

芝浦工業大学
博士学位論文

自動運転システムにおける車両制御の安全性および
運転権限移譲のインターフェースに関する基礎研究

平成31年9月

後閑 雅人

内容

要旨.....	1
Abstract	2
第1章 序論.....	3
1-1. 研究背景.....	3
1-1-1. 交通事故の削減と自動運転システム.....	3
1-1-2.自動運転システムの定義	5
1-1-3.自動運転システムの高速度道路での運用	7
1-1-4. 自動運転システムの安全技術ガイドライン	10
1-1-4-1. ガイドライン策定の背景と目的.....	10
1-1-4-2. 自動運転システムの安全要件	11
1-1-5. 自動運転システムの使用方法についての整理	13
1-2. 自動運転システムの課題.....	14
1-2-1. 自動運転システムによる車両制御の安全性評価.....	14
1-2-2. 自動運転システムからドライバへの運転操作の引継ぎ	15
1-2-3. 市街地での自動運転システムの実現.....	15
1-3 研究目的.....	16
第2章 研究の構成	17
2-1. 各章の研究目的	17
2-2 各章の研究方針	18
第3章 自動運転システムの前後方向の車両制御の安全性評価手法検討に係る研究 ..	19
3-1. 研究概要と方針	19
3-2. 交通事故分析.....	20
3-2-1. 交通事形態別における交通事故の発生割合	20
3-2-2. 道路形状別における追突事故の発生割合.....	21
3-3. ドライバの制動制御に関する実験（実車実験）	22
3-3-1. 目的.....	22
3-3-2. 実験方法.....	22
3-3-2-1. 実験環境.....	22
3-3-2-2. 実験装置.....	22
3-3-2-3. 実験参加者	24
3-3-2-4. 追従実験.....	24
3-3-2-5. 急制動実験	25
3-3-3. 実験結果.....	26
3-3-3-1. 追従実験結果.....	26
3-3-3-2. 急制動実験結果.....	27

3-3-4 自動運転システムの制動制御パターンの設計	28
3-3-4-1. 自動運転システムの追従時における車間距離の設計.....	28
3-3-4-2. 自動運転システムの制動制御時における減速度の設計	29
3-4. 自動運転システムの前後方向の車両制御の評価に関する実験 (DS 実験)	32
3-4-1. 目的.....	32
3-4-2. 評価項目	32
3-4-3. 実験環境.....	32
3-4-4. 実験装置.....	33
3-4-5. 実験方法.....	37
3-4-5-1. 実験シナリオ.....	37
3-4-5-2. 実験条件の順番	40
3-4-5-3. 実験参加者	42
3-4-6. 実験結果.....	43
3-4-6-1. 最短車間距離.....	43
3-4-6-2. 追突が発生する実験条件の分析.....	43
3-4-6-3. 主観評価値	46
3-4-6-4. 模擬自動運転車の制動制御に危険を感じる実験条件の分析.....	46
3-5. 考察.....	49
3-6. 結論.....	50
第4章 出眠時における手動運転に遷移する際のドライバの運転特性に関する検討 ..	51
4-1. 研究概要と方針.....	51
4-2. 実験装置.....	51
4-2-1. ドライビングシミュレータ	51
4-2-2. 生体信号測定装置	57
4-3. 実験方法.....	59
4-3-1. 実験シナリオ.....	59
4-3-2. 実験参加者	59
4-3-3. 脳波測定.....	62
4-3-4. 実験手順.....	63
4-4. 実験結果.....	64
4-4-1. 衝突の割合	64
4-4-2. ブレーキ反応時間	65
4-4-3. ブレーキペダル踏力.....	66
4-4-4. ブレーキ踏力の立ち上がり時間.....	67
4-4-5. 脳波の分析	68
4-5. 結論.....	69

第5章 出眠時における手動運転に遷移する際の刺激による覚醒効果に関する研究 ..	71
5-1. 研究概要と方針	71
5-2. 実験装置	72
5-2-1. ドライビングシミュレータ	72
5-2-1-1. ドライビングシミュレータの概要	72
5-2-1-2. ドライビングシミュレータのシステム概要	74
5-2-1-3. プロジェクタの配置と視野角について	75
5-2-2. 脳波の測定装置	76
5-2-3. 覚醒手法用の装置	78
5-3. 脳波の計測方法	79
5-3-1. 脳波の概要	79
5-3-2. 電極の配置方法	80
5-4. 実験方法	81
5-4-1. 実験のシナリオ	81
5-4-2. 実験条件	82
5-4-3. 実験参加者の睡眠状態の監視方法	83
5-4-4. 刺激による覚醒手法	84
5-5. ドライバの覚醒手法検討実験結果	85
5-5-1. 歩行者との衝突の割合	85
5-5-2. ドライバのブレーキ反応時間	87
5-5-3. ドライバのブレーキペダル踏力の最大値	88
5-5-4. 脳波の分析	89
5-6. 結論	90
第6章 前照灯照射範囲の違いによる歩行者の被視認性の検討	91
6-1. 研究概要と方針	91
6-2. 交通死亡事故の分析	92
6-2-1. 昼夜別における交通死亡事故分析	92
6-2-2. 前照灯配光特性による交通事故の影響	93
6-3. 実験方法	94
6-3-1. 実験概要	94
6-3-2. 視認対象物	95
6-3-3. 背景輝度	96
6-3-4. 歩行者輝度と背景輝度のコントラスト比	96
6-3-5. 実験参加者	96
6-3-6. 評価方法	96
6-4. 実験結果	97

6-4-1. ADB における実験条件ごとの視認率の変化.....	97
6-4-2. 歩行者への照射範囲の違いによる視認率の影響.....	101
6-5. 結論.....	111
第7章 結論.....	112
7-1. 各テーマに対する結論.....	112
7-2. 各テーマを統括する結論.....	117
謝辞.....	118
参考文献.....	119
研究業績.....	123

要旨

現在、自動運転システムの開発は発展途上であり、様々な問題を抱えている。本論文は、自動運転システムを実現するにあたり、自動運転システムの運用方法や課題を整理し、想定される課題に対して将来必要となる要素技術に着目して検討を行うことを目的としている。本論文はこの目的に沿って、以下の7章で構成されている。

第1章では、自動運転システムの定義や安全要件、運用方法、課題等について整理を行った。第2章では、整理した課題に対して必要となる要素技術と研究方針について整理を行った。第3章では、自動運転システムの車両制御の安全性に関する評価手法の検討を実施した。本章では、自動運転システムの周りを走行するドライバが衝突する危険とドライバが感じる危険感から自動運転システムの車両制御を評価する手法を検討した。その結果、自動運転システムとドライバが運転する車両が混在する混合交通(以下、混合交通流)を想定した新たな自動運転システムの車両制御の評価手法を提案することを可能とした。第4章では、自動運転システムが高速道路での実現から計画されていることを踏まえて、高速道路を自動運転中にドライバが睡眠状態に陥ると、高速道路出口付近にて出眠したばかりのドライバが適切に運転操作引き継ぐことが可能であるのかを検討することである。その結果、出眠したばかりのドライバは、市街地を走行中において、ブレーキ操作の反応時間が遅く、ブレーキペダルも強く踏み込むことができず、飛び出してくる歩行者と衝突する危険が高くなるという結論を得た。第5章では、第4章の結論を踏まえて、高速道路で睡眠中のドライバに対して、効果的な覚醒手法の検討を実施した。その結果、エアコンの送風と座席のシート振動による刺激を5分間与えることによって、出眠したばかりのドライバは覚醒時と同等のブレーキ操作の反応時間とブレーキペダル踏力を引き出すことができ、歩行者との衝突を回避できることを得た。第6章では、市街地を安全にドライバが運転すること、また、市街地における自動運転システムの実現という観点から夜間でのドライバとカメラ等のセンサの視界確保向上に必要となる自動配光制御システムに対する歩行者の被視認性を検討した。その結果、歩行者に対して、首下を照射することによって、歩行者に対して幻惑を与えず走行ビームと同等の視認性を確保できることが得られた。第7章では、各テーマに対しての結論を整理して、本研究を統括する結論を述べている。

Abstract

This study focused on the automated driving system which automotive manufacturers are working on development. In recent years, the automated driving systems are under development and have various problems. The purpose of this study is to consider and evaluate the new technologies in order to countermeasure the problems of the automated driving systems. This study is consisted of 7 chapter according this purpose.

In first chapter, it was sort out about the definition, requirement, problems, and so on for the automated driving systems. In second chapter, the new technologies in order to countermeasure the problems of the automated driving systems were sort out. Also, this study policy was sort out. In third chapter, the purpose of chapter is to consider that evaluating method for vehicle control of the automated driving systems. This evaluating method evaluates the vehicle control based on risk feeling of driver who drives vehicle around the automated driving vehicle in this chapter. As a result, new evaluating method was possible to propose assuming mixed traffic flow by driver's vehicle and the automated driving vehicle. In fourth chapter, the purpose this chapter is to evaluate driver's driving characteristics of driver when the system switches from automated driving to manual driving. At first, automated driving system will be used limited area such as highway. Therefore, the driver possible to sleep on highway using the automated driving system. In the exit of highway, it is important for the driver to take over the driving operation from the automated driving systems. This chapter examined about this content. As a result, it was found out that the driver who just awake from sleeping cannot avoid the collision with a pedestrian which is rushing out of the blind spot in city road. Because driver's brake pedal operation is too late and weak compared to the awake state. In fifth chapter, the effective awakening method for the driver who is sleeping on highway was investigated based on the result of chapter 4. As a result, it was found out the stimulations for 5 minutes by air condition and vibration of seat are effective for the driver who is sleeping on highway. In sixth chapter, the purpose of this chapter is to evaluate a pedestrian visibility by automotive headlight which is controlled automatically. This headlight system is very useful for driver to drive vehicle safely in city road. Also, this headlight system is necessary for the automated driving vehicle in city road because visibility performance of camera is improved by the system. This chapter examined about this content. As a result, it was found that the headlight system that can illuminate down from the pedestrian's neck has almost same performance as high-beam headlight. Also, the headlight system can prevent pedestrian's glare of a headlight. In seventh chapter, each conclusion was sort out and conclusion that summarized each conclusion was stated.

第1章 序論

1-1. 研究背景

1-1-1. 交通事故の削減と自動運転システム

内閣府は、平成28年3月に策定された第10次交通安全基本計画⁽¹⁾において、道路交通の安全目標として、平成32年までに交通事故による24時間死者数（以下、交通事故死者数）を2,500人以下とし、世界一安全な道路交通を実現しようとしている。図1-1は、国内における交通事故死者数を示す。2018年の交通事故死者数は、3,532人となっており⁽²⁾、過去最少の交通事故死者数を記録しているが、同国家の目標（2,500人以下）達成は厳しい状況となっている。交通死亡事故件数の内訳を分析すると、約9割がドライバの違反（「漫然運転」「脇見運転」「運転操作不適」「安全不確認」等）によって発生したものである⁽³⁾。つまり、ほとんどの交通死亡事故は、ドライバの運転操作ミス（以下、ヒューマンエラー）によって引き起こされたものであるといえ、ドライバが適切に運転操作を行うことができれば、約9割の交通死亡事故の削減につながると考えられている。しかしながら、ドライバは長時間の運転による疲労や気の緩みから、常に適切に運転操作を行うことができないと考えられる。これらドライバのヒューマンエラーによる交通事故の削減に寄与すると考えられているのが自動運転システムである。

府省庁の分野横断の取組である戦略的イノベーション創造プログラム（以下、SIP）自動走行システムの研究開発計画⁽⁴⁾（2017年4月1日公表）の中で、自動運転システムの市場化等期待時期として、2020年までにSAEでの自動運転レベル3に向けたステップとなる自動運転レベル2を実現するため、所要の技術の確立を図るとしているほか、さらに2020年を目途に自動運転レベル3、2025年を目途に自動運転レベル4のシステムの市場化がそれぞれ可能となるよう、協調領域に係る研究開発を進めるとしている。また、現在普及している衝突被害軽減ブレーキ（以下、AEB）が、全車両に搭載されると全追突事故の52%を削減できることが報告⁽⁵⁾されている（図1-2参照）。交通事故を削減するためには、ドライバのヒューマンエラーをAEBのような安全運転支援システムや自動運転システムに関連する技術がカバーするという考えが重要であり、この構想の先に安心安全社会の実現が成り立つと考えられている。

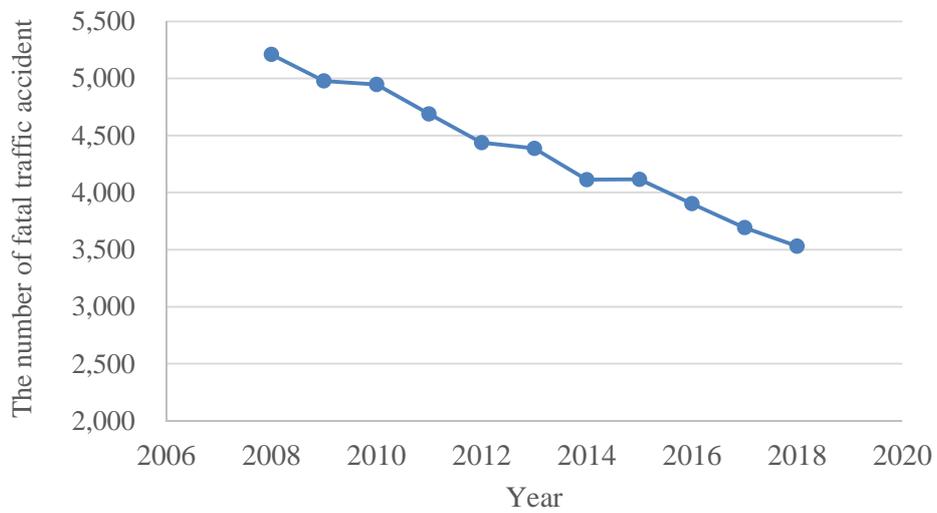


図 1-1 交通事故死者数⁽²⁾

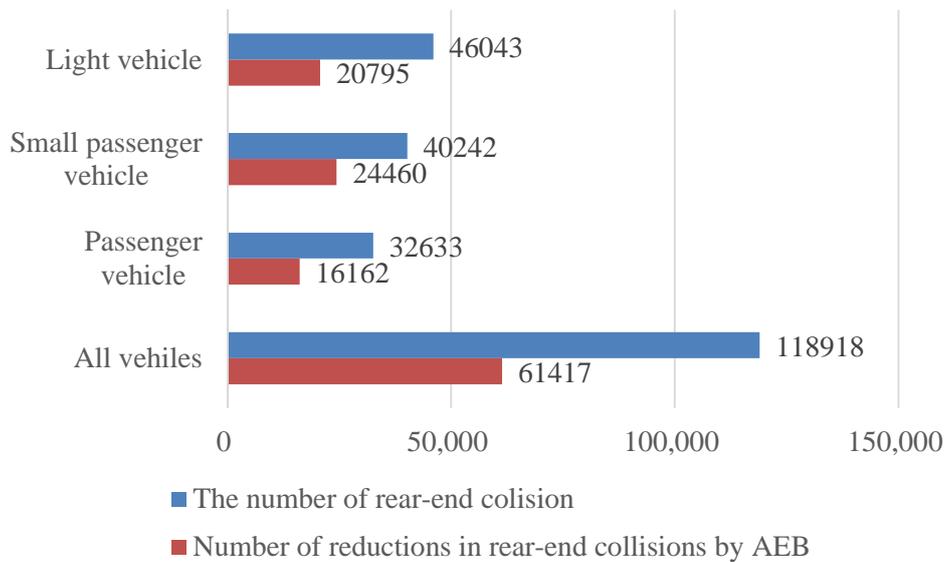


図 1-2 平成 29 年の AEB による追突事故低減効果の推定⁽⁵⁾

1-1-2.自動運転システムの定義

Society of Automotive Engineers（以下、SAE）が完全自動運転に至るまでのロードマップを定義しており、自動運転システムの性能ごとにレベル分けを行っている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。表 1-1 は、SAE が定義している自動運転システムのロードマップを示す⁽⁸⁾。このロードマップにおいて、完全自動運転システムは自動運転システムレベル 5 に位置付けられており、システムのレベルが上がるにつれ、ドライバから自動運転システムが運転操作を担う範囲が増えることとなる。自動運転システムレベル 0（運転支援なし）は、ドライバが全ての運転操作を行い、運転操作の責任もドライバが負うこととなる。次に自動運転システムレベル 1（運転支援）は、加速・操舵・制動制御のいずれかをシステムが制御するが、運転操作の責任はドライバが負うこととなる。また、自動運転システムレベル 2（部分的自動運転）は、加速・操舵・制動制御に対して、複数の制御を同時にシステムが行う一方で、運転操作の責任はドライバが負うこととなる。さらに自動運転システムレベル 3（条件付き自動運転）は、限定的な環境下もしくは交通状況のみに全ての運転操作をシステムが制御するが、システムの異常時や機能限界による要請があった場合、ドライバが運転操作を引き継ぐこととなる。この自動運転システムレベル 3 に至っては、システム作動中において、ドライバは運転操作から解放されることとなるが、自動運転システムからの要請を受けた場合、運転操作を引き継がなくてはならないことから、ドライバは常に自動運転システムの監視を行う義務が発生する。なお、運転操作の責任は、システムが運転操作を行っている際はシステムの責任、システムの要請を受けてドライバが運転操作を引き継いだ場合、ドライバが責任を負うこととなる。よって、ドライバが適切に運転操作を引き継ぐには、自動運転システムが何秒前にドライバへ警告を促すことが求められるのか、ドライバに許容されるセカンドタスク等についての議論や研究⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が報告されている。さらに、自動運転システムレベル 4（高度自動運転）は、特定の状況下（例：高速道路）のみ、全ての運転操作の制御をシステムが行い、その状況下が続く限りドライバが運転操作に関与する必要がなく、運転操作の責任もシステムが負うこととなる。自動運転システムレベル 4 においては、基本的にドライバが運転操作に関与する必要がなく、ドライバが睡眠をとることも許容される可能性がある。最後に、自動運転システムレベル 5（完全自動運転）は、完全な無人運転を可能とするものであり、ドライバがオーバーライドする必要もなく、運転操作と周辺監視を全て自動運転システムにゆだねることができる。

表 1-1 自動運転システムのロードマップ (SAE J3016) ⁽⁸⁾

Definition of level	Definition of automated driving system	Driving responsibility
Level 0 No Driving Automation	The performance by the driver of the entire DDT, even when enhanced by active safety systems	Driver
Level1 Driver Assistance	The sustained and ODD-specific execution by a driving automation system of either the lateral or the longitudinal vehicle motion control subtask of the DDT (but not both simultaneously) with the expectation that the driver performs the remainder of the DDT.	Driver
Level2 Partial Driving Automation	The sustained and ODD-specific execution by a driving automation system of both the lateral and longitudinal vehicle motion control subtasks of the DDT with the expectation that the driver completes OEDR subtask and supervises the driving automation system.	Driver
Level3 Conditioned Driving Automation	Sustained and ODD-specific performance by an ADS of the entire DDT with the expectation the DDT fallback-ready user is receptive to ADS issued requests to intervene, as well as DDT performance relevant system failures in other vehicle systems, and will respond appropriately.	Driver/System
Level4 High Driving Automation	The sustained and ODD-specific performance by an ADS of the entire DDT and DDT fallback without any expectation that a user will respond to intervene.	System
Level5 Full Driving Automation	The sustained and unconditional (i.e. not ODD-specific) performance by an ADS of the entire DDT and DDT fallback without any expectation that a user will respond to intervene.	System

1-1-3.自動運転システムの高速道路での運用

日本での自動運転の実用化に向けた動向として、2013年に国土交通省の自動運転システムに関する検討会が2020年代初頭に高速道路での自動運転システムの実現を目指す内容を提示した。図1-3は、国土交通省が提示した自動運転システムにおける走行範囲のイメージを示す⁽¹¹⁾。自動運転システムの走行範囲は、インターチェンジ及びサービス・パーキングエリアの合流部から高速道路本線に流入しジャンクション等を経て高速道路本線からインターチェンジへ退出する分流部までの範囲を対象としている。また、内閣府が自動運転システムを実現するためのロードマップを示した⁽¹²⁾（図1-4参照）。このロードマップによると2020年代初頭ごろまでに、高速道路本線上で、混雑時の最適走行を除く高度な運転支援システムによる連続走行、2020年代初頭以降に、分合流部、渋滞多発箇所など、混雑時の最適走行を含む高速道路本線と連結路で高度な運転支援システムによる連続走行を実現するとしている。このように、完全自動運転システムの実現までには、ドライバーが常に自動運転システムの運転を監視し、ドライバーの責任のもとで自動運転を使用する運用方法が検討されている。この運用方法では、自動運転システムが故障や機能限界になった場合には、自動運転の機能を停止し、ドライバーへ運転操作を移譲させる可能性がある（自動運転システムレベル3）。自動運転システムレベル3は、ドライバーがシステムの制御を注意深く監視できれば、切り替え時においてドライバーが運転操作を適切に引き継ぐことができると考えられる。しかしながら、ドライバーの注意力が散漫である状況において、ドライバーは自動運転から運転操作を適切に引き継ぐことができない可能性が示唆されており、数々の研究が報告されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。特に自動車基準調和世界フォーラム（以下、WP.29）においては、ドライビングシミュレータを用いた自動運転操舵システムの故障時におけるドライバーへのテイクオーバーリクエストのための適切なHMIの検討をしており、ドライバーが適切に運転操作を引き継ぐには、システムが故障してから4秒間機能を維持させることが重要であると報告されている⁽⁹⁾。また、国際会議においては、ドライバーのセカンドタスクとして、どこまでが許容されるべきなのかが議論されている。このように現在は、自動運転システムレベル3導入に向けた取り組みが主となっている。一方で、限定エリアでのドライバーの監視義務が生じない完全自動運転システム（自動運転システムレベル4）においても考えてみると、ドライバーは高速道路の自動運転中に運転に従事しなくて良いことになるが、高速道路の出口付近において、適切に自動運転システムから運転操作を引き継ぐ必要がある。しかしながら、高速道路を自動運転中にドライバーが深い睡眠状態に陥ると、高速道路出口付近において、出眠したばかりのドライバーが運転操作を引き継ぎ、市街地を適切に運転できない危険性が生じるが、その危険性について論じている研究報告がない状況である。よって本研究では、自動運転システムレベル5を見据えたうえで、自動運転システムレベル4について、議論を行うこととする。

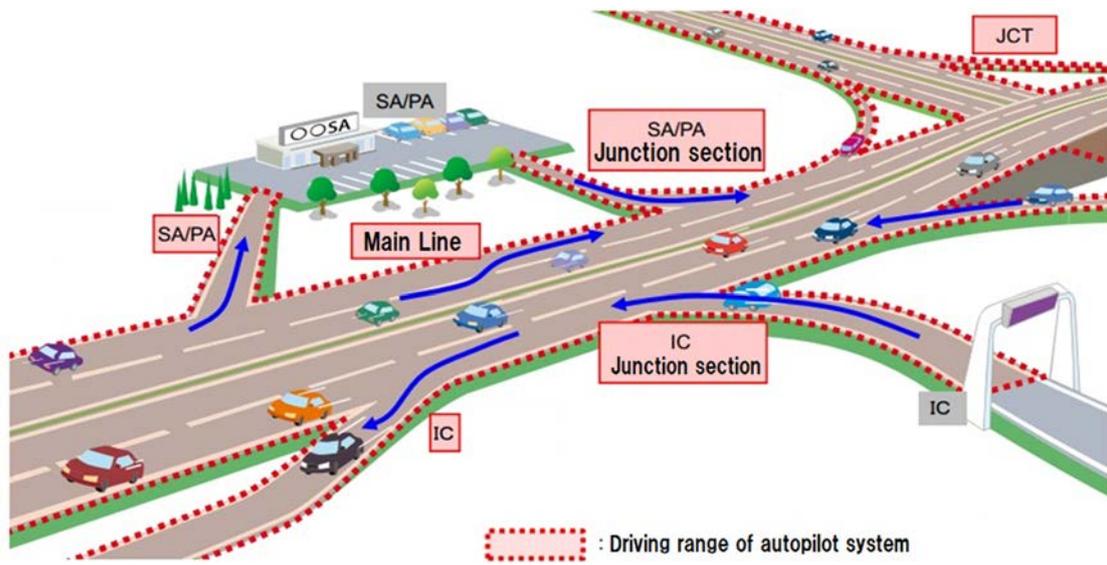


図 1-3 自動運転システムの運用範囲⁽¹¹⁾

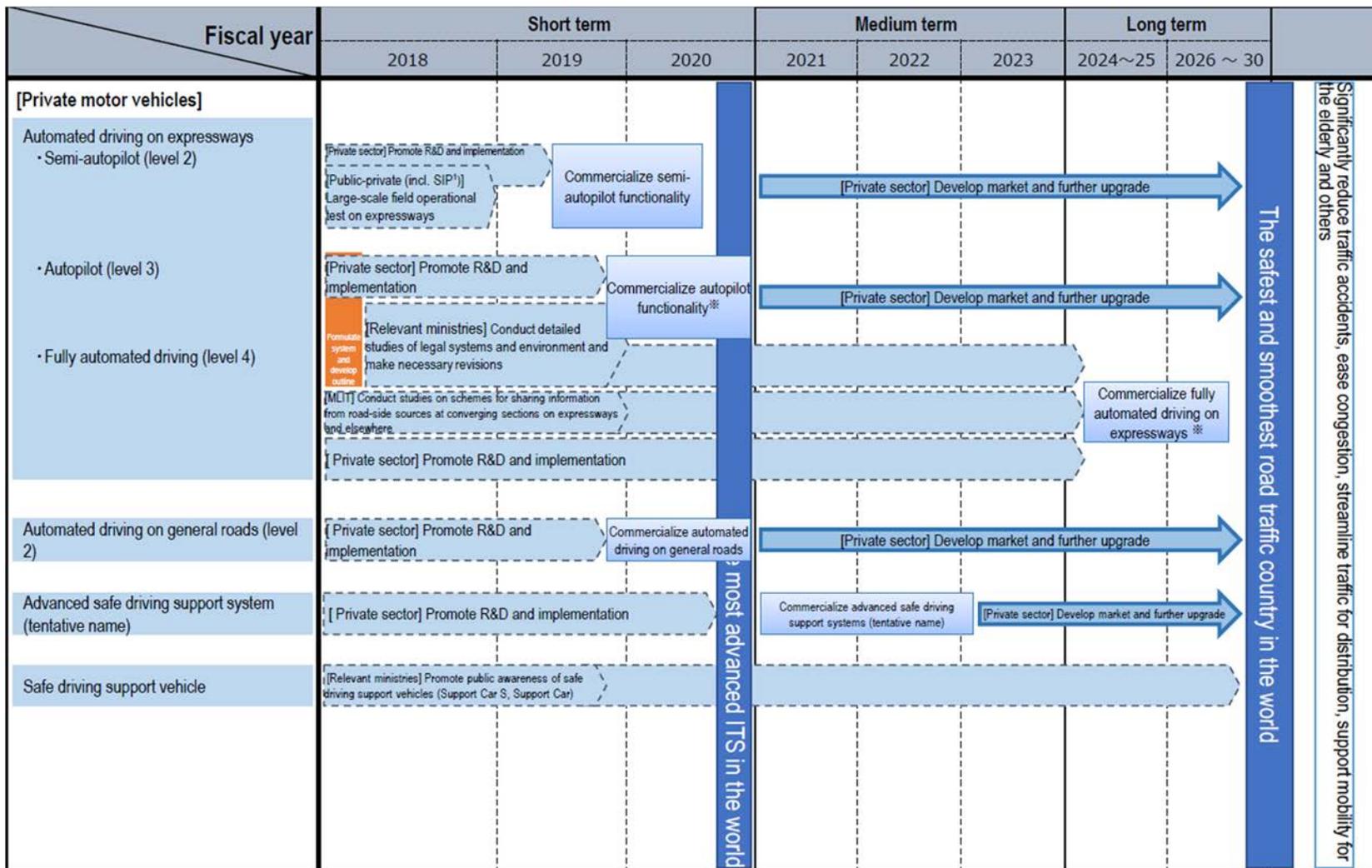


図 1-4 自動運転システムのロードマップ⁽¹²⁾

1-1-4. 自動運転システムの安全技術ガイドライン

1-1-4-1. ガイドライン策定の背景と目的

政府が高速道路での自動システムレベル3の市場化や実現を目指すにあたり、ガイドライン⁽¹⁸⁾の策定を行った。自動運転システムレベル3以上の高度な自動運転システムの実現は、車両の安全基準や交通ルール等の多岐にわたる道路交通関連法規について見直しが必要であり、「自動運転に係る制度整備大綱」（平成30年4月高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議決定）において、2020年以降2025年頃の導入初期段階を想定した道路交通関連の法制度の見直しに関する政府全体の方向性がとりまとめられ、国を挙げて自動運転システムレベル3の早期実用化に向けた取り組みを実施している。このような背景をふまえ自動運転システムの普及に伴い、ドライバーによる運転操作を前提とした従来の車両の安全基準に加え、自動運転システムに対する新たな安全基準や安全性評価手法が求められる。現在、全国各所において官民を挙げた実証実験・検討が進められるとともに、自動車の安全・環境基準の国際的な調和を図る場である WP.29 において、AEB や自動運転操舵、サイバーセキュリティ等の自動運転システムに係る国際的な安全基準や安全性評価手法の策定に取り組んでいるところである。本ガイドラインは、自動運転システムの国際的な議論を踏まえた安全基準や安全性評価手法が策定されるまでの間においても、適切に安全性を考慮した自動運転システムの開発、実用化を促すことを目的として策定されたものである。なお、本ガイドラインは、自動運転システムが安全に運用されるために満たすべき基本的な方針を示したものであり、今後の技術開発や国際基準の策定動向等を踏まえ、適宜見直されるものである。

