

仮想環境を活用した高次脳機能障害による 車いす利用者のための外出トレーニングに関する検討

Study on Outdoor Training for Wheelchair Users with Brain Injury Utilizing Virtual Environment

荒木 沙紀[†] 大井 翔[‡]
Saki Araki Sho Ooi

1. はじめに

高次脳機能障害は、交通事故や脳出血などの外的要因により脳が部分的に損傷を受けた結果として生じる障害である [1]。主な症状として、注意障害、記憶障害、遂行機能障害などが挙げられ、日常生活における自立した行動を困難にする。実生活においては、図 1 の神経心理ピラミッド [2] で示されるように、注意や記憶から遂行機能に至るまで、各階層の認知機能が複合的に求められる場面が多く、特にそれらが同時に発揮される状況では、実践的な訓練が重要である。

従来の認知リハビリテーションにはいくつかの課題が存在する。例えば、コンピュータを用いた訓練は実際の生活場面との乖離が大きく、応用が難しいと指摘されている [3]。また、日常生活行動を取り入れた訓練（例：買い物）は有効であるが、認知機能が低下した患者にとっては転倒リスク [4] や、それに伴う外出頻度の低下と運動不足 [5] といった問題も指摘されている。

近年、これらの課題を解決するアプローチとして、VR 技術を用いたリハビリテーション研究が注目されている。岡橋らの研究 [6] では、VR 空間で「買い物」を再現し、患者の認知能力を評価する試みがなされた。また、山田ら [7] や蓮ら [8] は、VR による「観光」体験システムを開発し、安全な環境での活動機会を提供している。これらの先行研究は、特定のタスクにおける VR の有用性を示してきた。

また、従来の高次脳機能検査は静的な状況を前提としており、日常生活における動的かつ予測困難な状況を十分に再現・評価することが困難である。これに対し、VR は安全性を確保しながら、信号、他者、車両などがリアルタイムに変化する交通場면을模擬することが可能であり、そのような環境下で求められる複合的な認知機能、特に注意の持続および配分能力の評価や訓練に資する手法として有用性が期待される。

本研究の目的は、VR 技術を活用して、高次脳機能障害者が日常生活に近い動的な交通環境下において必要とされる認知機能を安全に訓練できる手法の有効性を明らかにすることである。この目的を達成するために、視覚・聴覚・空間認識などの複数の感覚刺激を統合した環境を VR 上に構築し、外出行動に近い状況を模擬する訓練システムを開発する。また、訓練中に得られるフィードバックが学習効果に与える影響についても併せて検討を行う。図 2 にシステムの全体像を示す。

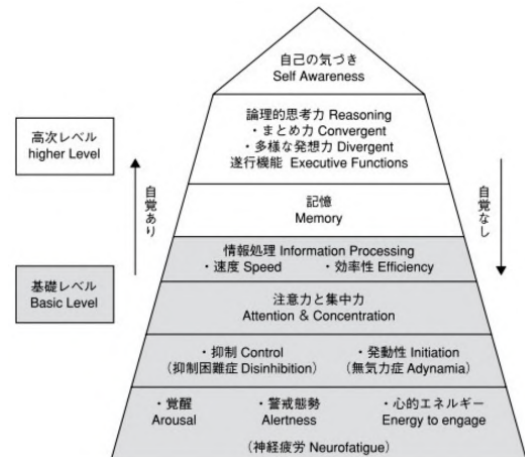


図 1: 神経心理ピラミッド [2]

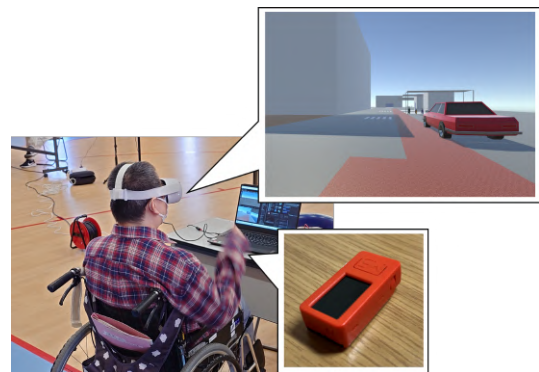


図 2: 本研究で開発した VR 歩行評価システムの概要

2. 関連研究

岡橋らの研究 [6] では、日常生活の中で重要な「買い物」行動を仮想環境で再現し、高次脳機能障害者の認知能力を評価することを目指している。従来の高次脳機能検査は静的なテストや質問紙を用いることが多く、日常生活の動的な場面を十分に反映できていないという問題があった。これに対し、VR 技術を用いることで、よりリアルな環境下での評価が可能となり、患者の実際の生活に即した能力を測定できるようになった。この研究では、買い物課題を通じて得られたデータを分析し、注意や記憶障害を持つ高次脳機能障害者の能力評価に適用できることが示唆されている。しかし、仮想環境内での行動が現実の行動と完全に一致するとは限らず、得られたデータの一般化には限界がある。また、VR システムの操作習熟や使用に伴うストレス、さらにシステム構築・維持にかかるコストと技術的な専門知識の必要性が課題

