

Mixed Realityを活用した 電動車いすの操作練習ツールの開発

沖僚太^{1,a)} 井尻敬¹

概要：歩行が困難な場合の移動手段のひとつとして、電動車いすの普及が進んでいる。電動車いすの利用者は、安全な操作が求められる一方で、現実世界に起こり得る多様なシナリオを想定した操作練習の機会はない。Virtual Reality (VR) を活用した練習手法が提案されているが、視覚全体を仮想映像で覆う VR には、練習環境の安全性に課題が残る。本研究では、多様な練習シナリオと安全性を両立した電動車いす練習環境の実現を目的とし、Mixed Reality (MR) 技術を利用した練習手法を提案する。ユーザは MR 機能を持つ Head Mounted Display (HMD) を装着して電動車いすに座り、MR 空間に提示された通路・障害物を利用して練習タスクを実施する。特に本研究では、前進・ジグザグ移動・障害物回避といった基本的な移動タスクや、狭路通過・エレベータ乗降といった応用的なシナリオを提供する。加えて、理想的な移動経路をアバターを用いて提示する機能や、実際の移動軌跡を MR 空間中に提示する振り返り機能も提供する。提案手法の有用性を確認するためユーザスタディを実施した結果、複雑な操作を要するタスクにおいて、提案手法による練習後に、タスクにかかる時間が減少する傾向が確認された。

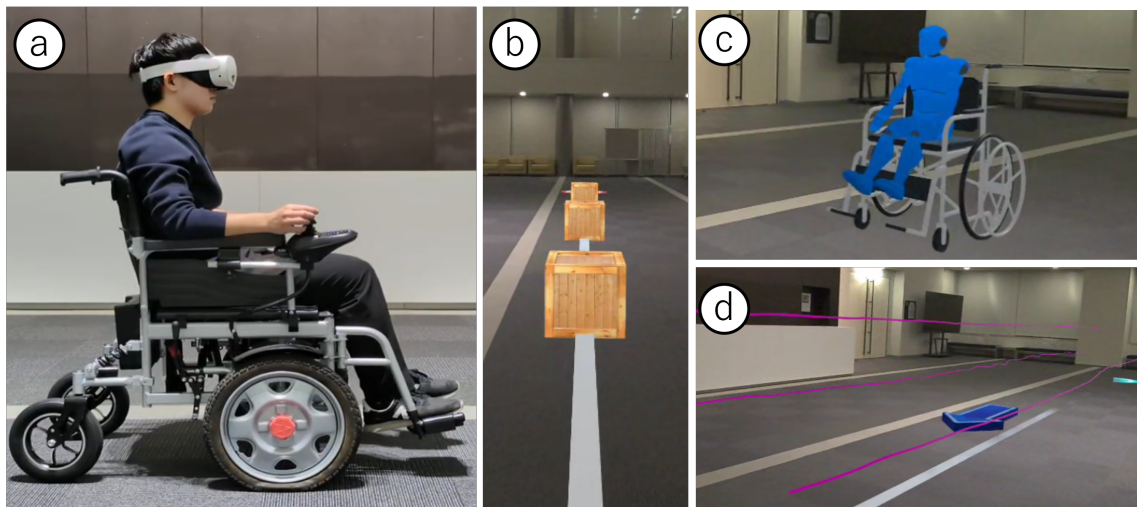


図 1: (a) 提案手法使用時のユーザ. (b)MR 空間上に表示される練習タスク. (c) 手本となるアバター. (d) 移動軌跡の可視化.

