

令和元年度 博士論文

自転車および自動車の VR 運転シミュレータの
開発と交通事故誘発要因の研究

指導教員

水戸部 一孝 教授

秋田大学大学院 理工学研究科 博士後期課程

総合理工学専攻

数理・電気電子情報学領域

人間情報工学講座

8517008 半田 修士

内容梗概

日本は世界で最も高齢化が進んでいる国である。高齢化に伴う問題の一つとして、高齢者の交通事故がある。平成 30 年度の日本の交通事故死者数の 55.7% を高齢者が占めており、高齢者に有効な事故対策が不足しているのが現状である。さらに、高齢ドライバーのペダル踏み間違い事故が近年注目されているが、詳しい原因は未だ解明されておらず、特にドライバーの急ブレーキ時のペダルワークに関する知見は少ないのが現状である。高齢ドライバーの交通事故の増加により、高齢者の免許返納が促進されている。免許を返納した高齢者は代替交通手段に自転車を選択するが、平成 30 年中の自転車運転中の死者数に占める高齢者の割合が 64.9% と最も高く、高齢自転車乗員の事故防止の取り組みも重要な課題といえる。自転車の運転に関して、運転動作に関する知見は多く報告されているが、車道横断行動についての知見は少なく、「横断経路」や「事故発生時の地点および自転車の向き」、「後方確認動作」、「横断タイミング」等は明らかになっていない。さらに、自転車運転中の事故を発生状況別にみると、平成 30 年中の自転車運転中の全事故のうち対自動車事故が 85% と非常に高い割合を占めており、その 51% を出会い頭事故が占めている。出会い頭事故は、見通しの悪い交差点で発生しやすい事故であり、平成 27 年の出会い頭事故における自転車乗員側の死傷者は 10 代・20 代の若年者が 40% 以上と最も高い。事故の原因は自転車側の一時不停止等の法令違反が主とされているが、自転車乗員の直前の行動や道路形状が原因となっている可能性もあり、これらの知見は未だ少ないのが現状である。

本論文では、自動車および自転車運転中の事故誘発要因の顕在化を目的とした。そのための手段として、運転者の行動を計測可能な自動車および自転車の VR 運転シミュレータを開発すると共に、「自動車運転時のペダルワーク」と「自転車運転時の右折横断および出会い頭事故」に着目して自動車および自転車運転時の行動を計測・解析した。

本研究では、Virtual Reality (VR) 技術および Motion Capture (MoCap) 技術を組み合わせて、ドライバーの頭部の向き、操舵、右足の膝および爪先の動きを計測できる Head Mounted Display (HMD) を用いた自動車運転シミュレータを開発し、若年者および高齢者を対象として計測した。さらに、「歩行者が車道に飛び出してからドライバーがアクセルから足を離すまでに要した時間」、「ドライバーがアクセルからブレーキに足を移すのに要した時間」および「歩行者が車道に飛び出してから 10 秒間のドライバーの右足の総移動軌跡長」について解析した。その結果、今回の計測ではペダルの踏み間違いは発生しなかったが、高齢者は若年者に比べ操舵よりもブレーキによる回避を選択する割合が 17% 高く、急ブレーキ時のペダルワークも遅く、ブレーキの踏み込みも安定しないことを明らかにした。以上から、車両速度に適したペダルワークができていないことが、高齢ドライバーの急ブレーキ時の特徴であり、事故要因の一部であると考えられる。

自転車運転シミュレータを VR 技術および MoCap 技術を組み合わせて開発した。3 枚

の 100inch スクリーンをコの字型に配置し、中央に自転車を設置した。また、自転車運転時の床反力を計測するために、自転車の台座の前方中央および後方左右に圧力式ロードセルを 3 個設置した。本装置は自転車の操舵角、ブレーキの度合、タイヤの回転、重心動揺および体験者の頭部・腰・両膝の位置(x, y, z)姿勢(yaw, pitch, roll)を計測可能である。片側一車線の直線道路を横断する条件で、「事故発生率」、「衝突時の位置姿勢」、「横断直前の後方確認所要時間」および「後方確認を終えてから車道に進入するまでの所要時間」について解析した結果、事故の 90%が手前の車線で発生しており、車道に進入する前の最終後方確認に費やす時間が短いほど、また、最終後方確認から車道に進入するまでに要する時間が長いほど、交通事故誘発リスクが上昇することを明らかにした。さらに、自転車を運転して交差点を横断する条件では、カーブまでの距離が 20m 以下の交差点において死角から飛び出してくる車両との事故発生率が高く、特にカーブまでの距離が 10m の交差点で左から飛び出してくる車両との事故発生率が最も高いことを明らかにし、交差点付近の道路形状が事故誘発要因となりうることを指摘した。

本論文は全 6 章で構成されている。第 1 章は序論とし、本研究の背景および目的について述べた。第 2 章では、各種運転シミュレータの先行研究について紹介している。第 3 章では、本論文で開発した「ドライビングシミュレータ」および「自転車運転シミュレータ」について説明している。第 4 章にて、ドライビングシミュレータを用いてドライバーの運転行動の検査条件および手法を説明し、顕在化した運転行動の特徴から交通事故誘発要因を考察した。第 5 章では、自転車運転シミュレータを用いて自転車乗員の運転行動の検査条件および手法を説明し、顕在化した運転行動の特徴から交通事故誘発要因を考察した。第 6 章は結論で、本研究により得られた主な知見および今後の課題について述べている。

目次

第1章 序論.....	1
1.1. 背景.....	1
1.2. 目的.....	3
第2章 各種運転シミュレータの先行研究.....	4
2.1. ドライビングシミュレータ.....	4
2.2. 自転車運転シミュレータ.....	4
2.3. 2章まとめ.....	5
第3章 開発したVR運転シミュレータの構成.....	6
3.1. ドライビングシミュレータ.....	6
3.1.1. ハードウェア構成.....	6
3.1.1.1. 三次元位置姿勢計測装置「G4™」.....	6
3.1.1.2. Head Mounted Display「Oculus Rift CV1」.....	9
3.1.1.3. 車両運転用入力インターフェース.....	10
3.1.2. ソフトウェア構成.....	11
3.1.3. システム構成.....	12
3.2. 自転車運転シミュレータ.....	14
3.2.1. ハードウェア構成.....	14
3.2.1.1. 三次元位置姿勢計測装置「LIBERTY™」.....	14
3.2.1.2. 映像呈示設備.....	15
3.2.1.3. 音響設備.....	16
3.2.1.4. 圧力計測システム.....	18
3.2.1.5. 自転車運転用入力インターフェース.....	20
3.2.2. ソフトウェア構成.....	22
3.2.3. システム構成.....	22
3.3. 3章まとめ.....	24
第4章 ドライバーの運転行動検査.....	25
4.1. 本検査の狙い.....	25
4.2. 実験方法.....	26
4.3. 解析方法.....	28
4.3.1. 回避方法による分別.....	28
4.3.2. 歩行者の飛び出しからドライバーがブレーキを踏むまでの所要時間.....	28
4.3.3. 歩行者の飛び出しからドライバーがアクセルを離すまでの所要時間.....	28
4.3.4. ドライバーがアクセルを離しブレーキを踏むまでの所要時間.....	28
4.3.5. 歩行者の飛び出しから10秒間のドライバーの右足つま先の総軌跡長.....	29

4.4. 結果.....	30
4.4.1. 回避方法の割合.....	30
4.4.2. 歩行者の飛び出しからドライバーがブレーキを踏むまでの所要時間.....	32
4.4.3. 歩行者の飛び出しからドライバーがアクセルを離すまでの所要時間.....	33
4.4.4. ドライバーがアクセルを離しブレーキを踏むまでの所要時間.....	34
4.4.5. 歩行者の飛び出しから 10 秒間のドライバーの右足つま先の総軌跡長.....	35
4.5. 考察.....	36
4.6. 4 章まとめ.....	37
第 5 章 自転車乗員の運転行動検査.....	38
5.1. 片側一車線直線道路における右折横断.....	38
5.1.1. 本検査の狙い.....	38
5.1.2. 検査方法.....	38
5.1.3. 検査参加者.....	40
5.1.4. 教示条件.....	41
5.1.5. 解析方法.....	42
5.1.5.1. 比較対象の分類.....	42
5.1.5.2. 交通事故発生率.....	42
5.1.5.3. 車両衝突地点および衝突角度.....	42
5.1.5.4. 横断経路偏差.....	42
5.1.5.5. 車道進入前の最終後方確認の所要時間.....	44
5.1.5.6. 最終後方確認から車道に進入するまでの所要時間.....	44
5.1.6. 結果.....	45
5.1.6.1. 交通事故発生率および事故件数.....	45
5.1.6.2. 車両衝突地点および衝突角度.....	46
5.1.6.3. 横断経路偏差.....	47
5.1.6.4. 車道進入前の最終後方確認の所要時間.....	48
5.1.6.5. 最終後方確認から車道に進入するまでの所要時間.....	49
5.1.7. 考察.....	50
5.1.8. まとめ.....	51
5.2. 無信号交差点における直進横断.....	52
5.2.1. 本検査の狙い.....	52
5.2.2. 検査方法.....	52
5.2.3. 教示条件.....	55
5.2.4. 検査参加者.....	55
5.2.5. 解析方法.....	55
5.2.5.1. 条件別交通事故発生率.....	55

5.2.6. 結果.....	56
5.2.6.1. 条件別交通事故発生率.....	56
5.2.7. 考察.....	57
5.2.8. まとめ.....	57
5.3. 5章まとめ.....	58
第6章 結論.....	59
6.1. まとめ.....	59
6.2. 今後の課題.....	65
謝辞.....	66
研究業績.....	68
参考文献.....	71

第1章 序論

1.1. 背景

日本は世界で最も高齢化が進んでいる国である。アジアでは中国およびシンガポールが 2030 年頃に現在の日本と同等の高齢化率になると予測されている^[1]。今後、多くの国が高齢化に伴う問題に直面する中、高齢化先進国である日本が、世界に先駆けて高齢化に伴う課題を顕在化し、解決しうる工学技術を構築することは国内産業の競争力を強化する上でも極めて有効と考える。高齢化に伴う問題の一つとして、高齢者の交通事故がある。平成 30 年度の日本の交通事故死者数は 3532 名であるが、この 55.7% を高齢者が占めており、高齢者に有効な事故対策が不足しているのが現状である^[2]。

高齢ドライバーのペダル踏み間違い事故が近年注目されているが、詳しい原因は未だ解明されておらず、特にドライバーの急ブレーキ時のペダルワークに関する知見は少ないのが現状である。車両による交通事故の多くがドライバーの不注意(ペダル踏み間違いや操作不適等)に起因していることを踏まえれば、例えば自動運転技術等の発展は事故の減少に大きく貢献する可能性があり、また、自動ブレーキ等の先進安全技術についても事故削減効果が大きく期待される^[3]。しかし、サポート機能の備わった車両が普及するまでには、それなりの年月を要すると考えられており、普及と並行して事故防止対策を考えていくことは重要な課題となっている^[4]。

高齢ドライバーの交通事故の増加により、高齢者の免許返納が促進されている。免許を返納した高齢ドライバーは代替交通手段として自転車を選択するが、平成 30 年中の自転車運転中の死者数に占める高齢者の割合が 64.9% と最も高いことから、高齢者の自転車運転中の事故防止の取り組みも重要な課題といえる^[1]。

自転車の運転に関して、低速時には膝で姿勢を制御する^[5]、自転車乗車中に振り向くとハンドルが左右にブレる^[6]等の自転車運転動作に関する知見は報告されているが、自転車運転中の車道横断行動についての知見は少なく、特に車両と並進時の「後方確認動作」や「どのような車間・タイミングで横断しているのか」等は明らかになっていない。道路交通法によると、横断歩道又は自転車横断帯が付近に無い場合、車道を横断する際に一時停止の義務はなく、他の交通の妨げにならなければ横断しても良い。よって、横断歩道等が無い車道を自転車で停止せず走行しながら右折するという状況が想定できる。危険な(他の交通の妨げになる)タイミングでこのような横断をすると、左車線を走る車両から追突、もしくは右車線を走る車両と正面衝突し、重大な事故に繋がると考える。もし、危険なタイミングで車道に進入してしまう人に共通する横断の特徴を抽出できると、交通事故誘発要因の解明に有用な知見となる。また、高齢自転車乗員の死亡率が高い原因の一つに車両との一次衝突時もしくは路面との二次衝突時の頭部外傷がある。自転車乗員と車両の衝突に関する研究として、Maki^[7]らによるマルチボディモデ

ルを用いた解析や、Howard^[8]ら、Cardot^[9]らによる人体モデルを用いた有限要素解析、Ito^[10]らによる人体有限要素モデルを用いた解析により、歩行者と自転車乗員では衝突時の挙動や頭部の衝突速度などに違いがあることやヘルメットによる頭部保護の重要性が明らかになっている。これらの研究では車両に対し直交する向きに進行する自転車との衝突のみを対象としているが、実際の車道では自転車乗員が車道走行時に車道に飛び出した、あるいは右折横断したときに車両と衝突する場合があります。車両と自転車の衝突角度により有限要素解析の結果が異なる。そのため、様々な位置姿勢で車両と自転車の衝突をシミュレーションする必要があるが、指標がない状況では膨大な条件をシミュレーションせざるを得ないのが現状である。

自転車運転中の事故を事故発生状況別にみると、平成30年中の自転車運転中の全事故のうち対自動車事故が85%と非常に高い割合を占めており、その51%を出会い頭事故が占めている^{[11][12]}。出会い頭事故は、見通しの悪い交差点で発生しやすい事故であり、平成27年の出会い頭事故における自転車乗員側の死傷者は10代・20代の若年者が40%以上と最も高い^[11]。事故の原因は自転車側の一時不停止等の法令違反が主とされているが、自転車乗員の直前の行動や道路形状が原因となっている可能性もあり、これらの知見は未だ少ないのが現状である。

1.2. 目的

医療技術の発展、自動車ドライバーのシートベルト装着率の向上、道路交通法の違反者数の減少などの要因により、交通事故死者数は減少している。また、近年の車両の衝突安全技術の向上やドライバーに危険を促すための危険通知システムの開発など、車両側の技術改良の効果も死者数の減少に貢献している。これまでに、高齢者に関する交通事故の発生状況の分析が科学警察研究所および交通事故分析センターにより進められ、有益な統計情報が公表されている。しかし、交通事故防止の取り組みとしては、「明るい目立つ色の服装を心がける」、「反射板を装着する」といったドライバーの注意を喚起する取り組みがほとんどであり、交通弱者側からの交通事故回避の活動は地域の交通安全講習に留まっているのが現状である。もし、交通事故を誘発するリスク要因を明らかにできると、交通安全のためのデバイスの開発や、より効果的な交通事故対策の立案に役立つと期待できる。しかし、交通事故に関する研究の多くは、事故後の状況を解析して推察しているため、交通事故発生前後の被害者の行動、周囲を走行する車両等の状況を知ることは容易ではない。自転車乗員がとる行動を認知科学的な観点から分割すると、走行車両の「知覚」、周囲の状況の「認知」、安全に渡れるか否かの「判断」、最後に横断する「行動」の4種類のプロセスに大別できる^[12]。これはドライバーの行動も同様に歩行者の「知覚」、周囲の状況の「認知」、安全に走行できるか否かの「判断」、最後に走行する「行動」の4種類に大別できる。高齢者の交通事故誘発要因は、これら4種類のプロセスのいずれかの衰えにあると考えており、仮想交通環境での移動行動を評価することで隠れたリスク要因を推定できるのではないかと考えている。

本研究では、自動車および自転車運転中の事故誘発要因の顕在化を目的としている。そのため的手段として、本論文では運転者の行動を計測可能な自動車および自転車のVR運転シミュレータを開発すると共に、「自動車運転時のペダルワーク」と「自転車運転時の右折横断および出会い頭事故」に着目して自動車および自転車運転時の行動を計測・解析する。なお、本論文で実施した検査は全て秋田大学手形地区におけるヒトを対象とした研究に関する倫理規定第6条第2項に基づいた倫理審査の上、秋田大倫理審査委員会の承認を得ている。

第2章 各種運転シミュレータの先行研究

本章では各種運転シミュレータを用いた先行研究について紹介する。

2.1. 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用いた研究に、郊外の道路における自転車追い越しに関する研究がある^[13]。この研究では簡易的に再現した運転席の正面に5枚のディスプレイを同心円状に配置したシミュレータにより、自転車を追い越す際の車両の走行情報を計測・解析することで追い越し戦略のモデル化を目指している。その結果、自動運転や先進安全システムの開発に役立つ、追い越し戦略を予測するモデルを構築できたと報告している。

香港では、配送業者等のプロのドライバーと一般のドライバーの運転技能をドライビングシミュレータによる実験で比較している^[14]。使用しているドライビングシミュレータは、簡易的に再現した運転席の正面に3枚のディスプレイをハの字に配置しており、運転席のステアリングやペダル等を操作することでハイウェイや市街地を走行できる。この研究では車両走行時の横位置や車両先頭部の向き、速度について車両の走行データから解析している。実験の結果、プロのドライバーは一般ドライバーよりも車両制御に優れており、特に中年のプロドライバーは高齢のプロドライバーよりも車両制御が優れていることを明らかにしており、加齢に伴う車両制御能力の低下は経験によって補うことは可能であるが、高齢ドライバーにはトレーニングを科すことでより事故リスクを減少させられると提言している。

上記の他にも、Yuqing らによる、床からアクセルへのペダルワークを画像処理によるMoCapで評価した研究^[15]等がある。

2.2. 自転車運転シミュレータ

オーストラリアの交通安全戦略により、自転車乗員にとってより安全な道路環境を構築するための重要な手段の1つとして、証拠に基づいた道路設計の仕様を推奨されている^[16]。そのため、Steve らは、モナッシュ大学事故研究センター (MUARC) で開発された、HMD 式の自転車運転シミュレータを用いて、仮想空間に再現した道路に構築した自転車走行帯を走行させ道路構造を評価する研究を報告している^[17]。

米国では Masoud らにより、自転車走行帯と商用車の積み込み領域の間における自転車乗員の行動を、自転車運転シミュレータを用いた実験により評価した研究が報告されている^[18]。この研究の自転車運転シミュレータは自転車の正面に3.20 m × 2.54 m のスクリーンを1枚設置した簡易的な装置である。前方に投影された自転車走行帯と商用車の

積み込み領域の間を走行するときの自転車の速度と左右位置を解析して自転車乗員の行動を評価している。

上記のような交通計画分野の研究以外にも、Song らの研究のように、自転車運転シミュレータの動的特性をより現実近づけるために、運転中にハンドルにかかる荷重やペダル踏力を計測しモデル化する運動力学分野の内容も多く研究されている^[9]。

2.3.2 章まとめ

本章ではドライビングシミュレータおよび自転車運転シミュレータの先行研究について紹介した。ドライビングシミュレータの先行研究では自動運転システムのための知見や配送業プロドライバーへの提言を紹介した。自転車運転シミュレータの先行研究では交通計画への活用事例や運動力学分野の研究を紹介した。