1-1-4-2. 自動運転システムの安全要件

交通死亡事故の多くがドライバーの違反やヒューマンエラーによって生じることから、自動運転システムの実用化により、大幅な交通死亡事故の削減が期待されている。このため、自動運転システムは、各レベルに応じた走行条件下において、高度な認知、判断及び操作が求められる。また、自動運転システムの実現により、高齢者等の移動支援、物流サービス等における運転手不足への対応等、道路交通に関する様々な課題を解決することが期待されているが、現状として、自動運転システムは開発途上の技術であり、様々な問題を抱えている。自動運転システムの社会受容性を考慮すると、ドライバーが自動運転システムを正しく理解し使用すること、自車及び周囲の道路交通の安全が確保されることが必要である。以上を踏まえ、本ガイドラインでは、自動運転システムが安全に普及するために自動運転システム関わる交通事故を防ぐことを目標として設定している。この目標を達成するために自動運転システムが満たすべき車両安全の定義を、「許容不可能なリスクがないこと」、すなわち、自動運転システムの運行設計領域（以下、ODD）4において、自動運転システムが引き起こす人身事故であって合理的に予見される防止可能な事故が生じないことと定め、この定義に基づいて自動運転システムが満たすべき車両安全要件を設定し、その安全性を確保することが規定されている。現段階では、本ガイドラインにおいて、自動運転システムの安全性に関して 10 個の項目が設定されている（表 1-2 参照）。

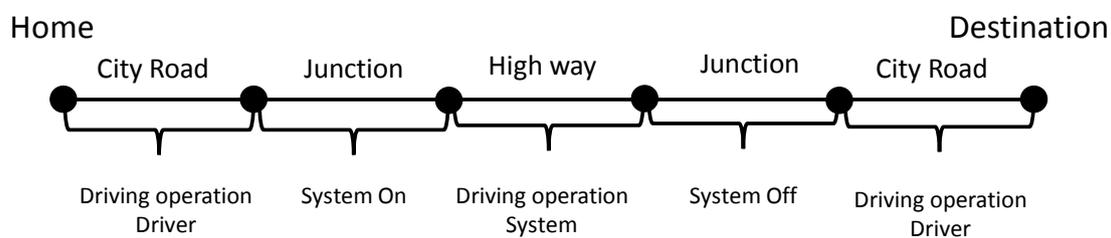
表 1-2 自動運転システムの安全性に関する項目⁽¹⁸⁾

Vehiclesafety item	Mainrequirements
Settingof ODD	Set the operational design domain (specific design conditions related to the driving environment based on which an automated driving system operates properly: ODD) according to the performance of individual automated vehicles and use conditions to limit the driving environment and the way they are used
Safetyof automated driving systems	<ul style="list-style-type: none"> • Ensure systemsafety by providing redundancy to control or sensor systems, etc. • Automatically stop a vehicle safely when it is difficult to continue automated driving, such as when the situation becomes outside of the set ODD, etc
Compliancewith Safety Regulations, etc	<ul style="list-style-type: none"> • Comply with the existing Safety Regulations for Road Vehiclesrelated to automated driving • Compliance with related international standards such as ISO is recommended

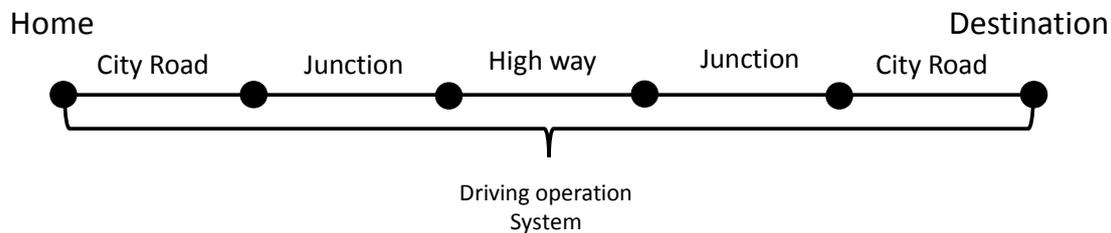
Humanmachine interface (HMI)	<ul style="list-style-type: none"> • Install HMI that has the following functions to notify the driver or passengers of the operation status of the automated driving system:- For conditional automated driving vehicles, to monitor to see if the driver is ready to take over driving from the system and issue an alarm as necessary (driver monitoring system, etc.) • For conditional full automated driving vehicles, to inform the driver or passengers (a person responsible for operation) in advance that the system has determined that it is difficult to continue automated driving and will stop the vehicle automatically
Installation of data recording devices	Have a device that records the operational status of the automated driving system, the status of the driver, etc.
Cybersecurity	Design and develop vehicles that take account of cybersecurity such as measures against automated vehicle hacking, etc. based on the most recent requirements on cybersecurity by the UN (WP.29) or other organizations
Safety of vehicles used for unmanned driving services (additional requirement)	For automated vehicles used for unmanned driving services (conditional full automated driving), in addition to requirements (i) to (vi), have a camera that enables the operation control center to monitor the situation inside the vehicle, etc. and a function to automatically send a notification to the operation control center when the vehicle is stopped at emergency
Safety evaluation	Verify and confirm safety in advance by conducting simulations, and test track and road tests in adequate combination for rationally foreseeable hazardous events within the set ODD
Safety of in-use vehicles	Take measures such as maintenance (inspection) of automated vehicles and cybersecurity software update, etc. to ensure safety of in-use vehicles
Information provision to automated vehicle users	Take measures to inform the users of automated vehicles how to use the system, scope of ODD, functional limitations, etc

1-1-5. 自動運転システムの使用方法についての整理

上述したように自動運転システムレベル3の導入においては、国内におけるガイドラインが発表され、国際的な議論も行われており、現在取り組んでいるところである。一方で、自動運転システムレベル4については、ガイドラインの策定に資する研究報告は数少ない。よって、本研究では自動運転システムレベル5を見据えたうえで、自動運転システムレベル4について、本論文を展開する。まず、自動運転システムレベル4とレベル5を使用する際の流れを図1-5に整理する。上述したように自動運転システムレベル4は、高速道路を想定して運用される方針となっている。よって、目的地までの高速道路での走行範囲が、自動運転システムが運転操作を担う部分であり、ドライバーは市街地での運転を担うこととなる。ここで問題となるのが、自動運転システムが高速道路において、安定して走行することが可能であるのか。また、自動運転システムの車両制御について安全性をどう担保するのかが重要となってくる。加えて、自動運転システムレベル4を想定するとドライバーは、高速道路走行中において、睡眠を取ることも可能になる。そこで、高速道路出口付近で出眠したばかりのドライバーが、自動運転システムから運転操作を引継ぎ、市街地を適切に運転することが求められる。一方で、自動運転システムレベル5では、現在地から目的地まで自動運転システムに運転操作を全てゆだねることから、運転操作の引き継ぎに関する問題は一切生じない。一方で、自動運転システムの車両制御について安全性をどう担保するのかがより重要となってくる。



(a) 自動運転システムレベル4



(b) 自動運転システムレベル5

図 1-5 自動運転システムの使用イメージ

1-2. 自動運転システムの課題

上述するように自動運転システムレベル4では、高速道路において自動運転システムの車両制御における安全性を担保することが必要になる。本研究においては、この安全性を担保するために車両制御を評価する手法を検討することとした。また、運転操作を引き継いだドライバーが市街地を安全に運転することも重要となる。高速道路での自動運転走行中において、ドライバーは睡眠をとることが可能である。そこで、高速道路出口付近で出眠したばかりのドライバーが、自動運転システムから運転操作を引継ぎ、適切に市街地を運転できるように効果的な覚醒手法を検討することとした。なお、市街地においては、夜間における歩行者との衝突事故割合が最も多いことから、歩行者にグレアを与えないうえでドライバーの視界確保を向上させる **Adaptive Driving Beam** (以下、**ADB**) のような安全運転支援システムも自動運転システムの根幹を支える技術であり、本システムに対する歩行者の被視認性についても合わせて検討することとした。一方で、自動運転システムレベル5では、車両制御における安全性の担保と夜間での高速道路及び市街地における自動運転システムの実現が重要となる。よって、自動運転システムレベル5においても、自動運転システムの車両制御を評価する手法と **ADB** に対する歩行者の被視認性の検討が必要である。

1-2-1. 自動運転システムによる車両制御の安全性評価

現在、自動運転システムの車両制御の開発は、数々の研究が報告されている。例えば、高速道路を想定した自動運転システムの合流モデル⁽¹⁹⁾や他車両を想定した自動運転システムのレーンチェンジの経路計画⁽²⁰⁾⁽²¹⁾と速度制御⁽²²⁾に関する数々の研究が報告されている。また、高速道路においてのトラックの隊列走行を目指したコーペラティブ・アダプティブ・クルーズ・コントロール (以下、**CACC**) に関する車両制御についても研究が報告⁽²³⁾⁽²⁴⁾されている。このように、自動運転システム自体の車両制御や他車両との衝突を避けつつ、最適な行動経路選択を行うアルゴリズムとそれに準ずる車両制御について数々の研究がある。一方で、自動運転システムとの混合交通流を想定した手動運転の車両を運転するドライバーが、感じる精神的負担や追突の危険性について報告している研究⁽²⁵⁾も存在する。本研究によると自動運転システムのような高度な車両制御を行う車両が普及するにつれ、周りを走行するドライバーは精神的負担が大きく、自動運転システムの高度な車両制御に対して、ドライバーが反応しきれず衝突事故を引き起こす可能性が高いことが示唆されている。混合交通流では、自動運転システムには周りを走行するドライバーにとって、安全である車両制御が求められる。これを実現するためには、自動運転システムの周りのドライバーが自動運転システムの車両制御を予測できること、自動運転システムの車両制御に対して危険を感じないことが重要であると考えられる。そこで、自動運転システムの車両制御は、周りを運転するドライバーによって評価されることが重要であると考え、自動運転システムの車両制御を評価する手法を提案することとした。

1-2-2. 自動運転システムからドライバへの運転操作の引継ぎ

自動運転システムの運用において、自動運転システムからドライバへの運転操作の引継ぎは、重要な課題である。特に自動運転システムレベル3について、運転操作の引継ぎに関する数々の研究が報告されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。本研究においては、自動運転システムの機能限界をむかえ、ドライバに運転操作を安全に引き継ぐための余裕時間について検討を行っている。また、自動運転システムから運転操作を引き継ぐために適切な方法も検討を行っている。加えて、自動運転中においては、監視義務が生じる自動運転レベル3でさえ、ドライバの覚醒度が低下し、運転操作の引継ぎに対する危険性を示唆している。

一方で、自動運転システムレベル4について整理すると、ドライバは高速道路の自動運転中に運転に従事しなくて良いことになるが、高速道路の出口付近において、出眠したばかりのドライバが自動運転システムから運転操作を引き継ぐ必要がある。しかし、高速道路を自動運転中に、ドライバが睡眠状態に陥ると、出口付近にて運転操作を引継ぎ、市街地を適切に運転できない可能性がある。自動運転システムの普及前では、運転しているドライバに対して居眠り防止を目的とした研究が数々報告されている。その中でも、エアコンの送風と座席の振動による刺激がドライバの居眠り防止として効果的であるという報告もある⁽²⁹⁾。しかしながら、自動運転システムの普及に伴い、これまでの居眠り防止という観点ではなく、ドライバが一度睡眠をとった状態から効果的に覚醒させる手法の検討が必要である。

1-2-3. 市街地での自動運転システムの実現

自動運転システムレベル4の使用方法について整理すると、市街地ではドライバが自動運転システムから運転操作を引き継ぐこととなる。つまり、自動運転システムレベル4が普及しても、市街地での交通事故は引き続き発生する可能性が高い。市街地で発生する交通事故は、夜間において歩行者と車両との衝突事故(以下、対歩行者の衝突事故)が最も多く、ドライバからの歩行者の見易さ(以下、歩行者の被視認性)が問題となっている。現在では、歩行者にグレアを与えないよう顔から下の部分を照射して、ドライバの視界確保を実現するADBといったシステムの導入が図られつつあり、対歩行者の衝突事故の回避支援についての研究も報告されている⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。また、自動運転システムレベル5の使用方法について整理すると、夜間の市街地も含めた完全自動運転を実現することが必要となる。Uber社が自動運転システムの実証実験において、歩行者と衝突事故を起こしている。これは、夜間でのカメラ等のセンサによる歩行者の検知ができず、自動運転車が歩行者を回避することができなかったためである。対象物の検知は、カメラが主流であり、カメラのセンシング性能の向上を目的とした配光制御が重要となる。ADBは自動運転システムレベル4とレベル5の根幹を支える技術であると考え、ADBによる歩行者の被視認性を検討した。

1-3 研究目的

上述したように本研究は、混合交通流を想定とした自動運転システムの車両制御に関する安全性を担保するために車両制御の安全性評価手法を検討することを目的としている。また、高速道路において睡眠したドライバーが市街地で運転する危険性と、ドライバーを短時間で覚醒させるのに効果的な手法を検討することを目的としている。なお、自動運転システムの実現には、夜間におけるドライバーとカメラの視界確保向上を目的とした ADB が重要であると考え、本システムによる歩行者への被視認性についても合わせて検討することとした。

第2章 研究の構成

2-1. 各章の研究目的

本研究では、各章ごとに以下の研究内容を検討する。

●自動運転システムの前後方向の車両制御の安全性評価手法検討に係る研究

混合交通流において、自動運転システムの車両制御は、周りを運転するドライバーの妨げにならない車両制御が求められる。本研究は、自動運転システムの車両制御について、周りのドライバーが感じる衝突の危険感と衝突の有無から自動運転システムの車両制御の安全性を評価する手法について検討する⁽³²⁾。

●出眠時における手動運転に遷移する際のドライバーの運転特性に関する検討

自動運転システムレベル4の使用方法について整理すると、高速道路において自動運転中にドライバーは睡眠を取ることが可能である。そこで、高速道路での自動運転中において、ドライバーが睡眠を取ることを想定し、高速道路の出口付近において出眠したばかりのドライバーが運転操作を引継ぎ、市街地を適切に運転できるのかを検討する⁽³³⁾。

●出眠時における手動運転に遷移する際の刺激による覚醒効果に関する研究

高速道路の自動運転中において、ドライバーが睡眠を取ることを想定し、高速道路の出口付近において出眠したばかりのドライバーが運転操作を引継ぎ、市街地を適切に運転できないことを踏まえたうえで、出眠したばかりのドライバーが覚醒時と同等の運転操作を行うことが可能になる覚醒手法について検討する⁽³⁴⁾。

●前照灯照射範囲の違いによる歩行者の被視認性の検討

自動運転システムレベル4の使用方法について整理すると、市街地ではドライバーが運転操作を引き継ぎ運転することとなる。市街地の交通事故においては、夜間での歩行者と車両の衝突事故が最も多く、ドライバーの視界確保が重要となる。また、自動運転システムレベル5では、夜間での市街地における自動運転システムの実現を目的としたカメラの視界確保が重要となる。そこで、本研究では、歩行者に対して眩感させない、かつ遠方まで照射することが可能であるADBが、自動運転システムの根幹を支える技術であると考え、ADBによる歩行者の被視認性を検討する⁽³⁵⁾。

2-2 各章の研究方針

本研究では、以下の研究方針に従い実施する。

●自動運転システムの前後方向の車両制御の安全性評価手法検討に係る研究

本研究では、まず交通事故分析により自動運転システムの車両制御を評価すべき環境を特定した。次に実車を用いた実験により、ドライバの運転操作による車両挙動を計測した。この計測データを基に、自動運転システムに実装される可能性が高い車両制御を分析し、ドライビングシミュレータ上で仮想自動運転システムを構築した。この仮想自動運転システムの車両制御について、周りを運転するドライバが感じる衝突の危険感及び衝突の有無によって、安全性を評価する手法を検討する。

●出眠時における手動運転に遷移する際のドライバの運転特性に関する検討

本研究では、ドライビングシミュレータを使用した実験により、高速道路出口付近で出眠したばかりのドライバが自動運転システムから運転操作を引継ぎ、市街地を運転する危険性を検討する。高速道路での自動運転中において、ドライバには一度睡眠を取ってもらう（脳波で睡眠状態を判定する）。その後、ドライバを警報によって起こし、市街地を運転させ、歩行者の飛び出しに対して適切にブレーキ操作を行えるのかを評価する。また、適切にブレーキ操作を行えたのかは、覚醒時のブレーキ操作と比較することによって分析する。

●出眠時における手動運転に遷移する際の刺激による覚醒効果に関する研究

本研究では、ドライビングシミュレータによる実験により、高速道路出口付近で出眠したばかりのドライバが自動運転システムから運転操作を引継ぎ、市街地を適切に運転するための覚醒手法について検討する。高速道路での自動運転中において、ドライバには一度睡眠を取ってもらう（脳波で睡眠状態を判定する）。その後、ドライバをエアコンと座席の振動による刺激によって起こし、市街地を運転させ、歩行者の飛び出しに対して適切にブレーキ操作を行えるのかを評価する。また、覚醒手法の効果は、覚醒時と覚醒手法による出眠時のブレーキ操作を比較することによって分析する。

●前照灯照射範囲の違いによる歩行者の被視認性の検討

本研究では、暗室を用いて実験を実施し、実験条件ごとにADBに対する歩行者の被視認性を検討する。暗室の中で明るさを調整し、スクリーンに首から下までの歩行者の画像（ADBを想定）を提示し、条件ごとに識別できるのかをアンケート調査によって評価した。また、歩行者全身の画像（走行ビームを想定）と足元だけ（すれちがいビームを想定）の画像を用意して、同様な実験を行い、走行ビームとすれちがいビームに対する歩行者の被視認性についても比較検討する。

第3章 自動運転システムの前後方向の車両制御の安全性評価手法検討に係る研究

3-1. 研究概要と方針

混合交通流において、自動運転システムの車両制御は、周りを運転するドライバーの妨げにならない車両制御が求められる。本研究は、自動運転システムの車両制御について、周りのドライバーが感じる衝突の危険感及び衝突の有無から安全性を評価する手法を検討する。本研究の方針は、以下のとおりである。

- ① 日本で発生した交通事故分析を行い、自動運転システムの車両制御を評価する交通環境を明らかにする。
⇒ 日本では、単路における追突事故が最も多く発生している⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾。この追突事故に関わる自動運転システムによる制動制御の安全性を評価する手法を検討する。
- ② ドライバーが追従時において確保する車間距離について実車を用いて計測する。この計測した車間距離の平均値と標準偏差を基に自動運転システムの制動制御を評価する際の追従車間距離を決定する。
⇒ ドライバーが追従時に確保する車間距離の平均値は、28.3mであり、標準偏差は9.1mであった。
- ③ ドライバーが過去に行ったことがある急制動を再現させ、車両速度を計測する。車両速度を目的変数、時間を説明変数として回帰分析を行い、基準となる制動制御を設計する。
⇒ 計測データを基に基準となる制動制御を設計した。この基準となる制動制御の平均減速度は 4.64m/s^2 であり、この平均減速度を基準（減速度の割合：100%）として評価する制動制御パターンを設計した。
- ④ ②,③の結果を基に、自動運転システムの制動制御の安全性を評価する制動制御パターンを設計する。
⇒ 追従時の車間距離を3水準（28.3, 19.2, 9.1m）、制動制御時の減速度を6水準（80, 100, 130, 160, 172, 200%）設定し、全部で18水準の自動運転システムの制動制御パターンを設計した。
- ⑤ ドライビングシミュレータ（以下、DS）上で仮想自動運転システムの後方をドライバーが追従する混合交通流を構築し、仮想自動運転システムに④で設定した制動制御パターンを実装し、その安全性について後方車両を運転するドライバーが感じる追突の危険感及び追突の有無によって評価する。
⇒ 本評価結果から、仮想自動運転システムの制動制御パターンについて、後方車両が追突する条件（追従車間距離と制動制御時の減速度）及びドライバーが追突の危険を感じた条件、ドライバーが追突の危険を感じなかった条件に分類する評価手法を確立した。

3-2. 交通事故分析

3-2-1. 交通事形態別における交通事故の発生割合

まず、自動運転システムの車両制御を評価するための交通環境を明らかにするために、2016年に日本で発生した交通事故を分析した。図3-1は、交通事故形態別における交通事故の発生割合を示す⁽³⁶⁾。追突事故の発生割合は36.7%と最も高く、次いで交差点時の衝突事故の発生割合が24.4%、そして衝突事故の発生割合が17.2%を占める。これらの交通事故の割合を合計すると78.3%となり、交通事故全体の約80%を占める。

そこで、これら3つの事故形態の交通事故に着目し、過去5年間に遡る交通事故の発生割合を分析した。図3-2は2011～2016年の事故形態別における交通事故の発生割合を示す⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾。本分析から、過去5年間においても追突事故が30%以上を占め、増加傾向にあることを得た。また、過去5年間についても、2016年の結果と同様に、追突事故、交差点時の衝突事故、衝突事故の割合が全体の約80%を占める。つまり、過去6年間において追突事故が最も多い交通事故であることがわかる。本研究では、この追突事故に関わる制動制御に着目し、自動運転車の安全性を評価することとした。

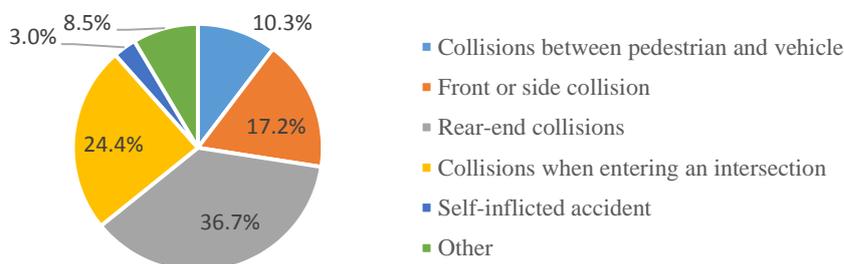


図3-1 交通事形態別における交通事故の発生割合（2016年）⁽³⁶⁾

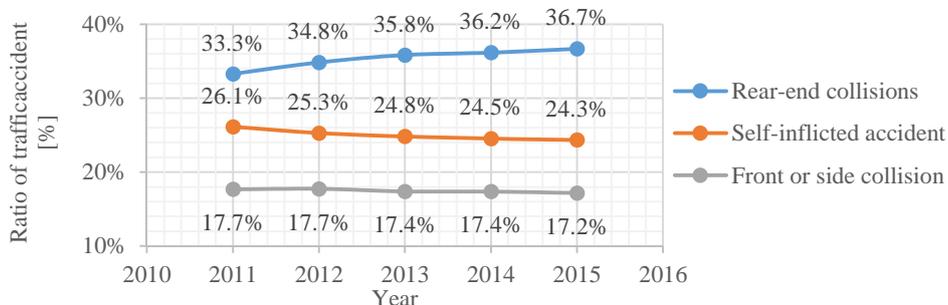


図3-2 交通事形態別における交通事故の発生割合（2011-2015年）⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾

3-2-2. 道路形状別における追突事故の発生割合

次に、自動運転システムによる制動制御の安全性を評価するための道路環境を明らかにするために、追突事故が発生する道路形状を分析した。図 3-3 は、2016 年に日本で発生した道路形状別における追突事故の発生割合を示す⁽³⁶⁾。追突事故の割合は、カーブや曲がりなどが無い単路における直線（以下、単路直線）において、59.9%と最も多く、次いで交差点付近が 29.7%であった。単路直線と交差点付近での追突事故の割合を合計すると 89.6%となり、約 90%の追突事故を占めることとなる。

そこで、これら二つの道路形状に着目し、5年間に遡る道路形状別における追突事故の発生割合を分析した。図 3-4 は 2011～2016 年の道路形状別における追突事故の発生割合を示す⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾。本結果から、単路直線における追突事故は、過去 5 年間で最も多発する交通事故であり、約 60%を占めていることを示す。この交通事故分析の結果に基づき、単路直線における自動運転システムによる制動制御の安全性を評価することとした。

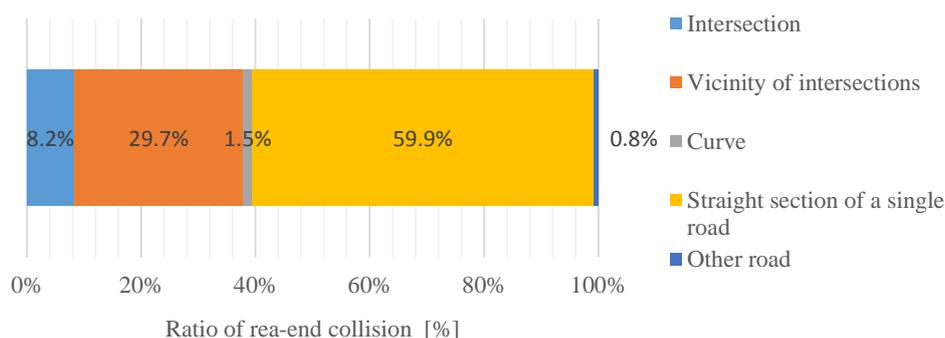


図 3-3 道路環境別における追突事故の発生割合（2016 年）⁽³⁶⁾

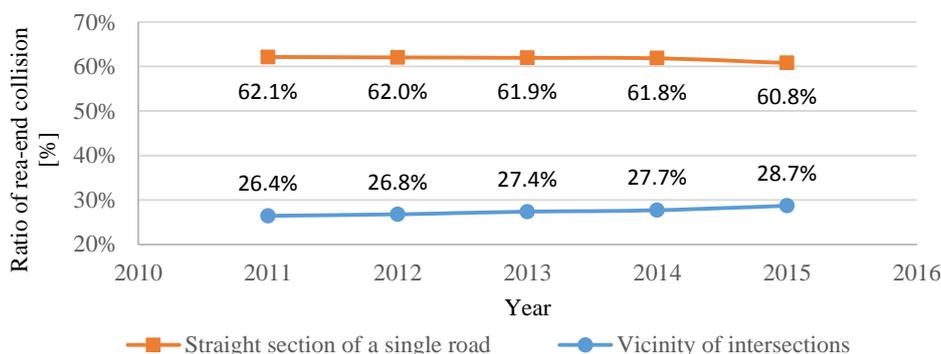


図 3-4 道路環境別における追突事故の発生割合（2011-2015 年）⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾

3-3. ドライバの制動制御に関する実験（実車実験）

3-3-1. 目的

本実験は、実車を用いて実験参加者が行う制動制御の減速度及び追従時に保つ車間距離を定量的に計測することを目的とする。

3-3-2. 実験方法

3-3-2-1. 実験環境

本実験は、交通安全環境研究所の走行試験路（図 3-5 参照）において実施した。

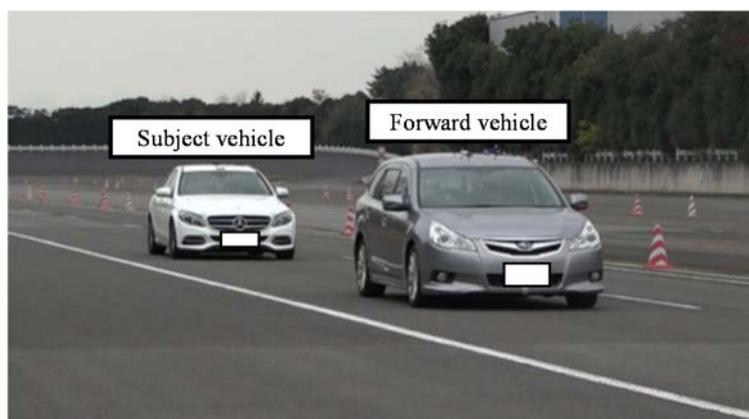


図 3-5 走行試験路

3-3-2-2. 実験装置

本実験は、以下の実験機器を用いて実施した。

【前方車両】自動運転ロボットによって制御される車両（図 3-6 参照）

車両：スバル製レガシー（DBA-BR9）

実験装置：AB Dynamics 製自動運転ロボット（SR15TD、Torus-S 及び CBAR）

VIOS 製高精度 GPS 装置

【実験参加者車両】実験参加者が運転する車両（図 3-7 参照）

車両：メルセデスベンツ製 C200（RBA-205042C）

実験装置：VIOS 製高精度 GPS 装置

【計測項目】

上記に示す実験装置の構成によって、以下の項目について計測を行う。

- ・ 実験参加者車両と前方車との車間距離
- ・ 実験参加者車両の車両速度



图 3-6 前方車両

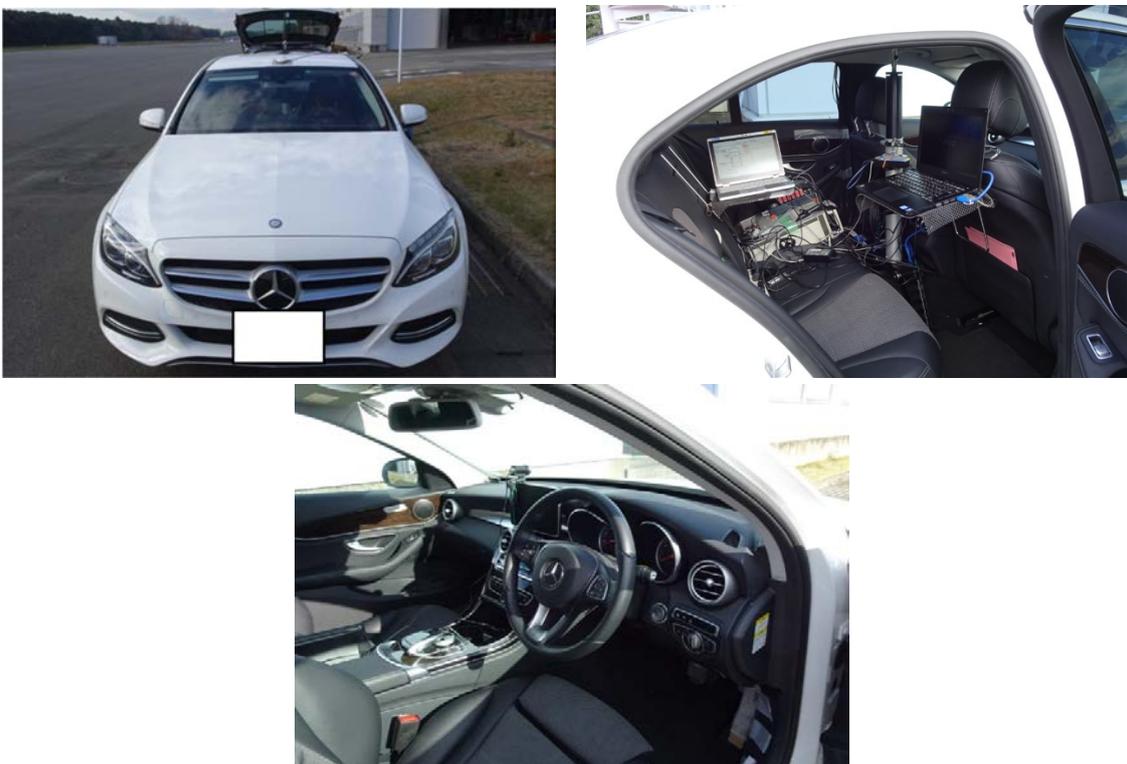


图 3-7 実験参加者車両

3-3-2-3. 実験参加者

実験参加者の人数は9名（男性：5名、女性4名）、平均年齢45.4歳（標準偏差：11.86）であった。本実験は、交通安全環境研究所における「人間を対象とする実験に関する倫理規定」に基づいて事前に審査が行われ、その承認のもとに実施した。実験参加者には、実験を開始する前に以下の内容を実施した。