1. はじめに

歩行が困難な場合の移動手段のひとつとして、電動車いすの普及が進んでいる。この電動車いすを安全に操作するには、自身や周囲の安全を確保できる操作技術の習得が求められる。しかし、現実世界において起こり得る多様なシナリオを想定した操作練習を行うためには、それらに合わ

せたコースや周辺環境を準備する必要がある、実践的な操作練習を行う機会は限られるという課題がある。

電動車いすの一般的な操作練習タスクの基準として、Wheelchair Skills Training Program (WSTP) [1] が知られる。この WSTP は、前進や後進といった基本的な移動や、ドアの開閉、段差の乗り上げなど、実生活における行動をもとにした練習タスクより構成される。しかし、WSTP のための練習環境を用意するのは、空間的・金銭的なコストがかかる。一方、現実空間における練習環境準備の困難さ

¹ 芝浦工業大学

^{a)} al21056@shibaura-it.ac.jp

を背景に、Virtual Reality (VR) 技術を活用した練習手法が研究されている [2,3]。VR は、仮想空間・仮想オブジェクトを提示することで、多様な練習シナリオを低コストに再現できるという利点を持つ。しかし、視界全体を仮想映像で覆う VR では、自身の手元や周囲の障害物を認識できなくなるため、練習環境そのものの安全性に課題が残る。

本研究では、多様なシナリオと安全性を両立した電動車いす練習環境の実現を目的とし、Mixed Reality (MR) 技術を利用した練習手法を提案する。提案手法において、ユーザはカメラパススルー型の MR 提示機能を有する Head Mounted Display (HMD) を装着した状態で電動車いすに座り (図 1a)、現実空間に重畳表示される仮想の通路や障害物などを用いて多様な練習タスクを実施する (図 1b)。加えて、本研究では、手本となる移動軌道をアバターを用いて提示する機能や自身の移動軌跡を提示する振り返り機能も提供する (図 1c, d)。提案手法は、実空間に仮想物体を提示することで低コストに多様な練習タスクを提供でき、また、ユーザは実空間を観察しながら安全に練習を実施できる。

提案手法の有用性を確認するため、提案手法を利用して 7 種類のタスクを練習してもらうユーザスタディを実施した。実験の結果、提案手法を用いた練習により、狭路通過やエレベータへの進入といった複雑な操作を必要とするタスクにおいて、完了時間が短縮できる傾向が観察された。また実験参加者の主観的な評価により、MR 空間上の障害物やオブジェクトに対して高い実在感が得られるとともに、大きな不快感を生じさせることなく安全に練習が可能であることが示された。

2. 関連研究

2.1 車いすの練習プログラム

車いすの標準的な練習プログラムとして、WSTP [1] が知られる。WSTP は、手動・電動の車いすやスクーターなどのモビリティのユーザを対象とした練習プログラムであり、自力での運転が可能かを評価する一連のタスクで構成されている。具体的には、ドアの開閉や段差の乗り上げのようなプログラムが存在する。この WSTP について、Kirby ら [4] は、電動車いすユーザを対象としたランダム化比較試験を行い、WSTP はユーザが個別に設定した目標の達成や、実生活における操作スキルの向上に有効であることを示した。一方で、熟練したユーザに対しては基礎的な操作スキルの向上に限界が見られることや、実生活における練習はトレーナや場所の確保など多くのリソースが必要であるという課題も報告している。

2.2 ビデオや VR 空間を利用した車いす練習

現実環境におけるリソース確保の困難さを背景に、ビデオや VR 技術を活用した手法が研究されている。Kelly

ら [5] は、トレーナ不在の環境でも効果的な練習環境の実現を目的として、モーションキャプチャにより取得した姿勢をフィードバックする車いすトレーニングシステムを提案した。しかし、この研究では高価なモーションキャプチャ設備が必要となるため、練習できる環境が限られる。Zorzi ら [2] は、WSTP における標準的な練習タスクに基づいて VR 空間を利用した練習手法を提案し、提案手法が電動車いすスキルの短期的な習得を促進することを報告した。Li ら [3] は、ユーザの技術レベルや目的の難易度に応じてトレーニングシナリオを自動生成するシステムを提案し、これを用いた練習によりユーザの操作スキルが向上することを示した。これらの手法では VR を活用することで多様な練習シナリオを低コストに提供可能であるが、視覚全体を完全に仮想映像で置き換える VR には、その安全性や車いす操作感に与える影響に課題が残る。

