

修士学位論文

バーチャルリアリティ環境を用いた
適応的歩行調整能力の学習支援システムの構築

(西暦) 2018 年 12 月 27 日 提出

首都大学東京大学院
人間健康科学研究科 博士前期課程 人間健康科学専攻
ヘルスプロモーションサイエンス学域

学修番号: 17899605

氏名: 近藤 夕騎

(指導教員名: 樋口 貴広 教授)

要旨

高齢者の中には、状況に応じて方略を調整することが困難になる者がいる。例えば、狭い隙間を通り抜ける際に必要以上に体幹を回旋するため(Hackney & Cinelli, 2013)、接触は回避しやすくなるもののバランス維持に支障をきたしうることがある。一般に、こうした行動調整能力は経験を通して改善される側面がある(Franchak et al., 2010)。しかし、接触回避場面では失敗した場合に接触を伴うことから、実際に何度も接触回避場면을訓練する方法が最善の方法とは言えない側面もある。

こうした問題に対して、本研究室において隙間通過場면을バーチャルリアリティ(VR)技術で再現した。VR環境では実環境下で衝突回避行動を訓練する場合と異なり、物理的な衝突がないという利点がある。つまり、VR技術を応用することで、歩行時の行動調整能力を向上させるための訓練ツールとして安全に利用できる可能性がある。

そこで本研究では、高齢者の安全な歩行を支援するため、VR環境を用いて狭い隙間を通り抜ける際の適応的歩行調整能力を向上させる学習支援システムの構築を目指した。第1検証では、実環境との一定の類似性を担保するため、VR環境で測定した接触回避行動特性(隙間通過時の体幹回旋角度)が、実環境における接触回避行動特性を再現しているか検討した。第2検証では、適応的な歩行調整能力の学習を支援するかどうか検証するため、VR環境における最小限の体幹回旋が求められる隙間通過訓練によって、隙間通過時の接触回避の精度が高まるか検討した。

第1検証では健常若年者を対象に、VR環境において実環境下で観察される2つの基準(①隙間が狭くなるほど体幹回旋角度が大きくなること、ならびに、②一定以上の隙間幅に対して体幹の回旋をせずに通り抜けること)を根拠に、VR環境において再現性

が得られたと判断した。実験 1 は、実環境、VR 環境でそれぞれ狭い隙間を通り抜ける課題であり、水平棒を把持して隙間を通過する際の体幹の回旋角度を算出した。実験 2 は実験 1 と同一参加者を対象に、隙間通過の可否判断課題を行い、静止立位で 91cm の水平棒を両手で把持した状態で、実環境、VR 環境それぞれの環境において、隙間に対して体幹を回旋せずに通過できるかどうか回答した。結果として、実験 1 では再現性の基準①「隙間が狭くなるほど体幹回旋角度が大きくなる現象」については再現性を得た。しかし、再現性の基準②「一定以上の隙間幅に対して体幹の回旋をせずに通り抜ける現象」は確認できず、VR 環境では必要以上に体幹の回旋を行うことが示された。その要因を探るため実験 2 をおこなった結果、実環境と比較して、VR 環境では体幹を回旋せずに通過できると判断する隙間幅を大きく見積もる傾向があった。さらに、実験 1・2 を追加分析すると、一部の参加者において、隙間幅に関わらず過度に体幹を回旋する参加者（保守的な参加者）がいることが分かった。

実験 3・4 では、必要以上の体幹の回旋を誘導したと考えられる事象に対して補正を行った。実験 3 では、再現性を得るために VR システムの調整を行ない、調整前後での隙間通過時の体幹の回旋角度を算出した。結果として、体幹の回旋角度を下げることはできたものの、必要以上に体幹を回旋する現象の解決には至らなかった。実験 4 では実験 1 の実験手続きと同一の課題に加えて、「体幹の回旋を最小限にする」という条件を追加し、隙間通過課題を測定した。制約条件を追加することで、一定以上の隙間幅に対して体幹の回旋をせずに通り抜ける現象を達成することができた。これらの結果から、4 つの実験を通して再現性の基準であげた 2 つの現象が得られ、隙間通過時の接触回避行動を再現する VR 環境を確立するに至った。

第2 検証にあたる実験5 では、VR 環境での最小限の体幹回旋が求められる隙間通過訓練によって接触回避の精度が高まるか検討した。参加者は健常高齢者、ならびに行動特性を比較するため健常若年者も対象とした。それぞれ無作為に介入群（ランダムに隙間幅を提示し、最小限の体幹回旋が求められる隙間を通過する群）と統制群（体幹回旋の必要のない隙間を通過する群）の2 群に分けてVR 環境で訓練を行った。訓練前後に水平棒を把持し、最小限の体幹の回旋で接触せずに隙間を通り抜ける課題を行なった。その結果、高齢者において、体幹回旋角度で介入効果を示唆する結果が得られた。一方で、介入群においてのみ介入後に接触頻度が増加することがわかった。

本研究より、VR 環境での隙間を通過する訓練は、行動変容のきっかけを作るという意味では有益なものの、「接触しない程度の最小限の通過幅を学習させる」という意味では、さらなる改善の余地があることが示唆された。

目次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 本研究の理論的および方法論的背景	3
第 1 節 高齢者の適応的歩行調整能力	3
1.1 隙間通過時の接触回避行動	4
1.2 拡張物を伴う隙間通過行動	5
1.3 高齢者における隙間通過時の接触回避行動	7
1.4 適応的な歩行調整能力を向上させるための訓練	10
第 2 節 バーチャルリアリティ (VR) のリハビリテーションへの応用可能性	11
2.1 VRとは	11
2.2 VRであれば安全に訓練ができる	11
2.3 VR技術のリハビリテーションへの応用	13
2.4 VR環境と実環境における行動特性の比較	16
2.5 VRシステムについて (出力インタフェースのメリット, デメリット)	20
第 3 節 問題の所在	25
第 3 章 実験報告	27

第 1 節：実環境における隙間通過時の接触回避行動特性（体幹回旋角度） を再現できているか	27
<u>実験1：隙間通過課題における実環境とVR環境の比較</u>	29
1.1.1 方法	29
1.1.1.1 実験参加者	29
1.1.1.2 実験装置	29
1.1.1.3 実験プロトコル	34
1.1.1.4 実験デザインと分析	37
1.1.2 結果	41
1.1.3 考察	42
<u>実験2：隙間通過可否判断課題における実環境とVR環境の比較</u>	44
1.2.1 方法	44
1.2.1.1 実験参加者	44
1.2.1.2 実験装置	44
1.2.1.3 実験プロトコル	44
1.2.1.4 実験デザインと分析	46
1.2.2 結果	46
1.2.3 考察	47

実験3：VRシステム調整によって必要以上の体幹回旋を低減できるか 51

1.3.1 方法	51
1.3.1.1 実験参加者	51
1.3.1.2 実験装置	51
1.3.1.3 実験プロトコル	52
1.3.1.4 実験デザインと分析	53
1.3.2 結果	53
1.3.3 考察	54

実験4：制約を設けることによって必要以上の体幹回旋を低減できるか 56

1.4.1 方法	56
1.4.1.1 実験参加者	56
1.4.1.2 実験装置	56
1.4.1.3 実験プロトコル	56
1.4.1.4 実験デザインと分析	57
1.4.2 結果	57
1.4.3 考察	58

第 2 節 : VRによる隙間通過訓練によって適応的歩行調整能力を改善できるか	60
<u>実験5 : VRによる最小限の体幹回旋が求められる隙間通過訓練後に実環境の接触回避の精度を高めるか</u>	60
2.1 方法	60
2.1.1 実験参加者	60
2.1.2 実験装置	61
2.1.3 実験プロトコル	63
2.1.4 実験デザインと分析	64
2.2 結果	65
2.2.1 隙間通過時の体幹回旋角度	65
2.2.2 隙間通過時のドアとの接触率	66
2.3 考察	68
第 4 章 総合考察	71
引用文献	77
謝辞	84
付録	85

第 1 章 緒言

歩行時における空間の状況は他者の動き、物体の配置、そして自らの動きによって変化する。その中で、人や障害物との接触を回避し安全に通過するために歩行の軌道修正、歩行速度の調整、ならびに体幹の回旋という3つの動作修正方略が、他者との接触を回避する有効な方法である。若年者は狭い隙間を通過する際に、通過口の大きさが肩幅の1.3倍より狭い場合に体幹を回旋し始めることが分かっている (Warren and Whang, 1987)。また、たとえ身体幅が拡張した身体+物体の状況においても、身体の拡張物である物体の長さを参照することで適切な回避行動をとることができる (Higuchi et al., 2012)。つまり、若年者は自己の肩幅や把持している物体を参照することで自己と隙間幅との関係を知覚し、状況に応じた適切な回避行動をとっている。

一方、一部の高齢者では状況に応じて行動を調整することが困難になる。高齢者は狭い隙間を通り抜ける際に、必要以上に体幹を回旋したり (保守的方略)、同一環境に対して体幹回旋の大きさがばらついたりすることがある (Hackney & Cinelli, 2013)。こうした特徴は、高齢者においては行動の調整が困難になっていることを示唆している。行動を調整することが苦手な高齢者においては、障害物との接触やバランスの崩れによって生じる転倒や思わぬ怪我につながる恐れがあるため、環境に応じて行動を調整するための適応的な行動調整能力を高める必要がある。一般に、適応的な行動を調整する能力は、日常の経験の中で自然と身につくルールであり、何度もその場面を経験して覚えていく特性がある。しかしながら、接触回避場面では失敗した場合に接触を伴うことから、実際に何度も接触回避場面を訓練する方法が最善の方法とは言えない側面もある。

こうした問題意識のもと、本研究では隙間通過課題をバーチャルリアリティ (VR) 技術で再現し、物理的な接触のない訓練方法として利用することを試みた。VRは臨場感のある立体映像を呈示することにより、現実の世界で再現困難な状況を再現し、まる

で現実で起こっているかのようにその状況を体験させる。そのため、実環境下で接触回避行動を繰り返し訓練する場合と異なり、物理的な接触がないという利点がある。つまり、VRを応用することで、適応的な歩行調整能力を向上させるための訓練ツールとして安全に利用できる可能性がある。

そこで本研究では、高齢者の安全な歩行を支援するため、VR環境を用いて狭い隙間を通り抜ける際の適応的な歩行調整能力を向上させる学習支援システムの構築を試みた。検証は大別して2つの検証を行った。第1検証では、VRシステムで測定した隙間通過行動が実環境における隙間通過行動の接触回避行動特性（隙間通過時の体幹回旋角度）を再現できているかについて実環境とVR環境で比較検証した。ここでは、接触回避行動における体幹回旋の調整に重点を置いているため、実環境下で観察される2つの現象(①隙間が狭くなるほど体幹回旋角度が大きくなること、ならびに、②一定以上の隙間幅に対して体幹の回旋をせずに通り抜けること)が確認されたかどうかを根拠に、隙間通過行動の再現性が得られたものと判断した。第2検証では、高齢者を対象にVRによる最小限の体幹回旋が求められる隙間通過訓練後に実環境の接触回避の精度が高まるか、つまり、ぶつからずに隙間幅に応じて微調整する能力が高まるかについて検証した。実環境における行動特性の再現性、ならびに行動を調整する訓練ツールとしての有用性を併せ持つシステムを構築することで、高齢者の安全な歩行を支援する一助となることが期待される。

第 2 章 本研究の理論的および方法論的背景

本研究を立案した背景として、高齢者の一部では歩行時における環境に応じた行動の調整が上手くいかないことで障害物との接触が起こり、それがきっかけで怪我や転倒の原因となり得ることがある。そこで本章ではまず第1節において高齢者の適応的な歩行調整能力についてまとめる。第2節ではバーチャルリアリティ（VR）について概説したのち、VRを応用したリハビリテーションの紹介、ならびに実環境とVR環境での行動特性を再現することの必要性を述べる。最後に、第3節にて問題の所在について言及する。

第 1 節 高齢者の適応的歩行調整能力

本研究が対象とするのは、歩行中の接触回避場面などにおいて必要とされる適応的歩行調整能力、つまり、歩行時における環境に応じた行動の調整能力である。高齢者は若年者に比べて、適応的歩行調整能力が低下していることが指摘されている。そこで本節では、若年者と高齢者における接触回避時の行動特性の違いについての情報をまとめ、適応的な歩行調整能力について理解を深める。そして、適応的歩行調整能力を向上させる方法について言及する。

1.1 隙間通過時の接触回避行動

歩行時における空間の状況は、自己や他者の動き、障害物の配置によって変化する。その中で、人や障害物との接触を回避し安全に通過するために、歩行の軌道修正 (Hackney & Cinelli, 2013 ; Huber et al., 2014 ; Vassallo et al., 2016) , 歩行速度の調整 (Wilmot & Barnett, 2010 ; Wilmot & Barnett, 2011 ; Hackney & Cinelli, 2013 ; Huber et al., 2014 ; Vassallo et al., 2016) , ならびに体幹の回旋 (Warren & Whang, 1987 ; Higuchi et al., 2006 ; Wilmot & Barnett, 2010 ; Wilmot & Barnett, 2011 ; Higuchi et al., 2012 ; Hackney & Cinelli, 2011 ; Hackney & Cinelli, 2013 ; Hackney & Cinelli, 2015 ; Hackney et al., 2015) という3つの動作修正方略が、他者や障害物との接触を回避する有効な方法である。ここでは、高齢者における狭い隙間を通過する際の行動特性の先行研究 (Hackney & Cinelli, 2013) で使用された体幹の回旋に着目した知見について説明する。

Warren & Whang (1987) は、健常若年者を対象とし、2枚の暗幕を通過口に見立て、その隙間口を必要に応じて自由に体幹を回旋してよいという条件で通過させた。その結果、身体の大きさに関わらず全ての参加者が、この身体幅と隙間の相対値の大きさに基づいて体幹の回旋角度を調節していることがわかった (図1) 。また、通過口の大きさが肩幅の1.3倍より狭い場合に体幹を回旋し始めることが明らかになった。この結果から、若年者は効率よく隙間を通過するために自身と通過口である隙間幅の関係に応じて体幹の回旋を調節し、通過に必要なだけ体幹回旋を行なっていることが示された。このWarren & Whangの研究成果を機に、隙間通過行動は幅広く研究され、接触回避方略の選択の仕組みを解明するための対象として利用されている。

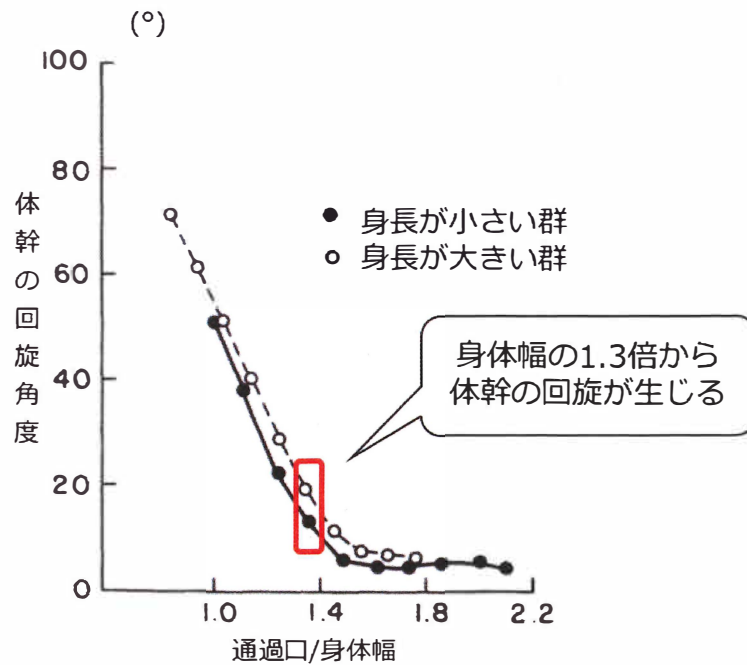


図1 隙間通過時の体幹回旋行動 (Warren & Whang, 1987より一部改変)

隙間幅 (通過口) に応じて体幹回旋の調整を行っている。また、身長の高低に関わらず、身体幅に対する隙間幅の1.3倍より狭い隙間幅から体幹の回旋を行う。

1.2 拡張物を伴う隙間通過行動

日常生活の中では、手にカバンや買い物袋などの荷物を持って移動することが少なくない。この場合、移動のために必要なスペースは荷物の形状に伴って拡張しうる状況にあり、実際の身体幅の情報は移動中の環境との関係性知覚の利用に役立たないことがある。こうした状況では把持する物体の大きさを知覚し、接触回避行動を実行することが必要である。Higuchi et al. (2006) は、手に肩幅よりも広いサイズの水平棒を把持するといった“身体+物体”の状況下での歩行分析を行った。その結果、通常歩行時と水平棒把持のいずれの条件でも、隙間幅が小さくなるほど体幹の回旋角度は大きく、隙間幅が大きくなるほど体幹の回旋角度は小さくなる傾向がみられた。つまり、隙間を通過

する際の体幹の回旋角度は、隙間幅と水平棒の長さの相対関係に応じて調節されていることが明らかになった（図2）．したがって、身体+物体の状況においても、身体の拡張物である物体の長さを参照することで、通常の歩行時と同様に適切な接触回避行動をとることが可能であることを示唆している．

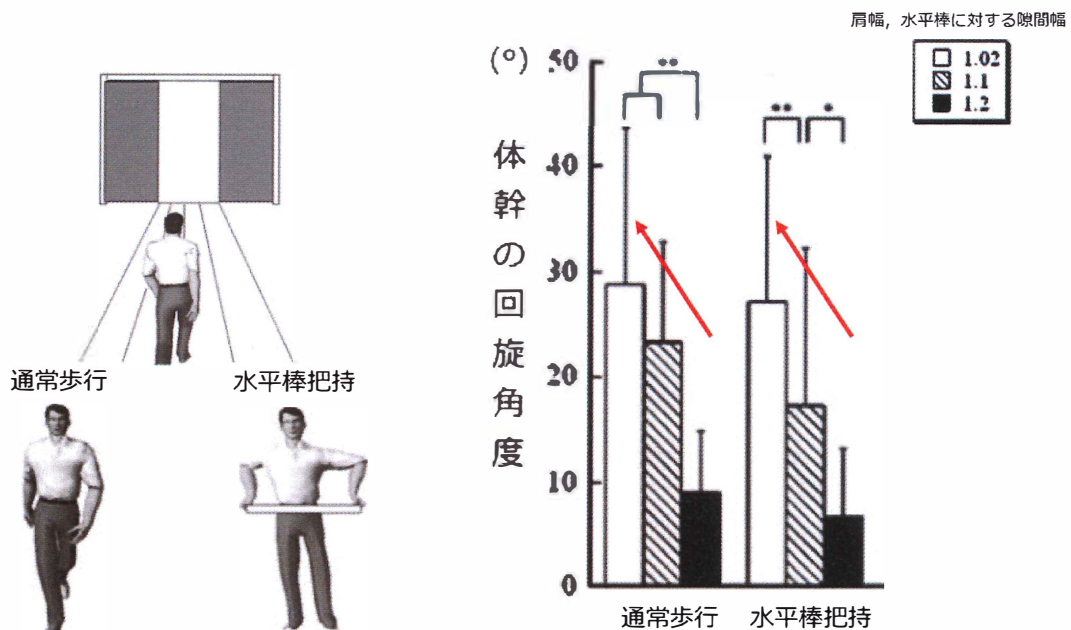


図2 拡張物を持った場合の隙間通過行動時における体幹の回旋角度

(Higuchi et al., 2006より一部改変)

水平棒を把持した場合にも、水平棒と空間の大きさの相対関係に応じて、適切に体幹の回旋角度が調整されている．

さらに Higuchi et al. (2012)の研究では、身体+物体の隙間通過行動について、水平棒を把持した状態で隙間を通過する際の体幹の回旋が、隙間と身体に必要最低限のマージンが生まれるように調整されていることが明らかになった（図3）．こうした調節ができると、隙間幅の相対値が同じ条件である場合、水平棒の長さが長いほど体幹の回旋角度が少なく済む．

以上より、若年者は、必要最低限の体幹の回旋で効率よく接触を回避していることが明らかになった。こうした障害物の形状や周囲の状況に対応して柔軟性の富んだコントロールが、安全な回避行動に繋がっていることを示唆する。

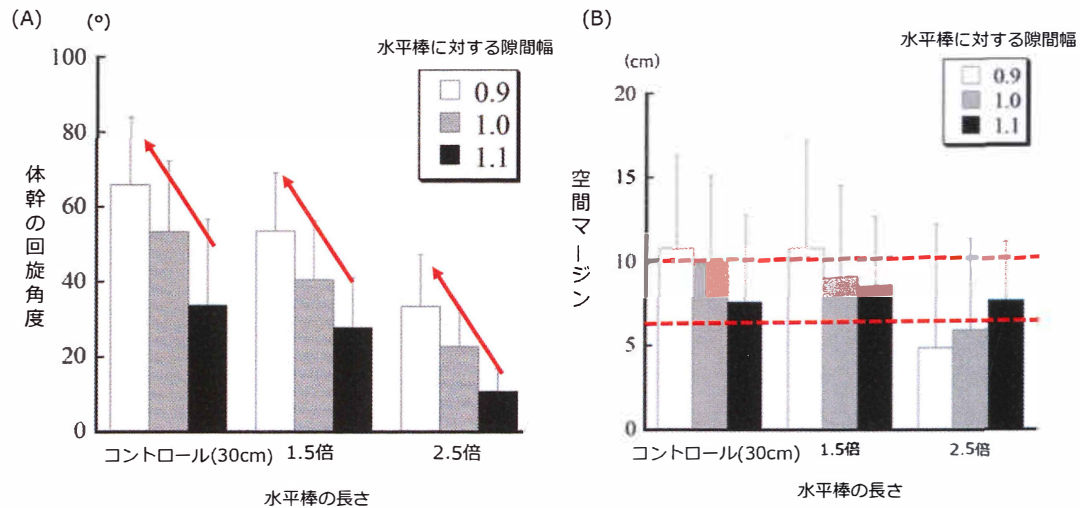


図3 把持条件・水平棒の長さ・隙間の幅に対する

体幹回旋角度および空間マージン (Higuchi et al., 2012より引用)

水平棒の長さに応じて体幹回旋角度が調整される (A) . 隙間と水平棒に一定の空間マージン (6-10cm) が生じるように調整される (B) .