- ① 実験参加者に対し実験内容の口頭説明を行い、実験参加者の同意（インフォームドコンセント）を得る。
- ② 実験参加者にアンケート（年齢、性別、免許保有年数、運転頻度）を記入させる。

3-3-2-4. 追従実験

本実験の目的は、自動運転システムの制動制御を評価する際の追従車間距離を設計するための基になるデータを得ることである。実験シナリオは、一般道（法定速度60km/h）を想定し、以下の手順で実施した。なお、実験回数は被験者ごとに5回とし、GPS計測器（図3-7参照）を用いて車間距離を計測した。

- ① 前方車両は、車両速度が8km/hから60km/hに達するまで加速（ 1.44m/s^2 ）した後、20秒間定速走行を行い、その後減速（ 4.81m/s^2 ）する。ただし、前方車両は後方を追従する実験参加者車両との追突の危険性を考慮し、8km/hまで減速し、15秒間定速走行を行うこととする。なお、再現性確保のため、前方車両は自動運転ロボット（図3-6参照）によって操作される。図3-8は、前方車両の時間変化による車両速度を示す。
- ② 実験参加者は、後方の車両を運転し、前方車両に対して追突しないように追従する。実験参加者は、前方車両の減速を確認後、普段通りに制動制御を行う。

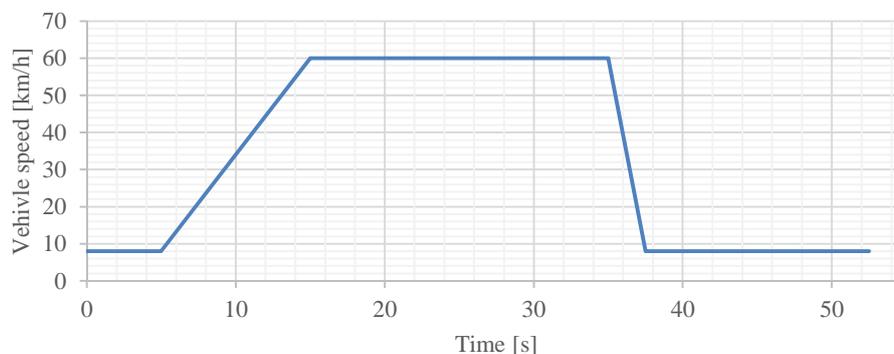


図 3-8 前方車両の時間変化における車両速度

3-3-2-5. 急制動実験

本実験の目的は、自動運転システムの制動制御を評価する際の減速度を設計するための基になるデータを得ることである。実験シナリオは、一般道（法定速度 60km/h）とし、以下の手順で実施した。なお、GPS 計測器（図 3-7 参照）を用いて車両速度を計測した。

- ① 走行試験路（約 1km）上に 100m 毎に停止線を設置する。実験参加者車両の車両速度が 60km/h で安定した後、実験参加者は自分で選択した停止線に向かって急制動を行う。なお、実験参加者は、車両速度の調整に、Adaptive Cruise Control（以下、ACC）を使用する。
- ② ①の内容を練習とし、5 回程度練習を行う。
- ③ 実験参加者は①の練習を踏まえて、過去に行ったことのある漫然運転や脇見運転等による急制動を再現する。その際、実験参加者が急制動を再現できたと判断した段階で、実験を終了する。

3-3-3. 実験結果

3-3-3-1. 追従実験結果

図 3-9 は、実験参加者の追従時の平均車間距離とその標準偏差を示す。なお、実験参加者 No.7 の実験データについては、欠損データがあり本分析から除外することとした（実験参加者の人数：8名（男性：5名、女性3名）、平均年齢 45.6 歳（標準偏差：12.7 歳））。また、平均車間距離は、前方車両が 60km/h まで達した 15 秒後から、前方車両が制動制御を行うまでの 5 秒間分のデータを安定した追従時の車間距離のデータとして用いている。つまり、実験参加者ごとの平均車間距離は、500 データ（サンプリングタイム 0.01s の 5 秒間分のデータ）×5 回分のデータを平均した値である。本実験結果より、全実験参加者における追従時の平均車間距離は、28.3m（標準偏差：9.6m）であった。

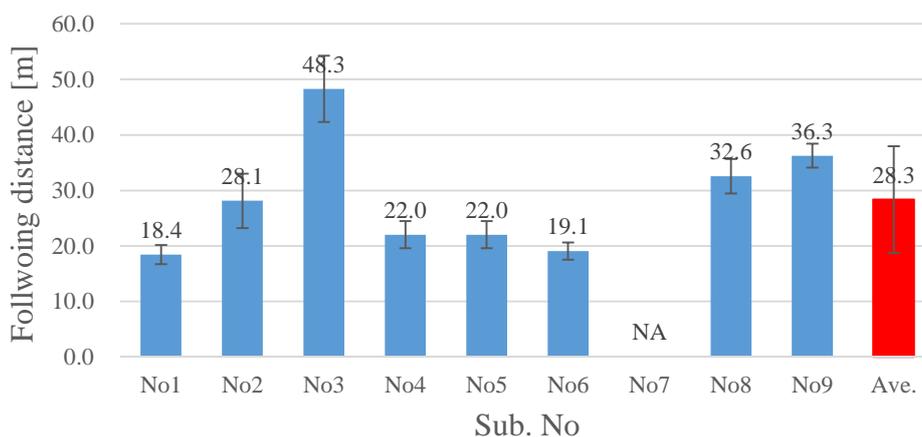


図 3-9 追従時における車間距離と標準偏差

3-3-3-2. 急制動実験結果

図 3-10 は、急制動実験シナリオにより計測した時間変化による車両速度を示す。本実験結果より、急制動を再現した際の制動制御は、減速度が急激に上昇し、ある減速度に達した時点からはその減速度でほぼ一定に減速する傾向がみられた。初速度 60km/h からの制動制御の減速度の平均値（以下、平均減速度）は、 4.21m/s^2 であった。

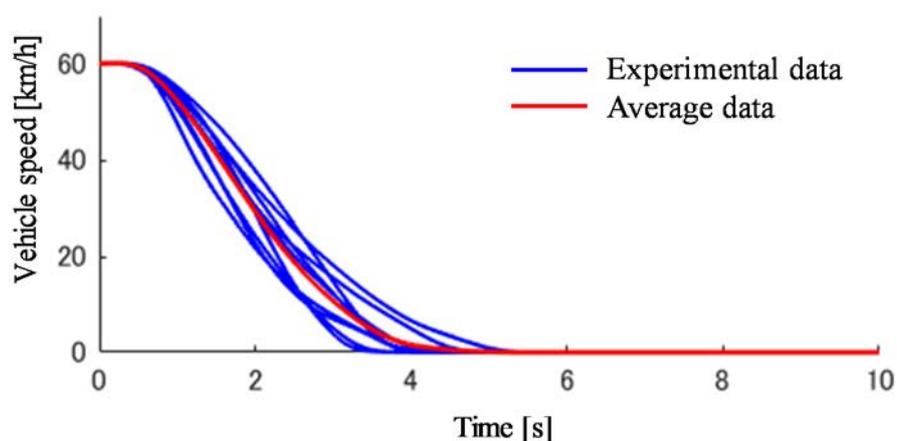


図 3-10 急制動再現時の車両速度の時間変化

3-3-4 自動運転システムの制動制御パターンの設計

3-3-4-1. 自動運転システムの追従時における車間距離の設計

追従時の車間距離は、追突事故の発生要因の一つである。そこで、本研究では車間距離を一定にした追従時における自動運転システムの制動制御を評価することとした。なお、追従時の車間距離を一定に保つために ACC を利用する。また、ACC で決定される車間距離（以下、ACC 設定車間距離）は「3-3-3-1. 追従実験結果」で得られた平均車間距離とその標準偏差をもとに表 3-1 に示す値を設定する。

表 3-1 ACC の設定車間距離

	Average -2σ	Average $-\sigma$	Average
Following distance [m]	9.1	18.7	28.3

3-3-4-2. 自動運転システムの制動制御時における減速度の設計

本研究では、「3-3-3-2. 急制動実験結果」で得られた実験結果をもとに評価する自動運転システムによる制動制御時の減速度を設計することとした。図 3-11 は、急制動実験で得られた実験参加者車両の時間変化による車両速度を示す。また、同図にはこのデータをもとに以下の手法に基づいて設計した基準となる制動制御（以下、基準制動制御パターン）による時間変化の車両速度も合わせて示す。

- ① 計測データの減速を開始した地点（59km/h 以下になった地点）から車両が停止（1km/h 以下になった地点）するまでのデータを抽出。
- ② 抽出したデータをもとに目的変数を車両速度、説明変数を時間として線形回帰分析を行う。
- ③ 算出した回帰式を用いて、基準制動制御パターンを求める。ただし、回帰式より算出された車両速度が 60km/h 以上の区間は、車両速度を 60km/h に設定する。また、車両速度が 0km/h 以下の区間は、車両速度を 0km/h に設定する。

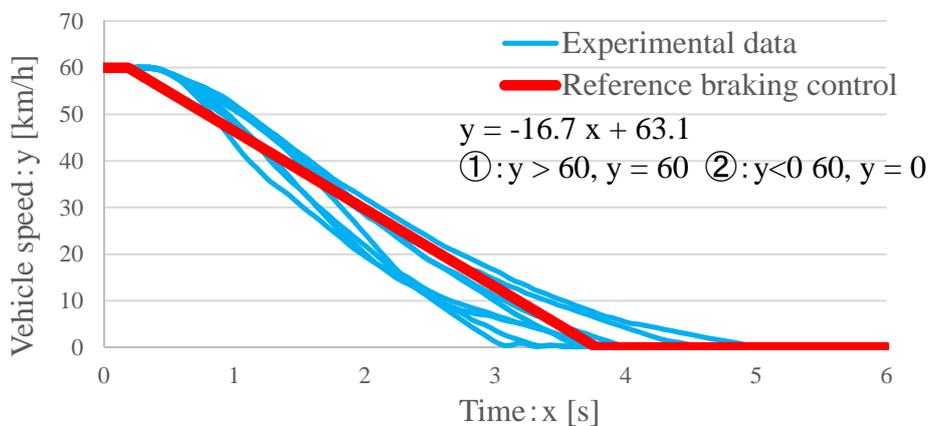


図 3-11 計測データと基準制動制御パターンによる時間変化の車両速度

本研究では、基準制動制御パターンを自動運転システムにおける制動制御として採用し、その安全性を評価することとした。加えて、現在既に実在する自動運転システムの制動制御の代表例として AEB の制動制御も合わせて安全性を評価することとした。図 3-12 に静止している歩行者ダミーに対する AEB の被害軽減性能を示した実験データの一例を示す。本実験データが示すように AEB は、作動してから短時間の間に減速度を増加させ、ある時点から歩行者ダミーに衝突するまで、おおよそ一定の減速度で減速していることがわかる。そこで、本実験では歩行者ダミーに衝突するまでの減速度を維持したまま、停止まで制動を行うと仮定した制動制御パターン（以下、AEB 模擬制動制御パターン）を設計して実験条件に含めることとした。この AEB 模擬制動制御パターンは平均減速度が 7.98m/s^2 であり、基準制動制御パターンの減速度 (4.64m/s^2) の 172% に相当する値となっている。

本研究では、上記のような状況を踏まえ、基準制動制御パターンから AEB 模擬制動制御パターン間の減速度及びその周辺の減速度を評価することとした。基準制動制御パターンの減速度 (4.64m/s^2) を 100% として、基準減速度に対する減速度の割合（以下、減速度の割合）を 80%、100%、130%、160% 及び 200% に設定した制動制御についても安全性を評価することとした。表 3-2 に各減速度の割合と減速度の関係を示す。図 3-13 に各減速度の割合の制動制御が行われた場合の車両速度の時間変化（以下、制動制御パターン）を示す。

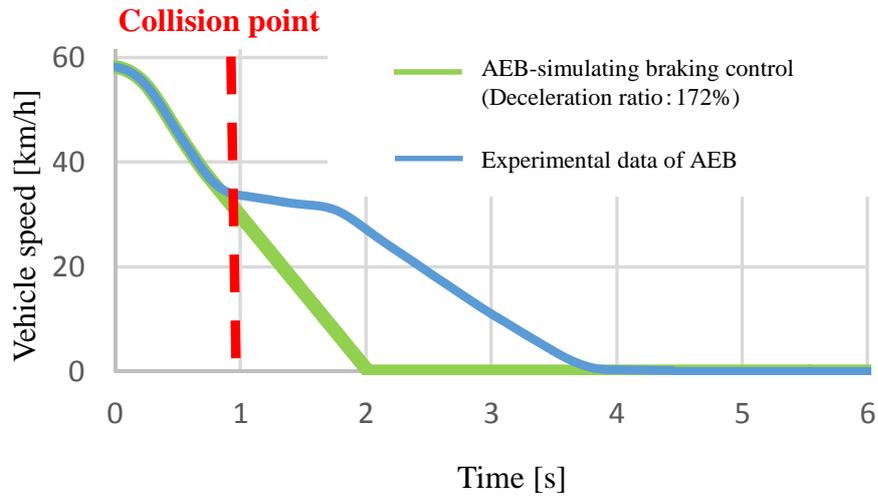


図 3-12 AEB 模擬制動制御パターンによる時間変化の車両速度

表 3-2 減速度の割合と減速度の関係

Ratio of deceleration [%]	80	100	130	160	172	200
Deceleration [m/s ²]	3.71	4.64	6.03	7.42	7.98	3.71

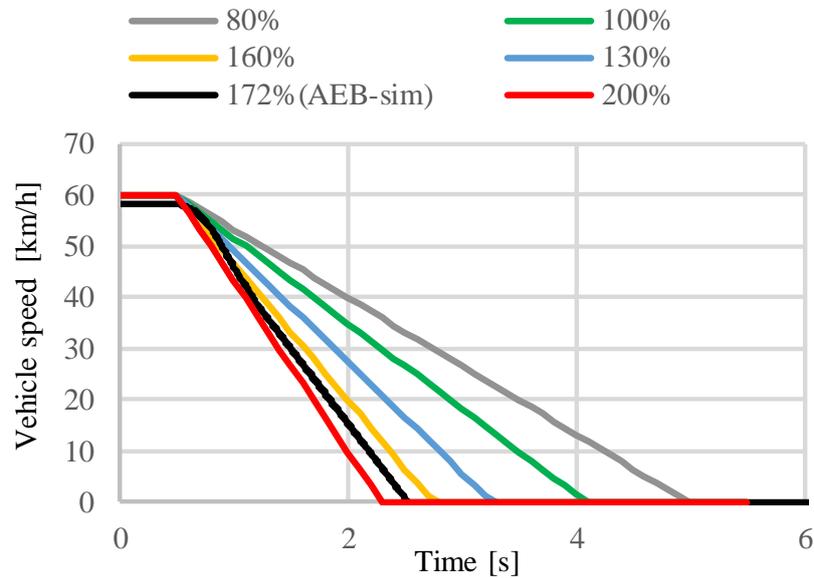


図 3-13 制動制御パターンによる時間変化の車両速度

3-4. 自動運転システムの前後方向の車両制御の評価に関する実験（DS 実験）

3-4-1. 目的

本実験は、自動運転システムの制動制御の安全性を、後方を追従する実験参加者の運転行動及び主観評価に与える影響に基づいて評価することを目的とする。

3-4-2. 評価項目

本実験では、以下の二つの項目に着目して、後方車両の追突の有無及び実験参加者が感じる追突の危険感を評価する。

【最短車間距離】

本実験では、自動運転システムの制動制御が後方を追従する実験参加者の運転行動に与える影響として、自動運転システムを想定した前方車両（以下、模擬自動運転車）と実験参加者が運転する試験車両（以下、実験参加者車両）の最短車間距離を求める。

【模擬自動運転車の制動制御に対する主観評価値】

模擬自動運転車の制動制御に対して感じた主観評価値（以下、制動制御に対する主観評価値）を5段階（1：危険、2：やや危険、3：普通、4：やや安全、5：安全）で、実験参加者に評価させる。5段階評価の間隔が可能な限り均等となるように注意すること、また、常に同じ判断基準で評価するように指示する。

3-4-3. 実験環境

本実験では、実験参加者を DS に乗車させ、以下の環境で実施した。

- ① 交通事故分析をもとに昼間を想定し、道路は片側1車線、道路の両脇に木を配置する。
- ② 実験参加者が運転する車両は ACC の機能を有する。
- ③ 模擬自動運転車は、時間変化による車両速度のデータによって制御する（詳細は、「3-3-4-2. 自動運転システムの制動制御時における減速度の設計」を参照）。

3-4-4. 実験装置

本実験では、追突事故の発生を想定した高い減速度が生じる制動制御を含んだ追従時の実験参加者の運転行動及び主観評価を行う必要がある。そのため、前方を走行する模擬自動運転車は AEB のような急制動を行うことを想定している。そこで、本実験では、実験参加者に前後の加速度を提供でき、かつ、安全に実験を行うことができる交通安全環境研究所所有の並進装置付き DS を使用し、実験を実施することとした。DS は、主に模擬視界表示装置、6 軸モーション装置、傾斜台、並進装置で構成されている。図 3-14 に DS の概略図、図 3-15 (a)~(d) に DS の主要となる部分の風景、表 3-3~3-6 に各装置の諸元を示す。

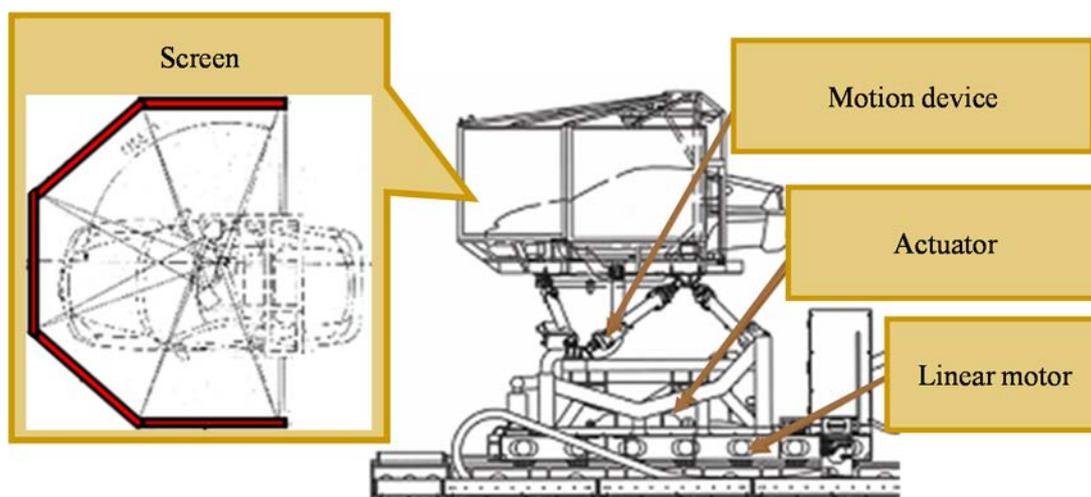
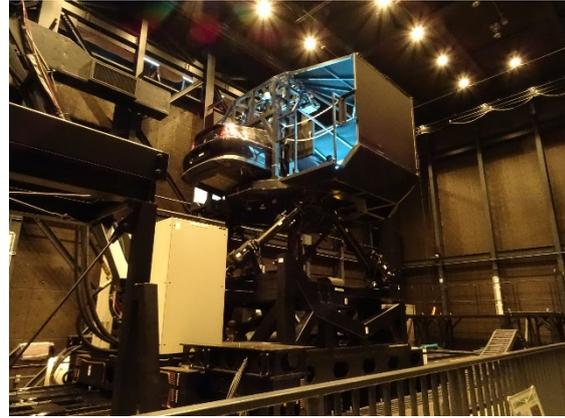


図 3-14 DS の概略図



(a) 6 軸モーションと並進装置



(b) 車両と模擬視界表示装置



(c) 操作卓と監視モニタ



(d) 簡易運転システム

図 3-15 DS 主要部分の風景

表 3-3 DS の視界表示装置諸元

Item	Specification
Viewing angle [deg]	216 (horizontal), 30 (vertical)
Screen size	800 (width), 600(height)

表 3-4 DS の並進装置の諸元

Item	Specification
Weight [kg]	4760
Stroke [mm]	800
Maximum velocity [m/s]	3.5
Maximum acceleration [m/s ²]	3.92

表 3-5 DS の 6 軸モーション装置の諸元

Item	Specification	
Weight [kg]	2000	
Moment of inertia [kg · m ²]	Longitudinal direction	3430
	Vertical direction	4200
	Lateral direction	3770
Range of movement [mm]	Longitudinal direction	± 300
	Vertical direction	± 300
	Lateral direction	± 290
Range of angle movement [deg]	Roll	± 14
	Pitch	+ 13, - 15
	Yaw	± 13
Maximum velocity [mm/s]	Longitudinal direction	500
	Vertical direction	
	Lateral direction	
Maximum angle velocity [deg/s]	Roll	26
	Pitch	
	Yaw	
Maximum acceleration [m/s ²]	4.91	
Response frequency [Hz]	5	

表 3-6 DS の傾斜台装置の諸元

Item	Specification
Weight [kg]	4760
Moment of inertia [kg · m ²]	9720
Range of angle movement [deg]	0~25
Maximum angle velocity [deg/s]	25

DS に使用されている車両にはカメラを 4 つ搭載し、ナビゲーション画面、前方画面、実験参加者の表情、ハンドル操作を監視することができる（図 3-16）。また、本実験では、ナビゲーション画面に ACC の作動状態が表示される。なお、本実験においては、走行道路を片側 1 車線としているため対向車両との衝突を想定し、ステアリング操作で回避行動を行う実験参加者はいなかった。以上の実験装置を使用し、本実験で取得したデータを以下に示す。

- ・ 実験参加者車両の位置座標、速度、加速度（DS）
- ・ 模擬自動運転車の位置座標、速度、加速度（DS）
- ・ 模擬自動運転車と実験参加者車両の車間距離（DS）
- ・ 制動制御に対する主観評価値（助手席の同乗者によるアンケート）

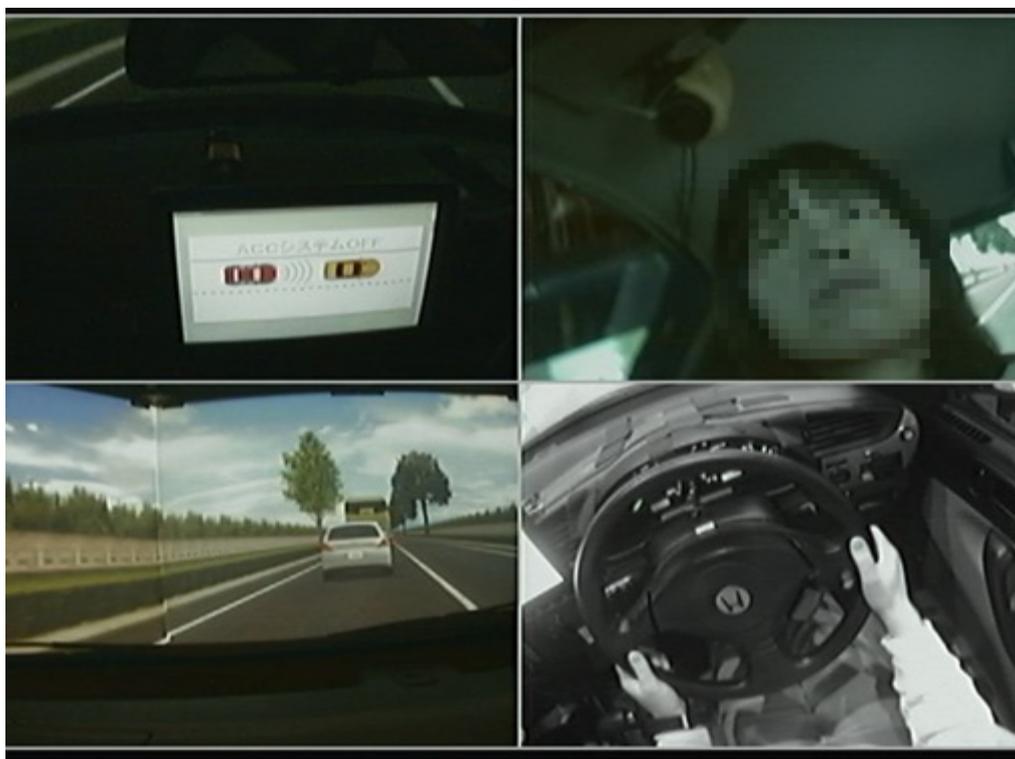


図 3-16 DS の監視画面

3-4-5. 実験方法

3-4-5-1. 実験シナリオ

- ① 実験参加者に対して、実験内容についての口頭説明を行い、実験参加への同意（インフォームドコンセント）を得る。
- ② 実験参加者にアンケート（年齢、性別、免許保有年数、運転頻度）を記入させる。
- ③ 実験参加者を DS に乗車させ、安定した走行ができるまで以下の3点の習熟を図る。
 - ・ DS のハンドル、アクセル及びブレーキ操作の習熟を図る。
 - ・ 先行車両が 60km/h で走行している状況で追従させ、普段の追従時の車間距離を保てるように車間距離の感覚に対する習熟を図る。
 - ・ ACC を使用し、スイッチの位置、システムの特性の把握及び使用方法の習熟を図る。
- ④ 実験シナリオの練習を行う。以下に実験シナリオを示す。
 - Step1（図 3-17 (a) 参照）

実験参加者が ACC ボタンを押す。その後、先行車両が 60km/h になるように走行を開始する。
 - Step2（図 3-17 (b) 参照）

自動で実験参加者が運転する車両が追従を開始する。
 - Step3（図 3-17 (c) 参照）

走行が安定すると、全ての車両が 60km/h になり、先行車両と実験参加者が運転する車両の車間距離が ACC の設定車間距離（「3-3-4-1. 自動運転システムの追従時における車間距離の設計」を参照）になる。
 - Step4（図 3-17 (d) 参照）

20 秒後に模擬自動運転車が制動制御（「3-3-4-2. 自動運転システムの制動制御時における減速度の設計」を参照）を開始する。
 - Step5（図 3-17 (e) 参照）

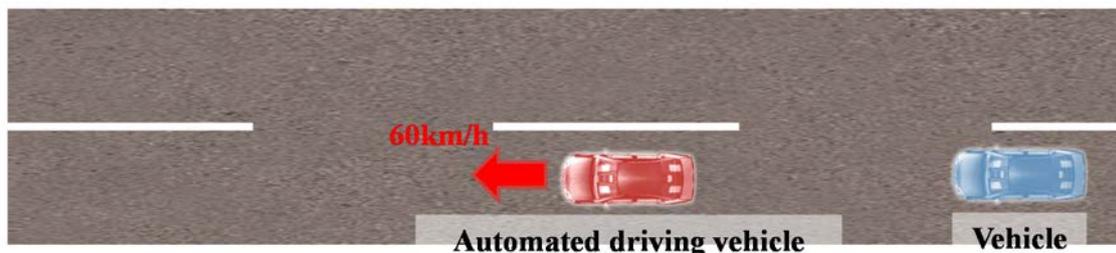
実験参加者に模擬自動運転車の制動制御を確認させ、追突しないように制動制御を行わせる。なお、実験参加者がブレーキペダルを踏んだ瞬間に ACC は解除される。
 - Step6（図 3-17 (f) 参照）

実験参加者が運転する車両が停止してから、同乗者がアンケートを行い、模擬自動運転車の制動制御に対する主観評価値を集計する（「3-4-2. 評価項目」を参照）。

以上の Step1～Step8 までのサイクルを 1 回の実験とし、練習として 10 回行う。

- ⑤ 練習終了後、約 10 分間の休憩を取る。その後、実験を開始する。実験は④で説明したサイクル 20 回を 1 セットとし、1 人につき 6 セット行う（全部で 120 回の実験を行う）。なお、1 セット毎に 30 分以上の休憩を取る。

The subject press the ACC button and the forward vehicle accelerates to 60 km/h.