2.3 MR 空間を利用したトレーニング

MR 技術は、現実空間の視覚情報を遮断せずに仮想オブジェクトを表示できるという特徴から、リハビリテーションに活用されている。Kanamuro ら [6] は、HMD を用いて現実空間の床面に仮想的な足跡を表示する歩行誘導システムを提案した。この研究では、足元の視界を遮らない仮想の足跡を表示することで、歩行時の歩幅やつま先の角度をユーザが無意識的に変化・改善させることが報告された。Chitti ら [7] は、特定の疾患に対するリハビリテーション支援を目的として、パーキンソン病患者のすくみ足を対象とした MR アプリケーションを提案した。この研究では、療法士がタブレット端末を用いて、リハビリ中に仮想障害物や視覚・聴覚キューをリアルタイムに制御できるため、患者個々の状態に即した動的な介入を実現した。トレーニングの継続性を高めるために MR によるゲーミフィケーションを取り入れた研究もおこなわれている。Paredes ら [8] は、下肢の機能回復リハビリテーションにおいて、単調な訓練による患者のモチベーション低下を防ぐため、MR 技術を用いたシリアスゲームを提案した。この研究では、ゲーム形式で楽しみながら訓練を行うことで、能動的なリハビリへの参加を促す効果が報告されている。

これらの研究は、MR 技術が現実環境の安全性を確保しつつ、視覚的な誘導やフィードバックを与えることで、身体的なスキルの習得や改善につながることを示している。本研究では、これらの研究で利用された MR 技術を電動車いすの操作練習に応用する。

3. 提案手法

本研究では、多様な練習シナリオと安全性を両立した電動車いす練習環境の実現を目的とし、MR 技術を利用した練習手法を提案する。提案手法において、ユーザはカメラパススルー型の MR 提示機能を有する HMD (Meta Quest

3S)を装着し、前輪駆動型の電動車いすで移動する(図1a)。電動車いすは手元のジョイスティックを倒すことで操作できる。ジョイスティックを前に倒すと前進し、左右に倒すとその場で旋回が可能である。ユーザは実空間に重畳表示される練習コースや障害物(図1b)を利用して、電動車いすの操作練習を行う。

3.1 車いすの操作練習タスク

我々は、WSTPの標準練習タスクセットを参考に、MR空間における電動車いす練習タスクを提案する。本研究の練習タスクセットは、基本的な操作習得を目的とした「基本移動タスク(図2)」と、日常生活で必要となるより実践的な環境を模した「応用タスク(狭路通過やエレベータ)(図3)」の2種類から構成される。以下に各タスクの詳細を述べる。

3.1.1 基本移動タスク

基本移動タスクは「直進移動」「ジグザグ移動」「前進スラローム」の3種類から構成される。

直進移動タスク(図2a)。電動車いすの安定した直進移動を練習するためのタスクである。MR空間に長さ10mの直線コースが表示され、ユーザはコースから外れないようにゴール地点まで走行する。このタスクでは、ジョイスティックを一定に保ち、ふらつきを抑えつつ、安定した直進操作を行うことが求められる。

ジグザグ移動タスク(図2b)。連続した旋回操作と直進移動を練習するためのタスクである。MR空間に2か所の90度旋回と直線移動からなるコースが提示され、ユーザはこれに沿ってゴール地点まで走行する。このタスクでは、直進移動と旋回操作を円滑に切り替える連続した操作を行うことが求められる。

前進スラロームタスク(図2c)。障害物を避ける移動方法を練習するためのタスクである。直線上に2m間隔で仮想障害物が配置され、ユーザはこの間を縫うように走行する。このタスクでは、ジョイスティックの繊細な操作により、スムーズな左右の切り返し動作を行うことが求められる。

3.1.2 応用タスク

応用タスクは、「狭路通過(直進)」「狭路通過(ジグザグ)」「エレベータ乗降(正面進入)」「エレベータ乗降(横進入)」の4種類から構成される。

狭路通過(直進)タスク(図3a)。壁に接触せずに限られた幅を通過する練習のためのタスクである。MR空間上に直進経路と幅1mの仮想の壁が提示され、ユーザは狭路(壁の間)を、壁に接触しないように慎重に通過する。ユーザが壁に接触した際、壁の色が赤色に変化し、壁に接触したことを視覚的に提示する。

