

VR 空間におけるユーザの回避行動から見た
身体認識に関する研究

—障害物回避行動時のユーザの振る舞い調査から
ユーザインタフェースの提案まで—

Study on body recognition through user's avoidance
behavior in VR space

— Ranging from cognitive obstacle avoidance behavior
to user-interface design principles —

2021 年 3 月
March, 2021

齋藤 芳明
Yoshiaki Saito

島根大学大学院総合理工学研究科
Interdisciplinary Graduate School of
Science and Engineering, Shimane University

目次

図一覧.....	5
表一覧.....	7
第1章 序論	9
1.1 本研究の背景と動機.....	9
1.2 本研究の目的.....	11
1.3 論文の構成.....	12
第2章 関連研究	14
2.1 バーチャルな身体の認識と錯覚.....	15
2.2 身体知覚を伴うアプリケーション指向の研究.....	17
2.3 身体の拡張とテレプレゼンス.....	17
2.4 空間と動きの知覚.....	18
2.5 ドライビングシミュレータ.....	19
2.6 頭部動作インタフェース.....	21
2.7 VR 酔い.....	22
第3章 ユーザが有する自身の身体の大きさ (横幅)認識に基づく回避行動の調査	23
3.1 はじめに.....	23
3.2 実験の動機.....	25
3.3 実験 1(予備実験).....	27
3.3.1 参加者, 装置および手順.....	27
3.3.2 結果.....	30
3.4 実験 1(主実験).....	31
3.4.1 参加者, 装置および手順.....	31

3.4.2 結果.....	33
3.4.2.1 回避ポジション.....	33
3.4.2.2 回避タイミング.....	35
3.4.2.3 試行の経過に伴う行動の変化.....	37
3.4.3 実験 1(予備実験と主実験)の考察.....	41
3.5 実験 2.....	43
3.5.1 参加者, 装置および手順.....	43
3.5.2 結果.....	47
3.5.2.1 回避方向.....	47
3.5.2.2 回避ポジション.....	48
3.5.2.3 回避タイミング.....	52
3.5.2.4 主観的なフィードバック.....	55
3.5.3 実験 2 の考察.....	55
3.6 本章のまとめ.....	58
第 4 章 映像参照の影響に基づく回避行動調査.....	60
4.1 はじめに.....	60
4.2 予備実験.....	60
4.2.1 参加者および実験装置.....	61
4.2.2 実験シナリオ.....	62
4.2.3 結果.....	65
4.2.3.1 車両ポジション.....	65
4.2.3.2 回避タイミング.....	67
4.2.3.3 ユーザの振る舞いに影響を与える要素.....	68
4.3 主実験.....	69

4.3.1 仮説.....	69
4.3.2 参加者および実験装置.....	70
4.3.3 実験シナリオ.....	70
4.3.4 結果.....	74
4.3.4.1 車両ポジション.....	74
4.3.4.2 回避タイミング.....	77
4.4 考察.....	80
4.5 本章のまとめ.....	83
第5章 ユーザインタフェースの提案.....	84
5.1 はじめに.....	84
5.2 仮説.....	85
5.3 第4章主実験におけるユーザ頭部動作の分析.....	85
5.4 主実験に向けて.....	87
5.5 主実験.....	88
5.5.1 参加者と装置.....	89
5.5.2 手順.....	90
5.5.3 結果.....	91
5.6 考察.....	93
5.7 本章のまとめ.....	94
第6章 総括.....	96
付録.....	98
A.1 第3章 実験1(予備実験)の教示文.....	98
B.1 第3章 実験1(主実験)の教示文.....	98
C.1 第3章 実験2の教示文.....	99

C.2 第3章 実験2のアンケート集計結果.....	100
D.1 第4章 予備実験の教示文.....	101
D.2 第4章 予備実験のアンケート集計結果	102
E.1 第4章 主実験の教示文	104
E.2 第4章 主実験のアンケート集計結果	106
F.1 第5章の実験の教示.....	109
F.2 第5章 実験のアンケート集計結果	111
G.1 各実験の実施期間と実施場所	114
謝辞	115
参考文献	116
研究業績	127
発表論文	127
国内学会における口頭発表論文	128

図一覧

図 1- 1	研究の目的と各章の対応	12
図 2- 1	本研究の流れと関連研究との位置づけ	15
図 3- 1	拡張された身体を通した周囲環境との相互作用.....	26
図 3- 2	実験 1 (予備実験)における物体(ボール)の軌道－上面図	28
図 3- 3	実験 1 (予備実験)における物体(ボール)の軌道－側面図	28
図 3- 4	物体(ボール)の軌道の様子.....	29
図 3- 5	映像刺激.....	30
図 3- 6	Kinect の設置位置.....	32
図 3- 7	物体を回避した試行結果(回避ポジション).....	34
図 3- 8	物体を回避した試行結果(回避タイミング).....	36
図 3- 9	k を変化させたときの近接距離に関する p 値の変化.....	38
図 3- 10	k に対する近接距離の平均.....	38
図 3- 11	k に対する近接距離の標準偏差.....	39
図 3- 12	k を変化させたときの回避タイミングに関する p 値の変化.....	40
図 3- 13	k に対する回避タイミングの平均.....	40
図 3- 14	k に対する回避タイミングの標準偏差.....	41
図 3- 15	実験中の参加者.....	44
図 3- 16	提示した柱の映像：(a) 遠方；(b) 中間；(c) 至近.....	45
図 3- 17	位置調整に使用した Gamepad	46
図 3- 18	男女別，ボード幅別の試行の経過による回避距離の推移.....	49
図 3- 19	男女別，試行の経過別のボード幅による回避距離の違い.....	50
図 3- 20	試行の経過による男女別の接触率の変化.....	51
図 3- 21	試行の経過によるボード幅別の接触率の変化	52
図 3- 22	ボード幅の違いによる男女別の回避タイミング.....	53

図 3-23	試行の経過別の男女の違いによる回避タイミング	54
図 3-24	試行の経過別のボード幅の違い回避タイミング	55
図 4-1	実験の様子	62
図 4-2	座席からのビュー	63
図 4-3	実験に用いた道路	64
図 4-4	車速と車線変更方向による車両ポジション	67
図 4-5	4 種類の車線境界線	73
図 4-6	ハンドル位置別の車幅の違いによる車両ポジション	75
図 4-7	ハンドル位置と車線境界線の組み合わせにおける	76
図 4-8	車線変更方向と車線境界線の組み合わせにおける	77
図 4-9	正方向の横方向移動量平均 (1 車線変更)	79
図 4-10	方向別の横方向移動量平均 (1 車線変更)	80
図 5-1	測定した Oculus HMD の 6-DOF の種類と向き	87
図 5-2	区間別の平均横方向移動量(1 車線移動).....	88
図 5-3	区間毎の正方法, 負方向の横方向移動量.....	88
図 5-4	区間別の平均横方向移動量(1 車線移動).....	92
図 5-5	区間別の平均横方向移動量(2 車線移動).....	92
図 F.1-1	インタフェース (Head-x)	109
図 F.1-2	インタフェース (Head-yaw)	109
図 F.1-3	インタフェース (Head-roll)	110

表一覧

表 3-1	各実験における調査項目	24
表 3-2	各実験の対象物, 回避の有無, 回避操作および刺激	25
表 3-3	回避タイミングの平均と標準偏差.....	36
表 3-4	回避方向の割合 (%)	48
表 4-1	実験ステージ	65
表 4-2	平均と標準偏差 (回避タイミング).....	68
表 4-3	練習試行の取り組み内容	74
表 5-1	車線変更関連項目と頭部動作との分散分析結果.....	86
表 5-2	操作の難易度と動きとの親和性についてのアンケート結果.....	91
表 5-3	VR 酔いについてのアンケート結果	93
表 C.2-1	第 3 章 実験 2 の参加者の年齢.....	100
表 C.2-2	第 3 章 実験 2 の難易度, 映像見易さ, 酔い, 疲れ	101
表 D.2-1	第 4 章 予備実験参加者の年齢	102
表 D.2-2	第 4 章 予備実験参加者の運転経験.....	103
表 D.2-3	第 4 章 予備実験の難易度	104
表 D.2-4	第 4 章 予備実験の酔いと疲れ	104
表 E.2-1	第 4 章 主実験参加者の年齢.....	106
表 E.2-2	第 4 章 主実験参加者の運転経験.....	107
表 E.2-3	第 4 章 主実験の難易度	108
表 E.2-4	第 4 章 主実験の映像見易さ	108
表 E.2-5	第 4 章 主実験の酔いと疲れ	109
表 F.2-1	第 5 章 実験参加者の年齢	111
表 F.2-2	第 5 章 インタフェースの難易度	111
表 F.2-3	第 5 章 インタフェースの有効性 (自動車用)	112

表 F.2-4	第5章	インタフェースの有効性（一般用）	112
表 F.2-5	第5章	インタフェースの親和性	112
表 F.2-6	第5章	実験の映像見易さ	113
表 F.2-7	第5章	インタフェースの酔い	113
表 F.2-8	第5章	実験の疲れ	113
表 G.1-1		各実験の実施期間と実施場所一覧	114

第1章 序論

1.1 本研究の背景と動機

今日、多くの製品開発においてコンピュータは必要不可欠なものであり、特にシミュレーション技術を活用したモデルベース開発（MBD: Model Based Development）を経済産業省が推進するまでに至っている[経産省 1]。我が国の産業を牽引する自動車産業をはじめ、多くの製造業ではシミュレーションを活用した仮想開発によって、モノづくりの品質向上と開発リードタイムの短縮を実現してきている。現在では、ICT（Information Communication Technology）による開発作業の半自動化や、機械学習によりコンピュータが物事を認識できるようになってきており、今後はAI（Artificial Intelligent）による完全自動化が実現する日もそう遠くはないと思われる。当然ながらこれらの先進技術は、いきなり現場で利用されるわけではなく十分な実証実験を経て導入されるわけであるが、危険な事象や発生させにくい事象などは現実世界でテストすることは極めて困難であり、通常はシミュレーションによって評価されることになる。このように今日の製品開発においてシミュレーション技術は極めて重要である。

筆者も国内建設機械メーカーにおいて MBD を推進する立場にあり、様々なシミュレーション技術を製品開発に適用する活動をしている。多くのシミュレーションは人間を介さないものであるが、製品の官能評価の多くは未だ指標化が難しく、実物を作ってから評価が大部分を占めている。そこで筆者は VR（Virtual Reality）技術を活用した仮想シミュレータを作成し検討を行ってきた。実機の挙動を得ることはできたが、官能評価を可能とできるレベルには到達し得なかった。ゲームや訓練シミュレータのように現実に近い感覚を再現することは可能であろうが、製品開発に活用するためには感覚評価とそれに影響する要素（例えば加速度）とを紐付けなければ改善活動に繋がらない。この課題に直面したことが、筆者が本研究に取り組もうと考えた動機である。筆者は複雑なシステムと人間の感覚との関係を明らかにするためには、シンプルな感覚とシンプルな要素との関係を 1 つ 1 つ積み

上げていくことであると考え、VR空間内におけるユーザの振る舞いを研究することにした。

さて、2016年はVR元年といわれている。三菱総研の報告[中村 2016]によると、2016年をVR元年とする理由として、視野角の拡大、分解能がHDレベルでリフレッシュレートが90Hzを超えること、加速度計や各速度計が小型化されてHMDへ実装されることで深部感覚と3D動画を同期させることが可能となってリアリティが大きく向上したこと、デバイスの低価格が挙げられている。なかでも、これまで高価だったVR機器、特にHMD(Head Mounted Display)が一般消費者向けに安価で販売された影響が大きい。実際、この年はOculus Rift [Oculus Website]、Vive [Vive Website]、PlayStation VR [PlayStation VR Website]というHMDが一斉に発売されている。VR関連ハードウェアの市場規模は2025年には750億ドルになる見込みと報告されている。また、国としても積極的なVR活用への取り組みを行っており、文化庁の文化財の観光活用に向けた取り組み[文化省 2018]や、観光庁の最先端ICT(VR/AR等)を活用した観光コンテンツ活用に向けた取り組み[国交省 2019]などがある。また、VR技術は多くの企業で活用されている[経産省 2]、今後もVR技術の益々の改善・改良が期待されると共に、多くの分野での活用や普及によって産業の活性化が期待されるものである。

しかしながらVR空間における人間の知覚や認知に関する知見の蓄積は未だ十分ではなく、地道な実験を繰り返してVR空間における事象とユーザの振る舞いとの関係を調査し知見を蓄えていくことがVRの発展、延いては製品開発への応用利用へと繋がっていくと考える。例えば、現実世界において頭部を傾けても視野が調整されるが、VRではその調整がうまくなされず現実との差異を生じることがある。身近な事例としてバイクに実際に乗っている際、カーブにて車体を傾けても視界を維持でき違和感なく受け入れられるが、その映像をカメラで撮影したものをディスプレイ越しに見ると違和感、特に酔いを生じさせることがある。最近では、この映像の調整のためバイクの車載映像は車体が傾いても地面に対して水平を保った映像に補正することで視聴者の映像酔いを軽減させている。この例が示すように、VRシステムの実装が人間の生体構造や認知特性を十分に配慮したものとなって

いない現実がある。

以上に述べたような VR に対する知見の蓄積の必要性を踏まえ、著者は VR のさらなる活用的一端を担うことを期待し、VR 空間でのユーザの認識をユーザの振る舞いを通して明らかにすることで、VR コンテンツ作成において期待するユーザの振る舞いや認識をコントロールできるようにしたいと考えた。

1.2 本研究の目的

本研究の最終的な目標は今後益々活用が見込まれる VR について基礎的な知見を積み重ねることにより、VR のさらなる活用、延いては産業の発展に貢献することである。ここで、VR 技術を実際の産業にて活用するための研究アプローチには様々なものがある。現実世界を精巧に模擬し、現実世界での振る舞いと VR での振る舞いの差異を対象にする研究もあれば、純粋に VR 空間での振る舞いに注目してユーザの振る舞いについて調査し、VR 空間自体の特性を調査し明らかにする研究もある。本研究では後者のアプローチを採用し、VR 空間でのユーザの空間認識を明らかにすることを目的とした。

しかしながら空間認識と一口にいても様々な場面や条件が考えられる。本研究では障害物回避行動時の振る舞いにフォーカスして実験を行うこととした。まず、自身が有する身体の大きさ（横幅）認識に基づく回避行動を探求した。これは街中を歩いているときに回避対象と自身との距離の差を必ずしも目視確認して回避することなく、無意識的に回避していることに対応する課題設定である。次に回避行動に影響する要素として参照アイテムの影響、すなわち VR 空間内の自身の映像および回避対象(障害物)の映像の影響が先ず考えられる。以上 2 つの要素について本研究ではユーザの障害物回避時の振る舞いについて実験を行うことにした。さらに、本研究の実験結果を利用した移動(回避)に適した横方向移動用ユーザインタフェースの提案を行う。

以上を整理すると、本論文の目的は次の 3 点に要約できる（図 1-1 参照）。

- 1) ユーザが有する自身の身体の大きさ（横幅）認識に基づく回避行動の調査

- 2) 映像参照の影響に基づく回避行動の調査
- 3) ユーザインタフェース提案

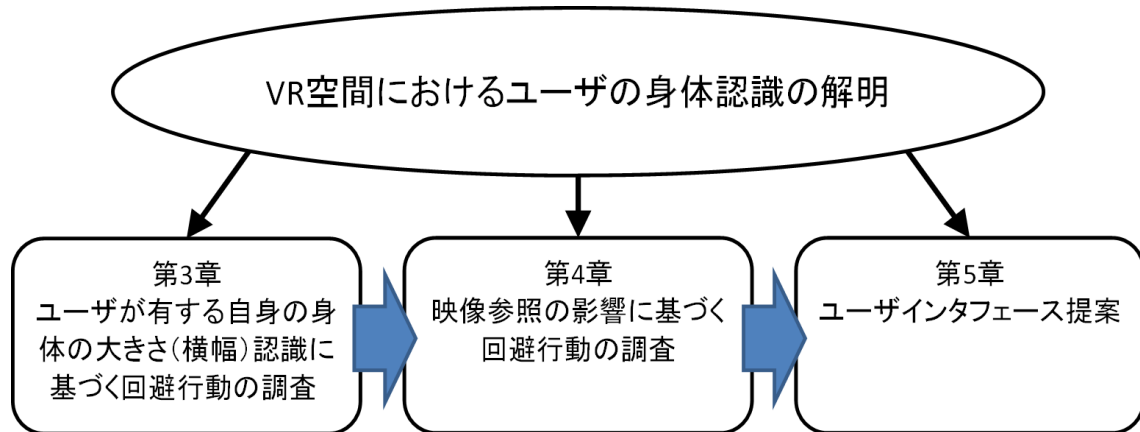


図 1-1 研究の目的と各章の対応

1.3 論文の構成

本論文は 6 つの章で構成されており、各章の内容は以下のとおりである。

第 1 章では本研究の背景、目的および本論文の構成について述べる。第 2 章では第 3 章から第 5 章での研究に関係する関連研究を紹介する。第 3 章では参照の影響を排除した上で、ユーザが有する自身の身体の大きさ（横幅）認識に基づく回避行動の調査するために、自身の大きさは未知かつ不可視（障害物のみ可視）と設定し、自身の大きさ感覚に頼っての回避行動についての実験結果を述べる。これは障害物との接触や回避成功を通しての自身の大きさを推定させることで取得した自身の大きさ認識について調査したものである。第 4 章では映像参照の影響に基づく回避行動調査を行うために、自動車運転シミュレータを用いて障害物の回避行動について実験を行った成果をまとめる。直線路を一定速度で走行しているときの障害物回避行動について、車幅、ハンドル位置および車幅線の種類の違いによる影響について明らかにする。なお、同章では現実世界と同様にハンドルを用いての障害物回避を評価対象としたが、第 5 章では自動車運転時の回避行動と頭部動作との関係性に着目

し, VR 空間におけるユーザインタフェースとして頭部動作を採用することの有効性について検討を行っている. 最後に第 6 章では, 本論文の調査結果の総括を述べる.

第2章 関連研究

本章では本研究に関連する研究を紹介する。図 2-1 に本研究の流れと本章で紹介する関連研究との位置づけを示す。本研究は VR 空間における身体認識を明らかにするために第 3 章にて基礎的な研究を行い、第 4 章では第 3 章の基礎研究を基礎として、ドライビングシミュレータを事例とする研究を行った。さらに第 5 章では第 4 章のドライビングシミュレータにおいて得られた知見を基礎にユーザインタフェースについて検討を行った。関連研究の紹介は、先ず本研究全体、特に第 3 章に関係する認知や知覚に関する研究として、バーチャルな身体認識と錯覚、身体知覚を伴うアプリケーション指向の研究、身体の拡張とテレプレゼンス、空間と動きの知覚の 4 つについて紹介を行う。さらに第 4 章にて映像参照の影響に基づく回避行動調査の過程でドライビングシミュレータを用いるため、ドライビングシミュレータ関連の研究について紹介する。最後に第 5 章にて行う自動車操舵用のユーザインタフェースの提案に関する研究として、頭部動作インタフェースに関する研究の他、VR 酔いについての研究について紹介を行う。

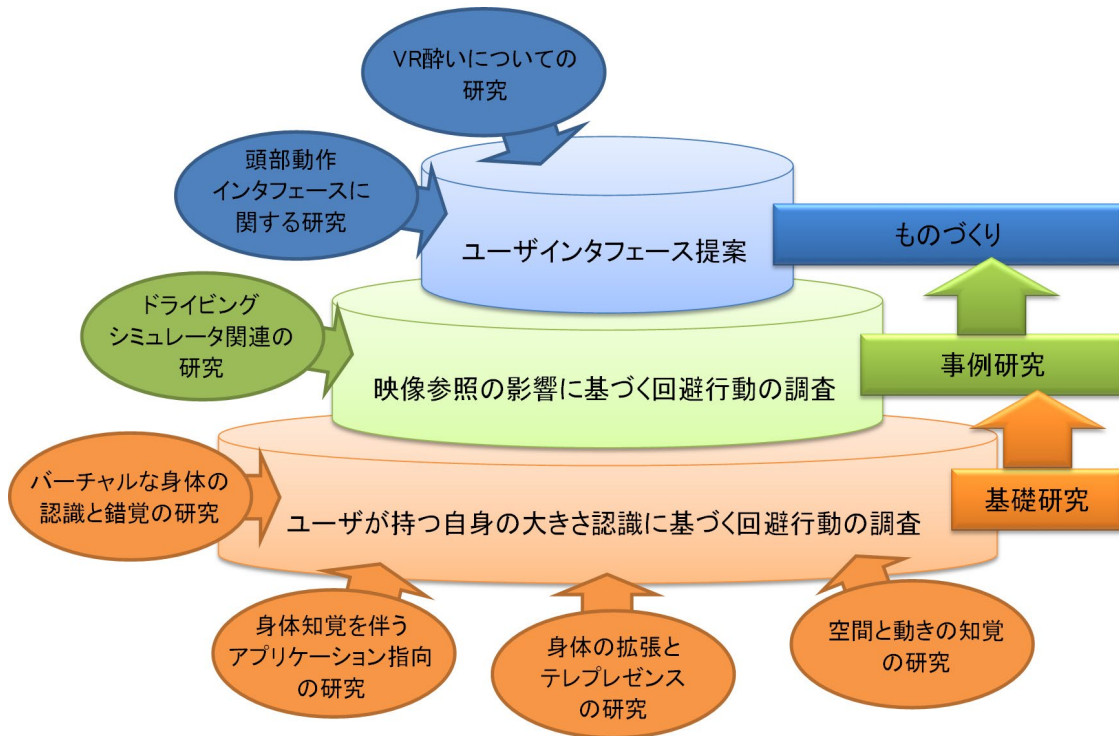


図 2-1 本研究の流れと関連研究との位置づけ

2.1 バーチャルな身体認識と錯覚

身体知覚と自己意識の根底にある神経科学の研究の主要なテーマ 1 つとして、身体所有錯覚 (BOI: Body Ownership Illusion) がある。ラバーハンドイリュージョン [Botvinick 1998] はその最も有名な例であるといえ、眼前に置かれたラバーハンドを実際には見えていない自分の手と誤って認識する感覚は、ラバーハンドと実際の手の両方に同期して与えられる触覚刺激によって誘発されるといわれている。Martin らは、人間が自分の身体とその動作をどのように認識しているかを解明するために、身体部分を泡立て器やハンマーなどの実際とは異なる映像化された不自然なアイテムに置き換えたときの影響について調査している [Martin 2014]。さらに、体外離脱体験は意識が体を離れる感覚であり [Ehrsson 2007]、身体所有錯覚の考え方に通じるため、神経科学者や哲学者だけでなく、コンピュータ科学者、エンジニアにも関心が持たれている [Komiyama 2017] [Yan 2015]。他にも、お互いの身体が入り替わる体験をバーチャルに体験させる研究も報告されている

[Petkova 2008].

これらの多くの研究では、バーチャルな体験の過程において身体（の一部）が参加者に提示されているが、提示することが必ずしも錯覚を生じさせる原因とはならない。参加者が自分の身体を見ていなくても、錯覚が生じる可能性について報告されている。例えば、HMDを装着させ自身の身体を不可視とした状態で参加者の身体の一部にブラシを接触させつつ、同箇所に対応する位置でブラシを動かしている様子を HMD に提示すると、目に見えていない身体所有の錯覚を生じることが報告されている [Guterstam 2015]。 [Kondo 2018]は、手と足の映像表現で十分に錯覚を誘発し、全身のアバタを使用した場合と同じくらい効果があると報告している。Lugrin ら [Lugrin 2018]は、アバタの目に見える体の部分の程度(分量)を変えることによる、VR ゲームでのユーザパフォーマンスへの影響を調査した。さらに、身体の自己意識の多感覚統合プロセスは、感覚刺激の意識的な認識を必要しないことが調査されている [Salomon 2017]。身体の知覚や自己意識について共通に理解されていることとして、自己の感覚は固定されるものではなく、容易に変化しうるとされる。

VR コンテンツにおいて現実の大きさとは異なる身体を持ったものとしてユーザを登場させることがある。重要な知見として、VR 空間内の身体の大きさは、VR 空間内のオブジェクトの大きさ知覚に影響を与える [Hoort 2011][Linkenauger 2013]。ユーザは、VR 空間内で小さな身体となった体験をしているときは VR 空間内のオブジェクトが大きくなっていると感じ、逆に大きな身体となっているときは VR 空間内のオブジェクトが小さくなっていると感じる。この効果は、現実世界でユーザにとって馴染みのあるオブジェクトの大きさではなく、VR 空間内（自分自身）の身体に影響され [Linkenauger 2013]、大きな身体での錯覚の場合と比較して、小さな身体での錯覚の場合の方が過大に評価されていることが報告されている [Banakou 2013]。最近の研究では、参加者がバーチャルな手を使用してオブジェクトを操作する場合、オブジェクトの大きさが知覚される手の大きさに影響を与えることも明らかにされている [Ogawa 2019]。さらに VR でのアバタの手の知覚に対する性別の影響が明らかにされている [Schwind 2017]。この錯覚はその空間での物体の大きさを

過大または過小評価させ、それに伴う振る舞いに影響を与える可能性が示している。

2.2 身体知覚を伴うアプリケーション指向の研究

ヒューマンコンピュータインタラクション分野の研究者は、既存の人間の能力を強化したり、特定のアプリケーションで新しい能力を作成したりするために、人間の知覚の増強と増幅を積極的に研究している[Schmidt 2017]。 [Piumsomboon 2018]は、Superman と Giant という 2 つのモデルを提案している。 Superman モデルにあっては現実世界の大きさを維持し、ただしユーザはまるで上空を飛んでいるかのように振る舞うものである。 もう一方の Giant モデルでは、ユーザ（アバタ）の身体を拡大し、ユーザは上から見降ろすように世界を見ることができるようになっている。 OutsideMe は、ダンサ向けの外部から見た自己イメージ複合現実システムである。 練習中は第三者視点から自分を観察することができる[Yan 2015]。 [Fan 2017]は、人間工学に基づいた製品設計のためのマルチボディインタフェースを提案している。 このインタフェースでは、模擬された追加の仮想身体がユーザ自身の身体に重ね合わされる。 また、不適切な対人距離による不快感を軽減し、快適な社会生活を可能にすることを目的として、対面する人々の大きさを制御するというアイデアが示されている[Maeda 2016]。 対人空間の大きさは、自分の体の表現の操作によって影響を受けることが実験的に研究されており[D'Angelo2016]、本研究はユーザの拡張された体の大きさを把握するメカニズムを明らかにすることを目的としている点で異なっている。 [Medeiros 2018]は、アバタを見る視点（一人称または三人称）がナビゲーションタスクの具体化とタスクのパフォーマンスにどのように影響するかについて調査している。

2.3 身体の拡張とテレプレゼンス

身体の拡張は、身体能力、知覚、および認知の全体的な変化につながる可能性がある[Leigh 2017]。 身体にアイテムを付加した影響について研究されており、腕[Saraiji 2018][Vatsal 2017]、指[Hussain 2016][Hu 2017]、尻尾[Xie 2019][Nabeshima 2019]など

様々な身体の拡張効果について論じられている。さらに、VR技術により腕や指などの特定の仮想身体部分を任意に拡張して、空間でのアクセシビリティを拡張することができる。例えば、[Feuchtner 2017]は義肢が実際にユーザの身体の一部であるという認識を維持しながら、ユーザの腕を拡張現実で伸ばして、実際には手の届かない場所にある要素を操作できるようにするインタラクション技術を紹介している。これと同様のアイデアが[Ueda 2017][Poupyrev 1996]においても示されている。[Ogawa 2016]は、バーチャルなピアノを弾くインタラクティブな体験を実現させるために、メタモルフォシスハンドと名付けた指の伸長というアイデアを示している。

一方で、テレプレゼンスシステムはユーザの身体の延長と見なせる。そのような一例であるMRP(Mobile Remote Presence)にあつては、Double 3, VGo, Texai, QB, newmeなど、いくつかのシステムが現在すでに市場に出回っている。それらは遠隔環境で動き回ることになるため、障害物を回避することは明らかに重要な機能である[Lewis 2014]。いくつかのシステムには障害物を検出して障害物との衝突を回避するサポートメカニズムがあるが[Takayama 2011]、ユーザがシステムの動作を制御して人間の能力を十分に活用することは依然として重要である。

MRPシステムの外観は人間とはかなり異なるが、アンドロイドもしくはジェミノイドと呼ばれる特定のタイプのロボットは人間に似せて作られている。身体所有錯覚に関する報告として、ユーザ（ロボットの操作者）から離れた場所に置かれたロボットを第三者が突いている様子をユーザがカメラ越しに見るとき、自身が突かれているような感覚を感じる事が報告されている[Nishio 2007]。この結果の延長としての研究として、[Jazbec 2017]は運動の動作主体が自分である感覚が自身の身体的所有感にどのように影響するかについて調査している。

2.4 空間と動きの知覚

野生動物が環境の中で生き残るためには攻撃の危険を感知する必要がある、差し迫った

接触を予測するために使用できる潜在的な情報に関する多くの研究が過去数十年にわたって行われてきた。そこでの重要な指標の 1 つとして衝突までの時間または接触までの時間 TTC(Time To Contact/Collision)がある。これはユーザと物体(敵)が接触するまでの残り時間として定義される [Schiff 1965] [Schiff 1990] [Yan 2011]。TTC は、距離や速度などの奥行き方向の情報を検出することなく、視覚的な画像処理によって簡単に取得できる [Pundlik 2011][Kilicarslan 2019]。これまでの多くの研究においては対象として剛体を扱っていたが、歩行者などの剛体以外を障害物として想定したものもある [Pundlik 2011]。さらに、TTC の実現世界での適用範囲は、車両制御 [Kilicarslan 2019][Hou 2014] など、産業においても利用されている。

なお、距離の知覚は人によって異なる。一般に、距離の知覚は、奥行き方向の情報だけでなく、ユーザを取り巻く環境状況や、生理学的状態や行動の意図などの個人的な変数(状態)によっても影響を受ける可能性がある [Renner 2013]。さらに、仮想環境における個人的な距離の知覚に関する研究も行われている [Renner 2013][Rousset 2018]。ユーザが HMD を介してバーチャル世界を体験する場合、実際の環境での距離と比較して距離が過小評価されることが明らかにされている。

2.5 ドライビングシミュレータ

ドライビングシミュレータを利用して車両の挙動を模擬する試みは、機械および制御システムの分野で長年にわたって行われてきた。企業ベースでは、6DOF モーションベースや 360 度のドーム型スクリーンを用いたシミュレータが採用されており、一部のシミュレータにおいては VR 機能もサポートしている [Slob 2008]。これらのシミュレータを用いることで、ステアリングホイールの回転角度、車両の速度、道路上の車両の位置(経路)などのシミュレーション変数を自由に設定し、かつ事故などのリスクなしに車両開発のための貴重な情報を獲得することができる。

車両自体の動的モデルに加え、運転を司るドライバの運転行動モデルをシミュレータに

組み込むことで、シミュレーションをより効果的かつ実用的にする研究も数多い。前方を走行する車両の追従走行[Pekkanen 2018]、障害物回避[小林 2019]、携帯電話での通話などといった安全運転を妨げる行為[Xiao 2015]の場面でのドライバの挙動をモデル化するという試みがある。それらの研究は、道路形状や他車両との関係あるいはドライバの自発的行動といった、自動車運転における基本的または深刻な要請に応えるものである。一方で、自動車運転時のドライバの感覚器によって取得される周辺環境情報はドライバの運転に少なからず影響を与える。Hsu ら[Hsu 2016]は、交差点での歩行者、交通標識、および路面上に描かれたハッチングの有無がドライバの減速動作に及ぼす影響について分析を行っている。この研究はドライバの状況認識と作業負荷が、他車両の存在にとどまらず、周囲に存在するその他の環境要素に依存することを示唆している。また、時刻および天候を踏まえた運転モデルの研究もある[楠瀬 2016]。ドライバの運転行為に影響を与える要素の特定と、それがドライバの振る舞いに生じさせる変化の度合いの多くは依然として課題として残されている。