[†]大阪工業大学 情報科学部 情報メディア学科

[‡]大阪工業大学 情報科学部

として挙げられる。

VRを活用した観光システムに関する研究として、山田らの研究[7]では、座位足踏み運動による仮想空間内での移動システムが開発された。特に、高齢者や運動制限のある人々が安全かつ手軽に観光体験を楽しめることを目的としている。従来のVR観光システムでは動きが制限されることが多く、身体的な制約を持つ人々にとって利用が難しいという問題があった。本研究では、座位足踏み運動を取り入れることで、身体的負荷を軽減しながらもリアルな移動体験を提供することが可能となった。さらに、足踏み運動が健康維持やリハビリテーションにも効果的であることが示唆されており、特に高齢者の身体機能維持・向上に寄与することが期待されている。

VRにおけるコミュニケーション支援に関する研究として、仮想空間での観光体験を提供するシステム[8]や星空ビジョンの研究[9]がある。前者では、ユーザがアバターを介して仮想空間内で他者と交流しながら観光を楽しむことができる仕組みを構築し、同行者との観光を通じて社会的交流を促進することを目指している。従来の観光支援システムは一人での体験が中心であり、他者との交流を重視したものは少なかったが、本研究ではアバターを用いることでコミュニケーションを活性化し、より豊かな観光体験を実現している。また、星空ビジョンの研究[9]では、仮想空間で星空を介してユーザ同士のコミュニケーションを支援するツールが開発された。このツールでは、ユーザが仮想空間内で星空を観賞しながら、他のユーザと感想を共有し、意見交換を行うことができる。従来のコミュニケーションツールはテキストや音声によるやり取りが中心であったが、本研究では視覚的に魅力的な要素を取り入れることで、ユーザ同士の交流を促進し、より豊かなコミュニケーションを実現している。

3. 神経心理検査について

高次脳機能障害の評価には、さまざまな神経心理検査が用いられている。以下に代表的な検査を示す。

○ WAIS-III (Wechsler Adult Intelligence Scale-III)

知能を評価する検査であり、以下の指標を含む[10]：

VIQ (Verbal IQ) 言語性IQ (言語的な知能)

PIQ (Performance IQ) 動作性IQ (非言語的な知能)

FIQ (Full-scale IQ) 全検査IQ (総合的な知能指数)

また、以下の4つの認知領域も評価する【Wechsler, 2006】：

言語理解 言語を用いた情報処理能力

作動記憶 短期的に情報を保持し操作するワーキングメモリの能力

知覚統合 視覚情報を処理し、統合する能力

処理速度 情報を迅速に処理する能力

○ RBMT (Rivermead Behavioural Memory Test)

記憶機能を評価する検査であり、以下の指標を含む[10]：

SPS (Story Passage Score) 物語の記憶力

SS (Screening Score) スクリーニングスコア (全体的な記憶評価)

○ REY (Rey-Osterrieth Complex Figure Test)

以下の認知機能を評価する[10]：

即時再生 提示された図を直後に再現する能力 (短期記憶)

遅延再生 一定時間経過後に再現する能力 (長期記憶)

○ CAT (Paced Auditory Serial Addition Test, PASAT)

注意力および情報処理速度を評価する課題であり、各秒数ごとの正答数が記録される[10]。

○ KWCST (Modified Wisconsin Card Sorting Test)

認知的柔軟性を測定する課題であり、以下の指標を含む：

CA (Category Achieved) 達成したカテゴリー数 (適応能力)

PEN (Perseverative Errors of Nelson) 持続的エラー (ルールの変更に適応できない誤答)

DMS (Failure to Maintain Set) セット維持失敗 (ルールを維持する能力)

4. VR 外出トレーニングシステム

4.1. システム設計

本研究では、実際の環境に近い状況をVRで再現し、訓練を行うシステムを構築することを目的としている。このシステムは、参加者が仮想環境内で安全に行動を学習できるように設計されており、現実の生活空間に近い状況をVR内に再現することで、日常的な場面で求められる注意機能の訓練を行うことができる。本システムに求められる要件は以下の通りである。

