

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

Pilot study on the effect of virtual environment complexity on gait dynamics: An experiment on passing through a virtual crowd

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

本研究は、環境の複雑さが歩行に及ぼす影響を検討するため、VR 内で人混みを再現し実験を行った。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トレッドミル上を歩くよう求められ、アバターが少ない単純条件、多い複雑条件が比較された。歩行のステップ間隔データのフラクタル性（スケーリング指数 α ）を評価した結果、複雑条件で α が有意に低く、歩行時の身体自由度が高くなったと解釈され、VR 内の人混みの量が歩行の複雑さや自由度に影響する可能性が示された。

キーワード：歩行リズム (gait dynamics), 人混み (crowd), 複雑性 (complexity), フラクタル (fractality)

1. はじめに

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は、様々な理論的、実験的な検討がなされてきたが、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）と呼ばれる考え方が提唱されている [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])。

一般に、時系列データに対するフラクタル解析では、変動の量と時系列の時間スケール（窓長）の関係を両軸にとった両対数グラフの傾きであるスケーリング指数 α によって、その時系列の時間変動のパターンを定量化する。具体的には、 α が $0 < \alpha < 0.5$ のとき反持続性相関（過去に起きた変動とは逆方向の変動が未来で起こる可能性が高い）を示し、 $0.5 < \alpha < 1$ のとき持続性相関（過去に起きた変動と同じ方向の変動が未来で

起こる可能性が高い）を示す。また、 $\alpha = 0.5$ のときホワイトノイズ（ランダムノイズ）、 $\alpha = 1$ のときピンクノイズ（ $1/f$ ゆらぎ、いわゆるフラクタル）、 $\alpha = 1.5$ のときブラウンノイズとなる [3]。

例えば、歩行の研究においては、若年健常者の歩行リズムには長期相関と呼ばれる性質（フラクタル性・持続性相関）が見られるが、高齢者やパーキンソン病患者の歩行リズムはフラクタル性が見られずホワイトノイズに近いランダムな性質を持つことが知られている (e.g., [4])。

また、歩行のリズムには、聴覚刺激や視覚刺激が影響することも知られている。例えば、一定のリズムを刻むメトロノームと $1/f$ のゆらぎをもつメトロノームを聴かせて歩行させた場合では、歩行リズムが前者ではホワイトノイズ、後者ではピンクノイズ ($1/f$) になることが知られている [5]。さらに、視覚的メトロノームについても同様の結果が報告されている [6]。

一方で、日常的な生活環境は、メトロノームのような周期的な知覚情報だけでなく、人混みや雑踏など、より複雑な情報にも溢れている。そのような複雑な環境においても、ヒトは視覚情報などをうまく利用し、予測的、適応的に歩きながら移動している [7]。

以上の背景を踏まえ、本研究では、より日常的で複雑な環境を想定し、「人混みの中を歩く」という場面に着目した。しかし、実際の人混みの中で実験を行うことは、コスト面や安全面、そして要因の統制という意味でも現実的ではない。そこで、本研究では、仮想現実 (VR) で人混みを再現し、安全かつ実験的統制がとれた状況で実験を行った。

2. 方法

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). 参加者には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 5 体程度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 15 体程度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て 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. ただし, 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左右方向 (ML 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) [8] 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) [9] 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, 条件ごとの平均を参加者ごとに灰色の点でプロットして, それらの平均を黒い点でプロットして示している (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, 主効果, および, 交互作用は認められなかった ($F(2, 10)=1.26, p=0.32, \eta_p^2=0.20$).