一方、仮想実験環境で与えられた刺激に反応する人間の行動について研究が古くからなされている。前述したとおり研究課題の1つとして衝突までの時間TTCがある。向かってくるオブジェクトを参加者が回避する動作も、速度[Li 2001]およびオブジェクトサイズ[DeLucia 1994]に応じて変化することが先行研究により明らかにされている。さらに、鋭利な形状などといった危機感を与えるような情報は人間の視覚にバイアスをかけ、生理学的反応を高めることが報告されている[Chen 2016]。これらの現象はBIBS(Body Image / Body Schema) [Gallagher 1986]との関連でも議論されている。本研究における第4章とは、自動車という身体拡張機材を伴った参加者の反応に着目しているという点で異なっている。

また自動車運転シミュレーションにTTCを適用し、他車両の距離認知およびリスク判断に速度、車両サイズ、運転要求が及ぼす影響を明らかにした研究[川上 2011]もある。VR空間におけるBody Schemaに関する研究[渡邊 2016]もあるが、現実と異なる情報を参加者に提示したときの参加者の知覚の違いを評価しており、VR空間で参加者に与える情報の差

異による参加者の振る舞いを調査対象とする本研究と異なっている。

視覚情報が運転者の速度感に及ぼす影響についてはオプティカルフローに注目した整理がなされており[赤松 2007][四辻 2009], 走行映像を用いた実験による研究も報告されているが[濁澤 2003], そこでは知覚レベルでの取り扱いにとどまっている。本研究では実用を意識したうえで知覚と運動の相互作用に踏み込んだ解析を行うことにより, 運転行動に影響を及ぼす要素とその影響範囲を具体的に明らかにする。

2.6 頭部動作インタフェース

VR 関連のインタフェースに関する先行研究がいくつもあるが, 有望なアプローチの 1 つとして, ユーザは注意を向けているオブジェクト (例として他者やアイテム) に対して目を向けると想定できるため, 注視を用いたインタフェースが考えられている。ユーザが装着している HMD の位置や方向を検出することで, 対象物を特定できる可能性が高い。[Fang 2019]では, 視線インタフェースが実装された VR アプリケーションのユーザビリティと心理的要因を調査している。また手のジェスチャやコントローラベースのインタフェースを組み込むことにより, VR システムとのユーザインタラクションを増やす試みもある。[Pfeuffer 2017]では, VR システムの視線インタフェースに対する手のジェスチャの影響を分析している。[Kharoub 2019]では, VR 3D デスクトップ環境でのコントローラベースおよびジェスチャインタフェースの使いやすさとユーザエクスペリエンスに関する実験を実施している。既存のトライアルのほとんどは VR 空間内の特定のオブジェクトを選択するために設計されているが, 我々は VR 空間内を移動する物体の動きを制御するためのインタフェース技術に関心を持っている。

頭部動作に関しては, [Hachaj 2019]は, 機械学習技術を使用して, 時計回り/反時計回りの回転とうなずきを含む 7 つの頭部のジェスチャの認識と分類を提案している。さらに, 他の先行研究では, 四肢麻痺のある人のために, 頭部動作によってロボット[Rudigkeit 2019]と車椅子を制御することを調査している[Kumar 2015][Gupta 2016][Davy 2014]。イ

インタフェース技術として頭部動作を採用する研究のほとんどは現実世界での機器制御を想定しているが、頭部動作は VR 空間にあっても有効な手段であると考えられる。

2.7 VR 酔い

VR 酔いと乗り物酔いの研究は、VR システムの実現可能性に影響を与えるため重要である。[Tanaka 2004]は、臨場感に影響を与えることなく、VR 酔いを低減する角速度と視野角を効率的に計算する最適値検索システムを検討している。さらに、車両が走行しているときの乗り物酔いに関する研究がある[Saruchi 2020]。症状を和らげるには、乗員が横方向の加速方向に向かって頭を傾ける角度を小さくする必要があることが知られている。横方向の加速に応じた乗員の頭部動作のモデルも提案されている[Saruchi 2019][Saruchi 2019-2][Wada 2010][Wada 2014]。さらに、[Diels 2014]は自動運転車の時代を見越して、(車)酔いに関連する設計上の問題について議論している。[Wang 2019]は仮想環境での車両ナビゲーションの応用において、視覚的に誘発される乗り物酔いの新しい測定基準を提案している。

第3章 ユーザが有する自身の身体の大きさ (横幅)認識に基づく回避行動の調査

3.1 はじめに

本章では、VRを用いた回避行動の振る舞い実験を通じて、ユーザのVR空間における大きさ認識について明らかにする。実験では身体の大きさ未知かつ不可視の状況に置かれたユーザが、接触や回避成功の経験を重ねる過程で身体の大きさを獲得していく様子を観察した。本章にて対象とした調査項目は受動的認識、能動的認識、認識の改定、身体の大きさ(幅)の影響および性差の5つであり、それらを明らかにするために段階的に2つの実験を計画した。いずれの実験においても参加者は大きさ未知かつ不可視のボードとしてVR空間でモデル化した。

なお、1つ目の実験(実験1)は予備実験と主実験の2段構成を取っており、予備実験では受動的認識について調査し、主実験では能動的認識と認識の過程について調査を行った。2つ目の実験(実験2)では、実験1の主実験の結果を受けて身体の大きさ(幅)の影響と性差について拡張して調査を実施した。ここで性差にも着目した理由は、現実世界における空間認識の性差同様に、VR空間においても性差が存在するかどうかを検証するためである。ポジショニングや回避タイミングに差異があるとすれば、用途によってはVR空間に没入しているユーザに意図した効果を得るために、適切なコンテンツ制作(車両や環境のデザインなど)を図ることが求められよう。

各実験における調査項目を表3-1にまとめる。

表 3-1 各実験における調査項目

調査項目	実験 1	実験 1	実験 2
	予備実験	主実験	
受動的認識	○		
能動的認識		○	○
認識の過程		○	○
身体の大きさ(幅)の影響			○
性差			○

実験 1 の予備実験では直立不動で前方を見るように指示した参加者に向かって球形の物体（ボール）を飛翔させ、不可視の身体（ボード）との接触や非接触の経過を通して自身の身体の大きさを推定させた。物体がボードに当たると、接触を知らせる映像刺激効果と HMD に搭載されたイヤホンを通じて接触点で音を発生させて参加者に接触位置を推察させる手がかりとさせた。この予備実験は、参加者が身体の大きさ（幅）をどれだけ正確に獲得できるかをテストすることであるが、続いて実施した主実験では、参加者には飛んでいる物体との衝突を避けるために積極的に左右に動くことを指示した。試行が進むにつれて身体の大きさ認識がどのように変化するかを回避行動から観察することを目的とした。なお、参加者の回避動作は Kinect にて検出を行った。

実験 2 では自身の身体サイズ（幅）に比べて大きい、例えば車両に搭乗していることを想定し、大きさの違いが及ぼす振る舞いの違いについて調査した。参加者は実験 1 と同様に大きさ未知かつ不可視なボードとして VR 空間にモデル化した。参加者は VR 空間を一定速度で前方に進むように設定され、自身の扮するボードの大きさを推定して、接近する障害物である柱との衝突を避けるように指示を行った。参加者が扮する身体ボードの幅を大きくとったため、実験 1 の主実験で実施したように参加者自身が自らの身体を左右に移動回避するのは仕様設備（Kinect）の認識範囲的にも困難であり、また参加者の運動量的にも負担

がかかる。そのため椅子に座った状態で Gamepad での操作にて回避行動を取らせた。ボードが柱に当たると、実験1同様に HMD に搭載されたイヤホンを通じて接触点での接触音を発生させたが、移動量増加に伴う VR 酔いを低減する目的で、映像刺激効果は与えなかった。実験2では VR 空間での回避行動の男女差に注目して、ユーザ行動から自身の大きさ認識について違いについて調査も行った。これは現実の空間において空間認識の男女差があるように、VR 空間においても男女差がどのようにあるかを明らかにするためである。

実験1の予備実験および主実験、実験2の対象物、回避の有無、回避操作および参加者への接触通知に用いた刺激の一覧を表3-2にまとめる。

表 3-2 各実験の対象物、回避の有無、回避操作および刺激

	対象物	回避	回避操作	刺激
実験1(予備実験)	ボール	なし	—	映像刺激・音
実験1(主実験)	ボール	あり	自身の動作(Kinect で検出)	映像刺激・音
実験2	柱	あり	Gamepad 操作	映像刺激

3.2 実験の動機

混雑した街のなかを歩く際、他の歩行者や障害物からの距離を保つことによって接触を回避する。この場合、近接の対象物については直接的に目を向けることでその大きさを確認することはできるが、自分自身の大きさを確認するために自身の体を見ることは通常は行われぬ。これは BIBS がすでに各人に形成されているためである。このようなことは乗り物やリモートロボットの操作、一人称視点でのアバターベースのゲームのプレイなどといった状況でも当てはまる。逆に、例えば自動車を運転する場合、ドライバは運転している車のサイズを把握した上でなければ接触のリスクが高まる。

既存のコンピューティングシステムでは、ユーザとの間でやり取りされる情報のデザイ

ンが中心的な関心事項であり、ユーザの身体の存在はあまり考慮されていない。例えば一人称シューティングゲームにあっては、身体の大きさが異なる大人でも子供でも画面表示内容は変わらず共通である。このような取り扱いはゲーム用途では問題ないが、自動車開発などといった産業用途では十分ではない場合がある。

実世界のモノと身体との係わりを図 3-1 に概念的に示す。人間は自身の身体を通して対象世界と係ることもあれば、自らが操作する機械（例えば自動車）や持ち物で拡張された身体を通して係わりを持つこともある。後者の場合には、ユーザがすぐには大きさ感覚を把握できないこともある。拡張された身体についての BIBS を獲得してはじめて支障なく社会生活を送ることができるようになる。

ユーザはどのように身体の大きさを把握していくかを調査する必要があると考え、不可視の身体(ボード)の大きさを障害物(ボールや柱)の回避試行を通した BIBS 把握の具合を調査することにした。実験において身体を不可視としたのは、参加者に障害物と自身との距離の差を視覚的に把握することが起こらないようにするためである。VR 空間におけるユーザの BIBS の把握メカニズムを明らかにすることで、VR 空間でのコンテンツ制作の可能性を拡げることを目指す。

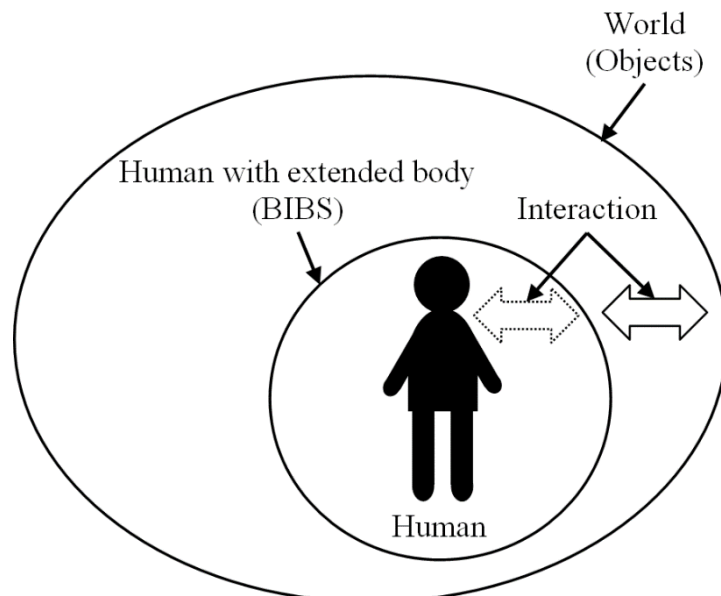


図 3-1 拡張された身体を通した周囲環境との相互作用

3.3 実験 1(予備実験)

3.3.1 参加者, 装置および手順

21 歳から 60 歳 (平均 : 38.5, 標準偏差 : 13.9) の 8 人 (男性 6 人と女性 2 人) が実験に参加した。彼らは通常の視覚と身体能力を持っていた。実験に先立ち, すべての参加者には実験手順について説明し, 参加の同意を得た。教示文については付録 A.1 に, また実験の実施期間と実施場所は付録 G.1 に掲げる。

実験で使用したコンピュータは, Intel Core i7 (3.50 GHz), 16 GB の RAM, および NVIDIA GeForce GTX1080 グラフィックボードを搭載していた。実験で使用した VR コンテンツは, Oculus Rift HMD (CV 1) を介して, 片眼あたり 1080x1200 ピクセルの解像度でユーザに提示した。HMD の視野角 (FOV: Field of View), リフレッシュレート, および重量は, それぞれ 110 度, 90 Hz, および 470g であった。実験の VR コンテンツは, Unity 5.6.0f3 (64 ビット) を使用して制作した。

実験には, 0.2 m (タイプ A) と 0.7 m (タイプ B) の 2 種類の幅のボードを用いた。直径 30cm の物体 (ボール) を参加者の前方 10 m の位置から発射し, その速度は 7.5 m/s に設定した。結果として, 発射後約 1.3 秒で参加者に到達する (図 3-2 参照)。物体の投射範囲はボード幅を考慮して, タイプ A の場合は $\pm 2^\circ$, タイプ B の場合は $\pm 4^\circ$ の範囲内でランダムな軌道とした。また図 3-3 に示すように, 物体は床から 1.0m の高さから発射し, 1.2m から 2.0m のランダムな高さでボードに到達するように設定した。図 3-4 は参加者に呈示した映像の例である。複数の球形の物体画像を図中に示しているが, あくまでも投射軌道のイメージを補助する参考情報であり, 実際には, 各瞬間には床面に影を付した 1 つだけである。同様に, 実際の提示映像には物体の投射の始点を示す破線は表示されていない。

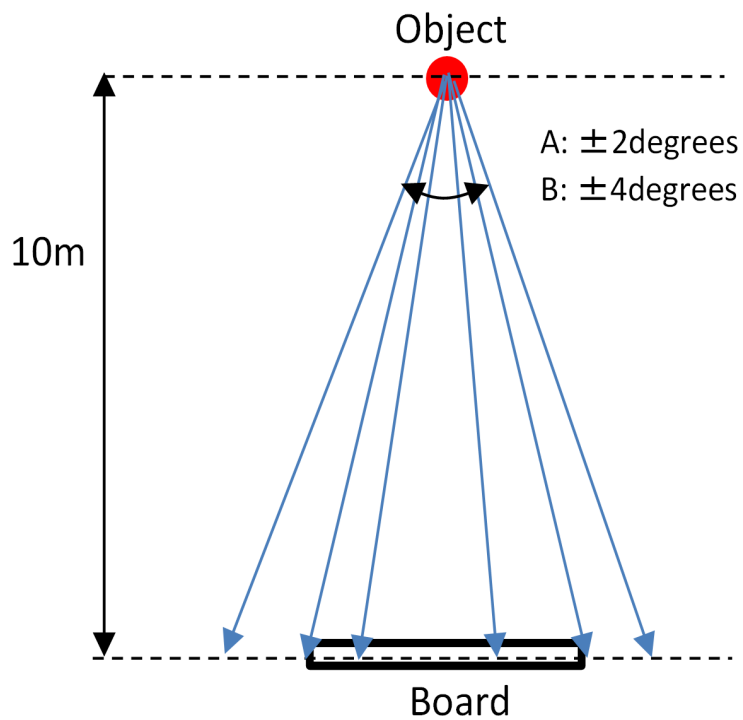


図 3-2 実験 1 (予備実験)における物体(ボール)の軌道—上面図

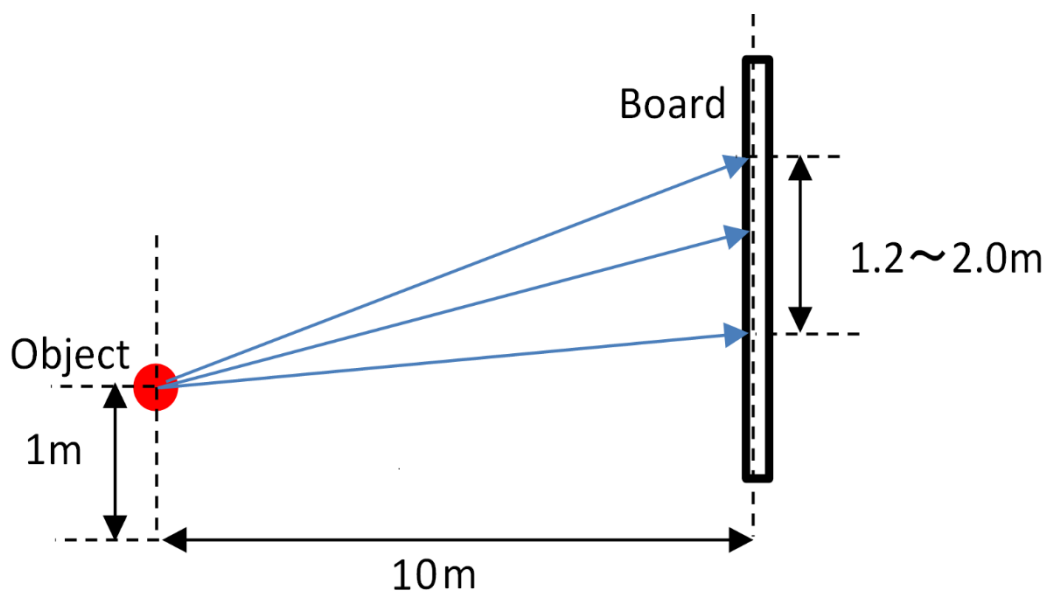


図 3-3 実験 1 (予備実験)における物体(ボール)の軌道—側面図

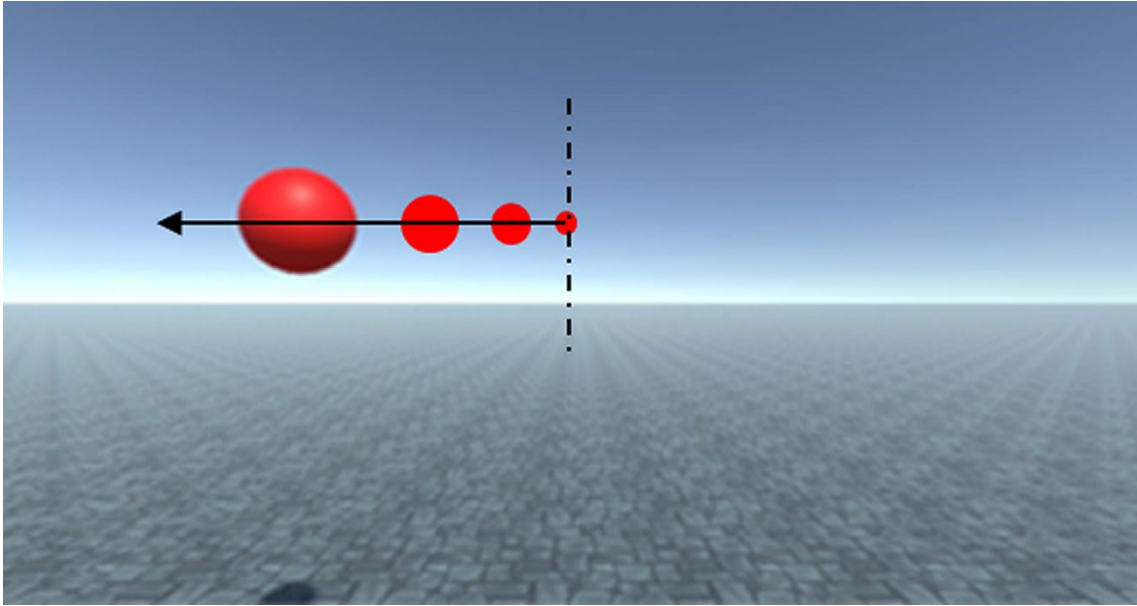


図 3-4 物体(ボール)の軌道の様子

参加者が物体との衝突を認識する手掛かりとしての映像刺激効果として、衝突時には背景画像を回転方向ならびに前後方向へ揺らすようにした。図 3-5 はそのイメージ図である。ここで、回転方向の映像呈示の効果を回転効果(Rotational effect)、前後方向への映像呈示の効果を前後効果(Back-forth effect)と名づける。回転効果にあつては、例えばボードの右側に物体が衝突すれば、ユーザへの呈示映像は右方向に振られることになる。この映像効果の大きさは、物体がボードの中心から離れるにつれて大きくなるように設定した。映像の変化の程度によって、接触位置がボードの中心より遠いのか近いのかを把握させる効果を狙ったものである。一方で、物体がボード中央に当たった場合は映像的な変化は生じない。そのため前後効果を別途用意した。前後効果は接触位置に関係なくユーザへの呈示映像を物体の衝突により前後に揺らす(少し後ろに動き、その後に元の位置まで戻る動き)映像刺激である。また、物体がボードに当たったときに HMD に取り付けられたイヤホンを通じて衝突位置から省都音が発生させる衝突音刺激を用意した。すなわち 2 種類の映像刺激と衝突音刺激の計 3 つの刺激にて物体の衝突をユーザへの刺激として与えた。

なお参加者の頭部が動くと VR 映像が HMD 位置の変化に応じて変化するが、VR 空間内

ではボードの位置は初期位置から変わらないようにして、物体との接触がない限り映像の変化は生じさせなかった。そのため説明文に示したとおり、参加者には「前方を見て動かずに立ってください」と指示をした。

参加者は2つのグループに分け、半分（グループ1）は最初にタイプAを試行し、次にタイプBを試行した。残りの半分（グループ2）はグループ1とは逆に最初にタイプBを試行し、次にタイプAを試行した。各試行で物体の投射は60回とし、各試行の完了後、参加者に自身が扮するボードの推定幅を、両手を使って示すように依頼し、両手の間の長さを測定した。測定方法の選択は様々に提案されているが[Piryankova2014]、HMDを装着した参加者が拡張された身体（ボード）幅を測定者に簡単に伝える方法であるため、本方法を採用した。

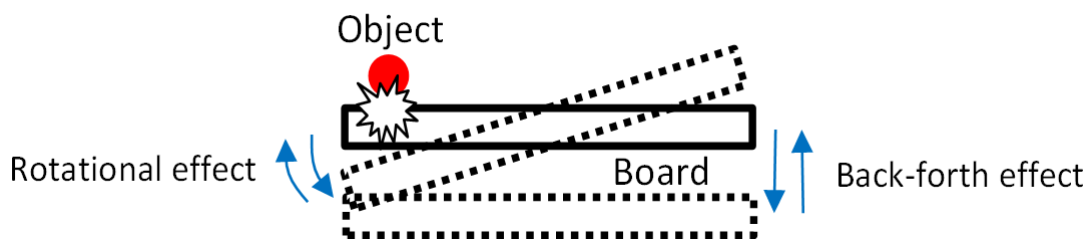


図 3-5 映像刺激

3.3.2 結果

実験の結果、参加者はタイプAのボード幅を0.38 m (SD : 0.13 m) と推定し、タイプBのボード幅を0.63 m (SD : 0.11 m) と推定した。参加者は物体の軌道と衝突の有無からおよそボード幅を推定できていることが明らかになった。また、狭いボード幅のタイプAの推定幅は実際のボード幅よりも広く推定されていたのに対し、広いボード幅のタイプBの場合は実際のボード幅より狭く推定されていることがわかった。

3.4 実験 1 (主実験)

3.4.1 参加者, 装置および手順

22 歳から 24 歳 (平均 : 22.6, 標準偏差 : 0.73) の 14 人 (男性 11 人と女性 3 人) が実験に参加した。彼らは通常の視覚と身体能力を持ち, そのうちの数名は実験 1(予備実験)にも参加していた。予備実験と主実験の間には 3 か月間の間隔を空けた。すべての参加者には実験手順を説明し, 参加の同意を得た。教示文については付録 B.1 に, また実験の実施期間と実施場所は付録 G.1 に掲げる。

主実験においても予備実験と同様の機器を使用した。さらに, 参加者の右または左への回避動作を検出するために, Unity Package (Kinect.2.0.1410.19000) と Microsoft KinectV2 を使用した。図 3- 6 に示すように, Kinect は参加者に対面する位置で, かつ RGB カメラの中心を基準にして床から 0.75 m 上に設置した。また参加者の立ち位置は RGB カメラの前面から 1.5m の距離とした。Kinect による参加者の位置検出は胸の中心 (spine shoulder) とし, 参加者のいずれも実験中に Kinect の身体検出可能範囲から逸脱することはなかった。

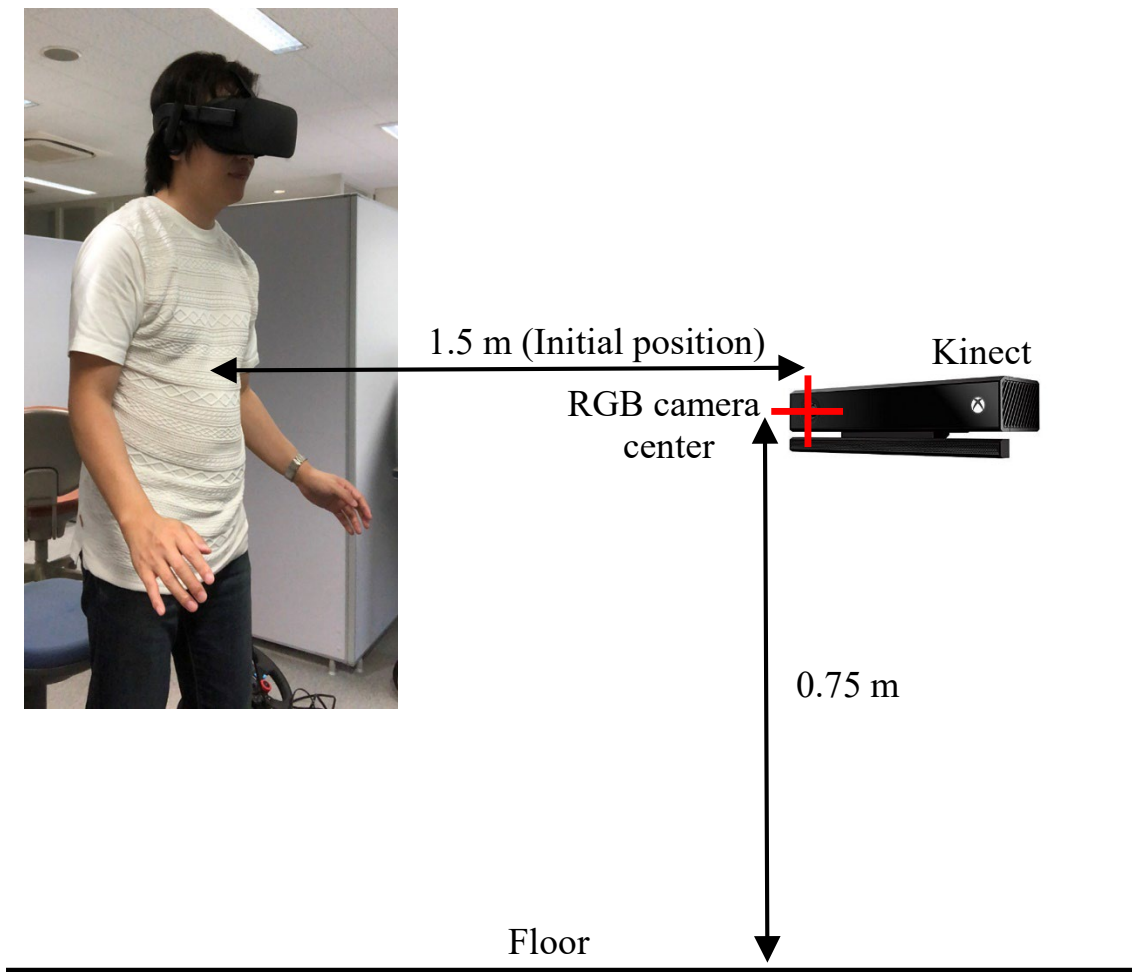


図 3- 6 Kinect の設置位置

主実験においても予備実験と同様の映像刺激および衝突音刺激を提示した。一方，実験設定を簡素化し，参加者の回避行動に焦点を当てるため，使用するボードの幅については予備実験において推定幅のバラつき（標準偏差）がより少なかったタイプ B（0.7 m）を選択した。さらに，参加者に身体を素早く動かし続けるのは負担が大きいことを考慮して，物体の飛翔速度を 5m/s に下げることにした。飛翔する物体の高さは一定とし，水平面上の物体の飛翔方向は $\pm 3^\circ$ の範囲内とした。さらに，ボード（身体）の幅を特定するよう参加者に促す目的で，物体を左右に交互に投射した。

さらに，参加者には試行の残り回数の他に，耐久性とエネルギーを示す 2 つのステータスバーを HMD 上へ表示した。耐久性の値は 0～100 の範囲で，物体がボードに当たるたびに

減少させた。耐久性の値がゼロになった時点で試行は終了とした。エネルギーは参加者が試行中に動いた量に応じて減少させた。エネルギー値がゼロになったときも試行を終了させた。ここでは、25回の接触で耐久性がゼロになり、合計50m移動するとエネルギーがゼロになるように設定した。これらの耐久性とエネルギーの制約は、身体を無駄に大きく移動することなく効果的に物体を回避することを参加者に促すためのものである。耐久性とエネルギーがゼロにならない場合でも、最大100回の物体の投射を以て試行を終了させた。

3.4.2 結果

参加者のいずれも100回の試行を完結することはできなかった。参加者1人あたりの試行回数の平均は53.6であった。試行回数の最大値は71回、最小値は24回であり、標準偏差は10.7であった。参加者の試行回数は総計で750回であった。以下では物体とボードの間の回避ポジション（近接距離）、回避タイミング（Avoiding timing）および試行行動の経時的変化の観点から実験結果を分析する。

3.4.2.1 回避ポジション

物体がボードとの接触位置に到達したときのボードの中心（本体）と物体の中心との距離を近接距離と定義する。参加者が左に移動（左回避）し、物体がボードの右端にちょうど接触したことになる場合、近接距離は0.5mとなる。これはボードの長さの半分（0.35m）と物体の半径（0.15m）の合計が0.5mであるためである。一方、参加者が右に移動（右回避）したときに物体がボードの左端にちょうど接触したことになる場合、近接距離は-0.5mとなる。近接距離が0.5mより大きい、または-0.5mより小さい回避ポジションを取った場合は、参加者（ボード）が物体を回避することに成功したことを表している。逆に、近接距離が-0.5mから0.5mの範囲内であれば、ボードと物体が接触していたことを意味する。全てのトライアルでの近接距離データのヒストグラムを図3-7に示す。横軸が近接距離、縦軸が累積回数を表している。

分散分析の結果は右回避グループと左回避グループの間で近接距離（絶対値）に有意差がないことを示した ($F(1, 748) = 0.23, p > 0.05$). 平均値は 0.60m (標準偏差 : 0.26m) であった. 参加者が物体を回避するために 0.6m を必要と判断したことになり, 実際のボードサイズから片側 0.1m 大きいことがわかった.