第3章 開発した VR 運転シミュレータの構成

3.1. ドライビングシミュレータ

3.1.1. ハードウェア構成

3.1.1.1. 三次元位置姿勢計測装置「G4™」

ドライビングシミュレータで用いたワイヤレス 3 次元位置姿勢計測装置(G4™, POLHEMUS 社)の動作原理と概要, ハードウェアの構成および性能について述べる. 図 3-1 に磁気式モーションキャプチャの動作原理, 図 3-2 に磁気式モーションキャプチャの姿勢定義を示し, 図 3-3 に各姿勢の角度範囲を示す^[20]. G4™ は, トランスミッタと呼ばれる固定電気双極子発信アンテナ, 複数のレシーバと呼ばれる移動可能な電気双極子受信アンテナ, トランスミッタにレシーバの相対的な距離および姿勢を計測するための電子回路で構成されている. トランスミッタおよびレシーバは, 3 軸直交コイルで構成されており, コイルの直径はトランスミッタとレシーバの間の距離に比べて非常に小さく保たれているため, 各コイルは 1 つの点と見なすことができる. トランスミッタコイルに電流を流し励磁すると, 遠方界成分および近傍界成分(誘導電界)で構成する電磁界が生じる. 遠方界の強度はコイルのサイズと励磁周波数と相関しており, 距離に反比例する ($1/r$). 誘導電界(準静電界^{[21][22]})の強度は励磁周波数に依存せず, 距離の逆 3 乗で減衰する ($1/r^3$). 準静電界は遠距離からは検出できない. なお, その強度は短距離において優位を占めており, その場合では遠方界が無視できる^[21]. G4™ は, トランスミッタの各軸のコイルが同一の励磁周波数および位相を持つ駆動信号によって順々に励磁される. トランスミッタの各軸のコイルが励磁されるたびに, 1 つの単一軸トランスミッタが生成される. トランスミッタの励磁は, 3 つの状態を持つパターンである. トランスミッタが励磁されることにより, レシーバ側に 3 つの線形独立ベクトルが出力される. レシーバとトランスミッタとの相対的な位置姿勢は, 3 つの線形独立ベクトルより求めることができる. 基本的に, 得られる 9 個の計測値により位置 (x, y, z) および姿勢 ($azimuth, elevation, roll$) を求めている^[21]. トランスミッタは任意の周波数で 3 軸直交コイルから磁場を発生させており, HUB に接続されたレシーバに生じる誘導起電力を検出回路で増幅し, HUB に内蔵されたコンピュータおよび解析ソフトウェアによりトランスミッタに対する相対的なレシーバの位置姿勢情報を算出しており, 位置姿勢情報は無線通信により計測用 PC へと出力されている. また, 3 軸直交コイルからなるトランスミッタおよびレシーバの座標系は図 3-2 のように右手系で構成されている. ここでは, 図 3-3 のようにそれぞれの方位によって角度範囲が異なる. 表 3-1 に G4 の検出特性を示す. 測定精度は位置が 2.0mm, 角度が 0.5deg である. 分解能は位置が 0.0762mm, 角度が 0.0008deg である. サンプルングレートは 120Hz である. 図 3-4 に G4 のトランスミッタおよびレシーバを示す. 同図(a)にトランスミッタの外観, 同図(b)

にレシーバの外観を示す。トランスミッタのサイズは $L103.4 \times W103.4 \times H102.9\text{mm}$ である。測定範囲は、トランスミッタを中心として半径約 1m の半球状である。レシーバの先端コイル部のサイズは $L22.9 \times W28.2 \times H15.2\text{mm}$ である。

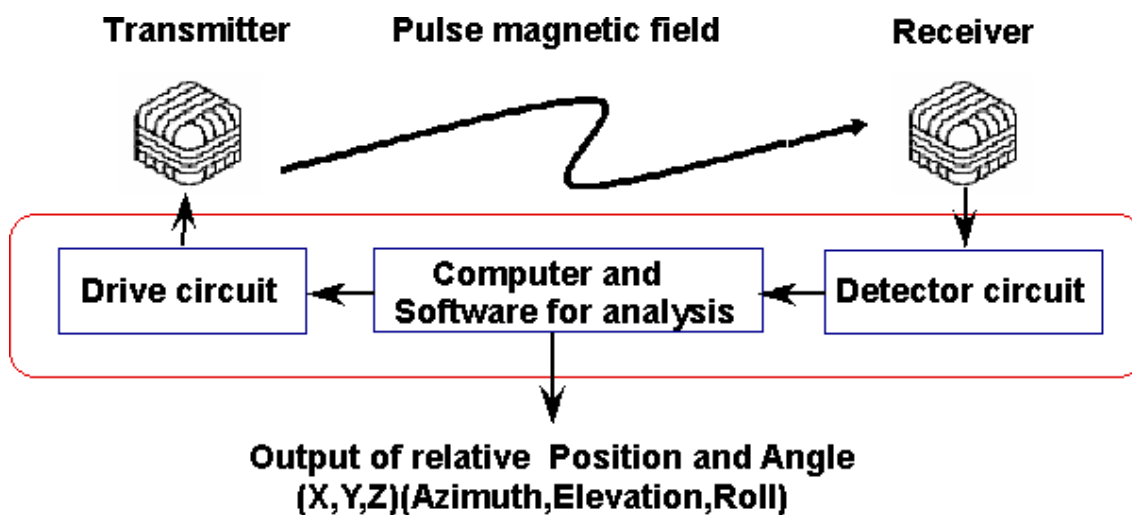


図 3-1 磁気式モーショキャプチャ装置の動作原理^[20]

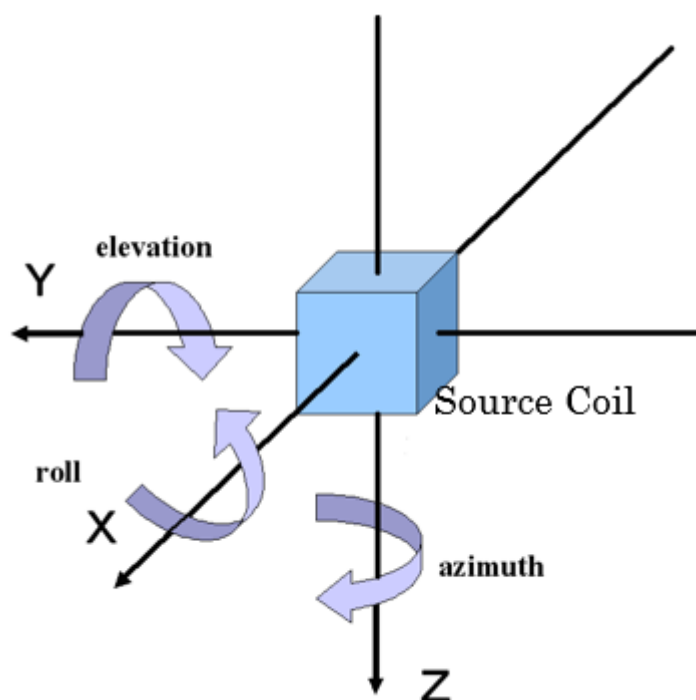


図 3-2 磁気式モーショキャプチャ装置の姿勢定義^[20]

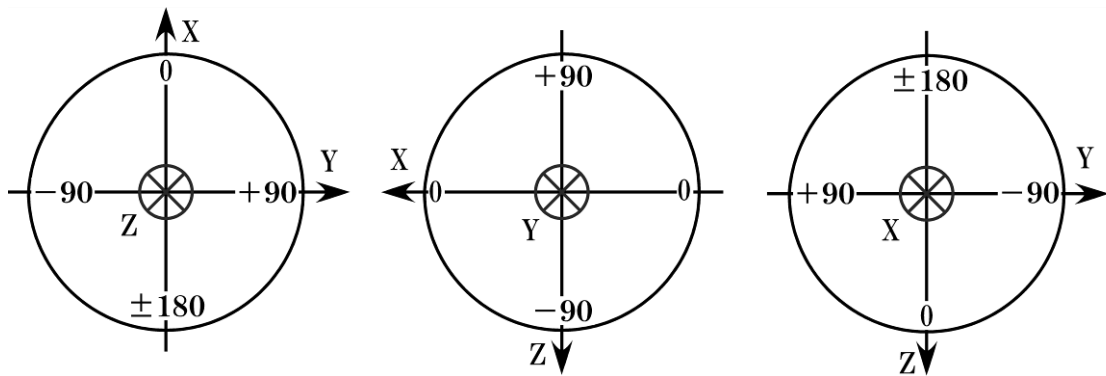


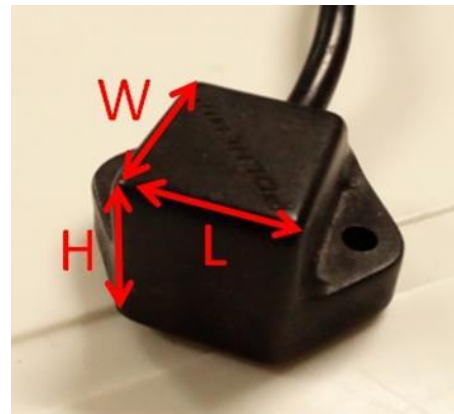
図 3-3 各姿勢の角度範囲^[20]

表 3-1 G4™ の確度および分解能

	Position [mm]	Angle [deg]
Accuracy	2.0	0.5
Resolution	0.0762	0.0008



(a) トランスミッタ



(b) レシーバ

図 3-4 トランスミッタおよびレシーバの外観

3.1.1.2. Head Mounted Display 「Oculus Rift CV1」

Head Mounted Display (HMD)はゴーグルのような形状で、頭部に装着することで両目に画像や映像を呈示する装置である。HMDの種類は様々あるが、本研究で使用したHMDのOculus Rift CV1(Oculus社、以降CV1)は、右眼に右眼用の映像、左眼に左眼用の映像を別々のディスプレイで呈示することで、視差を生じさせ奥行き感を再現している。図3-5にCV1の外観を示す。同図(a)にCV1のヘッドセット、同図(b)にCV1のPosition Tracking Cameraを示す。CV1のディスプレイの解像度は 2160×1200 (片眼あたり 1080×1200)であり視野角は横方向に 110deg である。目とレンズは 12mm 離れており、視野角は垂直 93deg 、水平 94deg である。ディスプレイのリフレッシュレートは 90Hz であり、滑らかな映像が呈示可能である。Position Tracking Cameraには赤外線カメラを使用しており、CV1のヘッドセットに埋め込まれた赤外線LEDの反射からヘッドセットの位置を推定することができる。また、ヘッドセットの内臓の各種センサとPosition Tracking Cameraとの位置関係から、ヘッドセットの相対的な位置姿勢を取得することができる。本研究では、運転中の検査参加者の頭の位置姿勢データを経過時間と共に記録する。CV1のPC要求グラフィックボードはGTX960以上、物理メモリは8GBである。さらに、PCのOSはWindows8.1より新しいOSが必要である。なお、検査で使用するPCはCV1の要求スペックを全て満たしている。



(a) CV1のヘッドセット



(b) Position Tracking Camera

図 3-5 CV1の外観

3.1.1.3. 車両運転用入力インターフェース

DSに使用した入力インターフェース(以降, コントローラと呼ぶ)はLogicool G29 Driving Force (LPRC-15000)である. コントローラはステアリング部とペダル部に分かれている. 図 3-6 に G29 のコントローラを示す. 同図(a)に G29 のステアリング部, 同図(b)に G29 のペダル部を示す. ステアリング径は 280mm, 回転の可動域は $\pm 450\text{deg}$ であり, 実際の自動車のステアリングと同じ仕様となっている. また, ステアリングにモータが搭載されており, 回転中に抵抗力を発生させることができる. ペダル部には3つのペダルが存在し, 右にアクセルペダル, 中央にブレーキペダル, 左にクラッチペダルが配置されている. 本検査ではオートマチックトランスミッション式の車両を想定しアクセルペダルおよびブレーキペダルのみ使用する.



(a) ステアリング部



(b) ペダル部

図 3-6 G29 のコントローラ

3.1.2. ソフトウェア構成

本研究では VR 環境開発ツール Vizard5.0 (WorldViz 社製) を用いてシミュレータの VR 環境を開発した。Vizard は Python スクリプト言語によって VR 空間を構築することができる開発ソフトウェアである。Python 言語はインタプリタ型のプログラミング言語であり、コンパイルしなくても構築した環境を実行可能である。Vizard は特定のライセンスを購入するとコンパイルした実行ファイル形式を自由に配布することができる。本研究で使用した CV1 とコントローラをすべてサポートしている。システム全体のサンプリングレートは CV1 のリフレッシュレートに合わせて 90Hz に設定した。Vizard で作成した VR 空間の座標系は左手座標系(位置[x, y, z]姿勢[yaw, pitch, roll])である。図 3-7 に Vizard の開発環境画面を示す。

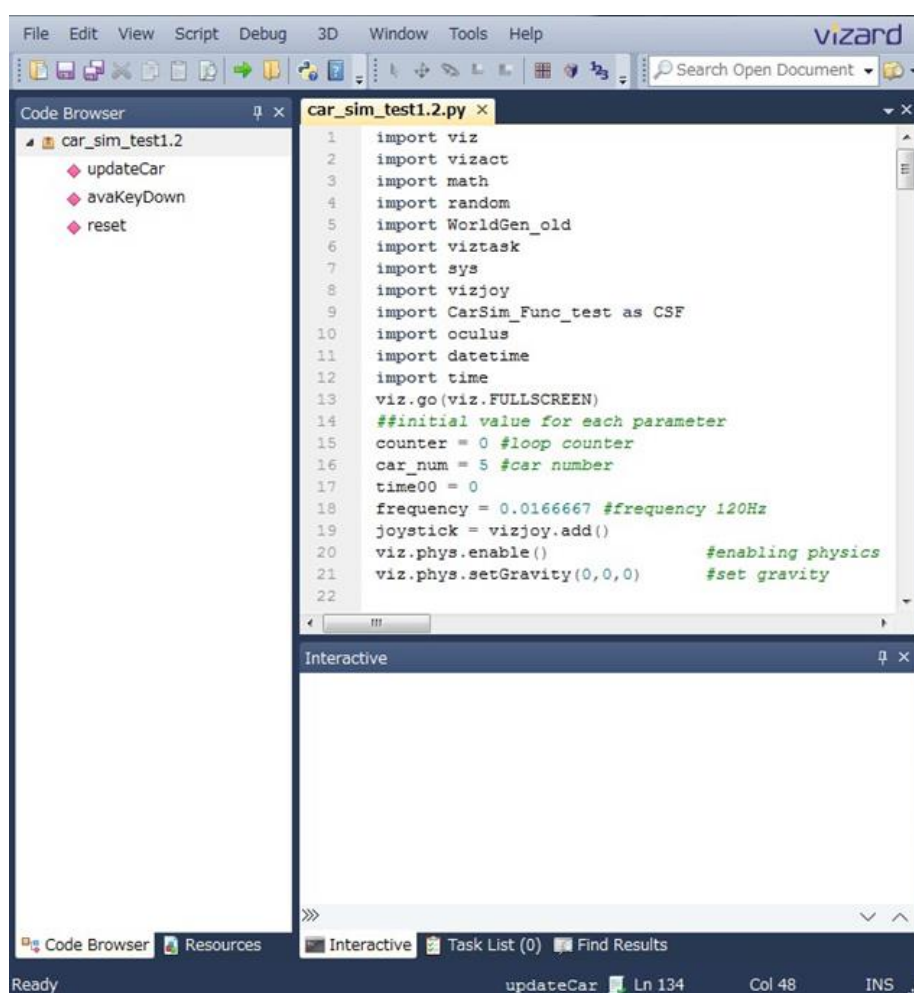


図 3-7 開発環境「Vizard」画面

3.1.3. システム構成

図 3-8 にドライビングシミュレータのシステム図を示す。本シミュレータは制御用 PC1 台、ステアリングコントローラおよびペダルコントローラ 1 台(G29, Logitech 社), 映像呈示用 HMD(Oculus CV1, Oculus 社)1 台および MoCap 装置(G4™ 通信ハブ 1 個, 通信用 dongle 1 個, レシーバ 3 個, トランスミッタ 1 個, POLHEMUS 社)で構成されている。表 3-2 に使用した PC の詳細を示す。この PC にコントローラおよび G4 通信用 dongle を USB で接続し, HMD を USB および HDMI で接続している。図 3-9 に正面から撮影したドライバーの足下のペダル周辺を示す。ドライバーの右足の親指, 踝および膝に MoCap レシーバを装着し, 位置(x, y, z)および姿勢(yaw, pitch, roll)を計測している。また, HMD を介して仮想交通環境の映像をドライバーに呈示することで, 両眼視差による奥行き知覚を再現している。図 3-10 にドライバーに呈示した映像を示す。車両の運転席に座ったドライバー視点の車内の様子と周囲の風景を呈示している。HMD の姿勢をセンサカメラでトラッキングしており, 顔を見たい方向に向けることでその方向の映像を呈示している。ドライバーはこのシミュレータを操作することで仮想空間上の車道を自由に走行することができる。なお, 本シミュレータで採用したペダルコントローラはアクセルとブレーキのペダルに段差が無いことに留意する必要がある。

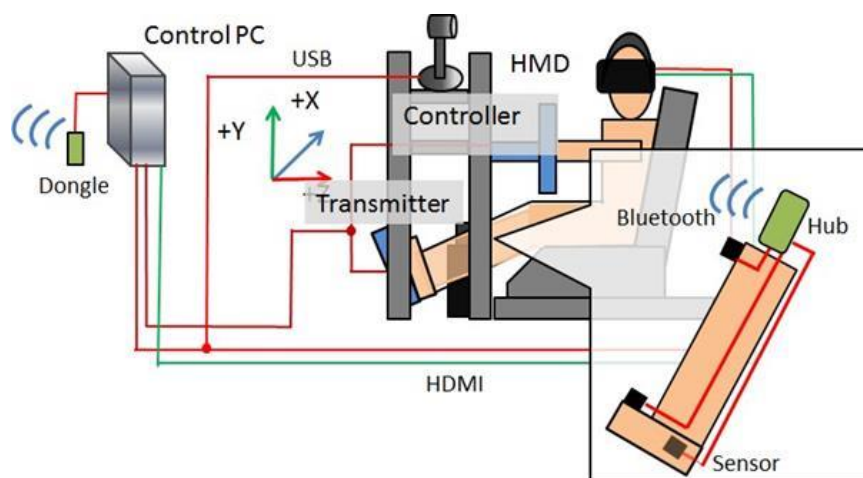


図 3-8 ドライビングシミュレータのシステム構成

表 3-2 PC の仕様

CPU	Intel 4core i7 6700 3.4GHz
メモリ	16GB (8GBx2) DDR4-2133
HDD	1TB
グラフィックボード	GeForce GTX 1070 8GB
OS	Windows10

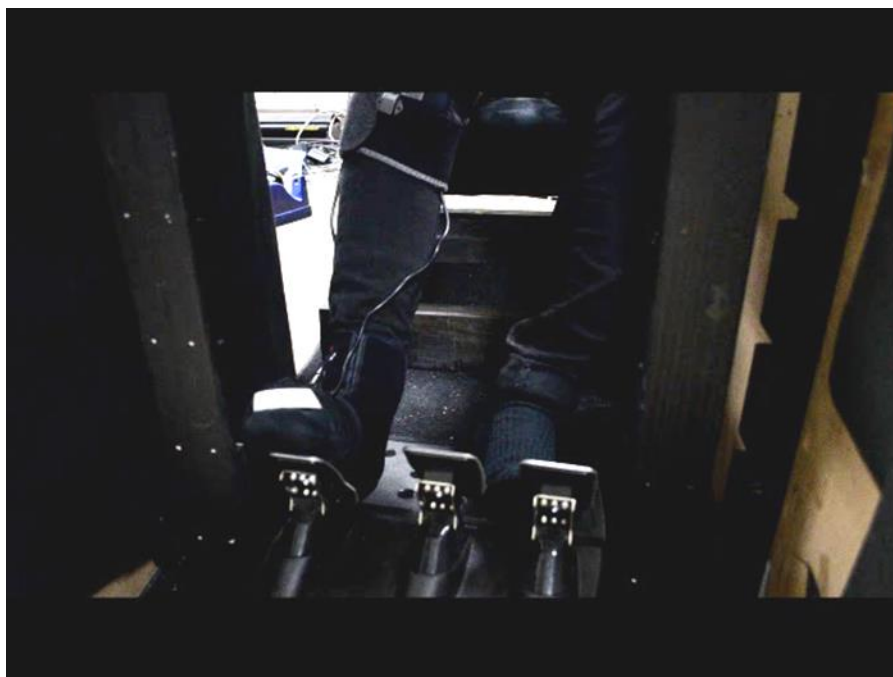


図 3-9 正面から撮影したドライバーの足下のペダル周辺



図 3-10 ドライバーに呈示した映像

3.2. 自転車運転シミュレータ

3.2.1. ハードウェア構成

3.2.1.1. 三次元位置姿勢計測装置「LIBERTY™」

自転車運転シミュレータで用いた三次元位置姿勢計測装置(LIBERTY™, POLHEMUS社)のハードウェア構成および性能について述べる^[23]. LIBERTY™は3.1.1.1で説明したG4™と同様の原理で動作する. 図3-11に本研究で使用したトランスミッタを示す. トランスミッタのサイズはL103.4×W103.4×H102.6mmである. トランスミッタの測定範囲は半径約900mmの半球状である. 図3-12にレシーバを示す. 先端コイル部のサイズはL23.0×W28.4×H15.2mmである. バンドにレシーバを固定することで頭, 腰および両膝に装着できるよう加工した. 表3-3に本システムの確度および分解能を示す. 位置の確度は0.76[mm], 分解能は0.0038[mm]である. 姿勢の確度は0.15[deg], 分解能は0.0012[deg]である.