1.3 高齢者における隙間通過時の接触回避行動

高齢者は若年者と比較して、狭い隙間を通り抜ける際に必要以上に体幹を回旋したり (保守的方略) , 同一環境に対して体幹回旋の大きさがばらついたりすることがある. Hackney & Cinelli (2013) は、高齢者の接触回避行動の特徴を若年者と比較することで調査した. 8m前方に提示された隙間にアプローチし、必要に応じて体幹を回旋することで、接触せずに通過する課題を行なった. その結果、若年者は隙間が身体幅の1.4

倍より狭い大きさの隙間の時に体幹を回旋し始めるのに対し、高齢者では隙間が身体幅の1.6倍の大きさより狭い隙間幅の時から体幹の回旋を始めた(図4)。この結果は、高齢者が狭い隙間を通過する時に必要以上に体幹の回旋行動を行うことを示唆している。さらに、高齢者は、同じ隙間幅であっても試行間における個人内の体幹の回旋角度のばらつきが大きいことが明らかとなった。

以上の結果を踏まえると、高齢者の場合、行動に若干の不安定さがあることも考慮して、少し広い隙間幅から体幹を回旋させて通過している可能性がある。たしかに安全面からいえば、接触を避けるために体幹の回旋を大きくとり隙間を通過する行動は問題ないが、体幹回旋の必要がない隙間幅においても必要以上に体幹の回旋を行うことは、行動の調整が困難になっていること、つまり、適応的な歩行調整能力が低下していることを示唆している。

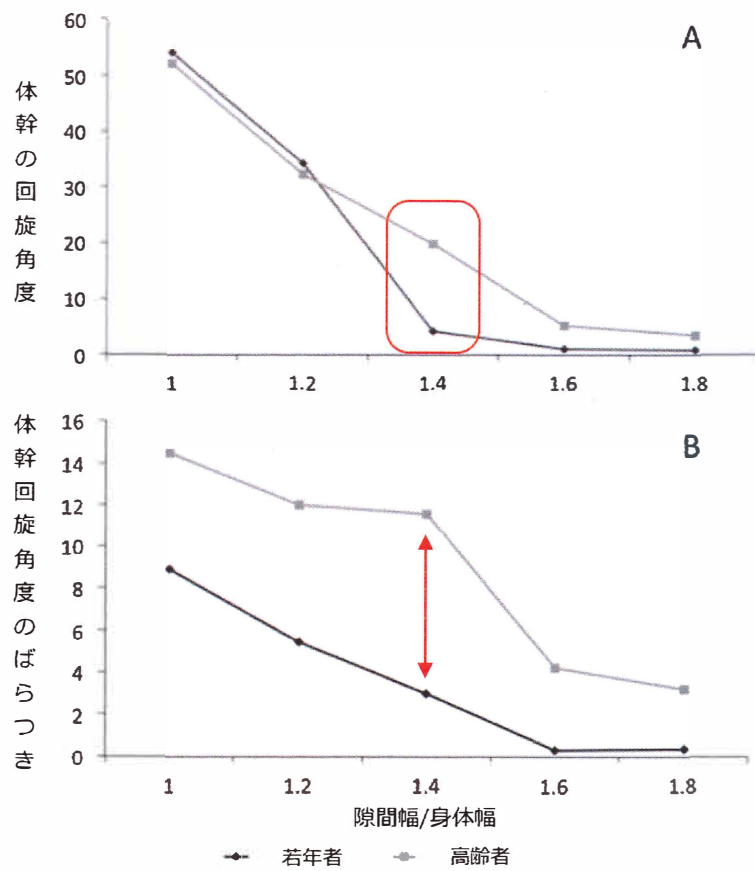


図4 隙間通過時の体幹回旋角度に関する高齢者と若年者の比較

A: 体幹の回旋角度, B: 体幹回旋角度のばらつき

(Hackney & Cinelli, 2013より引用)

若年者では隙間幅が身体幅の1.4倍になった段階で体幹の回旋が始まるのに対して、高齢者は隙間幅が身体幅の1.6倍になった段階で体幹の回旋が始まる (A)。さらに、高齢者では各試行における体幹回旋角度のばらつきが大きい (B)。

1.4 適応的な歩行調整能力を向上させるための訓練

環境に応じて行動を調整することが苦手な高齢者においては、障害物との接触によって生じる転倒や思わぬ怪我につながる恐れがあるため、障害物に応じて行動を微調整するための歩行時における適応的な調整能力を高める必要がある。適応的な歩行調整能力は、日常の経験の中で自然と身につくルールであり、何度もその場面を経験して覚えていく側面がある (Franchak et al., 2010)。しかし、接触回避場面に限っては、ともすれば「ぶつかりながら覚える」という方法にもなる可能性があり、実際の接触回避に失敗した場合には接触がともない、転倒、怪我を生じる可能性がある。このことから、実際の環境で接触回避を訓練するという方法は、高齢者にとって最善な訓練方法とは言えない現状があり、効果的な訓練方法について検討の余地がある。

こうした問題意識に基づき、本研究ではバーチャルリアリティ (VR) 技術を応用する着想に至った。実環境下で接触回避行動を繰り返し訓練する場合と異なり、VR環境では物理的な接触がなく、運動を学習したい場面に近い環境が設定できる。このことを考慮すると、VR技術を利用したトレーニングによって接触回避時における適応的な歩行調整能力を改善できれば、高齢者の安全な歩行を支援する一助となることが期待される。

第 2 節 バーチャルリアリティ (VR) のリハビリテーションへの応用可能性

適応的な歩行調整能力を向上させるための方法として、対象となる行動を何度も繰り返し経験する方法が有益と考えられる。訓練する方法の一つの方法としてVRに着目した。本節ではまずVRについて概説し、リハビリテーションにおけるVR技術の応用知見、VR環境の中で実環境の行動特性を比較検討する必要性について説明する。最後に、本実験で開発したVRシステムについてまとめる。

2.1 VRとは

VRは、日本バーチャルリアリティ学会により“人工現実感”と訳され、「みかけや形は原物そのものではないが、本質的あるいは効果としては現実であり原物であること」であると定義されている (<https://vrsj.org/about/virtualreality/>, 参照 2018-11-23) 。VR技術を用いることで現実の世界で再現困難な状況を3次元的に再現し、まるで現実で起こっているかのようにその状況を体験できることが可能である。VR技術は、実環境では訓練しにくい環境、例えば、手術場面や接触などの危険が伴う行動場面を安全な環境で、慣れるまで何度も練習を繰り返せることが利点としてあげられる。また、実環境で統制が困難な環境要因について実験者の意図に合わせて制御することができる。つまり、VR技術の発展により、あたかも個人が問題としている状況で訓練、計測が行えるようになった。

2.2 VRであれば安全に訓練ができる

VR技術を応用することで安全に行動調整能力の向上を導ける可能性がある。例えば、車道を安全に横断するためには、状況を正確に知覚、判断した上で横断する必要があり、適切な行動調整能力がもとめられる。しかし、実際の車道でそれを経験してもらおうと

した場合、接触による事故の危険を伴うため、現実的な訓練方法ではないことは容易に想像できる。こうした問題に対してCavallo et al. (2017) は、車道横断の状況を再現したVR環境を用いて行動調整能力が高まるか（接触率の軽減）を検討した。12例の高齢者を対象とし、片側1車線で対面通行の車道を再現した車道横断のシミュレータを用いて、車と接触せずに横断する課題、ならびに訓練を行い、その前後で接触率が減少するか検討した（図5）。その結果、VR環境での訓練後に、シミュレータ内での遠いレーンにおける接触率が減少する効果を得られ、その効果は6ヶ月後も持続していた（図6）。このことから、VR環境は、課題となる行動を繰り返し安全かつ効果的に訓練することができるシステムとして有益である可能性が示唆された。



図5 実験風景と車道横断課題（Cavallo et al., 2017より引用）

転倒予防のためにハーネスを使用した安全な環境において車道横断をする課題。

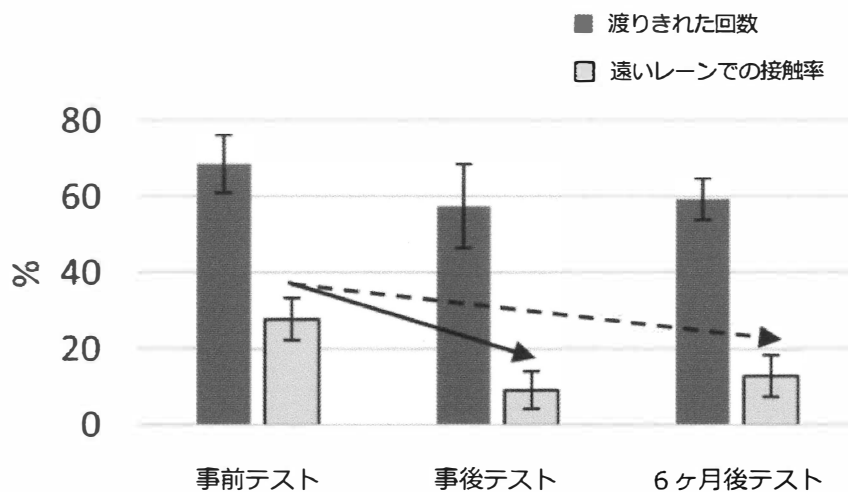


図6 訓練後に遠いレーンでの接触率が減少する (Cavallo et al., 2017より引用)

2.3 VR技術のリハビリテーションへの応用

VR環境内での訓練は、リハビリテーションの世界で重要視されている、課題指向型アプローチの考えを内包している。課題指向型アプローチとは、スキル（一貫性、柔軟性、自律性）を獲得（再獲得）する意図を持って実生活で行う課題を練習することである (Hebert et al., 2016)。課題指向型アプローチは、要素的な筋力や関節可動域などの機能低下に対して訓練するのではなく、むしろ、個人と環境および課題の相互作用から運動制御が生じることを重要視しており、行為の学習が目標である。つまり、環境要因の中で特異的なスキルの獲得を図るという考えが課題指向型アプローチである。

VR技術を応用することで、各個人が問題としている環境および課題を訓練することができる。VR技術を用いたリハビリテーションは心身機能、脳機能等の機能改善を得たという有用性についての報告が散見される。リハビリテーションの場面では、高齢者 (Hsieh et al., 2014; Tsang et al., 2016; Maillot et al., 2017) をはじめ、脳卒中 (Laver et al., 2015)、パーキンソン病 (Dockx et al., 2016) でVR技術をリハビリ

セッションとして応用することによっていずれも上下肢機能や歩行能力等の改善が得られている。機能改善の背景には、VR技術を使用することで現実に近い環境を経験することができる、その結果として自己効力感が向上し、運動学習が促進されるといわれている (Imam & Jarus. 2014)。実環境における限られた空間から解放され、VR空間の中で課題指向型アプローチが可能となったことは、リハビリテーションの可能性を大きく拡大することに繋がる結果をもたらしている。

Mirelman et al. (2016) は、トレッドミルにVRを組み合わせた介入が高齢者の転倒リスク防止に有用であるかを検討した。302例の高齢者を対象とし、トレッドミル単独群、トレッドミル+VR群の無作為化法で2群に割り付けた。VRの内容としては、前方のモニターに投影される障害物の映像を、トレッドミル上でまたぐ課題である。いずれの群も1セッション約45分の介入を週3回、6週間行い、主要評価項目として、介入終了後6ヵ月間の転倒発生率を比較した (図7A)。その結果、トレッドミル+VR群では、訓練後6ヶ月間の転倒発生率は有意な減少を得られた (転倒発生率比: 介入前11.9→介入後6.0)。一方で、トレッドミル単独群では転倒発生率の統計的に有意な減少を得られなかった (転倒発生率比: 介入前10.7→介入後8.3) (図7B)。このことから、VRを従来のリハビリテーション介入と組み合わせることで、リハビリテーション単体で得られる以上の結果を上げる効果を与えることを示唆している。

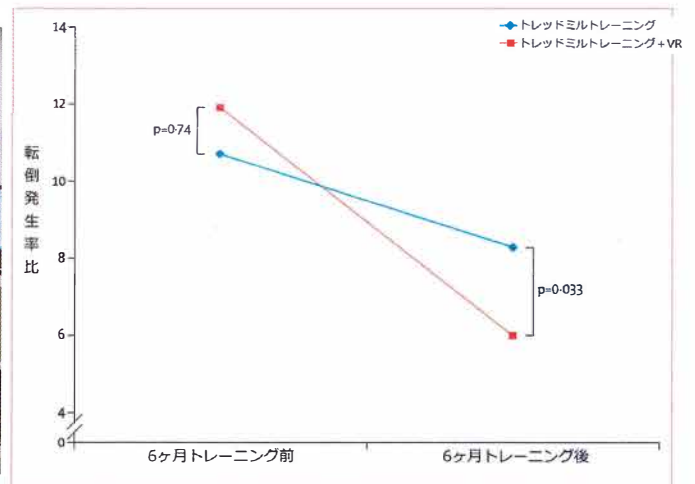
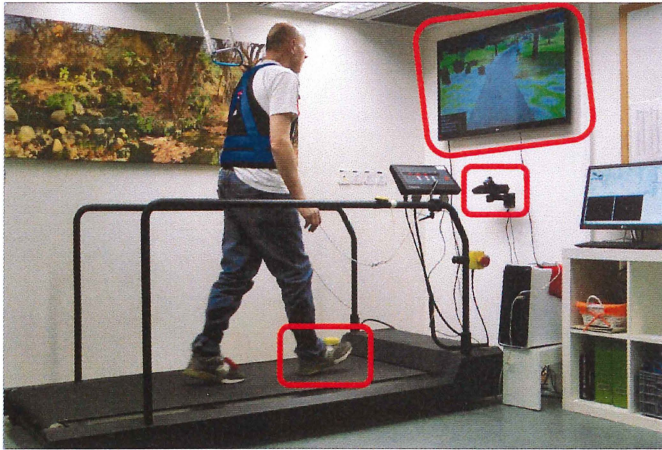


図7 (A)トレッドミルトレーニング+VRによる訓練：障害物を跨ぐ課題

(B)トレーニング前後の転倒発生率変化 (Mirelman et al., 2016より引用)

(A)：障害物を跨げたかどうかの判断は、足部につけられたマーカーを動作解析装置で追跡することで判断される。障害物を跨げなかった場合は参加者の目の前のモニターに接触の情報が表示される。(B)：トレッドミルトレーニング+VRでの訓練後に転倒発生率が低下する。

一方で、VR環境で訓練した内容が、実際の環境における同様の課題に転移するかどうかは一定の効果を得られていない。Bezerra et al. (2018)は、健常高齢者を対象とし、実環境とVR環境のそれぞれで同様のタイミング一致課題の訓練を実施し、訓練した結果が両者の環境へと学習が転移するのかを調査した。その結果、訓練環境内では精度が高まる（エラー率が減少）ものの、実環境からVR環境、およびその逆にVR環境から実環境では訓練結果が転移しないことがわかった。この結果からVR環境での訓練で得られる効果が、実際の環境における同様の課題に転移させるためにはさらなる検証が必要といえる。

以上より、VRは幅広く研究され、リハビリテーション場面にプラスとして作用する可能性がある。一方で、ただ単にVR技術を用いれば、全てがプラスに作用するわけではなく、よい影響をもたらさない要因の1つとして行動の差異があげられる。高い没入感が実現されているとしても、VR環境内の行動で得られる感覚フィードバックは、実環境と比べて差異があるため、実環境とVR環境における人間の行動の不整合が懸念される。学習支援システムを構築するためには、両環境における差異を明らかにし、両環境の整合性を合わせる事が重要であると考えられる。このことから、上述した問題を解決する方法として、訓練ツールとしての有用性を検討する前に、あらかじめ実環境下で観察される現象を得られているかをVR環境で確立していることを確認する必要があると考えた。

2.4 VR環境と実環境における行動特性の比較

実環境とVR環境を用いた実験結果を比較・検討することにより、VR環境で生じる行動特性が実環境の行動特性と違いがあるのかを検討した先行知見がある。これらの研究が示しているのは、VRを使用する際は類似性だけでなく、VR環境内で生じる実環境との行動の相違を明らかにする必要があるということである。

Ida et al. (2017)は、参加者に向かって障害物が迫ってくる状況において、下肢を持ち上げる加速度、下肢・体幹筋の筋活動を測定した。ここではVR環境条件として頭部搭載型ディスプレイ (Head Mounted Display: HMD) とスクリーン型 (3D-P) の2条件を設定し、実環境条件を合わせて3条件として実験を行なった (図8)。その結果、下肢を持ち上げる加速度は障害物の高さに応じて変化させていることを示した (図9)。一方で、下肢を持ち上げる際の加速度は実環境よりもVR環境で遅延が生じ、下肢・体幹筋の筋活動は実環境よりもVR環境で減少がみられた。このことから、実環境を再現し

たVR環境をリハビリテーションプロトコルに取り入れる場合、VR環境で生じる変化を考慮してVR技術を利用する必要があることを示唆している。

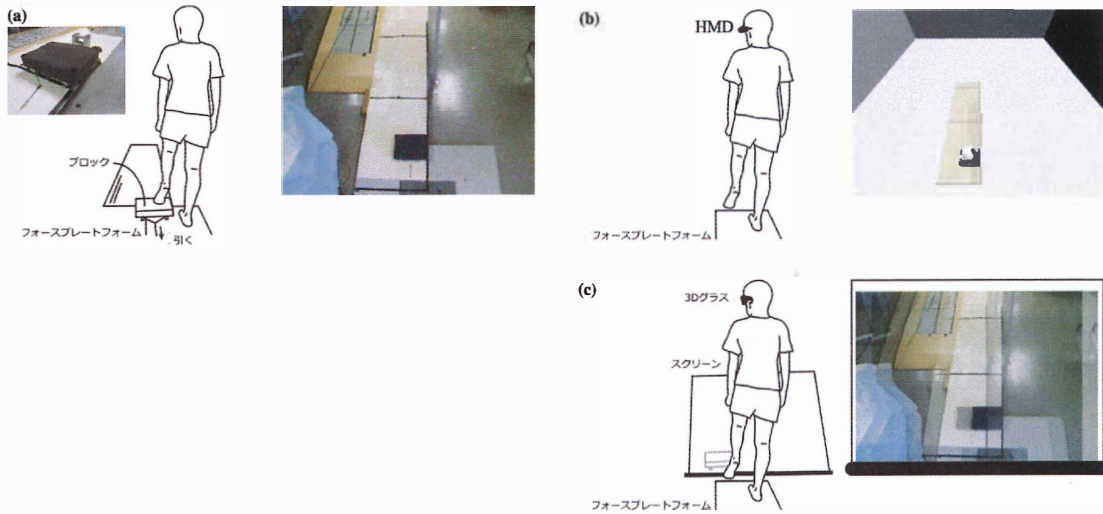


図8 参加者に向かって迫ってくる障害物を避ける課題におけるそれぞれの条件

(A)実環境, (B)HMD, (C)3D-P(Ida et al., 2017より引用)