- 現実の都市環境を忠実に再現し、実際の環境と同じ環境を体験できること
- 特別な技術を持たない参加者でも簡単に操作できること

図3にVR空間内の環境を示す。参加者は、図4のような流れで目的地であるスーパーマーケットにたどり着くまでに、様々な場所を通過しながら訓練を行う。



図 3: VR 空間内の環境

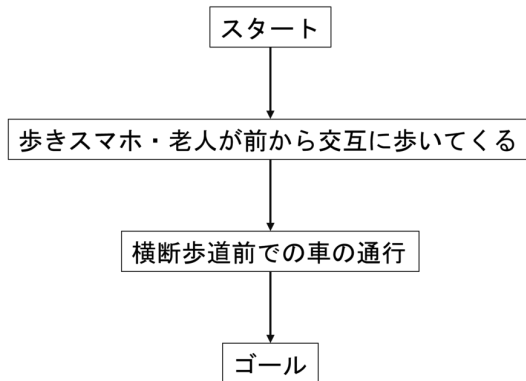


図 4: システムの流れ

○ VR 空間に再現された環境の構成

本研究では、以下のような現実的な環境要素を VR 空間内に再現している。それぞれの環境は、日常生活における典型的な行動場面を模擬し、認知的な注意や判断が求められるように設計されている。

歩道 参加者が最初に歩行を開始する場所である。歩道では、歩きスマホの人や高齢者が前方から歩いてくるなど、注意を引かれるシチュエーションが発生する。

横断歩道 信号機や車両の動きを再現し、参加者が交通ルールを守りながら安全に道を渡る訓練を行う。

駐輪場 自転車やバイクを再現し、参加者が実際の環境での行動を行う場面を構成する。

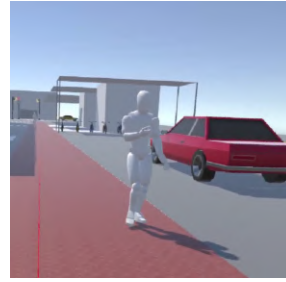
駐車場 車両の出入りが頻繁に発生する状況を再現し、参加者が車両の動きに注意を払う訓練を行う。

病院周辺 病院の出入り口付近を再現し、参加者が実際の環境での行動を模擬できるようにしている。

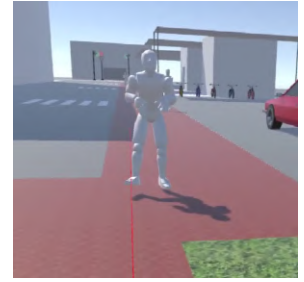
目的地（スーパーマーケット） 参加者が最終的に到達すべき目的地として設定されており、ゴールとしての役割を果たす。

以上の環境を構築することで、参加者が現実の生活空間で遭遇する可能性のある様々なシチュエーションを VR 内で訓練でき、適切に対処する能力を養うことができる。

また、これらの環境内では、訓練中に実際の環境に近い状況を作るため以下のような環境を構築した。



(a) 歩きスマホの人



(b) 歩いている老人

図 5: 買い物システムにおける NPC キャラクタ：(a) 歩きスマホの人、(b) 歩いている老人



図 6: 横断歩道

- 歩きスマホの人が前から歩いてくる（図 5a 参照）
- 老人が前から歩いてくる（図 5b 参照）
- 車の通行（図 6 参照）

4.2. 評価方法

本システムでは、参加者の歩行時における注意機能を定量的に評価するため、VR 環境内での歩行において重要と考えられる複数の行動を評価項目として設定し、スコア化を行った。これらの項目は、道路横断時の一時停止や信号確認、他者との接触回避、歩道からの逸脱防止など、実際の歩行場面で注意を要する代表的な行動を反映しており、表 1 に示すように整理されている。

各評価項目は、選択的注意（特定の刺激への集中）、持続的注意（一定時間にわたる注意の維持）、分配的注意（複数の情報の同時処理）など、異なる側面の注意機能と関連しており、項目ごとにどの注意機能に関わるかを併記している。また、評価は原則として 2 値（できた = 1 点、できなかった = 0 点）で採点されるが、衝突回数については重大度に応じて、すれ違いや接触には - 1 点、明らかな衝突には - 2 点とし、より精緻なスコア化を行っている（衝突回数は安全性の指標としても扱われる）。

