

Mixed Reality技術を利用した 低照度環境における歩行分析とその評価

稻増 陸^{1,a)} 福代 航大¹ 村田 晃琉¹ 柴本 勇² 井尻 敬¹

概要：夜間や暗い部屋のような低照度環境における歩行は日常生活に不可欠であるが、その一方でつまづきや転倒リスクを伴う。そのため、低照度環境における歩行練習や歩行分析を行える仕組みの実現が求められる。そこで本研究では、Mixed Reality（MR）技術を活用し、仮想低照度環境における歩行分析手法を提案する。具体的には、カメラパススルー型 Head Mounted Display（HMD）を利用し、パススルー映像にブルーシフト効果を考慮した低照度フィルタを適用することで低照度環境を仮想的に再現する。提案手法は、このMR空間においてユーザが『5m歩行テスト』を実施する様子を計測し、歩行後に頭・手・足の軌跡を可視化する。提案手法の有用性を確認するため、パススルー型HMDを装着した状態で、異なる照明条件、および、異なる障害物条件にて5m歩行テストを行う様子を観察する実験を実施した。結果、仮想低照度環境では、明るい環境に比べて歩行速度が低下し歩幅が短縮するといった、実際の低照度環境と類似した傾向が確認された。

1. はじめに

歩行は日常生活において必要不可欠な身体活動であり、その評価と分析はリハビリテーション分野における重要な課題である[1]。特に、夜間や暗い部屋といった低照度環境や障害物を含む環境ではつまづきや転倒のリスクが高まるため、このような環境下における歩行練習や歩行分析を安全に実施できる仕組みの実現が求められている。しかし、実際に低照度環境を構築し、障害物を配置して歩行練習・歩行分析を行うには、広い部屋の準備や安全性の確保が課題となる。

手軽に再現性のある環境を提示できるVirtual Reality（VR）技術が歩行リハビリテーションの分野で広く活用されている。例えば、VR環境にてリハビリテーションを行うことで、標準的なリハビリテーションと比べて脳卒中患者の歩行速度などが向上されるという報告[2]やリハビリテーションに対する動機づけを高められるという報告[3]がある。他にも、VR技術を用いることで、視覚的・聴覚的・認知的負荷のもとで歩行分析を行う手法[4]や、障害物の回避行動を分析する手法[5]が提案されている。しかし、先行研究の多くは十分な照度が確保された明所の歩行

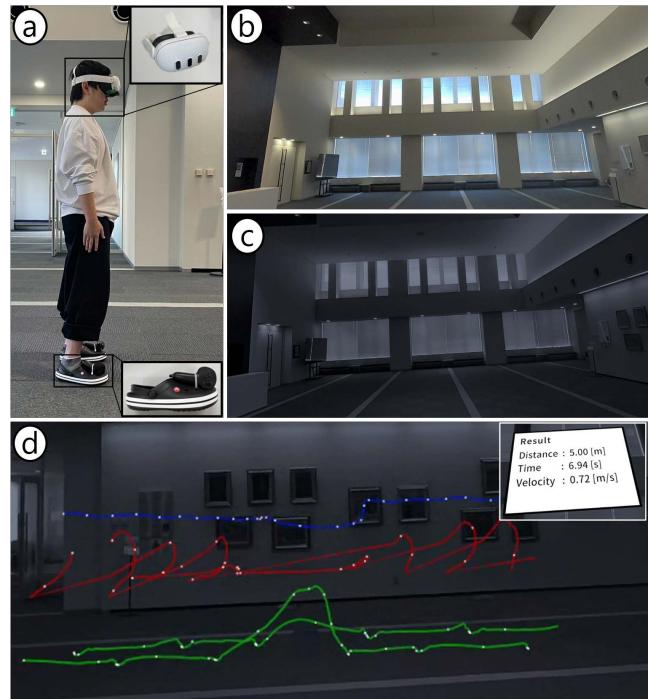


図 1 提案手法の全体像。ユーザは HMD とコントローラ付きの靴を装着して MR 空間にいる (a)。このときパススルー映像 (b) に低照度フィルタを適用することで、仮想的に低照度環境を再現する (c)。この空間で歩行テストを実施すると、その際の歩行の軌跡が MR 空間に可視化される (d) (実際に利用した $k = 0.001$ では図が暗くなりすぎるため、本図では $k = 0.08$ の映像を示す)。

¹ 芝浦工業大学
Shibaura Institute of Technology
² 聖隸クリストファー大学
Seirei Christopher University
a) al20033@shibaura-it.ac.jp