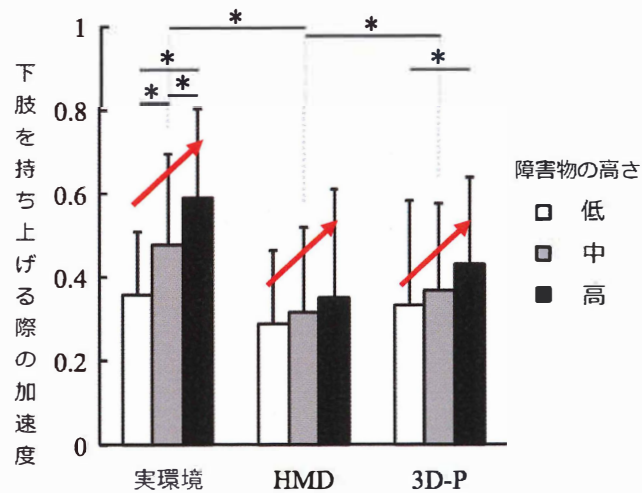


図9 下肢を持ち上げる際の加速度 (Ida et al., 2017より引用)

障害物の高さに応じて下肢を持ち上げる際の加速度を変化させている。

Gerin-Lajoie et al. (2008) は接触回避行動時における実環境とVR環境の行動特性の違いを検証した。若年者を対象に、実物およびVR映像で作成された円柱状の障害物を避ける際の接触回避行動時のパーソナルスペース(空間マージン)を測定した(図10)。その結果、VR環境では実環境に比べてパーソナルスペースを大きくとること、またそれに伴い心拍数が多くなることがわかった(図11)。Gerin-Lajoieらはこれらの結果に基づき、HMDを使用したことで重量や視野角の問題、および不安感が増加したのではないかと考察している。またそれが原因で接触回避行動が大きくなることにつながっていると解釈している。一方で、接触を避ける際の戦略(軌跡)、ならびに右側に比べて左側のパーソナルスペースを作るという結果に関しては実環境と何ら遜色がなかった。このことから完全に実際の環境における行動特性を再現することは不可能であるが、比較検討することにより、一定の類似性を見出すことができる。

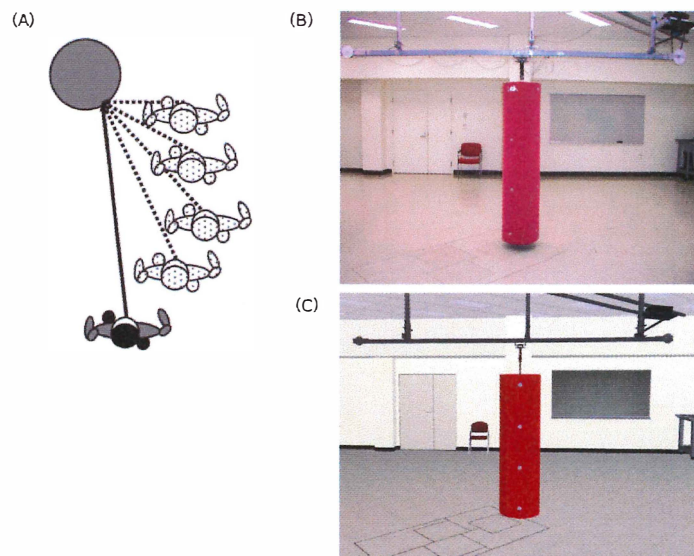


図10 円柱状の障害物を避ける行動(Gerin-Lajoie et al. , 2008より引用)

(A)障害物を避ける際の模式図, (B)実物の障害物, (C)VRの障害物

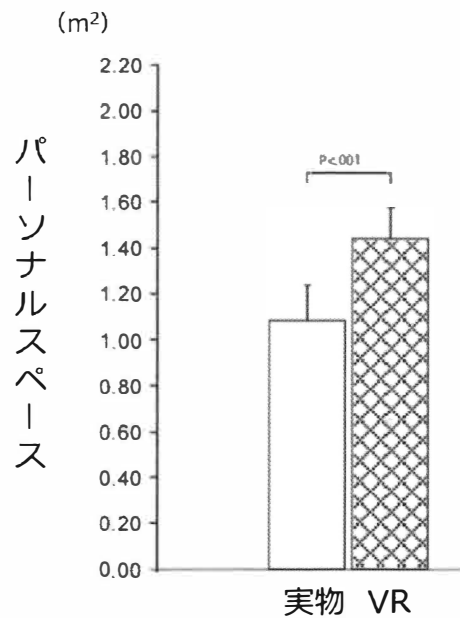


図11 各環境におけるパーソナルスペースの違い(Gerin et al., 2008より引用)

実物よりもVRの障害物に対して接触回避を大きくとる傾向。

以上のように、実環境とVR環境を用いる場合、実環境で生じる行動の結果を比較検討することによって類似している要素を明らかにする必要があると思われる。訓練目的を何にするかで重要な要素は異なってくるため、目的に合致した要素を含むVRかどうか、こういった違いがあるのか十分に検証する必要がある。それにも関わらず、リハビリテーションの場面では、VR技術を用いた訓練ツールが有益であるという報告は見受けられるものの、VR自体が実際の環境で得られる行動特性を再現できているかどうか十分に検討されていない。つまり、実環境との類似性は曖昧なまま、問題となる課題をVRで改善しようと試みることが多い現状がある。Gray & Allsop (2013)は、トレーニングでVRを用いる場合、最も重要な基準として実際の環境への訓練に汎化できるツールであることを最低限おさえてはならず、さらに、VRを応用し運動学習を促進するために、実環境との類似性、没入度などを評価すべきであると述べている。しかし、

現在では没入度を評価する指標がないため、その代替として実環境と比較検討することによって一定の類似性を担保する必要があるだろう。以上のことから、実際の運動への汎化を促進するために類似性だけでなく、VR環境内で生じる実環境との行動の相違をおさえておく必要があると考える。

2.5 VRシステムについて（出力インタフェースのメリット、デメリット）

VRではインタラクションを得るために視覚や聴覚、触覚などの感覚モダリティに固有の出力インタフェースが必要である。出力インタフェースは、バーチャル世界からの情報を人間の感覚受容器に人工的な刺激として与える。視覚に対する出力インタフェースとして、視野をすべて覆うような映像を与える空間没入ディスプレイ、両眼視差による左右の眼での見えの違いをつかって立体視をつくる2眼式視覚ディスプレイの2種類に分けられる。さらに、2眼式視覚ディスプレイには時分割式、偏光方式、パララクスバリア方式、HMDに分けられる。それぞれの特徴を踏まえ、対象者や目的に応じて出力インタフェースを選択する必要がある。

本研究では、2眼式視覚ディスプレイであるスクリーンを用いた時分割方式を採用した（図12）。スクリーンを設置し、プロジェクターから3D映像を投影し、偏光メガネを着用することで3D映像として見えるようになる方式である。ここでは、スクリーンを用いた時分割方式を利用することのメリット、デメリットを時分割式の代表例であるHMDと比較しながら述べる（図13）。

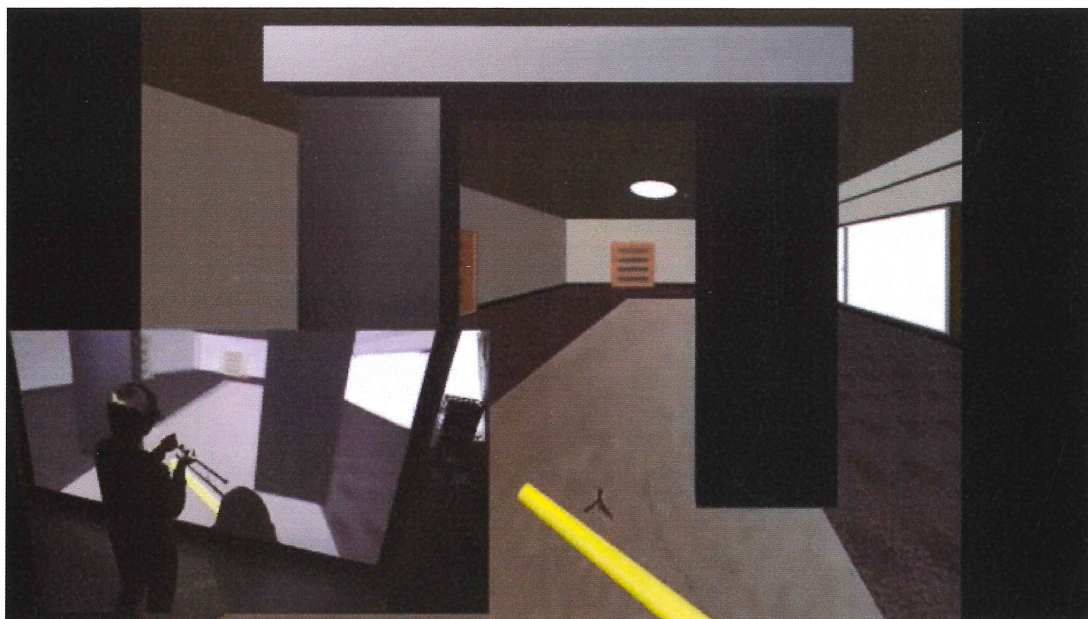


図12 スクリーンを用いた時分割方式

本研究で採用したスクリーンを用いた時分割方式。正式に実験で用いたシステムの概要は第3章：実験報告，1.1.1.2 実験装置（図17・18）を参照。

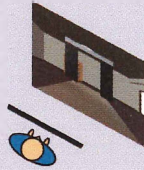

	大型スクリーン 	HMD 
没入感	低い	高い
歩行感覚	受動的（実際の歩行不可）	能動的（実際の歩行可）
脳波との親和性	高い	低い
疲労感	弱い	強い
VR酔い	リスク低い	リスク高い
視野角	広い	狭い
重量感	軽い	重い
応用場面	歩行, 高齢者	机上, スポーツ
その他	何度も接触回避を訓練可能	歩行パラメータを測定可能

図13 スクリーンとHMDのそれぞれの特徴の違い

高齢者において隙間通過場面を経験しようとした場合、高齢者に適していると考えられる部分を赤枠で囲っている。

まずメリットの1つ目として、高齢者で応用しやすいことがあげられる。HMDと比較して、疲労感やVR映像観察による映像酔いが少ないことに合わせ、視野角は広く、自身の身体を視認でき、眼鏡が装着できるといった特徴は高齢者で使用する際にメリットとなることが想定される。たしかにHMDと比較して、VR空間に入り込んだかのような感覚を意味する没入感は劣るものの、高齢者での安全性、応用し易さを考慮すると、スクリーンを用いることは有益であると考えられる。また、メリットの2つ目として、接触回避行動中の脳活動の計測ができることがあげられる。スクリーンを用いた時分割方式であれば3Dメガネを使用することで頭部を覆わなくても済むため、脳波の装着が可能

である。さらに、実際の歩行を伴わずに接触回避行動を行えることで体動を最小限にでき、接触回避行動中の脳活動の計測ができる可能性がある。今までは歩行動作で生じるノイズの低減、除去に対してアルゴリズムを適応することで対応されてきた。しかし、あくまで計算上で算出されたアルゴリズムであるため、接触回避行動における真に迫った脳活動を計測できない可能性がある。このことから、体動によるノイズを低減できることにより移動行動では計測不可能とされていた動的運動中の脳活動計測が可能であるため、接触回避行動における脳内情報処理の変容を解明する糸口になると考える。

スクリーンを用いることのデメリットとして、実際の歩行を行えないことがあげられる。HMDを使用する際には実際の歩行が可能である一方で、スクリーンの場合は実際の歩行が行えないという欠点がある。他者や障害物との接触を回避する有効な方法である歩行の軌道修正、歩行速度の調整、ならびに体幹の回旋という3つの動作修正方略のうち、歩行速度の調整を行えないことは不利益となる可能性がある。本研究では実験者が任意の歩行速度を決めることで映像が自動で進み、足踏みをすることで歩行を擬似的に実施する方法をとっている。左右交互に足をあげる、単脚支持期（片脚立ち）があるという共通点から足踏みで歩行を代用しているが、歩行と足踏みでの身体運動特性は異なるものである（Ralph et al., 2001）。また、トレッドミルを使用することも歩行の代用の候補として考えられるが、トレッドミル歩行においても平地歩行の身体運動特性と同一という見解に対して、未だ意見の一致を得られていない（Murry et al., 1985; Strathy et al., 1983; Arsenault et al., 1986; White et al., 1998）。さらに、トレッドミル歩行で体幹の回旋を大きくしてしまうと危険なことを考慮すると、隙間通過場面においてトレッドミル歩行を採用することは不適であると考え。本実験では歩行自体を再現するのではなく、接触回避行動における体幹の回旋の調整に重点を置いている。ス

クリーンを用いれば隙間を通過する課題を反復的、連続的に実施できるため、体幹を回旋させて接触を避ける練習を単純にその場で何度も訓練することが可能である。

以上のことを考慮した結果、スクリーンを用いた時分割方式を採用するに至った。高齢者へ安全に応用でき、体動を最小限にでき接触回避行動中の脳活動の計測ができる可能性がある。また、スクリーンを用いたことにより、実際の歩行が行えないシステムではあるものの、狭い隙間を通過する訓練を何度も行えるという点は有益であると考えられる。訓練ツールとして使用できるかどうか検討する前に、スクリーンを採用した影響が多分に生じないかを確かめる意味でも、実際の環境で生じる行動特性と比較検討し、調整する必要があるだろう。本実験で開発したVRシステムの構築を確立できれば、適応的な歩行分野における貢献は大きいと想定される。

第 3 節 問題の所在

これまで述べてきたように、一部の高齢者では接触回避場面において行動を調整できず、それが転倒に寄与している可能性がある（セクション1.3）。行動調整能力は、日常の経験の中で自然と身につくルールであり、何度もその場面を経験して覚えていく側面がある（セクション1.4）。しかし、実環境下でそうした訓練を行う場合、障害物との接触を伴う場合があり、怪我や転倒の原因にもなりうる。すなわち、ともすれば「ぶつかりながら覚える」という方法にもなりうるため、高齢者にとっては最善な訓練方法とは言えない（セクション1.4）。接触回避時の適応的な歩行調整能力を高めることのできる効果的な介入方法に関しては検討の余地がある。

そこで本研究では、こうした問題を解決する方策として高齢者の安全な歩行を支援するため、VR技術を利用したトレーニング環境を構築することにある。具体的には、大きく2つの観点からVRシステムの構築を確立する（図14）。第1に、実環境との一定の類似性を担保するため、VRシステムで測定した隙間通過行動の接触回避行動特性が、実環境における接触回避行動の特性（隙間通過時の体幹回旋角度）を再現できているかについて検証する（再現性）。第2に、適応的な歩行調整能力の学習を支援するかどうか検証するため、VR環境による最小限の体幹回旋が求められる隙間通過訓練後に実環境の接触回避の精度が高まるかについて高齢者を対象に検証する（有用性）。

このように、VR環境であれば接触や転倒の危険性がない安全な環境下において、歩行時の適応的な行動調整能力を向上させるための訓練ツールとして応用できる可能性がある（セクション2.2）。本研究において学習支援システムが構築されることで、高齢者の安全な歩行を支援する一助となることが期待される。

VR環境を用いた隙間通過システムの構築

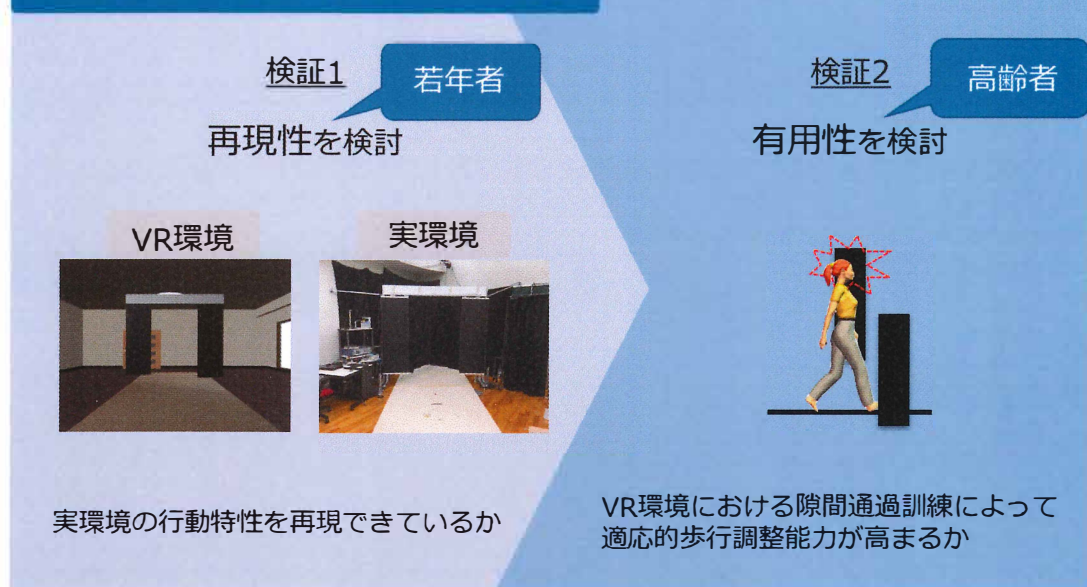


図14 本研究における検証の流れ

2つの検証をもって、VR環境を用いた狭い隙間を通り抜ける際の適応的歩行調整能力を向上させる学習支援システムを構築する。

第 3 章 実験報告

本研究では、検証を大別して2段階で行った。第1検証では、VR環境で測定した隙間通過行動が、実環境における隙間通過時の接触回避行動特性（体幹回旋角度）を再現できているかについて検討した。ここでは、前章で解説したHiguchi et al. (2012)の実験手法を採用した。第2検証では、VR環境を用いた隙間通過訓練によって高齢者の適応的歩行調整能力を改善できるかについて検討した。

第1検証：再現性の検討

第 1 節：実環境における隙間通過時の接触回避行動特性（体幹回旋角度）を再現できているか

本研究では4つの実験を通して実環境における接触回避行動特性の再現性を確立した。実験1、実験2では同一参加者を対象に、実環境とVR環境の接触回避行動特性の違いを探索的に検証した。その結果を踏まえ、実験3でVRシステムの調整、および実験4では参加者への制約を設けることで再現性を得るための補正を行なった（図15）。

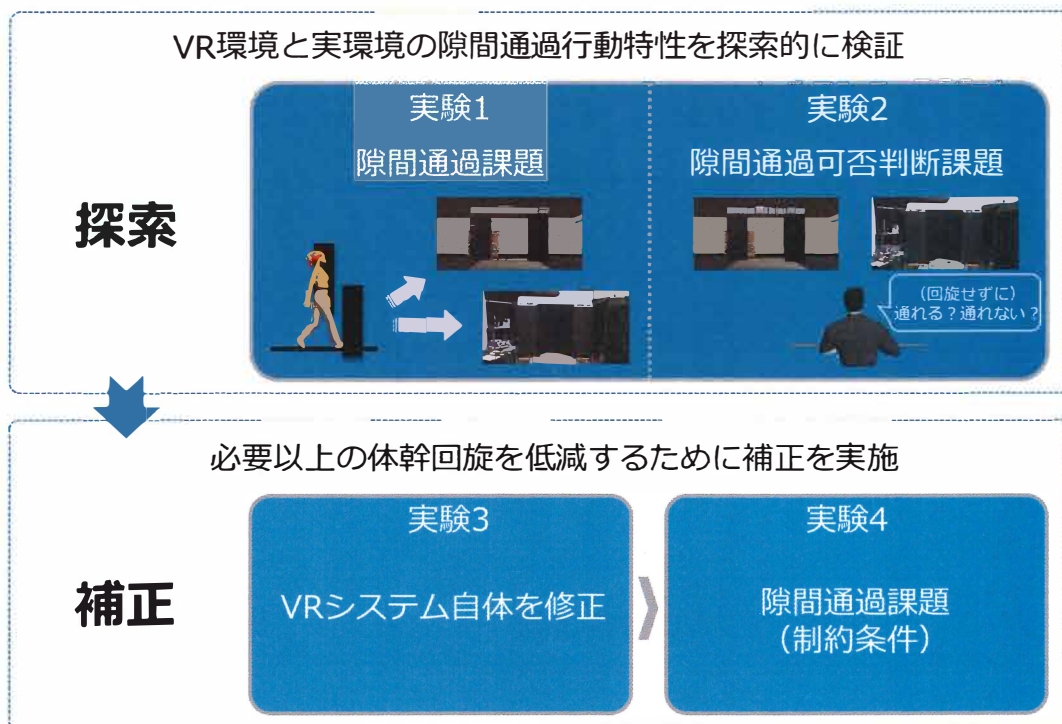


図15 4つの実験を通して再現性を確立

実験1と実験2で両環境における差異を明らかにし、実験3と実験4で両環境の整合性を図るための補正を行なった。

実験1：隙間通過課題における実環境とVR環境の比較

1.1.1 方法

1.1.1.1 実験参加者

実験参加者は、健常若年者10名（男性7名、女性3名、平均年齢 26.0 ± 5.4 歳）であった。実験参加にあたり、実験目的・方法・心身への影響・参加中止の自由について説明を行い、参加者本人から実験内容への同意と実験参加承諾を書面で得た。本研究手続きは、首都大学東京研究安全倫理委員会により審査を受け、承認をされている（承認番号H29-8）。