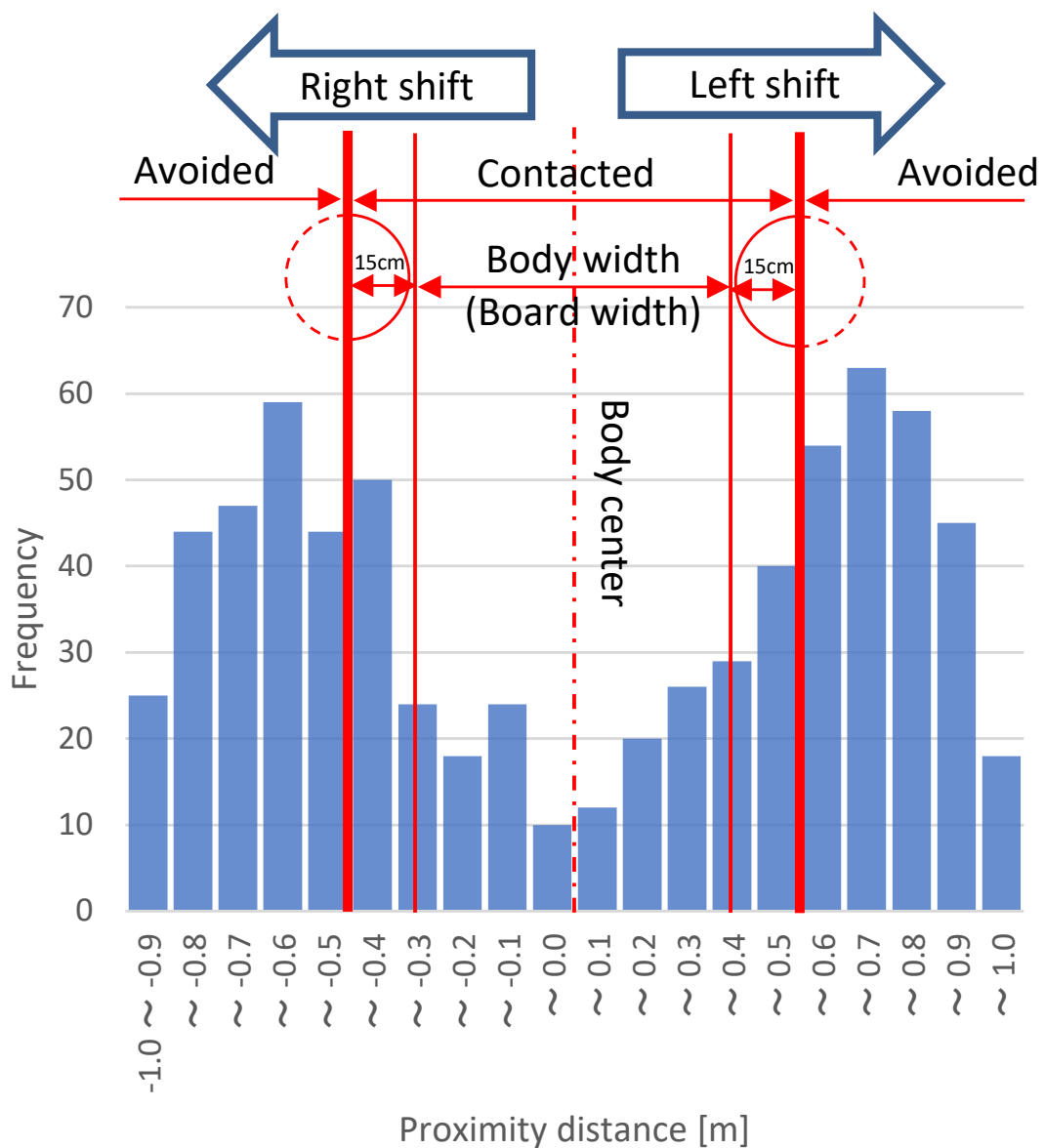


図 3- 7 物体を回避した試行結果(回避ポジション)

3.4.2.2 回避タイミング

試行の際に参加者が回避行動を起こすタイミングの傾向を明らかにするために、各試行において、物体が飛翔を開始した時点から 5m 地点到達まで（つまりボードに到達するまでの飛翔時間の前半）に参加者が行った横方向移動量を、飛翔距離 10m 全体を通しての横方向移動量で割った値を回避タイミングと定義する。物体が参加者の眼前に現れた直後から物体が 5m 地点に到達するまでの期間に回避行動が集中すると、回避タイミングは 1 に近づき、逆に、物体が参加者に到達する近傍まで回避行動が延期されると回避タイミングは 0 に近づく。

図 3-8 は、すべての試行の回避タイミングのデータを示したものである。横軸ならびに縦軸はそれぞれ回避タイミング、度数を表している。試行データの集計は、右回避と左回避で別々に行っている。回避タイミングに対する左右への移動方向の影響を検討するために分散分析を行った。結果は $F(1, 748) = 3.84$, $p = 0.0504$ となり、有意水準 5% でほぼ有意な差が示された。表 3-3 は、右回避、左回避およびその両方における回避タイミングの平均と標準偏差をまとめたものである。全データを通した回避タイミングの値が 0.4129 (0.5 未満) であることを考えると、参加者は物体が近づいてから回避行動を大きくするという傾向を示していることが分かった。

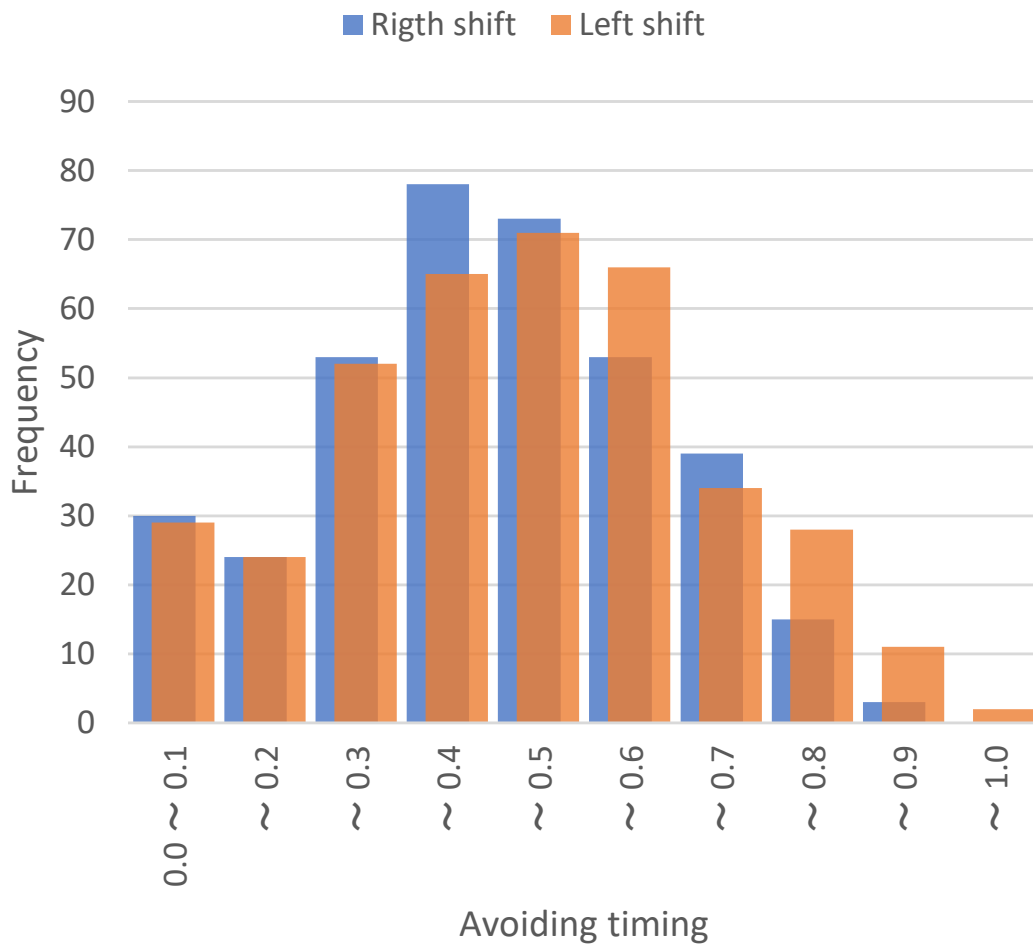


図 3-8 物体を回避した試行結果(回避タイミング)

表 3-3 回避タイミングの平均と標準偏差

	平均	標準偏差
右回避	0.3986	0.1856
左回避	0.4267	0.2055
全データ	0.4129	0.1964

3.4.2.3 試行の経過に伴う行動の変化

次に、トライアルが進むにつれて参加者の行動がどのように変化するかといったことを、上記 2 つの指標（回避ポジションおよび回避タイミング）の観点から調査した。具体的には各参加者の試行を 2 つのグループに分割して検討することを考えた。試行開始時点から k 回目までのトライアルをまとめて第 1 グループと定義する。たとえば k が 3 の場合、最初のグループには 1 回目から 3 回目のトライアルに係るデータを含めるものとし、以降残りのトライアル（例では 4 回目以降）を第 2 グループとして捉える。 k が 1 増加するごとに、第 1 グループに含まれるデータの数は 14 件（参加者の数）増加する。

先ず k の値を変更するたびに、2 つのグループ間での近接距離データの有意差について分散分析の p 値を繰り返し計算することにより、トライアルが進むにつれて行動が変化するかどうかを調べた。図 3-9 は、 k を 2 から 20 まで変化させたときの p 値の変化を示している。横軸と縦軸は、それぞれ k 値と p 値を表している。 k の値が小さい場合には p 値は低く、実際に k が 8 までの範囲では p 値はほぼ 0.1 に収まっている。一方で k の値が 9 よりも大きくなると p 値は 0.1 を超える大きな値をとる結果となった。このことから参加者の行動には、初期段階（第 1 グループ）と後期段階（第 2 グループ）の間で大きな違いが生じており、変化点は $k = 9$ といえる。

次に物体と身体との回避ポジションの変化について検討する。図 3-10 は、 k を 2 から 20 まで変えたときの第 1 グループと第 2 グループでの近接距離の平均値をグラフ化したものである。横軸と縦軸は、それぞれ k 値と前記平均値を表している。 k の値が小さい場合、第 1 グループでの近接距離平均は 0.54m 周辺に集まっている。これは物体がボードの端に触れたときの回避ポジションは 0.5m であることを考慮すると、物体が参加者に衝突する可能性が一定程度ある。 k の値が大きくなると、近接距離は 0.6m に近づき、しかも第 1 グループと第 2 グループの近接距離の値は接近する。図 3-11 は第 1 グループと第 2 グループの近接距離データの標準偏差の変化を表している。横軸と縦軸は、それぞれ k 値と前記標準偏差を表している。 k の値が小さい場合、値はかなり小さいが、 k の値が大きくなると増

加し，最終的にはわずかに減少して一定になる。

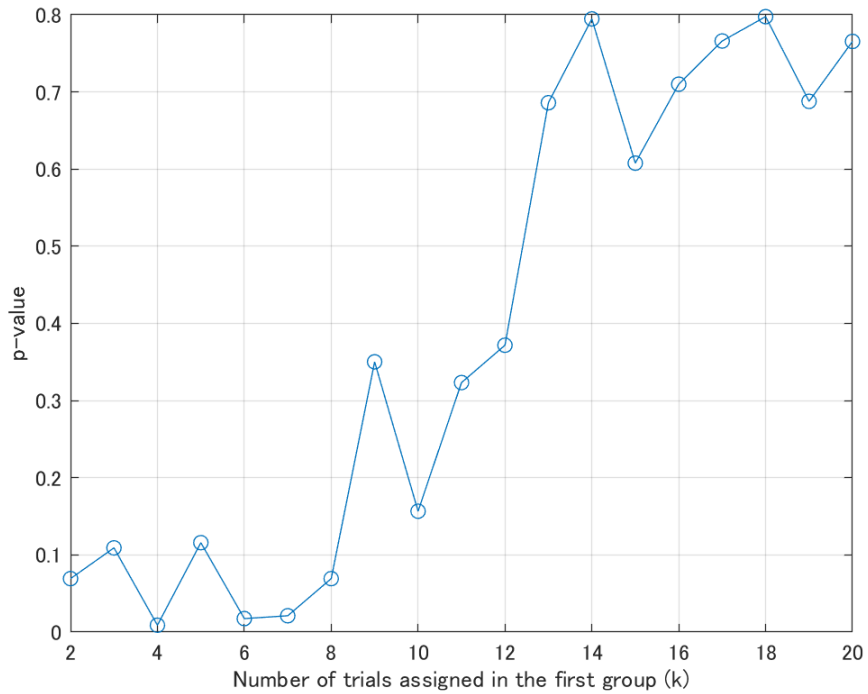


図 3-9 k を変化させたときの近接距離に関する p 値の変化

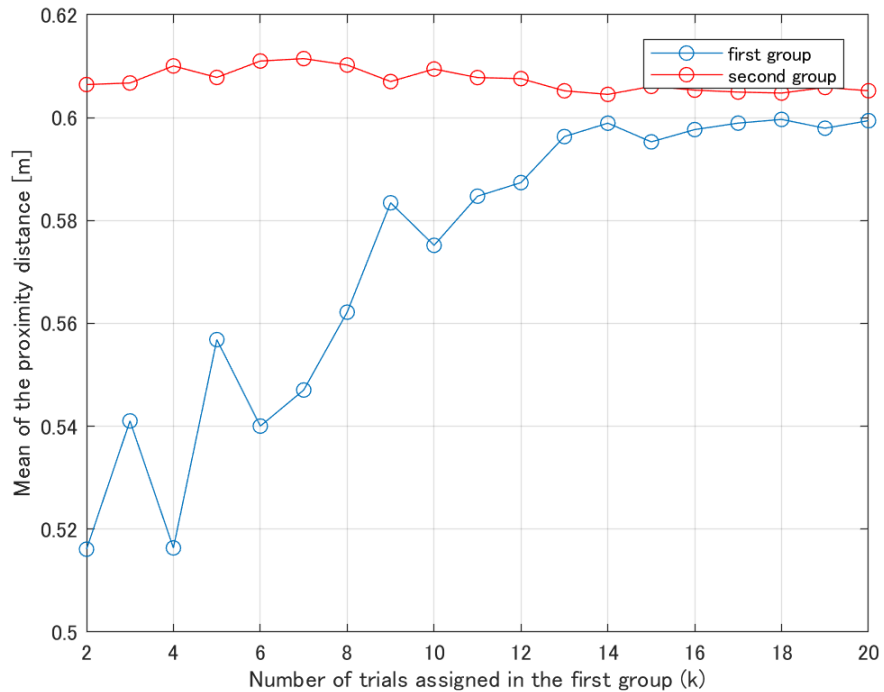


図 3-10 k に対する近接距離の平均

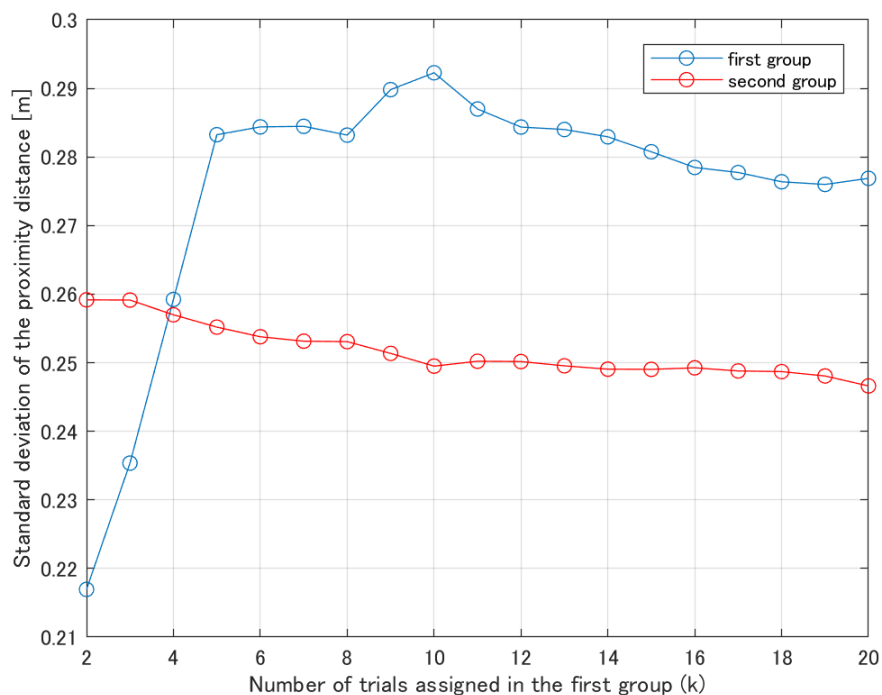


図 3-11 k に対する近接距離の標準偏差

図 3-12 は、回避タイミングに関して第 1 グループと第 2 グループの間の p 値の変化を示している。横軸と縦軸は、それぞれ k 値と p 値を表している。回避ポジションの場合と同様に、 k の値が小さいほど p 値がゼロに近く、 k の値が大きくなるにつれて p 値は増加することを示している。図 3-13 は、 k を変化させたときの第 1 グループと第 2 グループそれぞれの回避タイミングの変化を示している。横軸と縦軸は、それぞれ k 値と前記平均値を表している。回避ポジションと同じパターンが形成されていることがわかる。実際、第 1 グループでは k の増加につれて回避タイミングが大きくなり（早期になり）、一定の状態になる（安定した回避タイミングになる）。このことは、初期のトライアル段階では、参加者は物体に近づいたときに物体を回避したことを表している。一定数のトライアルの後、参加者はより早く回避行動を取り始めるようになったといえる。図 3-14 に回避タイミングの標準偏差の変化を示す。横軸と縦軸は、それぞれ k 値と前記標準偏差を表している。トライアルが繰り返されるにつれて、値は徐々に小さくなっていくことがわかる。

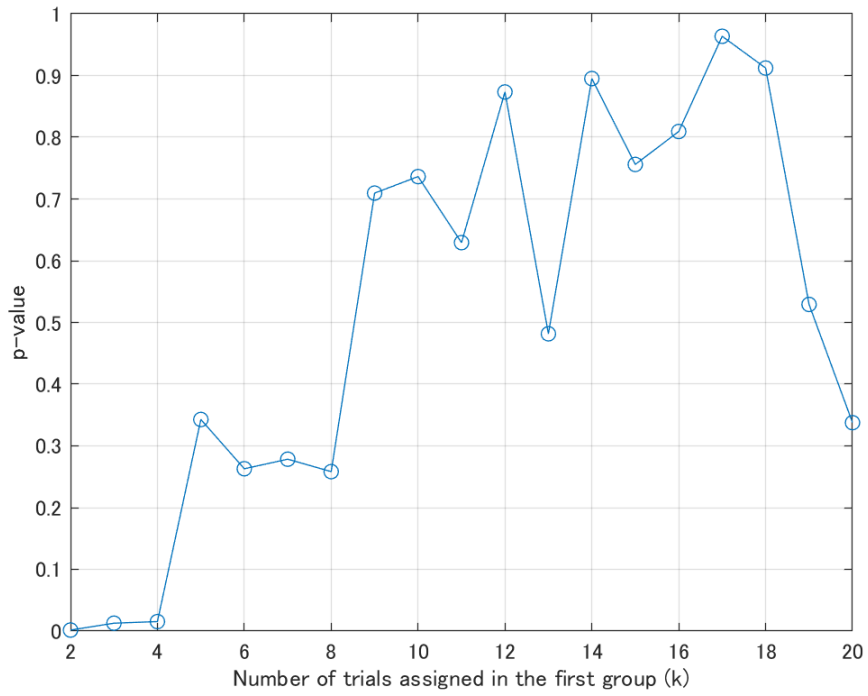


図 3-12 k を変化させたときの回避タイミングに関する p 値の変化

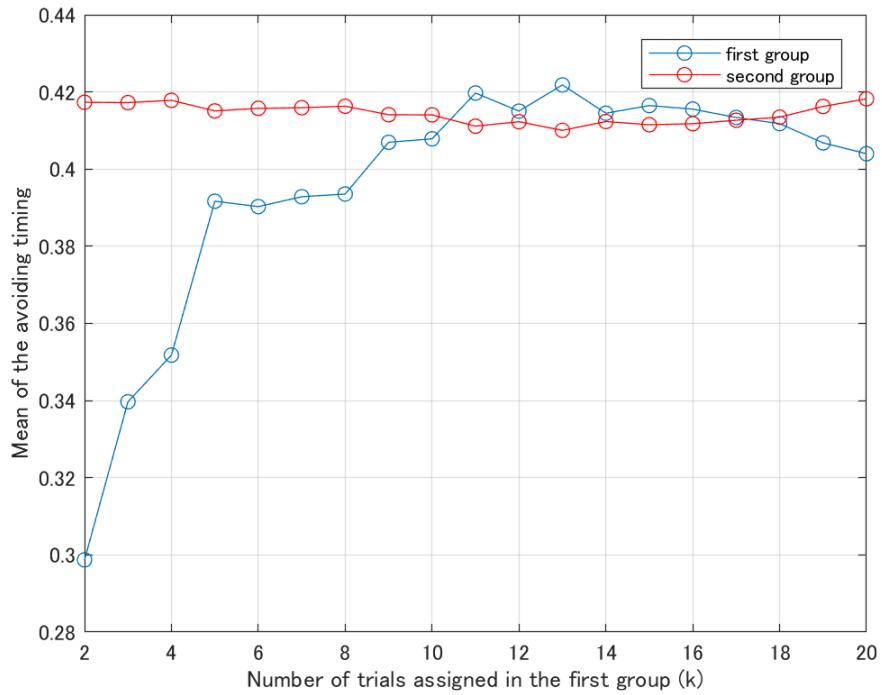


図 3-13 k に対する回避タイミングの平均

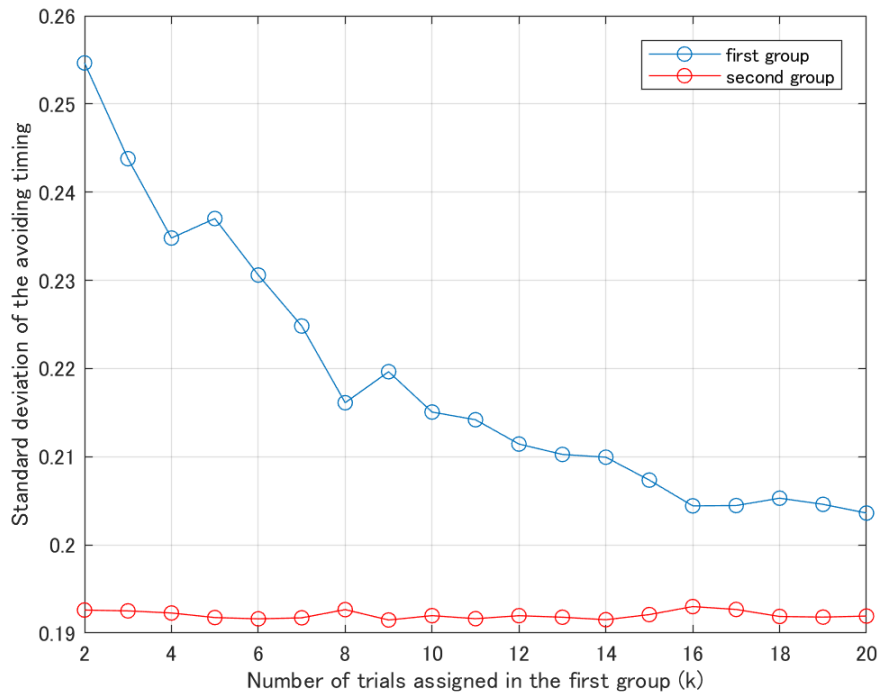


図 3-14 k に対する回避タイミングの標準偏差

3.4.3 実験 1(予備実験と主実験)の考察

参加者は、実験 1 の予備実験における投射された物体の飛翔ルート受動的に見る行いや、実験 1 の主実験における能動的な回避行動を通して不可視で大きさが未知のボードの幅をうまく捉えることができていたといえる。

実験 1 の予備実験の結果は、実験で設定したボード幅が狭い (0.2 m) 場合、参加者はそれよりも身体 (ボード) 幅が大きいと捉えたが、広いボード (0.7 m) の場合には逆の結果となった。男性および女性の平均肩幅はそれぞれ 39.8cm, 35.9cm である[河内 2005]ことを踏まえると、参加者の物理的な身体サイズに影響を受けた可能性がある。

実験 1 の主実験については、0.70m 幅のボードに対し、回避ポジションの結果から片側 0.10m 余分に回避していた。この結果は、予備実験での受動的な知覚判断の結果とは対照的に、参加者が体のサイズを過大評価していることを示している。この原因としては、移動量が制限されていた条件下 (参加者は効率的に回避することを要求されていた) で物体の回

避を成功させるためのマージンが含まれているためと考える。予備実験において参加者が認識したボード幅は 0.63m であり、主実験での余分な回避量を考えると、 $0.135\text{ m} (= 0.10 + (0.70 - 0.63) \div 2)$ が回避のための片側のマージンと解釈される。これは人間の認知の理解を形作る際に、マージンの存在を考慮に入れなければならないことを示唆している。一方、サイズ推定の差異は、タスクが能動的であるか受動的であるかに基づいて発生した可能性の他に、参加者の運動能力に違いやボード幅の違いによる認知行動への影響も考えられる。

一方、図 3- 13 の第 1 グループと第 2 グループに関連付けられた 2 つのグラフ線に基づいて、参加者が大きさ未知のボード幅を認識するために必要な試行回数は 10~14 回であることがわかった。試行の当初段階では参加者は自分の身体（ボード）の幅が不確かで、どれだけ回避すべきかを決めるのを延期する傾向があった。言い換えれば、参加者は回避行動において保守的であり、彼らは回避しなければならないタイミングまで現状の位置を維持した。また、図 3- 8 に示すように、回避方向によって物体を回避するタイミングが異なっている。右側の回避のタイミングは、左側に比べてわずかに遅れている。これは、利き手、利き足、利き目および心臓の位置（心臓を保護する行為）によって、一方または他方への偏りとして影響を受けた可能性がある。右側への回避は、物体が左側（心臓側）に当たるリスクを高めるため、参加者は右側への移動をためらった。その結果、右への回避は左への回避に比べて遅れた可能性がある。

さらに、我々の実験では物体が射出されたポイントを固定したが、現実の場面では物体は様々な方向から近づいてくる。Li と Laurent は、飛来する物体の進行方向ならびに速度を変えたときの参加者の行動について議論し、側面 20° を超える角度方向から物体が飛来する場合に回避反応の開始時の TTC が増加することを示した [Li 2001]。接近する物体の方向に関する不確実な条件下でのさらなる研究が必要である。

3.5 実験 2

3.5.1 参加者, 装置および手順

21 歳から 62 歳の 18 人の参加者 (男性 10 人, 女性 8 人) (平均 27.6, 標準偏差 11.7) が実験に参加した。彼らは通常の視覚感覚と身体能力を持っており, すべての参加者は右利きであった。参加者には全員, テスト手順について事前に説明を行い, 実験参加への同意を与えた。教示文については付録 C.1 に, また実験の実施期間と実施場所は付録 G.1 に掲げる。

実験で使用したコンピュータは実験 1 で用いたものと同一である。但し, 図 3-15 に示すように, 参加者は椅子に座った状態で Gamepad を手に持ち, HMD を装着することで VR 空間に没入させた。参加者には自身が透明なボードとして VR 空間内にモデル化されていることを知らせたが, そのボード幅は知らせず, 電柱を模した高さ 10 メートルのコンクリート色の柱を参加者の 10 メートル前方に配置した。試行が始まると, 図 3-16 に示すように, 参加者が扮するボードを一定速度で前進させることで, 柱との距離が近づくようにした。参加者(ボード)は 3 秒で柱の位置まで到達する。その後, 参加者の位置を初期設定位置に戻し, 次の試行が繰り返し開始される。



図 3-15 実験中の参加者

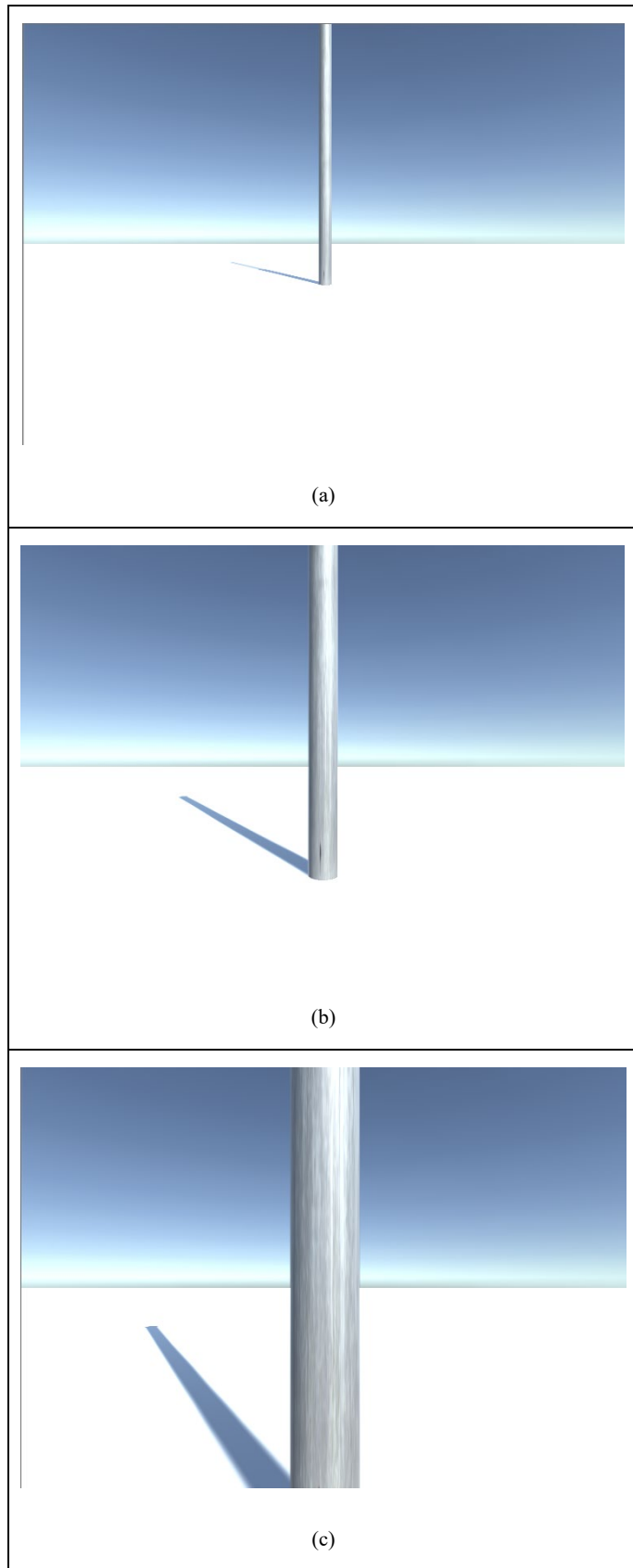


図 3-16 提示した柱の映像：(a) 遠方；(b) 中間；(c) 至近

参加者には、自分の身体(ボード)の大きさを推定して回避し、柱との衝突を避けるように指示した。 Gamepad のジョイスティック (図 3-17 参照) を傾けることで、VR 空間で自身(ボード)の位置を左または右に移動できる。 ジョイスティックからの信号は 50 Hz で PC に取得し、自身(ボード)の位置は最大 1m/s の速度で移動できるものとした。 自身(ボード)が柱に接触すると、HMD に取り付けられたイヤホンを通して接触点での接触音を発生させた。 ただし、VR 酔いを最小限にするために、接触を知らせるような視覚刺激は提示していない。

衝突の発生は自身の身体(ボード)幅が想定よりも大きいことを参加者に知らせ、参加者の回避行動を大きくさせる要素となる。 逆に、接触しないことは回避量が大きい可能性を参加者に知らせ、回避行動を小さくする動機づけとなることを期待した。 そのために実験では、回避に必要な最小限の動きを行うように参加者に依頼した。



図 3-17 位置調整に使用した Gamepad

ボード幅としては 1m, 2m, 3m の 3 種類を設定した。 これらの 3 つのボード幅の設定した理由は、ボード幅の違いによる回避行動やボード幅探索行動の違いを確認するためであり、 Gamepad の操作による移動速度を同一かつ目標までの距離を 10m (前述の通り 3 秒で到達) で回避できる範囲を考慮して設定した。 横方向移動速度が速すぎると位置調整が難

しく、到達時間が長いと複数回の試行を繰り返す時間が延びることで疲労が増大するため、そのような影響が少なくなるようにした。参加者には各ボード幅での回避試行を 50 回行ってもらった。50 回のトライアルが終了すると、HMD 画面にボード幅が変更され再度ボード幅を探索することを指示するメッセージを表示し、次のボード幅での探索試行を開始した。ボード幅の順序はランダムとした。3 つのボード幅探索試行がすべて完了した後、疲労と VR 酔いに関するアンケート（付録 C.2 参照）を参加者に実施した。

3.5.2 結果

実験 2 ではボード幅の違いの影響を調べるため、新たに接触率について検討を加えることにした。これはボード幅が大きくなることによる接触する可能性が高くなると考え、検討を追加することにした。また、回避ポジションを検討するのに実験 1 の主実験のようにボード中心から物体中心までの近接距離を用いると、ボード幅違いの差を比較しにくいいため、ボード端点と物体の端点との距離を分析することにした。回避タイミングについては実験 1 と同様に検討する。

3.5.2.1 回避方向

まず、回避方向の違いによって回避行動に差がないか検討するために、性別、ボード幅 3 水準(1m, 2m および 3m)、試行の経過 5 水準（第 1 試行から第 50 試行までを 10 試行毎に 5 つのグループに分割）の 3 要因の分散分析を実施した。ここですべての参加者の試行のうち一人の参加者の 1 試行だけ左右のどちらにも回避しなかったケースがあったので、これについては分析対象から除いた。

3 要因の交互作用を分散分析したところ、有意差は確認できなかった ($F(8, 2669) = 0.81, p > 0.05$)。そこで 2 要因毎の交互作用をそれぞれ確認した結果、いずれも有意差がなかった（性別とボード幅は $F(2, 2677) = 0.95, p > 0.05$ 、性別と試行の経過は $F(4, 2677) = 0.54, p > 0.05$ 、ボード幅と試行の経過は $F(8, 2677) = 1.10, p > 0.05$)。さらに主効果について分析したが、主効果についても有意差は確認できなかった（性別 $F(1, 2691) = 2.08, p > 0.05$,

ボード幅 $F(2, 2691) = 2.65, p > 0.05$, 試行の経過 $F(4, 2691) = 0.23, p > 0.05$). 回避方向は性別, ボード幅, 試行の経過によらず有意差がないことが確認できた. 表 3-4 に右回避, 左回避, 回避なしの回数の比率を示す. 左側への回避の割合が大きい結果となった. これは心臓を守るという無意識の作用が働いたために左への回避が増えた可能性がある.