狭路通過(ジグザグ)タスク(図3b)。狭路通過(直進)タスクと同様に、狭路通過を練習するタスクである。この

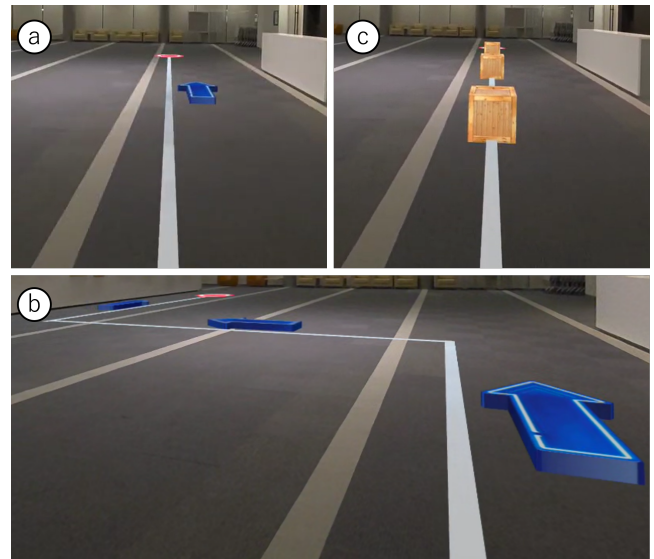


図2: 基本移動タスクの各タスクをMR空間内に表示したときの様子。(a) 直進移動タスク。(b) ジグザグ移動タスク。(c) 前進スラロームタスク。

タスクでは、MR空間上に2回の90度旋回と2回の狭路通過が必要な通路が提示され、ユーザはジグザグ走行と狭路通過を同時に実施する。先のタスクと同様に、壁接触時には壁が赤色に変化する。

エレベータ乗降(正面進入)タスク(図3c)。エレベータに正面方向から進入し降りるまでの操作を練習するタスクである。MR空間には直線経路の先に実際の規格に即した仮想のエレベータが提示され、ユーザは仮想エレベータに進入した後、内部で180度旋回し、前進移動で退出する。このタスクでは、狭路通過と狭い空間における旋回動作が求められる。

エレベータ乗降(横進入)タスク(図3d)。エレベータに横方向から乗降し、降りるまでの操作を練習するタスクである。MR空間には、1回の旋回が必要な経路と仮想エレベータが提示され、ユーザは経路に沿って移動し、仮想エレベータに進入した後、内部で180度旋回して前進移動で退出する。日常生活では、横方向からエレベータ(や部屋)に入る必要があることも多く、旋回を含めたエレベータ(や部屋)への進入を練習できる。

3.2 アバターによる理想軌跡の可視化

電動車いすを初めて利用するユーザにとって、適切な移動経路をイメージすることは困難である。そこで、理想的な移動経路を視覚的に理解しやすくするため、我々は、仮想アバターを用いて手本となる移動を表示する機能を提案する(図1c)。練習時、ユーザはこのアバターを追従することで、適切な移動経路を直感的に学習することができる。

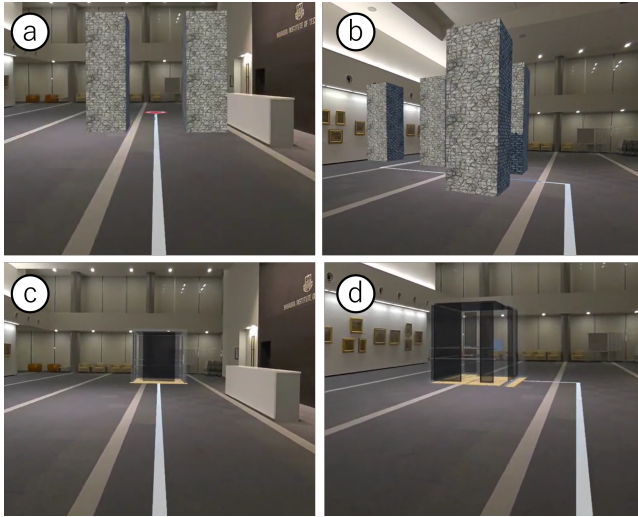


図 3: 応用タスクの各タスクを MR 空間内に表示したときの様子. (a) 狭路通過タスク (直進). (b) 狭路通過タスク (ジグザグ). (c) エレベータ乗降 (正面進入) タスク. (d) エレベータ乗降 (横進入) タスク.