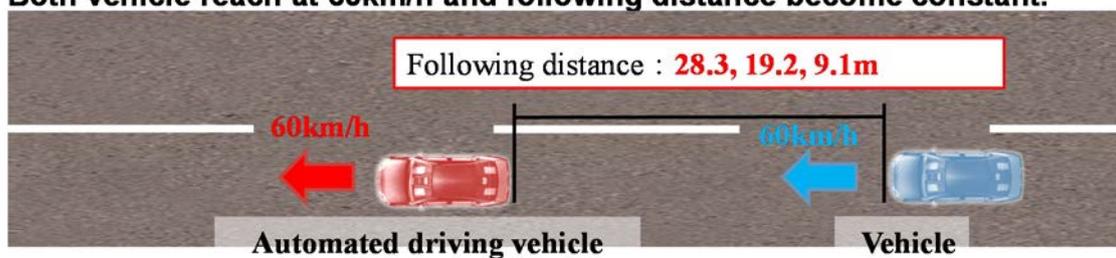
(a) Step1

The subject drives vehicle using ACC behind forward vehicle.



(b) Step2

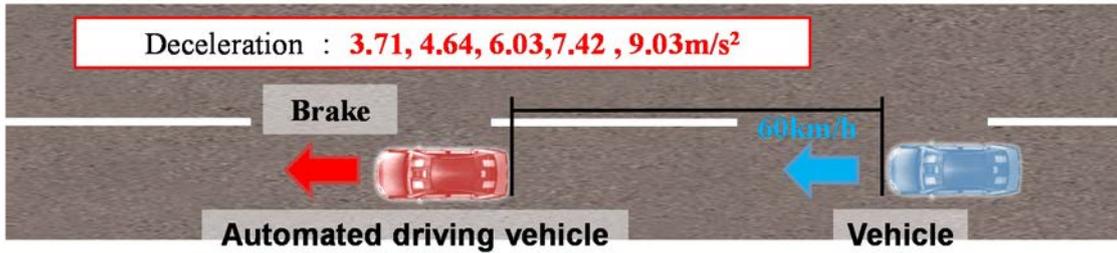
Both vehicle reach at 60km/h and following distance become constant.



(c) Step3

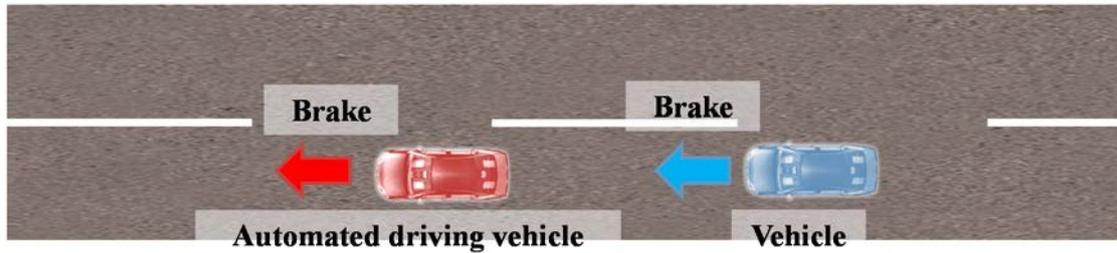
図 3-17 実験シナリオの概要

After the conditions are ready, forward vehicle operate brake to stop.



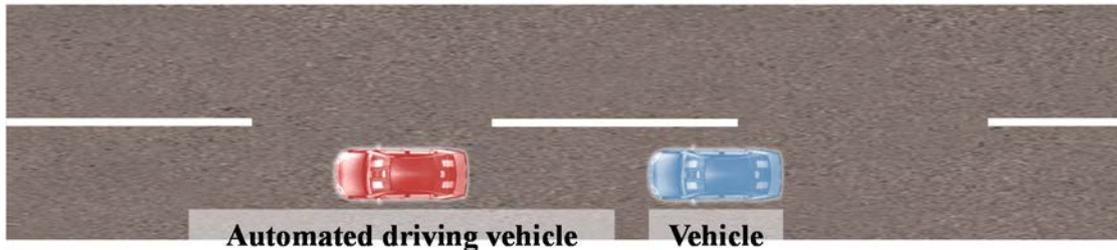
(d) Step4

The subject brakes to avoid collision with forward vehicle.



(e) Step5

The subject answers about the risk which felt in the braking control



Subjective evaluation of the automated vehicle's braking control.
(1: Dangerous, 2: Rather dangerous, 3: Normal, 4: Rather safe, 5: Safe)

(f) Step6

図 3-17 実験シナリオの概要

3-4-5-2. 実験条件の順番

本実験では、減速度の割合と ACC 設定車間距離を実験条件として設定し、実験を実施した。ただし、本研究では、以下の点に注意して実験を実施した。

- ①実験条件の中で最も低い減速度の割合である 80%の制動制御パターンを 2~4 回繰り返した後に 100%~200%の制動制御パターンを低い順に実施する。
 - ・減速度の割合が高い実験条件から先に実施する、もしくは、減速度の割合が高い実験条件を連続して実施すると、実験参加者の警戒感が高まり、その後の減速度の割合が低い実験条件の際に普段の制動を計測できなくなるため。
- ②ACC 設定車間距離を 1 セット (20 回) の間、全て同じ条件に設定する。
 - ・同セット中に ACC 設定車間距離の異なる実験条件を設定すると車間距離が短くなった瞬間、実験参加者に緊張感を与え反射的な制動を誘発してしまうため。
- ③実験を実施する前に練習として、比較的低い減速度の割合 80%の制動制御パターンを 10 回程度体感させる。
 - ・実験参加者が実験内容を誤認識していないことを確認するため。

表 3-7 に上述した注意点に沿って実施した実験の順番の一例を示す。

表 3-7 実験条件の順番例

Number of experiments	Following distance [m]	Ratio of deceleration [%]
1	28.3	80
2	28.3	80
3	28.3	80
4	28.3	80
5	28.3	100
6	28.3	80
7	28.3	80
8	28.3	80
9	28.3	130
10	28.3	80
11	28.3	80
12	28.3	80
13	28.3	160
14	28.3	80
15	28.3	80
16	28.3	80
17	28.3	172
18	28.3	80
19	28.3	80
20	28.3	200

※ 実験条件の 172%は、AEB 模擬制動制御パターンである（詳細は「3-3-4-2. 自動運転システムの制動制御時における減速度の設計」を参照）。

3-4-5-3. 実験参加者

本実験の実験参加者は、12名（男性6名、女性6名）であり、平均年齢は47.9歳（標準偏差：9.6）であった。表5-8は、各々の年齢と性別を示す。実験参加者全員が運転免許を保有しており、健康面に問題はなかった。本実験は、交通安全環境研究所における「人間を対象とする実験に関する倫理規定」に基づいて事前に審査が行われ、その承認のもとに実施した。

表 3-8 実験参加者の情報

Subject	Age	Gender
Sub. A	37	Men
Sub. B	47	Men
Sub. C	46	Men
Sub. D	59	Women
Sub. E	50	Women
Sub. F	42	Women
Sub. G	57	Men
Sub. H	46	Women
Sub. I	61	Men
Sub. J	53	Women
Sub. K	52	Women
Sub. L	25	Men

3-4-6. 実験結果

3-4-6-1. 最短車間距離

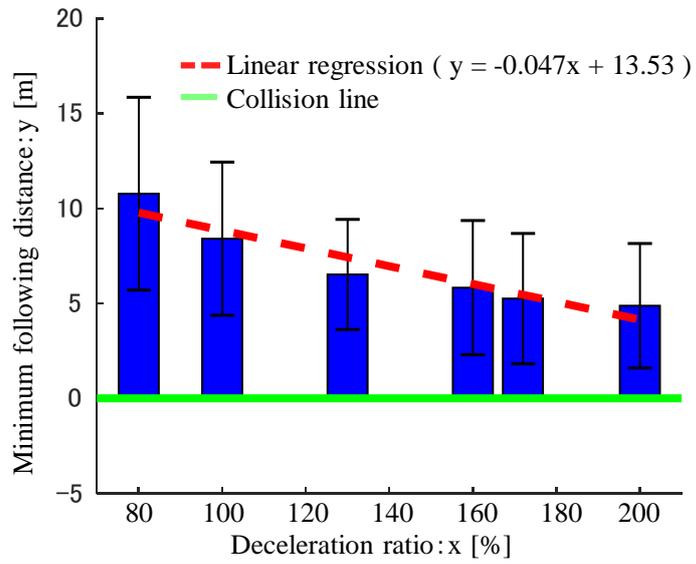
本実験では、模擬自動運転車の制動制御が後方を追従する実験参加者の運転行動に与える影響として、模擬自動運転車と実験参加者が運転する車両との最短車間距離に着目した。表 3-9 は、実験条件別に最短車間距離の平均値を算出した分析結果を示す。本表中の負の値（赤字）になっている箇所は、実験参加者が運転する車両が模擬自動運転車と追突する可能性が高いことを示す。本実験結果から、ACC 設定車間距離を 28.3m に設定すると減速度の割合が 200%の実験条件において、最短車間距離は 4.9m となった。また、ACC 設定車間距離を 18.7m に設定すると、減速度の割合が 200%の実験条件において 0.4m まで接近した。一方で ACC の設定車間距離を 9.1m に設定すると、減速度の割合が 160%以上の実験条件で模擬自動運転車と追突する可能性が高いことが確認された。ACC の設定車間距離が短くなる、または減速度の割合が高くなるにつれ、最短車間距離は短くなっていくことが明らかとなった。このことから、ACC 設定車間距離と最短車間距離、減速度の割合と最短車間距離に相関があることが予想される。

表 3-9 実験条件ごとの最短車間距離

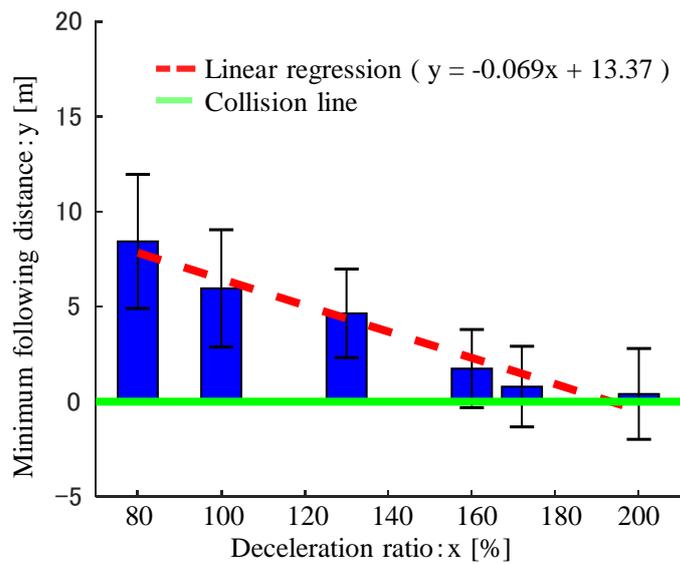
Following distance	Deceleration ratio [%]					
	80	100	130	160	172	200
28.3m	10.8m	8.4m	6.5m	5.8m	5.3m	4.9m
18.7m	8.4m	6.0m	4.7m	1.7m	0.8m	0.4m
9.1m	5.7m	4.2m	1.0m	-2.1m	-2.1m	-2.5m

3-4-6-2. 追突が発生する実験条件の分析

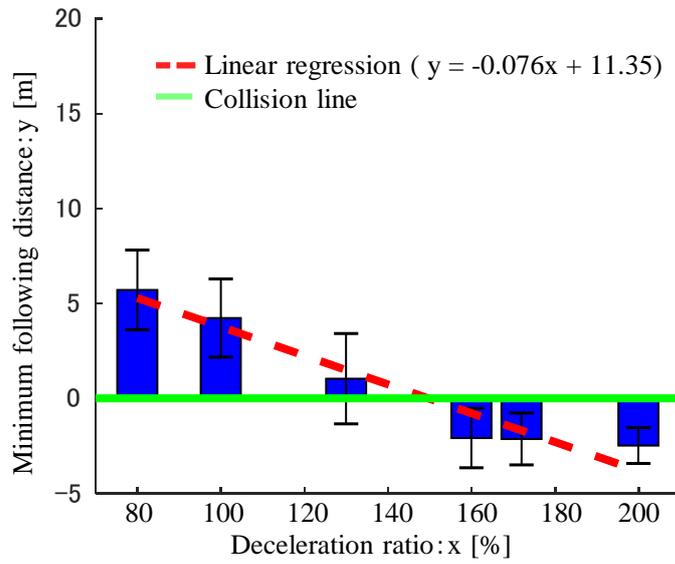
上記の実験結果から減速度の割合と最短車間距離に相関がある（右下がり傾向）ことが予想されたため、最短車間距離を目的変数、減速度の割合を説明変数にして線形回帰分析を行った。図 3-18 は、この線形回帰分析から得られた減速度の割合に対する最短車間距離を示す。本分析結果から、ACC 設定車間距離を 28.3m に設定すると模擬自動運転車との追突を避けることができる可能性が高いことが推定される（図 3-18 (a)）。一方で、ACC 設定車間距離を 18.7m に設定すると、減速度の割合が 200%の実験条件の場合に模擬自動運転車と追突する可能性が高いことが推定される（図 3-18 (b)）。さらに、ACC の設定車間距離を 9.1m に設定すると、減速度の割合が 150%付近で模擬自動運転車と追突する可能性が高いことが推定される（図 3-18 (c)）。表 3-10 は、この線形回帰分析から実験条件別に算出した最短車間距離を整理したものである。本表中の負の値（赤字）になっている箇所は、追突する可能性が高いことが推定される。



(a) ACC 設定車間距離 : 28.3m



(b) ACC 設定車間距離 : 18.7m



(c) ACC 設定車間距離 : 9.1m

図 3-18 減速度の割合毎の最短車間距離

表 3-10 線形回帰分析による最短車間距離の推定値

Following distance	Deceleration ratio [%]						
	80	100	120	140	160	180	200
28.3m	10.7m	9.5m	8.4m	7.3m	6.1m	5.0m	3.9m
18.7m	8.4m	6.9m	5.4m	3.9m	2.4m	0.9m	-0.6m
9.1m	5.7m	4.1m	2.5m	0.9m	-0.7m	-2.4m	-3.9m

3-4-6-3. 主観評価値

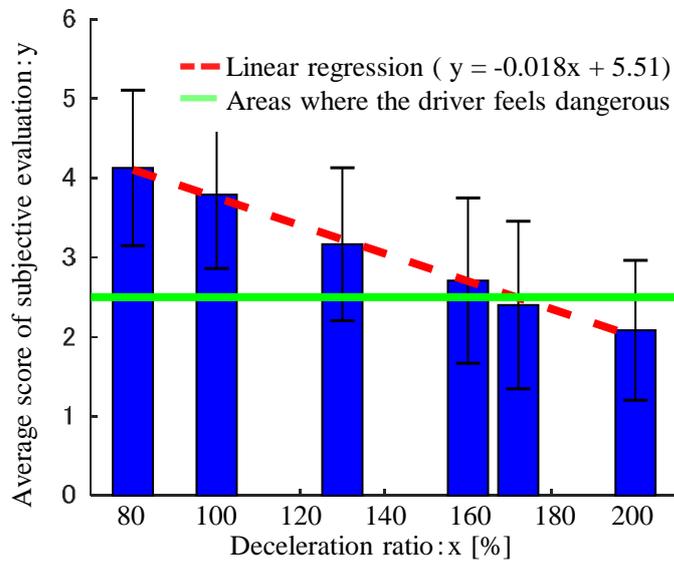
次に、模擬自動運転車の制動制御が後方を追従する実験参加者の制動制御に対する主観評価値に与える影響を分析した。主観評価値の指標は、5段階（1：危険、2：やや危険、3：普通、4：やや安全、5：安全）とした。表 3-11 は、実験条件別に主観評価値の平均値を示す。ACC 設定車間距離を 28.3m に設定すると減速度の割合が 172% の実験条件で、主観評価値が 2.5 を下回り危険を感じる可能性が高いという結果（黄字）になった。また、ACC 設定車間距離を 18.7m に設定すると減速度の割合が 130% の実験条件で危険を感じる可能性が高くなる。さらに ACC 設定車間距離を 9.1m に設定すると減速度の割合が 80% という比較的緩い制動制御でも危険を感じる可能性が高いという結果になった。ACC 設定車間距離が短くなる、または減速度の割合が高くなるにつれて、実験参加者は危険を感じやすくなる傾向が確認された。このことから、ACC 設定車間距離と主観評価値、減速度の割合と主観評価値に相関があることが予想される。

表 3-11 実験条件ごとの主観評価値

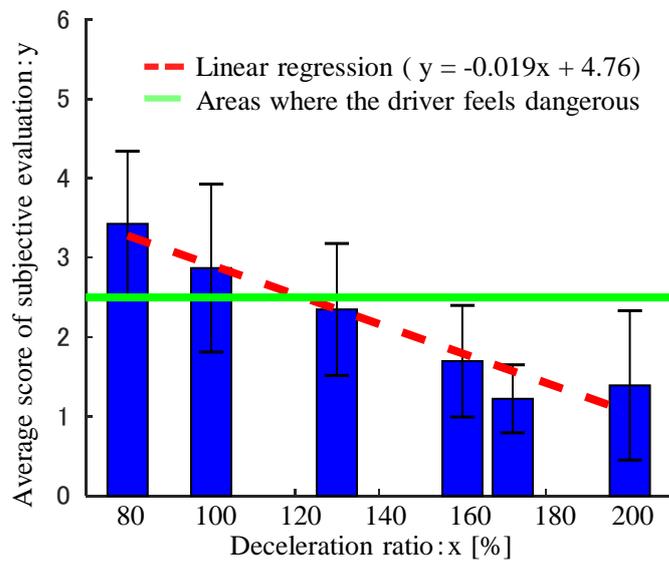
Following distance	Deceleration ratio [%]					
	80	100	130	160	172	200
28.3m	4.1	3.8	3.2	2.7	2.4	2.1
18.7m	3.4	2.9	2.4	1.7	1.2	1.4
9.1m	2.3	2.0	1.4	1.1	1.0	1.1

3-4-6-4. 模擬自動運転車の制動制御に危険を感じる実験条件の分析

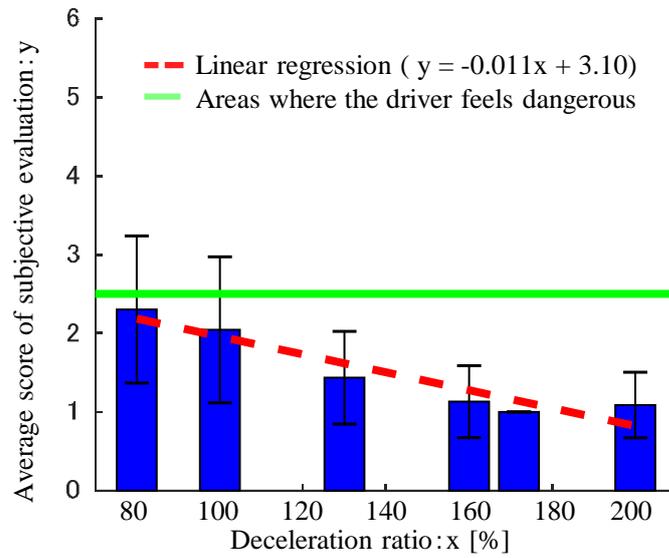
上記分析結果から減速度の割合と主観評価値に相関がある（右下がり傾向）ことが予想されたため、主観評価値を目的変数、減速度の割合を説明変数にして線形回帰分析を行った。図 5-21 は、この線形回帰分析から得られる減速度の割合に対する主観評価値を示す。本分析結果から、ACC の設定車間距離を 28.3m に設定すると減速度の割合が 172% の実験条件で、危険を感じる（評価値 2.5 を下回る）可能性が高いという結果になった（図 3-19 (a)）。また、ACC の設定車間距離を 18.7m に設定すると減速度の割合が 130% の実験条件で危険を感じる可能性が高い（図 3-19 (b)）。さらに ACC の設定車間距離を 9.1m に設定すると減速度の割合が 80% という比較的緩い制動制御でも危険を感じる可能性が高いと推定された（図 3-19 (c)）。表 5-12 は、この線形回帰分析から実験条件別に算出した主観評価値を示す。この表の評価値 2.5 以上を実験参加者が危険を感じない可能性が高い実験条件（緑字）、2.5 未満を実験参加者が危険を感じる可能性が高い実験条件（黄字）として整理した。



(a) ACC 設定車間距離 : 28.3m



(b) ACC 設定車間距離 : 18.7m



(c) ACC 設定車間距離 : 9.1m

図 3-19 減速度の割合毎の平均主観評価値

表 3-12 線形回帰分析による減速度の割合に対する主観評価推定値

Following distance	Deceleration ratio [%]						
	80	100	120	140	160	180	200
28.3m	4.1	3.8	3.4	3.1	2.7	2.4	2.0
18.7m	3.4	3.0	2.6	2.2	1.8	1.4	1.0
9.1m	2.3	2.0	1.8	1.5	1.3	1.0	0.8

3-5. 考察

表 3-13 は、表 3-11 及び表 3-12 の評価結果を整理したものである。本表は、本実験で評価した自動運転システムの制動制御パターン（表中には、各制動制御パターンの平均減速度を示す）と車間距離の条件に対する、追突の有無とドライバーが感じた危険感をまとめたものである。表中のⅠは、危険を感じ、かつ、追突事故が発生する可能性が高い条件、Ⅱは、危険を感じつつも追突事故を回避できる可能性が高い条件、そして、Ⅲは、危険を感じず、かつ、追突事故を回避できる可能性が高い条件となる。本解析結果より、ドライバーが自動運転システムの後方を 60km/h で追従している状況において、車間距離を 28.3m に保つ場合、自動運転システムが平均減速度 7.42m/s² 以下で制動制御を行えば、ドライバーは危険を感じず安心して追従することができる可能性が高くなる。また、車間距離を 18.7m に保つ場合、自動運転システムが平均減速度 5.57m/s² 以下で制動制御を行えば、ドライバーは危険を感じず安心して追従することができる可能性が高い。一方で、平均減速度 9.28m/s² 以上で制動制御が行われると追突事故が発生する可能性が高くなる。車間距離が 9.1m の場合、自動運転システムが平均減速度 3.71m/s² の緩い制動制御であっても危険を感じず安心して追従することは困難であり、平均減速度 7.42m/s² 以上で制動制御が行われると追突事故が発生する可能性が高くなる。

今回実験条件に組み込んだ AEB 模擬制動制御パターンは、既に市販されている車両に搭載されている AEB の制動制御を模擬したものであり、実際にこのような制動制御を行う車両の後ろを追従させられる可能性は既に十分に想定される。AEB 模擬制動制御パターンの平均減速度が 7.98m/s² であることを踏まえると、28.3m の車間距離を確保してもドライバーが安心して追従できる可能性は低く、車間距離が 9.1m の場合、追突事故の発生は避けられない可能性が高い。

表 3-13 自動運転システムの制動制御に対する安全性評価

Following distance	Deceleration ratio [%]						
	3.71 (80%)	4.64 (100%)	5.57 (120%)	6.50 (140%)	7.42 (160%)	8.35 (180%)	9.28 (200%)
28.3m	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ
18.7m	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ
9.1m	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ

Ⅰ：危険を感じ、追突の可能性が高い制動制御パターン

Ⅱ：危険を感じるが、追突回避の可能性が高い制動制御パターン

Ⅲ：安全を感じ、追突回避の可能性が高い制動制御パターン

3-6. 結論

本研究では、自動運転システムの制動制御パターン及び追従車間距離を適用することができる DS 環境を構築し、自動運転システムの制動制御の安全性を、後方を追従するドライバの主観評価及び運転行動によって評価する実験を実施した。自動運転システムの後方を追従するドライバが自動運転システムの制動制御を評価する場合、車間距離及び、自動運転システムによる制動制御の減速度が重要な実験条件となる。そこで、ドライバの運転データを計測し、その運転データをもとに評価する自動運転システムの制動制御を設計することとした。この設計した制動制御について、安全性を評価する実験を実施した。その結果、追従の車間距離が、平均的な距離である 28.3m であった場合、自動運転システムの制動制御が 7.42m/s^2 (160%) 以下であれば危険を感じずに追従できる可能性が高いことが確認された。また、車間距離が、平均車間距離- σ (標準偏差) である 18.7m となると、自動運転システムの制動制御が 4.64m/s^2 を越えた段階で追突の危険を感じる可能性が高くなり、 9.28m/s^2 程度になると追突する可能性が高いことが確認された。さらに、車間距離が、平均車間距離- 2σ (標準偏差) である 9.1m まで接近すると、危険を感じずに追従して制動制御を行うことはほぼ不可能となり、制動制御が 7.42m/s^2 程度となった段階で追突を回避できなくなる可能性が高いことが確認された。本実験結果から、以下の結論を得た。なお、本評価手法のデータ解析は、平均値を用いているが、例えば最小値等を用いることも可能である。また、危険感覚の閾値も 2.5 としているが、3 を採用することも可能である。このようにデータ解析の取り扱い方法や閾値の値の選定については、自動運転システムの車両制御を設計するエンジニアが任意に決めることで、臨むべき制御範囲を見出すことが可能となる。

- (1) 後方を追従するドライバの追突の危険性及び、ドライバが感じる危険感から自動運転システムの制動制御の安全性を評価することが可能である。
- (2) 本評価によって得られた自動運転システムの制動制御に関する安全性評価は、自動運転システムの制動制御アルゴリズムを修正することや制動制御アルゴリズム構築の目安となる。

第4章 出眠時における手動運転に遷移する際のドライバの運転特性に関する検討

4-1. 研究概要と方針

自動運転レベル4について整理すると、ドライバは高速道路の自動運転中に運転に従事しなくて良いことになるが、高速道路の出口付近において、自動運転システムから運転操作を引き継ぐ必要がある。しかし、高速道路を自動運転中に、ドライバが睡眠状態になると、出眠したばかりのドライバは適切に運転操作を引き継ぐことができない可能性がある。そこで、本研究では、このような状況下において、自動運転システムからドライバが運転操作を引き継ぎことによる危険性を検討することを目的とする。危険性の検討は、出眠したばかりのドライバが、高速道路出口付近において運転操作を引き継ぎ、市街地での歩行者の飛び出しに対して適切なブレーキ操作を行えるのかを評価する。適切なブレーキ操作の評価は、高速道路を自動運転で5分程度走行した後、運転操作を引き継ぎ、市街地を走行する場合（以下、覚醒時）のブレーキ操作と比較することによって、歩行者との追突の危険性を定量的に分析する。なお、本研究では、歩行者との追突を考慮して、DSを用いて実験を実施した。

4-2. 実験装置

4-2-1. ドライビングシミュレータ

本実験に用いたDSは、運動模擬システム、視覚模擬システム、操舵反力模擬システム、走行音模擬システムで構成されている。DSは実車を用いた実験と比較し、実験参加者の安全を確保でき、危険な状況下を想定した実験を実施することが可能である。本研究では、実験参加者が一度睡眠することを想定しており、実験内容として、歩行者との衝突の危険性が高いため、DS上でしか検討できないと判断した。図4-1に本研究で使用したDSの概観図を示し、表4-1にDSの仕様を示す。

