

VR 環境の複雑さが歩行に及ぼす影響：加齢要因の検討

Effects of virtual environment complexity on gait dynamics: Investigating age-related factors

児玉 謙太郎¹, 桜井 良太², 友野 貴之³, 佐藤 和之⁴, 樋口 貴広¹

Kentaro Kodama, Ryota Sakurai, Takayuki Tomono, Kazuyuki Sato, Takahiro Higuchi

¹東京都立大学, ²東京都健康長寿医療センター研究所, ³札幌学院大学, ⁴Friedrich Schiller University Jena

¹Tokyo Metropolitan University, ²Tokyo Metropolitan Institute for Geriatrics and Gerontology, ³Sapporo Gakuin University, ⁴Friedrich Schiller University Jena

kodama_k@tmu.ac.jp

概要

本研究では、環境の視覚的な複雑さが歩行に及ぼす影響について、加齢要因を含めて検討した。具体的には、VR 内で人混みを再現し、参加者はヘッドマウントディスプレイを装着した状態で足踏みするよう求められた。人混みが少ない単純条件と多い複雑条件を比較した結果、若齢者と同様に中高年者でも、複雑条件にて歩行リズムがランダムに近づき身体自由度が増加したと解釈された。今後、高齢者の歩行訓練への応用などが期待される。

キーワード：歩行リズム (gait dynamics), 人混み (crowd), 複雑性 (complexity), 加齢 (aging)

1. はじめに

目的

本研究では、高齢者の転倒予防のための仮想現実 (VR) 技術を応用した歩行トレーニング・システムの開発を目標に、視覚的な環境の複雑さが歩行のリズムやダイナミクスに及ぼす影響を検討した。具体的には、環境の複雑さとして、アバターによって生成された人混みの程度 (量) を操作した VR 環境を構築し、人混みが少ない単純条件と、人混みが多い複雑条件によって歩行がどのような影響を受けるかを実験的に比較した。

背景

呼吸や心拍、そして歩行などヒトの生理・行動レベルの時系列データには周期的なリズムがみられる。これら生体リズムの評価や背景メカニズムについて、近年、複雑系科学や非線形力学 (カオス・フラクタル理論) の知見を背景に、複雑性喪失仮説 (Loss of Complexity hypothesis: LoC 仮説) が提唱されている [1]。LoC 仮説によると、生体リズムには適度な“複雑性”や“揺らぎ”が存在すること、しかし、加齢や疾患に伴って複雑性が低下・喪失すること、そして、その複雑性はフラクタルやエントロピーといった観点から定量的に評価できること、が示唆されている (e.g., [2])。

これまでも VR 技術を脳卒中患者の歩行のリハビリテーションに応用した研究 [3]や、複雑系科学や非線形力学の知見に基づきフラクタルの観点から高齢者の歩行トレーニング・システムを開発した研究 [4] は存在したが、VR と複雑系科学の知見の融合は十分に検討されていない。特に、日常場面 (人混み) を想定した複雑な環境を VR という安全な環境で構築し、高齢者の歩行リズムを“複雑性”という新しい観点から評価する先行研究は、報告者らが調べた限り見当たらない。

そこで、著者らは若年健常者を対象に、トレッドミル上での歩行課題において、VR 環境の複雑さ (人混み) が歩行リズムに及ぼす影響を検討した [5]。その結果、複雑条件で歩行の変動量が減少し、リズムの複雑化が見られ、環境の視覚的な複雑さが、歩行時の身体自由度を高めると解釈された。

その一方、トレッドミルの安全性、VR 長時間使用による疲労の懸念も確認された。そのため、将来的に高齢者の転倒予防のための VR トレーニング・システムの開発を目指すためには、安全かつ効果的な方法での検討が求められる。そこで、本研究では、50 歳以上の中高年者を対象に、以下の実験を行った。

2. 方法

実験参加者

健康な中高年者 12 名 (男女それぞれ 8 名・4 名、平均 67.2 ± 6.1 歳) に同意のもと実験に参加してもらった。

実験装置

ヘッドマウントディスプレイ (HMD: Oculus Quest 2, Meta), 加速度センサ (TSND151, ATR-Promotions: サンプル周波数 100Hz で腰部に装着) が用いられた。VR 環境および実験刺激は Unity (2021.3.5f1) で開発・設計された。

実験刺激

統制条件として、①アバターなし (No avatar) 条件 (HMD を装着し VR 内で前方を見ながら歩行する条件)、実験条件として、②単純 (Simple) 条件 (VR 内で 10 秒間に約 5 のアバターと擦れ違う条件)、③複雑 (Complex) 条件 (VR 内で 10 秒間に約 15 体のアバターと擦れ違う条件) を設けた (図 1)。統制条件①では VR 内で街並みのみが表現され、実験条件②・③ではアバターが正面から擦れ違うように設計された。アバターは、参加者の左右に 2 列ずつ計 4 列に配置され (参加者から左右に約 1m ずつ離れた位置であり、アバター同士の隙間は参加者の肩幅の 2.6 倍に設定された)、一定の速度 (時速 4 km) で参加者と反対方向に直進するよう設定された。また、参加者の歩行速度に合わせ VR 環境の背景が前進するように光学的流動が設計された。但し、アバターは直進するため、参加者は VR 内でアバターとは衝突をしない設定となっている。