3.3 振り返りのための移動軌跡の可視化

練習中に自身のイメージ通りの経路を移動できたかどうかはユーザにとって重要な情報である. そこで本研究では, ユーザが実際の移動経路を客観的に認識できるよう, 移動軌跡を MR 空間上に可視化する機能を提供する (図 1d). 具体的には, 左右両輪の位置と頭の軌跡をタスク練習後に MR 空間に表示する. この可視化機能により, ユーザは各タスク終了後に「どこでコースから外れたのか」や「どこでふらついたのか」など, 自身の操作の課題点を観察し, 次の練習に向けた具体的な改善点を発見できると期待される.

4. ユーザスタディ

4.1 実験手順

提案手法による練習が, 電動車いす操作能力の向上に与える影響を調査するため, ユーザスタディを実施する. 本実験では, 提案手法の利用前後における電動車いすの操作能力の変化を比較する.

なお, 電動車いすの操作能力は, 以下に示す 5 つの評価タスクにより評価する.

- Task1 直進移動 (図 4a): 5 m の直進経路を移動
- Task2 スラローム (図 4b): 1.5 m 間隔の障害物を避けながら前進
- Task3 狭路通過 (図 4c): コース中にある 1m 幅の狭路を通過
- Task4 閉空間進入退出 1 (図 4d): 1.5 m×1.5 m の空間に直進して進入し, 旋回して退出
- Task5 閉空間進入退出 2 (図 4e): 1.5 m×1.5 m の空間に横方向から左折して入り, 旋回して退出

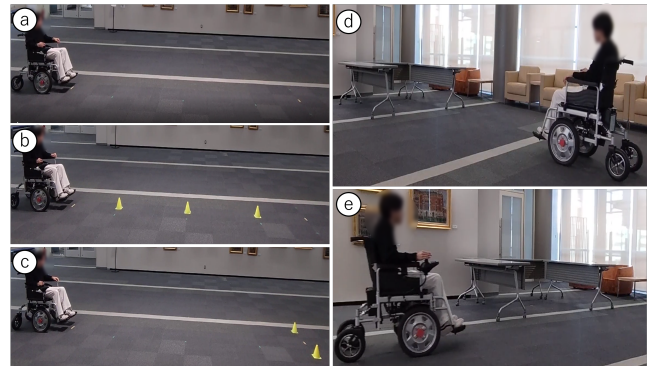


図 4: 評価タスクを実施している様子. (a) 直進移動. (b) スラローム. (c) 狭路通過. (d) 閉空間退出 1. (e) 閉空間退出 2.

これらタスクは, 広い室内空間に机・障害物等を配置して作成したコース (図 4) を利用して実施する. この評価タスクでは, 各タスクの完了時間を測定する. また, Task1 から Task5 の終了後, 酔いや疲労の主観評価指標である Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [9], および車いすの操作能力に関する主観評価指標である Wheelchair Skills Test Questionnaire (WSTQ) [10] に回答する.

ユーザスタディの流れは次のとおりである. (0. 準備) 実験参加者は, まず電動車いすの操作を 5 分間自由に練習する. (1. 事前評価) 続いて, 5 つの評価用タスクを実施し, SSQ と WSTQ に回答する. (2. 練習) その後, 参加者は提案手法についての説明を受け, 提案手法を利用して電動車いすの操作練習を行う. ここでは, 提案手法に実装した基本移動タスク・応用タスク, 計 7 タスクを, それぞれ 3 回ずつ練習する. (3. 事後評価) 続いて, 評価用タスクを実施し, SSQ と WSTQ に回答する. 最後に, 参加者は, 臨場感を評価するための主観評価指標である Igroup Presence Questionnaire (IPQ) [11] のアンケートに回答し, 提案手法に関する自由記述を行う.