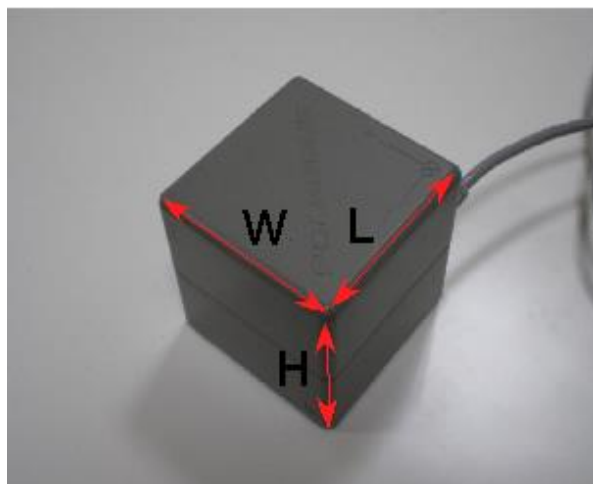


図 3-11 LIBERTY™のトランスミッタ

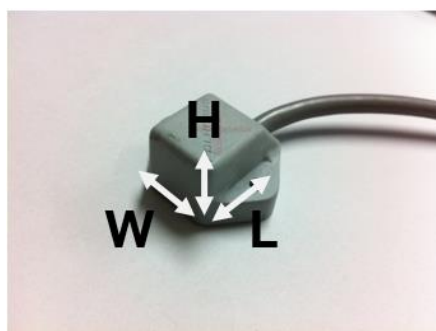


図 3-12 LIBERTY™ のレシーバ

表 3-3 LIBERTY™ の確度および分解能

	Position [mm]	Angle [deg]
Accuracy	0.76	0.15
Resolution	0.0038	0.0012

3.2.1.2. 映像呈示設備

本研究では、超単焦点プロジェクタ(PJ WX4152NI: RICOH)3 台および広視野角スクリーン[100 型(1,987(W)×1,490(H)mm)] (VL-S100E: NEC)3 枚を用いて映像を呈示した。図 3-13 にシミュレータ体験者とスクリーンの配置図を示す。L はスクリーンの幅である。右方スクリーンと前後スクリーンのなす角は 90deg である。

シミュレータ体験者の頭部の位置によって見える風景は変化する。本システムでは、頭部に装着したレシーバの情報を基に、リアルタイムでシミュレータ体験者の目の位置から見える映像を再現している。

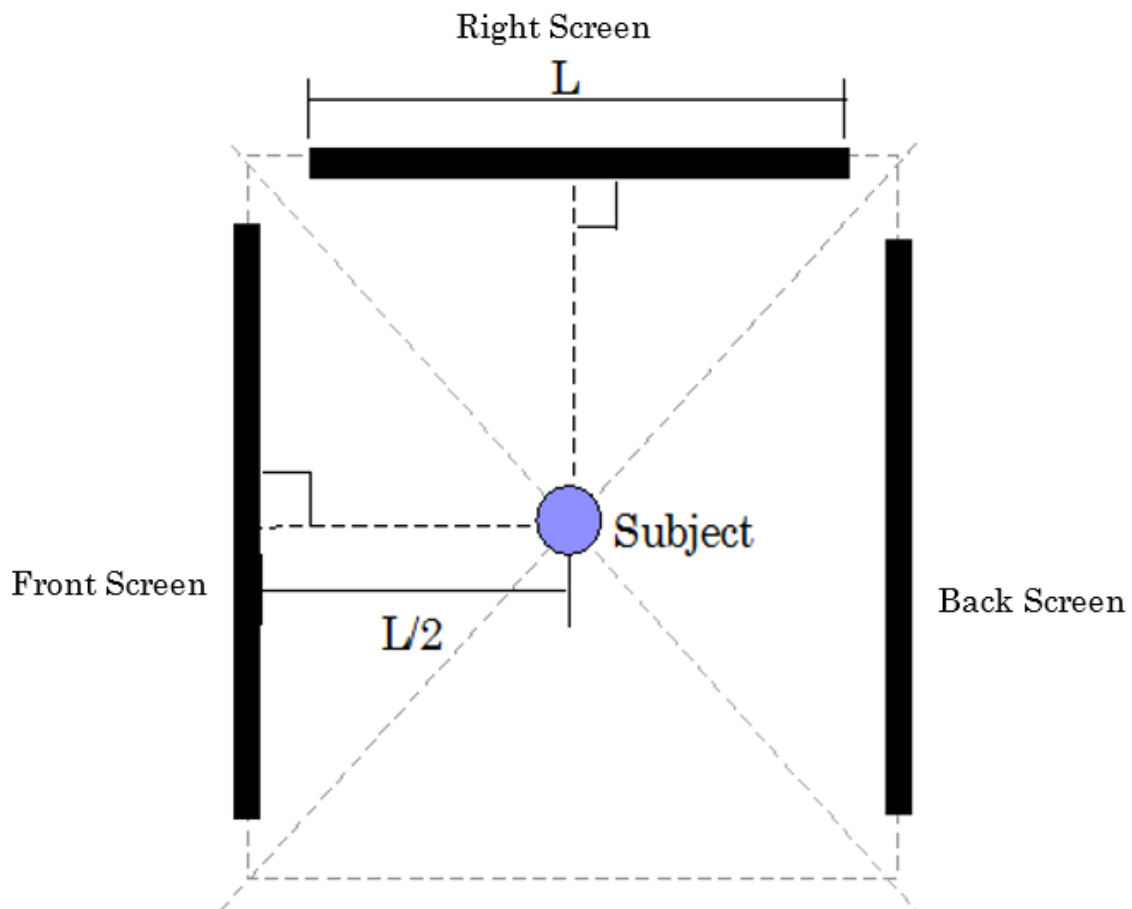


図 3-13 映像呈示用スクリーンの配置

3.2.1.3. 音響設備

自転車運転シミュレータでは，VR 空間上を走行する車両のエンジン音をフロント・リアスピーカ(TD510: fujitsu ten)4 台およびアンプ(TDA501 II: fujitsu ten)2 台で呈示した．

図 3-14 に音響機器を示す．同図(a)にスピーカを示し，同図(b)にアンプを示す．正面と背面にスピーカを 2 台ずつ，アンプを 1 台ずつ配置した．本検査システムで用いたスピーカの再生周波数帯域は 55～20,000Hz であり，環境音をより忠実に再現できる．図 3-15 にスピーカとスクリーンの配置図を示す．



(a) スピーカ



(b) アンプ

図 3-14 音響機器

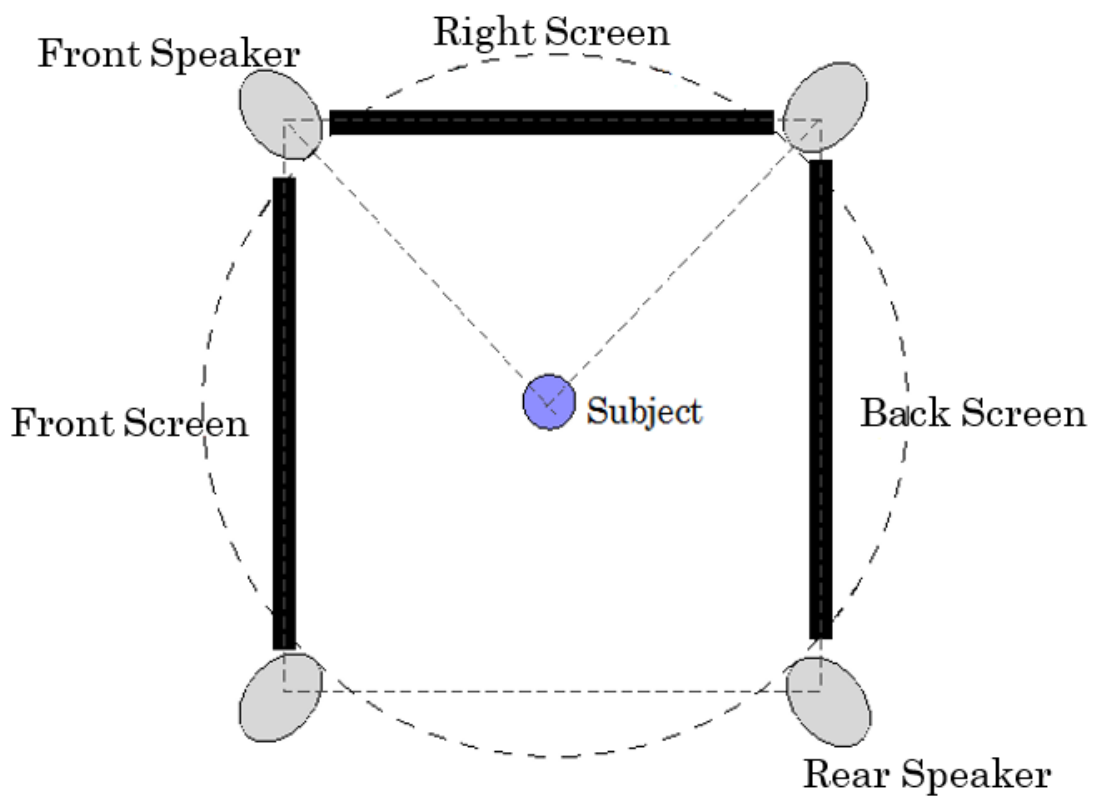


図 3-15 スピーカとスクリーンの位置

3.2.1.4. 圧力計測システム

図 3-16 に自転車に装着した圧力計測システムに使用した各種機器を示す。同図(a)に圧力センサの写真を示す。本研究で使用した圧力センサ圧縮型ロードセル(以後、ロードセル)で、自転車の後方下部の左右に装着されており、検査参加者の身体荷重を計測する。同図(b)にデジタル指示計(TD-700T: TEAC)の写真を示す。このデジタル指示計に圧力センサが接続されており、両圧力センサで計測した検査参加者の左右の荷重の変化を指示計より確認できる。同図(c)に AD 変換器(U3-LV: LABJACK)の写真を示す。圧力センサは、この AD 変換器を介してデジタル指示計に接続されており、左右の荷重値を計測している。

3.2.1.5. 自転車運転用入力インターフェース

図 3-17 に自転車ハンドル部に装着したレシーバの写真を示す。同図のように、ハンドルの回転軸の延長線上にレシーバを装着することで、ハンドルの回転を取得し、より現実に近い進行方向の変更が可能となった。レシーバの位置はハンドルから約 10cm 離しており、金属による影響を抑えている。

図 3-18 にブレーキの握りこみを取得する装置を示す。自転車ハンドル部の右手側にブレーキ用のブレーキレバーと可変抵抗器を装着した。ブレーキレバーの回転軸上に可変抵抗器を固定することでブレーキレバーの握りこみを取得可能とした。

図 3-19 にタイヤの回転を取得する方法を示す。赤箱は光電センサを示す。光電センサの前をタイヤのハブが通過するとパルス電圧が出力される。出力された電圧を 3.2.1.4 で紹介した AD 変換器を介してパソコンに取得している。光電センサの出力電圧は自転車の速度決定に用いており、ホイールの円周を L_{wheel} 、スポークの数を N_{spork} 、ギア比を R_{gear} 、通過したスポークの数を N_{post_spork} としたとき、自転車の速度 $Speed$ を式 3-1 で算出している。

$$Speed = \frac{L_{wheel} \cdot N_{post_spork} \cdot R_{gear}}{N_{spork} \cdot \Delta t} \quad \text{式 3-1}$$

$$L_{wheel} : 2.19\text{m}$$

$$N_{spork} : 21 \text{ 本}$$

$$R_{gear} : 1.6 / 3.25$$

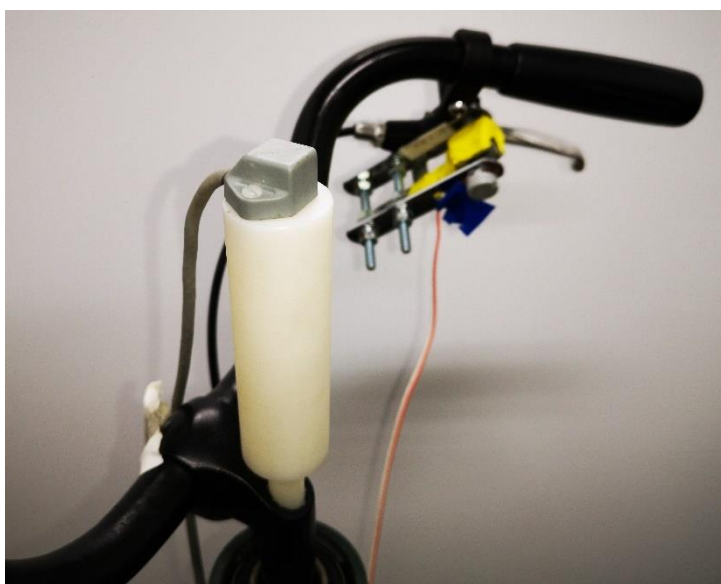


図 3-17 ハンドル部のレシーバ

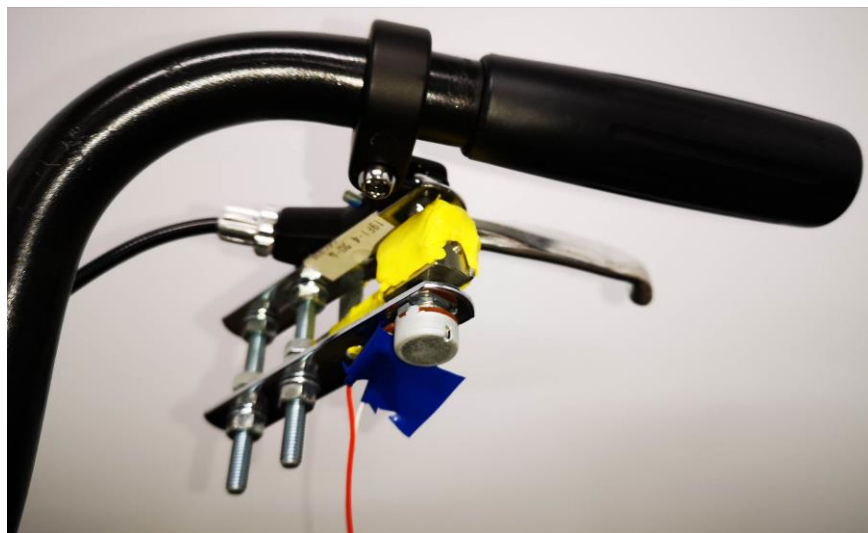


図 3-18 ブレーキ握りこみ取得装置

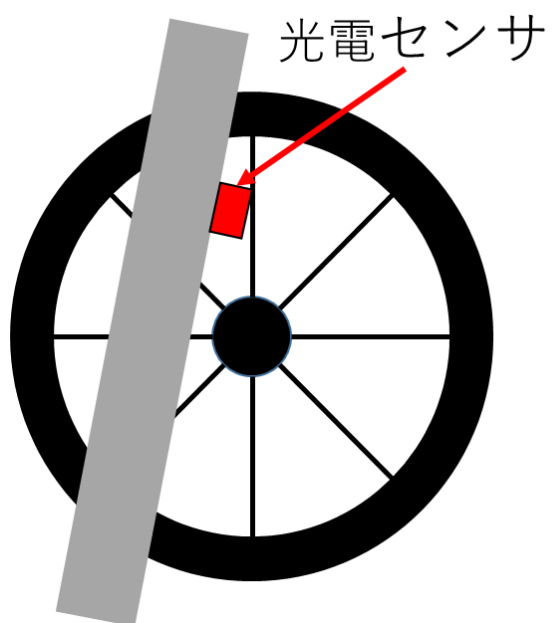


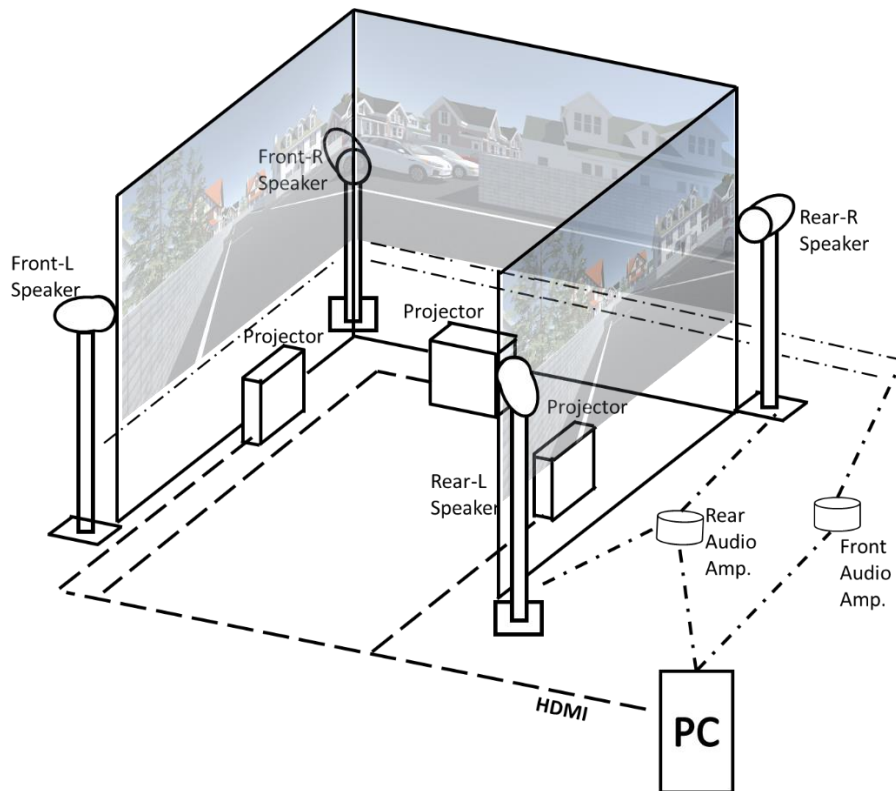
図 3-19 タイヤ回転取得方法

3.2.2. ソフトウェア構成

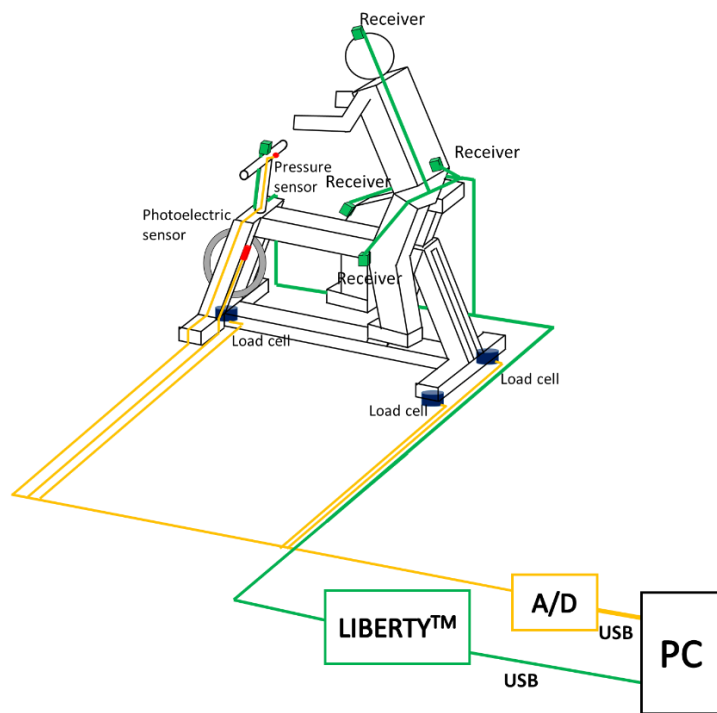
自転車運転シミュレータでは 3.1.2 で説明した Vizard5.0 と、VR アプリケーション向けの開発に対応した統合開発環境である Unity 2017.1.0(Unity Technologies 社)を開発環境とした。Unity は本来では高度な専門知識が必要とされる VR 空間の制作や物理演算の適用等を GUI から簡単に実装可能である。また、PC 向けや Android・IOS 等モバイル端末向けなど、複数のプラットフォームに対応している。Unity の VR 空間の座標系は左手座標系である。プログラミング言語は C#を用いた。