表 3-4 回避方向の割合 (%)

右回避	左回避	回避無し
44.48	55.48	0.04

3.5.2.2 回避ポジション

次に回避距離の違いについて調査した. 回避距離は, 参加者がちょうど柱の横を通り過ぎたときの参加者と柱との距離とする. 回避距離は, 柱とボードがちょうど接する場合を 0 とし, 値が 0 以下の場合には参加者 (ボード) が柱に接触したことを表す. 回避距離が 0 より大きい場合には, 参加者は柱とは接触せずに柱の横を通過したことになる.

回避方向の場合と同様に, 性別, ボード幅 3 水準(1m, 2m および 3m), 試行の経過 5 水準 (第 1 試行から第 50 試行までを 10 試行毎に 5 つのグループに分割) の 3 要因の分散分析を実施した. 3 要因の交互作用を分散分析したところ, $F(8, 2670) = 2.39, p < 0.05$ となり 3 要因の交互作用があることが確認できた. そこでさらに男女別, ボード幅別および試行の経過別にデータを分割し, さらに分割した後に残る 2 要因についてそれぞれ分散分析を実施した.

まず, 男女別にデータを分割し, 男女別のデータについてさらにボード幅 3 水準, 試行の経過 5 水準の 2 要因の分散分析を実施した. 男性, 女性共にボード幅と試行の経過の交互作用について有意な差が確認された (男性 $F(8, 1485) = 15.26, p < 0.05$, 女性 $F(8, 1185) = 15.66, p < 0.05$).

男女別, ボード幅別の試行の経過による回避距離の平均値の推移を図 3-18 に示す. 横軸

と縦軸は、それぞれ試行の経過群と回避距離を表している。図から分かるように、男女ともに近い傾向を示し、ボード幅 1 m の回避距離は、1-10 試行で最大値をとり、その後徐々に減少した。逆に、ボード幅 2m, 3m の場合、回避距離は試行の経過に伴って大きくなる傾向が見られ、特にボード幅 3m では当初負の値（接触）であったが、11-20 試行で正となっている。接触という要素は回避距離の修正に大きく作用し、かつ早期に修正を促す効果があることがわかる。

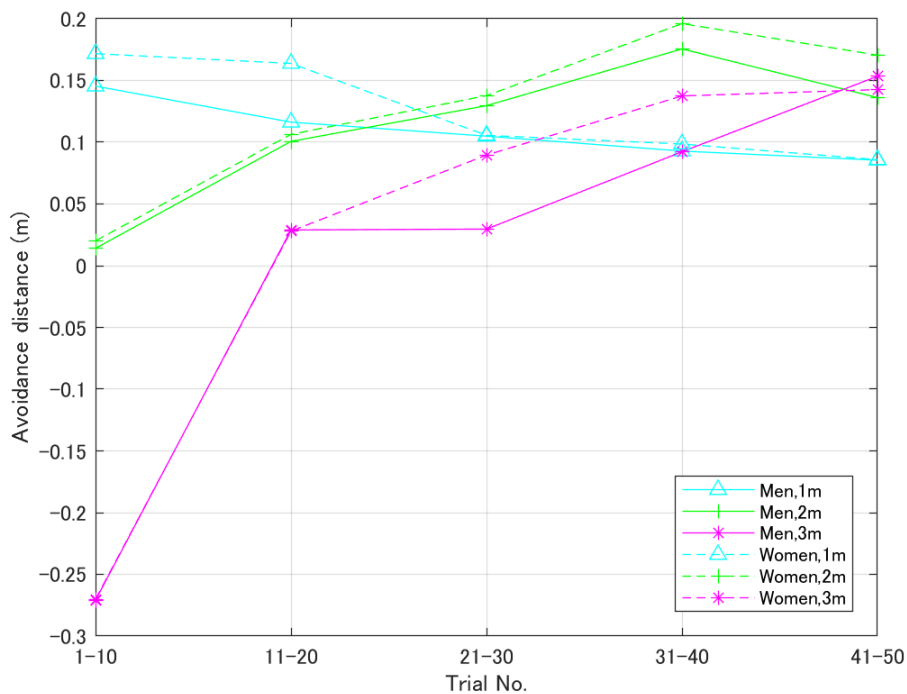


図 3-18 男女別、ボード幅別の試行の経過による回避距離の推移

ボード幅についても男女別同様にデータを分割し、ボード幅別のデータについてさらに性別、試行の経過 5 水準の 2 要因の分散分析を実施した。いずれのボード幅についても性別と試行の経過の交互作用について有意な差がないこと確認された (ボード幅 1m $F(4, 890) = 2.14, p > 0.05$, ボード幅 2m $F(4, 890) = 0.66, p > 0.05$, ボード幅 3m $F(4, 890) = 2.17, p > 0.05$)。

試行の経過についても同様にデータを分割し、試行の経過のデータについてさらに性別、ボード幅 3 水準の 2 要因の分散分析を実施した。21-30 試行と 41-50 試行のみ有意な差が確認された (1-10 試行 $F(2, 534) = 0.28, p > 0.05$, 11-20 試行 $F(2, 534) = 2.41, p > 0.05$, 21-30 試行 $F(2, 534) = 4.68, p < 0.05$, 31-40 試行 $F(2, 534) = 2.07, p > 0.05$, 41-50 試行 $F(2, 534) = 3.73, p < 0.05$)。

男女別、試行の経過別のボード幅による回避距離の違いの平均値を図 3-19 に示す。横軸と縦軸は、それぞれボード幅と回避距離を表している。この結果を見ると、全体的に女性の方が回避距離を男性に比べて大きく取る傾向が見られるが、特にボード幅が 1m の場合にはボード幅 2m や 3m に比べて男女の回避距離の差が見られた。

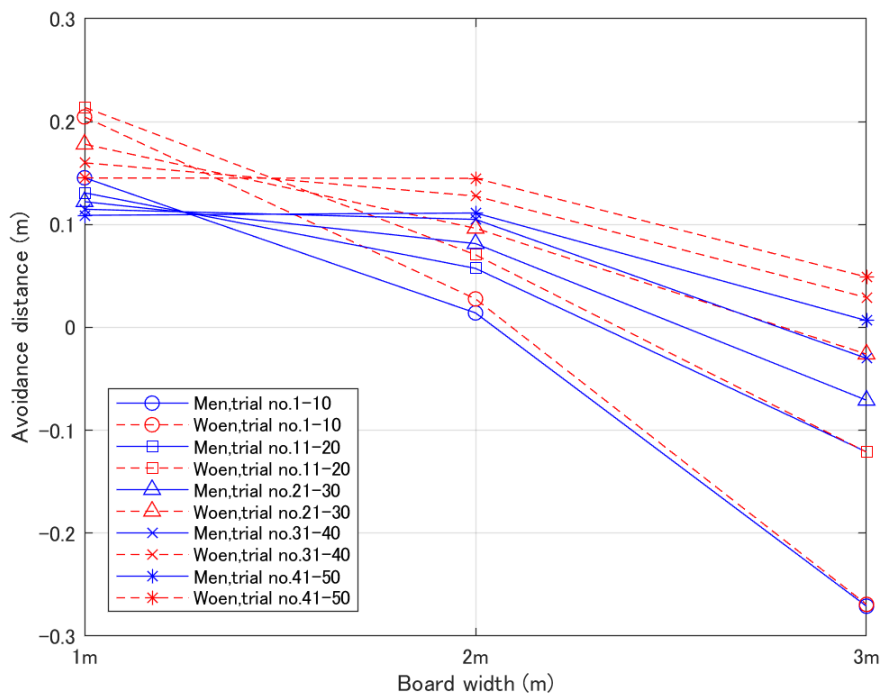


図 3-19 男女別、試行の経過別のボード幅による回避距離の違い

柱への試行の経過毎の接触率 (接触した試行数 / 全試行数) を男女別とボード幅別にそれぞれ図 3-20 と図 3-21 に示す。両図の横軸と縦軸は、それぞれ試行の経過群と接触率を表

している。図 3-20 を見ると接触率には男女の間に大きな違いはなく、試験開始時の接触率は約 30%であり、その後急激に減少し、試行が進むにつれて減少幅が少なり試行の後半では一定となっていることがわかる。また、図 3-21 の結果から試行初期はボード幅が大きいほど接触率が高くなり、試行の経過に伴って差が小さくなっていることが確認できる。

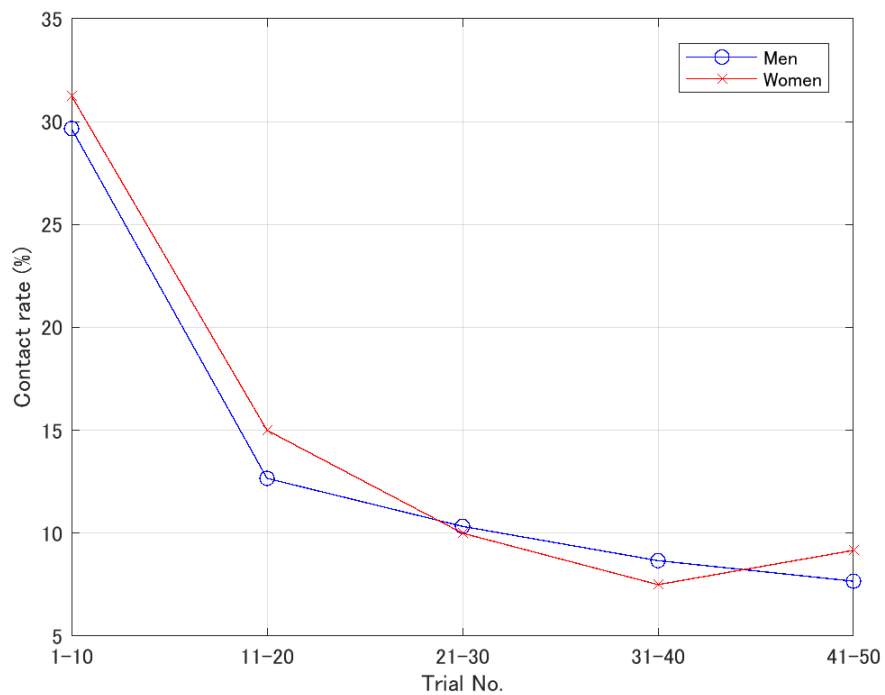


図 3-20 試行の経過による男女別の接触率の変化

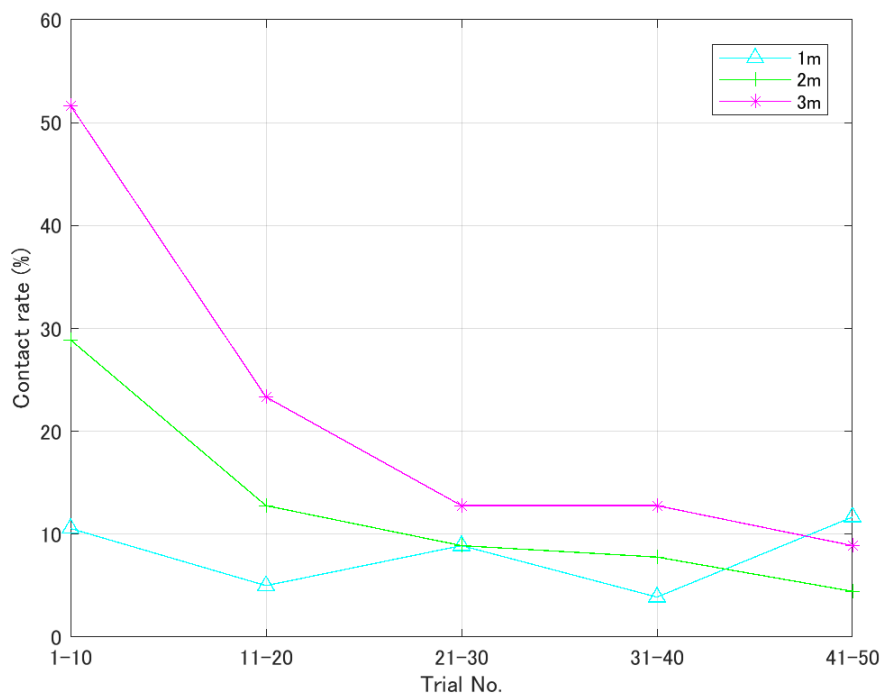


図 3-21 試行の経過によるボード幅別の接触率の変化

3.5.2.3 回避タイミング

試行における回避行動の差異を評価するために回避タイミングについて調査した。開始時点から半分の地点（つまり 5 m 位置）までの参加者の横方向の移動量を、1 つの試行全体（つまり 10m 全体）の横方向の移動量の合計で割った値を回避タイミングとする。参加者が前半で回避行動の大部分を完了すると、回避タイミングの評価値は 1 に近づき、逆に、参加者が柱近くに到達するまで回避行動が延期されると、回避タイミングの評価値は 0 に近づく。

回避方向、回避距離と同様に、性別、ボード幅 3 水準、試行の経過 5 水準の 3 要因の分散分析を実施した。3 要因の交互作用を分散分析したところ、 $F(8, 2669) = 1.22, p > 0.05$ となり 3 要因の交互作用は有意ではなかった。そこで先の 3 要因について 2 要因毎の交互作用をそれぞれ確認した結果、すべて有意差があることがわかった（性別とボード幅は $F(2, 2677) = 5.24, p < 0.05$ 、性別と試行の経過は $F(4, 2677) = 7.53, p < 0.05$ 、ボード幅と試行

の経過は $F(8, 2677) = 2.53, p < 0.05$).

各ボード幅での回避タイミングの平均値を男女別に図 3-22 に示す. 横軸と縦軸は, それぞれボード幅と回避タイミングを表している. この結果を見ると, 全体的に女性の方が回避タイミングを男性に比べて遅めにする傾向が見られる. 男性はボード幅が小さくなるにつれて回避タイミングが早めであった. 女性はボード幅が 3m の場合は男性と同様に早めの回避になるが, ボード幅が 2m および 1m の場合は大きな違いはなく, 男性の傾向と異なることが分かる.

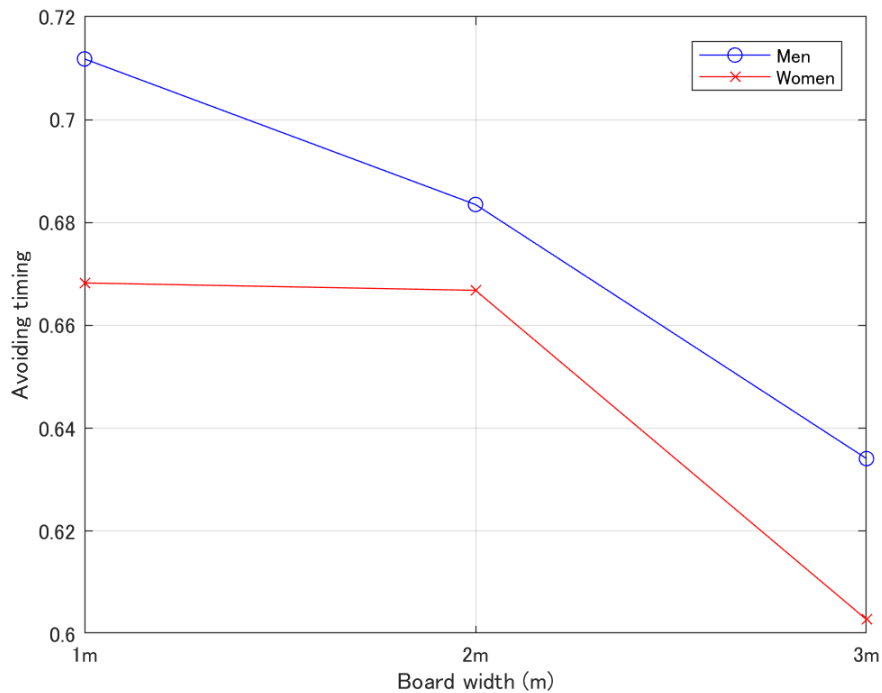


図 3-22 ボード幅の違いによる男女別の回避タイミング

試行の経過別の男女の違いによる回避タイミングの平均値を図 3-23 に示す. 横軸と縦軸は, それぞれ男女と回避タイミングを表している. この図は男女別の回避タイミングの値を直線で結んでいるが, 図が表現したいことは男女差の程度であり, 男女の差が大きいほど傾きが大きくなり, 男女差が小さくなると水平になる. 試行が経過すると回避タイミングの差

が減少傾向にある（傾きが少なくなる）ことがわかる。男性は女性に比べて試行の早い段階では早期に回避するということがわかる。

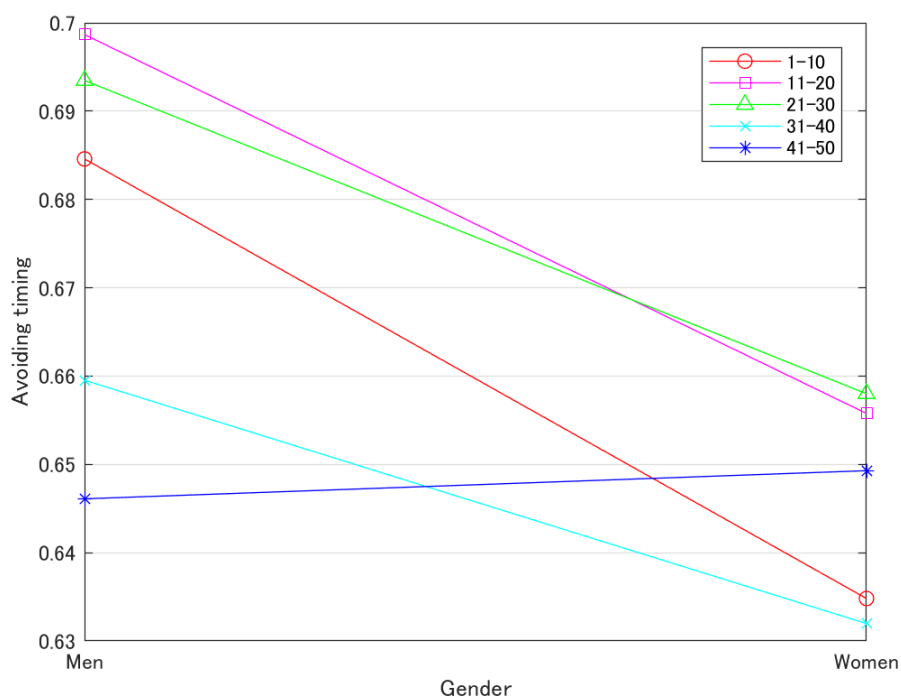


図 3-23 試行の経過別の男女の違いによる回避タイミング

試行の経過別のボード幅の違いによる回避タイミングの平均値を図 3-24 に示す。横軸と縦軸は、それぞれボード幅と回避タイミングを表している。ボード幅が 3m に比べてボード幅 2m の場合には試行の経過に依らず早期に回避していること、またボード幅 2m とボード幅 1m を比べると試行の早い段階では試行の後半に比べて回避を延期する傾向が見られる。

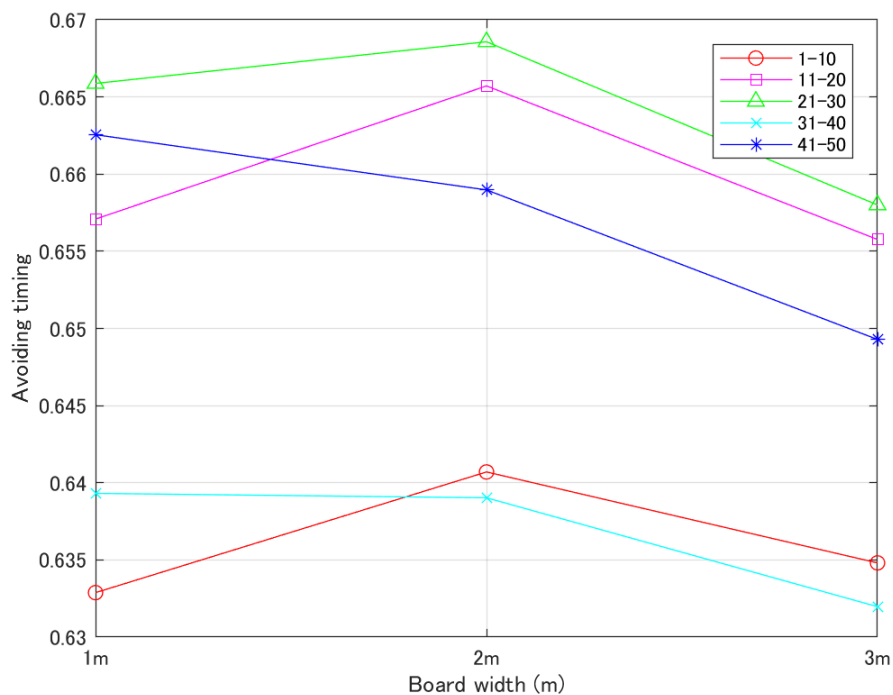


図 3-24 試行の経過別のボード幅の違い回避タイミング

3.5.2.4 主観的なフィードバック

試験終了直後に全参加者に依頼した 4 段階リッカート尺度アンケート（ポジティブ 2 段階、ネガティブ 2 段階の 4 段階）の結果によると、実験の難易度は特に高くも低くもない（平均：2.5; SD：0.60）。また、HMD を通じて参加者に提示した映像は見やすかったため（平均 3.8; SD：1.01）、参加者への負担の偏りはわずかであったと判断する。さらに、VR 酔いと疲労は軽微な範囲であった。3 人の参加者はやや疲れ、7 人の参加者はわずかな VR 酔いを感じていたが、残りの参加者は疲れや VR 酔いを感じていなかった。

3.5.3 実験 2 の考察

図 3-19 の試行の経過による回避距離の推移から回避距離の値が 0 より高くなっているという事実を考慮すると、参加者はおよそ 10 回程度の試行で、設定された不可視の自身（ボード）の大きさを大まかに把握できると考えられる。図 3-20 の男女別の試行の経過による

接触率や、図 3-21 のボード幅別の試行の経過による接触率からも、男女差、ボード幅に拠らず接触率が 11-20 試行において大きく低下することからも、このことを補強する事実といえる。さらに図 3-21 の 1-10 試行のボード幅別の接触率を見ると、ボード幅が大きいほど接触率が高く、1-10 試行の接触率と 11-20 試行での接触率の低下量や図 3-18 の 1-10 試行から 11-20 試行への回避位置の増加が多いことから、接触率が高い程、自身の大きさ把握の調整量が大きくなると考えられる。さらに、ボード幅 3m については 11-20 試行でもやや高めであることから、ボード幅が大きくなるほど自身（ボード）の大きさの把握に試行の回数を要する傾向があることがわかる。これらの結果は、VR 空間において自身の大きさを拡張もしくは自身が搭乗している乗り物の大きさの把握は、その大きさが大きいほど初期の接触率が高いが、回避行動における接触イベントによって 10 回程度の試行錯誤を経験すると自身の大きさを把握することができるといえよう。

また、ボード幅 2m とボード幅 3m の場合の参加者の行動は、ボード幅 1m の場合とは異なっていた。実際、図 3-18 に示すように、回避距離はボード幅が大きい 2 ケースの場合は負の値から始まり、ボード幅 1m では正の値から始まっている。つまり、ボード幅 1m の（仮想）身体は、実際の参加者の身体の大きさに近いと、大きさ探索の基準に普段の自身に備わっている BIBS が用いられた可能性がある。一方、ボード幅 2m とボード幅 3m のボード幅の場合は、参加者が保持している BIBS より大きかったため、参加者が自分の身体のイメージを調整するために、ある程度の試行が必要であったと考える。これは VR 空間での自身の大きさ把握は現実世界の BIBS をベースに行われるということであろう。

以上は男女に違いに拠らず共通の特徴であるが、図 3-19 から回避距離についての男女差が確認できる。全体を通して女性の方が男性に比べて障害物（柱）に接触しないように距離を取る傾向があることがわかる。ボード幅 2m とボード幅 3m では試行の初期段階では男女差は比較的小さいのに対して、試行が進むにつれて女性は男性に比べて距離を大きく取るようになっている。逆にボード幅 1m では女性は男性に比べて試行の初期段階において大きく回避し、試行の経過に伴って距離の差が近づいている。また興味深いことに、試行の最

終段階では女性と男性の回避距離の差はボード幅に拠らず同程度の距離差（約 0.04m）に収束していることである。先に検討した BIBS の男女差もしくは BIBS に対する安全マージンがこの 0.04m であると考えられ、試行の経過により女性は男性に比べて大きな BIBS を取得もしくは BIBS に一定の安全マージンを加えた回避距離を取るということであろう。これは Schiff [Schiff 1990] の検討における「女性は衝突判定タスクで到着までの時間を過小評価し、男性よりも正確に到着時間を推定できておらず、空間的判断と時間的判断に男女差がある」という分析に一致する結果であるといえる。

次に回避タイミングについて述べる。図 3-22 および図 3-23 は回避タイミングの男女の違いを表している。図 3-22 から、男性に比べて女性は早期に回避することが頭打ち（男性はボード幅 3m, 2m そして 1m と段々と早期に回避する傾向があったのに対して、女性はボード幅 2m から 1m になっても早期に回避する傾向が逡減していた）になっており、早期に回避することを控える傾向があることが分かる。すなわち女性は男性に比べて慎重な回避行動を取ったといえる。図 3-23 からは試行の前半では男性が女性より顕著に早期に回避する傾向を持っていたが、試行の経過に伴って男女の回避タイミング傾向が近くなることが分かった。このことは女性の回避行動は慎重かつ安定的な行動を取るのに対し、男性は対象によって（ボード幅によって）回避行動が変わり、試行の経過に依っても変化することから、状況に応じた回避行動を取る傾向があるといえる。

図 3-24 はボード幅と試行の経過による回避タイミングの差異を表したものであるが、ボード幅が 2m ならびに 3m の場合の回避タイミングは同じ（線が平行）であるが、ボード幅 1m とボード幅 2m とは線が交差しており、ボード幅 2m および 3m の傾向と相対的に比較すると、ボード幅 1m では試行が経過するほど回避が早期になっていることがわかる。また、この結果は、ボード幅 1m すなわち自身の幅に近い場合の探索行動においては、試行初期において探索が慎重であるが、試行の経過に伴って BIBS を取得したことが、早期の回避行動可能にさせたのかもしれない。これは幅が狭い身体における身体幅の探索は自身に近いところでの接触行動を試さなければならなかったため、繊細な操作量を必要とし、身体幅

の認識が進むまでは障害物に近づいてからの探索行動を取ったと考えられる。

3.6 本章のまとめ

人間が VR 空間で見えない身体の大きさ認識についてどのように把握するかを調査した。実験では、参加者は VR 空間に不可視のボードとしてモデル化した。目に見えない仮想の身体の幅を探索する手掛かりとして球形の物体や柱との接触を用いた。実験 1 の予備実験の結果から、参加者は、受動的な探索においては実験で与えられた幅が自身の現実世界での身体の幅よりも小さい場合、仮想身体(ボード)の幅をより広く捉えたが、逆に大きな身体(ボード)幅の場合には、それを狭く捉えることが分かった。一方で実験 1 の主実験や実験 2 のように能動的な回避行動では身体(ボード)幅の過大評価が観察された。参加者は受動的衝突回避タスクと比較して能動的衝突回避タスクでは余剰幅を考慮に入れている可能性がある。身体の認識に対する能動的および受動的なタスクの影響を明らかにするには、さらなる研究が必要である。一方、調査の結果、衝突回避の精度は試行の繰り返しとともに向上することがわかった。実験 1 の主実験では仮想身体 of 取得に必要な試行回数は 14 回であり、実験 2 でも 10 回程度の試行錯誤を経験すると大きさを把握することができたことから、VR 空間における仮想体の大きさの認識は一定程度の試行数で可能であることが 2 つの実験から明らかにできた。また、参加者は、実験 1 の主実験において物体が近づくまで回避行動を延期する傾向があることがわかった。これは試行の初期段階で顕著であった。その後、参加者は早期に回避行動を取り始めた。実験 2 の結果から、自身の身体幅に近い探索対象では障害物映像が近くなり障害物への接近を消極的になり、探索の初期においては慎重な探索行動を取っていた。さらに、実験 1 の主実験および実験 2 の両実験から VR 空間での自身の大きさ把握は現実世界の BIBS を基礎に行われる可能性を示唆する結果を得た。

実験 2 では男女の違いが回避行動にどのような差異を持つかについても調査を行った。女性は男性に比べて一定の安全マージンを加えた回避距離を取ることが分かった。女性の回避行動は慎重かつ安定的な行動を取るのに対し、男性は対象によって(ボード幅によって)

回避行動が変わり、試行の経過に依っても変化することから、状況に応じた回避行動を取る傾向がある結果が見られた。

これらの知見は VR コンテンツを制作する際の有効な情報の 1 つとなり得る。例えば事前の練習ステージの回数をどの程度にすればよいかを予め決定するときの 1 つの指標になると考える。男女差に関する結果については、例えば、VR 空間に没入したユーザのポジショニングの違いは VR 空間での見える（もしくは見ている）ものの違いへ影響し、VR 空間のアイテムの配置によって性別によって見せたいものが適切に見せられていない可能性もありえるため、VR 空間でのポジショニングに影響する要素は重要であるといえる。