4.2 結果と考察

工学系の学生 6 名の協力のもとユーザスタディを実施した. 練習前後に実施した評価タスクの完了時間の比較を図 5 に示す. 各タスクにおいて対応のある両側 t 検定を実施した結果, Task3 ($p = 0.0198$) と Task4 ($p = 0.0183$) において練習前後のタスク完了時間に有意差が確認された. 狭路通過や閉空間への進入といった複雑な操作を要するタスクにおいて, 提案手法による練習が有効であった可能性を示唆する. 一方, Task1・Task2・Task5 では有意差は認められなかった. Task1・Task2 は, 直進やスラロームといった単純な操作を行うタスクであるため, 練習前後における操作方法の改善の幅が小さかったと考えられる. また, Task5 は, 5 つの中で最も複雑な操作を要するもので, 参加者ごとにタスク完了までの時間のばらつきが大きい.

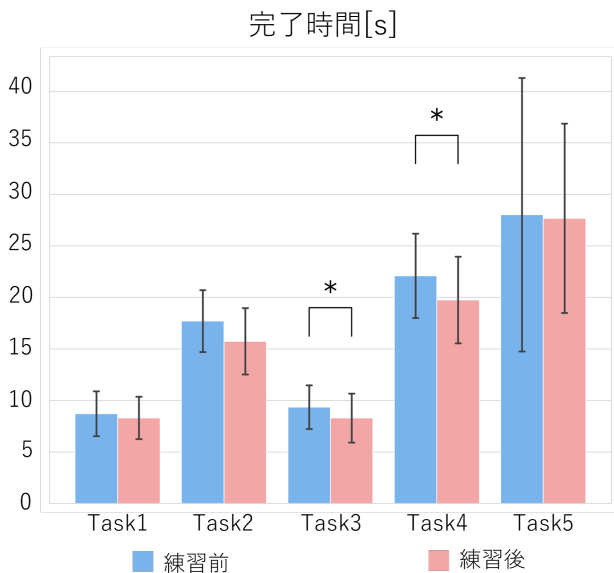


図 5: 提案手法を用いた練習前後における評価タスクの完了時間比較。*は $p < 0.05$ を示す。

く、3 回の練習タスク実施では、十分な能力向上が起らなかったと考えられる。

練習前後の評価タスク時の SSQ スコアを図 6a に示す。この図より、練習後に SSQ スコアの若干の上昇がみられた。これは、HMD を装着して電動車いすを操作することによる疲労や MR 映像の視聴によるわずかな酔いが生じた可能性を示唆するものである。ただし、SSQ のスコア基準においてこの数値は十分低い水準にとどまっており、長時間の練習を妨げるような酔いを引き起こすレベルではないと考えられる。

練習前後の評価タスク時の WSTQ への回答結果を、図 6b および図 6c に示す。なおこのアンケートでは、WSTQ から電動車いすの操作能力 (Capacity) と操作に対する自信度 (Confidence) に関する項目をピックアップし、Capacity は 0-3 点、Confidence は 0-4 点で回答してもらった。これらのスコアの比較においてもタスク完了時間と同様に、対応のある両側 t 検定を実施した。結果、Capacity については、各操作において有意差は確認されなかったが、障害物回避・狭路通過・狭空間旋回において、練習後に若干のスコア上昇がみられた。Confidence についても同様に、障害物回避・狭路通過・狭空間旋回の質問項目において、スコアの上昇が見られた。特に障害物回避においては、練習前後におけるスコアに有意差 ($p < 0.05$) が確認された。また、狭路通過タスクにおいても比較的大きなスコアの上昇が確認できる。これらの結果は、MR 空間での視覚的なフィードバックや繰り返しの練習が自信の向上に寄与したと考えられる。

次に、参加者が IPQ に 5 段階のリッカート尺度で回答した結果を図 7 に示す。このアンケートは、提案手法を用いた練習の臨場感・没入感を評価するものである。評価項