これらの得点を合計し、100 点満点に換算することで「合計点数（総合評価）」を算出し、VR 課題全体の遂行パフォーマンスを数値化している。換算方法は、例えば満点が 15 点の場合、12 点を獲得したときには「 $12 \div 15 \times 100 = 80$ 点」として計算される。また、記録された歩行の所要時間は「計測時間（効率性）」として別に指標化し、個人ごとの進行の早さや慎重さを把握できるようにしている。

表 1: VR 歩行評価システムにおける評価項目一覧

表項目	点数	配点	評価する認知機能
車との衝突		ぶつかっていない 1 ぶつかった 0	注意機能
人との衝突		ぶつかっていない 1 ぶつかった 0	注意機能
ほかの歩行者と適切な距離を保てたか		保てた 1 保てなかった 0	注意機能
道からそれる		はずれなかった 1 はずれた 0	注意機能
横断歩道の前で止まることができたか		できた 1 できなかった 0	注意機能
人が飛び出しそうな場所で一時停止できたか		できた 1 できなかった 0	注意機能
横断歩道の前で左右確認したか		できた 1 できなかった 0	注意機能
信号を確認したか		できた 1 できなかった 0	注意機能
衝突回数（安全性）		明らかな衝突 -2 すれ違いや接触 -1	注意機能
合計点数（総合評価）		上記項目の合計（100 点満点）	複数の注意・認知機能の統合的評価
計測時間（効率性）		歩行に要した時間（分：秒）	行動特性・慎重さ

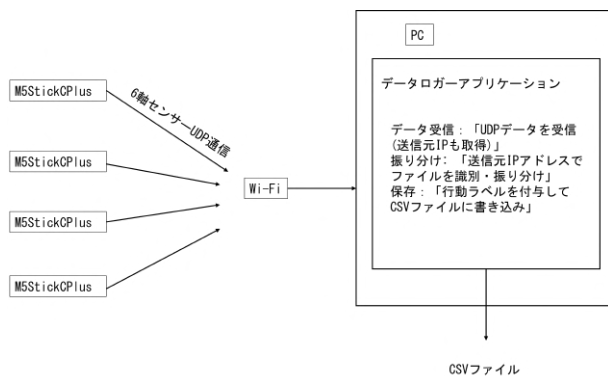


図 7: センサーデータ収集システムの構成図

4.3. データ収集システム

データ収集には、図 7 に示すシステムを構築した。被験者の両腕に装着された複数の 6 軸センサー（M5StickCPlus）は、取得した加速度データを UDP 通信により Wi-Fi 経由で PC に送信する。PC 上のデータロガーアプリケーションは、送信元 IP アドレスで各センサーを識別し、受信したデータに行動ラベルを付与して CSV ファイルとして保存する。これにより、複数の被験者あるいはセンサーからのデータを、効率的かつ正確に記録することが可能となる。

4.4. データセットと評価指標

本研究では、7 名の参加者に対し、「run（走行）」「stop（停止）」「walk（歩行）」の 3 状態をそれぞれ約 5 分間計測した加速度データを使用した。これら 3 つの状態は、歩行動作における基本的かつ明確なモーションの分類であり、動作速度の変化に伴う代表的な区切りとして位置付けられる。収集されたデータからは、合成加速度や、一定時間窓における平均・標準偏差といった統計的特徴量を算出し、機械学習モデルの入力とした。構築されたデータセットは合計 113,830 件であり、このうち約

表 2: 機械学習モデルの分類性能レポート

指標	走行	停止	歩行	全体
適合率	0.96	0.90	0.91	—
再現率	0.90	0.94	0.92	—
F1 スコア	0.93	0.92	0.92	—
データ数	11,080	11,719	11,350	—
正解率	—	—	—	92.06%

70%にあたる 79,681 件を学習用データ、残りの約 30%（34,149 件）をテスト用データとして使用した。各クラスのデータ数はほぼ均等であり、データセットに著しい偏りはない。モデルの性能評価には、正解率（Accuracy）、適合率（Precision）、再現率（Recall）、および F1 スコアを用いて、多角的に評価を行った。

4.5. モデルの性能評価と考察

構築した機械学習モデルをテスト用データセットで評価した結果、全体の正解率は 92.06%と非常に高い値を示した。各クラスの詳細な分類性能レポートを表 2 に示す。

表 2 から、すべてのクラスで F1 スコアが 0.92 以上と高い水準にあり、モデルが各動作をバランス良く識別できていることがわかる。クラス別に見ると、「走行」は適合率が 0.96 と最も高く、「停止」は再現率が 0.94 と最も高い値を示した。「歩行」は適合率 0.91、再現率 0.92 と安定した性能であった。