3.2.3. システム構成

図 3-20 に自転車運転シミュレータのシステム構成を示す。図 3-20 (a)に映像および音響呈示部を示し、図 3-20 (b)に自転車コントローラを示す。3 枚のスクリーン (100 inch) をコの字型に配置し、それぞれにプロジェクタで映像を投影する。自転車を 3 枚のスクリーンの中央に設置している。自転車の駆動輪は床から浮かせており、駆動輪にダイナモを装着して抵抗を与えている。自転車の車体は常に直立する様にフロントフォークとシートステーが 60mm×30mm 角のスチールフレームで左右に伸びた台座 (60mm×30mm×500mm)に固定されている。そのため、本研究で構築した自転車運転シミュレータは、車体が傾斜しない補助輪付きの自転車もしくは 3 輪の自転車の乗車体験に限定される。自転車運転シミュレータでは、走行車両のエンジン音を再現している。走行車両と検査参加者との距離に応じて音圧を調整しており、走行車両の移動に伴うドップラー効果も再現している。音源のスピーカを自転車の四方に設置しており、それぞれアンプに接続している。表 3-4 に使用したパソコンの仕様を示す。パソコンは、3 台のプロジェクタに接続されており、3 枚のスクリーンにそれぞれの方向の映像を投影している。図 3-21 に計測風景を示す。検査参加者は自転車に乗り、3 面のスクリーンに投影された映像を見ながら自転車を運転する。自転車のハンドル、検査参加者の頭部、腰部および両膝には、位置姿勢計測装置のレシーバを装着しており、装着した 5 箇所的位置(X, Y, Z の 3 軸)および姿勢(Yaw, Pitch, Roll)のデータを取得できる。また、自転車の車体を支える台座の左右両端部および前方中央部にロードセルを敷き、自転車の前後左右に作用する荷重を計測する。このロードセルはデジタル指示計に接続されており、検査参加者が自転車に加えた左右の荷重を両ロードセルで計測し、指示計、A/D 変換器を介してコンピュータで記録した。



(a) 映像および音響呈示部



(b) 自転車コントローラ部

図 3-20 自転車運転シミュレータのシステム概要

表 3-4 PC の仕様

CPU	Intel core i7 8700K 3.7GHz
メモリ	32GB (16GBx2)
HDD	1TB
グラフィックボード	GeForce GTX 1080
OS	Windows10 64bit



図 3-21 計測風景

3.3.3 章まとめ

本章では開発したドライビングシミュレータおよび自転車運転シミュレータのハードウェア構成要素, ソフトウェア構成要素およびシステム構成について説明した.

第4章 ドライバーの運転行動検査

本章では、3.1 で説明したドライビングシミュレータを用いた、運転行動検査について述べ、解析方法および結果を説明し交通事故誘発要因を考察する。

4.1. 本検査の狙い

本検査では高齢ドライバーのペダルワークに着目し、特に急ブレーキ時のペダルワークについて調査し、事故要因を明らかにすることを目的としている。そこで、前方に急に飛び出した歩行者に気づいて事故を回避する交通環境のシナリオを作成し、若年ドライバーおよび高齢ドライバーの行動を計測・解析することで高齢ドライバーの特徴の顕在化を目指す。

4.2. 実験方法

図 4-1 に本検査で設定した仮想交通環境を示す。本研究では、車両で片側 1 車線直線道路を 60km/h で走行中、歩行者の急な飛び出しを急ブレーキで回避するシナリオを想定している。本検査で設定した車道は長さ 300m の片側 1 車線直線道路である。車道の幅を 8m、各車線の幅員を 3.3m とした。左車線を走行し対向車線を車両が走行しないように運転する車両を設定した。自車両は 300m 進むと道路の初期位置(0m 地点)に戻り、計測終了までループする。時速 60 ± 3 km/h で車両を走行させていると、前方 40m に位置する電信柱の影からランダムに歩行者が飛び出す様にプログラムしている。電信柱はループして表示されるため、ドライバーは歩行者の出現位置を予想できない条件下で運転することになる。なお、歩行者は、左側路側帯の白線から 1m 左側にある電信柱の影から右側路側帯の白線を 1m 超えた位置まで、計 10m を 1m/s の歩行速度で 10 秒間かけて横断する。

本検査の検査参加者は初めに膝、踝およびつま先にレシーバ、頭部に HMD を装着した状態でドライビングシミュレータのシートに座る。そして、検査開始前にシミュレータの操作に慣れるために 5 分程練習し、十分に操作に慣れたら検査を開始する。本検査では、歩行者が対向車線側の路側帯に進入した時点で 1 回の計測を終了させている。これを一人あたり、10 試行計測した。5 セッション終了した時点で 5 分程度休憩した。

検査参加者には、「検査中は交通ルールを守り、60km/h で走行する」、「ヒトを轢かないようにブレーキを踏む」、「運転中はハンドルをあまり動かさないで、まっすぐ走行する」様に教示した。また、計測前に運転頻度について簡易アンケートにより調査した。

表 4-1 に検査参加者の年齢および性別を示す。本論文では「週 2 回以上運転している」人を「Normal Driver」、「週に 1 回以下」の人を「Paper Driver」と定義した。検査参加者は、21 歳から 23 歳の若年者 10 名(男性 7 名と女性 3 名、平均年齢 22.0 歳、標準偏差 0.8 歳)と 68 歳から 80 歳の高齢者 11 名(男性 6 名と女性 5 名、平均年齢 71.6 歳、標準偏差 3.5 歳)であり、全員が運転免許を保有している。日常的に運転している「Normal Driver」の割合は若年者 20%、高齢者 82%だった。

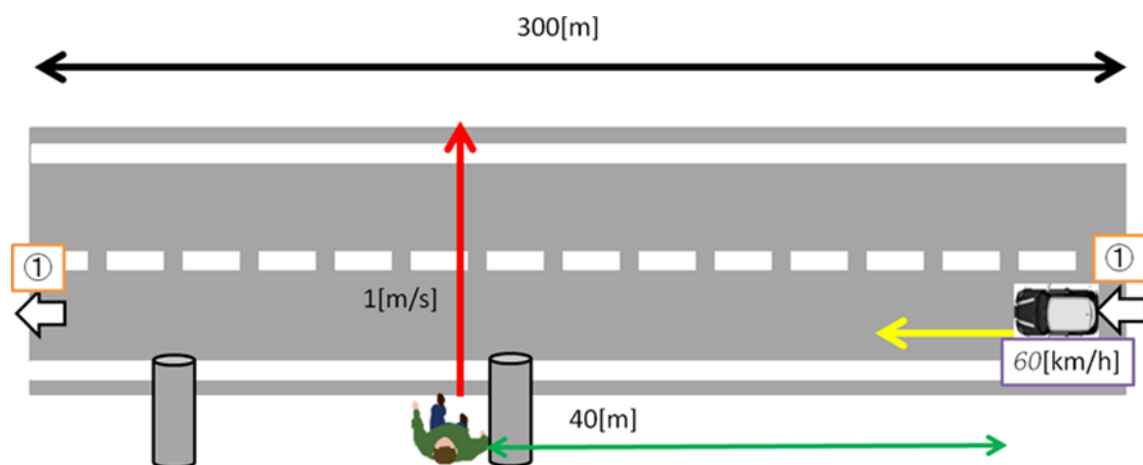


図 4-1 仮想交通環境の概要

表 4-1 ドライバーの運転行動検査の検査参加者詳細

Elder				Youth			
Subject	Age	Sex	DriverType	Subject	Age	Sex	DriverType
A	68	F	Normal	A	21	F	Paper
B	69	M	Normal	B	21	F	Normal
C	69	M	Normal	C	21	F	Paper
D	69	F	Normal	D	22	M	Paper
E	70	M	Normal	E	22	M	Paper
F	70	F	Paper	F	22	M	Paper
G	70	F	Paper	G	22	M	Paper
H	73	M	Normal	H	23	M	Paper
I	75	M	Normal	I	23	M	Normal
J	75	M	Normal	J	23	M	Paper
K	80	F	Normal				

4.3. 解析方法

本章ではドライバーの急ブレーキ時のペダルワークについて、ペダルコントローラの入力データおよびつま先に装着したセンサの取得データの解析方法について説明する。なお、本節の解析項目では **Brunner-Munzel** 検定により有意差を判定している。

4.3.1. 回避方法による分別

本計測では教示条件で操舵による歩行者回避を制限していない。そのため、急ブレーキ時のペダルワークを解析するために操舵により回避した試行とペダルワークにより回避した試行を大別する必要がある。そこで、操舵による回避試行をドライバーが運転する車両の車体が走行車線から半分以上はみ出した試行と定義し、ペダルワークによる回避試行と区別し全試行に占める割合を算出した。なお、以降の解析ではペダルワークによる回避試行のみを対象にした。

4.3.2. 歩行者の飛び出しからドライバーがブレーキを踏むまでの所要時間

歩行者の飛び出しからドライバーがブレーキを踏むまでに要した時間に着目し、「ペダルコントローラのブレーキが入力された時間」と「仮想空間で歩行者が車道に進入した時間」の差分として算出した。

4.3.3. 歩行者の飛び出しからドライバーがアクセルを離すまでの所要時間

ドライバーのブレーキ時のペダルワークを「アクセルから足を離す」、「ブレーキへ足を移す」および「ブレーキを踏み込む」の3つのプロセスに大別する。ここではアクセルから足を離す動作に着目し、歩行者が飛び出してからドライバーがアクセルを離すまでに要した時間を「ペダルコントローラのアクセルの入力が無くなった時間」と「仮想空間で歩行者が車道に進入した時間」の差分として算出した。

4.3.4. ドライバーがアクセルを離しブレーキを踏むまでの所要時間

ドライバーがブレーキに足を移す動作に着目し、ドライバーがアクセルから足を離してからブレーキを踏み始めるまでの時間を「ペダルコントローラのブレーキが入力された時間」と「ペダルコントローラのアクセルの入力が無くなった時間」の差分として算出した。

4.3.5. 歩行者の飛び出しから 10 秒間のドライバーの右足つま先の総軌跡長

急ブレーキ時のペダルワークでは、アクセルからブレーキにより速く正確に足を移し、力強くブレーキを踏み込む必要がある。さらに、最短で車両を停止させるためには、強い力でブレーキを踏み続ける必要がある。そのため、ドライバーの右足つま先の移動距離が短いほど最適化されたブレーキ操作であると考え、歩行者が車道に飛び出してから横断し終えるまで(10 秒間)のドライバーの右足つま先の総軌跡長を式 4-1 により算出した。

$$\text{Locomotion Length} = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \quad \text{式 4-1}$$

ここで、 x , y , z は右足つま先に装着したセンサの位置を示し、 i はフレームを示す。

4.4. 結果

4.4.1. 回避方法の割合

図 4-2 に年齢層における回避パターン(ブレーキによる回避試行と操舵による回避試行)の割合を示す。横軸は年齢層を示し、縦軸は各年齢層の全試行数に占める各パターンの割合を示す。凡例は橙色塗りつぶしがブレーキによる回避の無事故試行、橙色に斜線がブレーキによる回避の事故試行を示し、橙色塗りつぶしが操舵による回避の無事故試行、橙色に斜線が操舵による回避の事故試行を示す。同図より、若年者はブレーキによる回避の事故試行が 36%、無事故試行が 7%であり、操舵による回避の事故試行 7%、無事故試行が 50%であった。一方、高齢者はブレーキによる回避の事故試行が 41%、無事故試行が 19%であり、操舵による回避の事故試行 6.4%、無事故試行 33.6%であった。さらに、図 4-3 に回避パターン毎の事故発生率を示す。横軸は年齢層を示し、縦軸は各年齢層の各回避試行の全試行数に占める事故の有無の割合を示す。凡例は橙色塗りつぶしがブレーキによる回避の無事故試行、橙色に斜線がブレーキによる回避の事故試行を示し、橙色塗りつぶしが操舵による回避の無事故試行、橙色に斜線が操舵による回避の事故試行を示す。同図より、若年者のブレーキ回避試行中、事故試行が 83.7%、無事故試行が 16.3%を占め、操舵回避試行中、事故試行が 12.3%、無事故試行が 87.7%を占めた。一方、高齢者のブレーキ回避試行中、事故試行が 68.2%、無事故試行が 31.8%を占め、操舵回避試行中、事故試行が 15.9%、無事故試行が 84.1%を占めた。

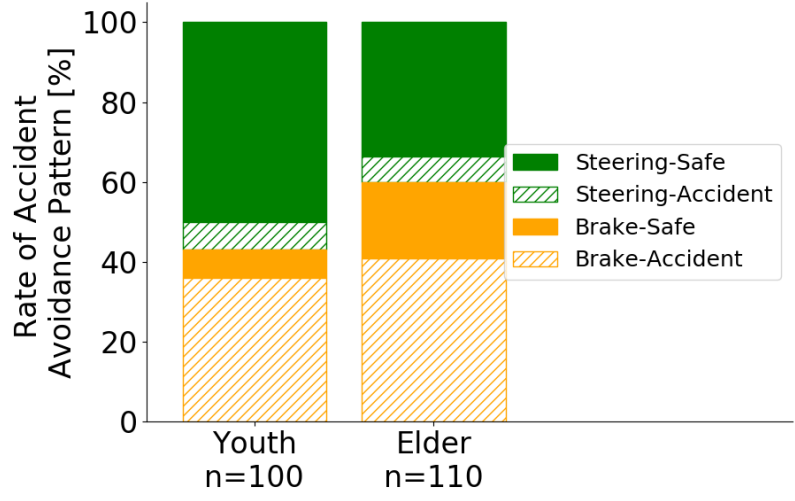


図 4-2 年齢別回避試行割合

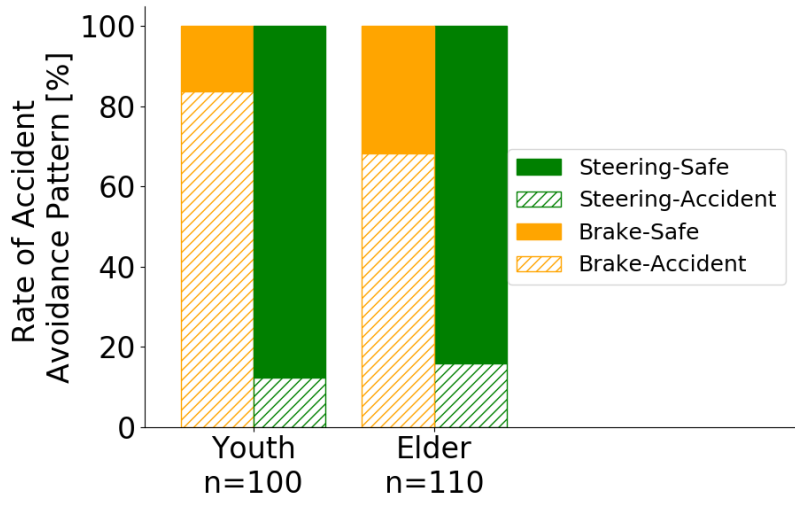


図 4-3 回避パターン毎の事故発生率

4.4.2. 歩行者の飛び出しからドライバーがブレーキを踏むまでの所要時間

図 4-4 に歩行者の飛び出しからドライバーがブレーキを踏むまでに要した時間を示す。縦軸が各試行におけるドライバーがアクセルを離しブレーキを踏むまでの所要時間を示し、横軸が検査参加者の年齢層および事故の有無を示す。同図より、若年者の無事故試行(Mean:0.51s, Std:0.08s, Min:0.43s, 25%:0.46s, 50%:0.47s, 75%:0.53s, Max:0.68s)は若年者の事故試行 (Mean:0.83s, Std:0.17s, Min:0.46s, 25%:0.72s, 50%:0.85s, 75%:0.96s, Max:1.17s)より有意に短い時間でブレーキに足を移していることがわかる($p<0.005$)。さらに、高齢者の無事故試行 (Mean:0.59s, Std:0.05s, Min:0.52s, 25%:0.56s, 50%:0.59s, 75%:0.63s, Max:0.68s)も高齢者の事故試行(Mean:0.73s, Std:0.16s, Min:0.56s, 25%:0.62s, 50%:0.68s, 75%:0.79s, Max:1.38s)より有意に短い時間でブレーキに足を移していた($p<0.005$)。また、高齢者の事故試行は若年者の事故試行に比べ有意に短い時間でアクセルから足を離していた($p<0.005$)。一方、高齢者の無事故試行と若年者の無事故試行では有意な差は生じなかった。

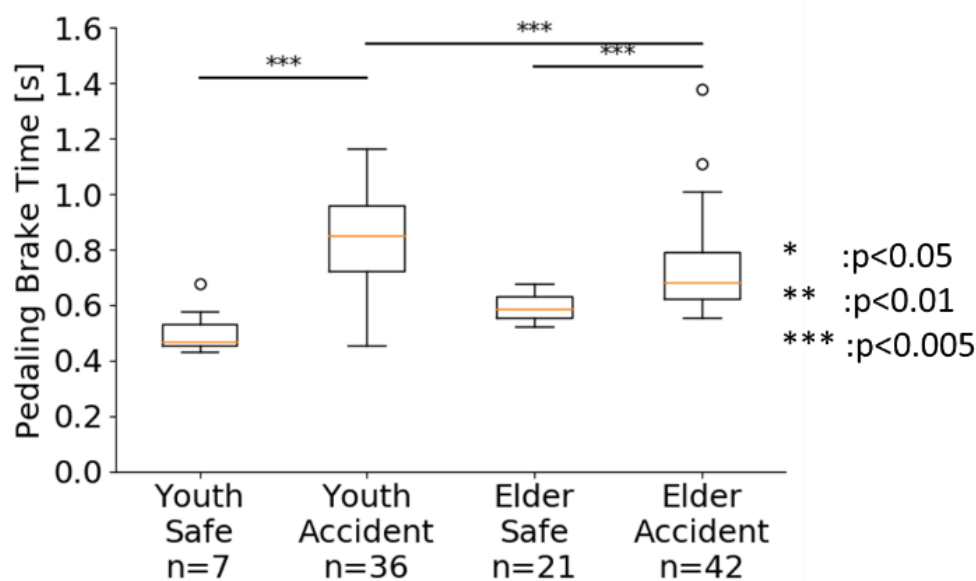


図 4-4 歩行者の飛び出しからドライバーがブレーキを踏むまでの所要時間

4.4.3. 歩行者の飛び出しからドライバーがアクセルを離すまでの所要時間

図 4-5 に歩行者の飛び出しからドライバーがアクセルを離すまでに要した時間を示す。縦軸が各試行における歩行者の飛び出しからドライバーがアクセルを離すまでの所要時間を示し、横軸が年齢層および事故の有無を示す。同図より、若年者の無事故試行 (Mean:0.34s, Std:0.05s, Min:0.29s, 25%:0.3s, 50%:0.33s, 75%:0.37s, Max:0.44s)は事故試行 (Mean:0.52s, Std:0.13s, Min:0.31s, 25%:0.44s, 50%:0.5s, 75%:0.57s, Max:0.92s)に比べ、有意に短い時間でアクセルから足を離していたことがわかる($p<0.005$)。さらに、高齢者の無事故試行 (Mean:0.41s, Std:0.04s, Min:0.35s, 25%:0.38s, 50%:0.41s, 75%:0.43s, Max:0.51s)も事故試行 (Mean:0.51s, Std:0.15s, Min:0.33s, 25%:0.41s, 50%:0.47s, 75%:0.59s, Max:1.07s)に比べ、有意に短い時間でアクセルから足を離していた($p<0.005$)。また、若年者の無事故試行は高齢者の無事故試行に比べ有意に短い時間でアクセルから足を離していた($p<0.05$)。一方、高齢者の事故試行と若年者の事故試行に有意な差は生じなかった。