目である「空間プレゼンス」「没入感」「現実感」「全体的プレゼンス」のすべての項目において、平均スコアは 4.0 を上回る結果となった。このことから、参加者が MR 空間上に配置された仮想の障害物やコースを、現実空間の一部として違和感なく認識できていたことが示唆される。

提案手法に関する自由記述では、肯定的な意見と、課題や要望に関する意見の両方が得られた。肯定的な意見としては「現実ではわからなかったが、MR ではまっすぐ進んでいるかどうかのわかりやすかった」や「自分の移動した軌跡を振り返ることで、操作の良い練習になった」という意見があり、提案手法の軌跡表示機能が、自身の操作を客観視するために有効であった可能性が示唆された。また「実際に障害物があるように感じた」といったコメントもあり、これは、IPQ における高いスコアを裏付けるものである。一方で「MR に慣れていなかったので少し酔った」というコメントがあった。これは、HMD デバイスへ不慣れであることが練習中の不快感の要因になったと考えられる。また「もう少し難しいものに挑戦したいと感じた」というコメントもあり、より難しいタスク・練習シナリオの開発が重要な将来課題であると考えられる。

5. まとめと展望

本研究では、多様な練習シナリオと安全性を両立した電動車いす練習環境の実現を目的とし、MR 技術を活用した練習手法を提案した。提案手法は、MR 空間に仮想的なコースや障害物を表示するため、物理的なコース・障害物設置の手間をかけずに練習を実施できる。本研究では、基本的な操作法習得のための基本移動タスク 3 件と日常生活で必要となりうる応用タスク 4 件の練習タスクを実装した。また、手本となるアバターの提示機能や自身の移動軌跡を可視化する機能も併せて提案した。提案手法の有用性を確認するためユーザスタディを行った結果、提案手法による練習後、一部の複雑なタスクにおいてタスク完了時間が短縮される傾向が確認された。

本研究の課題のひとつは、より高度な操作技術を習得するための、難易度の高い練習シナリオの提供である。本研究では、狭路通過やエレベータ乗降といった応用タスクを提供したが、実生活における走行環境はさらに複雑である。例えば、段差乗り越え、動く障害物の回避、坂道走行など、今後は、より複雑な環境に対応するための練習シナリオの提供を行いたい。また、提案手法による練習効果が、長期的に維持されるかを明らかにするため継続的な調査も今後の重要な課題である。

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。

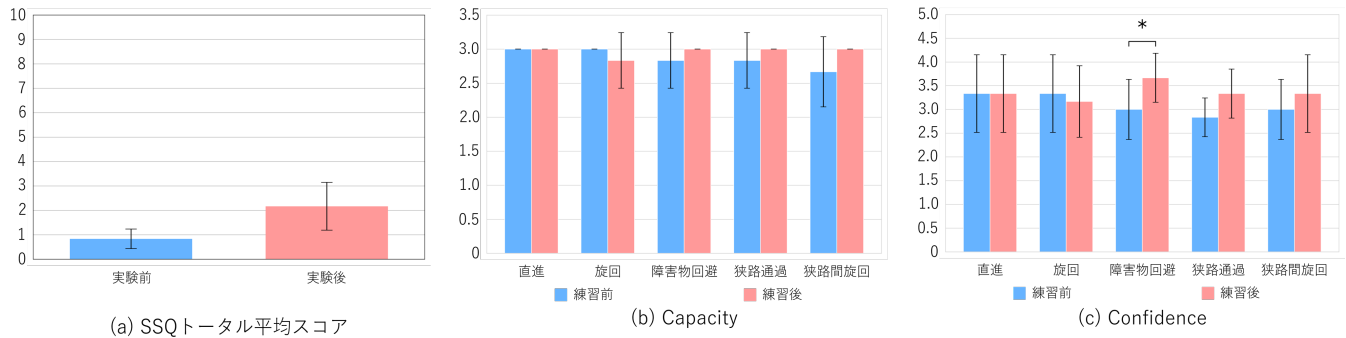


図 6: (a) 練習前後における SSQ トータルスコアの平均値. (b) 練習前後における操作能力 (Capacity) の平均スコア. (c) 練習前後における操作の自信度 (Confidence) の平均スコア. *は $p < 0.05$ を示す.