1.1.1.2 実験装置

①実環境における実験装置

本実験は670cm×590cmの部屋に長さ500cm×幅125cmの歩行通路を設置して行なった。本実験で参加者が通過する隙間は、ムービングドアを用い、歩行通路の400cmの位置に作成した。隙間の奥にある部屋の壁に暗幕を張ることで、壁の模様などから通過幅に関する情報を得られないよう配慮した。ムービングドアは、床面から2mの位置に60.5cm×175.5cmの黒い塩ビ板製のドアを2枚設置して作成した。個々の塩ビ板はモータ駆動により移動でき、その位置をパーソナルコンピュータにより制御した。

歩行動作の解析には13台の三次元動作解析カメラ（OQU300, Qualisys Sweden社製）を用いた。動作解析のサンプリング周波数は120Hzであり、参加者の身体、把持する水平棒、ムービングドアに貼り付けた全11個の反射マーカ（直径1.9cm）を追尾した。マーカの取り付け位置は図16の通りであった。まず、把持する水平棒の端に各1個、中央に1個、取手に各2個の合計5個取り付けした。次に2枚のドアの隙間幅の縁に各3個、合計6個を取り付けた。

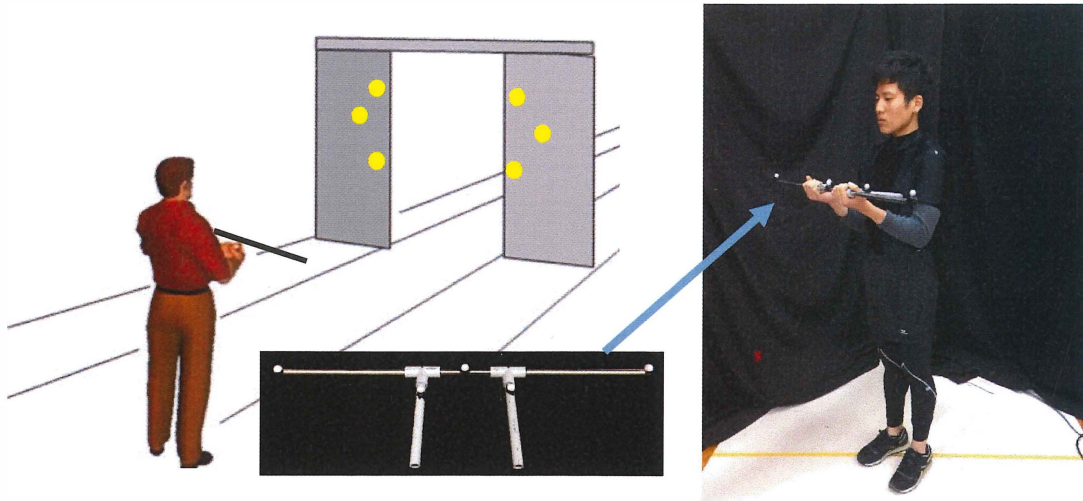


図16 動作解析用反射マーカールの取り付け位置

隙間通過時の体幹回旋角度を算出するため、水平棒およびドアにマーカールを貼り付けた。

②VR環境における実験装置

実験で使用するVR環境はスクリーンを用いた時分割方式を採用した(図17・図18)。実験室に200インチ(横325.1cm×縦243.8cm)の大型スクリーンを設置し、プロジェクター(Sight3D, ソリッドレイ研究所社製)から立体視映像を投影した。足踏みする位置は、大型スクリーンから150cmの位置に設定した。VR刺激はVR構築ソフトウェア(Omega Space, ソリッドレイ研究所社製)によって作成した。動作開始前に参加者に呈示した隙間の映像は、実環境の課題に合わせて、歩行開始位置から歩行通路の400cmから見える映像とした。個々のドアの移動ならびに試技の操作は、Omega Space内の専用スクリプトによって制御した。歩行移動は足踏み動作とし、足をあげた高さが15cmを越えた時点で自動的に映像が前方へ進むように設定した。なお、移動速度は1.5m/sとした。

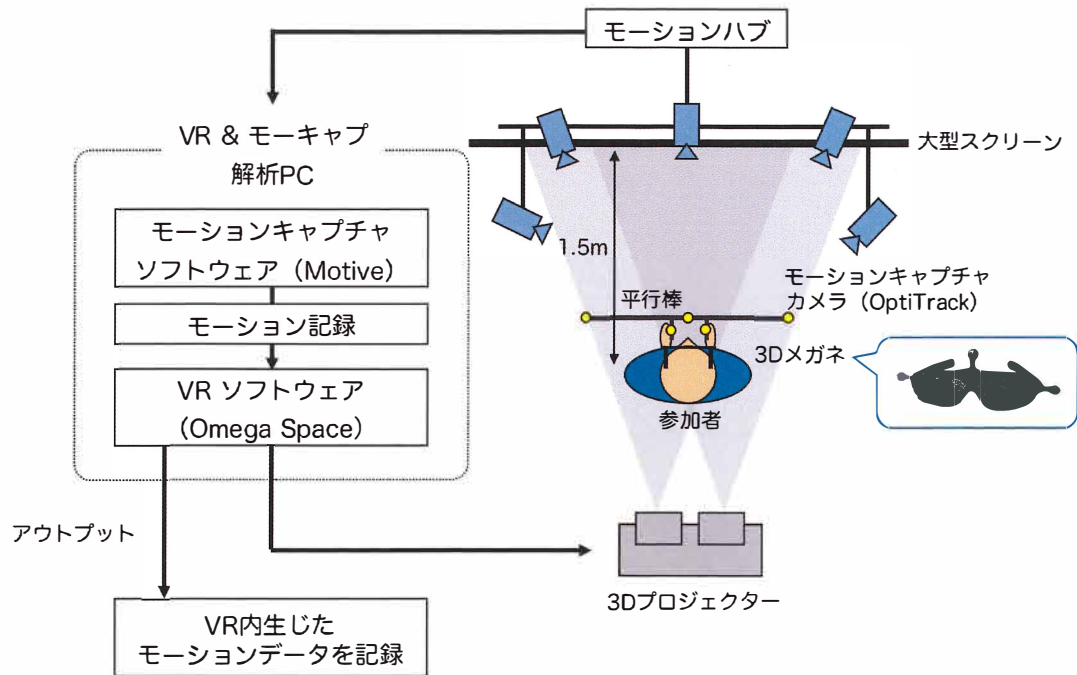


図17 本研究でVRシステムの概略図

モーションキャプチャ (optitrack) にて、マーカーの3次元座標をキャプチャする。次に、ここで計測された動作データは、モーションキャプチャソフトウェアからVRソフトウェア (Omega Space) へと転送される。ここでのデータは、1つは3Dプロジェクターにより投影し、もう1つは、VR空間上の3次元座標データとして出力される。これにより、「隙間通過時のどの時点で体幹の回旋が行われたのか」といった、3次元座標データによるVR空間内の行動特性の記述ができる。

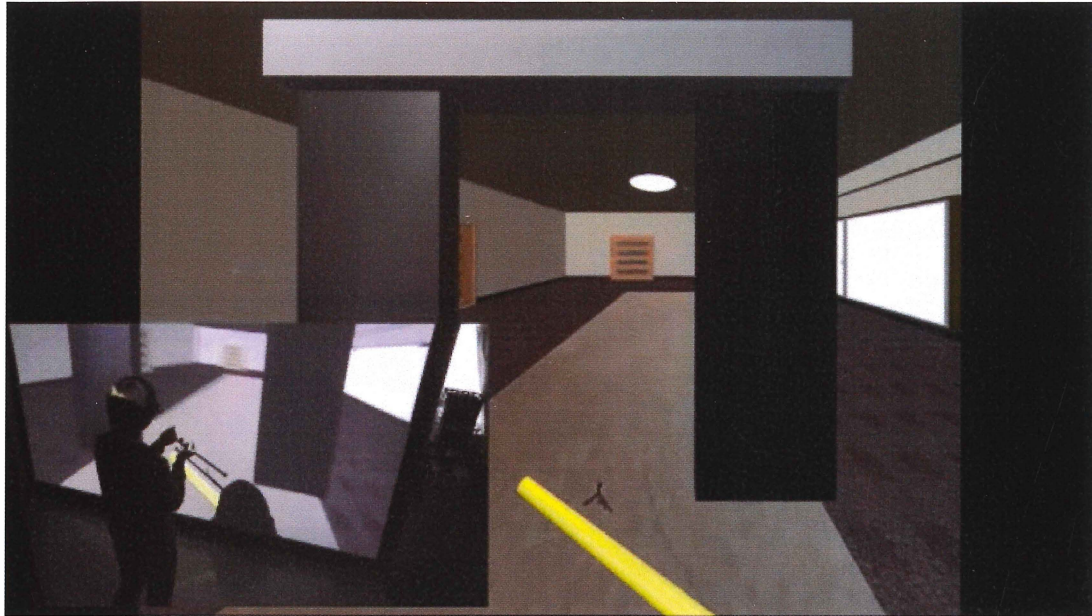


図18 参加者が経験するVR環境

VR環境下での歩行動作計測には三次元動作解析計測システム（OptiTrack, OptiTrack Japan社製）を用いた。参加者の身体に貼付した反射マーカは5台の赤外線カメラによって計測された。計測された三次元座標データは、3点以上のマーカセットを剛体セグメントとして定義し、モーションキャプチャソフトウェア（Motive, OptiTrack Japan社製）からVRソフトウェアへと転送した。この転送データに基づき、歩行動作をリアルタイムに映像と連動させた。水平棒が空間上でドアと接触した場合、視覚的なフィードバック情報として「HIT」と提示した（図19）。提示動作解析のサンプリング周波数は120Hzであり、偏光メガネ、把持する水平棒に貼り付けた全14個の反射マーカ（直径12.7cm/ 1.9cm）を追尾した。マーカの取り付け位置は図20の通りであった。まず、偏光メガネの前額部に1個、両側頭部に各1個、合計3個を取り付けた。さらに膝関節には参加者に衣服によるマーカ位置のズレを減少させるため、膝パ

ッドを着用させ、その上に反射マーカ―を各3個、左右合計6個を貼り付けた。次に、把持する水平棒の端に各1個、中央に1個、取手に各2個の合計5個取り付けた。

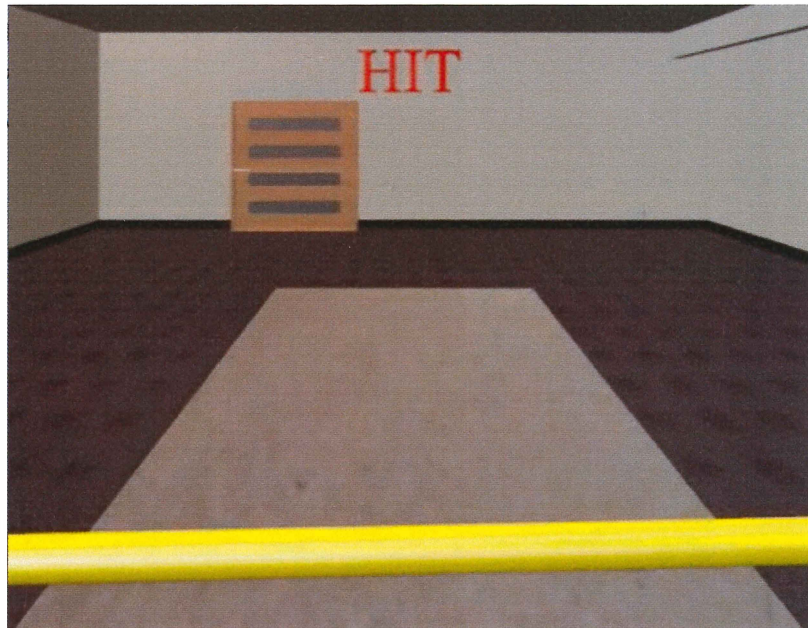


図19 水平棒が空間上のドアに接触した場合「HIT」と提示

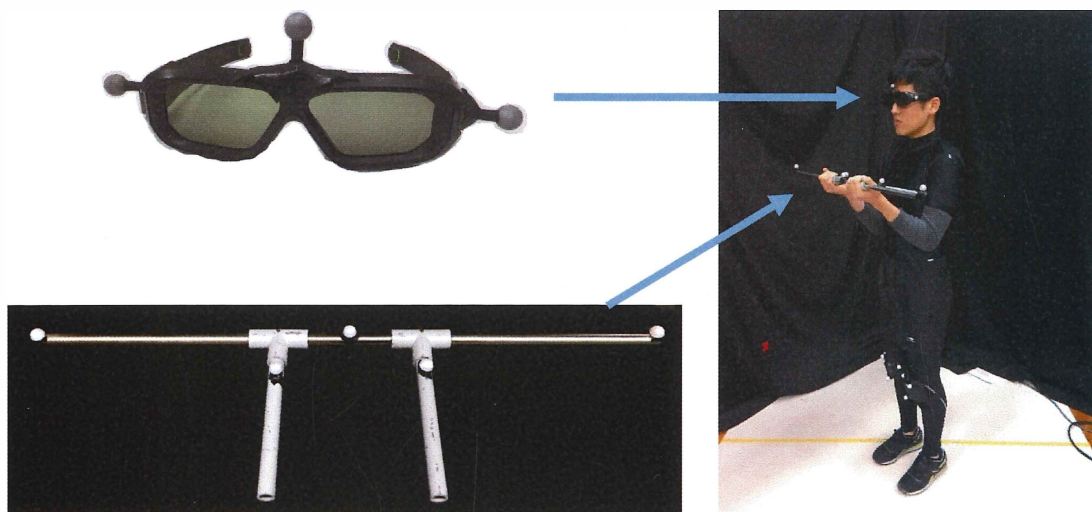


図20 VR環境における動作解析用反射マーカ―の取り付け位置

隙間通過時の体幹回旋角度を算出、ならびに接触情報を提示するため、水平棒、偏光メガネにマーカ―を貼り付けた。

1.1.1.3 実験プロトコル

①実環境における隙間通過時の接触回避行動

対象者は、長さ91cmの水平棒を把持して、歩行開始位置から4m先にあるムービングドアで作られた隙間を、必要に応じて体幹を回旋することで接触せずに歩いて通過した。なお、Higuchi et al. (2012) は、水平棒の長さや隙間の大きさにかかわらず、一定に作るように体幹の回旋角度は調節されていたことを報告している。ムービングドアで作る隙間幅は、水平棒の長さの0.7倍、0.8倍、0.9倍、1.0倍、1.1倍、1.2倍、1.3倍の7条件とした。Warren & Whang (1987) の研究から、通過口の大きさが身体幅の1.3倍より狭い場合に体幹を回旋し始めることが示されているため、1.3倍を最大の隙間幅とし、水平棒の長さ（隙間幅1.0倍）を基準に上下にそれぞれ3条件ずつ設定した。

課題は以下のとおりである。参加者は歩行開始位置で隙間に背を向けて直立した。これにより参加者は歩行開始するまで隙間の状況を把握できないようにした。実験者が隙間操作終了後、隙間の方を向くように指示を出した。参加者は歩いて隙間を通過し、その奥で立ち止まった。実験者は参加者が立ち止まったのを確認し、試行終了の指示を出した。参加者は歩いて歩行開始位置まで戻り、再び歩行開始位置で隙間に背を向けて直立した。隙間の幅は7条件の中から毎試行ランダムに1つを選択した。

②VR環境における隙間通過時の接触回避行動

実環境と同様の課題をVR環境上で実施した。対象者は、長さ91cmの水平棒を把持して、歩行開始位置から4m先にある大型スクリーンに映し出されたVR環境の狭い隙間を、必要に応じて体幹を回旋することで接触せずに足踏み動作をして通過した。歩行移動は足踏み動作とし、対象者の下肢動作が規定値の高さを越えると、自動的に前方へ歩行開始し、歩行中は一定の移動速度で映像が進んでいく（図21）。ムービングドアで作る隙

間幅は実環境と同一であり，水平棒の長さの0.7倍，0.8倍，0.9倍，1.0倍，1.1倍，1.2倍，1.3倍の7条件とした．

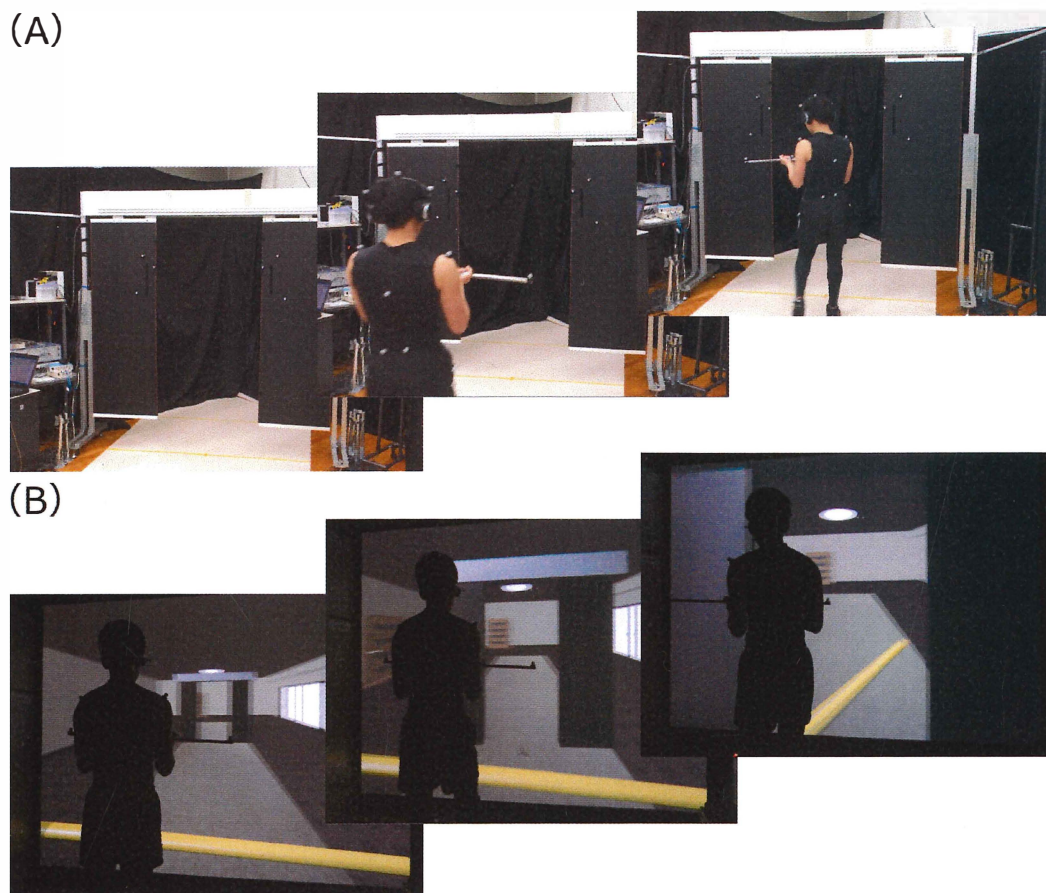


図21 実環境とVR環境で類似した環境を提示 (A) 実環境 (B) VR環境

実環境では歩行，VR環境では足踏みによって自動的に映像を進む中で，隙間通過課題を測定した．

課題は以下のとおりである．参加者は歩行開始位置で視線を下に向けて直立した．これにより参加者は歩行開始するまで隙間の状況を把握できないようにした．実験者が隙間操作終了後，視線を前方にあげ，隙間の方を向くように指示を出した．参加者は足踏

みで歩行を模擬的に行い、映像の中で隙間を通過した。実験者は試行が終了したのを確認し、試行終了の指示を出した。参加者は視線を下に向けながら、実環境と同様、歩行開始位置まで戻り直立した。隙間の幅は7条件の中から毎試行ランダムに1つを選んだ。万が一のVR映像観察による映像酔いに備えて、参加者の近くにエチケット袋を用意した。

実環境課題とVR環境課題での共通事項

参加者は経験する歩行課題の試行数は、2条件（実環境，VR環境）×7条件（隙間幅）×5（繰り返し）= 70試行とした。これらの試行とは別に実験手続きに慣れてもらうための練習を14試行おこなった（環境の2条件×隙間幅の7条件）。このため参加者が行う総実験試行数は84試行となった。経験する条件の順番による影響を避けるため、環境の2条件でカウンターバランスをとった。環境条件間は十分な休息をとった。