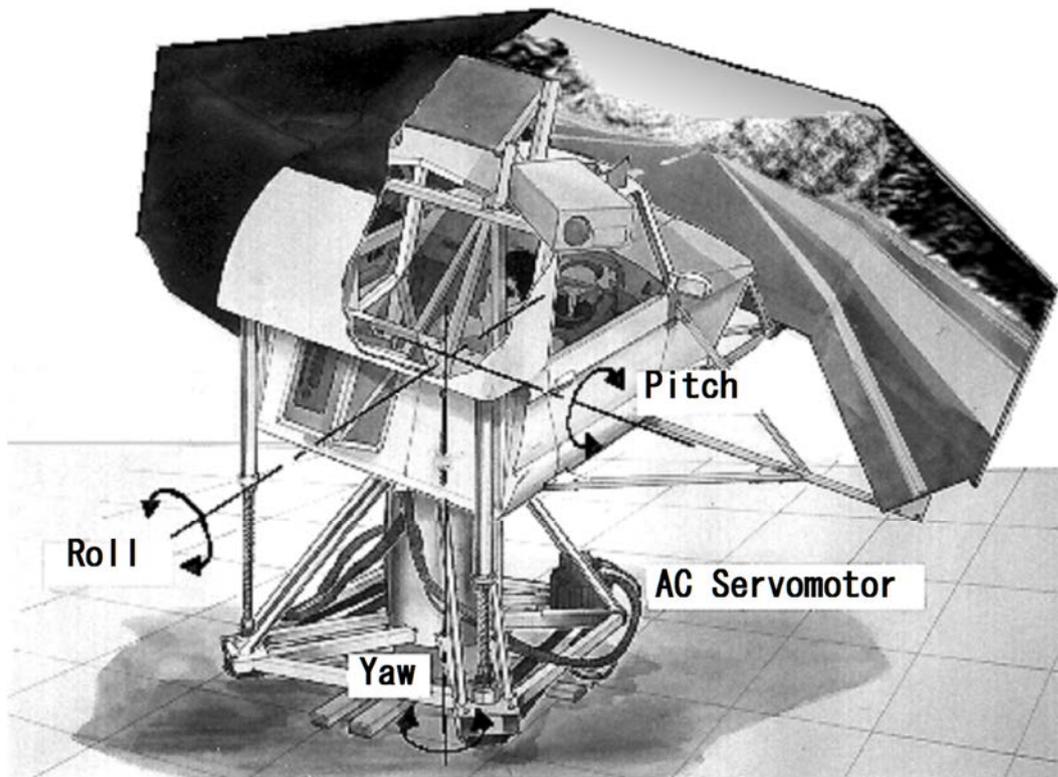


図 4-1 DS の外観

表 4-1 DS の仕様

Degree of freedom	Yaw, Roll, Pitch	
Range	Yaw	± 6.28 [rad] and over
	Roll	± 0.35 [rad]
	Pitch	± 0.35 [rad]
Maximum angular velocity	Yaw	3.14 [rad/s]
	Roll	1.22 [rad/s]
	Pitch	0.87 [rad/s]
Maximum acceleration a feeling of the body	Pitch	4.5 [m/s ²]
	Roll	(Roll angle, Pitch angle, when 0.17 [rad])
Device of motion display	AC servo motor and two ball screws	
Steering reaction force	AC servo motor 5~98 [N]	
Driving sound	Control on actual sound of sampling	
Calculation of the vehicle	Carsim produced by Mechanical Simulation Sampling time 120 [Hz]	
Visual information	Three projectors of front view	
Visual range	Horizontality	2.6 [rad]
	Verticality	0.52 [rad]
Calculator	Eight computers, Visual information (6), Vehicle dynamics (1), Motion control (1)	
Actuator	Four AC servo motor	
	Yaw	3.6 [kw]
	Roll	2.5 [kw]×2
	Pitch	2.5 [kw]×2
Measurements	Steering reaction force	1.2 [kw]
	Diameter	4.9 [m]
Mass	Height	2.9 [m]
	350 [kg]	

以下の図 4-2 に DS のシステム構成を示す。DS は、主に入出力システム、モーションシステム、音響システム、視覚情報システムの 4 つで構成されている。DS の入力データは、実験参加者の運転操作量であるアクセルペダルとブレーキペダルのストローク量及び、ステアリングの操舵角を用いる。各入力操作量は、Analog to Digital Converter（以下、A/D コンバータ）を介してデジタル量として車両運動計算機に取り込まれ、車両運動計算機に実装されている車両運動モデルが車両運動量や車両座標位置を計算し、各システムに送信する構成となっている。

モーションシステムは、モーション計算機とサーボモータコントローラ、サーボアンプ、ならびに 3 機の AC サーボモータにより構成されている。3 機の AC サーボモータは、ヨー、ロール、ピッチの 3 軸方向に対して、入力操作量に対する車両挙動から制御量を計算して実験参加者に与える加減速度の模擬をしている。

Input/Output System（以下、I/O システム）は、Digital to Analog Converter（以下、D/A コンバーター）と Digital Input/Output（以下、DIO）で構成される。各計測装置ならびに計算装置間の通信には、User Datagram Protocol（以下、UDP）通信を用いている。

音響システムは、オーディオアンプと 3 台のスピーカにより構成されている。車両モデルから計算されるエンジン回転数やギヤ比および、車速等を用いて走行音を再現している。また、イベントをトリガーとしてナレーションや警報などの音の出力が可能である。

視覚提示システムは、6 つの映像発生装置と映像分配機、3 台のプロジェクタと 3 台のモニタ、ならびに 1 台の計測器表示用サブモニタにより構成されている。視覚提示システムは、市街地や高速道路および、歩行者等の交通環境を実験参加者が運転する視点で提示することを可能としている。

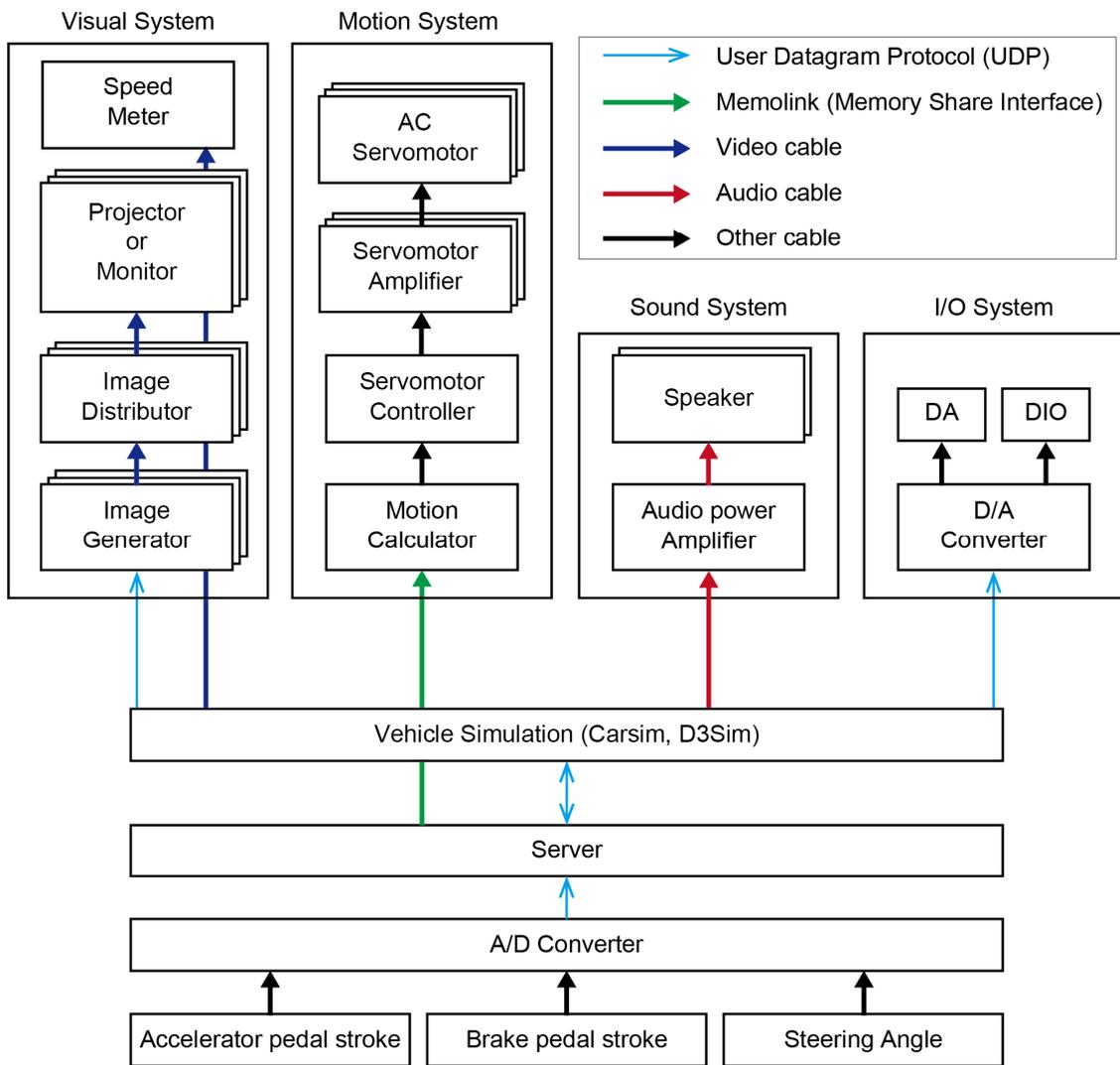


図 4-2 DS のシステム構成

図 4-3 に DS の視覚提示システムの詳細を示す。視覚提示システムは、実験参加者の運転操作量に伴う車両の運動量や座標位置に応じた映像を実験参加者に提示する。3つのプロジェクタとスクリーンを用いて、正面と左右の視野を再現する。なお、プロジェクタの映像を投影する前面のスクリーンは、水平視野角 135°を持つ。また、3つのモニタを用いて左右と後方ミラー用の視野を再現する。つまり、実験参加者は、実装されている各ミラーを確認しながら運転することができるようになっている。

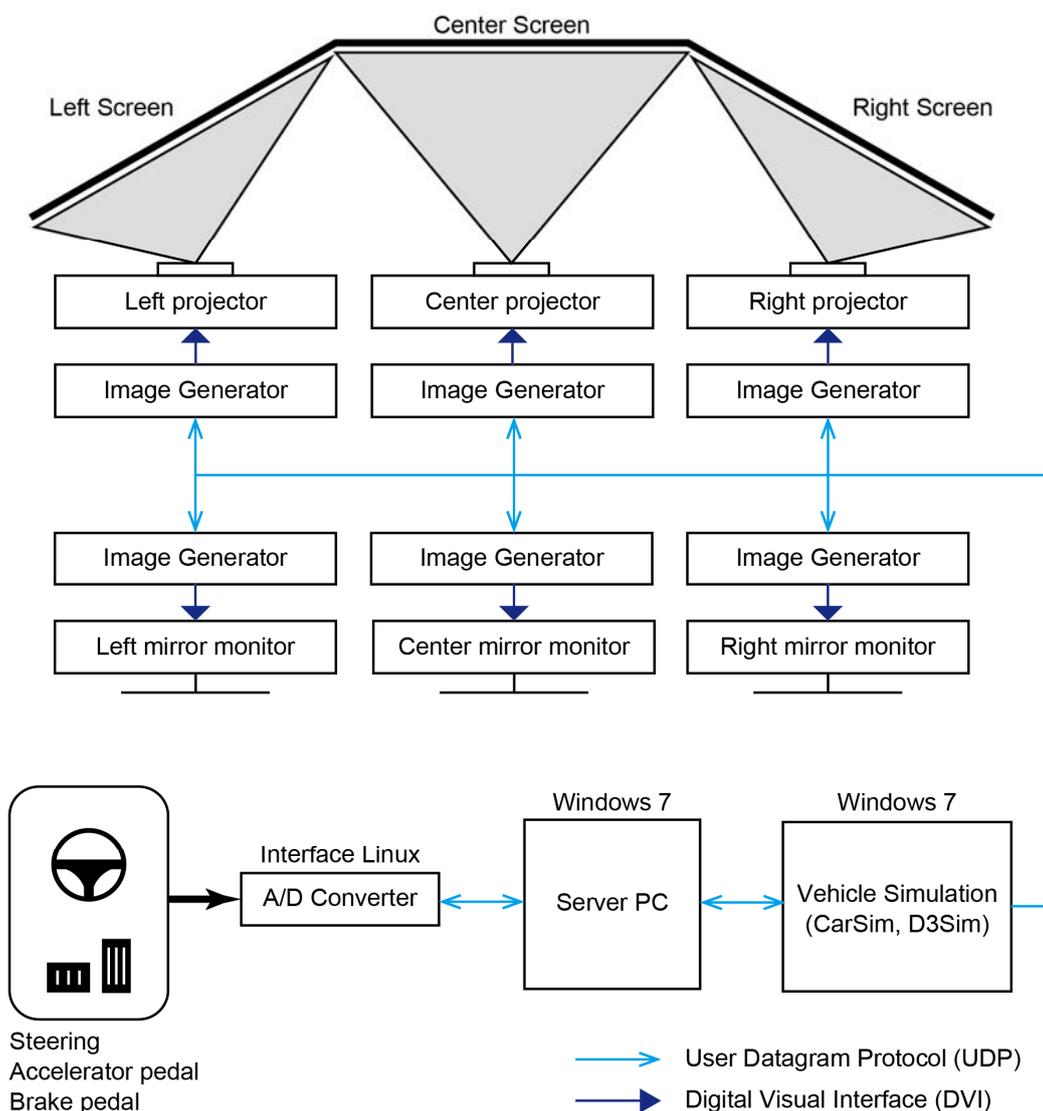


図 4-3 DS の視覚提示システム

4-2-2. 生体信号測定装置

本研究において脳波の測定に、株式会社デジテックス社製 Polymate II AP216 を用いた。生体アンプおよびバッテリーを内蔵したオールインワンタイプの小型生体収録装置であり、脳波、筋電図、心電図、眼球運動、呼吸、脈波、SpO2 などの生体信号をメモリーカードに最長約 18 時間連続で収録できる。また、PC と USB 接続することで、リアルタイムモニタリングが可能である。本製品はアクティブ電極を用いているため、通常脳波計などに用いられている皿電極よりも周囲環境の電磁ノイズや、実験参加者の動きにより生じる電気ノイズに対して非常に高い S/N 比を持っているのが特徴である。図 4-4 に本体概観図を示す。表 3-3 に生体測定機器の仕様を示す。



図 4-4 生体信号測定装置本体概観図

表 4-2 生体信号測定装置の仕様

Substance		
Part of measurement contain		
Number of electrode	Multi-purpose	1
	Breathe	3
	Pulse wave	1
	SpO2	1
	External	1
	REF	1
	E	1
(REF is active electrode when use multi-purpose)		
Number of channel	1	
Input impedance	Active electrode 300GΩ, Other 10MΩ	
AD converter	16bit	
Sampling frequency	1Hz~1000Hz	
Correspondence to medium	PC/Compact Flash	
Format of contain	JSSR of PSF format	
Electrode impedance	Absolute value and judge of quality	
General		
Consumption current	No more than 2.0VA	
Power source	DC7.2V, Lithiumion battery	
External dimensions (W×H×D)	100mm×50mm×160mm	
Mass	400g (Not included battery)	
*Not use for clinical experience		

4-3. 実験方法

4-3-1. 実験シナリオ

本実験は、高速道路において自動運転システムを使用して実験参加者が睡眠することを想定している。まず、実験参加者の搭乗する車両は、自動運転システムを使用し、速度 27.8m/s (100km/h) の一定速度で高速道路の左車線を走行する。実験参加者が睡眠後（睡眠の判定方法については、詳細を後述する）、高速道路出口付近で自動運転システムが車両を一旦停止させる。その後、10 秒間アラームを提示し、実験参加者を出眠させる。実験参加者は、自動運転から運転操作を引き継ぎ、市街地を 1 分程度運転する。実験参加者が市街地を走行中において、左端に停止しているバス前方の死角から歩行者が飛び出してくるシナリオとした。なお、歩行者が飛び出してくるタイミングは、Time To Collision（以下、TTC）が 2 秒のタイミングとする。この歩行者の飛び出しに対して、実験参加者が適切にブレーキ操作できるのかを評価する。また、適切に対応できていたのかを判定するために常に覚醒状態の実験参加者（以下、覚醒グループ）についても同様な実験を行い、比較検討することとする。なお、睡眠をする実験参加者（以下、睡眠グループ）は、高速道路を 2 時間程度走行することとした。一方で、覚醒グループは、高速道路を走行する時間を 5 分間とする。実験参加者には、市街地で走行中にバスの前方の死角から歩行者が飛び出すことは、事前に伝えずに実験を実施した。実験参加者 1 名につき実験回数を 1 回とする。

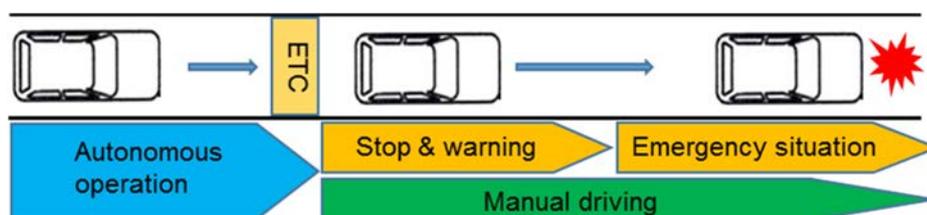


図 4-5 実験シナリオの概略図

4-3-2. 実験参加者

実験参加者は、普通自動車運転免許を所持する 20 代の男性 65 名、30 代の男性 1 名、50 代の男性 2 名、60 代の男性 2 名、30 代の女性 3 名、40 代の女性 1 名とした。本実験では、実験内容を口頭説明したうえで、実験参加者の同意（インフォームドコンセント）を得た。睡眠グループを 40 名、覚醒グループを 34 名のグループに分けて実験を実施した。表 4-3 に睡眠グループの実験参加者の免許取得経過年数と運転頻度、表 4-4 に覚醒グループの実験参加者の免許取得経過年数と運転頻度を示す。

表 4-3 睡眠グループの実験参加者データ

Participants	Holding period of driving licence	Driving frequency
Participant A	Two years	Once a half year
Participant B	Three years	Once a week
Participant C	Four years	Two times a month
Participant D	Three years	Once two month
Participant E	Five years	Two times a month
Participant F	One and half years	Once a year
Participant G	Three years	Once two month
Participant H	Five years	Once four month
Participant I	Five years	Once three month
Participant J	Five years	Once a week
Participant K	Three years	Once three month
Participant L	Two years	Once a half year
Participant M	Five years	Two times a week
Participant N	Six years	Everyday
Participant O	Five years	Once a two month
Participant P	Four years	Once a two month
Participant Q	Five years	Once a year
Participant R	Six years	Three times a month
Participant S	Five years	Once a half year
Participant T	Five years	Everyday
Participant U	Three and half years	Three times a month
Participant V	Half years	Once a half year
Participant W	Four years	Everyday
Participant X	Two and half years	Once a half year
Participant Y	Three and half years	Once a month
Participant Z	Five and half years	Everyday
Participant Aa	Four years	Once a week
Participant Ba	Three years	Everyday
Participant Ca	One year	Once a month
Participant Da	One and half years	Once a half year
Participant Ea	Two and a half years	Once a month
Participant Fa	Three and a half years	Once a month
Participant Ga	Three years	Everyday
Participant Ha	Two and a half years	Once a two weeks
Participant Ia	Three and a half years	Once a half year
Participant Ja	Three and a half years	Once two months
Participant Ka	Five years	Once a week
Participant La	Two years	Once a half year
Participant Ma	Five years	Everyday
Participant Na	Five and a half years	Once a week

表 4-4 覚醒状態の実験参加者データ

Participants	Holding period of driving licence	Driving frequency
Participant Oa	Four years	Once a month
Participant Pa	Three years	Once a week
Participant Qa	Six years	Once a half year
Participant Ra	Six years	Two times a week
Participant Sa	Five years	Everyday
Participant Ta	Three years	Once a month
Participant Ua	Three years	Three times a month
Participant Va	One and half year	Once a half year
Participant Wa	Five years	Two times a week
Participant Xa	Four years	Once a year
Participant Ya	Five years	Once a month
Participant Za	Five years	Four times a week
Participant Ab	Four years	Once three month
Participant Bb	Four years	Everyday
Participant Cb	Five years	Once a month
Participant Db	Four years	Once a week
Participant Eb	Four years	Once a year
Participant Fb	Three years	Two times a month
Participant Gb	Three years	Two times a month
Participant Hb	Five years	Once a month
Participant Ib	One year	Once a year
Participant Jb	Five years	Once a week
Participant Kb	Five years	Once a month
Participant Lb	Four years	Once a month
Participant Mb	Four years	Once a half year
Participant Nb	Thirty five years	Everyday
Participant Ob	Thirteen years	Everyday
Participant Pb	Thirty Three years	Once a week
Participant Qb	Thirty years	Once a month
Participant Rb	Thirty eight years	Two times a week
Participant Sb	Sixteen years	Once a week
Participant Tb	Forty one years	Four times a week
Participant Ub	Sixteen years	Everyday
Participant Vb	Twenty eight years	Everyday

4-3-3. 脳波測定

大脳皮質は約 140 億個の神経細胞から構成されており、これらの細胞は脳の活動状態や刺激に関連して、あるリズムをもった微弱な電位変化を示す。実際に頭皮に電極を貼付し、生体アンプで生体信号を増幅すると 0.5~100Hz の周波数成分を含む数十 μV の電位変動が得られる。このような脳の電気現象を記録したものを **Electro Encephalo Gram** (以下、**EEG**) という。人間の脳のそれぞれの部分は知覚情報処理や身体の運動制御に関連しており、これらの各部位から導出された電位変動を計測することで人間の行動と脳の働きの関連を推察することができると言われている。脳波を導出する部位は国際脳波・臨床生理学会連合標準電極配置法によって頭部の 21 ヶ所が決められており、この導出法を **ten-twenty electrode system** (以下、**10/20 法**) という。図 4-6 は 10/20 法の電極配置図⁽⁴²⁾を示す。この 10/20 法には基準導出法と双極導出法の 2 つに分類され、基準導出法は一方の電極を耳たぶなどの不関電極に他の電極を頭皮上に貼付し、電位差を記録する方法であり、臨床検査などで用いられている。また、双極導出法は頭皮上の 2 点間の電位差を記録する方法である。本研究では人間工学の分野でよく用いられている基準導法を用い、 α 波および δ 波が顕著に現れる 3 部位(**Fz**、**Cz**、**Pz**)を計測した。また、測定した脳波に対して周波数解析を行うと δ (4Hz 以下)、 θ (4Hz-8Hz)、 α 波帯域 (8Hz-13Hz) 3 つの周波数帯域に分類される。 α 波帯域はさらに **slow α** 波帯域、**mid α** 波帯域、**fast α** 波帯域の 3 つに分類できる。一般に β 波は速波、 δ 波と θ 波は徐波と呼ばれており、徐波は覚醒水準、意識レベルの低下によって出現する。また、 δ 波帯域は睡眠が深いときに出現し、 θ 波帯域は入眠初期のまどろみ状態の時に出現し、 α 波帯域は精神的に落ち着いた状態や目を閉じて光刺激を遮断している際に出現する。これらの特性から、本実験では深い睡眠時に出現する δ 波帯域に着目し、実験参加者の睡眠状態を定量的に評価することとした。

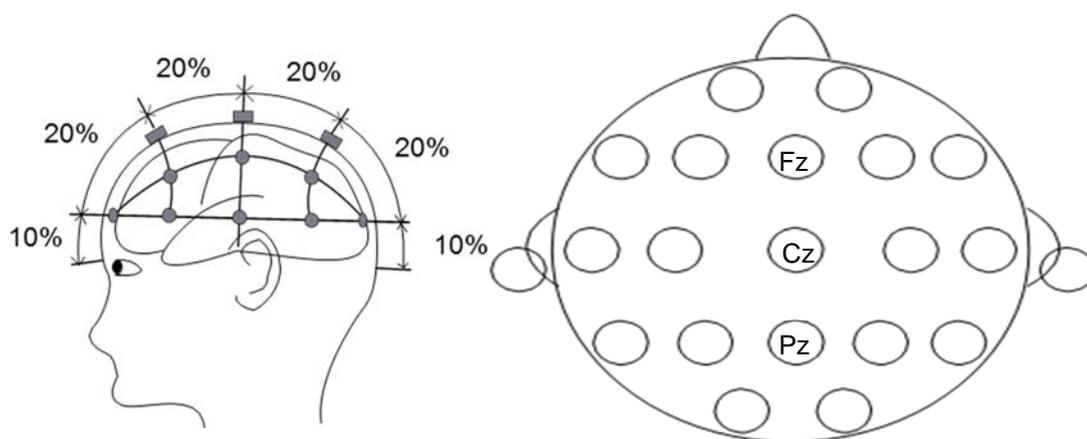


図 4-6 電極の取り付け位置⁽⁴²⁾

4-3-4. 実験手順

本実験は、睡眠グループと覚醒グループに分けて実験を実施した。以下に、各グループの実験手順を示す。

【睡眠グループの実験手順】

- (1) 実験内容を口頭説明し実験参加者の同意（インフォームドコンセント）を得る。
- (2) 実験参加者に脳波計測装置の電極を取り付ける（電極の取り付け位置は「4-3-3. 脳波測定」を参照）
- (3) 実験参加者を DS に乗車させる。
- (4) 実験参加者が自動運転システムを使用し、高速道路を 2 時間程度走行する。
- (5) 実験参加者が自動運転システムから運転操作を引き継ぎ、市街地を走行する（詳細は、「4-3-1. 実験シナリオ」を参照）。
- (6) 歩行者の飛び出しに対して、実験参加者のブレーキ操作に関するデータを計測する。

【覚醒グループの実験手順】

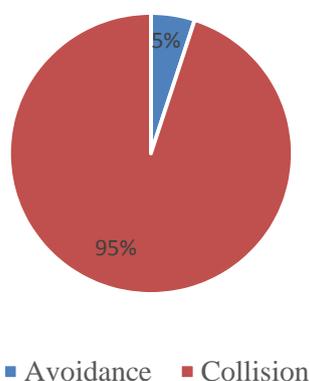
- (1) 実験内容を口頭説明し実験参加者の同意（インフォームドコンセント）を得る。
- (2) 実験参加者を DS に乗車させる。
- (3) 実験参加者が自動運転システムを使用し、高速道路を 5 分程度走行する。
- (4) 実験参加者が自動運転システムから運転操作を引き継ぎ、市街地を走行する（詳細は、「4-3-1. 実験シナリオ」を参照）。
- (5) 歩行者の飛び出しに対して、実験参加者のブレーキ操作に関するデータを計測する。

睡眠グループと覚醒グループの歩行者の飛び出しに対するブレーキ操作に関するデータを比較検討することで、出眠したばかりのドライバーが自動運転システムから適切に運転操作を引き継ぐことができるのかを評価することとした。

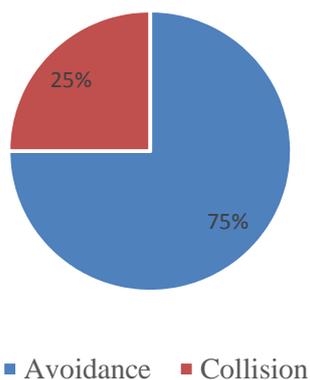
4-4. 実験結果

4-4-1. 衝突の割合

図 4-7 (a) は、睡眠グループの実験参加者が前方に飛び出した歩行者と衝突した割合を示す。また、図 4-7 (b) は、覚醒グループの実験参加者が前方に飛び出した歩行者と衝突した割合を示す。本実験結果から、覚醒グループの実験参加者は、歩行者との衝突を回避できた割合が 75% (15 人) であり、衝突した割合が 25% (5 人) であった。一方で、睡眠グループの実験参加者は衝突を回避できた割合が 5% (1 人) であり、衝突した割合が 95% (19 人) であった。睡眠状態から出眠したばかりのドライバーが自動運転システムから運転操作を引き継ぎ、市街地を運転すると、注意力が低下して歩行者を視認してからブレーキ操作までの時間が遅れることで衝突してしまうと考えられる。



(a) 出眠時



(b) 覚醒時

図 4-7 歩行者との衝突割合

4-4-2. ブレーキ反応時間

図 4-8 は、睡眠グループ及び覚醒グループの実験参加者が、歩行者を視認可能な状態からブレーキペダルを操作するまでの反応時間を示す。睡眠グループの実験参加者のブレーキ反応時間の平均値は、1.0s である。一方で、覚醒グループの実験参加者のブレーキ反応時間の平均値は、0.5 秒程度である。また、睡眠グループには、最大で 3 秒以上のブレーキ反応時間となる実験参加者も確認できた。睡眠グループと覚醒グループにおいて、t 検定を行ったところ有意差が確認できた ($p < 0.01$)。本実験結果から、出眠したばかりのドライバーは、歩行者を認知し、ブレーキ操作を行うまでの時間が遅く歩行者との衝突を避けられないと考えられる。

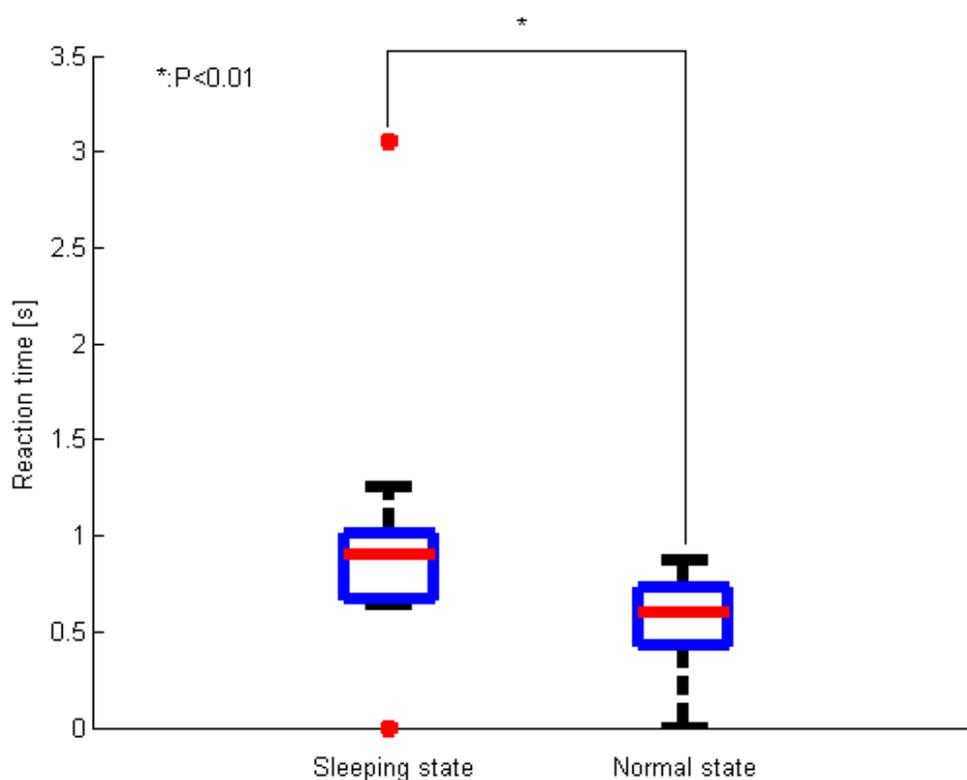


図 4-8 ブレーキ反応時間

4-4-3. ブレーキペダル踏力

図 4-9 は、睡眠グループ及び覚醒グループの実験参加者が、ブレーキ操作時におけるブレーキペダル踏力の最大値を示す。図 4-9 より、睡眠グループの実験参加者のブレーキペダル踏力の最大値の平均値は、100N 以下である。一方で、覚醒グループの実験参加者のブレーキペダル踏力の最大値の平均値は、300N 以下である。また、睡眠グループと覚醒グループにおいて、t 検定を行ったところ有意差が確認できた