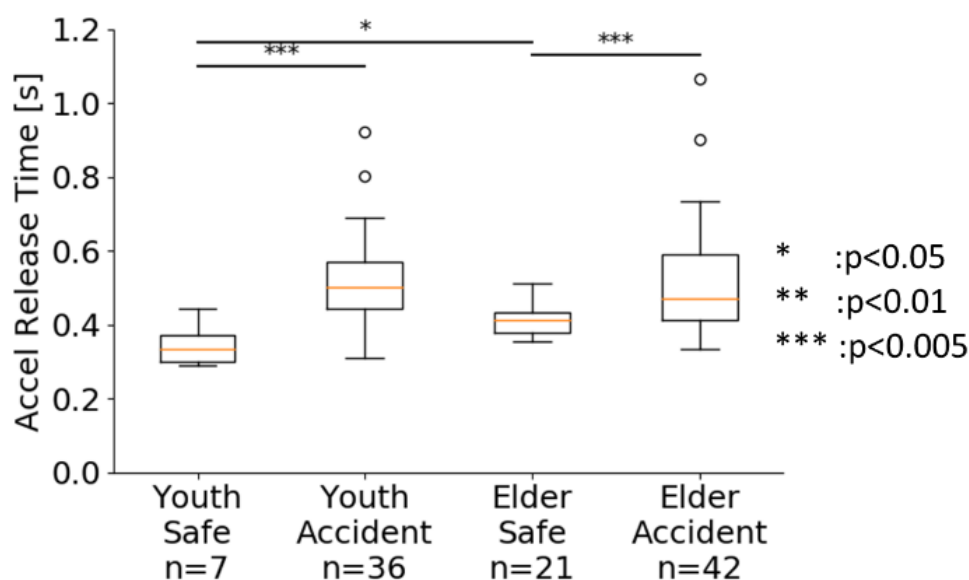


図 4-5 歩行者の飛び出しからドライバーがアクセルを離すまでの所要時間

4.4.4. ドライバーがアクセルを離しブレーキを踏むまでの所要時間

図 4-6 にドライバーがアクセルを離しブレーキを踏むまでに要した時間を示す。縦軸が各試行におけるドライバーがアクセルを離しブレーキを踏むまでの所要時間を示し、横軸が検査参加者の年齢層および事故の有無を示す。同図より、若年者の無事故試行 (Mean:0.16s, Std:0.05s, Min:0.13s, 25%:0.14s, 50%:0.14s, 75%:0.16s, Max:0.28s)は若年者の事故試行(Mean:0.31s, Std:0.12s, Min:0.14s, 25%:0.23s, 50%:0.26s, 75%:0.39s, Max:0.58s)より有意に短い時間でブレーキに足を移していることがわかる($p<0.005$)。さらに、高齢者の無事故試行 (Mean:0.18s, Std:0.03s, Min:0.14s, 25%:0.16s, 50%:0.17s, 75%:0.19s, Max:0.24s)も高齢者の事故試行 (Mean:0.22s, Std:0.04s, Min:0.16s, 25%:0.19s, 50%:0.21s, 75%:0.23s, Max:0.31s)より有意に短い時間でブレーキに足を移していた($p<0.005$)。また、高齢者の事故試行は若年者の事故試行に比べ有意に短い時間でアクセルから足を離していた($p<0.005$)。一方、高齢者の無事故試行と若年者の無事故試行では有意な差は生じなかった。

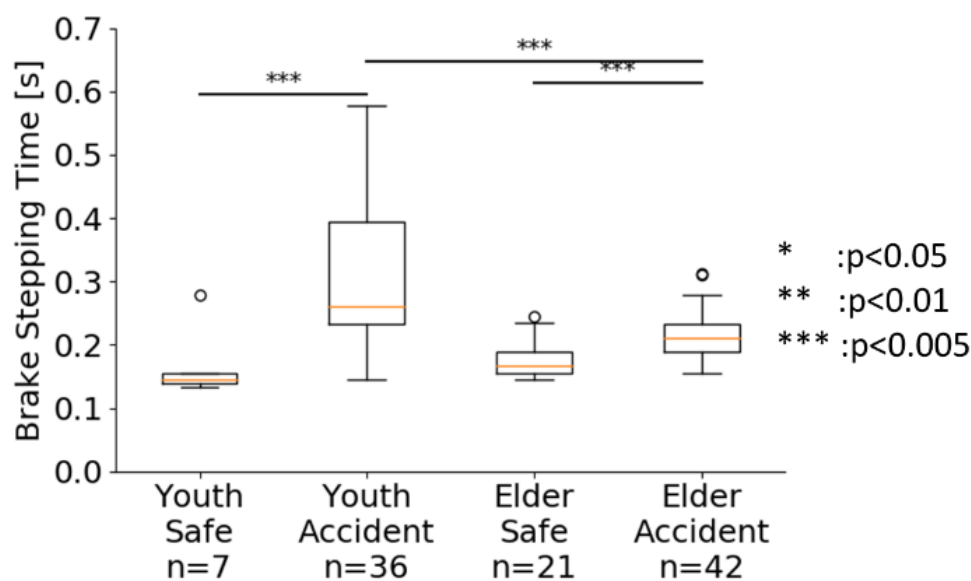


図 4-6 ドライバーがアクセルを離しブレーキを踏むまでに要した時間

4.4.5. 歩行者の飛び出しから 10 秒間のドライバーの右足つま先の総軌跡長

図 4-7 につま先に装着したレシーバの総軌跡長(歩行者の飛び出しから 10 秒間)を示す。縦軸が総軌跡長を示し、横軸が検査参加者の年齢層および事故の有無を示す。同図より、若年者の無事故試行(Mean:0.27m, Std:0.03m, Min:0.21m, 25%:0.26m, 50%:0.27m, 75%:0.28m, Max:0.32m)は高齢者の無事故試行 (Mean:0.49m, Std:0.2m, Min:0.26m, 25%:0.34m, 50%:0.42m, 75%:0.58m, Max:1.03m) より有意に短いことがわかった。さらに、若年者の事故試行 (Mean:0.3m, Std:0.07m, Min:0.19m, 25%:0.26m, 50%:0.28m, 75%:0.35m, Max:0.55m)は高齢者の事故試行 (Mean:0.5m, Std:0.2m, Min:0.19m, 25%:0.39m, 50%:0.49m, 75%:0.58m, Max:1.14m) より有意に短いことがわかった。一方、若年者および高齢者共に事故の有無では有意な差は生じなかった。

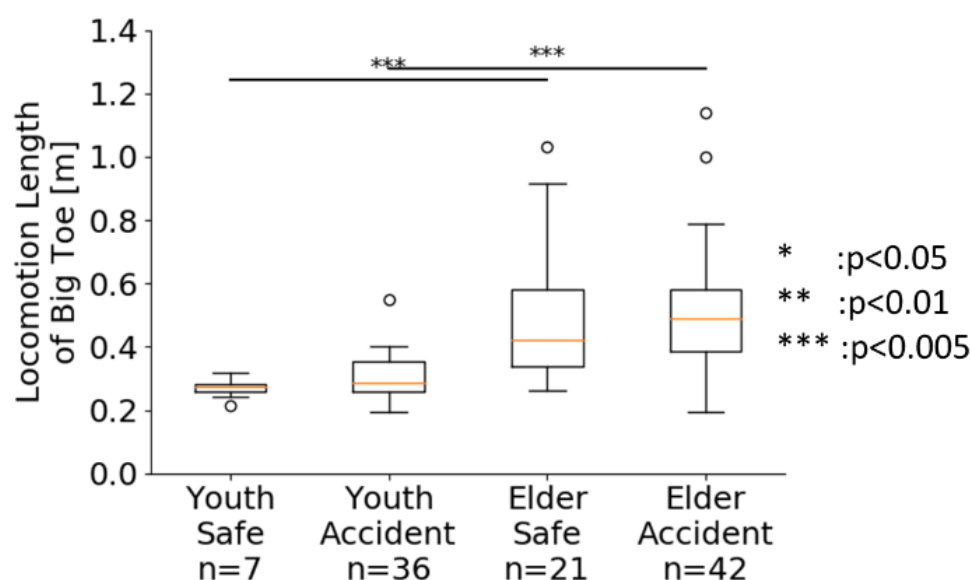


図 4-7 歩行者の飛び出しから 10 秒間のつま先に装着したレシーバの総軌跡長

4.5. 考察

今回の計測ではペダルの踏み間違いが発生しなかった。ペダルの踏み間違い事故を年齢別に見ると 75 歳以上の後期高齢者に多いことがわかっている^[4]。検査参加者の内、後期高齢者は 3 名でありデータ数が少ないことが要因の一つと考える。さらに、ペダルの踏面に段差が無いオルガン型のペダルコントローラを採用したこともペダルの踏み間違いが発生しなかった要因であると考えられる。

図 4-2 より、本検査条件では、ブレーキによる回避が操舵による回避より交通事故発生率が高齢者は若年者より 17%多くブレーキ回避を選択した。さらに、図 4-3 より、ブレーキによる回避が操舵による回避より交通事故発生率が若年者で 6.8 倍、高齢者で 4.3 倍高いことがわかった。計測時の検査参加者の様子を観察したところ、高齢者は急ブレーキ時にハンドルを強く握り体を固める傾向があることを確認した。高齢者はこれによりスムーズな操舵ができないためにブレーキ回避を選択する割合が増加したと考える。さらに、高齢者および若年者はブレーキ回避よりも操舵回避を選択した方が事故発生率は低い。そのため、高齢者は若年者に比べ、歩行者の急な飛び出しに対する回避判断が不適切であり、事故リスクが上昇していると考えられる。

図 4-4 より、無事故試行においては、「歩行者が飛び出してからブレーキを踏むまでの時間」に、年齢による有意差は生じなかった。しかしながら、図 4-5 の「歩行者が飛び出してからアクセルから足を離す時間」に限定すると、若年者に比べ高齢者で有意に長期化することを明らかにした。この特徴は、過去の研究において高齢者の判断力および下肢筋力の低下の報告と矛盾しない^{[24][25][26][27]}。一方、図 4-6 より、無事故試行における「アクセルからブレーキに足を移す時間」に、年齢による有意差は生じなかった。つまり、このプロセスでは筋力や判断に係る要因が影響していないといえる。しかしながら、通常の自動車のペダルと異なり、本実験で採用したブレーキペダルとアクセルペダルは踏み面の高さが揃っており、本実験特有の実験条件が影響した可能性は否定できない。また、若年者と高齢者に共通する特徴として、無事故試行と比べ事故試行で「歩行者が飛び出してからブレーキを踏むまでの時間」、「アクセルから足を離す時間」および「アクセルからブレーキに足を移す時間」が有意に長いことがわかった。事故試行では、歩行者の横断に早い段階で気づけなかったり、回避方法を操舵かブレーキで迷ったりすることでアクセルから足を離すのが遅れてしまい、事故リスクが上昇していると考えた。なお、「アクセルからブレーキに足を移す時間」で若年者の事故試行の四分位範囲が広いことがわかる。これは、若年検査参加者 B が「アクセルからブレーキに足を移す時間」の上位 9 試行を占めていることが要因であったが、若年検査参加者 B を除外し比較しても若年者が高齢者よりも時間を要している傾向は同様だった。

図 4-7 より、高齢者は若年者より歩行者飛び出しから試行終了までのドライバーの右足つま先の総軌跡長が長い。これは、加齢に伴う下肢筋力の低下により、ブレーキペダ

ル踏力に対して踏み込む力が安定しないこと、アクセルからブレーキへ最短で足を移動できていない等が要因であると考ええる。

4.6.4 章まとめ

本章では高齢ドライバーの急ブレーキ時のペダルワークの特徴の顕在化を目的として、前方に急に飛び出した歩行者に気づいて事故を回避する際のドライバーの行動を計測し、若年者と高齢者のペダルワークの差異を調査した。3.1 で説明したドライビングシミュレータを用いて、前方に急に飛び出した歩行者に気付いて事故を回避する交通環境の条件で高齢者および若年者を対象として検査した。さらに、解析項目および解析方法を考案した。実験および解析の結果、高齢者は若年者に比べ、操舵による回避よりもブレーキによる回避を選択する傾向にあることを明らかにした。さらに、高齢者は急ブレーキ時のペダルワークが有意に遅く、ブレーキの踏み込みも安定しないことを明らかにした。

第5章 自転車乗員の運転行動検査

5.1. 片側一車線直線道路における右折横断

本節では、3.2 で説明した自転車運転シミュレータを用いた、片側一車線直線道路における右折横断検査について述べ、解析方法および結果を説明し、交通事故誘発要因を考察する。

5.1.1. 本検査の狙い

本検査では危険なタイミングで車道に進入してしまう人に共通する横断の特徴を抽出し、交通事故誘発要因を明らかにすることを目指す。さらに、車両と衝突した試行における事故発生地点と衝突角度を解析することで衝突シミュレーションにおける指標の作成を目指す。

5.1.2. 検査方法

本検査では、3.2 で説明した自転車運転シミュレータを用いて車道横断時の行動を計測した。VR 空間に構築した交通環境を図 5-1 に示す。図中の①は左側路側帯を示す。検査開始時には左側路側帯に車道と並行した状態で自転車が出現する。図中の②は左車線(以後、手前車線と呼ぶ)を示し、③は右車線(以後、奥車線と呼ぶ)を示し、④は右側路側帯を示す。各車線の幅員は 3.3m であり、左側路側帯の自転車の出現位置から右側路側帯(横断を完了したと判定する検査終了位置)までは 8m に設定している。また、車道には横断歩道および自転車横断帯は存在しない。そして、速度標識のない郊外の公道を想定し、手前車線(検査参加者から見て後方から前方に車が走行)および奥車線(検査参加者から見て前方から後方に車が走行)に 60km/h で車両を走行させた。また、図 5-2 に本検査の実験条件を示す。本検査では同じ車線を走行している隣り合った前後の車両の間の距離を車間距離とし、3 種類の車間距離 (60m, 100m, 140m) をランダムな順に設定した。

検査参加者の操作する自転車は、車道の左側路側帯(図 5-1 の①)からスタートし、手前車線(図 5-1 の②)を走行する車両と同方向に走行する向きに設置されている。検査参加者には、後方から接近し追い越していく車両と並進した状態で自転車を進め、車道を横断できると思ったタイミングでハンドルを切って右折し、右側路側帯(図 5-1 の④)まで一気に車道を横断するように教示した。検査参加者が右側路側帯(図 5-1 の④)に到達すると 1 試行の検査が終了する。なお、検査参加者 1 人あたりの横断回数を 10 試行とした。



図 5-1 VR 空間に構築した交通環境

①左側路側帯, ②左車線(手前車線), ③右車線(奥車線), ④右側路側帯

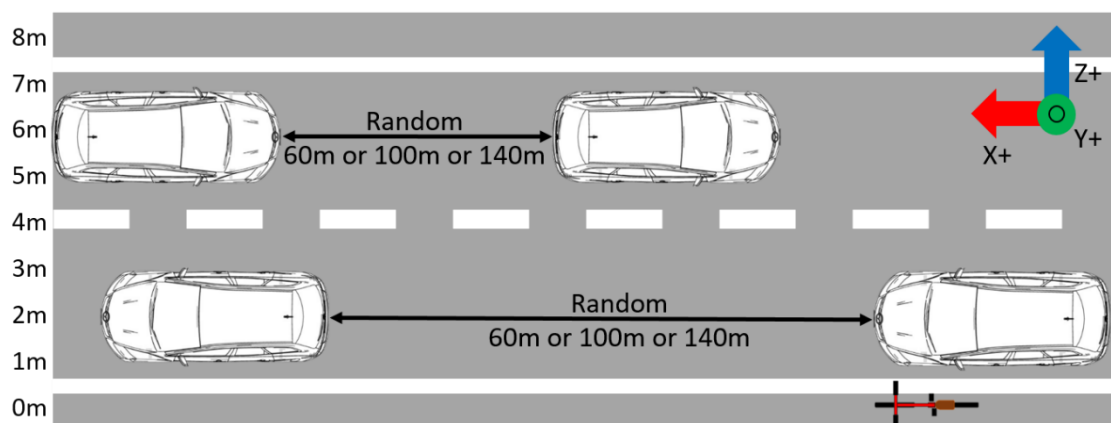


図 5-2 検査条件

5.1.3. 検査参加者

表 5-1 に検査参加者の年齢, 性別および自転車の利用状況を示す. 本検査は高齢者 18 名(男性 10 名, 女性 8 名), 若年者 15(男性 10 名, 女性 5 名)を対象とした. なお, 本検査は秋田大学手形地区におけるヒトを対象とした研究に関する倫理規定第 6 条第 2 項に基づいた倫理審査の上, 秋田大学倫理審査委員会の承認を得て実施した.

表 5-1 片側一車線直線道路横断検査の検査参加者詳細

Elder				Youth			
Subject	Age	Sex	Bicycle Usage	Subject	Age	Sex	Bicycle Usage
A	66	F	little to none	A	18	F	little to none
B	68	F	almost everyday	B	18	F	almost everyday
C	68	M	little to none	C	18	F	a few times a week
D	68	F	a few times a month	D	19	F	almost everyday
E	68	F	little to none	E	19	F	almost everyday
F	69	F	a few times a year	F	21	M	almost everyday
G	70	F	almost everyday	G	21	M	almost everyday
H	70	M	a few times a month	H	21	M	almost everyday
I	71	F	almost everyday	I	21	M	almost everyday
J	71	M	a few times a year	J	21	M	little to none
K	72	M	little to none	K	21	M	almost everyday
L	72	M	little to none	L	22	M	little to none
M	72	M	little to none	M	22	M	almost everyday
N	72	F	little to none	N	23	M	almost everyday
O	73	M	a few times a week	O	28	M	little to none
P	74	M	a few times a week				
Q	74	M	almost everyday				
R	74	M	a few times a month				

5.1.4. 教示条件

図 5-3 に本検査の教示条件を示す。また、口頭で「検査を開始前に、自転車に乗った状態でハンドルをまっすぐ握り、画面中央の赤点をまっすぐ見て待機する」、「渡れると思ったタイミングが無ければその試行の横断をあきらめても良い」と教示した。なお、横断をあきらめた場合は新たに1試行加えて計測した。

図 5-3 教示条件

5.1.5. 解析方法

5.1.5.1. 比較対象の分類

事故に2回以上遭った高齢検査参加者を「高リスク群(High Risk Group)」, 2回未満の高齢検査参加者を「低リスク群(Low Risk Group)」, 若年検査参加者を「若年者群(Youth Group)」に分類し比較した。なお, 検査参加者の分類において, 10試行の内1回事故が発生するのは偶然である可能性を考慮し, 「事故に2回遭っているかどうか」を分類の閾値にした。検査参加者3群に分類することで, 潜在的に交通事故誘発リスクが高い横断をしている人の特徴を抽出できると考える。

5.1.5.2. 交通事故発生率

手前車線事故発生率を全検査件数(高齢者180件, 若年者150件)に占める手前車線事故発生件数の割合, 奥車線事故発生率を全検査件数から手前車線事故発生回数を除いた総数に占める奥車線事故発生件数の割合として算出した。

5.1.5.3. 車両衝突地点および衝突角度

自転車運転時の事故状況を明らかにするため, 車両と衝突した地点とそのときの自転車の向きを解析した。

5.1.5.4. 横断経路偏差

横断経路を解析するために, 車道上のどの位置を通過したら「横断開始」と判定するかを定義する。図5-4に「横断開始」とする車道上の位置を示す。本論文では, Z軸上0mを自転車の初期生成位置としたとき, 「横断開始」をZ軸+0.7mを超えて車道に進入したときと定義した。0.7mを超えて走行した経路を横断経路とし, 検査参加者毎に全試行を解析した。図5-5に10試行分の横断経路の一例を示す。同図(a)に若年検査参加者Eの一例を示し, 同図(b)に高齢検査参加者Eの一例を示す。縦軸がZ軸位置を示し, 横軸がX軸位置を示す。同図(a)と同図(b)を比べ, 高齢検査参加者の横断経路は若年検査参加者よりばらつきが大きいと仮説を立て, 5.1.5.1で定義した分類により大別された各群の横断経路の標準偏差をSteel-Dwass検定により群間比較した。