これらの結果から、本モデルは両腕のセンサー情報のみで、参加者の 3 つの基本動作（走行・停止・歩行）を 90%程度の精度で識別可能であることが示した。

5. 実験

5.1. 実験概要

2025 年 1 月 8 日に IC（インフォームド・コンセント）を行い、1 月 15 日（水）、1 月 22 日（水）、1 月 29 日（水）、2 月 5 日（水）の 4 回にわたって大阪府 A 施設

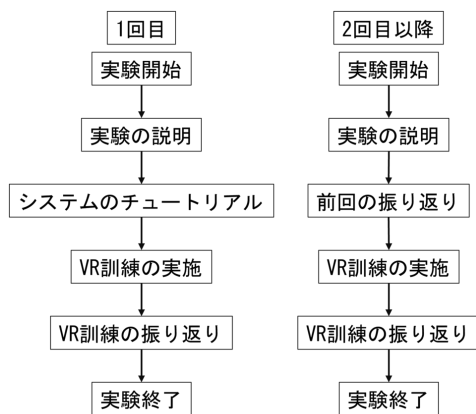


図 8: 実験の流れ

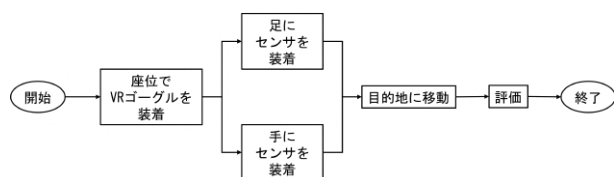


図 9: 実験の流れ

に通院する高次脳機能障害者 4 人に対して、実験を行った。図 8 に示す実験の流れとしては、第 1 回目の実験では、実験の説明、システム内の操作方法などのチュートリアル、VR 訓練の実施、VR 訓練の振り返りの流れで行う。第 2 回目以降では、システム内の操作方法などのチュートリアルについては省略し、前回の振り返りを行う。また最後にヒアリングを症例の方々と職員の方にも行い、本システムの感想とまとめを行った。本実験は、協力者全員に、事前に研究内容の説明を行い、実験参加への同意を得た。本実験は、大阪工業大学ライフサイエンス実験倫理委員会の承認（承認番号 2024-29-1）に基づき実施した。

5.2. 実験準備と手順

実験の流れを図 9 に示す。まず、参加者に実験の目的と手順を説明し、同意を得る。その後、VR ゴーグルを装着し、操作に使用する腕に図 10 に示す M5StickCplus というセンサを取り付ける。

今回は、日常的に車いすを使用している参加者を対象であり、VR 内での移動は腕を振る動作を行ってもらった。装着方法や操作手順について説明した後、短時間の試行体験を実施し、酔いや不快感がないかを確認する。

次に、図 11 に示すように、参加者は片腕を前後に振ることで VR 内のスーパーマーケットへ移動する。移動中はスタッフが常に付き添い、必要に応じて操作の補助や安全確認を行う。目的地への到着状況や移動中の行動・反応は記録し、後に評価を行う。VR ゴーグル装着中は周囲の状況が見えないため、安全確保のためにスタッフが常時サポートを行う。また、VR 酔いの不安がある場合には事前に申し出てもらい、適切に対応する。実験中に困難や不明点が生じた際には、いつでもスタッフに相談できる体制を整えている。



図 10: 装着するセンサ



図 11: 実験中の様子

6. 実験結果と考察

各症例の神経心理検査の結果を表 3 に示す。

6.1. 症例 A の結果と考察

症例 A の実験結果を表 4 に示す。4 回の試行を通じて合計点数は一貫して低い水準にあり、特に衝突回数が多さがパフォーマンス上の大きな課題であった。計測時間のばらつきも大きく、動作の安定性に欠ける様子が見られた。これは、歩行遂行に必要な注意や実行機能に困難がみられたことが、神経心理検査で示された認知機能のプロフィールと一致していた。

6.2. 症例 B の結果と考察

症例 B の結果を表 5 に示す。試行を重ねるにつれて衝突回数が減少し、3 回目には合計点数で満点を達成するなど、学習効果が示唆された。個別の評価項目でも改善が見られ、全体として VR 課題に対する適応の向上が確認された。つまり、症例 B は繰り返しの実施により課題遂行能力の向上が見られた。

6.3. 症例 C の結果と考察

症例 C の結果を表 6 に示す。全ての試行で衝突回数が 0 であり、高い安定性を維持した。合計点数も回を追うごとに向上し、最終的には満点を達成した。一部の評価項目ではわずかな変動が見られたものの、全体として安定した遂行能力が確認された。