($p < 0.01$)。本実験結果から、出眠したばかりのドライバは、適切にブレーキペダルを踏み込むことができず、歩行者との衝突を避けられないと考えられる。

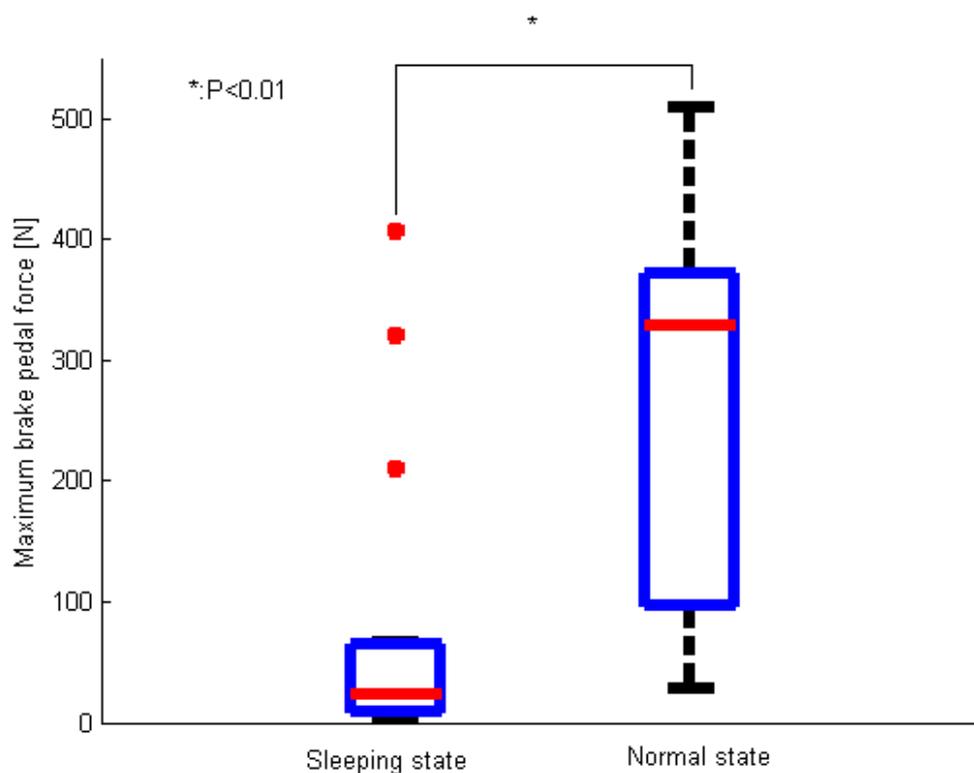


図 4-9 ブレーキペダル踏力の最大値

4-4-4. ブレーキ踏力の立ち上がり時間

図 4-10 は、睡眠グループ及び覚醒グループの実験参加者がブレーキ操作を開始してから、ブレーキペダル踏力が最大値になるまでのブレーキ立ち上がり時間を示す。図 4-10 より、睡眠グループの実験参加者のブレーキ踏力立ち上がり時間は、0.5~2 秒の間で推移している。一方で、覚醒グループの実験参加者のブレーキ踏力立ち上がり時間は、0.5~1.5 秒の間で推移している。また、睡眠グループと覚醒グループにおいて、t 検定を行ったところ有意差は確認できなかった。本実験結果から、睡眠グループ及び覚醒グループを比較するとブレーキ踏力の立ち上がり時間については、明らかな違いが見受けられなかった。

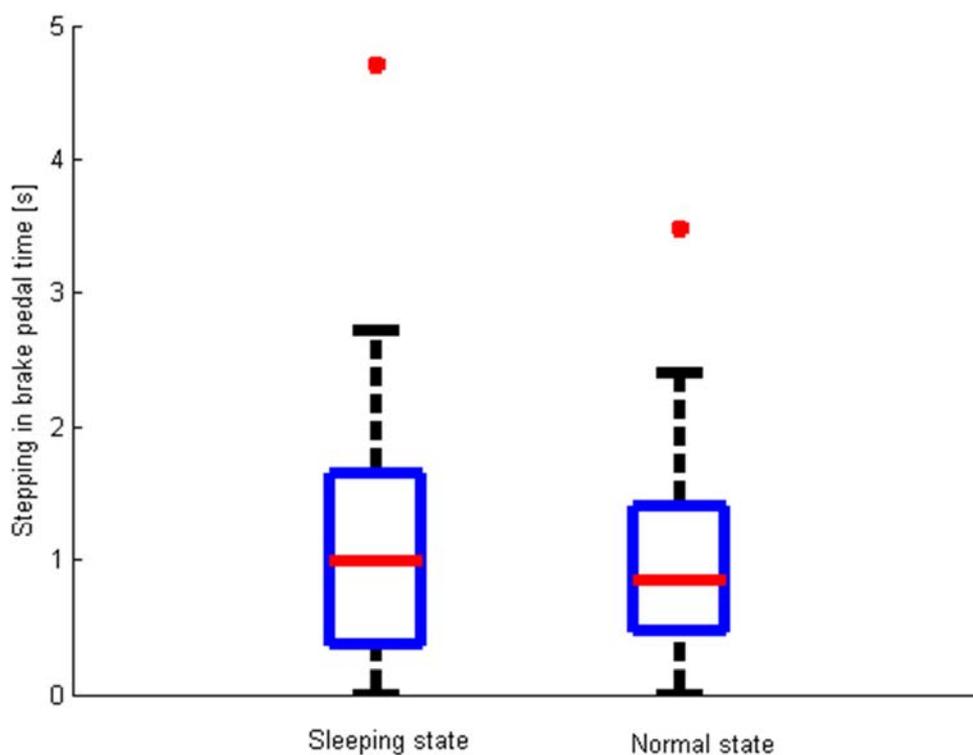


図 4-10 ブレーキ踏力の立ち上がり時間

4-4-5. 脳波の分析

本実験では、睡眠グループの実験参加者が本当に睡眠状態であったのかを確認するために脳波を分析した。図 4-11 は、 δ 波帯域（4Hz 以下）の脳波の Power Spectral Density（以下、PSD）を示す。被験者ごとに実験開始直後の脳波と実験を開始してから 2 時間後の脳波の PSD を計算し、全被験者の PSD を平均した。本実験結果から、実験開始直後に比べて、実験を開始してから 2 時間後の脳波には、 δ 波帯域が多く出現していることが得られた。また、この二つのデータに対して t 検定を実施すると有意差が確認できた ($p < 0.01$)。よって、実験参加者は高速道路での自動運転中に深い睡眠状態であったといえる。

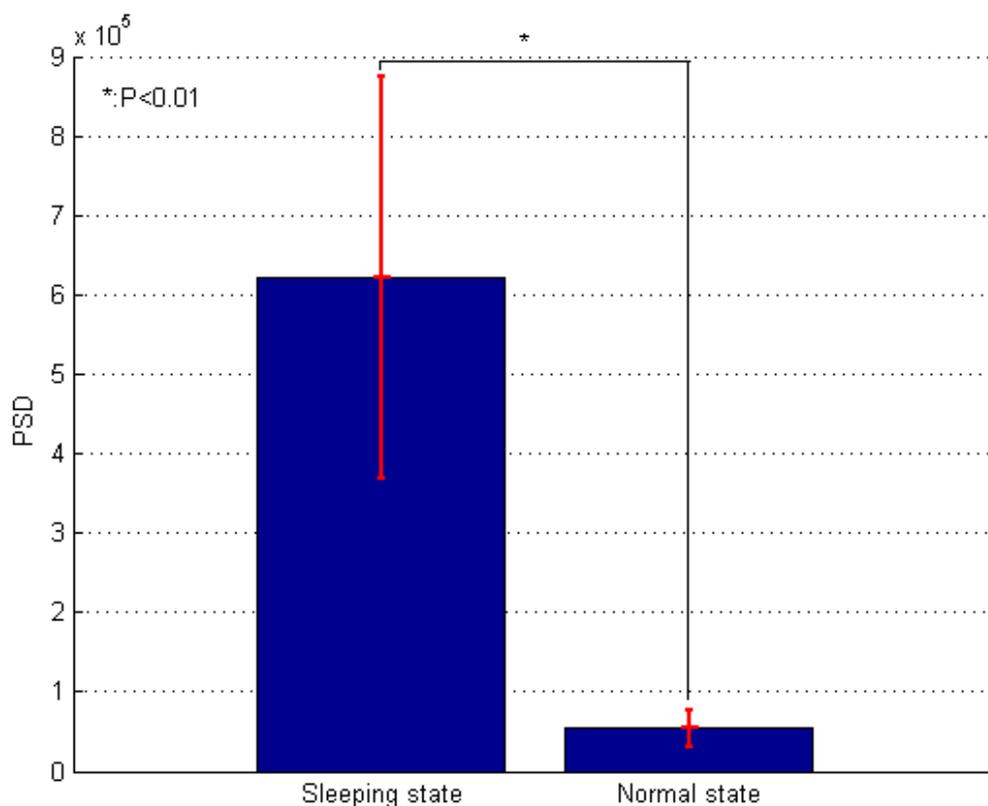


図 4-11 δ 波帯域（4Hz 以下）の PSD

4-5. 結論

自動運転レベル4について整理すると高速道路の出口付近において、ドライバは自動運転システムから運転操作を引き継ぐ必要がある。しかし、高速道路を自動運転中に、ドライバが睡眠状態になると、出口付近にて運転操作を引き継いだ出眠したばかりのドライバは市街地を適切に運転できない可能性がある。そこで、本研究では、出眠したばかりのドライバが運転操作を引き継ぎ、市街地を走行中に飛び出してくる歩行者に対して、適切にブレーキ操作を行うことができるのかを評価することとした。その結果、以下の実験結果と結論を得た。

(1) 歩行者との衝突する割合

睡眠グループの実験参加者は衝突を回避できた割合が5%（1人）であり、衝突した割合が95%（19人）であった。覚醒グループの実験参加者は、歩行者との衝突を回避できた割合が75%（15人）であり、衝突した割合が25%（5人）であった。

(2) ブレーキ反応時間

睡眠グループの実験参加者のブレーキ反応時間の平均値は、約1.0sであった。一方、覚醒グループの実験参加者のブレーキ反応時間の平均値は、約0.5sであった。出眠したばかりのドライバは、歩行者を認知し、ブレーキ操作を行うまでの時間が遅く歩行者との衝突を避けられないと考えられる。

(3) ブレーキペダル踏力

睡眠グループの実験参加者のブレーキペダル踏力の最大値の平均値は、100N以下であった。一方、覚醒グループの実験参加者のブレーキペダル踏力の最大値の平均値は、約300Nであった。出眠したばかりのドライバは、適切にブレーキペダルを踏み込むことができず、歩行者との衝突を避けられないと考えられる。

(4) ブレーキ踏力の立ち上がり時間

睡眠グループの実験参加者のブレーキ踏力立ち上がり時間は、0.5～2秒の間で推移していた。一方で、覚醒グループの実験参加者のブレーキ踏力立ち上がり時間は、0.5～1.5秒の間で推移していた。睡眠グループ及び覚醒グループを比較するとブレーキ踏力の立ち上がり時間については、明らかな違いが見受けられなかった。

(5) 脳波の分析

本実験では、睡眠グループの実験参加者が本当に睡眠状態であったのかを確認するために脳波を計測した。実験開始直後に比べて、実験を開始してから2時間後の脳波には、 δ 波帯域が多く出現しており、実験参加者は高速道路での自動運転中に深い睡眠状態であったといえる。

以上の実験結果から、高速道路出口付近において、出眠したばかりのドライバが自動運転システムから運転操作を引き継ぎ、市街地を走行すると、歩行者の飛び出しに対して、ブレーキ反応時間が遅く、ブレーキペダルを適切に踏み込めないことにより、歩行者と衝突する危険性が高いことが示唆された。そこで、出眠したばかりのドライバが市街地を適切に運転するには、ドライバモニタリングや脳波等の生体情報からドライバの覚醒状態を確認したうえで運転操作を引き継ぐことやドライバを短時間で覚醒させる手法の検討が必要である。

第5章 出眠時における手動運転に遷移する際の刺激による覚醒効果に関する研究

5-1. 研究概要と方針

上記の先行研究⁽³³⁾では、高速道路で自動運転走行中にドライバーが睡眠を取り、高速道路出口付近で出眠したドライバーが運転操作を適切に引き継げるのかを検討している。本研究は、運転操作を引き継いだドライバーが死角から飛び出してくる歩行者に対して、ブレーキ操作を適切に行うことができるのかを評価した。その結果、出眠後のドライバーは覚醒時に比べてブレーキ操作の反応時間が遅く、ブレーキペダル踏力も弱くなる傾向が確認され、歩行者との衝突を回避することができない可能性が示唆された。ドライバーの居眠りを防止するという観点による研究⁽²⁹⁾が報告されているが、自動運転を安全に普及させるためには、一度睡眠したドライバーを短時間で覚醒させるという事が重要となってくる。よって、本研究では、高速道路の自動運転中においてドライバーが睡眠を取ることを想定し、出眠したばかりのドライバーが覚醒時と同等の運転操作を行うことが可能になる覚醒手法について検討することを目的としている。また、覚醒手法については、車内でも簡易的に用意することができ、自動運転中においても容易にドライバーへ刺激を与えることができるエアコンによる送風と座席の振動を採用することとした。本覚醒手法は、ドライバーの居眠り防止の覚醒手法として、効果があることが確認されている⁽²⁹⁾。本研究では、同手法が一度睡眠したドライバーを短時間で覚醒させる効果について検討することとした。なお、本検討内容は、衝突の危険性が極めて高いものであるため、実験参加者の安全性を考慮して、DSを使用して実験を実施することとした。

5-2. 実験装置

5-2-1. ドライビングシミュレータ

5-2-1-1. ドライビングシミュレータの概要

本研究は、実験シナリオの内容として、ドライバが一度睡眠を取ることを想定している。先行研究からも報告されているとおり、出眠したばかりのドライバはブレーキ反応時間やブレーキペダル踏力にばらつきがあり、歩行者と衝突する可能性が高く、安全性を確保するために DS を使用している。また、WP.29 では、DS を使用して、覚醒時におけるドライバが自動運転システムから運転操作に適切に引き継ぐのに必要な時間について研究しており、その成果を国際基準に反映している⁹⁾。このことから、DS を使用して、出眠したばかりのドライバを適切に覚醒させる手法を検討することは、有効であるといえる。よって、本実験でも DS を使用して実験を実施することとした。図 5-1 に本研究で使用した DS の概略図を示す。また、表 5-1 に DS の仕様を示す。

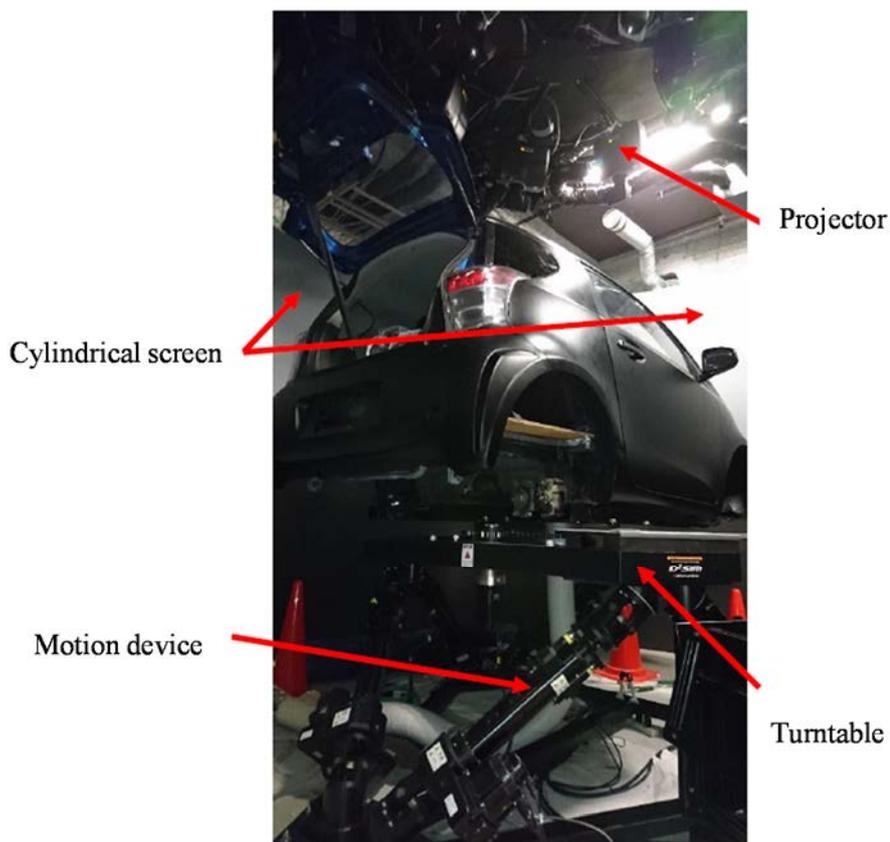


図 5-1 DS の外観

表 5-1 DS の仕様

Motion Device		
Mass	1000kg	
Range	X	+116/-106mm
	Y	± 104mm
	Z	+114/-104mm
	Yaw	± 7.3deg
	Roll	± 7.7deg
	Pitch	+7.7/-8.1deg
Maximum Velocity	X	± 500mm/s
	Y	
	Z	
Maximum Angular Velocity	Yaw	± 33deg/s
	Roll	
	Pitch	
Maximum Acceleration	X	± 0.6G
	Y	
	Z	± 0.5G
Turntable Device		
Mass	500kg	
Moment Of Inertia	200kgm ²	
Range	± 180deg	
Maximum Angular Velocity	± 60deg/s	

5-2-1-2. ドライビングシミュレータのシステム概要

図 5-2 は、本実験で使用した DS のシステム構成図を示す。ハンドル、ブレーキペダル、アクセルペダルにひずみアンプを使用しており、ドライバの操作量をアナログ量として計測し、デジタル量に変換しパソコンに取り込む。DS の入力データは、実験参加者の運転操作量であるアクセルペダルとブレーキペダルのストローク量及び、ハンドルの操舵角を用いる。各入力の操作量は、Analog to Digital Converter（以下、A/D コンバータ）を介してデジタル量として車両運動計算機に取り込まれ、車両運動計算機に実装されている車両運動モデルが車両運動量や車両座標位置を計算し、各システムに送信する構成となっている。6 軸のモーション装置が、入力操作量に対する車両挙動から制御量を計算して実験参加者に与える加減速度の模擬をしている。また、ターンテーブルも使用しており、実験参加者のハンドル操作量に対して、車両が回転するようになっている。

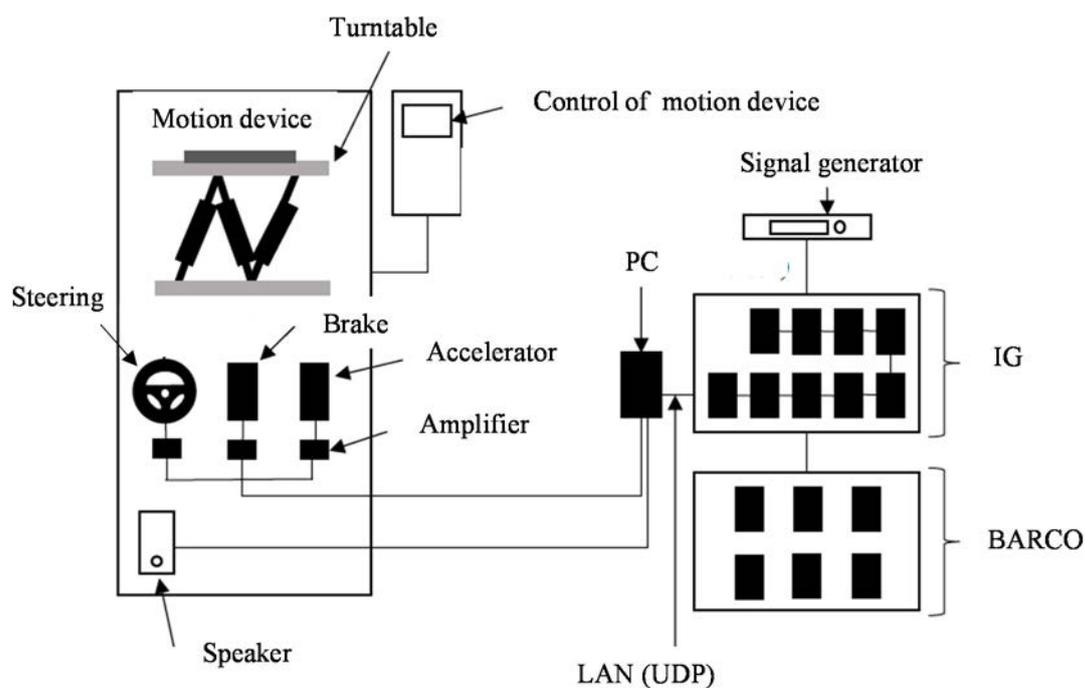


図 5-2 DS のシステム構成

5-2-1-3. プロジェクタの配置と視野角について

本研究で使用した DS は、図 5-3 のように円筒スクリーンに画像を映し出し、実車と同様に 360° の景色を再現している。使用しているプロジェクタは Barco F50 というプロジェクタである。ひずみ変換ユニットを使用し、円筒スクリーンに映像を映し出す際に歪みを修整しているため、直線の箇所は直線に、曲線の箇所は曲線に映る。また視野角 (FOV : Field Of View) は上方向に 23.6°、下方向に 17.4° とした (図 5-4 参照)。

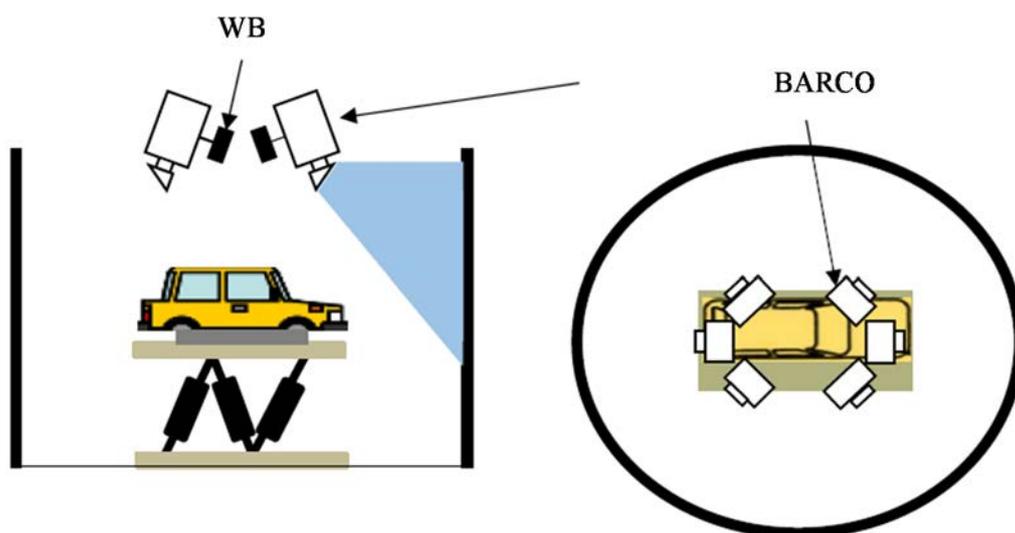


図 5-3 プロジェクタとひずみ変換ユニット概略図

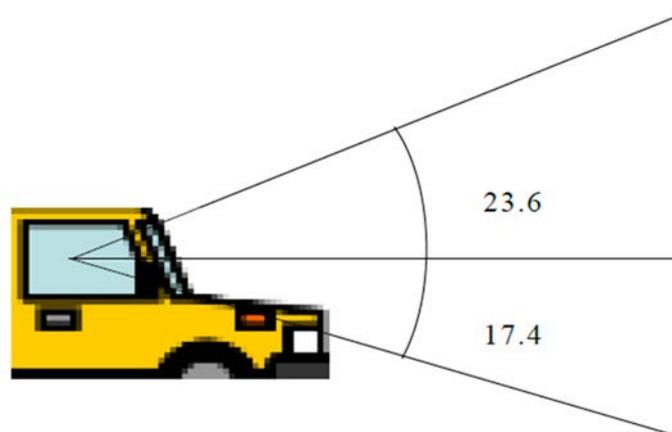


図 5-4 FOV 概略図

5-2-2. 脳波の測定装置

本研究では、脳波の測定に株式会社デジテックス社製 Polymate Mini AP108 を用いた。本測定器は、本体内部に生体アンプと Bluetooth を内蔵しており、リアルタイムで脳波を確認することができる。アクティブ電極を用いているため、通常脳波計などに用いられている皿電極よりも周囲環境の電磁ノイズや、実験参加者の動きにより生じる電気ノイズに対して高い S/N 比を持っており、DS 内の計測においても使用することができる。図 5-5 に本実験で使用した脳波計測装置の概略図を示す。また、表 5-2 に脳波計測装置の仕様を示す。



図 5-5 脳波計測装置

表 5-2 Polymate Mini AP108 の仕様

Substance		
Part of measurement contain		
Number of electrode	Multi-purpose	8
	External	2
	REF	1
	E	1
REF is active electrode when use multi-purpose		
Number of channel	1	
Input impedance	Active electrode 300GΩ、 Other 10MΩ	
AD converter	20bit	
Sampling frequency	500/1000Hz	
Correspondence to medium	PC/CompactFlash	
General		
Power source	DC5V, Lithium-ion battery	
External dimensions (W×H×D)	52mm×50mm×20mm	
Mass	80g, (Not included battery)	
*Not use for clinical experience		

5-2-3. 覚醒手法用の装置

本研究では、VIBRO-TRANSDUCER Vt708（以下、振動子）を使用して、実験参加者に振動を与える。図 5-6 に振動子の概略図、表 5-3 に振動子の仕様を示す。この振動子を運転席の座席に取り付け、実験参加者に振動を与えることとした。

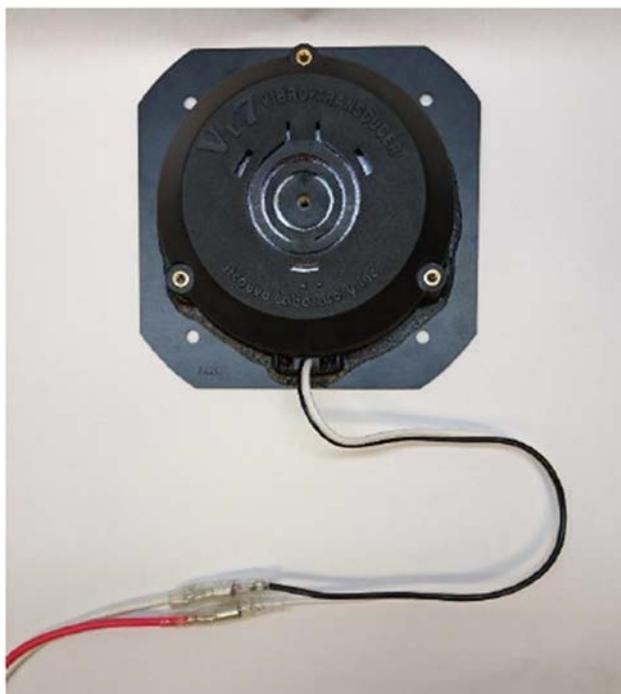


図 5-6 振動子の概略図

表 5-3 振動子の仕様

Impedance	8Ω ±15%(150Hz,4V)
Input	10W(20W)
Polarity	Black : - White : +
Size [mm]	115(W)×116(D)×30.5(H)
Weight [g]	500
Lowest frequency band [Hz]	16
Frequency of music playback [Hz]	20~1500