第4章 映像参照の影響に基づく回避行動調査

4.1 はじめに

前章においては参加者の持つ大きさ認識(BIBS)に基づく回避行動を調査してきたが、本章では視覚的要素(映像参照の影響)による回避行動を、ドライビングシミュレータを用いて調査した。実験では運転行動のうちの固定障害物の回避行動について、特にVR空間でのモノとの距離感や回避タイミングについて検討を行う。その理由として、自動車運転にあっては追い越しや合流など様々なシチュエーションが存在するが、それらの場合は対象物(他車)が移動体である上に、他車と自車の行動は相互に影響しあう関係にあるため、検討すべき項目が膨大になってしまう。シンプルな行動についての研究を積み重ねていくことで、将来的には現実レベルの複雑な振る舞いの分析要請に応えようとしている。

先ず事前の調査実験として、障害物を回避する課題において参加者が運転する自車に起因する内的要因の影響を検討した。具体的には、車速および車幅を変えたときの参加者のハンドリング操作や車線上の走行位置の空間的・時間的な変化を分析した。この予備実験で明らかになった結果を踏まえ、次に運転走行する周辺環境に係る外的要因として路上の車線境界線を組み合わせ、改めて主実験としてドライバの振る舞いに違いが生じるかを論じる。これらの実験を通して、VR空間での運転行動に見られる特徴がどのようなものであり、その特徴が何によって生じているのかを明らかにする。

4.2 予備実験

主実験に先行して、運転時のドライバの行動に影響を及ぼす要素候補を探索するための事前の調査実験を行った。課題として参加者にVR空間において自動車を運転させ障害物を回避させた。車線上の車両走行位置ならびに障害物回避タイミングは安全運転にあたって重要であり、それらを目的変数として、ドライバの行動に影響する要素候補(特徴量)を絞り込むこととした。時間的要素の違いとして車速、空間的要素の違いとして車幅を要素候

補とし、それぞれを変化させたときの参加者の行動について調査を行った。

4.2.1 参加者および実験装置

21 歳から 60 歳（平均：24.7，標準偏差：9.3）の 16 人（男性 13 人，女性 3 人）が実験に参加した。その際、すべての参加者に試験手順の説明を行った上で実験への参加について事前に同意を得た。教示文については付録 D.1 に、また実験の実施期間と実施場所は付録 G.1 に掲げる。参加者は正常な視覚および身体能力を有していた。また、1 名を除く他の参加者は運転免許証を保有しており、2 名が左ハンドルの車両の運転経験があった。

実験で使用したコンピュータは CPU に Core i7-7700 (3.60 GHz) を搭載し、メモリ量は 16 GB である。Oculus Rift HMD (CV 1) を使用して VR 空間の視覚および聴覚表現を行った。HMD の視野 (FOV) は 110 度、リフレッシュレートは 90 Hz、重量は 440g である。運転シミュレーションのコンテンツは Unity2017.2.1.f1 (64 ビット) で作成し、映像のフレームレートは 50 Hz であった。図 4-1 に示すように、車両の操縦には Logicool LPRC-15000 を使用した。

なお、回避行動とアクセルやブレーキの操作による車速コントロールは実際の自動車運転では関係が深いですが、アクセルとブレーキ操作による車速や加減速の変化を含めると複雑な人間の判断システムとなり、どの要因によって変化が誘発されたかを把握することが困難であるため、実験においてはアクセルとブレーキによる操作を無効化することにした。



図 4-1 実験の様子

4.2.2 実験シナリオ

実験に用いた課題は、障害物を避けながら VR 空間内の 3 車線道路を運転するものとした。車両の長さおよび高さは、それぞれ 4.5m と 1.4m である。幅は 1.6m (標準タイプ) およびその 1.2 倍、つまり 1.92m (ワイドタイプ) の 2 種類を用意した。これらの車幅は日本の小型車 (1.7m 以下) と普通車 (2.5m 以下) を参考にした。さらに、予備実験では要因探索のため、日本では乗られることが少ない左ハンドル車をあえて採用した。実験開始時の参加者の視線位置は、車両の中心から左寄りに 0.35m、地上高 1.05m、車両の前方 2.21m に設定した。なお、映像は HMD の動きに応じて変動するので、参加者には運転座席の範囲を著しく外れない範囲では、運転のしやすい位置に着座ポイントを動かすことを認めた。HMD に提示される映像の一例を図 4-2 に示す。

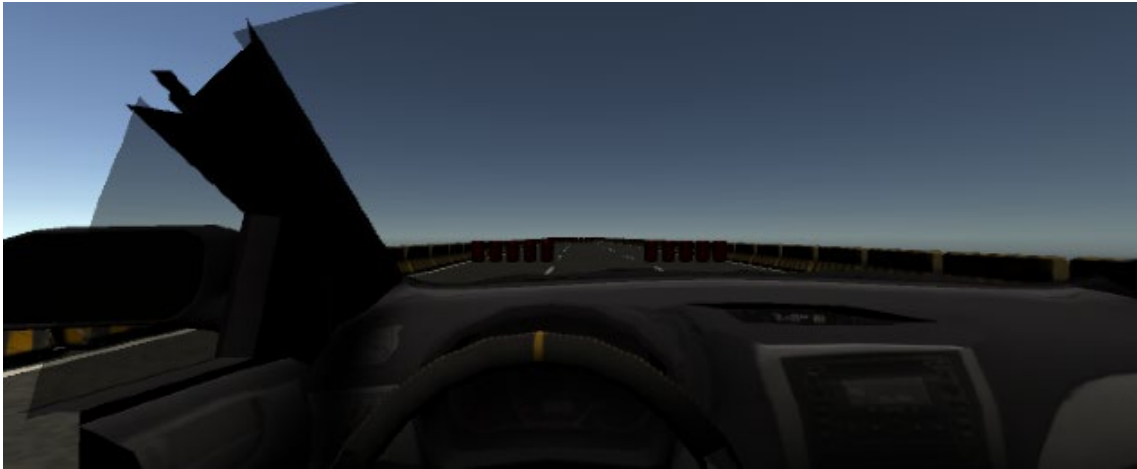


図 4-2 座席からのビュー

1 車線の幅は 3.5m であり，各車線は幅 0.15m の白い破線で区切られている．破線の長さは 5m で，破線と破線の間隔は 5m である（国内の一般道の仕様）．また，図 4-3 に示すように，3 つの車線のうち 2 車線をドラムでブロックした．ブロックした車線にはそれぞれ 5 つのドラム（直径 0.55m，高さ 0.9m）を配置した．また道路の両側には側壁を設置した．参加者には車両を操縦して通過可能な車線を通過するように指示した．車両が障害物や側壁に接触すると，衝突音と火花映像を参加者にフィードバックするようにした．

走行する道路はステージ 0 からステージ 9 までの 10 ステージとした．ステージ 0 は練習ステージであり，ステージ 1 からステージ 9 が本番用のステージである．車両の速度と幅はステージごと，表 4-1 に掲げるように割り当てた．国内の一般道での最高法定速度は 60km/h であり，これを基準に，より低速あるいは高速の 40km/h と 80km/h の 3 種類を採用した．基点とする車速 60km/h かつ標準車幅のステージに対し，車速あるいは車幅の変化がもたらす回避行動への影響を探索できるように各ステージの水準を設定した．しかも参加者に過大な負担をかけることがないようにステージ数を絞り込んだ．なお各ステージの長さは 1000m とし，ドラム缶による車線封鎖は 50m ごととした．通過可能な 1 車線はランダムに設定した．従って通過可能な車線が変わらない場合もある．

参加者には、通過可能な車線を確認し、それを通過しながら車を運転するように指示した。さらに、実験中に体調が悪化した場合は直ちに中止してよいことを予め通知したが、実験を途中で棄権した参加者はいなかった。実験手順の説明後に参加者には椅子に座って HMD を装着してもらい、実験を開始した。実験後、参加者にアンケート（付録 D.2 参照）への回答を求め、実際の運転経験および実験に関する意見を収集した。

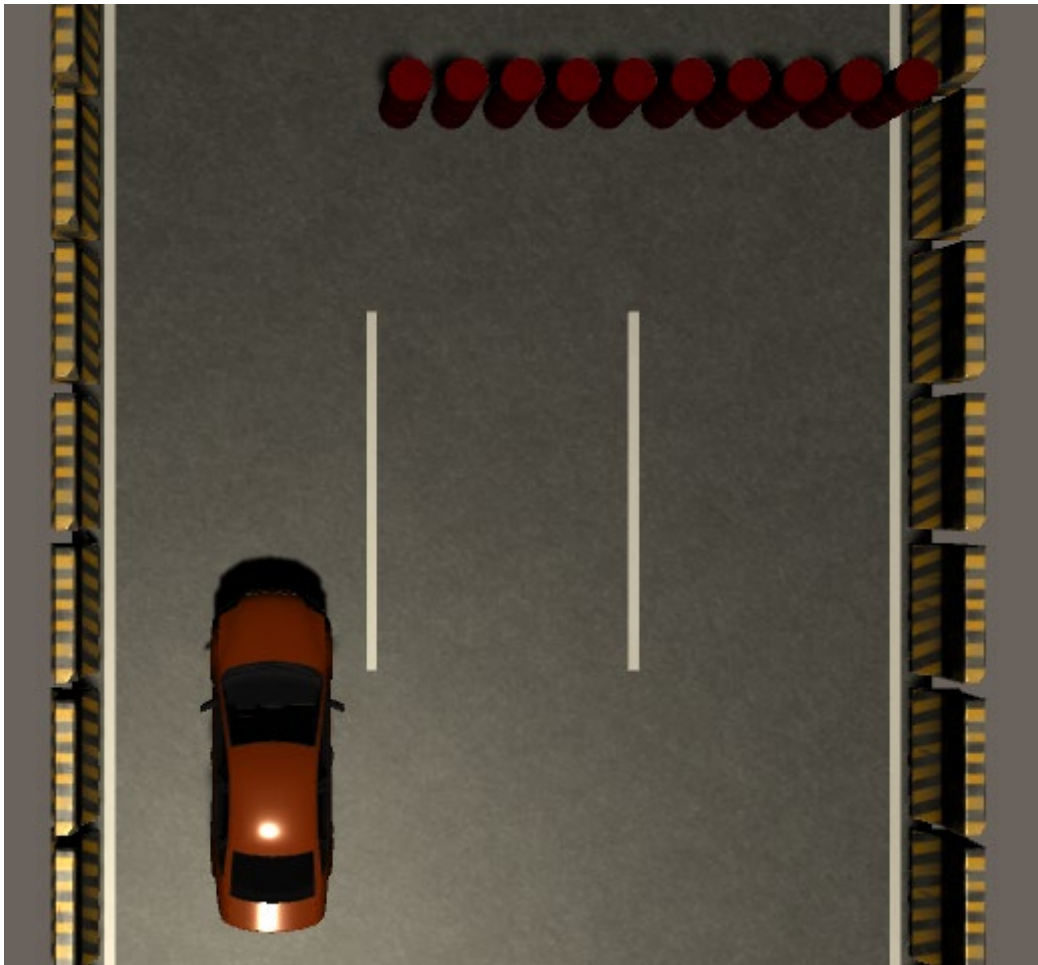


図 4-3 実験に用いた道路

表 4-1 実験ステージ

ステージ番号	車速 [km/h]	車幅 [m]
0	60	1.6
1	40	1.6
2	60	1.6
3	80	1.6
4	60	1.6
5	60	1.6 x 1.2
6	60	1.6
7	80	1.6
8	80	1.6 x 1.2
9	80	1.6

4.2.3 結果

50m 間隔で合計 20 個設置したゲートの回避運転行動についてデータの分析を行った。先に触れたように、封鎖する車線の選択はランダムとしたため、車線変更がなかったケースがあるが、その場合は分析対象から除外した。逆に、至近の障害物を回避中に次の障害物 (50m 先) に気づき、回避中の障害物を完全に通過する前に次の障害物回避に入るという行動パターンが一部参加者に見られた。さらに、障害物のない通過可能車線から大きく逸脱して障害物に突入するケースもあった。発生回数は前者 30 回、後者 11 回であり、それらは異常値として分析から除外した。結果として、練習ステージを除くステージ 1 からステージ 9 までの回避試行の総数は参加者 16 名で 1795 回であった。

4.2.3.1 車両ポジション

障害物のドラムが置かれていない通過可能な個所を通過するときの車線上での車両中心

の横方向位置を車両ポジションと定義する。車線の中央に位置するときをゼロ位置とし、進行方向に向かって右側を正、左側を負とする。車両ポジションに関して、3種類の車速（40km/h、60km/h および 80 km/h）、2種類の車幅（標準およびワイド）、および車線変更方向の3要素による影響を、3要因分散分析を適用して調べた。ここで右（左）車線変更とは、通過可能な車線がひとつ前の通過可能な車線を基準として右（左）側に位置する場合である。車線数は3を仮定しているため、移動する車線がひとつの場合とふたつの場合があるが、両者共に右（左）車線変更としてまとめた。

車速、車幅および車線変更方向の3要因の交互作用を分散分析したところ、有意差は確認できなかった（ $F(1, 1785) = 0.40, p > 0.05$ ）。そこで2要因毎の交互作用をそれぞれ確認した結果、車速と車線変更方向の交互作用が確認できた（ $F(2, 1786) = 7.08, p < 0.05$ ）。なお、車速と車幅は $F(1, 1786) = 0.06, p > 0.05$ 、車幅と車線変更方向は $F(1, 1786) = 2.89, p > 0.05$ であり、共に有意差は確認できなかった。

車速と車線変更方向の交互作用について行った単純主効果検定の結果、時速 40km/h（ $F(1, 214) = 26.06, p < 0.05$ ）ならびに 60km/h（ $F(1, 792) = 20.52, p < 0.05$ ）の場合、また左車線変更（ $F(2, 904) = 8.42, p < 0.05$ ）の場合に有意な差が認められた。図 4-4 に車速と車線変更方向による車両ポジションの平均値を図示する。横軸と縦軸は、それぞれ速度と車両ポジションを表している。速度が上がるにつれて、いずれの方向への車線変更であっても、0.25m 位置に収束してきている。このとき、ドライバ座席位置は車線中央から左に 0.1m の位置にある。

また、車幅については車速あるいは車線変更方向のいずれとも交互作用はなかったが、単独での主効果を確認したところ $F(1, 1793) = 8.16, p < 0.05$ となり、有意差がみられた。車両ポジションの平均値は標準車幅にて 0.207m、ワイド車幅にて 0.296m と、車幅が広いと右側へ、すなわち左ハンドル車であることから自身と運転席側障害物との距離を取ろうとする傾向を示した。

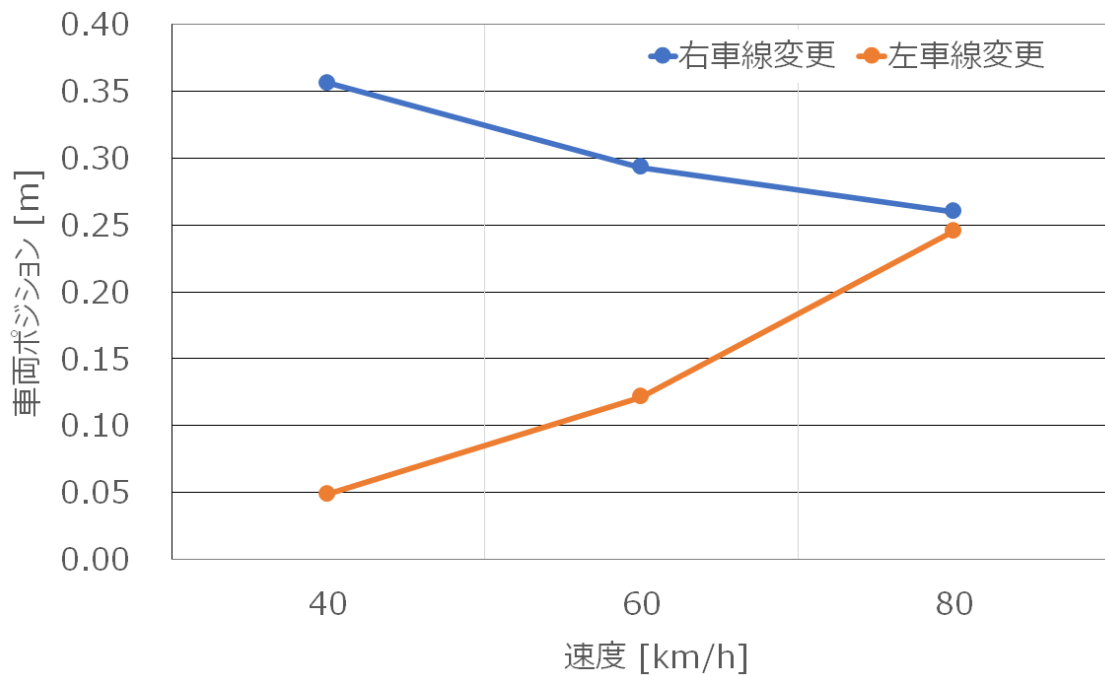


図 4-4 車速と車線変更方向による車両ポジション

4.2.3.2 回避タイミング

次に回避タイミングについて分析を行った。ここで回避タイミングは、ある地点の障害物と次の地点の障害物が置かれている 50m 区間においての左右方向移動量の絶対値に対する、最初の 25m 地点までの左右方向移動量の絶対値の比率とする。回避タイミングの値が 1 に近いほど前半 25m の間になされたステアリング操作の量が大きく、逆に値が 0 に近づくとつれて後半 25m により大きなステアリング操作がなされたことになる。

車両ポジションの場合と同様に、3 要因分散分析によって車速 (40km/h, 60km/h および 80 km/h)、車幅 (標準およびワイド)、ならびに左右への車線変更の違いによる回避タイミングの違いを調べたところ $F(1, 1785) = 0.03, p > 0.05$ となり、有意差は確認できなかった。続いて 2 要因毎の交互作用を確認したところ、車速と車幅は $F(1, 1786) = 0.01, p > 0.05$ 、車速と車線変更方向は $F(1, 1786) = 2.37, p > 0.05$ 、車幅と車線変更方向は $F(1, 1786) = 1.55, p > 0.05$ となり、いずれも有意差を確認できなかった。そこでそれぞれの要因の主効果の検定を行ったところ、車速については $F(2, 1790) = 3.38, p < 0.05$ で有意差が見られる

が、車幅と車線変更方向については有意差が見られなかった。表 4-2 には速度別の回避タイミングの値の平均ならびに標準偏差を示す。この結果から、速度が速いほど遅い時点で回避行動をとっていることがわかる。

なお、No.3 と No.13 の参加者は他の参加者に比べて回避タイミングが遅かった。実験後のアンケートによれば No.3 は他の参加者よりも VR 酔いを強く感じており、また No.13 は視力の関係で VR 画像が見えにくかったとコメントしている。VR 酔いによる判断障害や視認情報の欠乏により回避タイミングの遅延が生じた可能性がある。

表 4-2 平均と標準偏差 (回避タイミング)

	平均	標準偏差
40 km/h	0.806	0.230
60 km/h	0.770	0.227
80 km/h	0.757	0.234

3.2.3.3 ユーザの振る舞いに影響を与える要素

予備実験の結果より、ユーザの振る舞いに影響し得る幾つかの要素候補が明らかになった。まず、車両ポジションについては車速と車線変更方向の交互作用ならびに車幅単独の主効果が確認できた。具体的には車両ポジションは全体的に右寄り（正の値）の傾向を示した。これには左ハンドル車を用いたことが影響したことも考えられるため、主実験では左ハンドルに加えて右ハンドルの車両も用意する。車線変更方向については、右車線変更では左車線変更と比べて右寄り、左車線変更では右車線変更と比べて左寄りになる傾向が見られた。また車速が高まるにつれて、右車線変更では相対的に左寄り、左車線変更では右寄りになることが確認できた。この理由としては、車線移動を誘起する障害物から距離を置くという解釈が考えられるが、障害物などといった回避を誘引する第一義的な要素の他に、車線境界線などといった二次的な要素の影響もあり得る。

また、回避タイミングの値はいずれの車速についても 0.5 より大きく、そのため前半 25m 区間からの早期の回避行動を取るとともに、車速が上がるにつれて回避タイミングは遅くなることがわかった。このことは、速度に関するドライバの知覚、言い換えれば距離感の把握の難易が回避タイミングに影響を与えている可能性がある。一方で、VR 酔いを感じたり前方の障害物の視認性に難があったりと参加者の回避タイミングは、他の参加者に比べて後半（回避タイミング値が 0 に近い）に寄っている。回避行動の遅延の原因として、移動先の車線を早期に認識することが難しかったことも考えられる。そこで主実験ではドライバの速度感（距離感）および車線認識を変様させるために、車線境界線の種類を増やすことにした。予備実験では車線境界線は破線のみとしたが、主実験では 4 種類（縦破線、縦線、横線、なし）の車線境界線を用意する。一方で要因数を増やすことは多重性の問題につながるため、主実験では車速を 80km/h に固定して分析を行う。

4.3 主実験

4.3.1 仮説

予備実験の結果も踏まえ、車両ポジションと回避タイミングについて次のように仮説を立てた。

仮説① 車両ポジションについて、左ハンドル車は車線右寄り、右ハンドル車は逆に車線左寄りになる。加えて車幅が大きくなれば、さらに片寄り（左ハンドル車は右方向、右ハンドル車は左方向）の傾向が強まる。

仮説② 車線変更方向別の車両ポジションについて、回避を誘引する第一義的な要素（路上の障害物や側壁など）の他にも、車線境界線などといった副次的な要素が回避行動に影響する。

仮説③ 速度が高まるにつれて強まる衝突リスクに対し、これを早期に回避しようとすることから、速度への知覚[18]が回避タイミングに影響するであろう。また、自車両と障害物との位置関係の把握ができていのかどうかも回避タイミングに影響を与える

要因と考える．そこで回避タイミングと車線境界線との関係について次のような仮説を立てる．縦破線が速度感（距離感）および車線のいずれも明確に認識しやすいと考えられるため，最も早期に参加者は回避行動を始める．縦線の場合は回避行動を促すための車線認識は可能であるが，速度感は掴みにくい．横線はその逆のことがいえる．そのため縦破線に比べると回避タイミングが遅くなる．そして車線境界線に相当するものが何も存在しない場合，最も回避タイミングに遅延を生じる．

4.3.2 参加者および実験装置

21 歳から 24 歳（平均：21.8，標準偏差：0.8）の 20 人（男性 18 人，女性 2 人）が実験に参加した．すべての参加者は正常な視覚および身体能力を有しており，実験手順の説明を受けた後に実験への参加を同意した．教示文については付録 E.1 に，また実験の実施期間と実施場所は付録 G.1 に掲げた．そのうちの 1 人以外は運転免許証を保有していた．1 人の参加者は左ハンドル車の運転経験があった．

主実験で使用する装置は予備実験時と同じものを利用した．また，予備実験同様に車両の速度はシステムによって制御するようにしたため，参加者にはアクセルペダルおよびブレーキペダル操作は無効化している．

4.3.3 実験シナリオ

主実験で使用したバーチャル車両は，予備実験時の左ハンドル車に加えて右ハンドル車も設定した以外は，予備実験と同一である．車幅は車両ポジションに影響し得る要素候補であるので，標準（1.6m）とワイド（1.92m）の 2 種類を維持した．

車線変更方向は同じく予備実験において車両ポジションを検討する際の有望な要素であり，左右方向への回避運転を参加者が取るように設定した．なお車線の移動量については，予備実験同様，1 車線分および 2 車線分の 2 種類を出現させるようにした．一方，側壁（あるいは植栽等の設備）は現実世界では無視できないが，路面上に設けた障害物の回避時のハ

ンドリング操作に焦点を当てた分析を遂行することを目的に、主実験にあっては側壁を設けないでおいだ。

また、ドライバの速度感（距離感）および車線認識に影響を与える要素として、主実験では車線境界線を新たに採用することにした。具体的には車線境界線なし、縦線、横線、縦破線の4種類（図4-5参照）とした。一方で、車速については予備実験では3種を用意したが、外的要因としての車線境界線の検討を優先的に進めるという視点、ならびに実験要素の組み合わせ数の増加による実験所要時間が長くなることを避けるために、80km/hに限定した。

実験に際しての特徴量の組合せパターンについては、まず車幅及びハンドル位置の組み合わせの中からひとつをランダムに決定し、その上で車線境界線と車線変更方向の計16パターンからランダムにひとつずつ選んで実施することを繰り返すことで16パターンすべてを実施した。その後、車幅とハンドル位置の組み合わせ残りから改めてひとつを選択し、先と同様に車線境界線及び車線変更方向の16パターンについて実験を進めた。これを繰り返すことにより、最終的に64（=4×16）の組み合わせすべてを完遂させた。以上の一連の試行を参加者には3回繰り返し取り組んでもらって運転行動データを収集した。

障害物の設置状況については、予備実験では3車線上の50m毎に障害物を設置したが、主実験では障害物は車両との距離が規定値以下になった時点で初めて表示するように制御するようにした。その表示タイミングの距離は100mとし、各試行の走行開始地点は障害物設置位置の110m手前から150m手前までの範囲でランダムに選定した。併せて、100m手前位置までは参加者のハンドル操作をシステムによって無効するようにした。また80km/hの車速の下では50m間隔での回避操作は参加者にとって厳しいとのコメントを踏まえ、障害物までの距離を確保することで、落ち着いて回避行動を取ることができるよう配慮した結果である。これらによって予備実験にて生じていた早期回避行動を排除するとともに、障害物のない通過可能車線から大きく逸脱して障害物に突入する例外的な事象の発生回避を図った。

なお、参加者には本番の実験開始前に表 4-3 に示す 4 種類の事前練習用の試行を行ってもらった。実験用のシステムに慣れることを主眼としたため、基本的には車線境界線のない単純な路面を選定する一方、左右の両ハンドル位置にも慣れる機会とした。

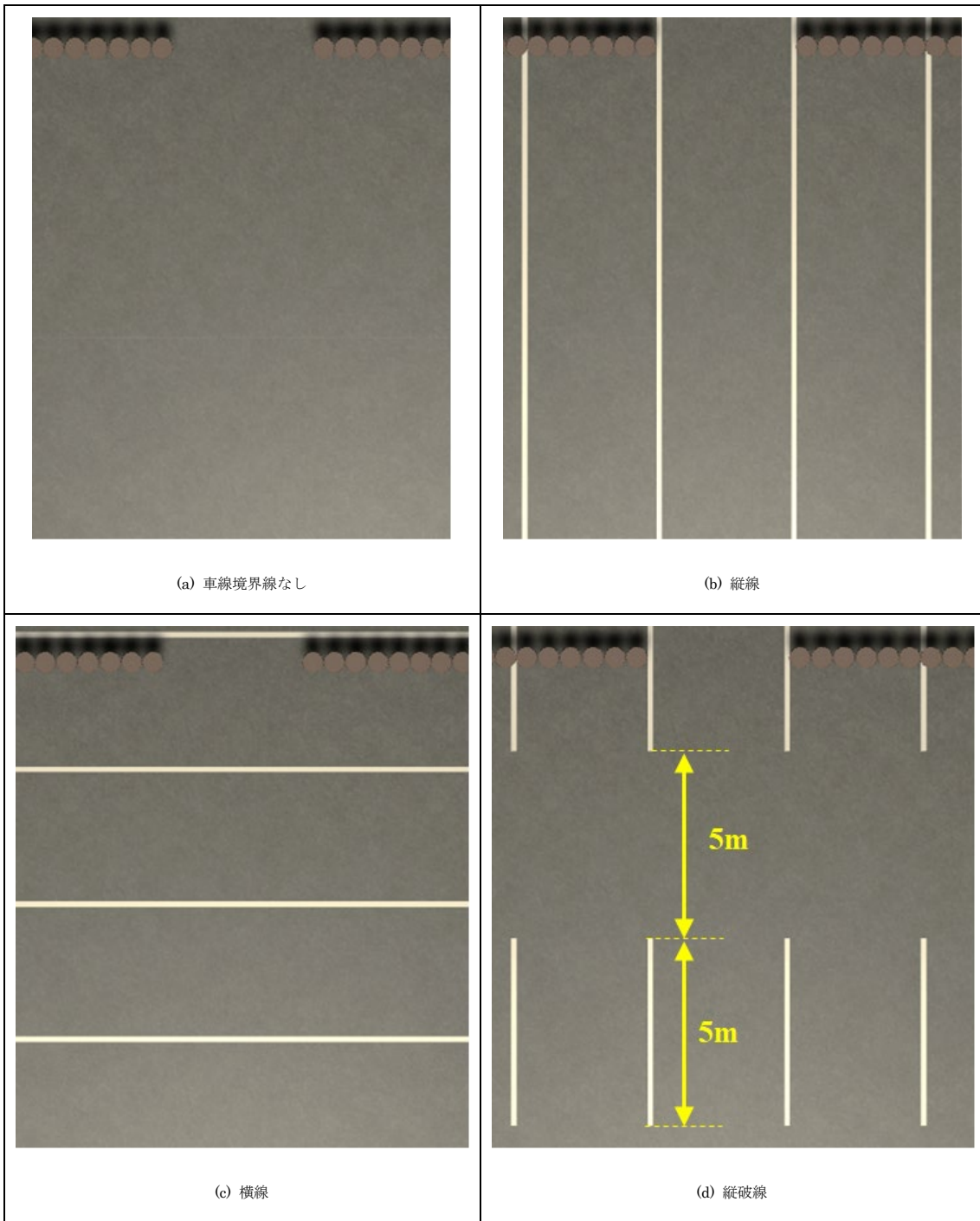


図 4-5 4 種類 of 車線境界線

表 4-3 練習試行の取り組み内容

	ハンドル位置	車幅	通過可能位置	車線境界線
1	右ハンドル車	標準車幅	右 1 車線分隣	車線境界線なし
2	左ハンドル車	標準車幅	左 1 車線分隣	車線境界線なし
3	左ハンドル車	ワイド車幅	右 1 車線分隣	車線境界線なし
4	左ハンドル車	ワイド車幅	左 1 車線分隣	縦線

実験の開始に先立ち、参加者にはハンドル位置、車幅、車線境界線に違いがあることを説明すると共に、前方の障害物が途切れている通過可能な場所を目視確認し、ハンドル操作によって障害物の回避運転をするように指示した。さらに、実験中に体調が悪化した場合はすぐに試験を中止してよいことを事前に伝えている。実験手順の説明後、参加者は椅子に座り HMD を装着した。なお、実験を途中で棄権した参加者はいなかった。全試行完了後に参加者にはアンケート（付録 E.2 参照）への回答を求め、実際の運転経験、コメント、および試験に関する意見を収集した。

4.3.4 結果

4.3.4.1 車両ポジション

まず、ハンドル位置（左ハンドルおよび右ハンドル）、車線変更方向（左車線変更および右車線変更）、車幅（標準およびワイド）、車線境界線（なし、縦線、横線、縦破線）が車両ポジションに及ぼす影響について 4 要因の分散分析を行った。その結果、 $F(3, 3808) = 2.04$, $p > 0.05$ となり 4 要因の交互作用は認められなかった。3 要因についての交互作用を調べたが、いずれも有意差はなかった（ハンドル位置と車線変更方向と車幅の結果 $F(1, 3808) = 0.19$, $p > 0.05$ 、ハンドル位置と車線変更方向と車線境界線の結果 $F(1, 3808) = 0.48$, $p > 0.05$ 、ハンドル位置と車幅と車線境界線の結果 $F(1, 3808) = 0.32$, $p > 0.05$ 、車線変更方向と車幅と車線境界線の結果 $F(1, 3808) = 1.08$, $p > 0.05$)。続いて 2 要因ごとの分散分析の結果、ハンドル