6.4. 症例 D の結果と考察

症例 D の結果を表 7 に示す。合計点数は一貫して低く、特に 2 回目の試行で衝突回数が多く悪化した点が課

表 3: 各症例の神経心理検査

検査名		症例 A	症例 B	症例 C	症例 D
WAIS-III	VIQ	99	75		-
	PIQ	60	72		60
	FIQ	78	71		-
	言語理解	104	73	未実施	-
	作動記憶	98	88		-
	知覚統合	68	83		70
	処理速度	52	66		50
RBMT	SPS	17	12	20	17
	SS	6	6	10	8
REY	模写	13.5	36	34	32
	即時再生	2	19	28	7
	遅延再生	2	17.5	28	7
CAT	PASAT(2 秒条件 正答数)	24/60 誤 0	32/60 誤 5	23/60 誤 5	-
KWCST	CA	2	0	5	3
	PEN	14	19	3	15
	DMS	0	9	1	3
	CA	6	0		
	PEN	0	3		疲労のため不可
	DMS	0	12		

表 4: 症例 A の 4 回のスコア

評価項目	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目
車との衝突	1	1	1	1
人との衝突	0	0	0	0
ほかの歩行者と適切な距離を保てたか	0	0	0	0
道からそれる	0	0	0	0
横断歩道の前で止まることができたか	1	1	1	1
人が飛び出しそうな場所で一時停止できたか	0	0	0	0
横断歩道の前で左右確認したか	0	1	1	1
信号を確認したか	1	1	1	1
衝突回数	-2	-4	-5	-2
合計点数	41/100	46/100	45/100	48/100
計測時間	5 分 55 秒	6 分 51 秒	6 分 8 秒	8 分 19 秒

題であった。信号確認や左右確認などの評価項目でも困難が見られ、遂行の安定性に欠けた。

6.5. 各症例の点数推移の比較

各症例における VR 実験の合計点数の推移を分析した。症例 A の点数は、41 点、46 点、45 点、48 点と推移し、4 回の試行を通じて低い水準でほぼ横ばいであった。初回と最終回（4 回目）の点差は+7 点であり、改善は限定的であった。症例 B の点数は、初回 69 点から 2 回目に 48 点へ一度低下したが、3 回目には 100 点満点を達成した。最終回は 77 点であり、初回との差は+8 点であった。試行の過程でパフォーマンスに変動はあるものの、学習効果が示唆された。症例 C は、初回 71 点から 2 回目 87 点へと順調に点数が向上し、最終の 4 回目には 100 点満点を達成した。初回と最終回の差は+29 点となり、4 症例中で最も顕著な改善を示した。症例 D は、1 回目のデータが欠損しているが、2 回目 36 点、3 回目 20 点、4 回目 49 点と推移した。点数は一貫して低い水準に留まった。評価が可能であった初回（2 回目）と最終回（4 回目）の差は+13 点であった。以上の結果から、症例 C および症例 B では試行を重ねることによるパフォーマンスの向上が確認されたのに対し、症例 A および症例 D では点数の改善が乏しいことが示された。この違いは、症例 C と症例 B が訓練による学習効果を示し、点数が順調に向上した一方で、症例 A と症例 D は認知機能や行動に

関連する課題が影響し、パフォーマンスの改善が限定的であったことが考えられる。特に、症例 A では試行を重ねても点数の変動が小さく、症例 D では全体的に低い水準で点数が推移したため、改善が乏しい結果となった。

6.6. 全体考察と神経心理検査との関連

本研究で開発した VR 歩行評価システムの妥当性を検証するため、VR 実験の最終回（4 回目）におけるパフォーマンス指標と、各種神経心理検査成績との相関分析を行った（表??）。ここでは、VR 実験における評価項目を「合計点数（総合評価）」「衝突回数（安全性）」「計測時間（効率性）」の 3 つの側面に分類し、それぞれと認知機能との関連について検討した。なお、いくつかの表のデータが未実施である場合には、それらのデータをどのように処理したかについても明記する必要がある。具体的には、欠損データに対しては除外法を採用し、それが分析に与える影響を最小限に留めるよう配慮した。

まず、総合的なパフォーマンス指標である「合計点数」は、REY（複雑図形検査）の即時再生（ $r = .986, p < .05$ ）および遅延再生（ $r = .987, p < .05$ ）と、統計的に有意な極めて強い正の相関が認められた。これは、VR 空間内の人や車、信号といった対象物の位置関係を視覚的に正確に捉え、それを短期・長期的に記憶する能力が、VR 課題全体の遂行能力に大きく関与していることを強く示唆するものである。