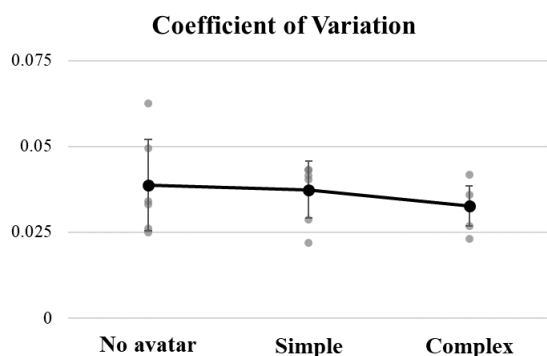


図2 ステップ間隔の変動係数
(No avatar : アバターなし条件,
Simple : 単純条件, Complex : 複雑条件)

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、条件ごとの平均を参加者ごとに灰色の点でプロットして、それらの平均を黒い点でプロットして示している (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、主効果、および、交互作用が認められ ($F(2, 10) = 5.21, p = 0.028, \eta_p = 0.51$)、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 ($t(5) = 4.63, p = 0.01, \eta_p = 0.20$)。

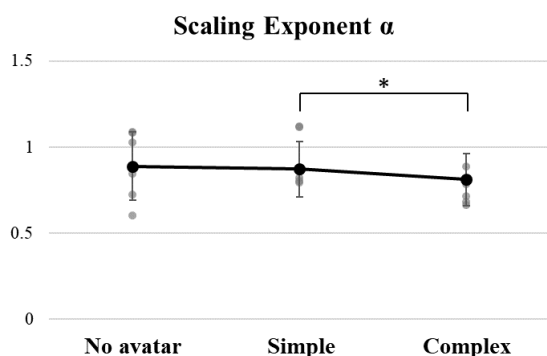


図3 ステップ間隔の DFA スケーリング指数 α
(No avatar : アバターなし条件,
Simple : 単純条件, Complex : 複雑条件)

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調べるため、本研究では予備的な検討として、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条件で比較したところ、統計的に有意な差は認められなかったものの、複雑条件でやや変動が少ない傾向が示された (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、複雑条件の方が単純条件よりも有意に DFA スケーリング指数 α が小さな値を示した (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。その意味では、VR 環境が複雑になれば歩行のリズムも複雑になるといった単純な影響関係は見られなかった。

他方、人混みが多い複雑条件で歩行の変動量が (統計的に有意ではないものの) やや減少し、変動に質としてランダム性が増加するという結果は、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 [10] と一致する点は注目に値する。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 [10]。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、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。

また、今回の予備的な実験では検討できていないが、人混みを通過することに対する様々な個人差（得意／苦手、パーソナルスペース、自己身体感覚など）の影響も今後の検討課題としたい。その他、視覚的な複雑さとして「アバターの数」以外の要因として、アバターの「歩行速度」「移動方向」「アバター間の隙間の幅」などの変数も歩行に影響する要因として考えられる。今後、どのような変数を操作すると歩行にどのような影響が出るのかを実験的に明らかにしたい。

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内で再現し、効果的なトレーニング方法が提案できる可能性がある。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。

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] 児玉謙太郎, 清水大地, 安田和弘. (2021). 非線形時系列解析による動作の質の評価と表現: 医療・スポーツ分野への応用. *バイオメカニズム学会誌* 45(4), 227-238.
- [4] Hausdorff, J. M. (2009). Gait dynamics in Parkinson's disease: common and distinct behavior among stride length, gait variability, and fractal-like scaling. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 19(2).
- [5] Marmelat, V., Duncan, A., Meltz, S., Meidinger, R. L., & Hellman, A. M. (2020). Fractal auditory stimulation has greater benefit for people with Parkinson's disease showing more random gait pattern. *Gait & posture*, 80, 234-239.
- [6] 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.
- [7] Higuchi, T. (2013). Visuomotor control of human adaptive locomotion: understanding the anticipatory nature. *Frontiers in psychology*, 4, 277.
- [8] 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.
- [9] Delignieres, D., Ramdani, S., Lemoine, L., Torre, K., Fortes, M., & Ninot, G. (2006). Fractal analyses for 'short' time series: a re-assessment of classical methods. *Journal of mathematical psychology*, 50(6), 525-544.
- [10] 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.