を対象としており、低照度環境下の歩行についてはほとんど検討されていない。

本研究では、安全かつ手軽に低照度環境において歩行練習・歩行分析を行える枠組みの実現を目的とし、Mixed Reality (MR) 技術を用いた仮想低照度環境における歩行分析手法を提案する（図 1）。具体的には、カメラパススルー型 Head Mounted Display (HMD) を利用し、パススルー映像に低照度フィルタを適用することで仮想的な低照度環境を再現する。我々は、この仮想低照度環境にて、リハビリテーション分野で歩行能力を評価するために利用される 5m 歩行テストを実施する。ユーザが MR 空間を歩行する様子を MR デバイスを用いて計測し、歩行中の頭・手・足の軌跡を記録し可視化する。また、回避動作の練習・評価のために仮想的な障害物を提示する機能も提供する。提案手法は、ユーザのみに仮想低照度環境を提供するため、周囲の空間は明るい状態を維持できる。そのため、監視を行いやすい安全な環境下で、MR トラッキング機能を用いた歩行分析を手軽に実施できる。

提案手法の有用性を確認するため、5m 歩行テストを用いた実験を実施した。この実験では、パススルー型 HMD を装着した状態で、異なる照明条件（実明環境・実低照度環境・仮想低照度環境）、および、異なる障害物条件（障害物なし・実物の障害物あり・仮想的な障害物あり）にて 5m 歩行テストを実施してもらい、歩行の様子を観察した。その結果、仮想低照度環境では、歩行速度が低下し歩幅が短縮するといった、実低照度環境と同様の傾向が確認された。

2. 関連研究

2.1 VR 技術を利用した歩行リハビリテーションや歩行分析

VR 技術は、条件を統一した反復練習環境を提供できる、練習の動機づけに寄与するといった特徴を有するため、歩行リハビリテーションや歩行分析への応用が多く行われている。Corbetta ら [2] は、脳卒中後の患者に対する VR を用いたリハビリテーションに関する研究をレビューし、標準的なリハビリテーションと比較して VR を用いたリハビリテーションは歩行速度・バランス・移動能力を向上させると報告した。Kern ら [3] は、VR とゲーミフィケーション要素を組み合わせることで、モチベーションを向上できる VR リハビリテーションシステムを提案した。Wang ら [4] は、視覚的・聴覚的・認知的な負荷がかかった環境における歩行能力を評価するための VRGaitAnalytics システムを開発した。また、Rhiel ら [5] は、小児の障害物歩行課題を VR 環境と実環境で比較し、VR 環境でも実環境と同等の歩行行動が得られることを示した。しかし、先行研究の多くは明所を前提としており、低照度環境下の歩行リハビリテーションや歩行分析の試みはほとんど行われていない。

2.2 低照度環境における歩行分析

低照度環境における歩行は、日常生活において避けられない一方でつまづきや転倒などのリスクを伴う。そのため、実際の低照度環境において歩行分析を実施する試みが発表されている。Choi ら [6] は、若年者と高齢者の歩行パターンを比較し、照度の低下によって若年者の歩行速度と立脚期の比率が減少することを示した。Huang ら [7] は、健康な成人を対象に異なる環境照度が歩行パターンにどのような影響を与えるかを調査し、照度の低下によってストライド長やストライド時間が減少することを示した。Naaman ら [8] は、若年者と中年成人および高齢者を対象に照度低下が歩行安定性に与える影響を分析し、中年成人は暗所で歩行すると通常照明に比べて歩行安定性が低下することを示した。Figueiro ら [9] は、過去半年の間に転倒経験のある高齢者を主な対象として歩行パフォーマンスを測定し、複数条件のうち夜間照明下で最も低い歩行パフォーマンスを示した。Kesler ら [10] は、高度歩行障害のある高齢者と健康な高齢者を対象に歩行を評価し、暗所において両者の歩行速度の低下と高度歩行障害のある高齢者の歩行安定性の低下を示した。

これらの研究は、歩行する環境の照度低下が歩行の速度・ストライド・安定性に影響を及ぼすことを明らかにした。しかし、このような歩行分析実験を実施するには、照度を制御できる暗室設備や広い安全空間が必要であり、臨床現場の活用は困難である。特に、転倒のリスクが高い高齢者や障害を有する方の歩行分析を行う場合、安全確保のための補助が不可欠であるが、低照度環境下では周囲からの視認性が低下するため適切な補助が難しいという課題もある。そのため、実世界に安全性を確保しつつ低照度歩行を練習・分析できる環境を構築することは手軽ではなく、安全かつ手軽に運用可能な低照度環境下の歩行分析手法が求められている。

我々の研究グループでは、MR 技術を用いて低照度環境を仮想的に構築し歩行分析を可能にする枠組みを提案した [11]。この研究では、ユーザスタディにおいて、照度条件の調整が不十分、実障害物と仮想障害物の比較がないといった課題があった。そのため本研究では、提案手法の実装内容の詳細を紹介するとともに、より詳細な評価実験を実施した結果を報告する。