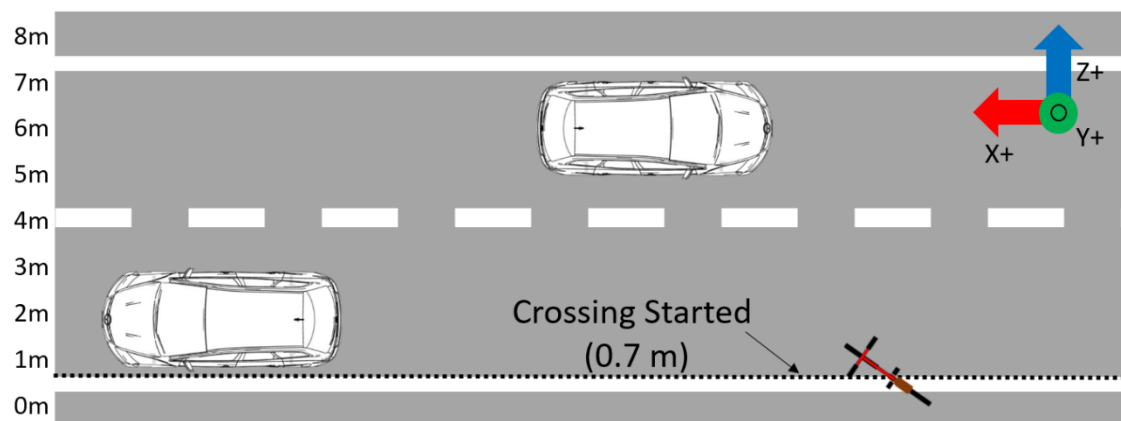
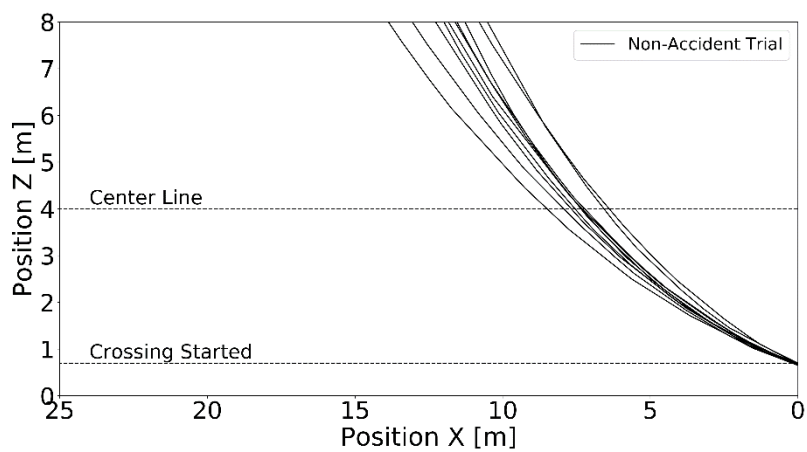
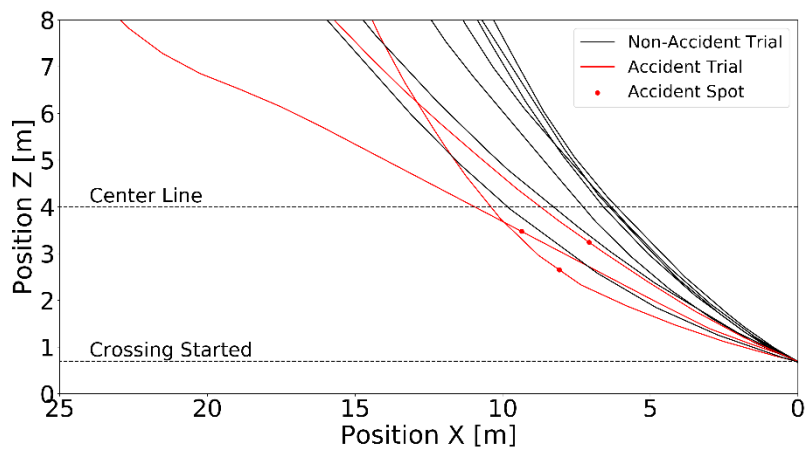


図 5-4 横断開始とする条件



(a) 若年検査参加者 E



(b) 高齢検査参加者 E

図 5-5 横断経路の例

5.1.5.5. 車道進入前の最終後方確認の所要時間

車道横断において、車道に進入する以前の、最後の後方確認行動が最も重要な行動であると考え、最後の後方確認行動に費やした時間に着目した。人が頭部を固定して両眼を動かして中心視の範囲に収めることができるのは水平方向で 44 度である^[28]。本稿では、自転車の正面方向を 0deg とし、90deg 以上後方に振り向いたときを後方確認とするため、頭を垂直軸（Z 軸）周りに 45deg より大きく回転させる動作を後方確認動作と定義した。「最終後方確認の平均所要時間」は、検査参加者が左側路側帯直進時における最後の後方確認動作に要した時間を示す。ここでは、車道に進入する前の最後の後方確認に要した時間を各試行の計測データの時間情報から求め、個人の 10 試行分の平均所要時間を算出し、分類した検査参加者群の基本統計量を算出し、Steel-Dwass 検定により群間比較した。

5.1.5.6. 最終後方確認から車道に進入するまでの所要時間

最終後方確認を終えてから車道に進入するまでの間にも交通状況は変化する。ここに時間を費やすと最終後方確認で得られた「最接近車両相対距離」という手がかりが信用できないものに変化してしまうと考えた。「最終後方確認から車道に進入するまでの所要時間」は、検査参加者が左側路側帯直進時に、最後に後方を確認し終えた時(頭の垂直軸周りの角度が 45deg 以下になった瞬間)から、手前車線に進入した時まで(要した時間を示す。ここでは、車道に進入する前の最終後方確認を終えてから車道に進入するまでに要した時間を各試行の計測データの時間情報から求め、個人の 10 試行分の平均所要時間を算出し、分類した検査参加者群の基本統計量を算出し、Steel-Dwass 検定により群間比較した。なお、後方を確認しながら車道に進入した場合は 0 秒となる。

5.1.6. 結果

5.1.6.1. 交通事故発生率および事故件数

図 5-6 に車線別事故発生率を示す。縦軸に割合を示し、横軸に年齢を示す。凡例は赤が手前車線、橙が奥車線を示す。同図より、高齢自転車乗員は手前車線で 15%(全 180 試行中 27 試行)、奥車線で 2.0%(手前車線事故試行を除く全 153 試行中 3 試行)事故に遭っていた。一方、若年自転車乗員は手前車線・奥車線共に事故に遭わなかった。

表 5-2 に各検査参加者の各車線における車両との衝突回数を示す。同表(a)に高齢検査参加者と示し、同表(b)に若年検査参加者を示す。同表より、手前車線を走行する車両と衝突した回数が 2 回以上の高齢検査参加者は 8 名(同表赤字)、1 回以下の高齢検査参加者は 10 名(同表緑字)であることがわかった。

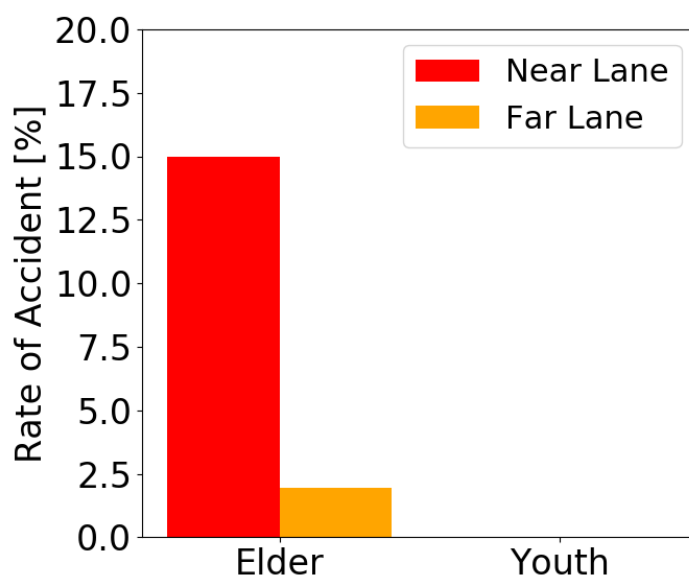


図 5-6 車線別交通事故発生率

表 5-2 各検査参加者の各車線における車両との衝突回数

(a) Elder

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Near Line	4	2	2	2	3	1	1	0	2	4	2	0	1	1	1	0	0	1
Far Line	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0

(b) Youth

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Near Line	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Far Line	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5.1.6.2. 車両衝突地点および衝突角度

図 5-7 に自転車が車両と衝突した地点とそのときの向きを示す。縦軸は Z 軸位置を示し、横軸は X 軸位置を示す。矢印が衝突時の自転車の角度を示し、矢印の根元の赤点が衝突位置を示す。衝突時の自転車の向きは Mean:20.6deg, Std:12.2deg と小さい角度で通行していたことがわかった。さらに、図 5-8 に車道の Z 軸方向における交通事故発生地点のヒストグラム(0.825m 幅)と各地点の衝突時の自転車の平均角度を示す。横軸が車道の Z 軸位置を示し、主軸(青棒グラフ)が正規化した事故発生回数の度数分布、副軸(赤点)が衝突時の自転車の角度を示す。赤線は副軸データの回帰直線を示す。なお、同図横軸の Z 軸位置は図 5-7 の Crossing Started を 0m とし、車道の幅員 6.6m までとした。同図より、車線上 Z 軸位置が奥車線に進むほど衝突時の自転車の角度が車道に対し大きくなっていることがわかる。事故発生地点の Z 軸位置と衝突角度を最小二乗法により一次式にフィッティングすると、線形式 $y = -5.1x - 12.3$ および決定係数 $R^2 = 0.41$ が得られた。なお、図 5-6 からわかるように奥車線での交通事故発生率が低く件数が少ないため、手前車線のみに関係式を適用するべきであることに留意する必要がある。

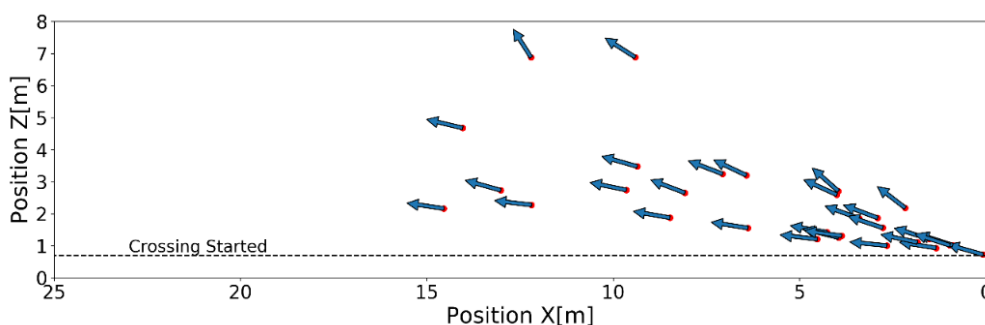


図 5-7 交通事故発生地点および衝突角度

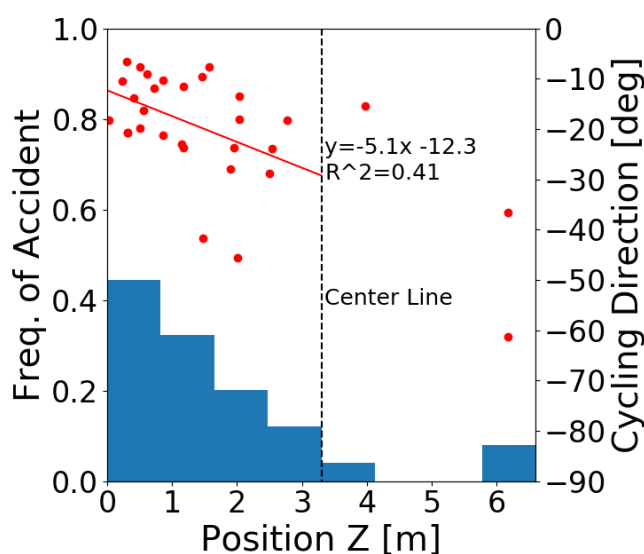


図 5-8 交通事故発生地点の Z 軸成分における度数分布および衝突時の自転車の角度

5.1.6.3. 横断経路偏差

図 5-9 に各群における自転車が車道の 4m 地点を通過したときの X 軸方向の標準偏差を示す。縦軸は標準偏差を示し、横軸は群を示す。各群を比較したところ、高リスク群(Mean: 3.43m, Std: 1.97m, Min: 0.86m, 25%: 2.17m, 50%: 3.05m, 75%: 4.42m, Max: 6.82m), 低リスク群 (Mean: 2.49m, Std: 1.32m, Min: 1.10m, 25%: 1.52m, 50%: 2.33m, 75%: 2.96m, Max: 5.53m)共に若年者群 (Mean: 1.33m, Std: 0.98m, Min: 0.47m, 25%: 0.64m, 50%: 0.97m, 75%: 1.58m, Max: 3.90m)より有意に大きい($p<0.05$).

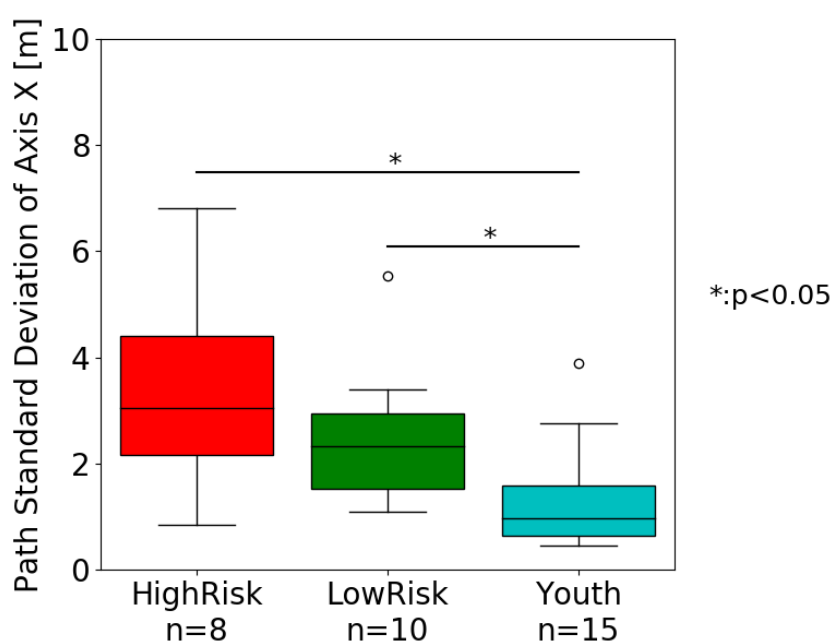


図 5-9 各群における横断経路偏差

5.1.6.4. 車道進入前の最終後方確認の所要時間

図 5-10 に最終後方確認の所要時間を示す。横軸に検査参加者群を示し、縦軸に所要時間を示す。同図より、高リスク群 (Mean:0.7s, Std:0.2s, Min:0.4s, 25%:0.6s, 50%:0.7s, 75%:0.8s, Max:1.1s) は若年者群 (Mean:0.9s, Std:0.2s, Min:0.6s, 25%:0.8s, 50%:0.9s, 75%:1.1s, Max:1.3s) に比べ、最終後方確認に費やした時間が有意に短い ($p<0.05$)。また、低リスク群 (Mean:0.7s, Std:0.2s, Min:0.5s, 25%:0.6s, 50%:0.7s, 75%:0.9s, Max:1.0s) は若年者群に比べて、最終後方確認に費やした時間が有意に短い ($p<0.01$)。一方、高リスク群と低リスク群には有意な差は無かった。

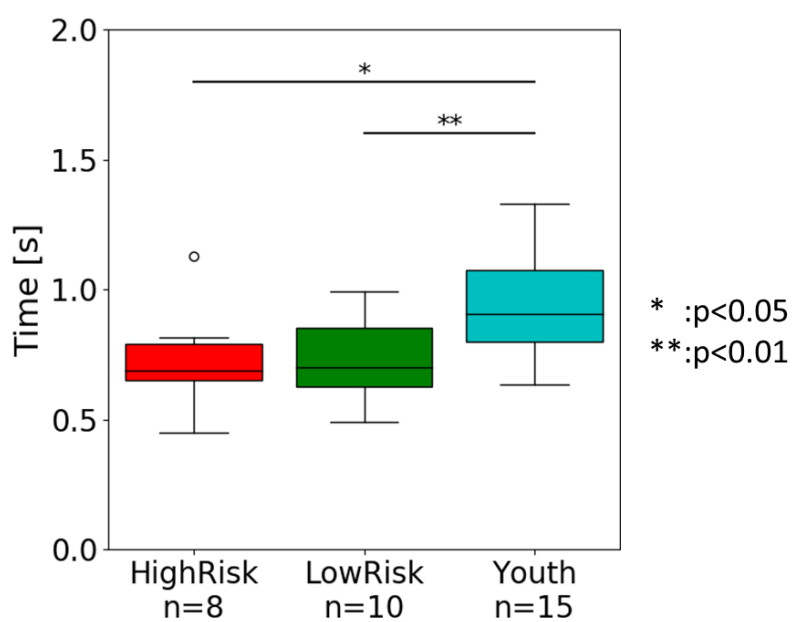


図 5-10 車道進入前の最終後方確認の所要時間

5.1.6.5. 最終後方確認から車道に進入するまでの所要時間

図 5-11 に最終後方確認から車道に進入するまでの所要時間を示す。横軸に検査参加者群を示し、縦軸に所要時間を示す。同図より、高リスク群 (Mean:2.0s, Std:0.8s, Min:1.1s, 25%:1.3s, 50%:1.9s, 75%:2.4s, Max:3.7s) は低リスク群 (Mean:0.9s, Std:0.4s, Min:0.5s, 25%:0.6s, 50%:0.7s, 75%:1.1s, Max:1.6s) に比べ、最終後方確認から車道に進入するまでの所要時間が有意に長い ($p<0.005$)。さらに、高リスク群は若年者群 (Mean:1.3s, Std:0.5s, Min:0.3s, 25%:1.0s, 50%:1.2s, 75%:1.5s, Max:2.1s) に比べて、最終後方確認から車道に進入するまでの所要時間が有意に長い ($p<0.05$)。また、低リスク群と若年者群には有意な差は無かった。

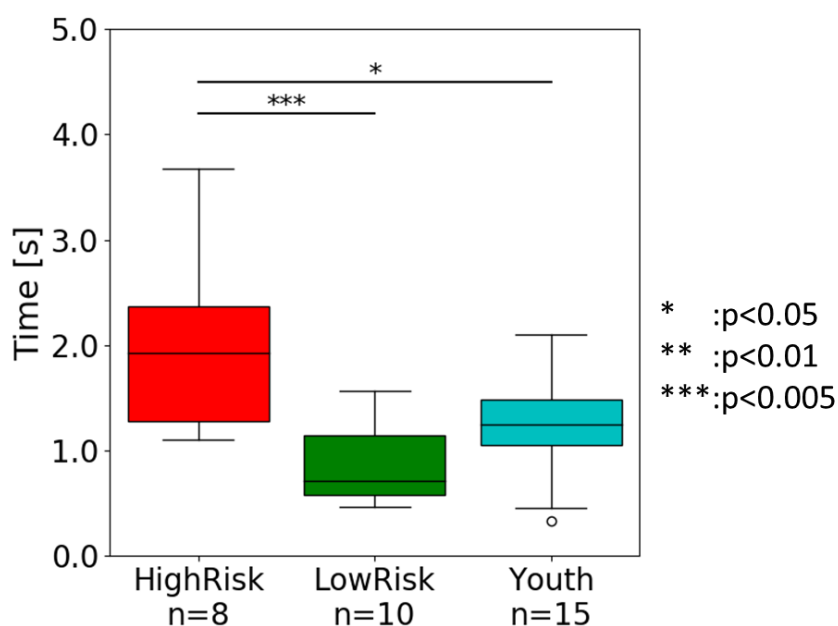


図 5-11 最終後方確認から車道に進入するまでの所要時間

5.1.7. 考察

車両と衝突時、自転車が小さい角度で横断していたことがわかった。これは車道に対する進行角度が小さいことで横断経路が X 軸方向に延び、車道横断において走行する区間が長くなり事故リスクが上昇したためと考える。