5-3. 脳波の計測方法

5-3-1. 脳波の概要

人の脳は、およそ百億以上の神経細胞がネットワークを形成している。脳内のネットワークの情報伝達活動は、個々の神経細胞の活動に伴って生じる電位変化によるものである。一つ一つの神経細胞で発生する電位変化は $-80\text{mV}\sim+40\text{mV}$ と大変微弱である上、一般的に用いられる頭皮に電極を配置する場合、図 5-7 に示すように頭皮や頭蓋骨の何層にわたる膜や髄液などかなり離れた距離にある大脳皮質から電位を受け取るため、計測される脳波は数百万の神経細胞が発生させる電位変化が重なりあったものを計測している⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾。脳波は、周波数によって表 5-4 に示すように 4 種類に分けることができる⁽⁴⁵⁾。

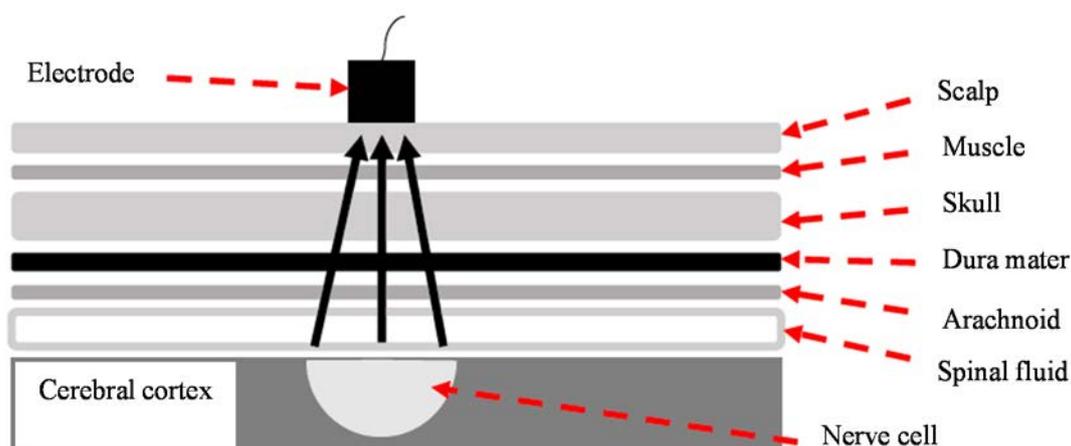


図 5-7 脳波計測装置

表 5-4 脳波の周波数

Frequency [Hz]	Name	Classification	State
0.5~4.0 Less than	δ Wave	Slow Wave	Sleeping
4.0~8.0 Less than	θ Wave	-	Sleeping
8.0~13.0 Less than	α Wave	Fast Wave	Low Alertness
13.0 over	β Wave	Fast Wave	Awake

5-3-2. 電極の配置方法

脳波を導出する部位は国際脳波・臨床生理学会連合標準電極配置法によって頭部の21ヶ所が決められており、この導出法を **Ten-twenty electrode system**（以下、10/20法）という⁽⁴²⁾。図5-8は10/20法による各電極の配置図を示す。この10/20法には基準導出法と双極導出法の2つに分類され、基準導出法は一方の電極を耳たぶなどの不関電極に他の電極を頭皮上に貼付し、電位差を記録する方法であり、臨床検査などで用いられている。また、双極導出法は頭皮上の2点間の電位差を記録する方法である。本研究では人間工学の分野でよく用いられている基準導法を用い、 α 波および δ 波が顕著に現れる3部位(Fz、Cz、Pz)を計測した⁽⁴²⁾。また、測定した脳波に対して周波数解析を行うと δ (4Hz以下)、 θ (4Hz-8Hz)、 α 波帯域(8Hz-13Hz)3つの周波数帯域に分類される。 α 波帯域はさらにslow α 波帯域、mid α 波帯域、fast α 波帯域の3つに分類できる。一般に β 波は速波、 δ 波と θ 波は徐波と呼ばれており、徐波は覚醒水準、意識レベルの低下によって出現する。また、 δ 波帯域は睡眠が深いときに出現し、 θ 波帯域は入眠初期のまどろみ状態の時に出現し、 α 波帯域は精神的に落ち着いた状態や目を閉じて光刺激を遮断している際に出現する⁽⁴³⁾ ⁽⁴⁴⁾ ⁽⁴⁵⁾。これらの特性から、本実験では深い睡眠時に出現する δ 波帯域に着目し、実験参加者の睡眠状態を定量的に評価することとした。

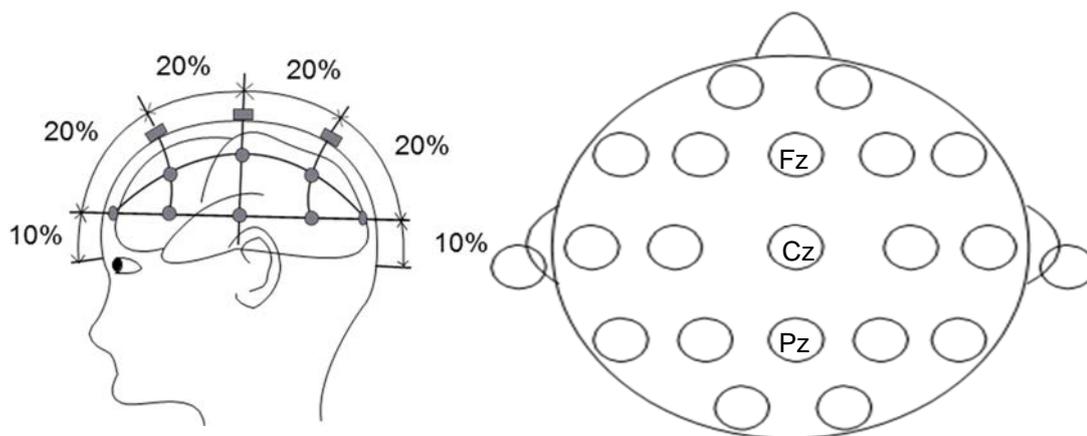


図 5-8 電極の取り付け位置⁽⁴²⁾

5-4. 実験方法

以下に示す実験シナリオを 10 人の実験参加者に協力頂き、出眠時のドライバを効果的に覚醒させる手法を検討することとした。また、実験参加者が常に覚醒状態にある状況においても同様の実験を行い比較することで、実験参加者は覚醒手法によって覚醒時と同等の運転操作を行えるようになるのかを検討することとした。

5-4-1. 実験のシナリオ

本実験シナリオは以下に示すとおりである。

- ① 説明資料を基に実験内容を説明し、同意書に実験参加者の署名をもらう（実験参加者のインフォームドコンセントを得る）。
- ② 実験参加者が自動運転システムを使用し、一定の速度（100km/h）で高速道路の左車線を走行中に睡眠を取る。
- ③ 実験参加者が深い睡眠状態にあることを脳波で確認後、実験参加者をアラーム（0.6 秒間に 2000Hz の音が 3 回なるものを 10 秒間提示）で出眠させる。
- ④ アラームの終了直後、DS 内部のエアコンと座席の振動による刺激を実験参加者に 2 分間、または 5 分間与える。
- ⑤ 高速道路を走行するシナリオから市街地を走行するシナリオに切り替える。
- ⑥ 実験参加者は、アクセルペダルとブレーキペダル、ハンドルを自身で操作し市街地を走行する。
- ⑦ 実験参加者が 2～3 分程度走行すると左車線の端に停止しているトラックの陰から歩行者が飛び出してくる。実験参加者は、この飛び出してくる歩行者との衝突を避けるためにブレーキ操作を行う。図 5-9 に歩行者の飛び出しにおける DS の前方映像を示す。



図 5-9 歩行者の飛び出しシナリオ

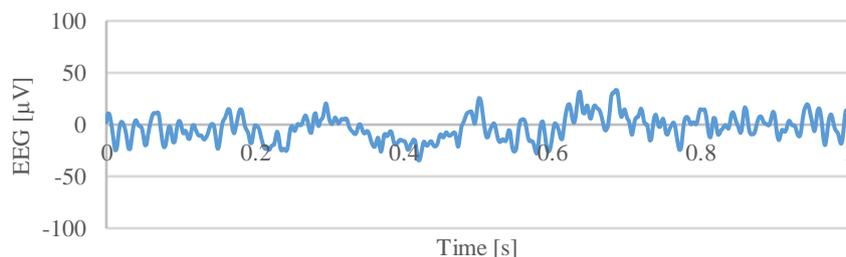
5-4-2. 実験条件

本実験条件は、以下に示すとおりである。

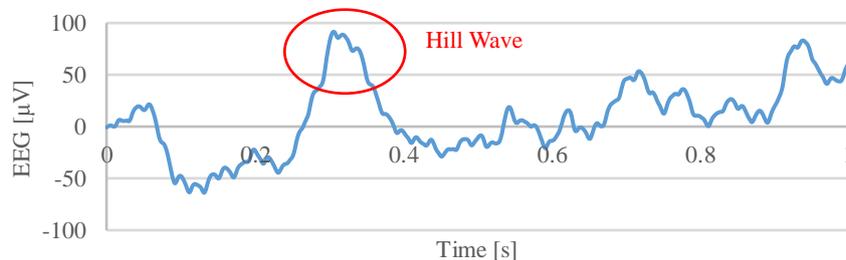
- ① 市街地の道路形状は、歩行者との衝突事故が多い単路を想定し⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾、片側1車線とした。
- ② 市街地の単路は、法定速度を40km/hとするため、実験参加者の目標速度は40km/hとした。
- ③ 実験参加者には、歩行者が飛び出してくることを伝えずに実験を実施した。
- ④ 実験参加者が急ブレーキで衝突を回避できる Time To Collision（以下、TTC）が、2秒のタイミングで歩行者が飛び出すこととした。
- ⑤ 飛び出してくる歩行者は、反応するのが困難である子供を想定している。なお、子供の身長（1154mm）や歩行速度（8km/h）等については、European New Car Assessment Program⁽⁴⁶⁾が策定した子供に対する被害衝突軽減ブレーキの評価方法で定義されている値を参考とした。
- ⑥ 刺激や実験シナリオの慣れを考慮し、実験回数は1日につき1回とした。また、実験は1条件につき1回のみとし、1人につき全部で3回のみとした。なお、1回ごとの実験は一週間以上あけることとした。
- ⑦ 一般道路でのシナリオは3種類用意し、歩行者の飛び出してくるタイミングがわからないようにすることとした。

5-4-3. 実験参加者の睡眠状態の監視方法

居眠りの運転発生の生理的メカニズムの研究⁽⁴³⁾によると、深い睡眠段階である Stage3, 4 (余波睡眠) に達すると出眠が難しくなり、出眠できてもかえって眠気や疲労が増大するという (睡眠惰性) 報告がされている。本研究では、実験参加者がこの深い睡眠段階である Stage3, 4 に陥った状態から効果的に覚醒する手法を検討することとした。そのため、実験参加者の脳波をリアルタイムで監視し、実験参加者の脳波が Stage1, 2 の浅い睡眠状態 (図 5-10 (a) 参照) から、Stage3, 4 の深い睡眠状態 (図 5-10 (b) 参照) に移行することを確認し、実験参加者が深い睡眠状態にあることを踏まえたうえで実験を行っている。深い睡眠に陥る過程は個人差があるため、実験参加者の睡眠時間は、ばらつきがあった (1~3 時間程度)。図 5-10 に示すように実験参加者が Stage3, 4 の深い睡眠を取ると、Stage1, 2 の浅い睡眠時には見られなかった丘波⁽⁴⁷⁾ (δ 波の範囲で振幅 $75\mu\text{V}$ 以上) と呼ばれる脳波が見られるようになり、この特徴的な脳波である丘波が出現することを観測することにより、実験参加者が深い睡眠に陥ったことを確認した。なお、 δ 波の PSD を計算し覚醒時と睡眠時の有意差を分析することにより、ドライバが実際に深い睡眠に陥っていたのかを確認することとした。また、Stage3, 4 を対象とした理由は、リアルタイムでは単位時間あたりに占める丘波の割合を算出することができず、Stage3, 4 の区別をつけることができなかつたためである。



(a) 覚醒時の EEG



(b) 睡眠時の EEG

図 5-10 EEG の計測実例

5-4-4. 刺激による覚醒手法

本研究の目的は、出眠したばかりドライバが効果的に覚醒状態になる手法を検討することである。居眠り運転防止の対策に関する研究⁽²⁹⁾として、様々な方法で刺激を与える実験が実施されているが、本研究では容易に行うことができるエアコンによる送風⁽²⁹⁾と座席の振動による刺激を同時に与えることとした。DS内のエアコンによる刺激は右手にある送風口1つとし、エアコンの風を実験参加者の顔に直接あてる方法を採用した。また、エアコンの設定温度は19℃とし、風量を最大に設定して一定時間（2分間と5分間）刺激を与えた。振動による刺激は、運転席の背面に振動機器を設置し、エアコンと同様に一定時間（2分間と5分間）振動させた。振動機器の周波数は16Hzとした。覚醒手法として使用した振動子とエアコンの配置関係を図5-11に示す。

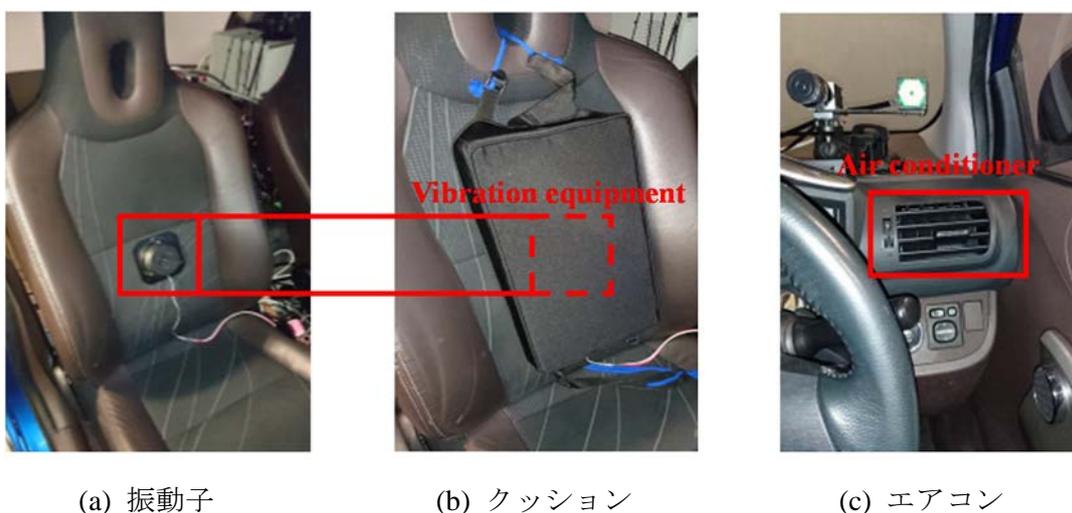


図 5-11 覚醒装置の配置図

5-5. ドライバの覚醒手法検討実験結果

5-5-1. 歩行者との衝突の割合

図 5-12 は、実験参加者が運転する車両と歩行者との衝突割合を実験条件別（1：覚醒状態、2：2分間の刺激を与えた場合、3：5分間の刺激を与えた場合）に示す。覚醒状態と5分間の刺激を与えた場合、すべての実験参加者が歩行者との衝突を回避することができた。一方で、2分間の刺激を与えた場合、実験参加者が歩行者と衝突する割合は10%（1名）となった。この衝突した原因を明らかにするために歩行者と衝突したデータ（1データ）を時系列に分析することとした。図 5-13 は、歩行者が飛び出した時間を基準（0秒）とした実験参加者が操作するブレーキストロークを示す。図 5-13 から、2分間の刺激を与えた場合、覚醒時に比べてブレーキを踏み始めるのが0.17秒遅く、ブレーキストロークを60%まで踏み込む時間は変わらない一方で、ブレーキストロークを60%から90%まで踏みきる時間が0.42秒長い（覚醒状態：0.56秒、2分間の刺激を与えた場合：0.98秒）ことが明らかになった。このブレーキストロークの操作遅れが、歩行者との衝突を回避できなかった要因であると考えられる。一方で、5分間の刺激を与えることによって、全ての実験参加者は歩行者との衝突を回避することができていることから、覚醒状態と同等の運転操作を行うことができる可能性が示唆された。よって、本研究では実験参加者の衝突回避に関わるブレーキ反応時間と最大ブレーキ踏力に着目して分析することにより、出眠したばかりの実験参加者が覚醒時と同程度にブレーキ操作を行えているのかを検討することとした。

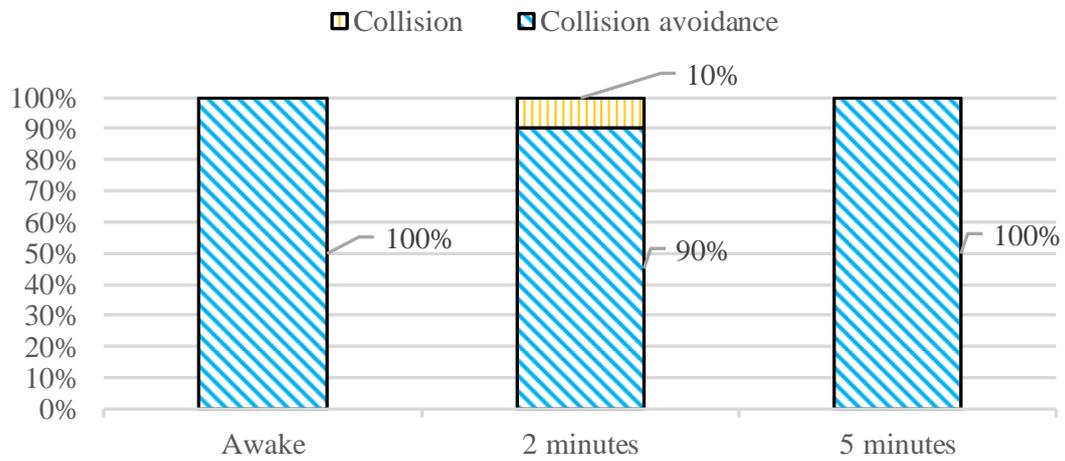


図 5-12 歩行者との衝突割合

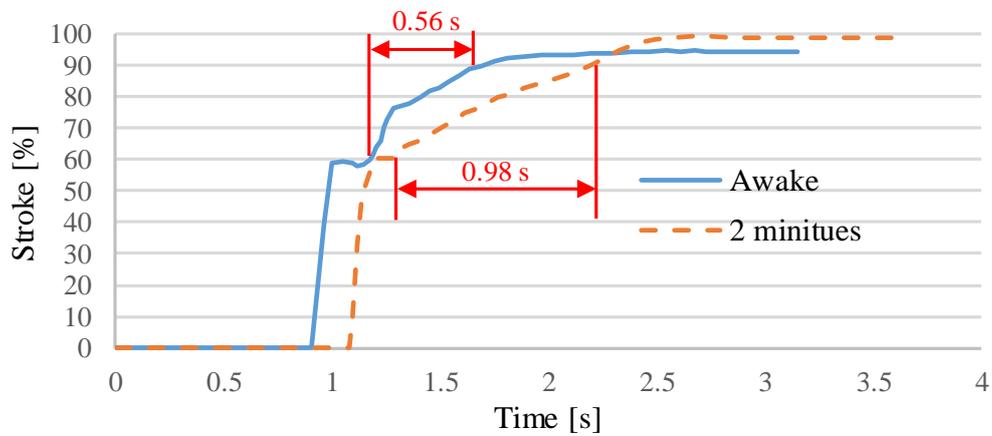


図 5-13 ブレーキストローク

5-5-2. ドライバのブレーキ反応時間

図 5-14 は、実験参加者が歩行者の飛び出しに対して、ブレーキを踏むまでの反応時間を実験条件別（1：覚醒状態、2：2分間の刺激を与えた場合、3：5分間の刺激を与えた場合）に示す。本研究に使用した DS では、ブレーキストロークが 20%以下の時、車両の制動力が発生しない仕様になっている（ブレーキペダルの遊び）。そこで、本研究では歩行者が飛び出してから、ブレーキストロークが 20%まで踏み込まれる時間をブレーキ反応時間と定義した。2分間の刺激を与えた場合、平均ブレーキ反応時間は 0.97 秒となり、覚醒時の 0.93 秒と比較して 0.4 秒遅いという結果になった。一方で、5分間の刺激を与えた場合、平均ブレーキ反応時間は 0.93 秒となり、覚醒時の 0.93 秒と比較すると、一緒になるという結果を得た。また、標準偏差はそれぞれ 0.11 秒（覚醒時）、0.08 秒（2分間の刺激）、0.10 秒（5分間の刺激）となっており、ばらつきは同程度であった。この実験結果を基に各実験条件におけるブレーキ反応時間に対して、等分散を前提とした優位水準 5%における t 検定を行うこととした。覚醒時と 2分間の刺激を与えた場合のデータ間に対して t 検定を行うと、p 値は 0.48 となり確率分布は一致しないという結果になった。一方で、覚醒時と 5分間の刺激を与えた場合のデータ間に対して t 検定を行うと、p 値は 0.92 となり同程度の確率分布であることが示された。また、覚醒時の標準誤差を算出すると 0.03 秒となった。覚醒時と 5分間の刺激を与えた場合の実験結果を比較すると標準誤差の範囲内であることに加え、10 人の実験参加者数でも十分にばらつきが少ないデータが取得できていることがわかる。以上の結果を踏まえると、2分間の刺激では実験参加者への覚醒手法の覚醒効果は確認できたが、覚醒効果が不十分であり、覚醒時と同程度のブレーキ反応時間にならないことが明らかになった。一方で、5分間の刺激を与えることによって、覚醒時と同程度のブレーキ反応時間になることが明らかになった。

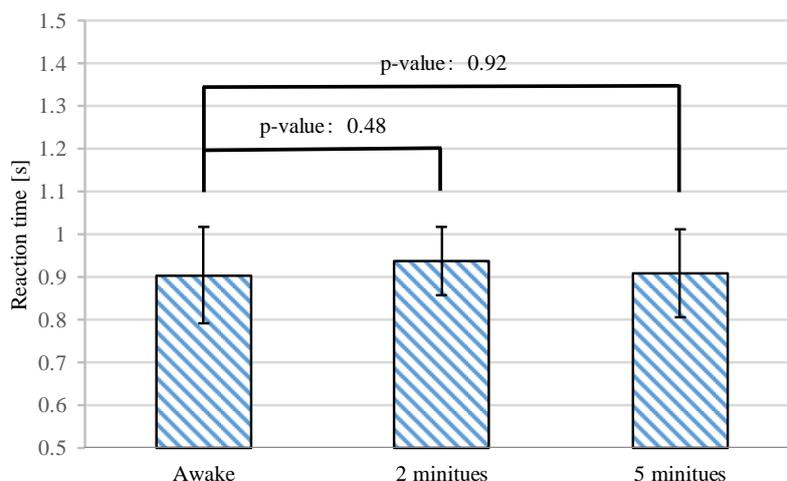


図 5-14 ブレーキ反応時間

5-5-3. ドライバのブレーキペダル踏力の最大値

本実験では、DS のブレーキペダルに踏力計を装着し、ドライバがブレーキペダルにかける踏力も合わせて計測している。本解析では、ドライバのブレーキ操作時に生じる最も高い踏力を最大ブレーキ踏力と定義している。図 5-15 は、実験参加者がブレーキ操作を行う際の最大ブレーキ踏力を実験条件別（1：覚醒状態、2：2 分間の刺激を与えた場合、3：5 分間の刺激を与えた場合）に示す。2 分間の刺激を与えた場合、平均最大ブレーキ踏力は 487N となり、覚醒時の 574N と比較して約 85% のブレーキ踏力となった。一方で、5 分間の刺激を与えた場合、平均最大ブレーキ踏力は 545N となり、覚醒時の 574N と比較して約 95% のブレーキ踏力になった。また、標準偏差はそれぞれ 326N（覚醒時）、215N（2 分間の刺激）、278N（5 分間の刺激）となっており、各実験条件のばらつきは等しくなかった。この結果を基に各実験条件における最大ブレーキ踏力が同程度であるのかを評価するために、分散が等しくないことを前提とした優位水準 5% における t 検定を行うこととした。覚醒時と 2 分間の刺激を与えた場合のデータ間に対して t 検定を行うと、 p 値は 0.51 となり確率分布は一致しないという結果になった。一方で、覚醒時と 5 分間の刺激を与えた場合のデータ間に対して t 検定を行うと、 p 値は、0.83 となり同傾向の確率分布であることが示された。また、先行研究では、出眠時と覚醒時の最大ブレーキ踏力において有意差 (p 値が 0.05 以下) があることが報告されている⁽³²⁾。以上の結果を踏まえると、ブレーキ反応時間の解析と同様に 2 分間の刺激では実験参加者への覚醒手法による覚醒効果は確認できたが、覚醒効果が不十分であり、覚醒時と同程度の最大ブレーキ踏力でブレーキを踏むことができないことが明らかになった。一方で、5 分間の刺激を与えることによって、覚醒時と同程度の最大ブレーキ踏力でブレーキを踏むことができることが明らかになった。

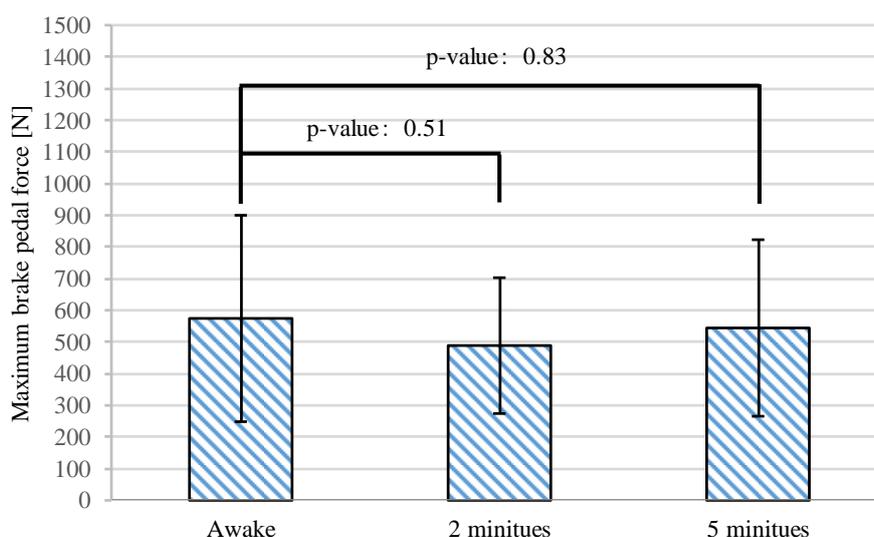


図 5-15 最大ブレーキ踏力

5-5-4. 脳波の分析

本実験では、脳波をリアルタイムで計測しながら実験参加者の睡眠状態を確認している。また、本研究では、計測したデータをもとに実験参加者が睡眠状態であったのかを定量的に評価することとした。睡眠時の脳波には、 δ 波帯域 (0.5~4Hz) の脳波が強く出現する。図 5-16 は、実験参加者が実験を始めた直後と自動運転システムを使用中に実験参加者が睡眠に陥った際の δ 波帯域の PSD を示す。PSD は、各実験参加者 20 秒分の脳波のデータをもとに実験参加者の代表値を算出し、代表値を平均することで条件ごとに平均値を求めることとした。また、覚醒時の脳波は、自動運転が開始された直後の 20 秒分のデータ、睡眠時の脳波は市街地のシナリオに切り替える直前の 20 秒分のデータを使用している。睡眠時の PSD は覚醒時の 3~4 倍程度の値となり、ばらつきが大きくなる。そこで、分散が等しくないことを前提とした優位水準 5% における t 検定を行い有意差について分析することとした。本解析結果から、実験開始直後 (覚醒時) に比べ、自動運転システムを使用中に実験参加者が睡眠に陥った際には δ 波帯域が多く出現しており、有意差があることを確認した。よって、高速道路での自動運転中において、実験参加者の監視画面と脳波の波形から居眠りを確認していること、オフラインによる実験参加者の覚醒時と睡眠時の脳波における PSD について有意差があることを確認したことにより、実験参加者が自動運転システムを使用している間、睡眠状態であったことが確認できた。なお、自動運転中においては着座姿勢であるため、脳波にノイズがのることがなく計測が可能であった。一方で、ドライバに刺激を与えた後は、ドライバが運転をするため、脳波にノイズがのってしまい計測することが不可能であった。そのため覚醒手法による脳波の影響まで分析することは、不可能であった。

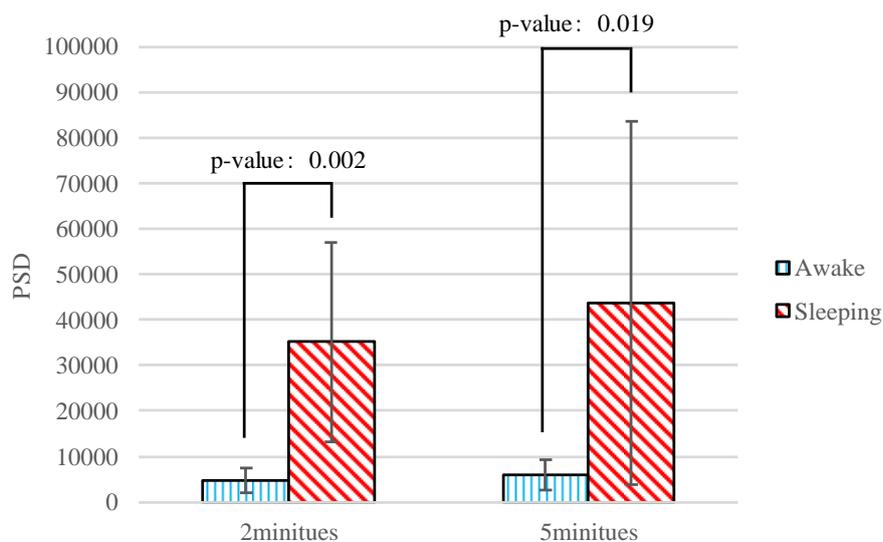


図 5-16 脳波の計測結果

5-6. 結論

本研究の目的は、高速道路での自動運転中にドライバーが睡眠を取ることを想定し、出眠時のドライバーが覚醒時と同等の運転操作を行うことが可能な覚醒手法について検討することである。そのため、本研究では自動運転システムレベル4を対象とした実験を実施した。ドライバーの覚醒手法検討実験は、まずドライバーが自動運転システムを使用し、高速道路の左車線を走行中に睡眠を取る。その後、高速道路出口付近で自動運転システムがドライバーに警告し出眠させた後、運転操作を遷移させる（計画的なシステム OFF）。ドライバーは自身で市街地を手動運転し、停止しているトラックの死角から飛び出してくる歩行者を避けるためにブレーキ操作を行うものである。ドライバーの覚醒手法として、警告を出した後、エアコンの送風と座席の振動による2つの刺激を2分間、または5分間与えた場合を比較検討することとした。また、ドライバーが常に覚醒状態にある状況においても実験を行い比較検討することで、覚醒手法が得られる効果を定量的に評価することとした。その結果、以下の結論を得た。