3. 提案手法

3.1 システムの概要

本研究では、安全かつ手軽に低照度環境において歩行練習・歩行分析を行える枠組みの実現を目的とし、MR 技術を用いた低照度環境の再現と MR 空間における 5m 歩行テストを提案する。提案手法は、カメラパススルー型 HMD Meta Quest 3 と、自己トラッキング機能付き Meta Quest Pro コントローラによって構成される（図 1a）。歩行中の

足動作を計測するため、コントローラを靴に取り付けて使用する。また、Meta Quest 3 のハンドトラッキング機能を用いて手の位置を取得する。これにより、外部機器を追加することなく頭・手・足を同時に追跡可能となる（図 1d）。

3.2 MR を用いた仮想低照度環境の再現

提案手法では、パススルー映像に Thompson ら [12] の夜間フィルタの一部を適用することで、低照度環境を仮想的に再現する（図 1b,c）。使用するフィルタは下式のとおりである、

$$\mathbf{c} = kV\mathbf{c}_{blue}. \quad (1)$$

ただし、 \mathbf{c} は HMD より出力する色、 k はゲイン係数（詳細は後述）、 V は HMD より入力された色から計算された暗所視輝度 [13]、 \mathbf{c}_{blue} は青色シフトベクトルである。 V については、HMD より入力されたパススルー映像の色を Larson ら [13] の式を用いて、桿体感度を考慮した暗所視輝度に変換する。また、 \mathbf{c}_{blue} については、Thompson ら [12] に従い、白色点より約 (0.03, 0.03) 下の色度を用いて計算する。なお、このフィルタ処理は、RGB カラー全通り ($256 \times 256 \times 256$) の各値に対する変換結果を事前計算して Look Up Table に格納し、Meta Quest 3 のカラーパススルー映像に適用することで実装する。このフィルタ処理により、物理的に室内を暗くすることなく、ユーザのみに仮想的な低照度環境を提示することができる。

3.3 仮想低照度フィルタのゲイン係数の決定

前述のフィルタ処理に含まれるゲイン係数 k を決定するために実験を実施した。計測は窓のない室内で行い、以下の 4 条件において、床面の照度および床に配置した紙の輝度を測定した（図 2a）。

- **実明条件**：部屋の半分の蛍光灯を点灯した状態で紙の輝度を計測
- **実低照度条件**：床面照度が約 0.1 lx になるように常夜灯のみ点灯した状態で紙の輝度を計測（図 2b）
- **仮想明条件**：実明環境と同じ照明下において、HMD のパススルー映像に表示された紙の輝度を計測（図 2c）
- **仮想低照度条件**：実明環境と同じ照明下において、 $k = 0.01, 0.005, 0.001$ を利用して低照度環境を再現したパススルー映像に表示された紙の輝度を計測

実低照度条件では、予備実験において、我々が物体を認識しづらいと感じた照度が約 0.1 lx だったため、本研究では床面照度を約 0.1 lx に設定した。なお、仮想明条件および仮想低照度条件では、HMD の個体差および計測時のノイズに対処するため、3 台の異なる HMD で計測を 3 回繰り返し、その平均値を記録した。また、各条件において白色（マンセル N9.5）と灰色（マンセル N5）の 2 種類の用紙の輝度を測定した。

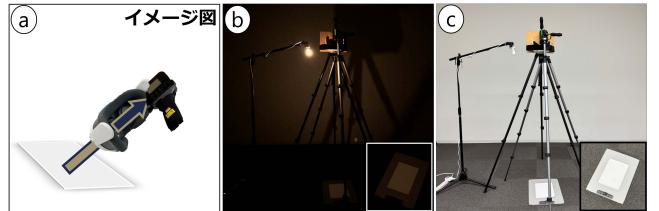


図 2 仮想低照度フィルタのゲイン係数を決定するための実験環境。
(a) 実験のイメージ図。(b) 実低照度条件。(c) 仮想明条件。

表 1 4 条件下で測定した輝度 [cd/m^2] の結果。「差」は白色と灰色の差を示す。

	実明	実低照度	仮想明	仮想低照度（提案）		
				$k=0.01$	0.005	0.001
白色	132.767	0.027	47.872	1.240	0.626	0.250
灰色	24.930	0.005	16.166	0.381	0.270	0.237
差	107.836	0.022	31.707	0.859	0.357	0.013

前述の 4 条件における床面照度は、実明条件・仮想明条件・仮想低照度条件において約 520 lx、実低照度条件では約 0.1 lx であった。各条件における紙の輝度値の計測結果を表 1 に示す。実明条件と仮想明条件を比較すると、同じ明るい照明下でもパススルー映像は輝度が低下することが確認された。これは HMD の最大輝度の制限によって、紙の輝度が実明条件よりも低い輝度でパススルー映像に表示されてしまったことだと考えられる。また、実低照度条件と仮想低照度条件を比較すると、最も小さなゲイン係数 $k = 0.001$ を利用した場合でも、仮想低照度条件は実低照度条件より輝度が高くなることが確認された。これらは HMD のブラックレベルの制限によって、パススルー映像を完全な暗さまで落とし切れずにある程度の暗さまでしか再現できなかったことだと考えられる。