高齢者(高リスク群と低リスク群共に)は若年者より有意に経路偏差が大きい。横断経路偏差が増大する要因は、横断経路の推定が不適切なケースと身体がイメージ通りに動かないケースとがあると考えられる。後者の場合、「自転車乗員が想定する経路」に対し「実際の横断経路」にズレが生じるため、横断所要時間が増加し、横断タイミングが不適切となり事故リスクが上昇する。加齢により筋力が低下した高齢者の操舵は安定性が低下するため、高齢者群の横断経路偏差が増加し、事故率も上昇したと考えた。市場に普及しているアシスト自転車にはペダリングの補助機能が多く存在するが、操舵の負荷を軽減し安定させる補助機能はあまり普及していない。仮に操舵の負荷を軽減する支援技術を実現できると安定した横断を実現できるため、横断経路偏差の減少につながり、横断時の事故を低減できると期待できる。

高齢者が若年者よりも車道横断直前の後方確認に費やす時間が短いことを確認した。自転車運転シミュレータではスクリーンの平面に映像を投影しているが、遠方に位置する物体の奥行き知覚に両眼視差と水晶体のピント情報はほとんど存在しないため、現実の奥行き近くの手がかりと同様と考えることができる。検査参加者は相対的サイズと親しみのあるサイズ^[29]等、単眼視による奥行き知覚の手がかりを総動員して車両までの位置を認識する。さらに、形状の大きさや見えの形の時間変化から相対速度を認識する。自身と車両との相対速度の認識には一定時間以上、注視し続ける必要がある。車道横断直前の後方確認は、手前車線を安全に横断するのに重要な「後方から接近してくる車両との距離および相対速度の認識」に不可欠であり、見積もりを誤ると事故に直結する。車道横断直前の後方確認時間が短いと接近車両までの距離および相対速度を知るための視覚的手がかりが不足するため、高齢者は接近車両の状態を正確に認識できず、交通事故誘発リスクが上昇したと考える。

最終後方確認から車道に進入するまでの所要時間では高リスク群が低リスク群および若年者群よりも長い時間を要していることを確認した。最終後方確認で知覚・認知した交通状況は、最終後方確認を終えてからも変化する。そのため、高リスク群は最終後方確認から車道に進入するまでに長い時間を要し、その結果、車道進入時には最接近車両との相対距離が検査参加者の想定よりも短くなり、危険なタイミングで車道に進入してしまったと考える。

以上より、「短い最終後方確認時間」、「最終後方確認から車道に進入するまでの長い所要時間」、「大きい経路偏差」が、高齢者の自転車乗用中における交通事故誘発リスクであると結論づけた。対策として、自転車の横断が車両の走行よりも優先される自転車横断帯を増やす(横断機会の増加)、自転車運転シミュレータを用いて交通事故を疑似

体験し「危険な横断をしない」という意識を高める（危険な横断の経験，交通安全への意識向上），操舵アシスト等の走行安定性を上昇させる機構を開発し普及させる等により，高齢自転車乗員の車道横断時における対車両衝突事故が低減できると考える。

5.1.8. まとめ

本節では片側一車線直線道路を右折横断時の自転車乗員の行動を計測・解析した。その結果，高齢自転車乗員は右折時の進行角度が車道に対して小さい角度で横断し，手前車線を走行する車両に追突されていることを明らかにした。さらに，若年自転車乗員に比べ高齢自転車乗員は横断経路偏差が大きいことが事故リスク上昇につながっていることを明らかにし，操舵の負荷を軽減する等，走行安定性を上昇させることで事故リスクを減少させられる可能性を示した。加えて，「短い後方確認時間」，「後方確認から車道に進入するまでの長い所要時間」，「大きい経路偏差」が交通事故を誘発するリスク要因であることを明らかにした。

5.2. 無信号交差点における直進横断

本節では、3.2 で説明した自転車運転シミュレータを用いた、無信号交差点における直進横断検査について述べ、解析方法および結果を説明し交通事故誘発要因を考察する。

5.2.1. 本検査の狙い

本検査では、出会い頭事故が起こりやすい交差点を仮想空間に構築し、自転車乗員の行動を計測・解析することで自転車乗用中の自動車との出会い頭事故の事故要因の顕在化を目指す。

5.2.2. 検査方法

本検査では、無信号交差点を直進横断するときの行動を計測した。検査には図 3-20(b)の自転車コントローラ部を時計回りに 90deg 回転させ、正面左右に 100inch スクリーンを再配置した自転車運転シミュレータを用いた。図 5-12 に実際に出会い頭事故が多発している埼玉県さいたま市大宮区三橋 4 丁目の交差点を示す^[30]。この交差点をシナリオのモデルとし、特徴である「車道の幅員が 4.5m、交差点から 10m 離れたところで 10deg の角度でカーブした形状」の交差点を仮想空間に構築した。図 5-13 に VR 空間に構築した出会い頭事故が発生しやすい形状の交差点を示す。交差点からカーブまでの距離が出会い頭事故の要因になり得ると仮説を立て、10m の交差点に加え、20m、30m、40m、50m の 4 つの交差点を構築した。図 5-14 に構築した 20m～50m の 4 つの交差点を示す。同図(a)に 20m、同図(b)に 30m、同図(c)に 40m、同図(d)に 50m の交差点を示す。これら 5 つの交差点において「右方から車両が到来する」条件および「左方から車両が到来する」条件、「車両が到来しない」条件の 3 条件を各 2 回、計 30 個の交差点を横断することとした。なお、車両が到来する条件において各交差点に車両が 2 台到来する。1 台目は車速 60km/h で自転車乗員が一時不停止の場合に必ず衝突するタイミングで現れ、2 台目は自転車乗員が交差点に進入した瞬間に、カーブの死角から 1 台目との車間を詰めるように、車速 90km/h で暴走して出現するように設定した。



図 5-12 埼玉県事故多発交差点^[30]

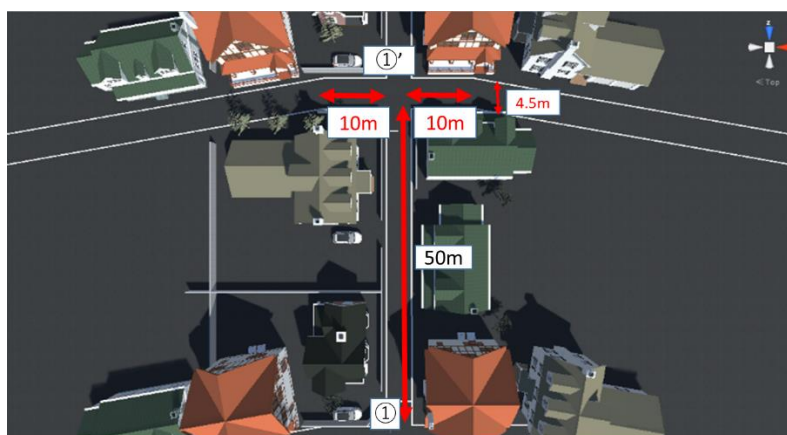
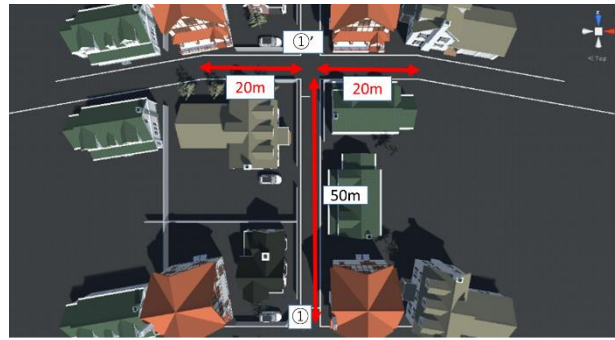


図 5-13 交差点からカーブまでの距離が 10m の交差点



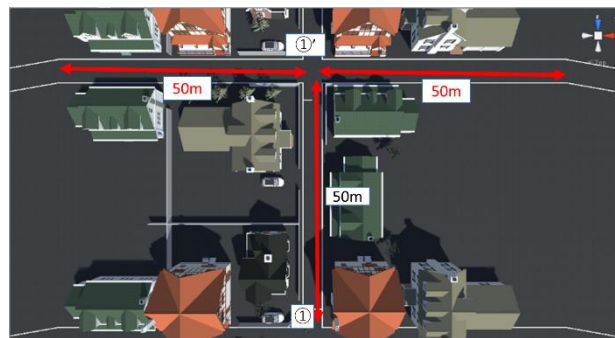
(a) 20m



(b) 30m



(c) 40m



(d) 50m

図 5-14 交差点からカーブまでの距離が 20m~50m の交差点

5.2.3. 教示条件

検査参加者には計測開始前に口頭で「自転車に乗って 1.5km の道路を直進してもらいます。できるだけ早く目的地に到着してください。交差点では左右から車両が到来するので、轢かれないように注意して安全運転で走行してください。」と教示した。

5.2.4. 検査参加者

表 5-3 に本検査の検査参加者の情報を示す。対象としたのは 21～22 歳(Mean:21.5 歳, Std:0.5 歳)の若年男性 8 名と 21 歳の女性 1 名で、免許を保有していない人が 1 名、普段全く自転車を利用していない人が 2 名である。なお、本検査は秋田大学手形地区におけるヒトを対象とした研究に関する倫理規定第 6 条第 2 項に基づいた倫理審査の上、秋田大学倫理審査委員会の承認を得て実施した。

表 5-3 交差点横断検査参加者情報

Subject	Age	Sex	License	Bicycle Usage
A	21	M	With	few days a month
B	21	M	With	None
C	21	M	With	None
D	21	M	With	few days a week
E	21	F	With	everyday
F	22	M	Without	everyday
G	22	M	With	everyday
H	22	M	With	everyday
I	22	M	With	everyday

5.2.5. 解析方法

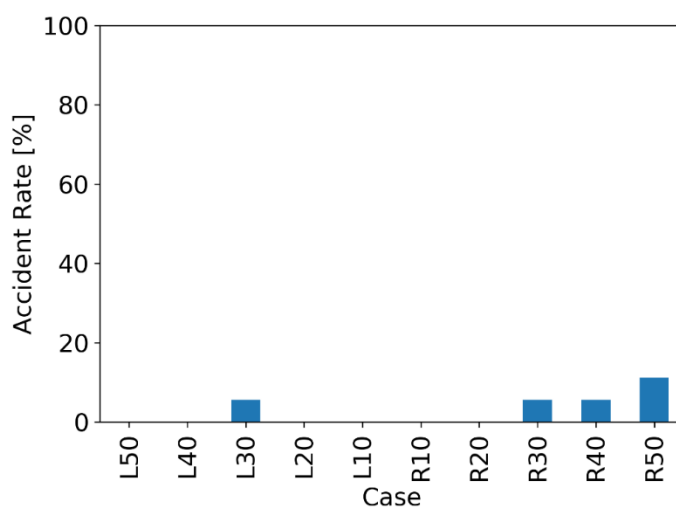
5.2.5.1. 条件別交通事故発生率

左から車両が到来する条件を条件 L, 右から到来する条件を条件 R とする。ここで、各交差点のカーブまでの距離 $d[m]$ と到来条件を合わせ、車両が到来する交差点の条件を Ld もしくは Rd と呼ぶ。例えば、カーブまでの距離が 10m の交差点で右から車両が到来する条件は $R10$ となる。1 台目の車両と衝突した交通事故発生率と、2 台目の車両と衝突した交通事故発生率を $L10, L20, L30, L40, L50, R10, R20, R30, R40, R50$ の全 10 条件でそれぞれ算出した。

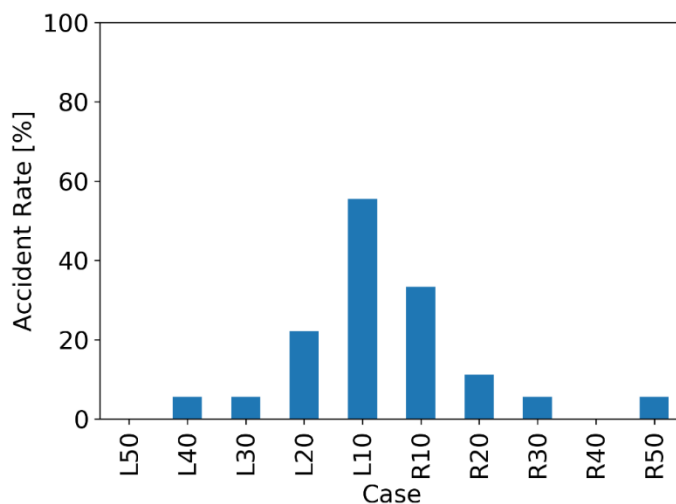
5.2.6. 結果

5.2.6.1. 条件別交通事故発生率

図 5-15 に条件別交通事故発生率を示す。同図(a)に 1 台目の車両との交通事故発生率を示し、同図(b)に 2 台目の車両との交通事故発生率を示す。縦軸は割合を示し、横軸は条件を示す。同図(a)より、1 台目の車両との交通事故（一時不停止の試行）は L30, R30 および R40 で 5.6%, R50 で 11.1%であった。同図(b)より、L40, L30, R30 および R50 で 5.6%, R20 で 11.1%, L20 で 22.2%, R10 で 33.3%, L10 で 55.6%であった。



(a) 1 台目の車両との交通事故発生率



(b) 2 台目の車両との交通事故発生率

図 5-15 交通事故発生率

5.2.7. 考察

図 5-15 より交差点からカーブまでの距離が 20m 以下の条件で交通事故発生率が高く、特に L10 で 55.6%と最も高いことが明らかとなった。本検査条件では、自転車乗員が交差点手前で一時停止し法令を順守したとしても 2 台目の車両と衝突している。このことから、構築した交通環境の中でも、交差点からカーブまでの距離が 20m 以下の形状では出会い頭衝突事故が発生するリスクが上昇してしまうと考える。ここで、事故発生率が右から車両が到来する条件よりも左から車両が到来する条件の方が高いのは、右側から到来する車両と衝突する領域が左側から到来する車両との衝突領域よりも手前にあり、右側から車両が到来する条件の方が衝突領域から一早く脱出できるためであると考えた。自転車の走行速度であれば右側から到来する車両をかわし切ることが可能であるが、左側から到来する車両をかわす場合は難しい。一方、左側から到来する車両を交差点の前半で止まってやり過ごして回避可能であるが、右側から車両が到来した場合に衝突してしまうことが予想でき、交差点からカーブまでの距離に余裕を持たせ、自転車乗員に回避方法を選択する時間を与えることが重要と考えた。以上から、交差点のある道路にカーブを設ける必要がある場合、30m 以上交差点からカーブを離すことが出会い頭事故の減少につながる可能性がある。なお、交差点からカーブまでの距離を 30m としたのはあくまでも今回の条件で得られた結果であり、最適な距離を求めるにはより一層の検討が必要であることに留意しなければならない。また、すでに施工された道路に関しては、交差点に信号機や予告灯、適切な位置へのカーブミラーの設置が必要と考えた。

5.2.8. まとめ

本節では、事故が多発している埼玉県の交差点を仮想空間に構築し、若年者を対象に無信号交差点を直進横断する自転車乗員の行動を計測・解析した結果、一時不停止で車両と衝突した試行が 5 件(2.8%)発生した。また、安全確認後に 2 台目の車両と衝突した割合は、交差点からカーブまでの距離が 20m 以下の条件で多く、右 20m で 11.1%、左 20m で 22.2%、右 10m で 33.3%、左 10m で 55.6%と左側から接近する車両との事故率が高いことを確認した。このことから、交差点からカーブまでの距離が 20m 以下の場合、車両が死角から飛び出した後、自転車乗員が避けきれない可能性が高い。そのため、交差点に信号機や予告灯、適切な位置へのカーブミラーの設置が必要と考えた。

5.3.5 章まとめ

本章では、自転車乗員の交通事故誘発要因の顕在化と衝突シミュレーションにおける指標の作成を目的として、片側一車線直線道路での右折横断シナリオと無信号交差点での直進横断シナリオを作成した。片側一車線直線道路での右折横断シナリオでは若年自転車乗員および高齢自転車乗員を対象に、無信号交差点での直進横断シナリオでは若年自転車乗員を対象に運転行動を計測・解析した。そして、「比較対象の分類」、「交通事故発生率」、「車両衝突地点および衝突角度」、「横断経路偏差」、「車道進入前の最終後方確認の所要時間」、「最終後方確認から車道に侵入するまでの所要時間」の解析手法を考案し、結果を比較・検討した。その結果、自転車乗員の交通事故誘発要因は、「右折時の角度の小ささ」、「横断経路偏差の大きさ」、「最終後方確認時間の短さ」、「判断プロセスの長さ」が交通事故誘発要因であり、無信号交差点の直進横断では「交差点からカーブまでの距離の短さ」が交通事故誘発要因であることを明らかにした。

第6章 結論

6.1. まとめ

本研究では、自動車および自転車運転中の事故誘発要因の顕在化を目的とし、運転者の行動を計測可能な自動車および自転車の VR 運転シミュレータを開発すると共に、「自動車運転時のペダルワーク」と「自転車運転時の右折横断および出会い頭事故」に着目した「ドライバーの運転行動検査」と「自転車乗員の運転行動検査」を考案し、自動車および自転車運転時の行動を評価した。

「ドライバーの運転行動検査」では、前方に急に飛び出した歩行者に気づいて事故を回避する交通環境のシナリオを作成し、若年ドライバーおよび高齢ドライバーの行動を計測・解析した。そして、「回避方法による試行大別」、「歩行者の飛び出しからドライバーがアクセルを離すまでの所要時間」、「ドライバーがアクセルを離しブレーキを踏むまでの所要時間」、「歩行者の飛び出しから 10 秒間のドライバーの右足つま先の総軌跡長」の解析手法を考案し、結果を比較・検討した。

「自転車乗員の運転行動検査」では、片側一車線直線道路での右折横断シナリオと無信号交差点での直進横断シナリオを作成した。片側一車線直線道路での右折横断シナリオでは若年自転車乗員および高齢自転車乗員を対象に、無信号交差点での直進横断シナリオでは若年自転車乗員を対象に運転行動を計測・解析した。そして、「比較対象の分類」、「交通事故発生率」、「車両衝突地点および衝突角度」、「横断経路偏差」、「車道進入前の最終後方確認の所要時間」、「最終後方確認から車道に侵入するまでの所要時間」の解析手法を考案し、結果を比較・検討した。

本研究で得られた成果の詳細を以下に記述する。

- ドライバーの運転行動検査
- I. 既存のドライビングコントローラに磁気式 MoCap 装置と HMD を組み合わせ、ドライバーのペダルワークが計測可能な VR ドライビングシミュレータを開発した。HMD により頭部運動に合致した視覚情報および両眼視差による奥行き知覚を呈示し、ドライバーのペダル操作時の繊細な足の動きを 60Hz で同時計測できる検査システムを実現した。

- II. 片側 1 車線の直線道路を時速 60km/h で走行中に歩行者が突然車道に飛び出す交通環境のシナリオを作成し、高齢者 11 名、若年者 10 名のドライバーを対象として運転行動を計測した。そして、「ステアリングとブレーキ操作」、「歩行者の飛び出しからアクセルを離すまでの所要時間」、「アクセルを離しブレーキを踏むまでの所要時間」、「歩行者の飛び出しから 10 秒間の右足つま先の総軌跡長」の解析手法を考案し、解析・考察した。得られた知見を以下に示す。
 - i. 「ステアリングとブレーキ操作の解析」

高齢者の特徴として、急ブレーキ時にハンドルを強く握り、体を固める傾向にあることを確認した。高齢者はこれによりスムーズな操舵が困難となり、ブレーキ回避を選択する割合が若年者と比べ 17%増加したと考えた。さらに、高齢者および若年者に共通した傾向として、ブレーキ回避を選択した方が操舵回避よりも事故発生率が高く、若年者で 6.8 倍、高齢者で 4.3 倍であることがわかった。そのため、歩行者の急な飛び出しに対し、高齢者は体を固めてしまい柔軟な行動をとることができないことが事故を誘発する要因であると考えた。