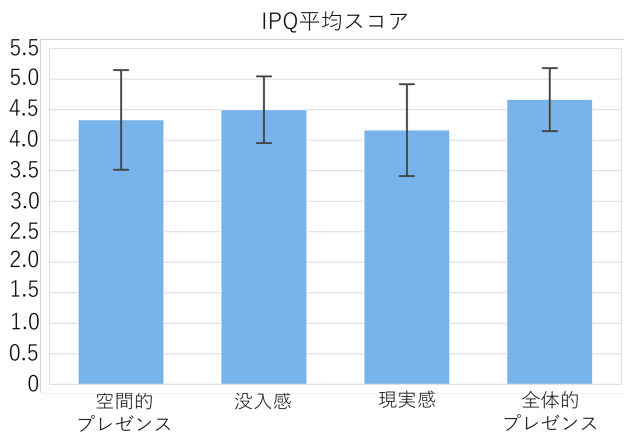


図 7: IPQ スコア.

参考文献

- [1] Wheelchair Skills Program: Wheelchair Skills Program, <https://wheelchairskillsprogram.ca/en/> (2022). Accessed: Nov. 11, 2025.
- [2] Zorzi, C., Tabbaa, L., Covacio, A., Sirlantzis, K. and Marcelli, G.: A Standardize and Cost-Effective VR Approach for Powered Wheelchair Training, *IEEE ACCESS*, Vol. 11, No. 4, pp. 66921–66933 (2023).
- [3] Li, W., Talavera, J., Samayoa, A. G., Lien, J.-M. and Yu, L.-F.: Automatic Synthesis of Virtual Wheelchair Training Scenarios, *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 539–547 (2020).
- [4] Kirby, R. L., Miller, W. C., Routhier, F., Demers, L., Mihailidis, A., Polgar, J. M., Rushton, P. W., Titus, L., Smith, C., McAllister, M., Theriault, C., Thompson, K. and Sawatzky, B.: Effectiveness of a Wheelchair Skills Training Program for Powered Wheelchair Users: A Randomized Controlled Trial, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, Vol. 96, No. 11, pp. 2017–2026 (2015).
- [5] Kelly, M. A., Yang, L., Thomas, A., Donnelly, P. and Cho, Y.: WheelSkills: Prototyping Manual Wheelchair Training through Immersive Visual Feedback, *Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '24)*, pp. 1–8 (2024).
- [6] Kanamuro, T. and Tanaka, H.: Gait Guidance using Mixed Reality for Gait Improvement, *Proceedings of the International Symposium on Affective Science and Engineering (ISASE 2023)*, pp. 1–4 (2023).
- [7] Chitti, E., Montereale, D. A., De Sandi, A., Mailland, E., Borrellini, L., Cogiamanian, F., Mellace, D., Marfoli, A., Campo, C., Manzoni, C., Ferrucci, R. and Borghese, N. A.: Co-Design of a Mixed Reality Application to Support Freezing of Gait Rehabilitation, *2025 IEEE Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)* (2025).
- [8] Paredes, T. V., Monge, J., Postolache, O. and Girão, P. S.: Gait Rehabilitation System based on Mixed Reality, *2021 Telecoms Conference (ConfTELE)* (2021).
- [9] Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S. and Lilienthal, M. G.: Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness, *The International Journal of Aviation Psychology*, Vol. 3, No. 3, pp. 203–220 (1993).
- [10] Wheelchair Skills Program: Wheelchair Skills Test(WST-Q)Form 5.4.3 Manual Chair August 2025, <https://wheelchairskillsprogram.ca/en/skills-manual-forms/> (2025). Accessed: Nov. 15, 2025.
- [11] Schubert, T., Friedmann, F. and Regenbrecht, H.: The experience of presence: Factor analytic insights, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 10, No. 3, pp. 266–281 (2001).