上記の通り、今回利用した HMD では、最大輝度およびブラックレベルの制限により、現実環境とパススルー映像内の紙の輝度を完全に一致させることは難しいことが確認された。一方、白色と灰色の紙のコントラスト（輝度値の差）に着目すると、実低照度条件で約 0.022、仮想低照度条件 ($k = 0.001$) で約 0.013 と似た値が確認された。人間の物体の識別においては、対象の輝度値そのものよりもそのコントラストが重要だと考えられる。特に低照度環境では、物体と背景のコントラストが低下することで識別が困難になるため、コントラストはより重要である。そこで本研究では、実低照度条件のコントラストを再現する $k = 0.001$ をゲイン係数として選択した。これはつまり床面照度が約 520 lx の部屋にてゲイン係数 $k = 0.001$ として提案手法を利用すると、床面照度が約 0.1 lx の部屋と似た環境が再現されることを意味する。

3.4 仮想低照度環境における 5m 歩行テスト

本研究では、リハビリテーション現場にて歩行能力を確認するために一般的に用いられる 5m 歩行テストを拡張し、

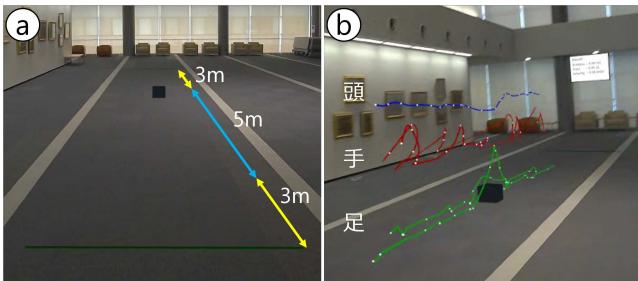


図 3 (a) MR 空間で実施可能な 5m 歩行テスト. (b) 歩行後に歩行距離・歩行時間・歩行速度および頭・手・足の軌跡が可視化される.

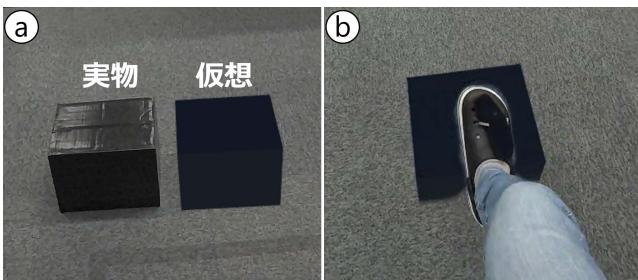


図 4 (a) 実物の障害物と仮想的な障害物. (b) ユーザの身体映像と仮想物体との奥行き関係を正確に考慮してレンダリングしている様子.

MR 空間に実施可能な 5m 歩行テストを提案する. ユーザは、Meta Quest 3 および Meta Quest Pro コントローラを装着した靴を履いて MR 空間に入り、MR 空間に提示されたスタートラインとゴールラインの間を歩行する. なお、歩行区間は、加速区間 3 m、歩行区間 5 m、減速区間 3 m により構成される(図 3a). 歩行後、歩行距離・歩行時間・歩行速度、および、歩行時の頭・手・足の軌跡が MR 空間に可視化される(図 3b). これらの歩行を記録・可視化することで、ユーザの歩行動態が一目で理解しやすくなると期待される.

障害物を跨いで避けながら歩行する様子を評価するため、提案手法は仮想的な障害物を提示する機能を提供する。障害物提示を有効にすると、スタートラインとゴールラインの中央に高さ 22.86 cm の箱が表示される(図 4a). なお、仮想的な障害物のサイズは、文献 [14] を参考に決定した。また、提案手法では、Meta Quest 3 の Depth API を活用し、外部カメラから取得されるユーザの身体映像と仮想物体との奥行き関係を正確に考慮してレンダリングを実施する。つまり、ユーザの足が仮想物体の手前にある場合、ユーザの足が仮想物体手前に正しくレンダリングされる(図 4b). これにより、ユーザは実物の障害物を跨ぐ際と同様の視覚的フィードバックを得ながら歩行できる。

4. ユーザスタディ

4.1 実験条件と手順

提案手法の有用性を確認するため、ユーザスタディを実



図 5 各条件においてユーザに提示される映像. (a) 実明条件. (b) 実明条件-VO. (c) 実低照度条件. (d) 仮想低照度条件 (実際に利用した $k = 0.001$ では図が暗くなりすぎるため、本図では $k = 0.08$ の映像を示す).

