に本研究では実際の歩行に近い環境とするために、実験参加者に実際の空間を歩行させた。結果として、先行研究同様に知覚する OF の速度と歩行速度は逆の関係を示した。これについて、人間は歩行運動において無意識に日頃知覚

している自身の OF の速度を保つように調整している可能性がある。さらには、歩行の際に空間情報が異なる環境で実験を行なったところ、空間的情報及び心理的效果に起因した違いが環境間で見られた。特に空間的情報については従来の周辺視野優位という定説に反するものであり、また、バーチャル空間内の歩行における心理的效果についてもあまり研究が進んでいないこともあり、これらの要因が歩行速度に与える影響については、今後より詳細な調査を行っていく。

謝辞 本研究は、東京大学バーチャルリアリティ教育研究センター サービス VR 寄附研究部門の支援によって実施された。

### 参考文献

- [1] 加藤典之, 金子寛彦: 歩行応答と知覚応答による視覚誘導性自己直線運動の知覚速度の測定, 光学 Vol. 34, pp. 597-605, 2005.
- [2] 渡邊淳司, 安藤英由樹, 前田太郎: 前庭感覚刺激による歩行方向の誘導パラサイトビューマンの研究第 17 報, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol. 8, pp. 339-342, 2003.
- [3] 渡邊淳司, 安藤英由樹, 朝原佳昭, 杉本麻樹, 前田太郎: 靴型インターフェースによる歩行ナビゲーションシステムの研究, 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No.3, pp. 1354-1362, 2005.
- [4] J R Lishman, D N Lee: The autonomy of visual kinaesthesia, Perception, vol. 2, pp. 287-294, 1973.
- [5] 渡邊紀文, 森文彦, 大森隆司: 周辺視ディスプレイと振動デバイスを利用した歩行誘導効果と感覚統合のモデル構築, 知能と情報 Vol. 28, No.3, pp. 608-616, 2016.
- [6] 吉川博美, 蜂須拓, 福嶋政期, 古川正紘, 梶本裕之: 歩行誘導における自己運動を用いたベクション場の設計, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 15, pp. 14-17, 2010.
- [7] A Lamontagne, J Fung, B J McFadyen, and J Faubert: Modulation of walking speed by changing optic flow in persons with stroke, Journal of neuro-engineering and rehabilitation, vol. 4:22, 2007
- [8] O Nami, N Takuji, K Hideaki, and H Michitaka: Do You Feel Like Passing Through Walls?: Effect of Self-Avatar Appearance on Facilitating Realistic Behavior in Virtual Environments, CHI '20 1-14 2020.
- [9] S Razzaque, Z Kohn, and M C. Whitton: Redirected Walking, University of North Carolina at Chapel Hill, 2005
- [10] F Steinicke, G Bruder, L Kohli, J Jerald, and K Hinrichs: Taxonomy and implementation of redirection techniques for ubiquitous passive haptic feedback, CW 2008, 217-223 2008.