位置と車幅 ($F(1, 3808) = 248.84, p < 0.05$), ハンドル位置と車線境界線 ($F(3, 3808) = 5.59, p < 0.05$), 車線変更方向と車線境界線 ($F(3, 3808) = 16.81, p < 0.05$) の交互作用が有意であった。まずハンドル位置と車幅の交互作用についての単純主効果検定の結果, ハンドル位置の各水準における車幅 (右ハンドル: $F(1, 1918) = 114.74$, 左ハンドル: $F(1, 1918) = 130.34$), ならびに車幅の各水準におけるハンドル位置 (標準: $F(1, 1918) = 599.68$, ワイド: $F(1, 1918) = 6.0$) に有意水準 5% で有意差が認められた。車幅と車両ポジション位置の関係をハンドル位置別に図 4-6 に示す。横軸と縦軸は, それぞれ車幅と車両ポジションを表している。全体として右ハンドル車は右寄り, 左ハンドル車は左寄りの傾向が見られ, 更には車幅が広くなるといずれのハンドル位置であっても車線中央にポジショニングされることが分かった。

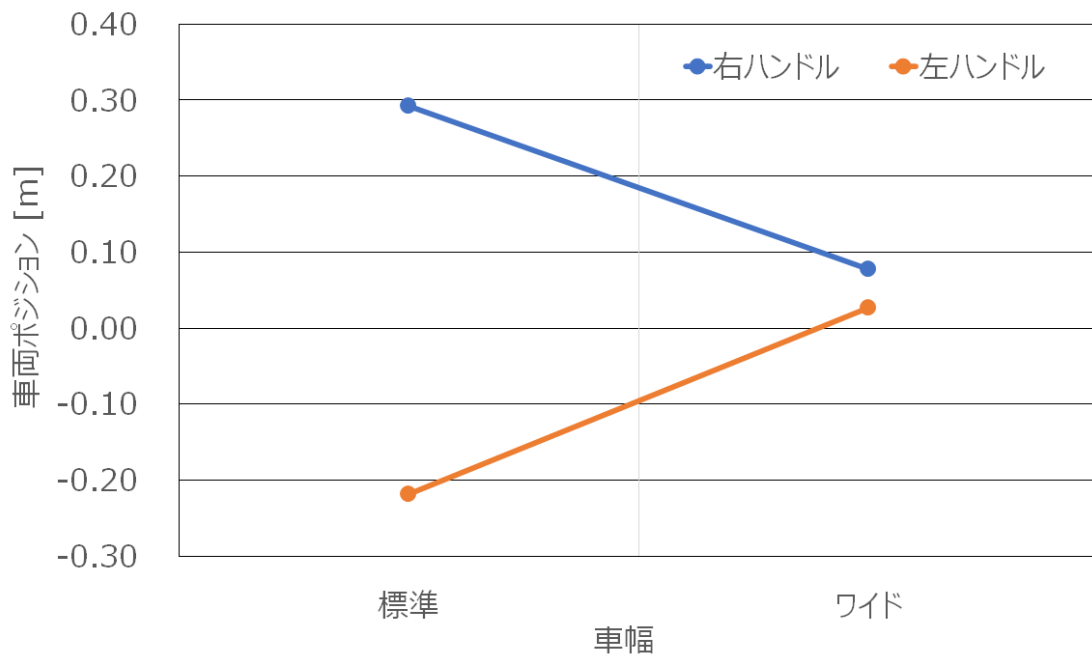


図 4-6 ハンドル位置別の車幅の違いによる車両ポジション

次にハンドル位置と車線境界線の交互作用についての単純主効果を確認したところ, 左ハンドル車については車両境界線の違いに有意差が認められた ($F(3, 1916) = 3.26, p < 0.05$)

が、右ハンドル車の場合には有意差は認められなかった。一方、車線境界線の各水準ではいずれも有意水準 5%でハンドル位置間有意差が認められた（なし： $F(1, 958) = 97.3$ ，縦線： $F(1, 958) = 81.49$ ，横線： $F(1, 958) = 81.3$ ，縦破線： $F(1, 958) = 102.05$ ）。図 4-7 は、右ハンドル車および左ハンドル車のそれぞれにおいて、車線境界線別の車両ポジションを図示したものである。横軸と縦軸は、それぞれハンドル位置と車両ポジションを表している。

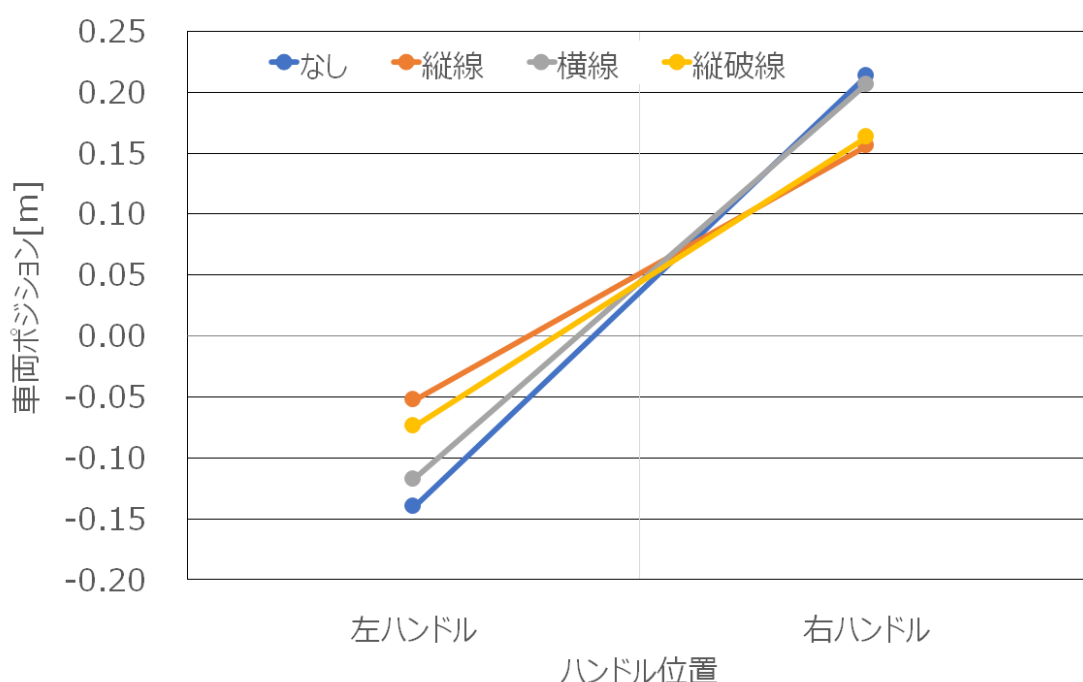


図 4-7 ハンドル位置と車線境界線の組み合わせにおける車両ポジション

更に車線変更方向と車線境界線についての単純主効果検定の結果、車線変更方向のいずれにおいても車線境界線は有意水準 5%で有意差があることが分かった（左車線変更： $F(3, 1916) = 8.01$ ，右車線変更： $F(3, 1916) = 6.51$ ）。一方、車線境界線がない場合を除く残りの 3 水準については、車線変更方向の間に 5%水準で有意な有意差が認められた（縦線： $F(1, 958) = 48.07$ ，横線： $F(1, 958) = 5.88$ ，縦破線： $F(1, 958) = 14.27$ ）。車線変更方向別の各車線境界線での車両ポジションを図 4-8 に示す。横軸と縦軸は、それぞれ車線変更方向と車

両ポジションを表している。

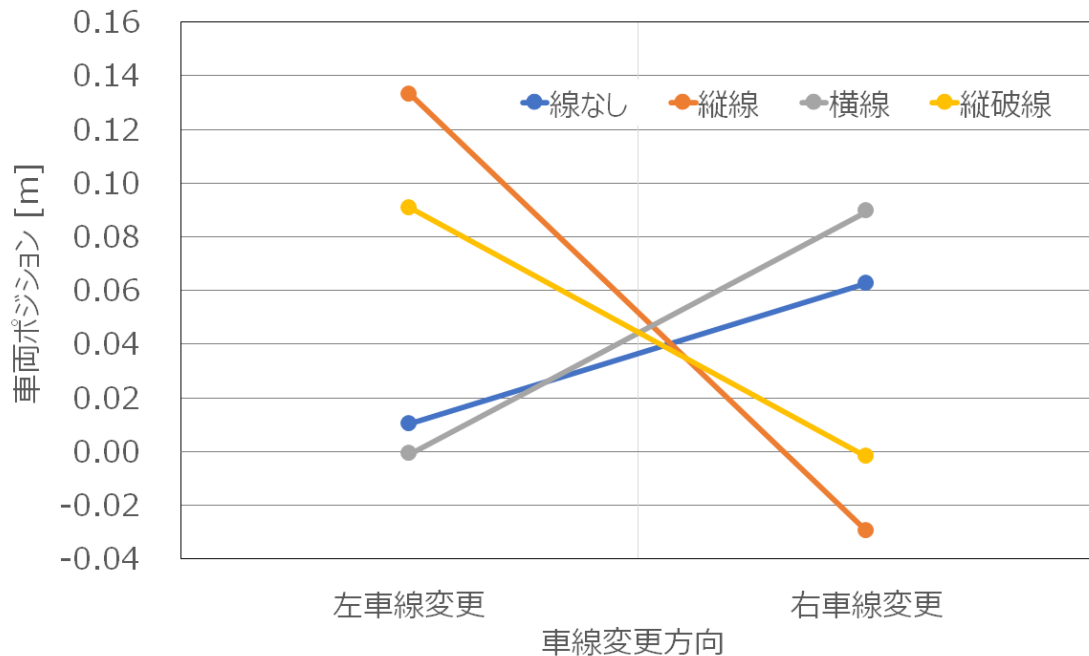


図 4-8 車線変更方向と車線境界線の組み合わせにおける車両ポジション

図 4-7, 図 4-8 の結果から, 車線境界線については, 車線なし及び横線は縦線及び縦破線とは異なる傾向を示すことが分かった. また前者の車線境界線集団をグループ 1, 後者をグループ 2 と呼ぶと, 図 4-7 の分析結果から, グループ 1 ではグループ 2 と比べて車両ポジションは車線中心から離れて左右両側方向に振れることが分かった. さらに図 4-8 から, 車線境界線グループの振る舞いは, 車線変更方向によって反転した結果が見て取れる. 具体的には, グループ 1 はグループ 2 と比べて, 左車線変更のときには車線左側方向, 右車線変更のときには右側方向に車両がポジショニングされることがわかった.

4.3.4.2 回避タイミング

各試行の 100m の区間を 4 つの均等区間 (0-25m, 25-50m, 50-75m, 75-100m) に分け, それぞれの区間の横方向の移動量について分析した. 横方向の移動量は回避すべき方向 (例

例えば各試行におけるスタート地点から右に通過可能レーンがある場合は右への移動方向を正とし、逆方向への移動を負とする。また、移動量は正負それぞれに総和を求める。例えば、右への回避が正とする場合に、右へ 5m、続いて左に 1m、さらに右へ 2m 移動したときは、正方向の移動量（右への移動量）は 7m、負方向の移動量（左への移動量）は 1m となる。

図 4-9、図 4-10 は車線移動時の区間別の正方向の移動量の平均値および負方向の移動量の平均値を表している。両図の横軸と縦軸は、それぞれ区間と横方向移動量を表している。いずれの車線境界線にあっても、正方向の移動量は 25-50m の区間が最も大きく、次いで 0-25m 区間での移動量が大きくなっている。つまり前半の 0-50m の区間で主たる車線移動を完了していることがわかる。車線境界線ごとの違いに注目すれば、縦線および縦破線（グループ 2）の場合は、車線境界線なしおよび横線（グループ 1）に比べて、移動が早期に行われている。また車線境界線なしおよび横線（グループ 1）では、縦線および縦破線（グループ 2）に比べて、障害物の直前である 50-100m 区間での移動量が正負方向共に大きく、通過直前まで車両ポジションの調整を行っている。

ちなみに正方向と負方向の別々に、区間と車線境界線の交互作用について 2 要因分散分析を行ったところ、正方向が $F(9, 15344) = 7.96, p < 0.05$ 、負方向が $F(9, 15344) = 19.52, p < 0.05$ で共に有意差が認められた。

正方向移動について単純主効果を確認したところ、区間については 25-50m 区間を除いて車線境界線は有意水準 5%で有意であった（0-25m 区間： $F(3, 3836) = 5.33$ 、50-75m 区間： $F(3, 3836) = 12.65$ 、75-100m 区間： $F(3, 3836) = 33.27$ ）。また車線境界線の各水準における区間間差異はすべて有意水準 5%で有意であった（なし： $F(3, 3836) = 397.31$ 、縦線： $F(3, 3836) = 520.8$ 、横線： $F(3, 3836) = 372.8$ 、縦破線： $F(3, 3836) = 538.39$ ）。

一方、負方向についての単純主効果の分析結果は、区間については 50-75m 区間（ $F(3, 3836) = 10.74$ ）と 75-100m 区間（ $F(3, 3836) = 49.84$ ）の 2 水準における車線境界線間に有意水準 5%の有意差が認められた。車線境界線については 4 水準のいずれも区間間差異が

有意水準 5%で認められた (なし : $F(3, 3836) = 34.83$, 縦線 : $F(3, 3836) = 13.26$, 横線 : $F(3, 3836) = 45.11$, 縦破線 : $F(3, 3836) = 7.67$).

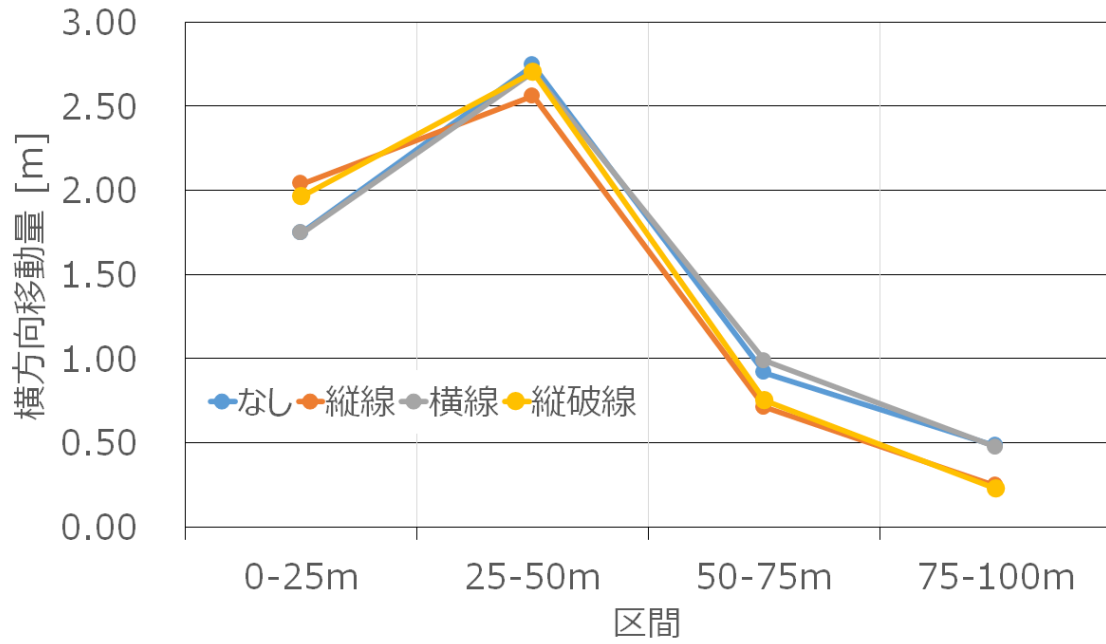


図 4-9 正方向の横方向移動量平均 (1 車線変更)

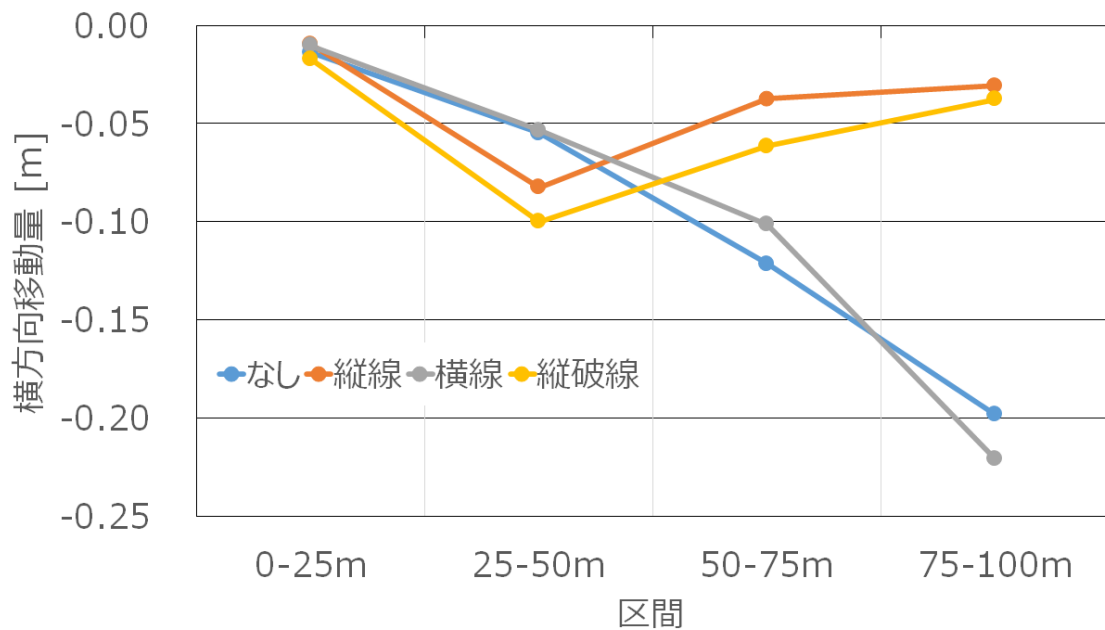


図 4-10 方向別の横方向移動量平均 (1 車線変更)

4.4 考察

主実験の実施にあたって掲げた 3 つの仮説について、実験結果からそれらの検証を行うことにする。

仮説①に挙げた、左右のハンドル位置及び車幅の違いが車両ポジションに与える影響について、実験結果のデータ (図 4-6 参照) は、右ハンドル車は車線中央より右寄り、左ハンドル車は逆に左寄りを示した。これは予備実験における結果とは異なる結果になった。これについては、予備実験では側壁に囲まれた 3 車線道路上で回避行動を連続して行わせていたのに対し、主実験では側壁のない路上で 1 試行毎に独立した回避行動を取らせるセッティングであったことが影響したと考えている。参加者は側壁との衝突リスクから解放され、障害物を回避するための基準としてドラム缶自体が最も強い参照要素 (目印) となった可能性がある。参加者は運転席に近いドラム缶に基準を置き、それとの一定距離保持によって回避を達成しようとした結果として、右ハンドル車では車線の右寄り、左ハンドル車では左寄りの実験結果になったと推察する。一方、車幅が大きい場合に、左右のハンドル位

置の違いによる車両ポジションの差が見られなくなることも明らかになった。車線上での車両両側の余裕が減少し、必然的に車線中央に車両をポジショニングする意識が強まったためと考えるのが自然であろう。以上より、仮説①は必ずしも成立するものではなく、ドライバを取り巻く条件（外的要因）によってさまざまに異なるといえる。

次に仮説②について考察する。車幅に対して障害物の間隔に余裕がある場合には、図 4-6 から分かるように、右ハンドル車および左ハンドル車ではそれぞれ車線の右寄りおよび左寄りであった。運転席とは反対（すなわち参加者にとって距離感がつかみにくい）側にある障害物との接触を避けて通過しなければならないという意識がそのような車両ポジションを取らせたと考えられる。あるいは、車幅が広い場合に車両両側の障害物に気を配った結果として車線中央付近に自車をポジショニングさせるという意識とは別に、障害物と車両との距離に余裕がある場合には、運転席側の障害物だけに注意を払い（運転席とは逆側の障害物には注意を向けることなく）走行経路を決定していた可能性もある。

一方、車線境界線の影響についてであるが、図 4-8 から分かるようにグループ 1 はグループ 2 に比べて、左車線変更のときに車両ポジションは車線左寄り、右車線変更のときは右寄りである。グループ 1 の車線境界線は車両ポジションを認識する際の参照要素には効果が弱く、参加者は障害物だけを頼りに回避を行うことになり、グループ 2 の車線境界線の場合と比べて、助手席側の障害物との距離余裕幅を拡大する必然性があったと考えている。併せて、図 4-7 が示すように、不慣れな左ハンドル車の場合、車線境界線の違いによる車両ポジションの差異が顕在化し、縦線、縦破線、横線、線なしの順に車線中央位置から左方向に車両ポジションが離れていく状況が見てとれる。右ハンドル車の場合には車線境界線の細かな違いが車両ポジションに与える影響は覆い隠されるが、路面への適切なパターン（車線境界線）敷設はドライバの車両ポジション決定に効果があるといえよう。

続いて回避タイミングについての仮説③を考察する。予備実験では回避間隔が 50m と短かったため、参加者は早期の回避行動を取る傾向があることが分かったのみであったが、主実験では回避間隔を 100m として回避行動のタイミングについてより詳細に分析を行った。

早期に回避行動を取るという結果は予備実験と同じであるが、加えて図 4-9 に見て取れるように、25-50m 区間において最大の回避動作が取られることが分かった。また図 4-10 も併せて、後半の 50m 区間ではグループ 1 での移動量が正方向および負方向（戻し方向）共に大きく、参加者が車両ポジションの調整行動を多くとっていたことがわかる。言い換えるとグループ 2、すなわち縦線系の車線境界線は車線上での参加者自身の位置把握に強く貢献していることの証である。以上より、車線境界線の線種ごとの差異については更に検討が必要であるが、部分的に仮説③を確認することができた。

当初設定した仮説の他に、主実験から得られた補足的な知見を加えておきたい。負（戻し）方向の移動量については、25m～50m 区間で左車線変更時は右車線変更時よりも大きくなることが判明した。また、2 車線移動時には 0m～25m 区間での移動量は左車線変更時が大きく、25m～75m 区間（2 区間）の負方向の移動量も左車線変更の方が大きいという結果であった。左車線変更は右車線変更に比べて余計に軌道修正を要したといえる。言い方を変えると、参加者は右回避に比べて左回避を苦手にするという傾向がみられた。

最後に、VR 空間での運転行動に見られる特徴がどの点にあり、その特徴が何によって生じているのかを改めて整理する。

- 側壁やドラム缶などといった障害物はドライバの車両ポジション決定に影響を与える。特に側壁の存在は運転席とは逆の方向に車両ポジションをシフトさせる要因となったが、各障害物要素にはドライバに判断のための優先度があり、これについては障害物の大きさが一因である可能性がある。対象物の大きさに着目した検討はこれまでなされておらず、今後の研究が必要である。
- 車幅に比べて、走行している道路の幅に余裕がある場合には、運転席側にある障害物のみ注意を向けて回避時の走行位置を決定している可能性がある。そうだとすれば今後の自動車運転シミュレーションの開発にあたっては、運転行動に関与している要素を絞り込むことも検討事項のひとつとすべきである。
- 車線境界線の存在は（安全走行に資する）車線上での適切な自車位置把握ならびに早期

の運転行動決定に寄与している。縦線系（縦線又は縦破線）はそれ以外（車線境界線なし又は横線）よりも効果がみられた。障害物と車線境界線が相互に影響しあっている可能性も排除できていないため、さらなる分析が期待される。

4.5 本章のまとめ

本章では自動車運転シミュレータのVRアプリケーションを題材に、VR空間でのドライバの振る舞いに影響する要素について調査を行った。障害物回避時にドライバが行う車両ポジション決定作業にあっては、その意思決定にインパクトを与える参照要素が存在し、それは状況（シミュレーション空間上に配置された要素自体やその振る舞い、またそれらの要素の組み合わせ）によって変わり得ることを実験により明らかにすることができた。

これまでの研究では分析やモデリングに据えられるターゲット要素（他の走行車両など）は明示的かつ限定的であったが、シミュレーションに際して将来的にはそれでは十分ではない可能性がある。自車周辺に係る外的要因がドライバの運転行動に及ぼす影響だけでなく、ハンドル位置や車幅といったような内的要因も無視できないことの一部を本研究では明らかにした。一見マイナーな要素であっても、そのような要素の影響を明らかにする実験を今後さらに積み重ねることで、知見を蓄積し、開発しようとするVRアプリケーションの目的に応じた適切な要素デザインを追求することができるようになり、それはシステムへの信頼度を高めることにつながる。

今回の実験では自動車運転シミュレータにおける回避場面をターゲットに取り組んだが、今後の研究では異なる状況でのユーザの振る舞いに着目することで、人間の振る舞いの解明を進め、VRアプリケーションの可能性を追求していきたいと考えている。

第5章 ユーザインタフェースの提案

5.1 はじめに

前章までは VR 空間における障害物の回避行動を対象にユーザの振る舞いについて検討をしてきたが、本章では VR 空間におけるユーザの振る舞い、ここでは頭部動作に注目してユーザインタフェースの提案を行う。本章で検討するシナリオは、第 4 章と同様に VR ゲームで広く使用されているドライビングシミュレーションとした。その際に、頭部動作は HMD から取得するようにした。Kinect などによって頭の位置を検出することも可能であるが、VR 映像の表示に HMD を採用しているため頭部動作を取得するのに HMD に実装されているモーションセンサを共用する方が合理的なためである。

頭部動作をインタフェースとして採用するというアイデアは、VR の特徴としてユーザが見る向きを変えるときは勿論、行動に際しても頭部 (HMD) を動かすという観察結果から生まれた。この行動と頭部動作のインタラクションでユーザの無意識の行動を意識的なものとして利用する手法は、新しく面白い研究テーマと考えた。将来は本研究の頭部動作をインタフェースとする試みは現実世界の支援技術としても機能し、ユーザビリティの高い制御を提供し、ユーザが機械やシステムとのインタラクションを完全な調和を感じることができるようになる可能性を期待する。この研究の目的は、無意識の相互作用技術の基礎研究を行うことであり、現実世界において頭部動作をインタフェースとして適用することの実現可能性は将来の研究課題であることを先に述べておきたい。

車両を操舵する手段として頭部動作のインタフェースの有効性を評価する実験を行う前に、先ず VR 空間での横方向のドライバの操舵行動に関連する頭部動作の様子を分析した。これには第 4 章の主実験時の頭部動作で得られたデータを用いた。分析の結果、頭部の x 方向、ヨー回転、およびロール回転の 3 つの軸の動きが操舵操作に関連した頭部動作であることが判明した。その結果に基づいて、参加者が頭部動作を使用して操舵操作を制御できるシミュレータを実装し、操作の難易度、車両動作との親和性、VR 酔いの観点から VR での

有効性を調べた。

5.2 仮説

ドライバは頭をカーブの中心に向けて傾けることが知られている [Saruchi 2019] [Saruchi 2019-2]。この反応は乗り物酔いを減らすのに役立つとされる。しかし、車線変更時の頭部動作が車両の横方向の動きと相関しているかどうか知られていない。さらに、頭部動作がステアリング制御を改善できるかどうかを調査する価値があると考え、実験に際して次の仮説を立てた。

仮説① ロール回転の他に、ヨー回転といった頭部動作も操舵操作の影響を受ける。

仮説② 頭部動作は操舵制御に有効な手段である。

5.3 第4章主実験におけるユーザ頭部動作の分析

第4章の主実験で得られた頭部動作データの分散分析を通して、4つの均等区間(0–25m, 25–50m, 50–75m, 75–100m)のそれぞれにおいて車線変更方向について頭部位置や回転方向の平均値に有意差があるかどうかを確認した。表5-1は第4章の主実験実施時の頭部動作の結果(p 値)をまとめたものである。 p 値が0.05あるいは0.01より小さいものについては、それぞれ青色あるいは緑色の網掛けを施した。なお、頭部の移動方向および回転方向を図5-1に示す。 x , y , z 方向は、それぞれ右/左, 上/下, 前後の動きを表しており、正の x 方向は右を指し、正の y 方向は上を指し、正の z 方向は前方を指す。また、ハンドルの位置(右ハンドル or 左ハンドルの影響)、車幅、車線境界線の影響についても検討した。これらはすべて運転に関連しており、頭部動作に特定の変化を引き起こす可能性があると考えたためである。

表5-1に示されているように、車線変更方向の違いは、 x 方向、ヨー回転およびロール回転で有意であった。ただし、ヨー回転の有意差は0-50mのゾーンにのみ見られた。ハンドル位置についても同様の結果が観察された。車幅にも有意差があったが、 y 方向とピッチ回

転だけであった。車線境界線については、有意差は見られなかった。

表 5-1 車線変更関連項目と頭部動作との分散分析結果

要素	区間	車線変更 方向	ハンドル 位置	車幅	車線境界線
x	0-25m	0.000	0.000	0.414	0.900
	25-50m	0.000	0.000	0.403	0.971
	50-75m	0.000	0.000	0.586	0.998
	75-100m	0.000	0.000	0.358	0.942
y	0-25m	0.799	0.241	0.000	0.995
	25-50m	0.832	0.206	0.000	0.999
	50-75m	0.815	0.400	0.000	1.000
	75-100m	0.517	0.492	0.000	1.000
z	0-25m	0.933	0.439	0.205	0.996
	25-50m	0.921	0.416	0.178	0.999
	50-75m	0.875	0.426	0.173	0.999
	75-100m	0.825	0.448	0.176	0.999
pitch	0-25m	0.626	0.275	0.023	0.922
	25-50m	0.941	0.166	0.030	0.979
	50-75m	0.986	0.536	0.020	0.968
	75-100m	0.461	0.804	0.034	0.982
Yaw	0-25m	0.001	0.000	0.953	0.965
	25-50m	0.000	0.000	0.763	0.993
	50-75m	0.667	0.000	0.474	0.842
	75-100m	0.774	0.000	0.986	0.977
roll	0-25m	0.000	0.000	0.839	0.630
	25-50m	0.000	0.000	0.952	0.737
	50-75m	0.000	0.000	0.885	0.474
	75-100m	0.001	0.000	0.430	0.129

Blue area: $p < 0.05$ and green area: $p < 0.01$.

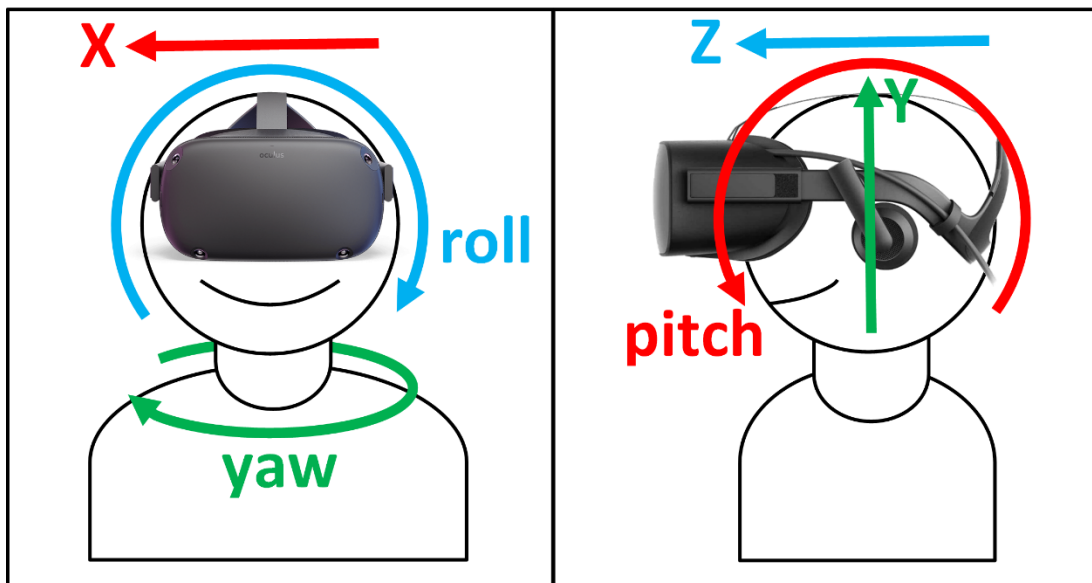


図 5-1 測定した Oculus HMD の 6-DOF の種類と向き

5.4 主実験に向けて

前節の結果から、 x 方向、ヨー回転、ロール回転の頭部動作が車線変更制御に関連していることがわかった。車両を操舵する相互作用技術の潜在的な候補として、これら 3 つを選挙した。また、以降に述べる主実験では車線変更制御への頭部動作の関与に焦点を当てるようにするため、ハンドル位置を右ハンドルに設定した。車幅に関しては、 x 方向、ヨー回転、ロール回転の間に有意差がなかったため、標準幅を採用することにした。車線境界線の差異が頭部動作に及ぼす影響は見られなかったが、区間や車線境界線によって操舵のタイミングが異なることが確認された。関連して、図 5-2 は車両が走行方向（正）（通行可能な車線に向かう方向）にどれだけ横方向移動をしたか、および各区間でどれだけ逆方向に移動（負）したかを示したグラフである（図 5-3 参照）。4 つの区間すべての値の合計は、通過可能レーンを通るために 1 車線移動をする場合には、理想的には 3.5m に等しく、これは（1 つの）車線間の幅に対応する。この結果より車線境界線に関する横方向の動きは 2 つのグループに分類されることがわかる。1 つ目のグループとしては線なしと水平線であり、もう 1 つのグループには縦線と縦破線である。グループの代表として、実験では線なしと縦線を採用し

た.