 - ii. 「歩行者が飛び出してからブレーキを踏むまでの時間の解析」

無事故試行においては、「歩行者が飛び出してからブレーキを踏むまでの時間」に、年齢による有意差は生じなかった。しかしながら、「歩行者が飛び出してアクセルから足を離す時間」に限定すると、若年者に比べ高齢者で有意に長期化することを明らかにした。この特徴は、過去の研究において高齢者の判断力および下肢筋力の低下の報告と矛盾しない。一方、無事故試行における「アクセルからブレーキに足を移す時間」に、年齢による有意差は生じなかった。つまり、このプロセスでは筋力や判断に関係する要因が影響していないといえる。また、若年者と高齢者に共通する特徴として、無事故試行と比べ事故試行で「歩行者が飛び出してからブレーキを踏むまでの時間」、「アクセルから足を離す時間」および「アクセルからブレーキに足を移す時間」が有意に長いことがわかった。事故試行では、

歩行者の横断に早い段階で気づけなかったり、回避方法を操舵かブレーキで迷ったりすることでアクセルから足を離すのが遅れてしまい、事故リスクが上昇していると考えた。

iii. 「歩行者の飛び出しから 10 秒間の右足つま先の総軌跡長の解析」

高齢者は若年者より歩行者飛び出しから試行終了までのドライバーの右足つま先の総軌跡長が長い。これは、加齢に伴い下肢筋力が低下し、ブレーキペダル踏力に対して踏み込む力が安定しないこと、アクセルからブレーキへ最短で足を移動できていない等が要因であると考えられる。

本計測で用いたペダルコントローラは実際の車両と異なり、アクセルとブレーキペダルに段差が無いため、つま先をを起こしてブレーキペダルを踏む、あるいは、踵を手前に引いてブレーキペダルを踏む過程が不要であり、単純に足の面を左にスライドさせる簡単な動作でブレーキを踏むことができる。つまり、本実験に使用したペダルは単純な動作でブレーキペダルを踏むことができるため踏み間違いが生じにくく、年齢による差が生じなかった可能性が残る。この点は、実際の車両と同様のペダルでの追試が必要と考えている。

- 自転車乗員の運転行動検査
- I. 既存のエアロバイクを改良し、磁気式 MoCap 装置と各種センサを組み合わせ、エアロバイクを取り囲むように 100inch スクリーンを配置することで 270deg の視野および 4 台のスピーカを周囲に配置することで 360deg の音場を呈示可能な VR 自転車運転シミュレータを開発した。ペダルを踏むことで任意の速度で走行することができ、ブレーキバーを握りこむことで任意のタイミングで制動でき、自転車乗員の頭部、腰部、両膝の 4 部位の位置姿勢、仮想空間上の自転車および自動車の位置姿勢、自転車のフレームにかかる床反力を 60Hz で同時計測できる検査システムを実現した。
- II. 片側一車線直線道路での右折横断シナリオを作成し、高齢者 18 名、若年者 15 名を対象に運転行動を計測した。そして、「交通事故発生率」および「車両衝突地点および衝突角度」、「横断経路偏差」、「車道進入前の最終後方確認の所要時間」、「最終後方確認から車道に進入するまでの所要時間」の解析手法を考案し、解析・考察した。得られた知見を以下に記す。
- i. 若年者は交通事故に遭うことなく右折横断することができたが、高齢者は手前車線で 15%、奥車線で 2.0% 事故に遭っていた。
 - ii. 車両と衝突した瞬間の自転車の位置姿勢を解析し、自転車が平均 20deg の小さい角度で横断していたことを明らかにした。車道横断において右折時の角度が小さいことで横断経路が車両と並走する方向（X 軸方向）に延びてしまい、走行区間および車道での滞在時間が長くなり事故リスクが上昇したと考える。
 - iii. 車両と衝突した位置の度数分布より、手前車線を四分割した条件で手前が最も事故率が高く、順に減少する傾向を明らかにした。また、衝突時の自転車の姿勢の近似関数も導出した。
 - iv. 横断経路偏差を比較したところ、高齢者(高リスク群と低リスク群共に)は若年者より有意に大きいことを明らかにした。加齢により筋力が低下した高齢者の操舵は安定性が低下するため、高齢者群の横断経路偏差が増加し、事故率も上昇したと考えた。

- v. 車道横断直前の後方確認に費やす時間を若年者と高齢者で比較した結果、高齢者が有意に短いことを確認した。車道横断直前の後方確認時間が短いと接近車両までの距離および相対速度を知るための視覚的手がかりが不足するため、高齢者は接近車両の状態を正確に認識できず、交通事故誘発リスクが上昇したと考える。
 - vi. 高齢者の交通事故の低リスク群および若年者群と比べ、高齢者の高リスク群の「最終後方確認から車道に進入するまでの所要時間」は有意に長いことを確認した。一般に、最終後方確認を終えてから時間の経過とともに車両との相対距離は減少し続けるため、高リスク群が車道に進入した時点では最接近車両との相対距離が想定よりも短くなり、危険なタイミングで車道に進入していたと考える。
- III. 無信号交差点における直進横断シナリオを作成し、若年者9名を対象に運転行動を計測した。設計した交差点は進行方向に対し左右の車道がカーブしており、交差点からカーブまでの距離を10m, 20m, 30m, 40m, 50mのいずれかに設定した。検査参加者が自転車に乗って直進すると、交差点において左右どちらか一方から車両が2台到来する。「死角から飛び出してくる車両との交通事故発生率」について解析・考察した。得られた知見を以下に示す。
- i. 1台目の車両と衝突した一時不停止による交通事故は5件(2.8%)発生した。また、安全確認後に2台目の車両と衝突した割合は、交差点からカーブまでの距離が20m以下の条件で多く、右20mで11.1%、左20mで22.2%、右10mで33.3%、左10mで55.6%と左側から接近する車両との事故率が高いことを確認した。このことから、交差点からカーブまでの距離が20m以下の場合、車両が死角から飛び出した後、自転車乗員が避けきれない可能性が高い。そのため、交差点に信号機や予告灯、適切な位置へのカーブミラーの設置が必要と考えた。

以上より、歩行者の飛び出しに対するブレーキ回避時のドライバーの交通事故誘発要因は、「歩行者が飛び出してアクセルから足を離す時間の長さ」および「アクセルからブレーキに足を移す時間の長さ」にあり、若年者と高齢者の違いは「歩行者の飛び出しからブレーキを踏むまでの総軌跡長」に現れることを明らかにした。一方、自転車乗員の片側一車線直線道路の右折横断では、「右折時の角度の小ささ」、「横断経路偏差の大きさ」、「最終後方確認時間の短さ」、「判断プロセスの長さ」が交通事故誘発要因であり、

無信号交差点の直進横断では「交差点からカーブまでの距離の短さ」が交通事故誘発要因であることを明らかにした。これらを改善することで安全な交通を実現できると結論する。

6.2. 今後の課題

今後の課題を以下に記す。

I. ドライバーの運転行動検査

- i. ペダル構造の違いによる影響を考慮する必要がある。本研究ではアクセルとブレーキの踏面に段差が無いオルガン型のペダルコントローラを使用している。しかし、市場の車両にはハンギング型のペダルや、ブレーキとアクセルの踏面に段差があるペダル等、多種多様のペダルが存在している。そのため、ブレーキの踏面がアクセルよりも手前にズレて配置されているペダルを用いて再度計測し、ペダル構造の違いがペダルワークに及ぼす影響を明らかにする必要がある。
- ii. 一般に、後期高齢者は前期高齢者の2倍ペダルの踏み間違い事故が多いことが知られている。今回の計測では後期高齢者が3名と少なく、後期高齢者の検査参加者を増やして検査することでペダルの踏み間違いが発生するか、ペダルワークを計測・解析する必要がある。

II. 自転車乗員の運転行動検査

- i. 検査参加者の下肢筋力、三半規管等の体性感覚や認知機能の衰えを評価するために反応時間や認知機能テストを実施し、本論文で評価した項目との関係を調査する必要がある。
- ii. 今回の片側一車線直線道路の右折横断検査では、自転車のブレーキを制限した条件で運転行動を計測しており、ブレーキによる自転車の制動を許可した条件での右折横断の交通事故誘発要因を再調査する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり終始懇切丁寧な御指導御鞭撻を賜り、研究の相談をはじめ多方面で御支援頂きました

秋田大学大学院 理工学研究科 数理・電気電子情報学専攻 人間情報工学コース
水戸部 一孝 教授

に心より深く感謝致します。

本論文の推敲にあたり、審査の上、御教授頂きました

秋田大学大学院 理工学研究科 数理・電気電子情報学専攻 人間情報工学コース
景山 陽一 教授

秋田大学大学院 理工学研究科 数理・電気電子情報学専攻 人間情報工学コース
有川 正俊 教授

に心より深く感謝致します。

本研究ならびに本論文を遂行するにあたり、様々な御助言を頂きました

秋田大学大学院 理工学研究科 共同ライフサイクルデザイン工学専攻
藤原 克哉 講師

秋田大学大学院 理工学研究科 数理・電気電子情報学専攻 人間情報工学コース
中島 佐和子 講師

に心より深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり、解析手法や検証方法等、様々なご助言を頂きました

秋田大学大学院 理工学研究科 技術部
齋藤 正親 技術職員

に心より深く感謝致します。

本研究の検査参加者として、貴重な時間を割いて検査にご協力して頂いた

財団法人 秋田長寿社会振興財団(LL 財団)の皆様

に心より深く感謝致します。

本研究に関して御協力および御討論を頂きました

本研究室 大学院生諸氏，4年生諸氏の皆様

に心より深く感謝致します。

本研究を遂行するにあたり、就業しながらの研究を許可・ご支援頂きました
横手精工株式会社 API 事業部
伊藤 昭彦 事業部長
をはじめ、
横手精工株式会社 API 事業部 開発部 開発課の皆様
に心より深く感謝致します。

最後に、今日に至るまで著者を育て、温かく見守り無償の支援を与えてくださいまし
た
父 半田 力 氏，母 半田 裕子 氏
に心から謝意を表します。

研究業績

発表論文

- (1) 半田 修士, オマル・バハルディン・ビン, 松井 靖浩, 及川 昌子, 水戸部 一孝; 自転車運転シミュレータの開発と高齢者の交通事故誘発要因の検討, 日本交通科学学会誌, Vol.15, No.3, pp.44-51, 2016.
- (2) 半田 修士, モハンマド ズルフアデゥリ, 松井 靖浩, 及川 昌子, 水戸部 一孝; 自転車運転シミュレータを用いた高齢自転車乗員の横断行動の計測と交通事故誘発リスクの検討, 日本交通科学学会誌, Vol.16, No. 2, pp.19-28, 2017.
- (3) 半田 修士, モハンマド ズルフアデゥリ, 水戸部 一孝; ドライビングシミュレータにおける高齢ドライバーのペダル操作の計測と評価, 日本交通科学学会誌, Vol.18, No.2, pp.19-27, 2018.
- (4) Naoto Handa, Kazutaka Mitobe; Investigation of Collision Position and Orientation of Elderly Cyclist for Car-Bicycle Collision Simulation: Traffic Accident when Crossing Right Turn on One Side Lane Straight Road, TEEE C, 2020. (投稿中)

解説記事

- (1) 水戸部 一孝, 半田 修士; 自転車シミュレータで見る交通事故, 自動車技術, Vol.73, No.12, pp.69-74, 2019.

学会発表

- (1) 半田 修士, オマル・バハルディン・ビン, 松井 靖浩, 及川 昌子, 水戸部 一孝; 自転車運転シミュレータを高齢者の交通事故誘発要因の検討, 日本交通科学学会誌, Vol.15, No.1, 2015, 第51回日本交通科学学会総会・学術講演会プログラム・抄録集, p.33, (秋田, 日本), (2015年6月20, 21日).
- (2) 半田 修士, 松井 靖浩, 及川 昌子, 水戸部 一孝; 自転車運転シミュレータを用いた高齢自転車乗員の交通事故誘発要因の検討, 日本交通科学学会誌, Vol.16, 特別号, 第52回日本交通科学学会総会・学術講演会講演集, pp.134-135, (東京, 日本), (2016年6月18, 19日).

- (3) モハンマド ズルファデウリ, 半田 修士, 水戸部 一孝; 歩行環境シミュレータを用いた高齢歩行者の交通事故誘発要因の検討, 日本交通科学学会誌, Vol.16, 特別号, 第52回日本交通科学学会総会・学術講演会講演集, pp.136-137, (東京, 日本), (2016年6月18, 19日).
- (4) モハンマド ズルファデウリ, 半田修士, 水戸部一孝; 自動車と自転車のインタラクションが可能な運転シミュレータの開発, 日本交通科学学会誌, Vol.17, 特別号, 第53回日本交通科学学会総会・学術講演会講演集, p.87, (滋賀, 日本), (2017年6月2日).
- (5) モハンマド ズルファデウリ, 半田修士, 水戸部一孝; 自動車運転シミュレータの開発とMoCapを用いた運転中のペダルワークの計測と評価, 情報処理学会東北支部研究会, Vol.2017-akita, No.16, (秋田, 日本), (2017年12月1日).
- (6) 半田 修士, モハンマド ズルファデウリ, 水戸部 一孝; ドライビングシミュレータとMoCapを用いた高齢ドライバーのペダル操作の計測と評価, 日本交通科学学会誌, Vol.18, 補冊, 第54回日本交通科学学会総会・学術講演会講演集, p.84, (東京, 日本), (2018年6月28, 29日).
- (7) 半田 修士, 伊藤 昭彦, 水戸部 一孝; 自転車運転シミュレータを用いた交差点出会い頭事故における自転車対自動車交通事故要因の検討, 日本交通科学学会誌, Vol.19, 補冊, 第55回日本交通科学学会総会・学術講演会講演集, p.76, (東京, 日本), (2019年6月20, 21日).
- (8) 内堀 雄太, 半田 修士, 藤原 克哉, 水戸部 一孝; 実歩行可能な歩行環境シミュレータの構築と車道横断動作の解析, 日本交通科学学会誌, Vol.19, 補冊, 第55回日本交通科学学会総会・学術講演会講演集, p.76, (東京, 日本), (2019年6月20, 21日).

受賞

- (1) 半田 修士, オマル・バハルディン・ビン, 松井 靖浩, 及川 昌子, 水戸部 一孝; 自転車運転シミュレータを用いた高齢者の交通事故誘発要因の検討, 第52回日本交通科学学会・総会・学術講演会 若手優秀講演発表奨励賞, (2016年6月18日).

- (2) 半田 修士, モハンマド ズルファデゥリ, 水戸部 一孝; ドライビングシミュレータにおける高齢ドライバーのペダル操作の計測と評価, 第55回日本交通科学学会・総会・学術講演会 優秀論文賞, (2019年6月20日).

参考文献

- [1] 内閣府; 平成 30 年版高齢社会白書 (全体版) , 2018.
https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2018/html/zenbun/s1_1_2.html, (2020 年 1 月 31 日アクセス).
- [2] 総務省統計局; 交通死亡事故の特徴等について, 2018.
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00130002&tstat=000001027458&cycle=7&year=20180&month=0>, (2020 年 1 月 31 日アクセス).
- [3] 内閣府; 先端技術を活用した交通安全の取組, 2018.
https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/h30kou_haku/gaiyo/features/feature.html, (2020 年 1 月 31 日アクセス).
- [4] 公益社団法人交通事故総合分析センター; ITARDA INFORMATION 交通事故分析レポート, No.124, 2018.
- [5] Moore JK, Hubbard M, Schwab AL, et al.; Statistics of Bicycle Rider Motion, *Procedia Engineering*, Vol.2, pp.2937-2942, 2010.
- [6] 片平清昭, 齋藤進, 塚原進; 自転車走行中のふり向きとハンドルのブレ, *人間工学*, Vol.11, pp.117-121, 1975.
- [7] Maki T. et al.; Comparative Analysis of Vehicle-Bicyclist and Vehicle-Pedestrian Accidents in Japan, *Accident Analysis & Prevention*, Vol.35, No.6, pp.927-940, 2003.
- [8] Hardy,R.N. et al.; Safety requirements for cyclists during car impacts to the legs, Vol.21st *ESV*, 2009.
- [9] Cardot, J., et al.; Finite element analysis of cyclist lower limb response in car-bicycle accident, *International Journal of Crashworthiness*, Vol.11, No.2, pp.115-130, 2005.
- [10] Ito D. et al.; Finite element analysis of kinematic behavior of cyclist and performance of cyclist helmet for human head injury in vehicle-to-cyclist collision, *IRCOBI Conference*, pp.119-131, 2014.
- [11] 警察庁; 統計表
<https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/toukeihyo.html>, (2020 年 1 月 31 日アクセス).
- [12] 水戸部一孝, ジョセフ F. コップリン, 吉村昇; サイバースペースにおける高齢歩行者の危険回避能力検査の試み, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol.J89-D, No.10, pp.2174-2182, 2006.
- [13] Haneen Farah, et al.; Modelling overtaking strategy and lateral distance in car-to-cyclist overtaking on rural roads: A driving simulator experiment, *Transportation Research Part F, Traffic Psychology and Behaviour*, Vol.63, pp.226-239, 2019.

- [14] Tiantian Chen, et al.; Safety of professional drivers in an ageing society – A driving simulator study, *Transportation Research Part F, Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 67, pp.101-112, 2019.
- [15] Yuqing Wu, Linda Ng Boyle, Daniel V. McGehee; Evaluating variability in foot to pedal movements using functional principal components analysis, *Accident Analysis & Prevention*, Vol.118, pp.146-153, 2018.
- [16] ATC; National Road Safety Strategy 2011–2020, Australian Transport Council, Canberra, 2011.
- [17] Steve O’Hern, Jennie Oxley, Mark Stevenson; Validation of a bicycle simulator for road safety research, *Accident Analysis & Prevention*, Vol.100, pp.53-58, 2017.
- [18] Masoud Ghodrat Abadi, David S. Hurwitz, Manali Sheth, et al; Factors impacting bicyclist lateral position and velocity in proximity to commercial vehicle loading zones: Application of a bicycling simulator, *Accident Analysis & Prevention*, Vol.125, pp.29-39, 2019.
- [19] Song Yin, Yuehong Yin; Study on virtual force sensing and force display device for the interactive bicycle simulator, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.140, Issue 1, pp.65-74, 2007.
- [20] Polhemus; G4 Usermanual, APPENDIX A-E, 2013.
- [21] Polhemus; 3Space Fastrak Usermanual, Appendix D, pp.1-2, 2012.
- [22] 澤谷邦男; 電子情報通信学会「知識ベース」, 電子情報通信学会, Vol.4, p.17, 2013.
- [23] Polhemus; LIBERTY User Manual, 2012.
- [24] 谷本 芳美, 渡辺 美鈴, 河野 令, 他; 日本人筋肉量の加齢による特徴, *日本老年医学会雑誌*, Vol.47, pp.52-57, 2009.
- [25] 池原圭一; 高齢者運転適性ハンドブック, pp.33-73, 2005.
- [26] 豊田泰孝, 繁信和恵, 池田学; 高齢者の自動車運転の実態, *老年精神医学雑誌*, Vol.19, pp.138-143, 2008.
- [27] 赤松幹之; 運転中に何を見て, そし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ー～小特集 運転者の知覚・認知能力の診断と補償, *映像メディア学会誌*, Vol.61, No.12, pp.1682-1688, 2007.
- [28] 根木昭, 田野保雄, 樋田哲夫, 他; *眼科プラクティス 15.視野*, 第3刷, 文光堂, 東京, p360, 2009.
- [29] 大山正, 今井省吾, 和気典二, 他; 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, Vol.1, 誠信書房, 東京, p774, 1994.

[30] Google Maps; 2019.

<https://www.google.co.jp/maps/@35.896859,139.5996114,329a,35y,74.02h,2.97t/data=!3m1!1e3>, (2020 年 1 月 31 日アクセス).