図 1 VR 環境の視覚的な複雑さ
(上：単純条件，下：複雑条件)



実験課題

参加者は、床の上で足踏みを行い、各自の適切な歩行速度を求めた。その後、VR 自体に慣れてもらった後、①アバターなし条件、②単純条件、③複雑条件において足踏み課題を行うよう求められた。

手続き

参加者は、はじめに①アバターなし条件を行い、②単純条件・③複雑条件の順番は参加者ごとにカウンターバランスをとった。参加者は、いずれの条件もなるべく前方を向いて歩くよう教示され、各条件では 5～6 分間 (解析に必要なデータ数の 512 歩以上) の歩行を行うよう求められた。条件間で 5 分程度の休憩を入れた。

データ分析

本研究では、腰部の加速度センサで取得したデータの上下方向の時系列データからステップ (着地) のタイミングを検出し、歩行のストライド間隔の変動の量を変動係数 (Coefficient of Variation : CV)、歩行ダイナミクスにおける複雑性についてはフラクタル性を定量化するスケーリング指数 (Scaling Exponent α) を求めた。具体的には、Detrended Fluctuation Analysis (DFA) [6] という非線形時系列解析手法 (フラクタル解析の一種) を適用した。これらの分析では DFA の適用において必要とされるデータ数 (512 点) を分析対象とし、歩行の開始と終了の前後のデータを除き、ステップ間隔 512 点を対象とした。

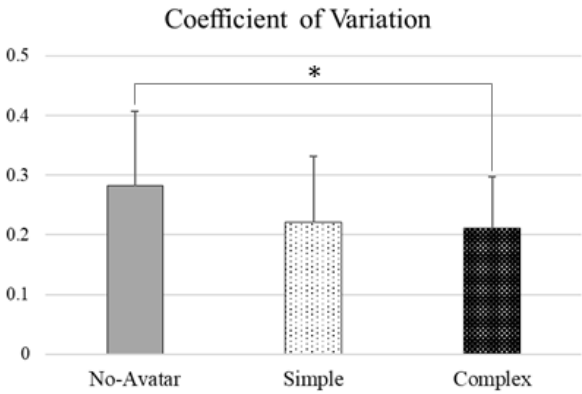
3. 結果

歩行ステップの変動の量 (CV)

図 2 では、歩行ステップ間隔の変動の量を評価するため、変動係数 (CV) を求め、条件ごとの平均を棒グラフで示している (エラーバーを標準偏差 (SD) で示している)。

各条件の変動係数 (CV) は、アバターなし条件では平均 0.282 (SD=0.125)、単純条件では平均 0.221 (SD=0.110)、複雑条件では平均 0.211 (SD=0.087) であった。分散分析の結果、有意傾向が認められ ($F(2, 22)=3.00, p=0.070, \eta_p^2=0.21$)、下位検定 (Holm 法) の結果、複雑条件が統制条件よりも有意に低い傾向が見られた ($t(11)=2.31, p=0.041$)。

図 2 ステップ間隔の変動係数
(No avatar : アバターなし条件,
Simple : 単純条件, Complex : 複雑条件)

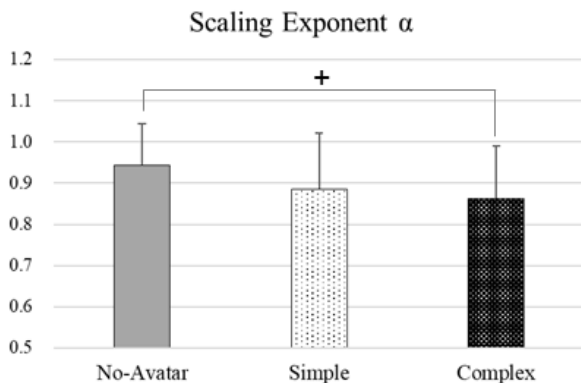


歩行ステップの変動の質（フラクタル性）

図3では、歩行ステップ間隔の変動の質を評価するため、DFA スケーリング指数 α を求め、条件ごとの平均を棒グラフで示している（エラーバーを標準偏差（SD）で示している）。

各条件のDFA スケーリング指数 α は、アバターなし条件では平均 0.94（SD=0.10）、単純条件では平均 0.89（SD=0.14）、複雑条件では平均 0.86（SD=0.13）。分散分析の結果、主効果が認められ（ $F(2, 22)=4.16, p=0.029, \eta_p^2=0.27$ ）、下位検定（Holm 法）の結果、複雑条件が統制条件よりも低い傾向が示された（ $t(11)=2.54, p=0.082$ ）。

図3 ステップ間隔のDFA スケーリング指数 α
 (No avatar : アバターなし条件,
 Simple : 単純条件, Complex : 複雑条件)



4. 考察

VR 環境の視覚的な複雑さが歩行のダイナミクスに及ぼす影響を加齢要因と合わせて調べるため、本研究では、VR 環境で人混みを再現し、統制条件（アバターなし条件）と、単純条件（人混みが少ない条件）、複雑条件（人混みが多い条件）の3条件を比較した（図1）。その際、歩行のダイナミクスは歩行ステップの間隔の変動の量と質という観点から評価し、比較した。