施した。実験参加者は、3種の照明条件、および、3種の障害物条件、合計 $3 \times 3 = 9$ 種の条件にて、MR 空間ににおける 5m 歩行テストを 2 回ずつ実施する。このとき歩行時の歩行速度、および、頭・手・足の軌跡を記録する。照明条件は下記のとおりである。

- **実明条件**: 明るい部屋（床面照度 約 520 lx）にて、HMD を装着しパススルー映像を見ながら歩行（図 5a）
 - **実低照度条件**: 暗い部屋（床面照度 約 0.1 lx）にて、HMD を装着しパススルー映像を見ながら歩行（図 5c）
 - **仮想低照度条件**: 明るい部屋（床面照度 約 520 lx）にて、提案手法による仮想低照度環境内で歩行（図 5d）
- なお、頭・手・足の軌跡を記録するため、かつ、装着物に関する条件を統一するため、全条件において HMD を使用する。また、障害物に関する条件は下記のとおりである（図 4a）。
- **-no** : 障害物を配置しない
 - **-VO** : 仮想的な障害物を経路の途中に配置
 - **-RO** : 実物の障害物を経路の途中に配置

例えば、『実明条件-VO』は、実明条件において仮想的な障害物を配置した状態を示す（図 5b）。なお、順序による影響を抑制するためこの 9 条件の実施順序は参加者ごとに異なるものとし、各条件の間に HMD を外さずに約 1 分の休憩を設けた。低照度条件においては、暗順応のためスタートラインで約 1 分の待機時間を設けた。

4.2 結果と考察

工学系の学生 7 名の協力のもとユーザスタディを実施した。実験中に計測されたデータから、歩行速度・歩幅・歩隔・足の高さ（障害物を跨ぐ際の先行足および後続足の

高さ)を算出した。各条件につき2回の歩行を実施したため、分析にはその平均値を用いた。なお、低照度環境下ではMeta Quest Proコントローラのトラッキング機能が働かないため、実低照度条件では、歩幅・歩隔および足の高さは測定しない。また、2名の参加者において、一部条件にエラーが生じたため、この2名のデータを除いた計5名のデータを用いて分析を行う。歩幅および歩隔は、提案手法により取得した足のトラッキングデータをもとに算出した。具体的には、各歩行周期における着地点を手作業で特定し、着地点の2つのコントローラ座標の進行方向の差を歩幅、左右方向の差を歩隔とした。また、障害物を跨ぐ際の足の高さについては、跨ぐ際のコントローラの軌跡のうち座標の高さの最大値を手作業で抽出した。

4.2.1 歩行速度

障害物を配置しない条件(-no)における歩行速度の測定結果を図6に示す。照明条件(実明条件-no・実低照度条件-no・仮想低照度条件-no)を要因とした一要因の反復測定分散分析を実施した結果、照明の主効果が有意であった($p < 0.001$)。事後検定の結果、『仮想低照度条件-no』および『実低照度条件-no』の歩行速度は、『実明条件-no』と比較して有意に低下した($p = 0.015, p < 0.001$)。これは、照度の低下により視覚情報が制限され、実験参加者が慎重な歩行行動を取ったためと考えられ、先行研究の報告[6], [15]と一致する。したがって、提案手法によって再現された仮想低照度環境が実低照度環境と同様の歩行行動の変化傾向を誘発する可能性が示唆された。

障害物条件(-VO・-RO)における歩行速度の測定結果を図7に示す。照明条件(実明条件・実低照度条件・仮想低照度条件)と障害物条件(-VO・-RO)を要因とした二要因の反復測定分散分析を実施した。分析の結果、照明の主効果($p < 0.001$)、障害物の主効果($p < 0.001$)、および、両者の交互作用($p = 0.003$)がいずれも有意であった。各障害物条件における照明条件の単純主効果の結果を表2に示す。事後検定を行った結果、『仮想低照度条件-VO』の歩行速度が『実明条件-VO』より有意に低下した($p = 0.011$)。また、『仮想低照度条件-RO』および『実低照度条件-RO』の歩行速度が『実明条件-RO』より有意に低下した($p < 0.001, p = 0.010$)。これらの結果は、仮想低照度環境が、障害物条件(-VO・-RO)に関わらず、実低照度環境と同程度に歩行行動を変化させていることを示唆しており、障害物を配置しない条件(-no)と同様の傾向であった。各照明条件における障害物条件の単純主効果の結果を表3に示す。事後検定を行った結果、『仮想低照度条件-VO』と『仮想低照度条件-RO』、『実低照度条件-VO』と『実低照度条件-RO』の間に有意差が認められた($p = 0.007, p = 0.001$)。これは、仮想的な障害物(-VO)がCGとして比較的高いコントラストで提示され視認しやすかったのに対し、実物の障害物(-RO)はパススルー映像のダイナミックレンジ制限