なお、実験前に参加者の身体幅（肩幅：両肩峰間の距離）の測定を行い、年齢、身長を聴取し、視機能に問題ないことを確認するため、視力（裸眼，矯正），乱視の有無を聴取，斜視・輻輳の有無を確認した。また、終了後にSimulator Sickness Questionnaire（SSQ）を用いて、VR映像観察によってVR映像酔いが生じていないかを個人間で評価した。SSQは、Kennedy et al.（1993）によって開発されたシミュレータによる酔いや疲労の分析に有効と考えられる16項目からなる質問紙である本実験では筆者が英語を日本語訳に翻訳したSSQを使用した（付録）。参加者は、各項目にそれぞれ0から3の4段階の尺度で主観的評価を行った得点が高いほどVR映像酔いの程度が高いことを示す（計48点満点）。実験1では、SSQの平均点が 3.1 ± 3.2 点であった。途中で中断する参加者がいなかったこと、SSQの総得点からVR映像酔いの影響はないと判断した。

1.1.1.4 実験デザインと分析

実環境とVR環境の行動特性を比較・検討することにより、VRを用いて隙間通過時の接触回避行動特性を再現し得ることを検証した。独立変数は、環境(実環境とVR環境)、隙間幅(水平棒の長さの0.7倍, 0.8倍, 0.9倍, 1.0倍, 1.1倍, 1.2倍, 1.3倍)の2要因とした。従属変数は、隙間通過時の体幹の回旋角度とした。体幹の回旋角度は、直立時と隙間通過時の水平棒両端の結んだ直線がなす角度を算出することで測定した。数値が大きいほど、体幹の回旋角度が大きいことを表す。なお、本実験では水平棒を体幹前面(胸部)に接触させたまま隙間通過課題を行うため、水平棒の回旋角度でなく体幹の回旋角度と表現している。統計解析として、それぞれの従属変数に対して2要因(環境、隙間幅)の分散分析を行った。

再現性の基準として、以下の実環境下で観察される2つの現象をもって隙間通過時の接触回避行動特性が確立されたと判断した(図22)。

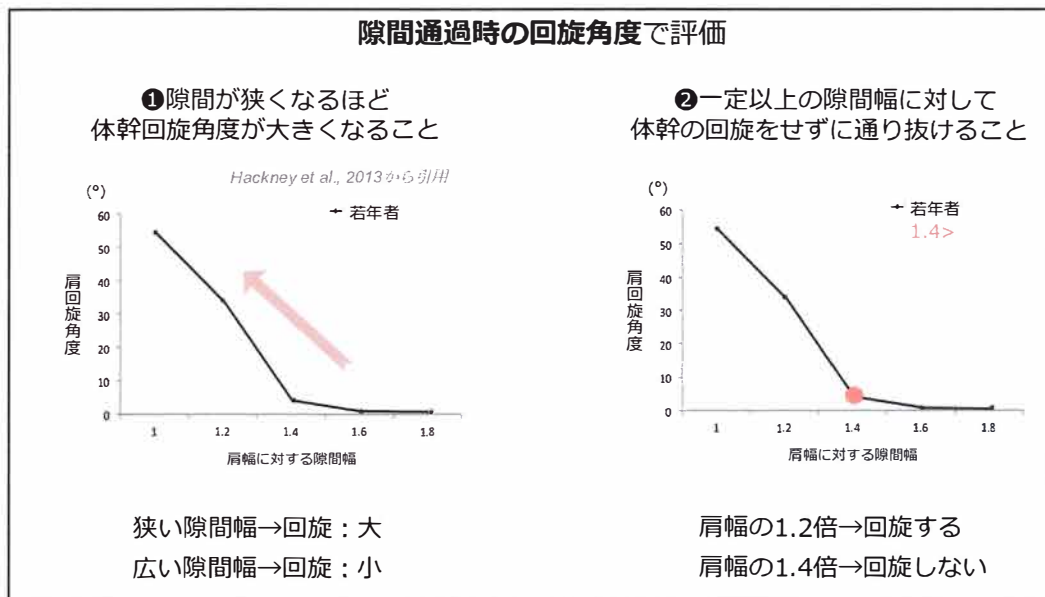


図22 再現性における2つの基準

第1に、隙間が狭くなるほど体幹回旋角度が大きくなる現象である。把持する水平棒の長さ、隙間幅の大きさに応じて体幹の回旋角度の調節を行っていることを確認した。

第2に、一定以上の隙間幅に対して体幹の回旋をせずに通り抜ける現象である。交互作用を確認後、各環境の隙間幅の要因に対して単純主効果の検定を行い、水平棒の長さの1.3倍の隙間幅と比較して有意差がない隙間幅が存在することを統計的に確認した

(Hackney & Cinelli, 2013) (図23)。体幹の回旋するポイントである臨界点が存在することをもって再現性の基準の2つ目が得られたと判断した。

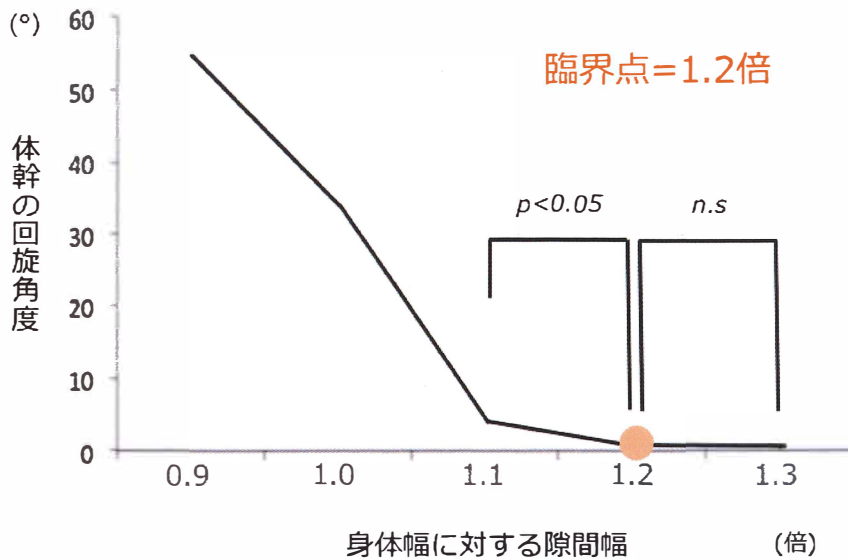


図23 回旋をするポイント（臨界点）の確認方法（筆者作成）

隙間幅の要因において事後検定を行い、隣接する隙間幅の有意差の有無を確認した。ここでは、身体幅に対する1.1倍と1.2倍の隙間幅には有意差が認められ、1.2倍と1.3倍の隙間幅は有意差が認められなかった。そのため、図23の例では、1.2倍を臨界点と判断できる。

なお、1.3倍の隙間幅に関しては、体幹の回旋を必要としない隙間幅と想定した。身体幅より長い水平棒を持った状態では水平棒の1.3倍から体幹を回旋させるというのは非効率的である。例えば、身体幅および水平棒の長さの1.3倍の隙間幅を考える。身体幅が40cmの場合の隙間幅は52cm (40×1.3) となり、隙間を作るドアや壁と身体との距離（安全マージン）は片側で6cm ($(52-40)/2$) となる。91cmの棒の場合、隙間幅は118cm (91×1.3) となり、安全マージンは片側13.5cm ($(118-91)/2$) となる（図24）。片側で13.5cmもの安全マージンがあるにも関わらず、体幹の回旋を行うのは非効率的であるため、水平棒を把持した条件で、1.3倍の隙間幅では体幹回旋せずに通過できると考えた。

もしVR環境で実環境の接触回避行動特性が得られている場合、2要因分散分析において、隙間幅の要因で隣接する水準間で有意差が得られ（再現性の基準1）、ある一定の水平棒の長さに対する隙間幅で臨界点を得られるはずである（再現性の基準2）。

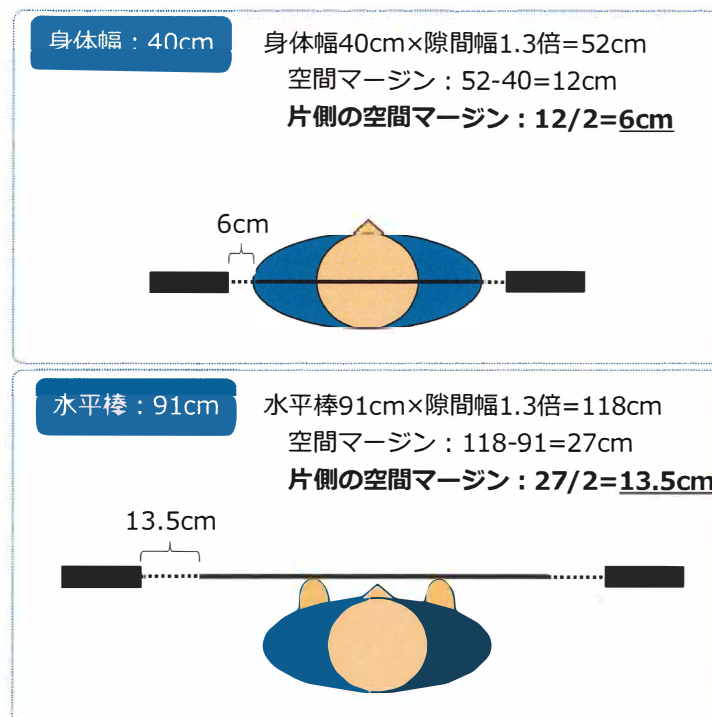


図24 身体幅と水平棒における相対値の違い

身体幅40cmの場合における空間マージンは片側6cmだが、水平棒91cmでは13.5cmとなる。同一の相対値であっても水平棒を把持した状況においては、体幹回旋行動は非効率的であり、体幹回旋することなく通過すると考えられる。

1.1.2 結果

環境の要因で主効果がみられ ($F(1, 9)=17.37, p<.01$) , 実環境よりもVR環境で体幹回旋角度が大きかった. 隙間幅の要因にも主効果が認められ ($F(6, 54)=114.21, p<.01$) , 隙間が狭くなるほど体幹回旋角度が大きくなった. また, 環境と隙間幅の交互作用が有意であった ($F(6, 54)=3.62, p<.05$) (図25) . 各環境における隙間幅の単純主効果の検定をしたところ, 実環境では水平棒の長さに対する隙間幅の0.7倍から1.1倍にかけて隣接する隙間幅に有意差があり, 1.1倍と1.2倍で有意な差は認められなかった. つまり, 体幹回旋を開始するポイントは水平棒の長さに対して1.1倍であった. 一方で, VR環境では体幹回旋をしないと推測した水平棒の長さに対する隙間幅の1.3倍においても, $26.1 \pm 25.5^\circ$ の体幹回旋をしている結果となった.

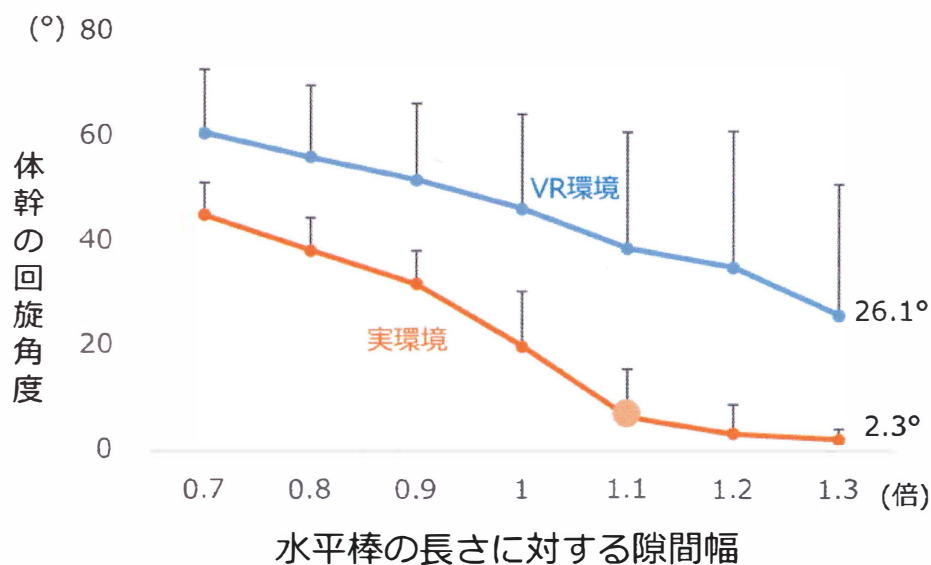


図25 実環境とVR環境における体幹の回旋角度

1.1.3 考察

実験の結果、単純主効果より隙間幅の要因で両環境ともに隣接する水準間で有意差が得られ、隙間が狭くなるほど体幹回旋角度が大きくなる現象については再現性を得た。しかし、VR環境では臨界点では得られず、体幹回旋せずとも通過できると推察した水平棒の長さに対する隙間幅1.3倍においても、VR環境では体幹を回旋して通過する結果となった。つまり、一定以上の隙間幅に対して体幹の回旋をせずに通り抜ける現象は確認できなかった。

1つ目の再現性の基準として設定した「隙間が狭くなるほど体幹回旋角度が大きくなる現象」については、VR環境において再現できることを確認した。環境によって体幹回旋角度の絶対値に差は認められたものの、実環境、VR環境ともにドアと水平棒の間に一定の隙間を作るように、把持する水平棒の長さ、隙間幅の大きさに応じて体幹の回旋角度の調節を行っていることが示された。この結果は、実環境における隙間通過行動と同様の結果である (Warren & Whang,1987 ; Higuchi et al., 2006 ; Higuchi et al., 2012 ; Hackney & Cinelli,2013) 。以上の結果から、体幹回旋角度の相対値に着目して検討すると、実環境下で観察される現象の1つ目の基準である、隙間幅に応じて体幹の回旋角度が生じる点に関しては再現性を得たと言える。

一方で、2つ目の再現性の基準にあたる一定以上の隙間幅に対して体幹の回旋をせずに通り抜ける現象を再現するに至らなかった。水平棒の長さに対する隙間幅1.3倍では、中心を通過した場合に片側に13.5cmもマージンが作られるため、体幹を回旋することなく通過すると考えていた。しかし、VR環境で狭い隙間を通り抜ける課題を行うと、実環境に比べて必要以上に体幹回旋を行い（水平棒の長さに対する隙間幅1.3倍でも体幹回旋を行う）、行動の微調整をせずに隙間を通過する結果を示した。Warren & Whang (1987) において、若年者は自身の身体幅の1.3倍より狭い大きさの隙間幅の時

に体幹を回旋させ通過することがわかっている。しかし、本実験では、身体幅より長い水平棒を持った状態で実験を行っており、水平棒が長くなるほど水平棒の長さに対する隙間幅は大きくなる。そのため、水平棒の長さの1.3倍から体幹を回旋させることは非効率的な接触回避行動である。

本研究では、高齢者の安全な歩行を支援することを目的に、行動の調整を訓練するツールとしてVRシステムを構築することの達成を目指している。それにも関わらず、参加者に隙間に接触しないように通過することを求めた結果、VR環境において安全確保のために単に自身と隙間の中にマージンをあえて多くとってしまい、行動の微調整を避ける傾向を示す結果となったと考える。このことから、実環境に比べてVR環境で必要以上に体幹回旋を行い、行動の調整をせずに隙間を通過する結果を示す理由についてさらなる検証が必要である。

実験1の結果が生じた理由として、そもそも歩行開始前から隙間幅の通過可否判断に違いがあったため、実環境よりもVR環境で大きく体幹の回旋を行ったという可能性が考えられる。もし同じ大きさの隙間幅を提示した際に、実環境と比較してVR環境で歩行開始前から体幹の回旋が必要と知覚判断している場合、行動の調整を行わず、どの隙間幅に対しても一様に大きく体幹の回旋をする可能性が考えられる。そこで、実験2として実環境とVR環境で隙間通過可否判断に違いはあるのかを検証した。

実験2：隙間通過可否判断課題における実環境とVR環境の比較

実験1の結果を踏まえ、歩行開始前からVR環境では大きく体幹の回旋が必要と判断している可能性が推察される。そこで実験2では、こうした推察が正しいかを検証するため、環境間における知覚判断値の影響を検討する。もし推察が正しければ、実環境よりもVR環境で通過可否判断値が大きくなる結果を得られるはずである。

1.2.1 方法

1.2.1.1 実験参加者

参加者は第1実験と同一参加者であった（第3章：実験報告，1.1.1.1 実験参加者）。実験参加にあたり、実験目的・方法・心身への影響・参加中止の自由について説明を行い、参加者本人から実験内容への同意と実験参加承諾を書面で得た。また、本研究手続きは、首都大学東京研究安全倫理委員会により審査を受け、承認をされている（承認番号 H30-9）。

1.2.1.2 実験装置

第1実験と同一の装置を使用した（第3章：実験報告，1.1.1.2 実験装置）。

1.2.1.3 実験プロトコル

実環境では、対象者は長さ91cmの水平棒を把持して、隙間手前の3mの位置で静止立位を取った。また、VR環境では、対象者は長さ91cmの水平棒を把持して、立体視専用メガネを頭部に装着し、大型スクリーンで静止立位を取った。

実環境、VR環境それぞれで実験者がムービングドアを操作し、隙間幅を提示し、体幹を回旋させずに通過できるかどうかを yes-no 方式で答えてもらった（図26）。隙間

幅の提示方法については、心理物理学的手法の1つである階段法を採用した。具体的には、明らかに通過できない狭い隙間（本研究では73cm）から3cm間隔で隙間を広く提示していく上昇系列と、非常に広い隙間（118cm）から3cm間隔で隙間を狭くして提示していく下降系列により、隙間を提示した上昇系列にて2試行連続で通過できると報告した場合、および下降系列にて2試行連続で通過できないと報告した場合に、反対の方向に刺激強度を変え、この反応が変化する点を6点設けた。上昇系列、下降系列それぞれで得られた6点、総数12点の反応変化点における隙間幅の平均を算出した。経験する条件の順番による影響を避けるため、環境の2条件（実環境・VR環境）、提示順序（上昇系列・下降系列）でカウンターバランスをとった。

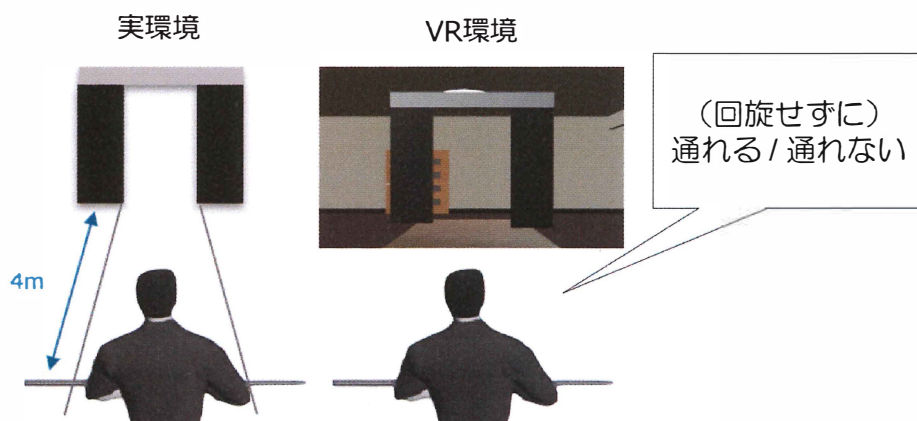


図26 知覚判断課題

1.2.1.4 実験デザインと分析

実環境とVR環境の知覚判断課題を比較・検討することにより、環境の違いによって水平棒と隙間幅との関係性の知覚に違いがあるかを検証した。独立変数は環境、従属変数は知覚判断された隙間幅とした。統計解析は実環境とVR環境で対応のあるt検定を行った。

1.2.2 結果

それぞれの環境における平均値は、実環境で $83.0 \pm 11.9\text{cm}$ 、VR環境で $95.7 \pm 11.1\text{cm}$ であった。対応のあるt検定を行った結果、隙間通過可否判断値はVR環境が実環境に比べて有意に大きかった ($p < 0.01$) (図27)。

