

2025 年 4 月 30 日

<研究課題> 高齢者の転倒予防のための VR 歩行トレーニング・システムの開発

代表研究者 東京都立大学 准教授 児玉 謙太郎
共同研究者 東京都健康長寿医療センター 研究員 桜井 良太

【抄録】

本研究では、高齢者の転倒予防のための VR システムの開発に向けて基礎的な実験を行った。具体的には、環境の複雑性が歩行に及ぼす影響を調べるため、VR 内で人混みを再現して 2 つの実験を行った。実験 1 では安全なシステム構築のため、若齢者を対象にトレッドミル上での実験を行った。視覚的な複雑性を 3 条件（統制・単純・複雑条件）で比較した結果、複雑条件で有意に歩行リズムの複雑化が見られた一方、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。そこで、実験 2 では、トレッドミルは使わずに地面の上での足踏み課題に変更し、高齢者を対象に同様の実験を行った。その結果、実験 1 と同様に複雑条件で歩行リズムの複雑化が見られ、身体自由度が増大したと解釈された。今後、どのような VR 環境でどのような運動を行うと歩行リズムの改善が見られるか多角的に検討し、VR システムの開発を進めていきたい。

1. 研究の目的

1-1 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的とする。具体的には、「視覚環境の複雑さ」(人混みの程度)をコントロールした VR 環境内での歩行トレーニングによって、環境に応じた「歩行の適応性」が改善する、という仮説を実験的に検証する。

1-2 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、将来的に高齢者の転倒予防のための VR 歩行トレーニング・システムの開発が実現すれば、地域の運動教室やスポーツ施設に導入し、安全かつ気軽に実施できるシステムとしての実用化が期待されると考えられる。

2. 研究方法と経過

2-1 実験 1: 若齢者対象の VR システム検証

実験参加者: 若年健常者 6 名 (男女 3 名ずつ、平均 22.3 ± 6.0 歳) に、同意のもと実験に参加してもらった。

実験装置: トレッドミル (AFJ2019A、ALINCO)、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: サンプルング周波数 100Hz で腰部と左右の足首に装着) 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、アバター同士の間隔は参加者の肩幅の 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、トレッドミル上で歩行を行い、各自の適切な歩行速度を求めた。その後、トレッドミル上での歩行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、トレッドミル上での歩行が求められた。

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 550 歩程度）の歩行を行うよう求められた。尚、条件間で 5～6 分間の休憩を入れた。

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を検出し、歩行の変動の量を変動係数 (Coefficient of Variation : CV) を、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) [5] 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。

2-2 実験 2：高齢者対象の足踏み実験

実験参加者：健康な高齢者 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：実験 1 と同様のヘッドマウントディスプレイ、加速度センサが用いられた。

実験刺激：実験 1 と同様の刺激が用いられた。

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：実験 1 と同様の手続きで行われた。

データ分析：実験 1 と同様の分析が行われた。

3. 研究の成果

3-1 実験 1：若齢者対象の VR システム検証 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 0.039 (SD=0.013)、単純条件では平均 0.037 (SD=0.008)、複雑条件では平均 0.033 (SD=0.006) であった。分散分析の結果、有意な主効果は認められなかった ($F(2, 10) = 1.26, p = 0.325, \eta_p = 0.20$)。

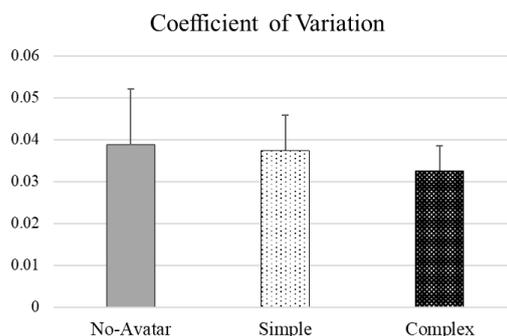


図 2 変動係数

(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 0.89 (SD=0.20)、単純条件では平均 0.87 (SD=0.16)、複雑条件では平均 0.81 (SD=0.15)。分散分析の結果、有意な主効果が認められ ($F(2, 10) = 5.21, p = 0.028, \eta_p = 0.51$)、下位検定 (Holm 法) の結果、複雑条件が単純条件よりも有意に低いことが示された ($t(5) = 4.64, p = 0.017$)。

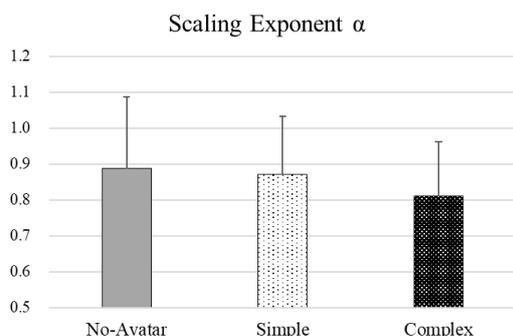


図 3 DFA スケーリング指数 α
(No avatar : アバターなし条件、Simple : 単純条件、Complex : 複雑条件)

3-2 実験 2 : 高齢者対象の足踏み実験 歩行ステップの変動の量 (CV)

図 4 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 ($F(2, 22) = 3.00, p = 0.070, \eta_p = 0.21$)、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 ($t(11) = 2.31, p = 0.041$)。

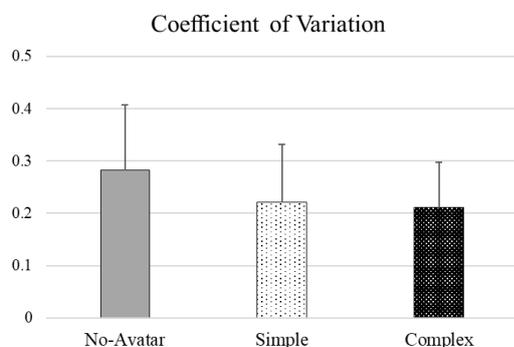


図 4 変動係数
(No avatar : アバターなし条件、Simple : 単純条件、Complex : 複雑条件)