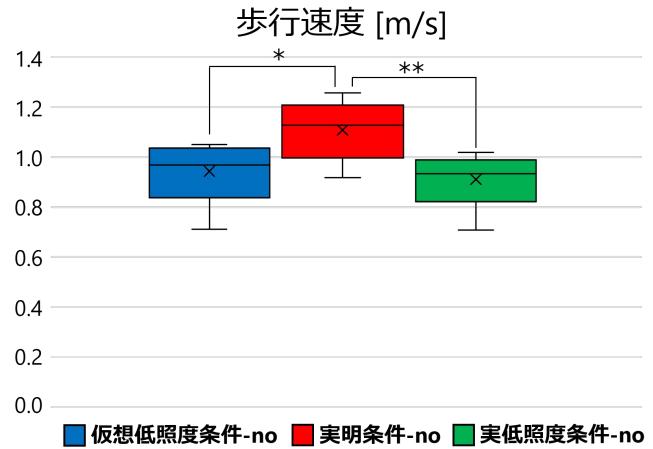


図6 障害物を配置しない条件(-no)における歩行速度の結果。*は $p < 0.05$, **は $p < 0.01$ を示す。

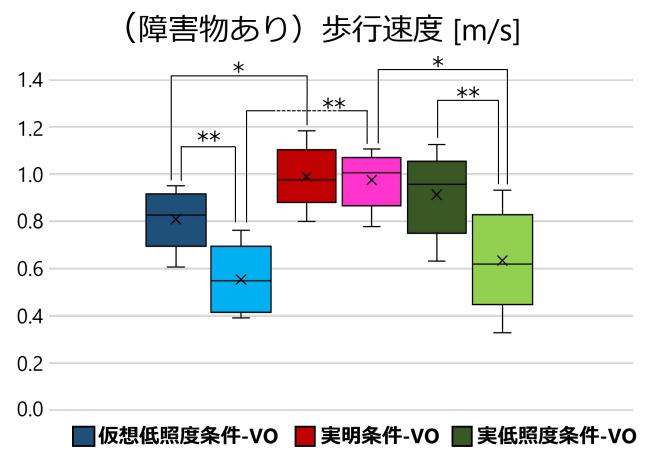


図7 障害物条件(-VO・-RO)における歩行速度の結果。*は $p < 0.05$, **は $p < 0.01$ を示す。

や低照度フィルタの影響により視認性が低下していたため、参加者がより慎重な歩行行動を取った可能性が高い。以上より、照度の変化による歩行行動の変化傾向は良好に再現されていると考えられる。一方で、仮想障害物と実障害物の視認性を統一した条件下の詳細な評価は今後の課題である。

我々の先行研究[11]では、『仮想低照度条件(-no/VO)』と『実明条件(-no/VO)』の間、および、『実低照度条件-no』と『実明条件-no』の間で歩行速度に有意差は認められなかった。一方で本研究では、これらの条件間で歩行速度に有意差が認められた。これは、先行研究において、実低照度条件の照度が仮想低照度条件より高く設定され、中間的な暗さの条件が生じたため、低照度による歩行への影響が相対的に弱められたことが原因であると考えられる。しかし、本研究では、実低照度条件と仮想低照度条件の照度を整合させたことで、仮想低照度条件・実低照度条件と実明条件のコントラストが上がり、結果として、歩行速度の差が表れやすくなつたと考えられる。

表 2 各障害物条件における、歩行速度に関する照明条件の単純主効果.

障害物水準	df	平均平方	F	p
仮想的な障害物	2	0.041	14.655	0.002
実物の障害物	2	0.252	47.990	< .001

表 3 各照明条件における、歩行速度に関する障害物条件の単純主効果.

照度水準	df	平均平方	F	p
仮想低照度条件	1	0.164	25.052	0.007
実照度条件	1	4.622×10^{-4}	0.388	0.567
実低照度条件	1	0.195	72.078	0.001

4.2.2 歩幅と歩隔

障害物を配置しない条件 (-no) における歩幅と歩隔の測定結果を図 8 に示す. 『仮想低照度条件-no』と『実明条件-no』間で対応のある t 検定を実施した結果、歩幅において条件間で有意差が認められた ($p = 0.009$). これは、視覚情報が低下した状況下で参加者が前方方向の歩行進行量を抑え、より保守的な歩行戦略が取られた可能性を示唆する. 歩行速度に関する前述の結果も踏まえて、仮想低照度環境は、実低照度環境で観察される歩行の保守化（速度低下、歩幅短縮）を概ね再現していると考えられる.