その結果、変動量という意味で歩行ステップの変動係数（CV）を3条件で比較した結果、複雑条件で統制条件より有意に変動が少なくなることが示された（図2）。

また、変動の質という意味で歩行ステップのリズム・時間構造をDFAで定量的に評価したところ、複雑条件で統制条件よりDFA スケーリング指数 α が小さくなる傾向が示唆された（図3）。

これらの結果について、LoC 仮説に基づく複雑性の観点から考察すると、今回の実験で設定したVR環境における人混みの複雑さは、歩行リズムのフラクタル性を低下させ、よりランダムな変動へと変える傾向があることが示唆される結果となった。

これらの結果は、若齢者のトレッドミル歩行で同様の検討を行った著者らの先行研究とも概ね一致する[5]。また、人混みが多い複雑条件で、歩行リズムの変動量が減少し、変動の質としてそのリズムがよりランダムになるという結果は、長距離ランナーの走行リズムの特徴として報告されている結果 [7] ととも一致する。すなわち、トレッドミル上で走行する課題を長距離ランナーと非ランナーの初級者で検討し、そのステップ間隔をDFAで解析した先行研究では、長距離ランナー群の方がCV、および、DFA スケーリング指数 α が低くなることが示され、熟達したランナーは、走行パターンの時空間的な組織化における自由度を失うことなく走行時の変動性を抑えることができると解釈されている [7]。

この解釈を本研究の結果にあてはめるならば、視覚的に複雑な人混みが多い条件では、若齢者と同様に [5]、中高年者もアバターとの接触を回避するように歩行の変動の量を抑えながら身体のある程度は解放させ、柔軟に歩行できる“構え”の状態を保持していたと考察される。つまり、 α が0.5に近い状態では、膨大な自由度をもつ身体システムが、自由度を結合させ規則的なリズムで歩いているというよりも、一定の自由度を保ちながらランダム性を有した状態であると解釈される。

ただし、著者らの先行研究では、トレッドミル上での歩行であったため [5]、加齢要因という観点だけでなく実験課題にも違いがある。結果の違いについては、CV（歩行の安定性）が大きく異なり、高齢者の方が安定性は低かった。この結果についても、加齢の要因だけではなく、一定の速度で歩くトレッドミル歩行に比べて、HMDで現実空間の視界が遮断された状態でその場で足踏みをする課題では歩行のばらつきが大きくなる可能性がある。これらの要因については、今後、さらなるデータを取得し、多角的に検討していきたい。

本研究を発展させることで、環境内のいかなる視覚情報が、参加者の歩行のダイナミクス（複雑さなど）に影響を及ぼすのかが明らかになれば、実際には危険を伴うような人混みなどの環境をVRで構築し、効果的なトレーニング方法が提案できるかもしれない。とくに、トレッドミルなどの機器を必要とせず、その場での

足踏みで同様の効果が得られれば、より手軽なトレーニング方法として普及できる可能性がある。そのためにも、今後、トレッドミル歩行と足踏みの比較を含め、基礎的な知見を蓄積することによって、高齢者や運動障害者のトレーニングやリハビリテーションのためのVRシステムの開発と応用を目指していきたい。

謝辞

本研究は、2023 年度・三井住友海上福祉財団・研究助成（高齢者福祉分野）、JSPS 科研費 23K24740 の助成を受けたものです。ここに感謝の意を表します。

文献

- [1] Lipsitz, L. A., & Goldberger, A. L. (1992). Loss of 'complexity' and aging: potential applications of fractals and chaos theory to senescence. *Jama*, 267(13), 1806-1809.
- [2] Manor, B., & Lipsitz, L. A. (2013). Physiologic complexity and aging: Implications for physical function and rehabilitation. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 45, 287-293.
- [3] Kim, M., & Kaneko, F. (2023). Virtual reality-based gait rehabilitation intervention for stroke individuals: a scoping review. *Journal of exercise rehabilitation*, 19(2), 95.
- [4] Rhea, C. K., Kiefer, A. W., Wittstein, M. W., Leonard, K. B., MacPherson, R. P., Wright, W. G., & Haran, F. J. (2014). Fractal gait patterns are retained after entrainment to a fractal stimulus. *PLoS One*, 9(9), e106755.
- [5] 児玉 謙太郎・桜井 良太・友野 貴之・佐藤 和之・樋口 貴広, (2024) “VR 環境の複雑さが歩行に及ぼす影響：人混み通過実験での予備的検討”, 2024 年度日本認知科学会第 41 回大会論文集, pp.571-574.
- [6] Peng, C. K., Havlin, S., Stanley, H. E., & Goldberger, A. L. (1995). Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos: an interdisciplinary journal of nonlinear science*, 5(1), 82-87.
- [7] Nakayama, Y., Kudo, K., & Ohtsuki, T. (2010). Variability and fluctuation in running gait cycle of trained runners and non-runners. *Gait & posture*, 31(3), 331-335.