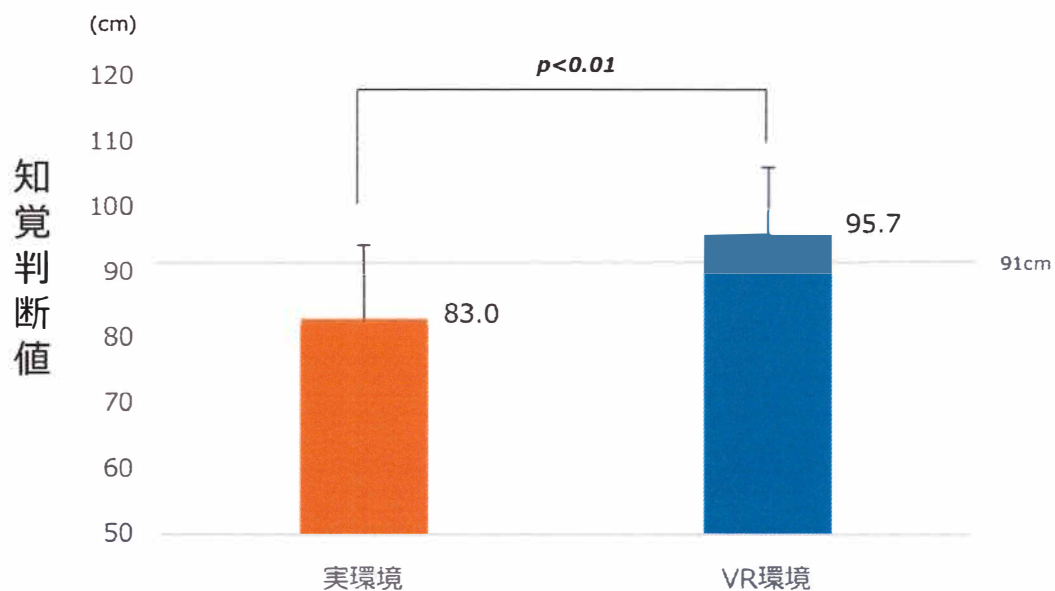


図27 実環境とVR環境における隙間通過可否判断値

2.3.3 考察

隙間通過可否判断課題の結果より、両環境には隙間幅の通過可否判断値に違いがあり、VR環境では通過可否判断値を大きく見積もる傾向を示した。こうした主観的な知覚特性の違いが、実環境よりもVR環境で大きく体幹の回旋を行うという実験1の結果に影響をもたらす可能性を示唆した。

実環境において、把持している水平棒の長さよりも狭い隙間幅でも通り抜けることができると判断する結果となった。先行研究によれば、健常若年者であっても遠方から身体幅よりも大きいモノとともに隙間を通り抜けることを想定した場合、実際には接触してしまう幅を通過できると判断してしまうこと(過小評価)が報告されている(Higuchi et al., 2004,2009; Wagman&Taylor, 2005)。このことから、水平棒の長さよりも狭い隙間幅でも通り抜けられると判断した結果については先行研究と同様の結果である。

一方で、実験2の結果において重要な点は、実環境よりもVR環境で隙間通過可否判断値が有意に大きいことである。この結果が実験1における必要以上の体幹回旋を誘導した可能性がある。実験2では、水平棒の長さ自体を前方の隙間幅で再現するような課題ではなく、体幹を回旋せずに通過できる最小の隙間幅を回答する課題である。参加者は隙間幅との関係性の知覚を行い、VR環境では判断が慎重になる傾向を示したと考えられる。また、実環境とVR環境で知覚判断値に違いが生じた理由として、それぞれの環境における奥行き知覚の問題が考えられる。実際の環境では奥行き知覚をする1つとして両眼視差を利用している。両眼視差を利用することで、毛様体筋によって行われる焦点調整だけでなく、輻輳開散運動を通して奥行きを知覚することができる。しかし、VR空間では実際の輻輳開散運動と焦点調整とは異なるため、奥行き距離にはズレが生じると考える。そのため、実空間における奥行き知覚とVR空間における奥行き知覚の性質

は完全に一致しない可能性がある。こうした環境の性質の違いにより、実環境よりもVR環境で大きく体幹の回旋を必要と判断したと考える。

実験1の結果をみても、水平棒の長さに対する隙間幅1.3倍において、実環境と比較してVR環境では標準偏差が大きい結果となった。参加者によっては実環境の行動特性と類似した結果を得られている場合があると推測した。そこで、実験1・2の結果の追加分析を行い、参加者の特性がないか探索的に検証した。

追加分析（実験1, 実験2）：参加者特性の探索

実験1の結果を追加分析することで、一部の参加者において、体幹の回旋が必要のない隙間幅に対しても大きく体幹の回旋をする参加者がいることが分かった。個人の結果を参照すると、実験1の参加者の半分にあたる5名の参加者に、水平棒の長さに対する隙間幅が1.3倍においても体幹の回旋をする現象がみられ、隙間幅に対して相対的な体幹の回旋角度が得られずにどの隙間幅にも一様に体幹の回旋を行っていることが示された（図28）。この5名は、1.3倍の隙間幅でも大きく接触を避けるグループであるため保守的なグループと名付け、1.3倍の隙間幅では体幹の回旋をせずに通過するグループを対比的に適応的なグループと名付けた。

さらに、実験2の隙間通過可否判断課題の結果においても、実験1のグループ分けをもとに保守的グループ、適応的グループに分け解析を行なった。両環境（実環境、VR環境）においてそれぞれ保守的グループと適応的グループの隙間通過可否判断値をMann-Whitney検定を用いて差の検定を行った。結果として、実環境では有意な差は認められなかった（保守的：83.2±5.3cm, 挑戦的：82.8±17.1cm, $p=.96$ ）。一方で、VR環境で保守的なグループは体幹の回旋をせずに通過できる隙間幅を大きく見積もる傾向を示した（保守的：104.0±6.1cm, 挑戦的：87.4±8.1cm, $p<.01$ ）（図29）。以上のことから、参加者の特性が隙間通過行動に影響した可能性が考えられる。

こうした結果を踏まえると、保守的なグループは安全確保のために自身と隙間の間のマージンを大きくとろうと歩行開始前から計画しており、行動の調整を避けていたことが考えられる。そこで実験3・4では個人差の解消のため、VRシステムの調整、ならびに参加者への条件を追加することで必要以上の体幹回旋を低減できるか検討した。

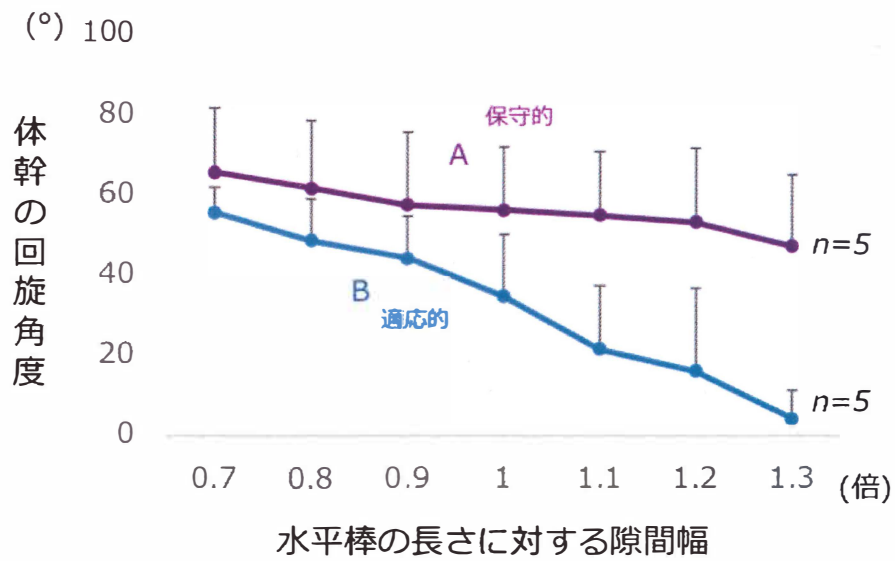


図28 VR環境において保守的なグループと適応的なグループが存在

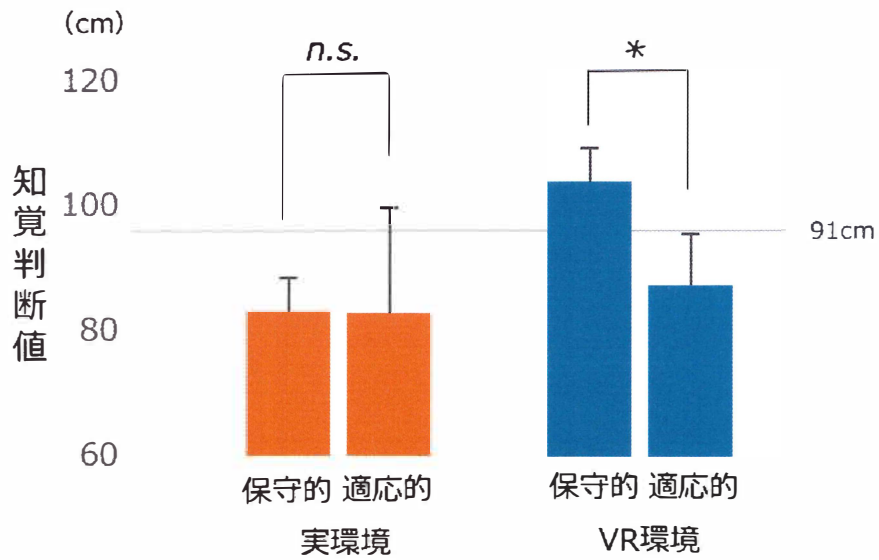


図29 保守的なグループはVR環境において隙間通過可否判断値が大きい

実験3：VRシステム調整によって必要以上の体幹回旋を低減できるか

本研究では、高齢者の安全な歩行を支援することを目的に、行動の調整を訓練するツールとしてVRシステムを構築することの達成を目指している。それにも関わらず、行動の微調整を避ける傾向を示す結果となったことは問題と捉え、実験3では、必要以上の体幹回旋角度を低減させるため、VRシステムの設定を調整した。必要以上に体幹回旋を行うという現象を改善する目的で、VRシステム自体を調整することにより参加者の行動変容を生じさせるか検討した。具体的には、スクリーンに投影されている水平棒の情報を消去、接触情報の追加、VR環境内の移動速度の減速を行なった。

1.3.1 方法

1.3.1.1 実験参加者

実験参加者は、健常若年者10名（男性6名、女性4名、平均年齢 23.2 ± 3.1 歳）であった。実験参加にあたり、実験目的・方法・心身への影響・参加中止の自由について説明を行い、参加者本人から実験内容への同意と実験参加承諾を書面で得た。また、本研究手続きは、首都大学東京研究安全倫理委員会により審査を受け、承認をされている（承認番号 H29-8）。

1.3.1.2 実験装置

第1実験と同一のVRシステムを用い、VRシステムに3点の修正を加えて使用した（第3章：実験報告，1.1.1.2 実験装置）。VRシステムの修正は、①水平棒の出力情報の変更（把持している水平棒と投影している水平棒の情報が存在するため、自身で行為を行っている感覚が阻害された可能性）、②接触時の視覚的フィードバック情報の変更（接触時のフィードバック情報が曖昧であった可能性）、③移動速度の減速（体幹回旋の必

要性を判断する時間が十分ではなかった可能性)を行なった(図30)。なお、移動速度の減速は1.5m/sから1.2m/sに変更した。



図30 VRシステムの調整

1.3.1.3 実験プロトコル

実験1の実験課題をVR環境のみ、VRシステム調整前後で行なった(第3章:実験報告, 1.1.1.3 実験プロトコル)。なお、参加者は経験する歩行課題の総試行数は実験1と同一であるが、環境条件である実環境を省き、新しくVRシステムの調整前後の条件を追加したため、VRシステム調整前後(調整前、調整後)×7条件(隙間幅)×5(繰り返し) = 70試行とした。実験3では、SSQの平均点が 1.7 ± 1.7 点であった。途中で中断する参加者がいなかったこと、SSQの総得点からVR映像酔いは生じていないと判断した。

1.3.1.4 実験デザインと分析

VRシステム調整前後を比較・検討することにより、必要以上に体幹を回旋させる現象を改善できるか検証した。独立変数は、VRシステムの調整の有無（修正前、修正後）、隙間幅（水平棒の長さの0.7倍、0.8倍、0.9倍、1.0倍、1.1倍、1.2倍、1.3倍）の2要因とした。従属変数は、隙間通過時の体幹の回旋角度とした。統計解析としてVRシステムの調整有無（調整前、調整後）× 隙間幅の2要因分散分析を行なった。

1.3.2 結果

VRシステムの調整の有無で主効果がみられ（ $F(1, 9)=26.89$, $p<.01$ ），調整後に体幹回旋角度が小さくなる結果が得られた。隙間幅の要因にも主効果が認められ（ $F(6, 54)=22.16$, $p<.01$ ），隙間が狭くなるほど体幹回旋角度が大きくなった。また、交互作用は有意でなかった（ $F(6, 54)=0.83$, $p=.47$ ）（図31）。VRシステムの調整後においても、水平棒の長さに対する隙間幅の1.3倍で $20.0 \pm 14.4^\circ$ の体幹回旋をしている結果となった。

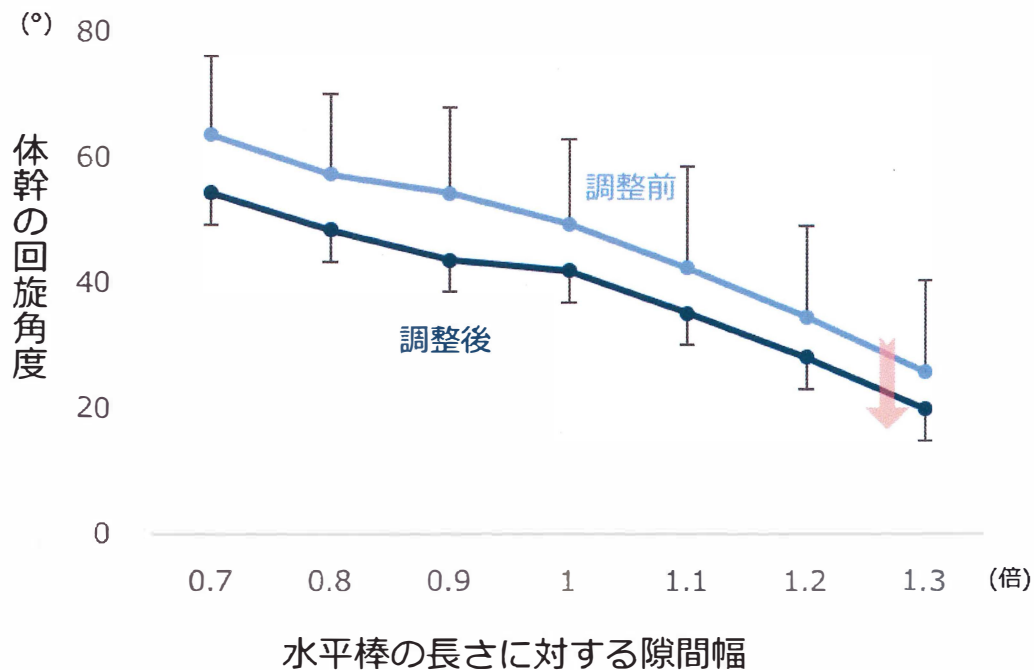


図31 VRシステム調整前後における体幹の回旋角度

1.3.3 考察

実験3では、実験1で行った隙間通過課題に対し、VRシステムに3つの調整を加えることでVR環境での必要以上に体幹を回旋させる現象を改善できるか検証した。その結果、VRシステム調整後に各隙間幅に対する体幹回旋角度が全体的に小さくなるという、一定の効果が得られた。ただし、実験1と同様の現象、必要以上に体幹回旋を行い、行動の微調整をせずに隙間を通過するという行動の改善には至らなかった。

VRシステムを調整することで体幹の回旋角度を下げる事ができた。水平棒の長さに対する隙間幅1.3倍における体幹の回旋角度は、調整前 $25.8 \pm 14.7^\circ$ 、調整後 $20.0 \pm 14.4^\circ$ であった。VRシステムの調整として、①水平棒の出力情報の変更、②接触時の視覚的フィードバック情報の変更、③移動速度の減速を行なった。どの調整が最も影響

を与えたかは今回の実験からは断言できないが、VRシステムを調整することによって一定の効果を得ることができたと考える。

一方で、VRシステム自体を調整しても必要以上に体幹回旋を行うという現象を改善するに至らず、参加者の行動変容を生じさせる影響は乏しい結果となった。実験1から実験3の結果を踏まえ、そもそも保守的な参加者においては、どの環境が提示されても歩行開始前から安全確保のために自身と隙間の中のマージンを大きくとろうと計画しており、行動を微調整する能力があったとしても最初から行動の調整を避ける可能性がある。そこで実験4では、行動を調整することに焦点を当てるために、参加者に対して最小限の回旋という制約を設け、必要以上の体幹回旋を低減により再現性の2つの基準を確立できるか検証した。

実験4：制約を設けることによって必要以上の体幹回旋を低減できるか

実験4では、必要以上の体幹回旋の低減を得るために、教示によって行動に制約を設けた条件下で隙間通過課題における体幹の回旋角度の変化を検討する。もし推察が正しければ、制約を設けることで必要以上の体幹回旋を低減し、隙間幅に応じて行動調整する結果が得られるはずである。

1.4.1 方法

1.4.1.1 実験参加者

実験参加者は、健常若年者10名（男性5名，女性5名，平均年齢 24.7 ± 5.9 歳）であった。実験参加にあたり、実験目的・方法・心身への影響・参加中止の自由について説明を行い、参加者本人から実験内容への同意と実験参加承諾を書面で得た。また、本研究手続きは、首都大学東京研究安全倫理委員会により審査を受け、承認をされている（承認番号 H29-8）。

1.4.1.2 実験装置

第1実験と同一の装置を使用した（第3章：実験報告，1.1.1.2 実験装置）。

1.4.1.3 実験プロトコル

第1実験と同一のプロトコルで実施した（第3章：実験報告，1.1.1.3 実験プロトコル）。なお、実験1ではムービングドアで作られた隙間を必要に応じて体幹を回旋することで接触せずに歩いて通過するよう伝えたが、実験4では“できる限り体幹の回旋を最小限に抑える”ことを目標として隙間を通過するという制約を設けた。実験4では、SSQの

平均点が 4.6 ± 3.8 点であった。途中で中断する参加者がいなかったこと、SSQの総得点からVR映像酔いは生じていないと判断した。

1.4.1.4 実験デザインと分析

第1実験と同一の実験デザインと分析を実施した（第3章：実験報告，1.1.1.4 実験デザインと分析）。

1.4.2 結果

環境で主効果がみられ ($F(1, 9)=23.21, p<.01$)，VR環境では実環境と比較して体幹回旋角度が大きかった。隙間幅の要因にも主効果が認められ ($F(6, 54)=116.78, p<.01$)，隙間が狭くなるほど体幹回旋角度が大きくなった。環境と隙間幅の交互作用は有意であった ($F(6, 54)=3.51, p<.01$)（図32）。各環境における隙間幅の単純主効果の検定をしたところ，VR環境では水平棒の長さに対する0.7倍から1.2倍にかけて隣接する隙間幅に有意差があり，1.2倍と1.3倍で有意差はなかった。つまり，VR環境における体幹回旋を開始するポイントは水平棒の長さに対して1.2倍の隙間幅であった。また，実環境では水平棒に対する0.7倍から1.1倍にかけて隣接する隙間幅に有意差があり，1.1倍と1.2倍で有意差はなかった。つまり，実環境における体幹回旋を開始するポイントは水平棒の長さに対して1.1倍の隙間幅であった。

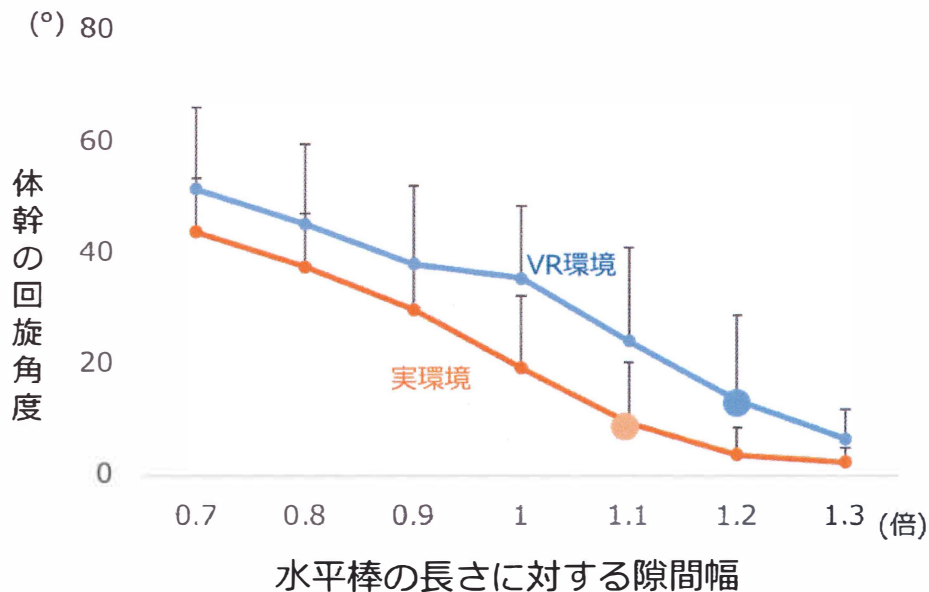


図32 制約を設けた条件下における実環境とVR環境の体幹の回旋角度

1.4.3 考察

出来るだけ体幹回旋をしないという制約条件下では、VR環境での隙間通過時の接触回避行動は実環境での接触回避行動に近づくことがわかった。つまり、実験4において、制約条件下では再現性の基準としてあげた2つの行動特性が得られる結果となった。