障害物条件 (-VO・-RO) における歩幅と歩隔の測定結果を図 9 に示す. 照明条件（実明条件・実低照度条件・仮想低照度条件）と障害物条件（-VO・-RO）を要因とした二要因の反復測定分散分析を実施した結果、歩幅において照明条件 ($p < 0.001$) および障害物条件 ($p = 0.005$) で有意であった一方、両者の交互作用 ($p = 0.290$) では有意ではなかった. 事後検定の結果、照明条件の主効果については、仮想低照度条件の歩幅が、実明条件と比較して有意に短かった ($p < 0.001$). この傾向は障害物を配置しない条件 (-no) と一致しており、仮想低照度環境が実低照度環境と同様に慎重な歩行行動を誘発することが示唆された. また、障害物条件の主効果では、実物の障害物 (-RO) における歩幅が仮想的な障害物 (-VO) よりも有意に短かった ($p = 0.005$). この結果は歩行速度の分析と同様に、参加者が視認性の問題により慎重な歩行行動を取ったと考えられる.

4.2.3 先行足と後続足の高さ

障害物条件 (-VO・-RO) における障害物を跨ぐ際の先行足と後続足の高さの測定結果を図 10 に示す. 照明条件（実明条件・実低照度条件・仮想低照度条件）と障害物条件（-VO・-RO）を要因とした二要因の反復測定分散分析を実施した. 分析の結果、先行足と後続足のいずれにおいても、照明条件 ($p = 0.374, p = 0.756$), 障害物条件 ($p = 0.199, p = 0.775$), および両者の交互作用 ($p = 0.301, p = 0.367$) に有意差は認められなかった. これらの結果から、参加者は照明の違いや障害物の実体性に

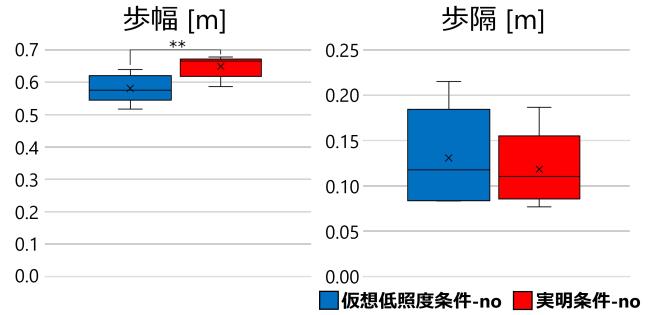


図 8 障害物を配置しない条件 (-no) における歩幅と歩隔の結果.
** は $p < 0.01$ を示す.

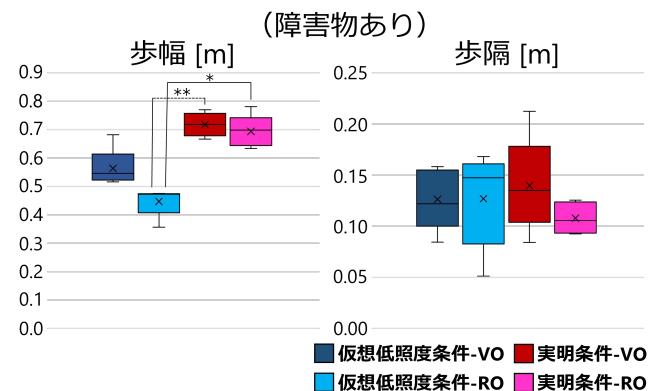


図 9 障害物条件 (-VO・-RO) における歩幅と歩隔の結果. * は $p < 0.05$, ** は $p < 0.01$ を示す.

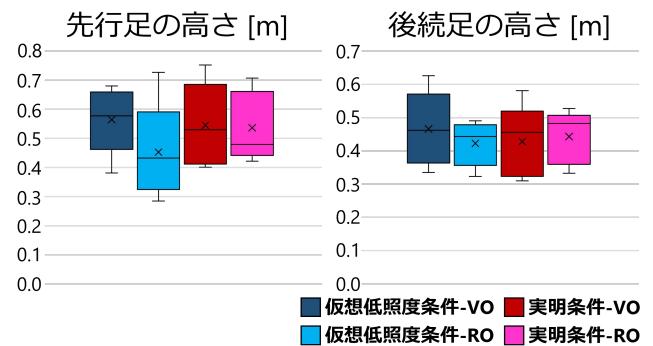


図 10 障害物条件 (-VO・-RO) における障害物を跨ぐ際の先行足の高さ（左）と後続足の高さ（右）の結果.

関わらず、ほぼ一定の高さで障害物を越えていた可能性があると考えられる.