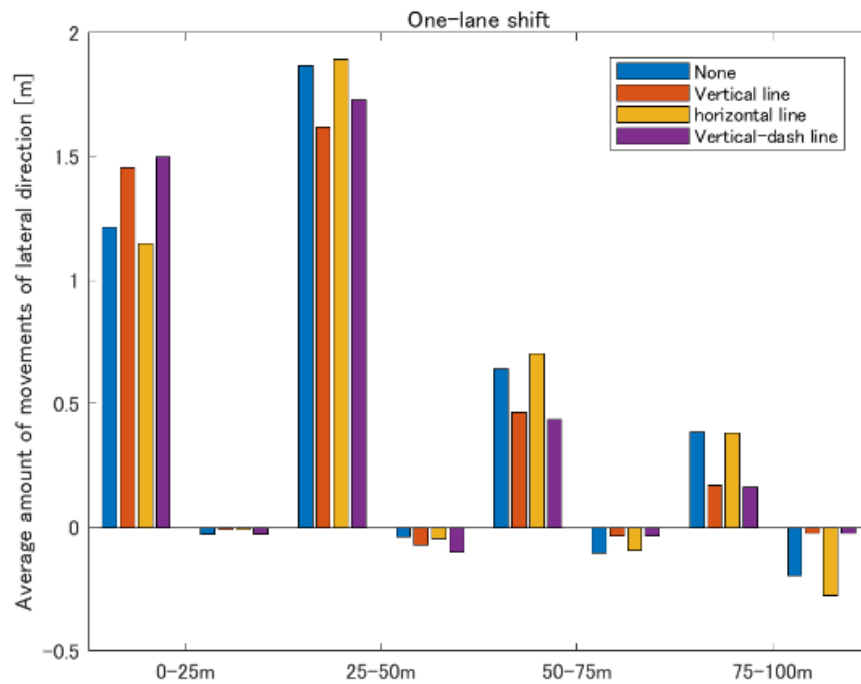


図 5-2 区間別の平均横方向移動量(1 車線移動)

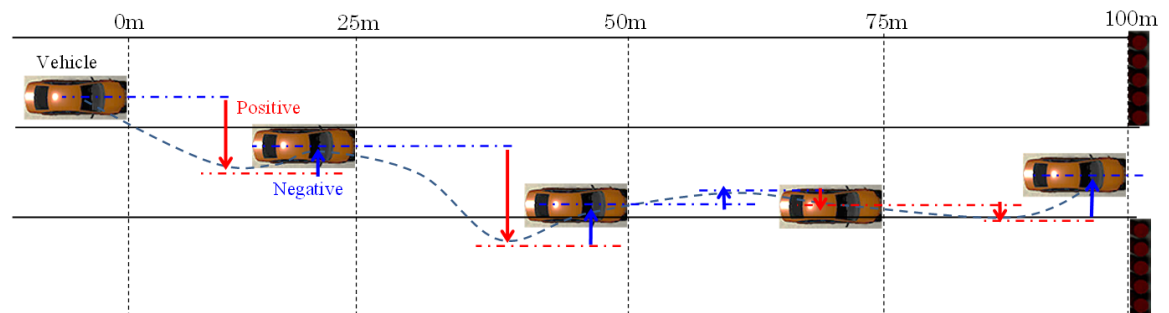


図 5-3 区間毎の正方法，負方向の横方向移動量

5.5 主実験

実験では参加者が初期位置から頭部を x 方向，ヨー回転，ロール回転方向に移動・回転させることで，VR 空間上の車両を左右に運転(移動)できるようにシミュレータソフトウェアを改造した．分析を単純化するために，3 種類の頭部動作を個別に評価した．頭部動作が実

際に車両の挙動に及ぼす度合いは、第 4 章で述べた主実験の結果を参考にして決定した。

具体的には車両の横方向の動きは、x 方向 5cm，ヨー回転 5 度，ロール回転 3 度の変化が秒速 3m の車両横方向移動に対応するように設定を行った。

頭部の x 方向の移動量(cm)と車両の横速度 v(m/s)の関係は式 (1) で表す。車両の移動する向きは頭部動作の方向に合わせている。すなわち頭部を右方向に移動させると車両も右方向に移動する。

$$v = \begin{cases} -1.5 & (-5 > x) \\ 0.375x + 0.375 & (-1 > x \geq -5) \\ 0 & (1 > x \geq -1) \\ 0.375x - 0.375 & (5 > x \geq 1) \\ 1.5 & (x \geq 5) \end{cases} \quad (1)$$

頭部のヨー回転 yaw(deg)と車両の横移動速度 v(m / s) の関係は式 (2) で表される。ロール回転 roll(deg)については、式 (3) の関係になっている。車両の移動方向は頭部の回転方向である。すなわちヨー回転についていえば右を向けば車両は右に移動し、ロール回転についていえば右に傾げると車両は右に移動する。

$$v = \begin{cases} -1.5 & (-5 > yaw) \\ 0.375yaw + 0.375 & (-1 > yaw \geq -5) \\ 0 & (1 > yaw \geq -1) \\ 0.375yaw - 0.375 & (5 > yaw \geq 1) \\ 1.5 & (yaw \geq 5) \end{cases} \quad (2)$$

$$v = \begin{cases} -1.5 & (-3 > roll) \\ -0.75roll - 0.75 & (-1 > roll \geq -3) \\ 0 & (1 > roll \geq -1) \\ -0.75roll + 0.75 & (3 > roll \geq 1) \\ 1.5 & (roll \geq 3) \end{cases} \quad (3)$$

5.5.1 参加者と装置

20 歳から 25 歳（平均：22.8，標準偏差：1.3）の 12 人（男性 10 人と女性 2 人）が実験に参加した。彼らは通常の視覚と身体能力を持っていた。すべての参加者は、テスト手順の完全な説明を受けた後、実験への参加に同意した。教示文については付録 F.1 に、また実験

の実施期間と実施場所は付録 G.1 に掲げる。

実験に使用した装置は、第 4 章の主実験で使用したものと同様である。ただし、操舵制御は HMD による制御であったため、ハンドルコントローラは使用しなかった。

5.5.2 手順

実験に使用した車両は、標準幅の右ハンドル車とした。x 方向、ヨー回転、ロール回転の 3 種類の頭部動作に対する車両制御について、この順序で調べた。以後 x 方向、ヨー回転、ロール回転のそれぞれのインタフェース名を Head-x, Head-yaw, および Head-roll とする。

参加者はシミュレータおよび各インタフェースに慣れるまで練習を繰り返し行うように指示を行い、参加者が十分に慣れてから試行を開始した。一連の試行は、2 つの線タイプ（線なしと縦線）と 4 つの車線変更方向パターン（右/左への 1 車線変更と右/左への 2 車線変更）の合計 8 つのパターンからランダムに選択しすべてのパターンを試行させた。8 つのパターンのそれぞれを継続して 3 回繰り返す合計 24 回の試行とした。1 回の試行の所要時間は約 7 秒であり、24 回の試行の合計は 3 分未満であった。3 種類のインタフェース候補のそれぞれについて 24 回の試行が行われたため、各参加者には合計約 9 分間連続で試行を行ってもらった。その他の設定は第 4 章の主実験と同じである。実験中に不快感を示して試行を途中で辞退した参加者はいなかった。

すべての試行が完了した後、参加者にアンケート（付録 F.2 参照）への記入を求めた。アンケートは操作の難易度、車両動作との親和性、VR 酔いについて回答を求めた。操作の難易度は各インタフェースの操作難易度について問うもので 5 段階（1：とても難しかった 2：難しかった 3：どちらともいえない 4：易しかった 5：とても易しかった）とした。車両動作との親和性は頭部動作が車両の横方向の動きにどれだけ適しているかを問うもので、5 段階（1：とても悪い 2：悪い 3：どちらともいえない 4：良い 5：とても良い）とした。VR 酔いへの反応は 4 段階（1：とても酔った 2：酔った 3：やや

酔った（4：酔わなかった）とした。

5.5.3 結果

表 5-2 は、操作の難易度、車両動作との親和性に関するアンケートの結果をまとめたものである。操作の難易度については Head-x が最も高く、Head-yaw がそれに続いた。車両動作との親和性も同様の傾向を示した。

表 5-2 操作の難易度と動きとの親和性についてのアンケート結果

		Head-x	Head-yaw	Head-roll
操作の難易度	平均	3.92	3.5	2.92
	標準偏差	1.19	1.38	1.04
動きとの親和性	平均	3.83	3.50	3.00
	標準偏差	1.07	1.19	1.00

図 5-4 は、通常のハンドルのインタフェースと 3 候補の頭部動作インタフェースにおける 1 車線変更の条件下での車線境界線別、25m 区間ごとの横方向の移動量を示している。また図 5-5 は、2 車線変更の場合の横方向の移動量を示している。両図の横軸と縦軸は、それぞれ区間と横方向の移動量を表している。大まかにいえば、頭部動作インタフェースを用いた場合の参加者の行動は、ステアリングホイールのインタフェースでの行動と大きく異ならなかった。ただし、いくつかの特徴的な違いも見られたが、それらについては考察にて述べる。

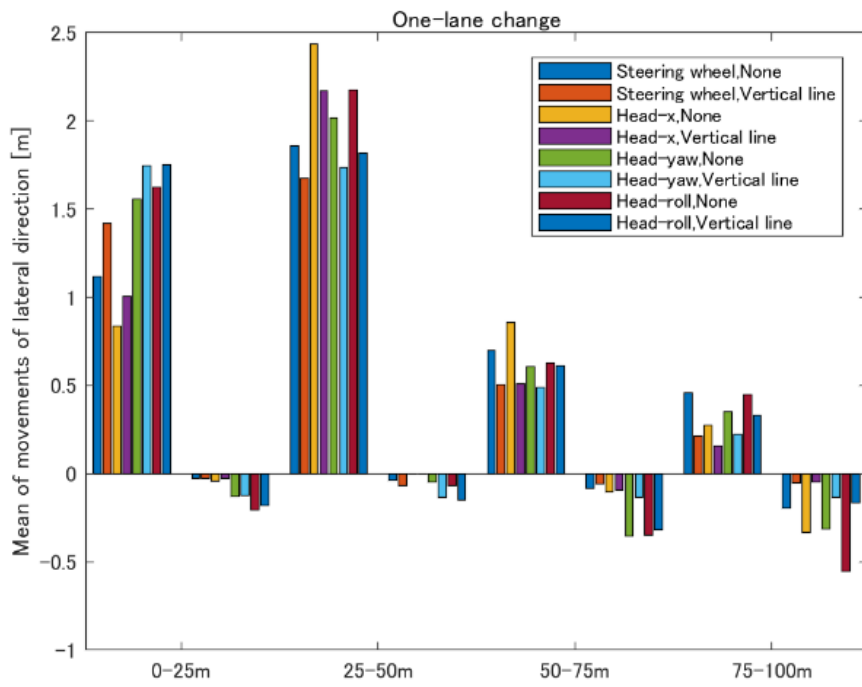


図 5-4 区間別の平均横方向移動量(1車線移動)

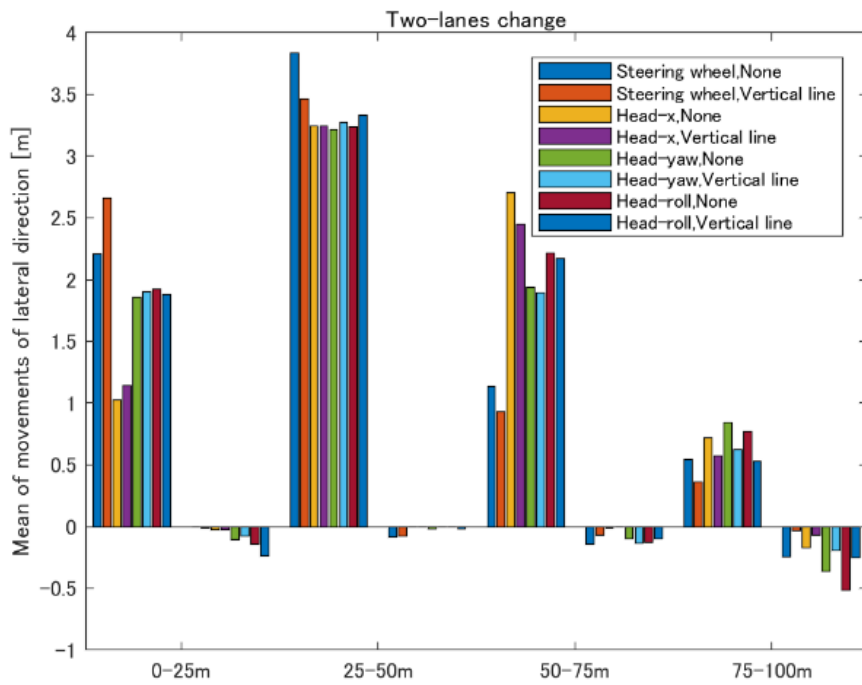


図 5-5 区間別の平均横方向移動量(2車線移動)

表 5-3 に VR 酔いのアンケート結果を示す。参加者は Head-x と Head-yaw にまったく VR 酔いを生じなかった。Head-roll にわずかな VR 酔いを感じたが、その程度はハンドルインタフェースの場合よりも少なかった。

表 5-3 VR 酔いについてのアンケート結果

		Head-x	Head-yaw	Head-roll	ハンドル
VR 酔い	平均	4.00	4.00	3.83	3.60
	標準偏差	0.00	0.00	0.37	0.58

5.6 考察

全身を右または左へ動かす動きは横方向への頭部の動き、すなわち Head-x であり、そのことが車両移動制御と最も親和性が高いという結果になったと考えられる。一方、Head-yaw と Head-roll は頭部を回転させる必要があり、このような動きは人の視線方向や水平線の角度を変え、相対的に使い勝手が悪くなるため、参加者にとっては快適性が相対的に低くなったと思われる。また Head-x は頭部が左右方向に移動し、それに伴って視野範囲の VR 映像が左右へ移動するため、参加者は自分(車両)の動きを過大評価し、特に通過ゲートから遠い 0-25m の区間で車両を操縦する範囲を制限した可能性がある。その後、参加者は移動距離が通過ゲートに近づくに連れて頭部の左右への動きによる車両の動きの過大評価が減少し最終的には通過ゲートを適切に通過することができていた。これは図 5-4、図 5-5 において、Head-x は他のインタフェースに比べて移動量が後半に延期されたことの原因と推定する。

2 車線移動の場合の横方向移動量は、単純には 1 車線移動の横方向移動量の 2 倍になると想定されるが、頭部動作インタフェースの場合の最初の 25m 区間での横方向の動きは、1 車線移動と 2 車線移動の両方でほぼ変わらない数値であった。一方で 50-75 m 区間での違いは、想定を 2 倍を上回るものであった。言い換えれば、頭部動作インタフェースは、ハ

ハンドルインタフェースと比較して、車線変更の動きを延期する結果となった。リスクが高まるため、これは好ましい選択ではない可能性がある。人間の行動モデルを構築し、そのモデルに基づいて適切な補償メカニズムを追加する必要がある。一方、Head-yaw と Head-roll では、Head-x よりも大きな負の動き(行き過ぎ量の戻し操作)が観察された。これは操作の難易度と動きとの親和性が Head-x に比べて相対的に低かったという点で、アンケートの結果と一致している。

VR 酔いについては、ハンドルをインタフェースとして使用した場合と比較して、参加者は頭部動作のインタフェース（特に Head-x と Head-yaw）で酔いが少ない傾向を示していた。操作との親和性が高かったことを考えると、視覚からの入力とは体の感覚と一致した可能性がある。参加者はシステム（車両）を自らコントロールしているような感覚を持っていた可能性があり、これは VR 酔いを軽減するのに効果があったと推察する。ただし VR 環境の使用時間による影響については今後調査する必要があると考える。

全体として、仮説①は支持されたと判断できる。具体的には、x 方向、ヨー回転、ロール回転の頭部動作が車線変更制御に関連していることがわかった。仮説②に関しては、頭部動作は操舵制御、より正確には横方向移動制御の支援手法として有望である。そこでは VR 酔いの軽減が期待でき、また使いやすさと車両動作との親和性が高い Head-x が最も有望なインタフェースであるといえる。ただし、頭部動作のインタフェースとハンドルインタフェース間の役割の協調については追加の調査が必要である。

5.7 本章のまとめ

本章では VR 空間における車両の操舵制御のユーザインタフェースとしての頭部動作の有効性を調査した。通常のハンドルインタフェース（第 4 章主実験）における運転中の頭部動作を調べたところ、x 方向、ヨー回転、およびロール回転が候補になり得ることが判明した。頭部の移動・回転動作によって車両を操縦できるドライビングシミュレータを実装し、操作の難易度、車両動作との親和性、VR 酔いの観点から有効性を検証した。頭部の水平方

向（x 方向）に沿った動きは，VR 酔いを軽減すると同時に，操作の難易度が低く，車両の動きとの親和性が高いことが確認され，最も有望なインタフェースであることがわかった。

今回の研究では，VR 空間で車両が一定速度で走行すると仮定した．さらに，この調査で検討した実験シナリオは，実際の運転シナリオよりも単純である．ドライバは，より現実的な運転シナリオ下では，追加の目的（たとえば，バックミラーを確認したり，長時間の運転セッション中の筋肉の緊張を和らげたりするなど）のために頭を動かす必要がある．さまざまな状況に対応するユーザインタフェース開発に向けて，引き続き詳しく調査していきたい．さらに，頭部動作インタフェースのステアリングホイールインターフェースへの統合（協調制御）を検討し，VR 空間および現実の世界でのより満足のいくステアリング制御を検討していきたい．

第6章 総括

VRについて基礎的な知見を積み重ねることによりVRのさらなる活用に貢献することを目標に、本研究ではその一端として、VR空間でのユーザの空間認識について検討を行った。特にユーザの障害物回避行動時の振る舞いに焦点を当てて実験を行った。

第2章では本研究に関連する研究を紹介した。本研究全体に関わる空間認知や知覚に関する先行研究として、バーチャルな身体認識と錯覚、身体知覚を伴うアプリケーション指向の研究、身体の拡張とテレプレゼンス、空間と動きの知覚について紹介し、さらに第4章以降で関係するドライビングシミュレータについての研究のほか、第5章に關係する頭部動作インタフェースおよびVR酔いについての研究についても紹介した。

第3章では、VR空間で見えない身体の大きさ認識について人間がどのように把握するかを調査するために、大きく2つの実験を行った。実験1の結果より、仮想身体の大きさの判断は現実世界での参加者自身の身体幅に影響(参照)されていることや、受動的な場面と能動的な場面とでは衝突回避に際しての身体幅認識に差がある、もしくは衝突回避のための安全マージンを取ることがわかった。また、衝突回避の精度は試行を重ねるとともに向上することもわかった。さらに、ユーザは物体が近づくまで回避行動を延期する傾向があることがわかった。実験2の結果からは、VR空間において仮想身体の大きさによらず10回程度の試行錯誤を繰り返すことによって自身の大きさを把握することができることがわかり、この結果は実験1の主実験の結果とも概ね一致している。VR空間での自身の大きさ把握は探索幅が大きいものと小さいものとで探索過程が異なっており、探索幅が小さい場合には探索の初期段階では大きく回避し、その後の探索過程で徐々に回避距離を縮めていった過程を鑑みると、VR空間における未知かつ不可視の仮想身体の大きさ探索は現実世界のBIBSをベースに行われる可能性があることがわかった。また、幅の狭い仮想身体の場合、幅を探索する場合、探索行動において障害物の至近を通過するため、障害物に近づくことを消極的になるためにユーザは慎重な探索行動を取ることがわかった。これは第4章の映像

参照の影響に通じる結果ともいえる。さらに女性は慎重かつ安定的な回避行動を取り、男性は状況に応じて大胆に回避行動を取る傾向があることも明らかになった。

第4章では自動車運転シミュレーションを題材として、VR空間でのドライバの振る舞いに影響する要素について調査を行った。障害物回避時にドライバが行う車両ポジションの決定は、自身が運転する車両の車幅やハンドルのポジション（右ハンドル、左ハンドル）、車線境界線という参照要素が影響していることを明らかにした。

第5章では、VR空間における車両の操舵制御のインタフェースとしての頭部動作の有効性について調査した。通常のハンドルインタフェースでの運転実験から、x方向、ヨー回転、およびロール回転の3つの頭部動作が横方向移動用インタフェースとしての有力な候補であることがわかり、3候補それぞれをインタフェースとして車両を操縦できるドライビングシミュレータを実装し、操作の難易度、車両動作との親和性、VR酔いの観点から有効性を検証した。頭部の水平方向（x方向）に沿った動きは、VR酔いを軽減すると同時に、操作の難易度が低く、動きとの親和性が高いことが確認され、最も有望なインタフェースであることがわかった。

VR空間はまだ未知なところが多く探求すべき領域が多い。それらの未知の点をひとつひとつ解明していくことで、人間にとって真に有益なVRインタフェースの実現やコンテンツ開発へと繋がっていくと考える。ユーザとVR空間との新たなインタラクションへの開拓の一助に本研究の成果が貢献の一端となることを願っている。

最後に、VRは娯楽利用に留まることなく、産業への展開が進んできている。しかしながらVR空間での人の振る舞いや認識についての知見はまだまだ少ない状況であり、我々はVR空間の利用可能性を拓げるべく基礎的調査を引き続き継続し、知見を積み上げていきたい。

付録

A.1 第3章 実験1(予備実験)の教示文

第3章 実験1(予備実験)では，参加者には次の説明を行った。

1. あなたはVR空間において不可視かつ大きさ未知のボードです。従ってVR空間では自分の体が見えません。前方を見て動かずに立ってください。
2. 球形の物体が次々と正面から投射されます。
3. あなたが扮するボードに物体が衝突すると，その衝突によりボードが動きます。衝突によるボードの動きによって映像が変化します。ボードの動きは回転効果と前後効果の2つがあります。回転効果はボードの中心から物体の接触点までの距離が大きくなるほど大きく回転します。前後効果は，接触位置に関係なく，背景画像が前後方向に揺れる動きです。また物体の衝突により衝突位置から衝突音が聞こえます。ボールの軌道と衝突の有無からあなたが扮するボードの幅を推定してください。
4. 物体が60回投射されると1回の試行が終了します。試行終了後にあなたが扮したボードの推定幅をあなたの両手で示してください。
5. ボード幅の異なる2回の試行を繰り返します。
6. 最後に，気分が悪い場合はいつでも実験を中止することができます。

B.1 第3章 実験1(主実験)の教示文

第3章 実験1(主実験)では，参加者には次の説明を行った。

1. あなたはVR空間において不可視かつ大きさ未知のボードです。従ってVR空間では自分の体が見えません。
2. 球形の物体が次々と正面から投げられます。物体の軌道を見て向かってくる物体を右または左に動いて回避してください。
3. あなたが扮するボードに物体が衝突すると，その衝突によりボードが動きます。衝突に

よるボードの動きによって映像が変化します。ボードの動きは回転効果と前後効果の 2 つがあります。回転効果はボードの中心から物体の接触点までの距離が大きくなるほど大きく回転します。前後効果は、接触位置に関係なく、背景画像が前後方向に揺れる動きです。また物体の衝突により衝突位置から衝突音が聞こえます。

4. 耐久性とエネルギーを示す 2 つのステータスバーが VR 空間に表示されます。物体がボードに当たるたびに耐久性が低下します。耐久性がゼロになってしまうと試行は終了です。移動するとエネルギーが減少します。エネルギーがゼロになっても試行は終了します。あなたが扮するボード幅を推定してエネルギーがあまり減らないように最低限の回避量で物体に衝突しないよう効率的に回避してください。
5. 試行は物体が最大 100 回投射されると終了します。
6. 最後に、気分が悪い場合はいつでも実験を中止することができます。

C.1 第 3 章 実験 2 の教示文

第 3 章 実験 2 では、参加者には次の説明を行った。

1. あなたは VR 空間において不可視かつ大きさ未知のボードです。従って VR 空間では自分の体が見えません。
2. 試行が始まるとあなたは一定速度で前進していきます。
3. あなたの前に現れる柱が近づいてくるので、見えないボードの幅を推測して柱を右または左に回避して通過してください。
4. Gamepad のジョイスティックを操作すると、右または左に移動できます。
5. 過度に回避しないようにしてください。ギリギリで回避できるように接触や回避成功を通してボード幅と把握してギリギリで回避するように取り組んでください。
6. 柱に当たると接触音が聞こえます。
7. 3 種類のボード幅を用意しました。各ボードで 50 回試行します。
8. 50 回の試行後（1 種類目の終わりと 2 種類目の終わり）、HMD に「新しいボード幅を

探索してください」というメッセージが表示されます。ボード幅が変わりますので再びボード幅を探索してください。

9. 実験後にアンケートにお答えください。

10. 最後に、気分が悪い場合はいつでも実験を中止することができます。

C.2 第3章 実験2のアンケート集計結果

①過去の実験の経験者数：0名

②年齢

表 C.2-1 第3章 実験2の参加者の年齢

平均	標準偏差	最大	最小
27.61	11.71	62.00	21.00

③実験参加者の性別 男性：10名，女性：8名

④利き手 右：18名，左：0名，両利き：0名

⑤実験時の視力(両眼) 1.0以上：9名，0.5以上1.0未満：6名，0.1以上0.5未満：3名，
0.1未満：0名

⑥過去のVRの経験数 何度も経験した：8名，1～3回ほど経験した：5名，
未経験：5名

⑦難易度，映像見易さ，酔い・疲れについて

実験の難易度

1：とても難しい 2：難しい 3：易しい 4：とても易しい

実験中の映像見易さ

1：とても見難かった 2：見難かった 3：どちらともいえない 4：見易かった

5：とても見易かった

実験中の酔い

1 : とても酔った 2 : 酔った 3 : やや酔った 4 : 酔わなかった

実験後の疲れ

1 : とても疲れた 2 : 疲れた 3 : やや疲れた 4 : 疲れなかった

表 C.2-2 第3章 実験2の難易度, 映像見易さ, 酔い, 疲れ

	1	2	3	4	5
難易度	0	10	7	1	-
映像見易さ	0	3	2	8	5
酔い	0	0	3	15	-
疲れ	0	0	7	11	-

D.1 第4章 予備実験の教示文

第4章 予備実験では, 参加者には次の説明を行った.

1. HMD を装着して VR の自動車運転シミュレータを体験してもらいます.
2. 操作はハンドル操作のみで, アクセルやブレーキ操作は不要です.
3. 車両の速度はアプリケーションによって設定され各ステージで決められた速度に一定に保たれます.
4. 運転してもらう自動車は左ハンドル車両です.
5. 自動車の車幅は標準の車幅と幅広の車幅の 2 種類があり, ステージによって設定が変わります.
6. あなたは 3 車線道路を走行しています.
7. 走っているとランダムで前方に障害物が現れます. 1 レーンだけ通過可能などところがありますので, そこを通過してください.
8. 最初のステージは練習ステージです.
9. 練習ステージは最大 3 回実施できます.

10. しかし、練習ステージで障害物に一度も接触しなかったら本番ステージに移行します。
11. 練習ステージおよび本番ステージにはステージが開始されると最初の数秒間メッセージが表示されます。練習ステージは「練習ステージ」と表示され、本番ステージでは車幅の設定および車速の設定が表示されます。
12. なお、すべてのステージをクリアすると終了のメッセージが表示されて自動で停車します。
13. 実験後にアンケートにお答えください。
14. 最後に、気分が悪い場合はいつでも実験を中止することができます。

D.2 第4章 予備実験のアンケート集計結果

①年齢

表 D.2-1 第4章 予備実験参加者の年齢

平均	標準偏差	最大	最小
24.69	9.28	60	21

②実験参加者の性別 男性：13，女性：3

③実験時の視力(両眼) 1.0 以上：8 名，0.5 以上 1.0 未満：4 名，0.1 以上 0.5 未満：2 名，
0.1 未満：2 名

④過去の VR の経験数 何度も経験した：6 名，1～3 回ほど経験した：5 名，
未経験：5 名

⑤免許の有無 バイク：0 名，普通自動車：15 名，大型：0 名，なし：1 名

運転経験（免許を保有する 15 名に対して実施）

⑥直近 1 年の運転量

1：ほぼ毎日 2：週数回 3：月数回 4：年数回 5：ほとんどしない

⑦ハンドルタイプ(複数選択可)

1 : 右ハンドル 2 : 左ハンドル 3 : バイクハンドル

⑧車両の大きさ(複数選択可)

1 : 軽自動車 2 : 普通自動車 3 : 大型車両 4 : バイク

⑨運転経験交通量(複数選択可)

1 : 交通量が多い大都市 2 : 交通量が中程度の地方都市 3 : 交通量が少ない地域

⑩高速道路の運転経験

1 : 多い 2 : 少ない 3 : なし

表 D.2-2 第4章 予備実験参加者の運転経験

	1	2	3	4	5
直近1年の運転量	2	2	1	6	4
ハンドルタイプ	13	2	1	-	-
車両の大きさ	8	8	0	1	-
運転経験交通量	1	6	8	-	-
高速道路の運転経験	4	9	2	-	-

難易度および酔い・疲れの度合い

⑪ 車速が 60km/h, 車幅は標準のときと比べて運転の難易度について

- 1 : 運転し難い 2 : やや運転し難い 3 : どちらでもない 4 : やや運転し易い
5 : 運転し易い

表 D.2- 3 第 4 章 予備実験の難易度

	1	2	3	4	5
速度が速い(80km)	2	9	1	1	2
速度が遅い(40km)	0	2	2	8	3
車幅が広い	2	6	3	1	3

⑫ 実験中の酔いと実験後の疲れについて

- 1 : 当てはまらない 2 : あまり当てはまらない 3 : 少し当てはまる 4 : 当てはまる

表 D.2- 4 第 4 章 予備実験の酔いと疲れ

	1	2	3	4
酔い	10	5	0	1
疲れ	6	3	3	4

E.1 第 4 章 主実験の教示文

第 4 章 主実験では, 参加者には次の説明を行った.