隙間の大きさに応じた体幹回旋角度の調整については再現性を得られた。つまり、再現性の基準の1つである、隙間が狭くなるほど体幹回旋角度が大きくなるという基準に合致する結果となった。この結果に関しては、実験1においても再現性を得られており、実環境、VR環境ともに制約を設けても、隙間幅の大きさに応じて体幹の回旋角度の調節を行っていることが示された。

実験4では制約を設けることで、体幹の回旋角度を小さくする結果が得られた。実験1では、VR環境で狭い隙間を通り抜ける課題を行うと、実環境に比べて必要以上に体幹回旋を行い、水平棒の長さに対する隙間幅が1.3倍であっても体幹の回旋を行っていた。このことから、制約を設けず自由にVR環境で狭い隙間を通り抜ける課題を行う

と、VR環境では接触を避けることを優先し、保守的な行動を選択したことが考えられる。そこで実験4で最小限の体幹回旋を求めたところ、VR環境では水平棒の長さの1.2倍よりも広い隙間幅は体幹の回旋をせずに通過することを示した。制約を設けることで行動を微調整することに焦点を当てることができ、参加者の個人特性に関わらず、再現性の基準としてあげた一定以上の隙間幅に対して体幹の回旋をせずに通り抜けることが再現できたと考える。

第2検証では、このVR環境での訓練後に実環境の接触回避の精度を高めるかについて検証した。

第2検証：有用性の検討

第2節：VRによる隙間通過訓練によって高齢者の適応的歩行調整能力を改善できるか

第1検証で4つの実験を通して、隙間通過時の接触回避行動を再現するVR環境の構築した。第2検証では高齢者の対象者を追加して、このVR環境での最小限の体幹回旋が求められる隙間通過訓練後に、実環境における適応的歩行調整能力を改善できるか検討した。なお、第2検証では、ぶつからずに隙間幅に応じて微調整する能力が高まるかを判断するため、従属変数として隙間通過時の体幹回旋角度の他に、ドアとの接触率を追加した。

実験5：VRによる最小限の体幹回旋が求められる隙間通過訓練後に実環境の接触回避の精度を高めるか

2.1 方法

2.1.1 実験参加者

実験参加者は、健常高齢者25名であった。また、高齢者との行動比較のため健常若年者16名に対しても実験を行なった。高齢者、若年者ともに実験開始前に「介入群」と「統制群」の2つのいずれかにランダムに振り分けた。高齢者は、介入群13名（男性5名、女性8名、平均年齢 71.3 ± 7.5 歳）、統制群12名（男性5名、女性7名、平均年齢 71.2 ± 6.5 歳）であった。若年者は、介入群8名（男性4名、女性4名、平均年齢 21.6 ± 2.3 歳）、統制群8名（男性4名、女性4名、平均年齢 21.5 ± 2.6 歳）であった。高齢者の参加者に関しては、移動能力ならびに認知能力の基礎特性を把握するため、高齢者の機能的移動能力評価として国際的に使用されているTimed up and go test（以下、TUG）、ならびに認知機能評価バッテリーであるMini-Mental State Examination（以下、MMSE）を実施した。その結果、TUGの平均歩行時間 6.4 ± 1.2 秒、MMSEの平均点が 28.9 ± 1.9 点

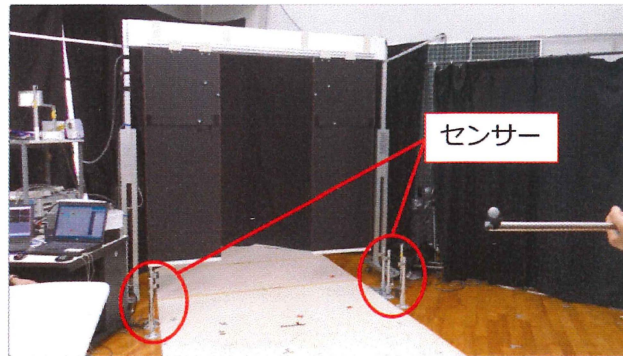
であった。この結果から、地域在住高齢者の転倒リスクにおけるテストのカットオフ値として13.5秒以上と報告されていること（Shumway-cook et al., 2000）、認知症疑いと判断されるカットオフ値が23点以下と報告されていることを考慮すると（森, 1985）、移動機能、認知機能に問題がない高齢者と判断した。

実験参加にあたり、実験目的・方法・心身への影響・参加中止の自由について説明を行い、参加者本人から実験内容への同意と実験参加承諾を書面で得た。また、本研究手続きは、首都大学東京研究安全倫理委員会により審査を受け、承認をされた（承認番号H30-10修正）。

2. 1. 2 実験装置

第1実験と同一の装置を使用した（第3章：実験報告, 1. 1. 1. 2 実験装置）。それに追加して、ムービングドアの70cm手前に自動センサーを置き、自動センサーの前を通過すると自動でムービングドアが開くように制御した（図33）。自動センサーを使用することで、隙間通過時に体幹の回旋をしなくとも接触しないよう環境を設定し、測定課題においてぶつかって覚えることのないよう条件を設定した。

歩行前



隙間通過直前

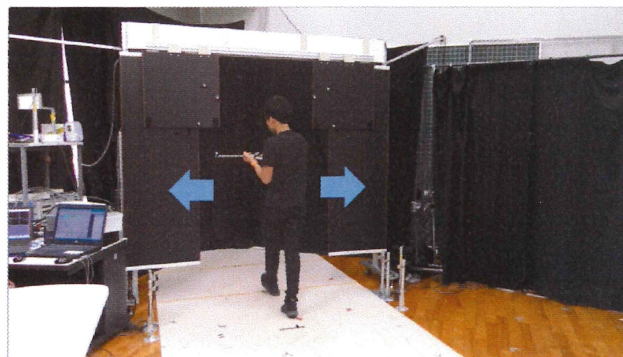


図33 隙間通過時に接触しないようにする工夫

隙間通過直前に自動センサーを設置することにより、直前にドアが開くように設定した。そのため、もし体幹の回旋に失敗したとしても、参加者はドアに接触せずに測定が行える。

2.1.3 実験プロトコル

実験手続きは、事前測定、介入、事後測定の3つの構成とした（図34）。

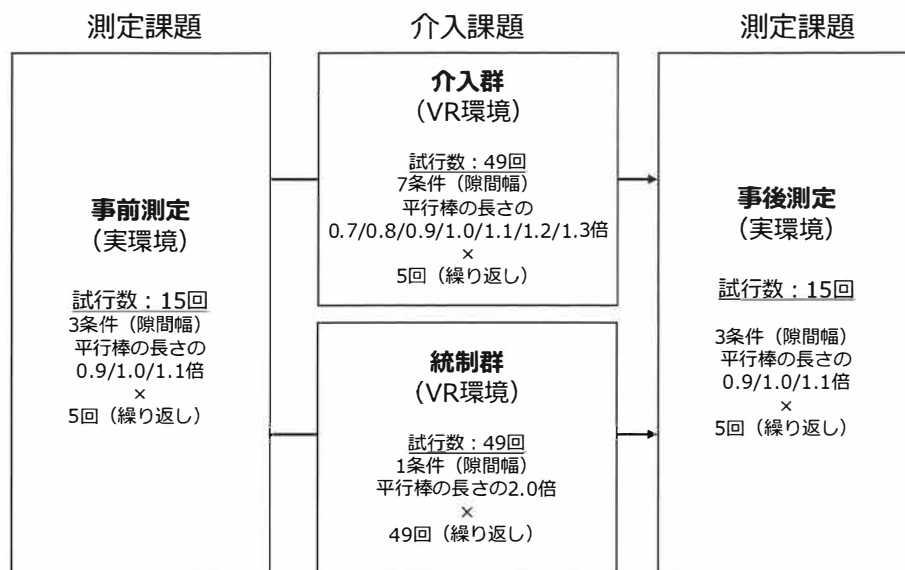


図34 第2検証（有用性実験）の流れ

測定課題では、実環境で隙間通過課題を行った。“できるだけ体幹を回旋しない”という制約下で隙間に接触せずに歩いて通過した。実際には、自動センサーの前を通過すると自動でムービングドアが開くように制御しているため、接触は生じないが、ムービングドアが動く前のドアの位置を想定して接触せずに通過した。ムービングドアで作る隙間は、検証1の結果を踏まえ、体幹の回旋角度の標準偏差が大きかった水平棒の0.9倍、1.0倍、1.1倍の隙間幅3条件とした。事前・事後測定では、実環境において同一の隙間通過課題を実施した。事前測定として、試行数は3条件（隙間幅）×5（繰り返し）=15試行とした。これらの試行とは別に実験手続きに慣れてもらうための練習を3試行おこなうため（隙間幅の3条件）、参加者が行う総実験試行数は18試行となる。なお、事後測定では練習試行を行わないため、試行数は3条件（隙間幅）×5（繰り返し）=15試行とした。

介入課題としてVRシステムで歩行課題を行なった。介入群では、“できるだけ体幹を回旋しない”という制約下で、足踏み動作をして隙間に接触せずに通過した。ムービングドアで作る隙間は、第1検証との整合性を確認するために第1検証と同一の隙間幅7条件（水平棒の0.7倍，0.8倍，0.9倍，1.0倍，1.1倍，1.2倍，1.3倍）とした。これに対して統制群では、体幹の回旋を必要としない隙間幅を足踏み動作で隙間を通過した。隙間幅は1条件であり、水平棒の長さの2.0倍（体幹を回旋せずとも通れる幅）とした。介入群では、試行数は7条件（隙間幅）×7（繰り返し）= 49試行とした。統制群では、総試行数は介入群と同一にし、試行数は1条件（隙間幅）×49（繰り返し）= 49試行とした。これらの試行とは別に実験手続きに慣れてもらうための練習を7試行おこなうため（隙間幅の介入群：7条件，統制群：1条件），介入課題における参加者が行う総実験試行数56試行であった。

よって、予備練習と測定課題（前後），介入課題（介入群もしくは統制群）で経験する総試行数は89試行であった（実環境：予備練習3試行，事前測定15試行，事後測定15試行，VR環境：予備練習7試行，介入課題49試行）。

2.1.4 実験デザインと分析

VRによる隙間通過訓練によって、歩行時における適応的な調整能力が高まるかを検証した。独立変数は、参加者（高齢者，若年者），介入前後，介入条件（介入群，統制群）の3要因とした。従属変数は、隙間通過時の体幹回旋角度およびドアとの接触率とした。統計解析として、各従属変数に対し3要因の分散分析を行った。また、高齢者における加齢による影響を検討するため、訓練前後のドアとの接触回数と年齢の相関分析を行った。

2.2 結果

2.2.1 隙間通過時の体幹回旋角度

各条件における隙間通過時の体幹の回旋角度は、図35の通りである。3要因分散分析を行った結果、参加者の要因の主効果が有意であり ($F(1, 74)=22.068$, $p<.01$, $\eta^2=.230$)、若年者ほど体幹の回旋角度が大きかった。また介入前後 ($F(1, 74)=.378$, $p=.541$, $\eta^2=.005$)、介入条件 ($F(1, 74)=.38$, $p=.841$, $\eta^2=.001$) に主効果は認めなかった。参加者×介入条件×介入前後 ($F(1, 74)=.352$, $p=.555$, $\eta^2=.005$)、参加者×介入前後 ($F(1, 74)=2.097$, $p=.152$, $\eta^2=.028$)、参加者×介入条件 ($F(1, 74)=.123$, $p=.727$, $\eta^2=.002$)、介入前後×介入条件 ($F(1, 74)=.797$, $p=.375$, $\eta^2=.011$) の項目において、交互作用は認めなかった。

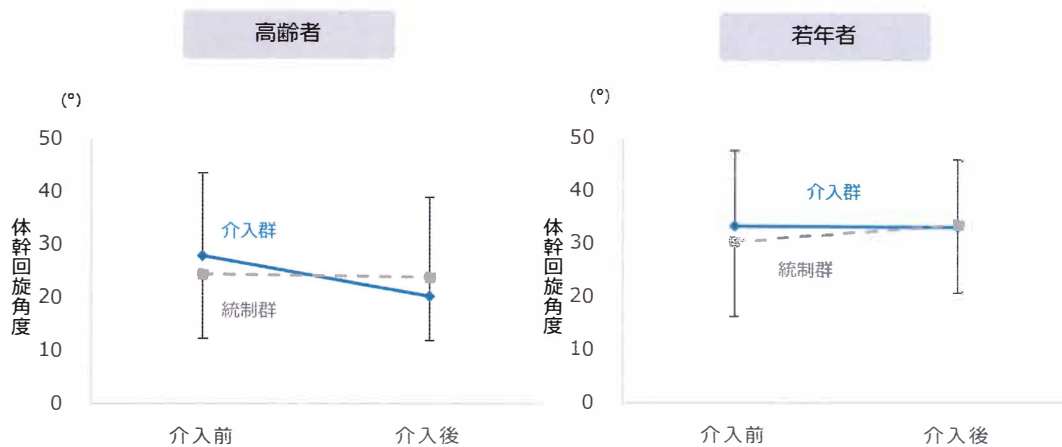


図35 VR訓練前後の体幹回旋角度

2.2.2 隙間通過時のドアとの接触率

各条件における隙間通過時の接触率は、図36の通りである。高齢者における接触頻度は、介入群で訓練前12.3%、訓練後22.0%、統制群で訓練前15.0%、訓練後13.3%であった。若年者における接触頻度は、介入群で訓練前2.5%、訓練後3.3%、統制群で訓練前7.5%、訓練後4.1%であった。

3要因分散分析を行った結果、参加者の要因の主効果が有意であり ($F(1, 74)=15.081$, $p<.01$)、高齢者ほど接触率が高かった。また介入前後 ($F(1, 74)=.569$, $p=.453$)、介入条件 ($F(1, 74)=.108$, $p=.743$) に主効果は認めなかった。参加者×介入条件×介入前後 ($F(1, 74)=.785$, $p=.378$)、参加者×介入前後 ($F(1, 74)=.129$, $p=.720$)、参加者×介入条件 ($F(1, 74)=.129$, $p=.646$)、介入前後×介入条件 ($F(1, 74)=.569$, $p=.453$) の項目において、交互作用は認めなかった。

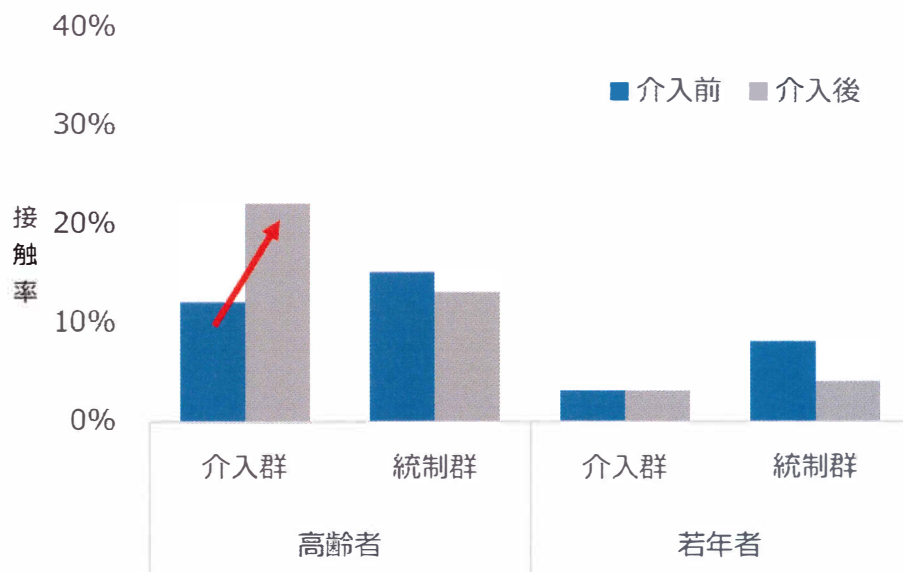


図36 VR環境での訓練前後の接触率の変化

高齢者における訓練後に接触回数が増加している参加者の特性を検討した。その結果、介入群において接触回数の増加は年齢と有意な相関を認めた ($r=.852$, $p<.01$)。なお、統制群においては有意な相関は認めなかった ($r=.027$, $p<.934$) (図37)。つまり、介入群において、年齢が高くなるにつれて訓練後に接触回数が高まる傾向を示した。

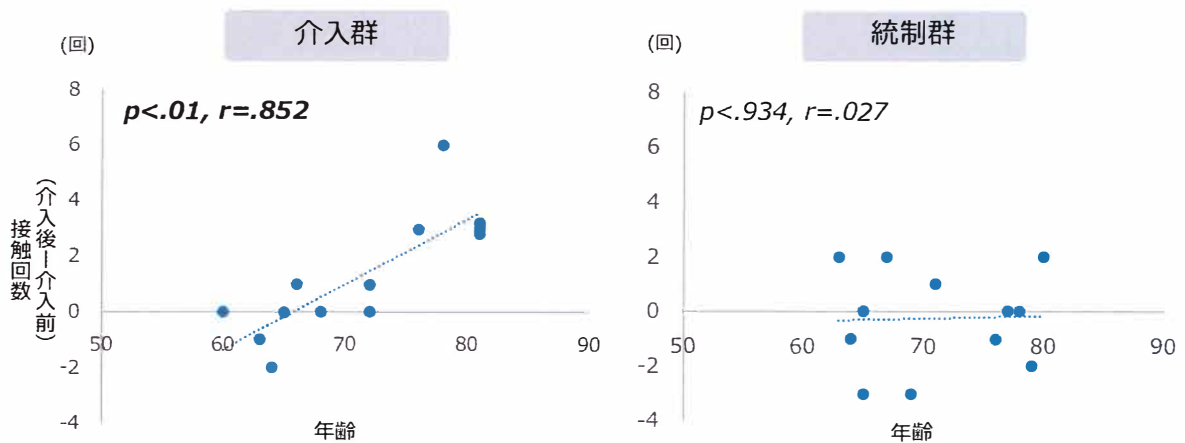


図37 VR環境での訓練前後の接触回数の変化

2.3 考察

本実験では、第1検証によって構築したVR環境を用いることで、高齢者の適応的な歩行調整能力が高まるかを検証した。歩行調整能力が高まったかどうかは、VR環境での訓練によって体幹の回旋角度が小さくなること、ただし、それにより接触回数が増加することがないことを持って判断した。実験の結果、現状では統計的に支持ができないものの、対象を高齢者に限定すると、介入群では介入後に体幹回旋角度の絶対値が低減する結果を得られた。一方で、高齢者の介入群においてのみ訓練後に接触率が増加することがわかった。この結果は、VR環境の経験後は「できるだけ回避動作を大きくしない」という教示に応じた行動の変化が認められた。しかし同時に障害物との接触も増大したことから、VR課題の改善が必要である可能性を示唆している。

3元配置分散分析において統計的に介入効果を示す交互作用は得られなかった。高齢者における体幹の回旋角度は、介入群で訓練前 $27.8 \pm 15.5^\circ$ 、訓練後 $20.2 \pm 18.5^\circ$ 、統制群で訓練前 $24.3 \pm 12.1^\circ$ 、訓練後 $23.7 \pm 12.0^\circ$ であり、介入群では介入後に体幹回旋角度の絶対値が低減している。今回は高齢者を対象にVR環境での隙間通過訓練の効果を検討しているため、追加分析として、参加者の要因（若年者）を除外した2元配置分散分析を行った。その結果、介入前後 ($F(1, 23) = 9.024$, $p < .01$, $\eta^2 = .282$, $B-1 = .820$) の要因に主効果が認められ、介入群において介入後に体幹の回旋が小さくなる傾向を示した。なお、介入条件 ($F(1, 23) = .010$, $p = .923$, $\eta^2 = .000$, $B-1 = .051$) に主効果は認めなかった。また、介入効果を示す介入前後 \times 介入条件 ($F(1, 23) = 4.683$, $p < .05$, $\eta^2 = .169$, $B-1 = .545$) に交互作用を認めた。第1検証では、高齢者において狭い隙間を通り抜ける際に必要以上に体幹を回旋するという Hackney & Cinelli (2013) の研究をもとに、実環境における隙間通過時の体幹回旋角度を再現できるように調整してきた。その要所をVR環境で実際に繰り返し経験できたことで、身体情報と隙間幅との情報を関

連づけられるようになったことが改善に影響を与えたと考える。なお、若年者では高齢者と比較して、体幹回旋角度が大きいものの、訓練前後で変化が生じない結果になった。若年者では、もともと効率的に歩行調整を行えていることを考慮すると、VR環境で訓練するかどうかに関わらず、接触を避けるための最小限の体幹回旋で通過していたことが考えられる。以上のことを総合的に考えると、VR環境における隙間通過経験が高齢者において歩行調整能力の改善につながる可能性は示唆したもの、現状では明確な根拠を得るには至らなかったといえる。