歩行ステップの変動の質 (フラクタル性)

図 5 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 ($F(2, 22) = 4.16, p = 0.029, \eta_p = 0.27$)、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 ($t(11) = 2.54, p = 0.082$)。

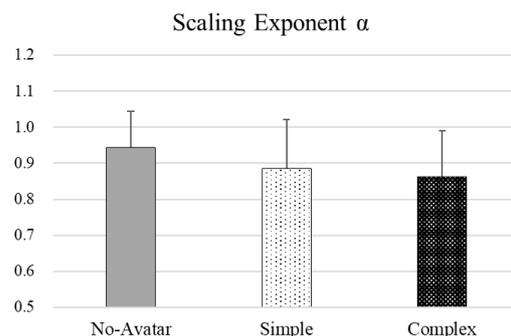


図 5 DFA スケーリング指数 α
(No avatar : アバターなし条件、Simple : 単純条件、Complex : 複雑条件)

3-3 総合考察

実験 1 では、若齢者を対象にトレッドミル上での歩行実験を実施し、実験 2 では、高齢者を対象に地面の上での足踏み実験を実施した。その結果、いずれの実験においても、VR 内での人混みが多く、視覚的に複雑な条件で歩行または足踏みのリズムの複雑性が、フラクタル性 (持続性相関) が下がり、ランダムな変動へと変化することが示唆された。さらに、人混みが多い複雑条件で歩行ないし足踏みの変動量が (統計的に有意ではないものの) やや減少する傾向があることも示唆された。これらの結果は、長距離ランナーの走行リズムの特徴を調べた先行研究の結果 [6] と一致する。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解析した結果、長距離ランナーの方が変動量、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を抑えることができる、と解釈されている [6]。

この解釈を本研究の結果にあてはめるなら、人混みが多い複雑条件においては、アバターと

の接触を回避するよう参加者は歩行の変動の量を抑えながら身体の自由度をある程度解放させ、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。これらの可能性については、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。

4. 今後の課題

今回は実験1の結果、HMDを装着して足元が見えない状況でトレッドミル上を歩行するのは安全性の観点から懸念があることが確認されたため、今後より広く大きなトレッドミルや、ハーネスを装着した安全な実験を検討する必要がある。

また、実験1の結果、今回のデータ解析(DFA)を行うために必要なデータ数(512歩以上)を取得するためには、5~6分間の歩行が必要であることが分かったが、このように長時間VRを使用することで疲労や眩暈が生じることも懸念されたため、今後はより短い時間で効果的なトレーニングを行える工夫を検討し、トレーニング効果の検証を行っていききたい。

また、今後、視覚的な複雑性に影響する要因として、アバターの数や歩行速度、移動方向、アバター同士の隙間の幅などの変数についても、歩行にどのように影響するかを検討したい。

今後、本研究を発展させることによって、VR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(複雑性など)に影響を及ぼす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内で再現し、効果的なトレーニング方法が提案できる。そのような知見が蓄積すれば、高齢者や運動障害者の歩行のリハビリテーションなどに応用できる可能性があり、VRトレーニング・システムの開発と、その社会的・臨床的な応用が期待される。

5. 研究成果の公表方法

本研究の成果は、実験1について2024年度の日本認知科学学会大会で発表を行い、実験2については2025年度の日本認知科学学会大会と、

International Society of Posture and Gait Research という姿勢と歩行の国際会議で発表を行う計画である。その後、データ数を増やし、英語論文としてまとめ、海外専門誌(Gait and Posture 誌など)に同年度内に投稿する計画である。

参考文献

- [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] Kang, Y. J., Park, H. K., Kim, H. J., Lim, T., Ku, J., Cho, S., ... & Park, E. S. (2012). Upper extremity rehabilitation of stroke: facilitation of corticospinal excitability using virtual mirror paradigm. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 9, 1-8.
- [4] Vaz, J. R., Knarr, B. A., & Stergiou, N. (2020). Gait complexity is acutely restored in older adults when walking to a fractal-like visual stimulus. *Human Movement Science*, 74, 102677.
- [5] 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.
- [6] 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.

以上

Development of a VR Gait Training System for Fall Prevention in older adults

Primary Researcher: Kentaro Kodama,
Associate Professor,
Tokyo Metropolitan University

Co-researchers: Ryota Sakurai,
Researcher,
Tokyo Metropolitan Institute of Gerontology

In this study, we conducted two experiments aimed at developing a virtual reality (VR) system for fall prevention in older adults. Specifically, we carried out the experiments in a VR environment simulating a crowded scene to investigate the effects of environmental complexity on walking. In Experiment 1, to ensure system safety, young adults participated in a treadmill-based walking task. Three conditions of visual complexity (control, simple, and complex) were compared, and results showed that walking rhythm became significantly more complex under the complex condition. However, concerns were also raised regarding the safety of using a treadmill and the potential fatigue associated with prolonged VR use. Therefore, in Experiment 2, we replaced the treadmill with an in-place stepping task and conducted a similar experiment with elderly participants. As in Experiment 1, the complex condition resulted in greater complexity in walking rhythm, which was interpreted as an increase in degrees of bodily freedom. Moving forward, we aim to explore from multiple perspectives which types of VR environments and movements lead to improvements in gait rhythm, in order to advance the development of the VR system.