表 5: 症例 B の 4 回のスコア

評価項目	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目
車との衝突	1	1	1	1
人との衝突	0	0	1	1
ほかの歩行者と適切な距離を保てたか	0	0	1	1
道からそれる	1	1	1	0
横断歩道の前で止まることができたか	1	1	1	1
人が飛び出しそうな場所で一時停止できたか	0	0	1	1
横断歩道の前で左右確認したか	1	0	1	1
信号を確認したか	1	1	1	1
衝突回数	-2	-2	0	0
合計点数	69/100	48/100	100/100	77/100
計測時間	5 分 20 秒	4 分 40 秒	4 分 30 秒	5 分 11 秒

表 6: 症例 C の 4 回のスコア

評価項目	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目
車との衝突	1	1	-	1
人との衝突	1	1	-	1
ほかの歩行者と適切な距離を保てたか	0	1	-	0
道からそれる	0	1	-	1
横断歩道の前で止まることができたか	1	1	-	1
人が飛び出しそうな場所で一時停止できたか	0	0	-	1
横断歩道の前で左右確認したか	1	1	-	1
信号を確認したか	1	1	-	1
衝突回数	0	0	-	0
合計点数	71/100	87/100	-	100/100
計測時間	6 分 30 秒	5 分 30 秒	-	6 分 56 秒

また、WAIS-III の処理速度 ($r = .989$) および知覚統合 ($r = .996$) との間にも、統計的有意水準には達しなかったものの、相関係数が .99 に迫る非常に強い正の相関傾向が見られた ($\dagger p < .10$)。これらの p 値が有意水準をわずかに上回った背景には、有効データが 3 名（または 4 名）と少数であったため、統計的検出力が十分でなく、結果の信頼性に限界があることが考えられる。少ないサンプルサイズでは、有意差が出ていたとしても、それが真の関連を示すものであるとは断言できないため、今後はサンプル数を増やし、検出力を高めた分析が求められる。

次に、「衝突回数」は、REY の模写 ($r = -.927$) および即時再生 ($r = -.919$) との間に強い負の相関傾向が認められた ($\dagger p < .10$)。この結果は、視覚的情報を正確に捉え（模写）、短期的に保持する（即時再生）能力が高い被験者ほど、VR 内での衝突が少なかったことを意味している。すなわち、本 VR システムは、歩行時の安全性を評価するうえで、周囲の人や物の位置を正しく把握し、その情報を短時間記憶しながら適切に行動する力を反映している可能性がある。

一方、「計測時間」と神経心理検査の成績間では相関は認められなかった。このことは、VR 課題において歩行にかかった時間が、特定の認知機能に影響されるというよりも、個人のペースや慎重さといった行動的な要因に強く影響されていた可能性を示唆する。

これらの結果を総合すると、本研究で開発した VR 歩行評価システムは、単一の能力に依存するものではなく、総合評価・安全性・効率性といった多面的な側面から、個人の歩行能力と関連する認知機能を反映できる有用なツールであることが示唆された。とくに、総合評価は視覚性記憶や情報処理能力と強く関連し、安全性は視覚認知機能と密接な関係を持つことが明らかになった。一方

で、KWCST や RBMT といった検査で評価される思考の柔軟性や言語性記憶は、本システムでは含まれていない可能性がある。

7. まとめ

本研究では、高次脳機能障害者のための仮想環境における外出行動トレーニングシステムを開発し、その有効性を評価した。VR 実験の評価では、特に「合計点数」や「衝突回数」といったパフォーマンス指標が、REY（視覚性記憶）や WAIS-III（情報処理能力）といった神経心理検査の成績と強く関連することが示された。これは、開発した VR システムが、単に安全な訓練環境を提供するだけでなく、外出行動時に必要な注意機能や認知機能を客観的に評価するツールとして有用である可能性を示唆している。また、一部の症例では訓練を重ねることで成績が向上する学習効果も確認されたが、効果には個人差も見られた。

一方、両腕のセンサーデータを用いた機械学習モデルは、92.06%という高い正解率で「走行」「停止」「歩行」の 3 動作を識別可能であることを実証した。特に「走行」予測の高い信頼性（適合率）や、「停止」検出の高い網羅性（再現率）など、クラスごとに異なる有用な特性を持つことが明らかになった。