一方で、高齢者における介入群においてのみ訓練後に接触率が増加する結果となった。高齢者の接触率は、介入群で訓練前 12.3%、訓練後 22.0%、統制群で訓練前 15.0%、訓練後 13.3%であった。さらに、年齢が高い高齢者ほど VR 環境における訓練後（介入群）に接触回数が増加する傾向があることを示した。この結果は、年齢が高い高齢者ほど、VR 環境での訓練によって教示を優先した行動に変容しやすい可能性が考えられる。本実験では高齢者における接触回避行動を対象にしており、自由に測定課題を行った場合、本来の適応的な歩行調整能力をみられない可能性があった。そのため、「最小限の体幹回旋」という制約を設け実験を行なった。高齢者の参加者は、接触を避けるということよりも「最小限の体幹回旋」という教示を優先し、VR 環境で教示に応じて経験を積んだ結果、前提条件である接触を避けるという行為の優先度が低くなった可能性が考えられた。教示を優先したと推察した背景として、加齢に伴って処理資源（注意資源）の減少により（*Craik & Byrd., 1982*）、分割的注意機能が低下することが報告されている（*Verhaeghen et al., 2003*）。このことから、接触しないことと、体幹の回旋を最小限にすることが求められた場合、年齢が高い高齢者ほど教示を優先する結果となりうる。さらに、隙間通過直前にドアが開くという、実際には接触しない測定課題が裏目に出た可能性が考えられる。対象者が動作を学習する場合、フィードバックが必要であ

るが今回は参加者には接触フィードバックを与えない環境で実験を行った。そのため、接触しないことに比重を置きにくい測定課題であったと考える。以上のことから、接触率が高まらないよう教示や測定課題の工夫が必要であることが示唆された。

以上より、VR 環境での隙間を通過する訓練は、適応的な歩行調整能力における行動変容のきっかけを作るという意味では有益であった。一方で、「接触しない程度の最小限の通過幅を学習させる」という意味では、適応的歩行能力の学習支援に向けた VR 環境の構築のためには、さらなる改善が必要である。

第4章 総合考察

本研究では、高齢者の安全な歩行を支援するため、VRを用いて狭い隙間を通り抜ける行動調整能力を向上させる学習支援システムの構築を目指した。第1検証として、実環境とVR環境の隙間通過時の接触回避行動を測定し、VR環境で測定した接触回避行動が実環境の接触回避行動を再現できているかを検討した。第2検証として、VRによる最小限の体幹回旋が求められる隙間通過訓練後に実環境の接触回避の精度が高まるかを検討した。

実環境の隙間通過時の接触回避行動特性を再現できるか

第1検証として、VR環境で測定した接触回避行動が、実環境の接触回避行動を再現できているかを検証した。ここでは、再現性の基準として、①隙間が狭くなるほど体幹回旋角度が大きくなること、②一定以上の隙間幅に対して体幹の回旋をせずに通り抜けることの2つをあげた。

実験1では、実環境とVR環境それぞれで狭い隙間を通過する課題を行なった結果、①隙間が狭くなるほど体幹回旋角度が大きくなることの再現性を得ることができた。この結果は、実環境における隙間通過行動と同様の結果であり（Warren & Whang,1987 ; Higuchi et al., 2006 ; Higuchi et al., 2012 ; Hackney & Cinelli,2013）, VR環境においても実環境と同様に、水平棒と隙間の相対値の大きさに基づいて体幹の回旋角度を調節できていることを示した。一方で、②一定以上の隙間幅に対して体幹の回旋をせずに通り抜けることの再現性を得ることができなかった。実際、VR環境における水平棒の長さに対する隙間幅1.3倍では、片側のマージンが13.5cmもあるにも関わらず体幹の回旋をして隙間を通過する結果となった。本研究では、歩行時における適応的な調整能力の精度を高めること、つまり、狭い隙間を通過する際の微調整をする能力を高めること

に主眼を置いているため、体幹の回旋が必要のない隙間幅に対して必要以上に体幹の回旋をするという現象を解決しなければならなかった。そのため、実験2では、実験1と同一の参加者で隙間通過可否判断課題を行ったところ、VR環境では実環境と比較して、体幹回旋せずに通過できると判断する隙間幅を大きく見積もる傾向があることが分かった。さらに、実験1、実験2の結果を追加分析すると、VR環境内での行動特性に個人差があることが示され、参加者の中には接触を避けることを優先する保守的な行動を選択する参加者が存在した。保守的な行動を選択する参加者は、歩行開始前から安全確保のために自身と隙間の中のマージンを大きく取ろうと計画しており、どの隙間幅に対しても一様に体幹の回旋を行う傾向があることが分かった。その結果、行動を微調整することを疎かにし、体幹を回旋せずに通れる隙間幅に対しても必要以上の体幹回旋が生じていることが示唆された。

実験3、実験4では必要以上の体幹の回旋を誘導したと考えられる事象の補正を行い検討した。実験3においては、VRシステム自体を調整することで各隙間幅に対する体幹回旋角度が全体的に小さくなるという効果が得られたものの、必要以上の体幹回旋の改善には至らなかった。体幹の回旋角度を調整することを誘導するため、実験4において実験1の手続きと同一の課題に加えて、「体幹の回旋を最小限にする」という制約を設けた。その結果、体幹の回旋角度を小さくすることを誘起し、再現性の基準としてあげた2つの現象を確立することができた。

これらのことから、本実験におけるVR環境では、体幹の回旋を自由にできる場合には、大きく体幹の回旋を行うことで隙間を通過する保守的な参加者がいるものの、体幹の回旋に制約を設けた場合、参加者の個人特性に関わらず適応的な歩行調整を誘起できることが分かった。つまり、制約をかけることにより、隙間幅に応じて行動をすることに焦点を当てることができ、VR環境において実環境で生じる隙間通過行動を再現でき

たとえる。VR環境における実環境との類似性の程度が、学習の転移に影響を与えるかどうか明確な根拠は不明であるが、VR環境においても適応的に行動を調整する経験を行えることは、行動変容を生じるうえで重要であると考え。以上4つの実験を通して、隙間通過時の接触回避行動特性を再現するVR環境を確立した。

本VRシステムでは、実際の歩行を伴わずに接触回避行動が行えるため、体動を最小限にでき、接触回避行動中の脳活動の計測ができる可能性がある。体動によるノイズを低減できることにより、移動行動では計測不可能とされていた動的運動中の脳活動計測が可能であるため、接触回避行動における脳内情報処理の変容を解明する糸口になると考える。

VRシステムは適応的歩行調整能力のための学習支援として応用できるか

実験 5 では VR 環境での最小限の体幹回旋が求められる隙間を通過する訓練によって、隙間通過時における接触を回避する精度が高まるか検証し、大きな成果として2つの結果が得られた。

第1に、高齢者において、VR環境における隙間通過訓練によって体幹回旋を低減させることができる可能性を示した。第1検証で押さえた要素（隙間通過時の体幹回旋）をVR環境で実際に繰り返し経験できたことで、身体情報と隙間幅との情報を関連づけられるようになったことが改善に影響を与えたと考え。しかし、隙間通過訓練が歩行調整能力の改善につながる可能性を示唆したものの、現状では統計的に支持ができないことから明確な根拠を得るには至らなかったといえる。

第2に、高齢者では、VR環境における隙間通過訓練後に接触率が増加する結果となった。さらに、年齢が高い高齢者ほどVR環境における訓練後に接触回数が増加する傾向があることを示した。この結果は、年齢が高い高齢者ほど教示を優先する可能性が考

えられた。教示を優先したと推察した背景として、加齢に伴って処理資源（注意資源）の減少により（*Craik & Byrd., 1982*），分割的注意機能が低下することが報告されている（*Verhaeghen et al., 2003*）。接触回避場面では接触を回避することが前提にあるにも関わらず、高齢者の参加者はVR環境における訓練によって、「最小限の体幹回旋」という教示に応じた行動の変化が生じた可能性が示唆された。

以上のことから、VR環境を用いた適応的歩行調整能力の学習支援システムの構築という観点からは、完全な目的達成とは至らなかったものの、VR環境の訓練が行動変容を引き起こす可能性を示し、将来の学習支援システム構築に貢献し得る知見を得ることができた。

今後の課題と展望

本研究では高齢者の安全な歩行を支援するため、VR環境を用いて狭い隙間を通り抜ける際の適応的歩行調整能力を向上させる学習支援システムの構築を目指した。VR環境での隙間を通過する訓練によって行動変容のきっかけを作るという意味では有益であったものの、「接触しない程度の最小限の通過幅を学習させる」という意味では、さらなる改善の余地があることが示唆された。適応的歩行調整能力を向上させる学習支援システムの構築のために、今後、少なくとも4つの検討を行う必要があると考えている。どのような検討、工夫が必要かについて4つの提案を行い、本研究の締めくくりとしたい。

第1に、運動学習の観点から長期効果を検討する必要がある。高齢者に限定すると、訓練後に即時的に体幹回旋角度が低減する結果を本研究では得られた。しかし、この運動学習が一時的な行動変容である可能性も否定できないため、即時効果だけでなく、長期的な効果を検討する必要があると考える。具体的には期間を空けて再度課題を行い、

学習したことが保持できているか検討する。長期効果が認められれば、高齢者の安全な歩行を支援する一助となることを強調することができるだろう。

第 2 に、VR システムで訓練する適応年齢について検討することである。本研究において、VR 環境の訓練後に年齢が高い参加者ほど接触率が増加するという現象が生じた。特に後期高齢者にあたる 75 歳以上の 5 名の参加者は、VR 環境による訓練後に、訓練前と比較して 3 回以上、いずれの参加者でも接触回数が増える結果となった。「最小限の体幹回旋」という教示以外の事象に注意が向きにくくなることを示唆し、安全性、そして有用性の観点からも何歳まで使用しても問題がないか、慎重に検討する必要があると考える。

第 3 に、実環境における測定課題時の練習施行時に接触が生じた場合のフィードバックを与えた場合に、接触回数が増えないか検討する必要がある。現在の実験環境では、接触したかどうかは解析した際に判断できるものであり、オンラインでの接触フィードバックの提示は困難な環境である。ドアに接触したとしてもフィードバックを与えないという測定課題が接触回避できているかどうか、つまり、正解が分からずに接触回数が増えた要因となっていると考える。そこで、測定課題の本施行では接触のフィードバックを与えないことは同様にし、本施行前の練習施行で接触回避できているかどうか口頭にてフィードバックを与えることで、接触回数を減らすことができるのではないかと考えている。

最後に、工夫として VR 環境における移動速度を参加者に合わせることである。現状の VR システムでは、どの参加者においても 1.2m/s の速度で映像が進むように設定している。しかし、参加者によって歩行速度は異なり、実環境で歩行速度が遅い参加者にとっては、隙間通過時に体幹を回旋する必要があるか、どの程度体幹回旋すればよいか判断を困難にした可能性が考えられる。参加者の歩行速度に合わせて移動速度を調整す

ることで、参加者は十分な時間を判断する時間に利用でき、本研究結果以上に訓練効果が得られるのではないかと考えている。

これらの4つの検討、工夫を行うことで、適応的歩行調整能力を向上させるより良い学習支援システムの構築に繋がると考える。VR環境であれば、安全な環境で慣れるまで何度も練習を繰り返せるだけでなく、実環境では統制が困難な環境要因について実験者の意図に合わせて制御することができる利点がある。そのため、上記で述べた問題点を修正でき、学習支援システム構築を成功に導ける可能性があると考えている。

引用文献

Arsenault AB, Winter DA, Marteniuk RG. (1986). Treadmill versus walkway locomotion in humans: an EMG study. *Ergon*, 29(5),665–676.

Bezerra ÍMP, Crocetta TB, Massetti et al. (2018). Functional performance comparison between real and virtual tasks in older adults: A cross-sectional study. *Medicine (Baltimore)*, 97(4), e9612.

Cavallo V, Dommes A, Dang N et al. (2017). A street-crossing simulator for studying and training pedestrians. *Transportation Research Part F*, 1-12.

Dockx K, Bekkers E, Van den Bergh V et al. (2016). Virtual reality for rehabilitation in Parkinson's disease. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, Issue 12.

Franchak JM, Van der Zalm DJ, Adolph KE et al. (2010). Learning by doing: action performance facilitates affordance perception. *Vis Res*, 50, 2758-2765.

Gerin- Lajoie M, Richards C, Funget J et al. (2008). Characteristics of personal space during obstacle circumvention in physical and virtual environments, *Gait and Posture*, 27, 239-247.

Gray R, and Allsop J. (2013). Interactions between performance pressure, performance streaks and attentional focus. *J. Sport Exerc. Psychol*, 35, 368–386.

Hackney A, Cinelli M. (2011). Action strategies of older adults walking through apertures. *Gait and Posture*, 33,733-736.

Hackney A, Cinelli M. (2013). Older adults are guided by their dynamic perceptions during aperture crossing. *Gait and Posture*, 37,93-97.

Hackney A, Cinelli M, Luke T et al. (2015). The effects of narrow and elevated path walking on aperture crossing. *Human Movement Science*, 41,295-306.

Hackney A, Cinelli M, Frank S et al. (2015). Does the passability of apertures change when walking through human versus pole obstacles? *Acta Psychologica*, 166, 62–68.

Hebert D, Lindsay MP, McIntyre A. (2016). Canadian stroke best practice recommendations: Stroke rehabilitation practice guidelines, update 2015. *Int J Stroke*, 11(4), 459-484.

Higuchi T, Takada J and Imanaka K. (2004). Visual Estimation of Spatial Requirements for Locomotion in Novice Wheelchair Users. *J Exp Psychol*, 10 (1), 55-66.

Higuchi T, Cinelli ME, Greig MA et al. (2006). Locomotion through apertures when wider space for locomotion is necessary: adaptation to artificially altered bodily states. *Experimental Brain Research*, 175,50-59.

Higuchi T, Hatano N, Soma K, Imanaka K. (2009). Perception of spatial requirements for wheelchair locomotion in experienced users with tetraplegia. *Physiol Anthropol*, 28, 15-21.

Higuchi T, Seya Y, & Imanaka K. (2012). Rule for scaling shoulder rotation angles while walking through apertures. *Plos ONE*, 7, e48123.

Huber M, Su YH, Krüger M et al. (2014). Adjustments of speed and path when avoiding collisions with another pedestrian. *PLoS One*, 26, 9(2), e89589.

Hsieh WM, Chen CC, Wang SC et al. (2014). Virtual reality system based on Kinect for the elderly in fall prevention. *Technology and health care*, 22(1), 27-36.

Ida H, Mohapata S, & Aruin A. (2017). Control of vertical posture while elevating one foot to avoid a real or virtual obstacle. *Exp Brain Res*, 235(6),1677-1687.

Imam B, Jarus T. (2014). Virtual Reality Rehabilitation from Social Cognitive and Motor Learning Theoretical Perspectives in Stroke Population. *Rehabil Res Pract*, 1-11.

Kennedy R, Lane N, Berbaum K et al. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220.

Laver K, George S, Thomas S et al. (2015). Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2015, Issue 2.

Maillot P, Dommes A, N-T Dang, F Vienne et al. (2017). Training the elderly in pedestrian safety: transfer effect between two virtual reality simulation devices. *Accident; analysis and prevention*, 161-170.

Mirelman A, Rochester L, Maidan I et al. (2016). Addition of a non-immersive virtual reality component to treadmill training to reduce fall risk in older adults (V-TIME): a randomised controlled trial. *The Lancet*, 388, 1170-1182.

Murray MP, Spurr GB, Sepic SB et al. (1985). Treadmill vs. floor walking: kinematics, electromyogram, and heart rate. *J Appl Physiol*, 59(1), 87-91.

Shumway-Cook, Brauer S, Woollacott M. (2000). Predicting the probability for falls in community-dwelling older adults using the Timed Up & Go Test. *Phys Ther*, 80, 896-903.

Strathy GM, Chao EY, Laughman RK. (1983) . Changes in knee function associatedwith treadmill ambulation. *J Biomech*, 16(7), 517–522.

Tsang W, Fong S, Tung K et al. (2016). Is virtual reality exercise effective in reducing falls among older adults with a history of falls? *Physiotherapy*, 101, eS1539-eS1540.

Ralph K, Arthur J, Wen Ling et al. (2001). Comparing Stepping-in-Place and Gait Ability in Adults With and Without Hemiplegia. *Arch Phys Med Rehabil*, 82, 36-42.

Vassallo C, Olivier AH, Souères P et al. (2017). How do walkers avoid a mobile robot crossing their way? *Gait Posture*, 51, 97-103.

Verhaeghen P, Steitz DW, Sliwinski MJ et al. (2003). Aging and dual-task performance: a meta-analysis. *Psychol Aging*, 18(3), 443-460.

Wagman JB & Taylor KR. (2005). Perceiving affordances for aperture crossing for the person-plus-object system. *Ecological Psychology*, 17, 105-130.

Warren WH, Whang S. (1987). Visual guidance of walking through apertures: body-scaled information for affordances. *Journal of Experimental Psychology: Hum Percept Perform*, 13,371-383.

White SC, Yack HJ, Tucker CA. (1998). Comparison of vertical ground reaction forces during overground and treadmill walking. *Med Sci Sports Exerc*, 30(10), 1537-1542.

Wilmot K, Barnett A. (2010). Locomotor adjustments when navigating through apertures. *Human Movement Science*, 29, 289–298.

Wilmot K, Barnett A. (2010). Locomotor behaviour of children while navigating through apertures. *Exp Brain Res*, 210, 185–194.

日本バーチャルリアリティ学会 VR心理学研究委員会 (2006) . だまされる脳 講談社

森 悦郎 (1985) . 神経疾患患者における日本語版Mini-Mental Stateテストの有用性. *臨床心理学*, 1, 2-10.

館 暲, 佐藤 誠, 廣瀬 通孝 (2011) . バーチャルリアリティ学 日本バーチャルリアリティ学会

“日本バーチャルリアリティ学会”. バーチャルリアリティとは.

<https://vrsj.org/about/virtualreality/>, (参照 2018-11-23)

謝辞

本修士論文は、著者が首都大学東京大学院人間健康科学研究科人間健康科学専攻ヘルスプロモーションサイエンス学域博士前期課程において行った研究をまとめたものです。

本研究に関して終始ご指導ご鞭撻を頂きました本学 樋口貴広教授に心より感謝申し上げます。また、本論文をご精読いただき、鋭いコメントやご助言をくださった、本学行動生理学研究室北一郎教授、スポーツ神経科学研究室西島壮准教授に深く感謝致します。本研究に関して、いつも親身に相談にのってくださった本学 福原和伸助教、井村祥子助教、樋口研究室のスタッフに深く感謝申し上げます。特に VR システムの開発から修正まで多大なご支援をいただいた本学 福原和伸助教には重ねて御礼申し上げます。合同ゼミでご意見を頂いた、本学 坂野逸紀氏、久保田夏子氏、帝京大学 緒方貴浩助教、院生の方々に感謝申し上げます。そして参加者として協力してくださった地域の皆様、本学学生の皆様に何より感謝申し上げます。皆様のおかげで、多くの貴重なデータを得ることができました。

さらに、現職場(国立精神・神経医療研究センター病院)スタッフ各位、ならびにリハビリテーションに携わった患者各位には、研究活動に理解を示していただき、ここに感謝の意を表します。2年間をともに過ごしたヘルスプロモーションサイエンス学域の同期の皆様、ご助言をくださった合同ゼミの先生方・先輩・後輩の皆様に、心より感謝しております。最後に、私の人生観が変わるほど素敵な時間を過ごさせていただきました。今後、リハビリテーションの分野へ還元していくことが本学で学んだことの恩返しだと思っております。ありがとうございました。

平成 30 年 12 月 27 日

近藤夕騎

付録

SIMULATOR SICKNESS QUESTIONNAIRE

No _____ Date _____

0= "None [なし]" , 1= "Slight [わずかに]" , 2= "Moderate [中程度]" , 3= "Severe [激しく]"

- | | |
|-----------------------------|---------------|
| 1. 全体的に気分がよくない (N, O) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 2. 疲れた (O) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 3. 頭痛がする (O) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 4. 目が疲れた (O) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 5. 目の焦点が合わせにくい (O, D) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 6. つばがよく出る (N) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 7. 汗が出ている (N) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 8. 吐き気がする (N, D) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 9. 集中できない (N, O) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 10. 頭がぼうとする (D) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 11. 映像が霞む (O, D) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 12. 目を開けているとふらふらした感じがする (D) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 13. 目を閉じているとふらふらした感じがする (D) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 14. ぐるぐるとしためまいがする (D) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 15. 胃に違和感がある (N) | 0 • 1 • 2 • 3 |
| 16. げっぷが出る (N) | 0 • 1 • 2 • 3 |