5. まとめと展望

本研究では、安全かつ手軽に低照度環境において歩行練習・歩行分析を行える枠組みの実現を目的とし、MR 技術を用いた仮想低照度環境における歩行分析手法を提案した. 提案手法は、MR 空間に仮想低照度環境や仮想障害物を再現できるため、実環境における転倒リスクを伴うことなく、安全かつ手軽に歩行分析を実施できる. 提案手法の有用性を確認するため、異なる照明条件、および、異なる障害物条件にて 5m 歩行テストを行う実験を実施した. そ

の結果、提案手法は低照度に伴う歩行の保守化傾向を実環境と同様に再現できることが確認された。

本研究の課題の一つとして、仮想的な障害物と実物の障害物の視認性に差があることがあげられる。今後は、実物体の反射特性や陰影などの視覚的手掛けりをMR空間で再現することで、仮想物体の見え方を実物体に近づけたい。また、提案手法が再現する仮想低照度環境について、ユーザが知覚する暗さ・物体の視認性・心理的負荷といった主観的な評価を実施し、仮想低照度環境の妥当性をより詳細に検証したい。さらに、高齢者や障害を有する方、リハビリテーション患者を対象とした大規模なユーザスタディを行い、提案手法の臨床における実現可能性をより評価したい。

謝辞 本研究は、JSPS 科学研究費 (25K15197) の支援のもと実施されたものである。また、実験参加者の皆様に感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Baker, R.: Gait analysis methods in rehabilitation, *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, Vol. 3, No. 1, p. 4 (2006).
- [2] Corbetta, D., Imeri, F. and Gatti, R.: Rehabilitation that incorporates virtual reality is more effective than standard rehabilitation for improving walking speed, balance and mobility after stroke: a systematic review, *Journal of Physiotherapy*, Vol. 61, No. 3, pp. 117–124 (2015).
- [3] Kern, F., Winter, C., Gall, D., Kähnner, I., Pauli, P. and Latoschik, M. E.: Immersive Virtual Reality and Gamification Within Procedurally Generated Environments to Increase Motivation During Gait Rehabilitation, *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 500–509 (2019).
- [4] Wang, Z., Arie, L., Lubetzky, A. V. and Perlin, K.: VR-GaitAnalytics: Visualizing Dual Task Cost for VR Gait Assessment, *Proceedings of the 27th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, New York, NY, USA (2021).
- [5] Rhiel, S., Kläy, A., Keller, U., van Hedel, H. J. A. and Ammann-Reiffer, C.: Comparing Walking-Related Everyday Life Tasks of Children with Gait Disorders in a Virtual Reality Setup With a Physical Setup: Cross-Sectional Noninferiority Study, *JMIR Serious Games*, Vol. 12, p. e49550 (2024).
- [6] Choi, J.-S., Kang, D.-W., Shin, Y.-H. and Tack, G.-R.: Differences in gait pattern between the elderly and the young during level walking under low illumination, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, Vol. 16, No. 1, p. 3–9 (2014).
- [7] Huang, C.-K., Chien, J.-H. and Siu, K.-C.: The reduced lighting environment impacts gait characteristics during walking, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 61, pp. 126–130 (2017).
- [8] Naaman, T., Hayek, R., Gutman, I. and Springer, S.: Young, but not in the dark—The influence of reduced lighting on gait stability in middle-aged adults, *PLOS ONE*, Vol. 18, No. 5, pp. 1–12 (2023).
- [9] Figueiro, M. G., Plitnick, B., Rea, M. S., Gras, L. Z. and Rea, M. S.: Lighting and perceptual cues: effects on gait measures of older adults at high and low risk for falls, *BMC geriatrics*, Vol. 11, No. 1, p. 49 (2011).
- [10] Kesler, A., Leibovich, G., Herman, T., Gruendlinger, L., Giladi, N. and Hausdorff, J. M.: Shedding light on walking in the dark: the effects of reduced lighting on the gait of older adults with a higher-level gait disorder and controls, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, Vol. 2, No. 1, p. 27 (2005).
- [11] Inamasu, R., Fukuyo, K., Murata, H., Shibamoto, I. and Ijiri, T.: Gait Analysis under MR-simulated Low-Light Environment, *Proceedings of 31st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, New York, NY, USA (2025).
- [12] Thompson, W. B., Shirley, P. and Ferwerda, J. A.: A Spatial Post-Processing Algorithm for Images of Night Scenes, *Journal of Graphics Tools*, Vol. 7, No. 1, pp. 1–12 (2002).
- [13] Larson, G., Rushmeier, H. and Piatko, C.: A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 3, No. 4, pp. 291–306 (1997).
- [14] Wrisley, D. M., Marchetti, G. F., Kuharsky, D. K. and Whitney, S. L.: Reliability, Internal Consistency, and Validity of Data Obtained With the Functional Gait Assessment, *Physical Therapy*, Vol. 84, No. 10, pp. 906–918 (2004).
- [15] Choi, J.-S., Kang, D.-W., Seo, J.-W., Kim, D.-H., Yang, S.-T. and Tack, G.-R.: Effects of low light on the stability of the head and pelvis of the healthy elderly, *Journal of Physical Therapy Science*, Vol. 27, No. 11, pp. 3365–3368 (2015).