本研究の成果は、VR システムによる主観的・行動的評価と、機械学習による客観的な身体活動評価を組み合わせることで、より多角的で個別化されたリハビリテーション支援が可能となる道筋を示した点にある。

今後の課題としては、VR システムにおいて、より多様な環境や予測困難なイベントを実装して訓練の汎化効果を高めること、症例数を増やして長期的な訓練効果を検証すること、システムの操作性や負担軽減に関する改

表 7: 症例 D の 4 回のスコア

評価項目	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目
車との衝突	-	1	0	1
人との衝突	-	0	0	0
ほかの歩行者と適切な距離を保てたか	-	0	0	0
道からそれる	-	0	0	0
横断歩道の前で止まることができたか	-	1	0	1
人が飛び出しそうな場所で一時停止できたか	-	0	1	0
横断歩道の前で左右確認したか	-	0	0	1
信号を確認したか	-	1	1	1
衝突回数	-	-1	-5	-1
合計点数	-	36/100	20/100	49/100
計測時間	-	5 分 38 秒	5 分 37 秒	5 分 40 秒

良を進めることが挙げられる。そして最終的には、本稿で独立して検証した VR システムと機械学習モデルを統合し、利用者の行動と身体活動をリアルタイムでフィードバックする、より高度なシステムの実現が望まれる。今後、これらの課題に取り組むことで、高次脳機能障害者の自立支援に貢献し、より効果的なリハビリテーションプログラムの実現を目指す。

参考文献

- [1] 種村純, 福永真哉, 大槻美佳, 河村満, 熊倉勇美, 熊倉真理, 小林祥泰, 七條文雄, 渋谷直樹, 下村辰雄, 先崎章, 田川皓一, 立石雅子, 能登谷晶子, 博文, 原寛美, 原田浩美, 深津玲子, 藤田郁代, 前島伸一郎, 三宅裕子. 高次脳機能障害全国実態調査報告. 高次脳機能研究, Vol. 36, No. 4, pp. 492–502, 2016.
- [2] 早川裕子. 作業療法士の立場から. 高次脳機能研究, Vol. 38, No. 3, pp. 292–296, 2018.
- [3] 大沢愛子. 脳卒中による高次脳機能障害に対するリハビリテーション治療の実践. 高次脳機能研究, Vol. 44, No. 1, pp. 5–10, 2024.
- [4] Helena M Blumen, Michele L Callisaya, Anne-Marie De Cock, Reto W Kressig, Velandai Srikanth, Jean-Paul Steinmetz, Joe Verghese, Olivier Beauchet, Biomathics Consortium, Gilles Allali, and Cyrille P Launay. Falls, cognitive impairment, and gait performance: Results from the good initiative. multicenter study. *Multicenter Study*, Vol. 18, No. 4, pp. 335–340, 2017.
- [5] Helena M Blumen, Michele L Callisaya, Anne-Marie De Cock, Reto W Kressig, Velandai Srikanth, Jean-Paul Steinmetz, Joe Verghese, Olivier Beauchet, Biomathics Consortium, Gilles Allali, and Cyrille P Launay. Influence of outdoor activity and indoor activity on cognition decline: Use of an infrared sensor to measure activity. *Telemedicine and e-Health*, Vol. 16, No. 6, 2010.
- [6] 岡橋さやか, 関啓子, 長野明紀, 種村留美, 小島麻木, 羅志偉. バーチャルリアリティ技術を用いた買い物課題による高次脳機能検査の開発. 高次脳機能研究, Vol. 32, No. 2, pp. 302–311, 2012.
- [7] 山田夢一途, 上田雄大, 土谷匠磨, 大井翔, 河合紀彦, 佐野睦夫. Vrを活用した観光システムのための座位足踏み運動に関する研究. 電子情報通信学会, 2022.
- [8] 蓮雄一, 加藤直樹. 星空ビジョン：仮想空間での星空を介したコミュニケーションを支援するツールの開発. Technical Report 2021-CE-162 No.18, 2021-CLE-35 No.18, 情報処理学会, December 2021. 2021 年 12 月 4 日.
- [9] 戸田和希, 伊藤淳子, 吉野孝. バーチャルリアリティ環境の評価. 2022 年度情報処理学会関西支部 支部大会, 2022.
- [10] 日本高次脳機能障害学会 Brain FunctionTest 委員会. 脳卒中, 脳外傷等により高次脳機能障害が疑われる場合の自動車運転に関する神経心理学的検査法の適応と判断. 高次脳機能研究, Vol. 40, No. 3, pp. 291–296, September 2020.