1. HMD を装着して VR の自動車運転シミュレータを体験してもらいます.
2. 操作はハンドル操作のみで, アクセルやブレーキ操作は不要です.
3. 車両の速度は一定に保たれています.
4. 4 つの車種があります. 右ハンドル車で標準の車幅, 右ハンドル車で車幅が 20%UP, 左ハンドル車で標準の車幅, 左ハンドル車で車幅が 20%UP. 車種が変わるときはメッ

ページでお知らせします。車種が変更されると 16 回障害物を回避してもらいます。4 車種の実施を 1 セットとして 3 セットの計測を行います。

5. 路面に表示される車線境界線は 4 種類あります。「なし」、「縦線」、「横線」、「縦破線」です。車線境界線の種類はランダムで変更されます。メッセージでは通知しません。
6. 走っているとランダムで前方に障害物が現れます。1 箇所だけ通過可能なところがありますので、そこを通過してください。通過可能な場所を目視して確認してから操作を行ってください。通過可能なところが判別できるまでは操作をしないでください。
7. はじめに練習ステージが 4 回行われてから本番になります。
 - 1) 右ハンドル, 車幅標準, レーンラインなし, 右に通過可能レーンあり
 - 2) 左ハンドル, 車幅標準, レーンラインなし, 左に通過可能レーンあり
 - 3) 左ハンドル, 車幅 20%UP, レーンラインなし, 右に通過可能レーンあり
 - 4) 左ハンドル, 車幅 20%UP, レーンライン縦線, 左に通過可能レーンあり
8. 練習ステージが終わったら本番のステージです。画面にメッセージで通知しますが、口頭でもお知らせします。
9. なお、すべてのステージをクリアすると終了のメッセージが表示されて自動で停車します。
10. 実験後にアンケートにお答えください。
11. 最後に、気分が悪い場合はいつでも実験を中止することができます。

E.2 第4章 主実験のアンケート集計結果

①予備実験の参加者：9名

②年齢

表 E.2-1 第4章 主実験参加者の年齢

平均	標準偏差	最大	最小
21.80	0.81	24	21

③実験参加者の性別 男性：18, 女性：2

④利き手 右：20名, 左：0名, 両利き：0名

⑤実験時の視力(両眼) 1.0以上：10名, 0.5以上1.0未満：9名, 0.1以上0.5未満：1名,
0.1未満：0名

⑥過去のVRの経験数 何度も経験した：10名, 1～3回ほど経験した：8名,
未経験：2名

⑦免許の有無 バイク：0名, 普通自動車：19名, 大型：0名, なし：1名

運転経験（免許を保有する19名に対して実施）

⑧直近1年の運転量

1：ほぼ毎日 2：週数回 3：月数回 4：年数回 5：ほとんどしない

⑨ハンドルタイプ(複数選択可)

1：右ハンドル 2：左ハンドル 3：バイクハンドル

⑩車両の大きさ(複数選択可)

1：軽自動車 2：普通自動車 3：大型車両 4：バイク

⑪運転経験交通量(複数選択可)

1：交通量が多い大都市 2：交通量が中程度の地方都市 3：交通量が少ない地域

⑫高速道路の運転経験

1 : 多い 2 : 少ない 3 : なし

表 E.2-2 第4章 主実験参加者の運転経験

	1	2	3	4	5
直近1年の運転量	5	0	2	4	8
ハンドルタイプ	18	1	0	-	-
車両の大きさ	9	10	0	1	-
運転経験交通量	2	9	9	-	-
高速道路の運転経験	6	10	3	-	-

回避難易度，映像の見易さ，酔い・疲れの度合い

⑬車線境界線ごとの障害物の回避難易度について

1：とても回避し難い 2：回避し難い 3：どちらともいえない 4：回避し易い
5：とても回避し易い

表 E.2- 3 第 4 章 主実験の難易度

	1	2	3	4	5
車線なし	0	16	3	1	0
縦線	1	0	1	7	11
横線	4	11	4	1	0
縦破線	0	0	1	7	12

⑭映像見易さについて

1：とても見難かった 2：見難かった 3：どちらともいえない
4：見易かった 5：とても見易かった

表 E.2- 4 第 4 章 主実験の映像見易さ

	1	2	3	4	5
映像	1	4	10	3	2

⑮実験中の酔いと実験後の疲れについて

1 : とても酔った 2 : 酔った 3 : やや酔った 4 : 酔わなかった

1 : とても疲れた 2 : 疲れた 3 : やや疲れた 4 : 疲れなかった

表 E.2-5 第4章 主実験の酔いと疲れ

	1	2	3	4
酔い	0	1	6	13
疲れ	2	6	10	2

F.1 第5章の実験の教示

第5章 実験では、参加者には次の説明を行った。

1. これから VR 空間において自動車運転をしてもらいます。
2. しかし、通常のハンドル操作ではなく頭を動かすことで左右に移動します。
3. 頭の動かし方は3種類です。
4. 1つ目は頭を左右に動かした方へ自動車は動きます。

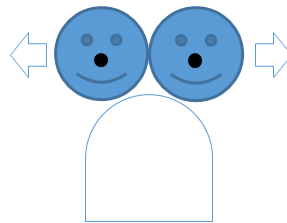


図 F.1-1 インタフェース (Head-x)

5. 2つ目は頭を左右に振る(左右を向く)と自動車が向いた方に動きます。

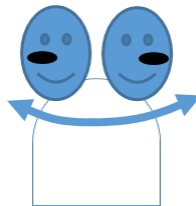


図 F.1-2 インタフェース (Head-yaw)

6. 3つ目は頭を左右に傾げると傾げた方向に自動車が動きます。

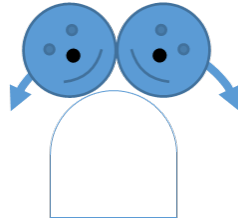


図 F.1- 3 インタフェース (Head-roll)

7. なお、前進するスピードは一定です。
8. 先ず HMD を装着してもらいます。
9. 装着後に HMD の位置調整をします。
10. その後実験を開始してよいかを聞いて了解を得てから実験を開始します。
11. 実験は 3 種類の操作を順番に体験してもらいます。
12. 走行開始後に前方に障害物が見えてきます。通過可能な位置を目視確認して、頭を動かして自動車を左右に操作して通過してください。はじめは練習ステージです。十分に練習したら声をかけてください。本番ステージに移ります。
13. 障害物が見えるまで頭を操作しても自動車は動きませんので、必ず障害物を目視確認してから自動車を操作してください。
14. 本番は 24 回の回避をしてもらいます。24 回の回避が終わると次の操作の練習ステージです。
15. 十分に練習したら声をかけて下さい。本番ステージに移行します。
16. 3 種類の操作について本番ステージを終えると終了になります。
17. 実験後にアンケートにお答えください。
18. 最後に、気分が悪い場合はいつでも実験を中止することができます。

F.2 第5章 実験のアンケート集計結果

①年齢

表 F.2-1 第5章 実験参加者の年齢

平均	標準偏差	最大	最小
22.83	1.34	25	20

②実験参加者の性別 男性：10，女性：2

③利き手 右：12名，左：0名，両利き：0名

④実験時の視力(両眼) 1.0以上：4名，0.5以上1.0未満：7名，0.1以上0.5未満：1名，
0.1未満：0名

⑤過去のVRの経験数 何度も経験した：9名，1～3回ほど経験した：2名，
未経験：1名

⑥操作の難易度について

1：とても難しかった 2：難しかった 3：どちらともいえない 4：易しかった

5：とても易しかった

表 F.2-2 第5章 インタフェースの難易度

	1	2	3	4	5
頭を左右に動かす操作	1	1	0	6	4
頭を左右に振る操作	1	3	1	3	4
頭を左右に傾げる操作	1	4	2	5	0

⑦自動車用の左右へ移動する操作インターフェース(操作するもの)として

1 : とても悪い 2 : 悪い 3 : どちらともいえない 4 : 良い 5 : とても良い

表 F.2- 3 第 5 章 インタフェースの有効性 (自動車用)

	1	2	3	4	5
頭を左右に動かす操作	1	1	3	6	1
頭を左右に振る操作	0	6	2	2	2
頭を左右に傾げる操作	2	5	4	1	0

⑧自動車用ではなく VR 空間での左右へ移動する操作インターフェース(操作するもの)として

1 : とても悪い 2 : 悪い 3 : どちらともいえない 4 : 良い 5 : とても良い

表 F.2- 4 第 5 章 インタフェースの有効性 (一般用)

	1	2	3	4	5
頭を左右に動かす操作	1	1	2	6	2
頭を左右に振る操作	0	4	2	2	4
頭を左右に傾げる操作	1	5	4	1	1

⑨身体の動きと VR 空間での動きの親和性 (相性) について

1 : とても悪い 2 : 悪い 3 : どちらともいえない 4 : 良い 5 : とても良い

表 F.2- 5 第 5 章 インタフェースの親和性

	1	2	3	4	5
頭を左右に動かす操作	1	0	2	6	3
頭を左右に振る操作	0	4	1	4	3
頭を左右に傾げる操作	1	2	6	2	1

⑩実験中の映像見易さについて

1 : とても見難かった 2 : 見難かった 3 : どちらともいえない 4 : 見易かった
5 : とても見易かった

表 F.2- 6 第 5 章 実験の映像見易さ

	1	2	3	4	5
映像	0	0	0	8	4

⑪実験中の酔いについて

1 : とても酔った 2 : 酔った 3 : やや酔った 4 : 酔わなかった

表 F.2- 7 第 5 章 インタフェースの酔い

	1	2	3	4
頭を左右に動かす操作	0	0	0	12
頭を左右に振る操作	0	0	0	12
頭を左右に傾げる操作	0	0	2	10

⑫実験後の疲れについて

1 : とても疲れた 2 : 疲れた 3 : やや疲れた 4 : 疲れなかった

表 F.2- 8 第 5 章 実験の疲れ

	1	2	3	4
疲れ	0	0	4	8

G.1 各実験の実施期間と実施場所

表 G.1- 1 各実験の実施期間と実施場所一覧

実験名	実験期間	実験場所
3 章実験 1 予備実験	2017/4/30-5/02	島根大学松江キャンパス 3 号館
3 章実験 1 主実験	2017/8/29-9/11	同上
3 章実験 2	2019/7/17-18	同上
第 4 章予備実験	2018/1/12-1/18	同上
第 4 章主実験	2018/5/25-7/6	同上
第 5 章主実験	2019/11/21-11/29	同上

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導頂いた島根大学総合理工学部 平川正人教授に心から感謝し、深く御礼申し上げます。論文が思うようにアクセプトされず心が折れそうになったときも、私のことを励まし、実直に研究の見直しや指導をして頂いたおかげで研究の難しさ、嬉しさを実感することができました。また、ご多忙の中、本学位論文をまとめるにあたり有益なご教示と温かいご配慮を賜りました島根大学大学院総合理工学研究科 縄手雅彦教授、神谷年洋教授に御礼申し上げます。

共同研究者である川島一将氏には本研究において実験参加者集めや実験の進行にご協力頂き心より深く感謝申し上げます。最後に、島根大学教育学部 佐竹易子先生には指導教授の平川正人先生をご紹介頂き島根大学大学院博士後期課程にて研究する機会を頂けただけでなく、在学中においては実験への参加者集めなど多大なるご協力を頂けたことに心から感謝し、深く御礼申し上げます。

参考文献

- [Banakou 2013] D. Banakou, R. Groten, M. Slater, “Illusory Ownership of a Virtual Child Body Causes Overestimation of Object Sizes and Implicit Attitude Changes,” *PNAS*, (2013) 110(31), pp.12846–12851.
- [Botvinick 1998] M. Botvinick, J. Cohen, “Rubber Hands 'Feel' Touch that Eyes See,” *nature*, (1998) 391(756).
- [Chen 2016] L. Chen, X. Yuan, Q. Xu, Y. Wang, Y. Jiang, “Subliminal Impending Collision Increases Perceived Object Size and Enhances Pupillary Light Reflex,” *Frontiers in Psychology*, (2016) vol.7, article 1897.
- [D’Angelo 2017] M. D’Angelo, G. di Pellegrino, and F. Frassinetti, “Invisible body illusion modulates interpersonal space,” *Scientific Reports*, 7 (2017) 1302.
- [Davy 2014] M. Davy, R. Deepa, “Hardware Implementation Based On Head Movement Using Accelerometer Sensor,” *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research* 2014, (2014) Vol. 3, Issue 1.
- [DeLucia 1994] P.R. DeLucia, R. Warren, “Pictorial and Motion-based Depth Information during Active Control of Self-motion: Size-arrival Effects on Collision Avoidance,” *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, (1994) vol.20, pp.783–798.
- [Diels 2014] C. Diels, “Will autonomous vehicles make us sick?” *Contemp. Ergon. Hum. Factors* (2014) pp.301–307.
- [Ehrsson 2007] H.H. Ehrsson, “The Experimental Induction of Out-of-Body Experiences,” *Science*, (2007) 317, 1048.
- [Fan 2017] K. Fan, A. Murai, N. Miyata, Y. Sugiura, M. Tada, “Multi-Embodiment of Digital Humans in Virtual Reality for Assisting Human-Centered Ergonomics Design,” *Augmented Human Research*, (2017) 2, 7.
- [Fang 2019] Y.-M. Fang, C. Lin, “The Usability Testing of VR Interface for Tourism Apps,”

- Appl. Sci. (2019), 9, 3215.
- [Feuchtner 2017] T. Feuchtner, J. Müller, “Extending the Body for Interaction with Reality,” Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, (2017) pp.5145–5157.
- [Gallagher 1986] S. Gallagher, “Body image and body schema: A conceptual clarification,” J. Mind Behav, (1986) vol.7, no.4, pp.541–554.
- [Gupta 2016] A. Gupta, N. Joshi, N. Chaturvedi, S. Sharma, V. Pandar, “Wheelchair Control by Head Motion Using Accelerometer,” International Journal of Electrical and Electronics Research 2016, (2016) Vol. 4, Issue 1, pp.158–161.
- [Guterstam 2015] A. Guterstam, Z. Abdulkarim, H.H. Ehrsson, “Illusory Ownership of an Invisible Body Reduces Autonomic and Subjective Social Anxiety Responses,” Scientific Reports, (2015) 5, 9831.
- [Hachaj 2019] T. Hachaj, M. Piekarczyk, “Evaluation of Pattern Recognition Methods for Head Gesture-Based Interface of a Virtual Reality Helmet Equipped with a Single IMU Sensor,” Sensors (2019), 19, 5408.
- [Hoort 2011] B. van der Hoort, A. Guterstam, H.H. Ehrsson, “Being Barbie: The Size of One’s Own Body Determines the Perceived Size of the World,” PLoS ONE, (2011) 6(5), e20195.
- [Hou 2014] J. Hou, G.F. List, X. Guo, “New Algorithms for Computing the Time-to-Collision in Freeway Traffic Simulation Models,” Computational Intelligence and Neuroscience, (2014) 761047.
- [Hsu 2016] C.C. Hsu, K.H. Chuang, “Traffic and Environmental Cues and Slow-down Behaviors in Virtual Driving,” Percept. Mot. Ski., (2016) vol.122, pp.101–122.

- [Hu 2017] Y. Hu, S. Leigh, P. Maes, “Hand Development Kit: Soft Robotic Fingers as Prosthetic Augmentation of the Hand,” Proceedings of 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, (2017) pp.27–29.
- [Hussain 2016] I. Hussain, G. Salvietti, D. Prattichizzo, “On Control Interfaces for the Robotic Sixth Finger,” Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference, (2016) 49.
- [Jazbec 2017] M. Jazbec, S. Nishio, H. Ishiguro, H. Kuzuoka, M. Okubo, C. Peñaloza, “Body-swapping Experiment with an Android Robot: Investigation of the Relationship between Agency and a Sense of Ownership toward a Different Body,” Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, (2017) pp.1471–1476.
- [Kharoub 2019] H. Kharoub, M. Lataifeh, N. Ahmed, “3D User Interface Design and Usability for Immersive VR,” Appl. Sci. (2019), 9, 4861.
- [Kilicarslan 2019] M. Kilicarslan, J.Y. Zheng, “Predict Vehicle Collision by TTC From Motion Using a Single Video Camera,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, (2019) 20(2), pp.522–533.
- [Komiyaama 2017] R. Komiyaama, T. Miyaki, J. Rekimoto, “JackIn Space: Designing a Seamless Transition Between First and Third Person View for Effective Telepresence Collaborations,” Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference, (2017) 14.
- [Kondo 2018] R. Kondo, M. Sugimoto, K. Minamizawa, T. Hoshi, M. Inami, M. Kitazaki, “Illusory Body Ownership of an Invisible Body Interpolated between Virtual Hands and Feet via Visual-motor Synchronicity,” Scientific Reports, (2018) 8, 7541.

- [Kumar 2015] S. Kumar, Neeraj Dheeraj S. Kumar, “Design and development of Head Motion Controlled Wheelchair,” *International Journal of Advances in Engineering & Technology* 2015, (2015) vol. 8, Issue 5, pp. 816–822, ISSN: 2231–1963.
- [Leigh 2017] S. Leigh, P. Maes, “Morphological Interfaces: On Body Transforming Technologies,” *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, (2017) pp.896–906.
- [Lewis 2014] T. Lewis, J. Drury, B. Beltz, “Evaluating Mobile Remote Presence (MRP) Robots,” *Proceedings of the 18th International Conference on Supporting Group Work*, (2014) pp.302–305.
- [Li 2001] F.X. Li, M. Laurent, “Dodging a Ball Approaching on a Collision Path: Effects of Eccentricity and Velocity,” *J. Ecol. Psychol.*, (2001) vol.13, pp.31–47.
- [Linkenauger 2013] S.A. Linkenauger, M. Leyrer, H.H. Bühlhoff, B.J. Mohler, “Welcome to Wonderland: The Influence of the Size and Shape of a Virtual Hand On the Perceived Size and Shape of Virtual Objects,” *PLoS One*, (2013) 8(7), e68594.
- [Lugrin 2018] J.-L. Lugrin, P. Krop, R. Kluepfel, B. Weisz, S. Stiersdorfer, M. Rueck, J. Schmitt, N. Schmidt, M. Ertl, and M. E. Latoschik. “Any ”Body” There? - Avatar Visibility Effects in a Virtual Reality Game,” In *Proceedings of the 25th IEEE Virtual Reality Conference (IEEE VR)* (2018)
- [Maeda 2016] M. Maeda, T. Tominaga, Y. Hijikata, N. Sakata, “Controlling Virtual Body Size to Reduce Discomfort Caused by Inappropriate Interpersonal Distance,” *Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers*, (2016) pp.192–195.

- [Martin 2014] M. Martin, J. Charlton, A.M. Connor, “Augmented Body: Changing Interactive Body Play,” Proceedings of Conference on Interactive Entertainment, (2014) pp.1–4.
- [Medeiros 2018] D. Medeiros, R.K. dos Anjos, D. Mendes, J.M. Pereira, A. Raposo, J. Jorge, “Keep My Head on My Shoulders!: Why Third-person is Bad for Navigation in VR,” Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, (2018) 16.
- [Nabeshima 2019] J. Nabeshima, MHD.Y. Saraiji, K. Minamizawa, “Prosthetic Tail: Artificial Anthropomorphic Tail for Extending Innate Body Functions,” Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference, (2019) 36.
- [Nishio 2007] S. Nishio, H. Ishiguro, N. Hagita, “Geminoid: Teleoperated Android of an Existing Person,” In: A.C. de Pina Filho (ed), Humanoid Robots, New Developments, (2007) pp.343–352.
- [Oculus Website] <https://www.oculus.com/>
- [Ogawa 2016] N. Ogawa, Y. Ban, S. Sakurai, T. Narumi, T. Tanikawa, M. Hirose, “Metamorphosis Hand: Dynamically Transforming Hands,” Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference, (2016) 51.
- [Ogawa 2017] N. Ogawa, T. Narumi, M. Hirose, “Distortion in Perceived Size and Body-based Scaling in Virtual Environments,” Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference, (2017) 35.
- [Pekkanen 2018] J. Pekkanen, O. Lappi, P. Rinkkala, S. Tuhkanen, R. Frantsi, H. Summala, “A Computational Model for Driver’s Cognitive State, Visual Perception and Intermittent Attention in a Distracted Car Following Task,” Royal Society Open Science, (2018) vol.5, no.180194.

- [Petkova 2008] V.I. Petkova, H.H. Ehrsson, “If I Were You: Perceptual Illusion of Body Swapping,” *PLoS ONE*, (2008) 3(12), e3832.
- [Pfeuffer 2017] K. Pfeuffer, B. Mayer, D. Mardanbegi, H. Gellersen, “Gaze + Pinch Interaction in Virtual Reality,” *SUI '17: Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction* October (2017), pp.99–108.
- [Piryankova 2014] Ivelina V. Piryankova, Hong Yu Wong, Sally A. Linkenauger, Catherine Stinson, Matthew R. Longo, Heinrich H. Bühlhoff, Betty J. Mohler, “Owning an Overweight or Underweight Body: Distinguishing the Physical, Experienced and Virtual Body,” *PLoS ONE*, (2014) 9(8), e103428.
- [Piumsomboon 2018] T. Piumsomboon, G.A. Lee, B. Ens, B.H. Thomas, M. Billinghurst, “Superman vs Giant: A Study on Spatial Perception for a Multi-Scale Mixed Reality Flying Telepresence Interface,” *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, (2018) 24(11), pp.2974–2982.
- [PlayStation VR Website] <https://www.playstation.com/ja-jp/explore/playstation-vr/>
- [Poupyrev 1996] I. Poupyrev, M. Billinghurst, S. Weghorst, T. Ichikawa, “The Go-Go Interaction Technique: Non-linear Mapping for Direct Manipulation in VR,” *Proceedings of the 9th annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, (1996) pp.79-80.
- [Pundlik 2011] S. Pundlik, E. Peli, G. Luo, “Time to Collision and Collision Risk Estimation from Local Scale and Motion,” *Lecture Notes in Computer Science*, (2011) 6938, pp.728–737.
- [Renner 2013] R.S. Renner, B.M. Velichkovsky, J.R. Helmert, “The Perception of Egocentric Distances in Virtual Environments – A Review,” *ACM Computing Surveys*, (2013) 46(2), 23.

- [Rousset 2018] T. Rousset, C. Bourdin, C. Goulon, J. Monnoyer, J.L Vercher, “Misperception of Egocentric Distances in Virtual Environments: More a Question of Training than a Technological Issue?,” *Displays*, (2018) 52 pp.8–20.
- [Rudigkeit 2019] N. Rudigkeit, M. Gebhard, “AMiCUS—A Head Motion-Based Interface for Control of an Assistive Robot,” *Sensors*, (2019), 19(12), 2836.
- [Salomon 2017] R. Salomon, J.-P. Noel, M. Lukowska, N. Faivre, T. Metzinger, A. Serino, O. Blanke, “Unconscious integration of multisensory bodily inputs in the peripersonal space shapes bodily self-consciousness,” *Elsevier Cognition*, (2017) 166, pp.174–183.
- [Saraji 2018] MHD.Y. Saraji, T. Sasaki, K. Kunze, K. Minamizawa, M. Inami, “MetaArms: Body Remapping Using Feet-Controlled Artificial Arms,” *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, (2018) pp.65–74.
- [Saruchi 2019] S.‘A. Saruchi, M.H. Ariff, H. Zamzuri, N. Hassan, N. Wahid, “Modeling of Occupant’s Head Movement Behavior in Motion Sickness Study via Time Delay Neural Network,” *Simulation 2019*, (2019) 96, pp.131–140.
- [Saruchi 2019-2] S.‘A. Saruchi, M.H.M. Ariff, M.I. Shapiai, N. Hassan, N. Wahid, N.J. Zakaria, M.A.A. Rahman, H. Zamzuri, “Radial Basis Function Neural Network for Head Roll Prediction Modelling in a Motion Sickness Study,” *Indones.J. Electr. Eng. Comput. Sci.* (2019), 15, pp.1637–1644.
- [Saruchi 2020] S.‘A. Saruchi, M.H. Mohammed Ariff, H. Zamzuri, N.H. Amer, N. Wahid, N. Hassan, K.A.A. Kassim, “Novel Motion Sickness Minimization Control via Fuzzy-PID Controller for Autonomous Vehicle,” *Appl. Sci.* (2020), 10, 4769.
- [Schiff 1965] W. Schiff, “Perception of Impending Collision,” *Journal of Psychological Monographs: General and Applied*, (1965) 79(11), pp.1–26.

- [Schiff 1990] W. Schiff, R. Oldak, “Accuracy of judging time to arrival: Effects of modality, trajectory, and gender,” *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, (1990), 16, pp.303–316.
- [Schmidt 2017] A. Schmidt, S. Schneegass, K. Kunze, J. Rekimoto, W. Woo, “Workshop on Amplification and Augmentation of Human Perception,” *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, (2017) pp.668–673.
- [Schwind 2017] V. Schwind, P. Knierim, C. Tasci, P. Franczak, N. Haas, N. Henze, “These are not my hands!”: Effect of Gender on the Perception of Avatar Hands in Virtual Reality,” *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, (2017) pp.1577–1582.
- [Slob 2008] J.J. Slob, “State-of-the-art Driving Simulators, A Literature Survey,” DCT Report: Eindhoven University of Technology, Department Mechanical Engineering Control Systems Technology Group, Eindhoven, Netherlands, (2008).
- [Takayama 2011] L. Takayama, E. Marder-Eppstein, H. Harris, J.M. Beer, “Assisted Driving of a Mobile Remote Presence System: System Design and Controlled User Evaluation,” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2011) pp.1883–1889.
- [Tanaka 2004] N. Tanaka, H. Takagi, “Virtual Reality Environment Design of Managing Both Presence and Virtual Reality Sickness,” *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, (2004) Vol.23 Issue 6, pp.313–317.
- [Ueda 2017] Y. Ueda, Y. Asai, R. Enomoto, K. Wang, D. Iwai, K. Sato, “Body Cyberization by Spatial Augmented Reality for Reaching Unreachable World,” *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, (2017) 19.

- [Vatsal 2017] V. Vatsal, G. Hoffman, “Wearing Your Arm on Your Sleeve: Studying Usage Contexts for a Wearable Robotic Forearm,” Proceedings of 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, (2017) pp.974–980.
- [Vive Website] <https://www.vive.com/>
- [Wada 2010] T. Wada, S. Fujisawa, K. Imaizumi, N. Kamiji, S. Doi, “Effect of Driver’s Head Tilt Strategy on Motion Sickness Incidence,” IFAC Proc. (2010) vol.2010, 43, pp.192–197.
- [Wada 2014] T. Wada, S. Fujisawa, S. Doi, “Analysis of Driver’s Head Tilt using a Mathematical Model of Motion Sickness,” Int. J. Ind. Ergon, (2018) 63, pp.89–97.
- [Wang 2019] Y. Wang, J. R. Chardonnet, F. Merienne, “VR Sickness Prediction for Navigation in Immersive Virtual Environments using a Deep Long Short Term Memory Model,” 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). (2019) pp.1874–1881.
- [Xiao 2015] Y. Xiao, J. Shi, “Analyzing the Influence of Mobile Phone Use of Drivers on Traffic Flow based on an Improved Cellular Automaton Model,” Discrete Dynamics in Nature and Society, (2015) vol.2015, article no.573090.
- [Xie 2019] H. Xie, K. Mitsuhashi, T. Torii, “Augmenting Human with a Tail,” Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference, (2019) 3.
- [Yan 2011] J.J. Yan, B. Lorv, H. Li, H.J. Sun, “Visual Processing of the Impending Collision of a Looming Object: Time to Collision Revisited,” Journal of Vision, (2011) 11(12) pp.1–25.

- [Yan 2015] S.Yan, G. Ding, Z. Guan, N. Sun, H. Li, L. Zhang, “OutsideMe: Augmenting Dancer's External Self-Image by Using A Mixed Reality System,” Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, (2015) pp.965–970.
- [河内 2005] 河内まき子, “AIST 人体寸法データベース 1991-1992 解説書,” 産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター (2005).
- [経産省 1] 経済産業省, 自動車産業におけるモデル利用のあり方に関する研究会,
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/automobile/mbd/mbd.html
- [経産省 2] 経済産業省近畿経済産業局, 関西 VR/AR/MR 企業カタログ,
https://www.kansai.meti.go.jp/3-2sashitsu/vr/xr_catalog.html
- [国交省 2019] 国土交通省観光庁観光資源課, 最先端 ICT(VR/AR 等)を活用した観光コンテンツ活用に向けたナレッジ集, (2019),
<https://www.mlit.go.jp/common/001279556.pdf>
- [四辻 2009] 四辻裕文, 喜多秀行, “ドライバーが抱く視覚的な距離・速度知覚構造のモデル化に関するレビューと展望,” 国際交通安全学会誌, (2009) vol.34, no.3, pp.326–333.
- [小林 2019] 小林祐人, 景山一郎, 坪内淳志, 木滝泰隆, 伊藤憲悟, “車両運動限界領域におけるリスクポテンシャルを用いた緊急回避ドライバモデルに関する研究,” 自動車技術会論文集, (2019) vol.50, no.1 pp.109–115.
- [赤松 2007] 赤松幹之, “運転中に何を見て, 何を認知しているのか～道路, 交通, 運転特性, そして高齢ドライバ～,” 映像情報メディア学会誌, (2007) vol.61, no.2 pp.1682–1688.
- [川上 2011] 川上翔太, 古川修, 伊勢野俊也, 玉田正樹, “交通シミュレータによる予防安全評価用ユニバーサルドライバモデルの開発,” 自動車技術会論文集, (2011) vol. 42, no.1 pp.61–66.

- [濁澤 2003] 濁澤雅, 上岡高之, 片倉正彦, 大口敬, 鹿田茂則, “視覚環境が運転者の速度感に及ぼす影響要因解析,” 土木計画学研究講演集, (2003) vol.28.
- [中村 2016] 中村裕彦, VR/AR 技術の将来展望, 三菱総合研究所 (2016),
https://www.mri.co.jp/knowledge/column/i6sdu6000000v98y-att/tec_10.pdf
- [渡邊 2016] 渡邊翔太, 川合伸幸, “自己身体と操作対象の身体図式の一致はより強い運動主体感・身体所有感を喚起する”, 日本認知科学会第 33 回大会, (2016) pp.31-40.
- [楠瀬 2016] 楠瀬適, 出村友秀, 佐藤健哉, “車両周辺環境とドライバー特性を考慮した自動車運転モデルの検討,” 情報処理学会第 78 回全国大会, (2016) 3U-08.
- [文化省 2018] 文部科学省文化庁文化財部伝統文化課, 文化財の観光活用に向けた VR 等の制作・運用ガイドライン(平成 29 年度版), (2018),
https://www.bunka.go.jp/tokei_hakusho_shuppan/tokeichosa/vr_kankokatsuyo/pdf/r1402740_01.pdf

研究業績

発表論文

関連論文 (レフェリー付き学術論文)

題 目 バーチャル空間における運転関連要素がユーザの振る舞いに与える
影響に関する調査的研究

著者名 (全員) 齋藤芳明, 川島一将, 平川正人

掲載誌名 (巻, 号, 頁) 電子情報通信学会論文, Vol.J103-D, No.12, pp.860-870

発行年月 2020年12月

題 目 Effectiveness of a Head Movement Interface for Steering a Vehicle
in a Virtual Reality Driving Simulation

著者名 (全員) **Yoshiaki Saito**; Kazumasa Kawashima; Masahito Hirakawa

掲載誌名 (巻, 号, 頁) symmetry 2020, 12, 1645; doi:10.3390/sym12101645

発行年月 2020年10月

題 目 Acquisition of the Width of a Virtual Body through Collision
Avoidance Trials

著者名 (全員) **Yoshiaki Saito**; Kazumasa Kawashima; Masahito Hirakawa

掲載誌名 (巻, 号, 頁) IEICE Transactions on Information and Systems,
Vol.E104-D, No.05, pp.741-751

発行年月 2021年5月

国内学会における口頭発表論文

題 目 バーチャル空間における自動車運転シミュレータの忠実性に関する考察

著者名（全員）齋藤芳明，川島一将，平川正人

掲載誌名（巻，号，頁） 第81回全国大会講演論文集(2019, 1, pp.13-14)

発行年月 2019年2月28日

題 目 バーチャル空間における交通法規遵守行動に関する考察

著者名（全員）川島一将，齋藤芳明，平川正人

掲載誌名（巻，号，頁） 第81回全国大会講演論文集(2019, 1, pp.83-84)

発行年月 2019年2月28日