- (1) ドライバーに刺激を与える時間を増やすことによって、ドライバーは覚醒状態の運転操作に近づき歩行者との衝突を回避できるという結果を得た。
- (2) 2分間の刺激では、ドライバーへの覚醒効果は不十分であり、5分間の刺激を与えることによって、覚醒状態の反応時間とブレーキ最大踏力を引き出すことが可能となり、ドライバーは自動運転システムから運転操作を移譲し覚醒時と同等の運転操作を行うことができる。

また、刺激は短時間において繰り返し提示されることにより、その刺激に対する反応が徐々に薄くなっていく馴化の問題があり、先行研究によって数々の報告⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾がされている。先行研究のようなドライバーの居眠りを防止するための刺激は、数分間隔で与える必要がある。一方で、本研究のような高速道路において自動運転中に睡眠を取ったドライバーを起こす場合、再度ドライバーが高速道路で睡眠を取って起こすまでに数時間の間隔があくこととなる。このような状況下における馴化の影響についても今後の課題として検討すべき事案である。また、刺激を提示することにより車両の停車時間内（5分間）でドライバーを覚醒させることが可能だと判明した一方で、基準化を想定すると必要最低限の刺激提示時間や刺激として選定したエアコンの設定温度や風量、振動機器の周波数等による効果については引き続き検討する必要がある。

第6章 前照灯照射範囲の違いによる歩行者の被視認性の検討

6-1. 研究概要と方針

自動運転システムレベル4の使用方法について整理すると、市街地ではドライバーが自動運転システムから運転操作を引き継ぐこととなる。つまり、自動運転システムレベル4が普及しても、市街地での交通事故は引き続き発生する可能性が高い。市街地で発生する交通事故は、夜間におい対歩行者の衝突事故が最も多く、歩行者の被視認性が問題となっている⁽⁴⁸⁾。茨城県警の交通事故分析によると、夜間における対歩行者の衝突事故は、90%以上のドライバーがすれ違いビームを使用している時に発生したものである⁽⁴⁹⁾。すれ違いビームの照射距離は40m程度とされており、市街地の法定速度である60km/h (16.6m/s)で走行中に歩行者を発見した場合、発見から1秒でブレーキを踏めたとしても車両が停止するまでに約37mの距離が必要になり、発見のタイミングや路面状況によっては非常に危険な状況である。こうした背景から、各県警においてドライバーが走行ビームを使用することを推奨する動きが広がりつつある。走行ビームを使用することにより、夜間における対歩行者の衝突事故の約50%が回避可能であったという報告もされている⁽⁴⁹⁾。しかし、その一方で、歩行者へのグレア対策も必要となる。この対策として、走行ビーム/すれ違いビームを自動切り替える前照灯システムや配光を自動制御するADBといったシステムの導入が図られつつある。本研究では、自動運転システムレベル4の根幹を支える技術であるADBに対する歩行者の被視認性を検討することとした。また、ADBによる歩行者の被視認性は、走行ビームとすれ違いビームに対する歩行者の被視認性と比較検討することとした。なお、歩行者の被視認性の評価方法として、歩行者としては区別できないが、何かを知覚（以下、知覚物体知覚）する場合と歩行者として認知（以下、歩行者認知）する場合を分類して分析した。

6-2. 交通死亡事故の分析

6-2-1. 昼夜別における交通死亡事故分析

夜間において、ドライバは視力の低下やグレア感度の向上に伴う蒸発現象などにより、歩行者を認知しづらくなる。警察庁の交通事故データによると交通死亡事故の中で昼間における対歩行者の衝突事故は、475件である。一方、夜間における対歩行者の衝突事故は、1,023件であり、昼間の衝突事故件数の2倍以上となる⁽⁴⁸⁾（図6-1参照）。このように、夜間において対歩行者の衝突事故が最も多く、歩行者の被視認性が問題となっている。

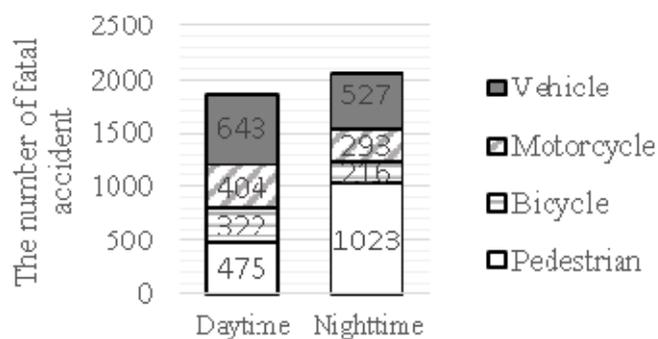


図 6-1 昼夜別における交通死亡事故の比較⁽⁴⁸⁾

6-2-2. 前照灯配光特性による交通事故の影響

昼間における対歩行者の衝突事故は自動車から見て「右から左への横断」と「左から右への横断」の割合がほぼ同等である。一方で、夜間において「右から左への横断」の対歩行者の衝突事故割合が多く、約70%を占める⁽⁵⁰⁾ (図6-2参照)。この原因としてすれ違いビームの配光特性が考えられる。すれ違いビームは対向車や前車を眩惑しないよう水平ラインから上方向を照らす光をカットしている。一般的にこのカットオフラインは対向車に対し、眩しくないよう右方向につれ下がるようになっている

(図6-3参照)。その前照灯配光特性から右側の照射範囲が制限され、歩行者の被視認性が低くなることにより、「左から右への横断」よりも「右から左への横断」の方が交通事故につながりやすいと推測される。以上の交通事故分析を踏まえ、夜間における対歩行者の衝突事故割合を減少させるために歩行者の被視認性の分析が必要である。

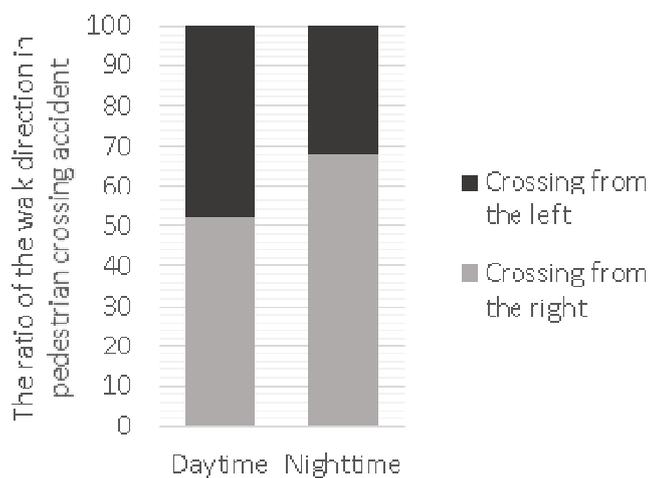


図6-2 横断方向別における対歩行者の衝突事故割合⁽⁵⁰⁾

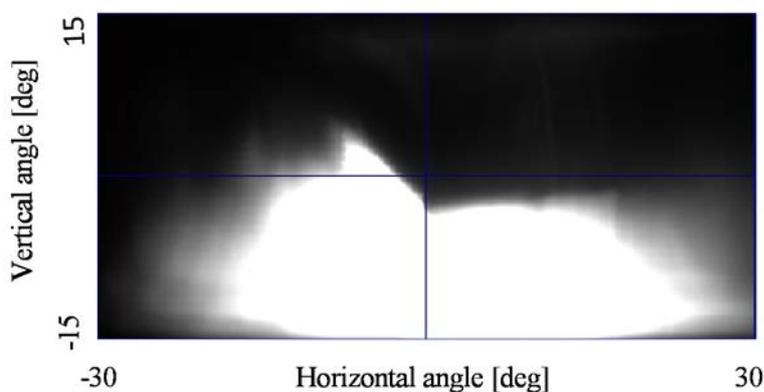


図6-3 すれ違いビームの配光

6-3. 実験方法

6-3-1. 実験概要

本研究では、ADB 及び走行ビーム、すれ違いビームによる歩行者の被視認性を明らかにするために、被験者による評価実験を実施した。暗室を用いて背景輝度やコントラスト比を変化させることにより、各条件における歩行者の被視認性を評価した。実験内容は、スクリーン（最大投影面積 $0.7\text{m} \times 1\text{m}$ ）上に歩行者（ 160cm を想定）の画像を投影した状態で、ドライバを想定した実験参加者が歩行者を観測評価するものである（図 6-4 参照）。なお、スクリーンは、実験参加者から 6m 離れたところに設置し、歩行者を投影する画像の大きさは、縮尺率を考慮して算出した。歩車間距離は、 $30, 40, 60, 100, 150\text{m}$ の 5 種類を想定し、投影画像の大きさは $5\text{cm} \sim 30\text{cm}$ 程度となった。



図 6-4 実験風景

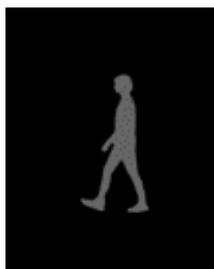
6-3-2. 視認対象物

本研究では、視認対象物として、歩行者の画像をスクリーンに投影した。スクリーンに投影する画像は、3種類の画像（図 6-5 参照，(a)：全身画像，(b)：首下画像，(c)：足元画像）を用いた。それぞれ、(a)：全身画像は走行ビーム、(b)：首下画像は ADB、(c)：足元画像はすれ違いビームを想定している。なお、すれ違いビームによる歩行者の照射される足下の高さ H_p [m]は、ヘッドライトの高さ（地上高：0.65m）とヘッドライトの勾配（0.01）、歩車間距離によって決まり、以下に示す式(1)から算出する。つまり、歩車間距離 30m において、歩行者の照射される足下の高さは 0.35m、歩車間距離 60m において、歩行者の照射される足下の高さは 0.05m となる。

$$H_p = 0.65 - 0.01 \times D \quad \dots\dots\dots(1)$$

H_p ：すれ違いビームによって照射される足元の高さ

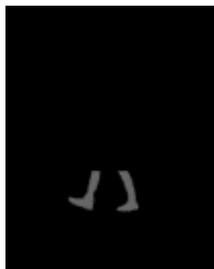
D ：歩車間距離 [m]



(a) 全体（走行ビーム）



(b) 首下（ADB）



(c) 足下（すれ違いビーム：歩車間距離 30m）

図 6-5 投影画像

6-3-3. 背景輝度

本研究では、歩行者の被視認性に及ぼす背景輝度を実験条件とする。背景輝度は、以下に示す式(2)より求める。ここで、平面照度は CIE で規定されている 3lx (交通量の少ない住宅地区) ~20lx (交通量の多い商業地区) を想定し⁽⁵¹⁾、路面の反射率は 15% (乾いたアスファルト相当) で完全拡散⁽⁵¹⁾として、背景輝度を 0.14, 0.33, 0.96 cd/m² の 3 種類を設定した。

$$L = (\rho E_h) / \pi \quad \dots\dots\dots(2)$$

L : 背景輝度 [cd/m²] ρ : 路面反射率 E_h : 水平面照度 [lx]

6-3-4. 歩行者輝度と背景輝度のコントラスト比

本研究では、歩行者の被視認性に及ぼすコントラスト比を実験条件とする。背景輝度は、以下に示す式(3)より求める。式(3)より、コントラスト比は、背景輝度と歩行者輝度の組み合わせで値が変わる。本研究では、歩行者輝度を前照灯照射範囲内において均一であるものとし、その結果得られるコントラスト比を実験条件として整理することとした。

$$C = (L_p - L) / L_p \quad \dots\dots\dots(3)$$

C : コントラスト L_p : 歩行者輝度 [cd/m²]

6-3-5. 実験参加者

実験参加者は、運転免許を保有している 36~57 歳の 29 名であった。なお、実験前に視力検査を実施しており、全ての実験参加者が視力に対して問題無いことを確認したうえで、評価実験を実施した。また、交通安全環境研究所の「人間を対象とする実験に関する倫理審査規程」に基づき、実験参加者のインフォームドコンセントを得たうえで、評価実験を実施した。

6-3-6. 評価方法

実験参加者は、実験条件別に 1 秒間投影される画像を観測し、その間に歩行者が視認できたかどうかを回答する。回答方法は、3 段階に分け、「○」は歩行者として認知できた場合、「△」は物体としてしか知覚できなかった場合、「×」は何も認識することができなかった場合となる。本実験結果から、物体知覚及び歩行者認知の視認率を算出し、歩行者の被視認性を分析した。なお、物体知覚の視認率は、「○」および「△」と答えた人数」を分子、「実験参加者数」を分母とした割合である。一方、歩行者認知の視認率は、「○」と答えた人数」を分子、「実験参加者数」を分母とした割合である。

6-4. 実験結果

6-4-1. ADB における実験条件ごとの視認率の変化

歩行者の被視認性の評価するために実験条件ごとの物体知覚と歩行者認知における視認率を分析した。図 6-6～8 は、各条件（歩車間距離：30, 40, 60, 100, 150m、背景輝度：0.14, 0.33, 0.96cd/m²）の物体知覚及び歩行者認知の視認率を示す。本実験結果から、物体知覚及び歩行者認知の視認率は、歩車間距離が大きくなると低下することが得られた。一方、コントラスト比、または、背景輝度が小さくなると、物体知覚及び歩行者認知の視認率は、低下するとことも得られた。

市街地の法定速度となる 60km/h から急制動をかけて車両を停止させるためには、40m 程度の制動距離が必要である⁽⁵²⁾。そこで、歩車間距離 40m の実験結果に着目した。歩車間距離 40m においては、背景輝度が 0.96 cd/m² の条件下でコントラスト比を 0.19 以上、背景輝度が 0.33 cd/m² の条件下でコントラスト比を 0.31 以上、背景輝度が 0.14 cd/m² の条件下でコントラスト比を 0.40 以上に保つことで、歩行者認知の視認率が 100% となる。この実験結果と式(3)を整理して ADB に対する要求仕様を求める。式(3)を整理すると背景輝度とコントラスト比から歩行者輝度を求める方程式(4)を導くことができる。この方程式(4)に対して、実験結果より求めた歩行者認知の視認率が 100% となる背景輝度とコントラスト比を代入し、ADB の要求仕様を求める（式(5)～(7)を参照）。本解析より、歩車間距離 40m の場合、背景輝度 0.96 cd/m² においては歩行者輝度が 1.19cd/m² 以上、背景輝度 0.33 cd/m² においては歩行者輝度が 0.48cd/m² 以上、0.14 cd/m² においては歩行者輝度が 0.23cd/m² 以上になるような ADB を設計することにより、ドライバが歩行者との衝突を回避するための支援が可能になると考えられる。

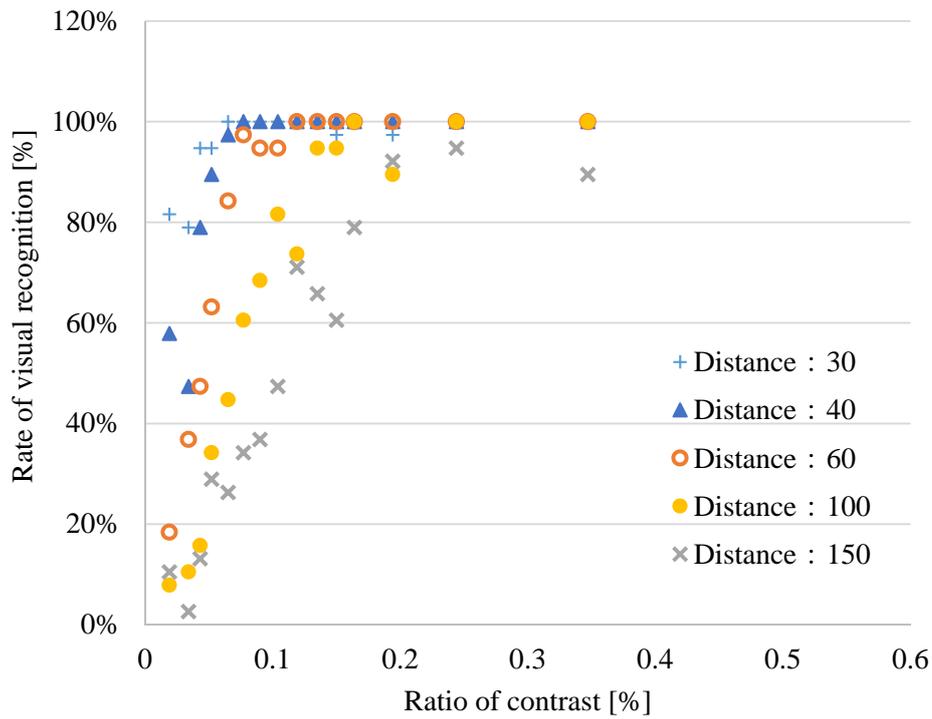
$$L_p = L / (1-C) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$L_p = 0.96 / (1-0.19) = 1.19 \quad \dots\dots\dots(5)$$

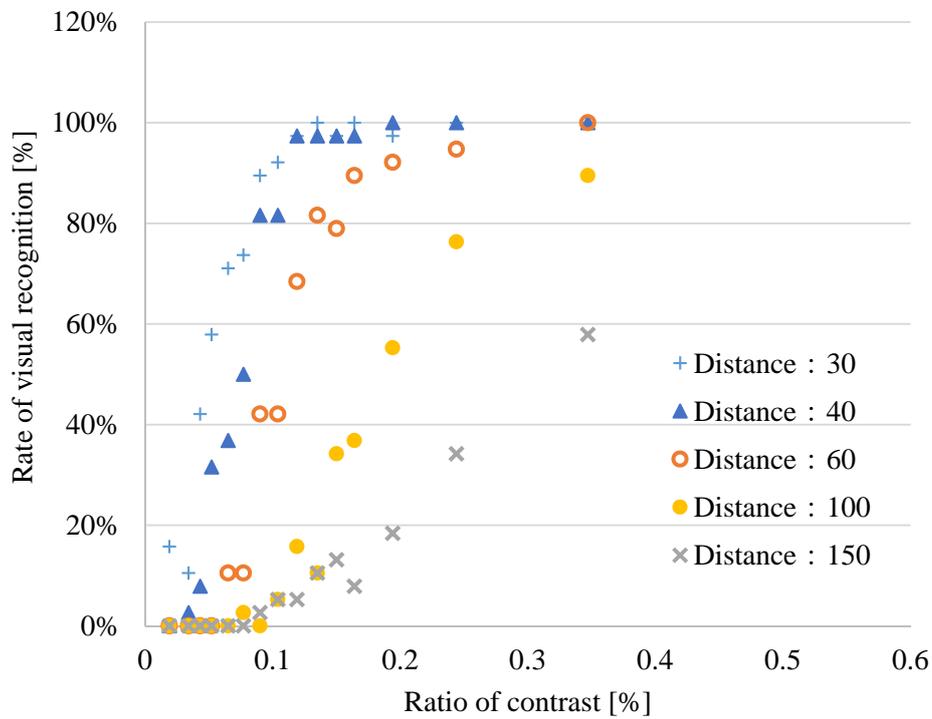
$$L_p = 0.33 / (1-0.31) = 0.48 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$L_p = 0.14 / (1-0.4) = 0.23 \quad \dots\dots\dots(7)$$

L : 背景輝度 [cd/m²] C : コントラスト Lp : 歩行者輝度 [cd/m²]

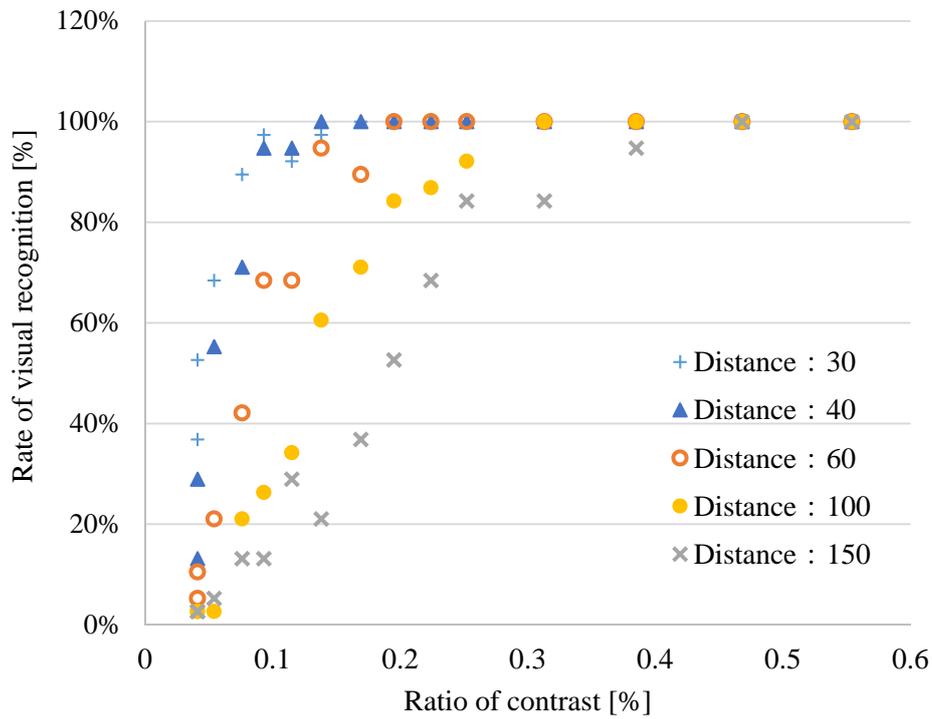


(a) 物体知覚

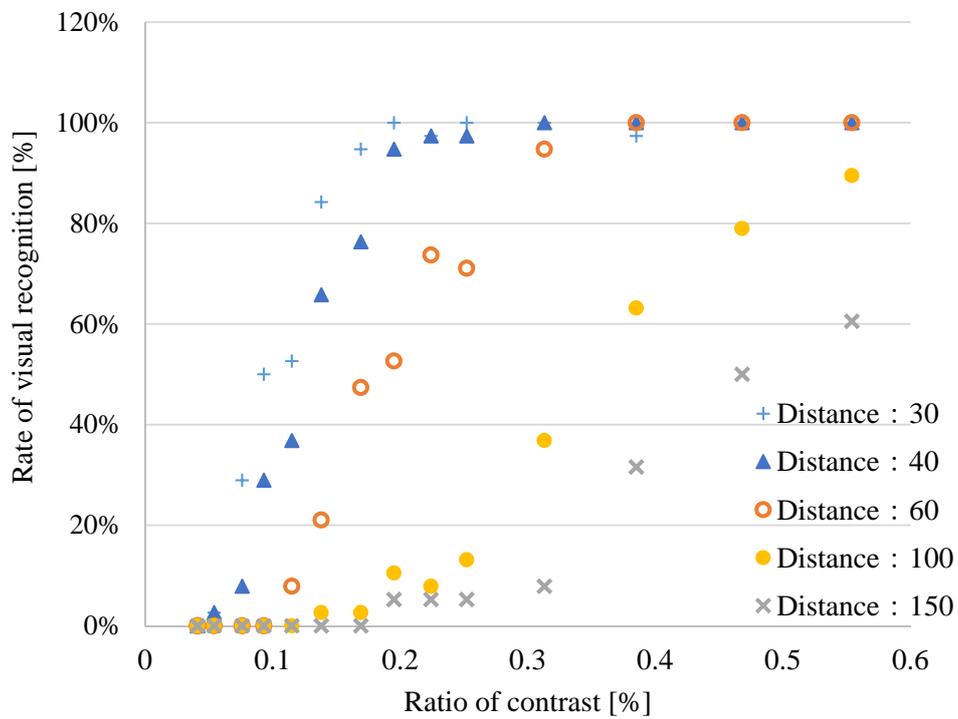


(b) 歩行者認知

図 6-6 ADB による視認率の変化 (背景輝度 0.96 cd/m²)

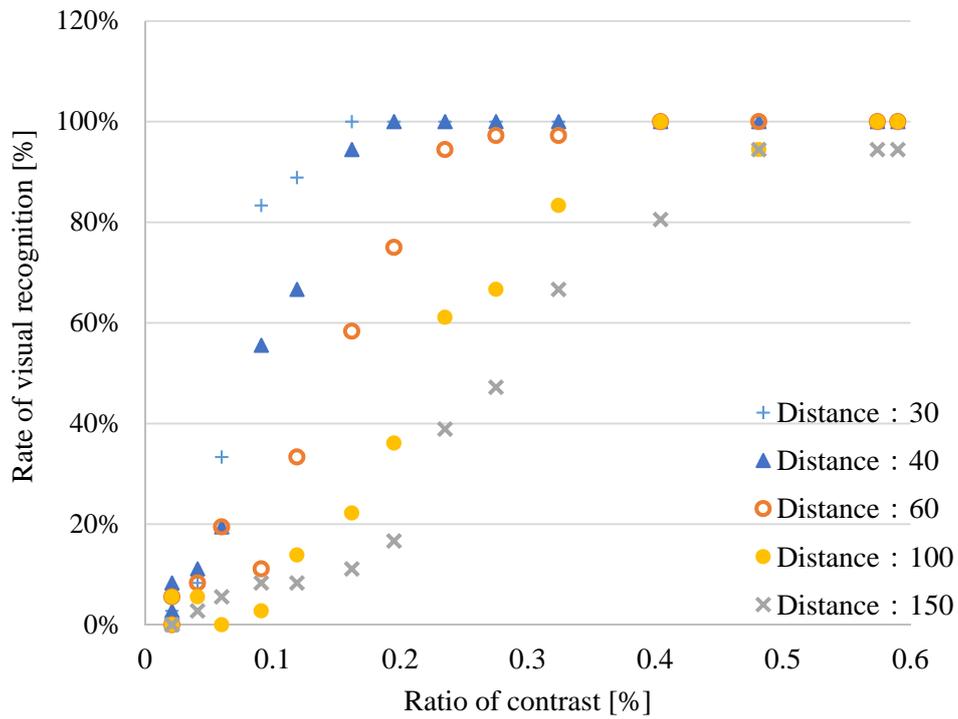


(a) 物体知覚

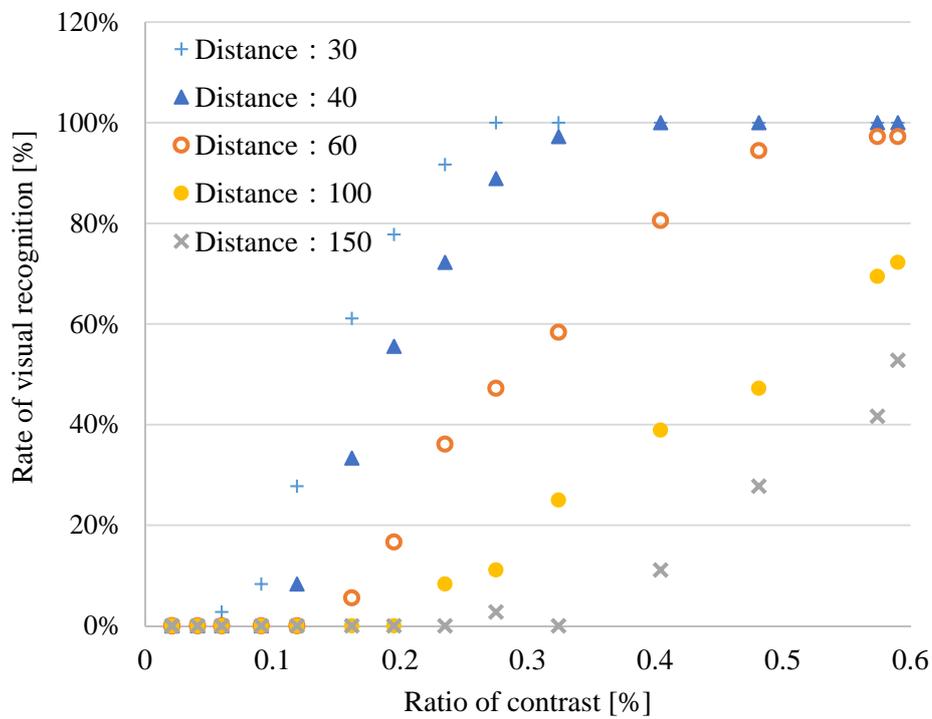


(b) 歩行者認知

図 6-7 ADB による視認率の変化 (背景輝度 0.33 cd/m²)



(a) 物体知覚



(b) 歩行者認知

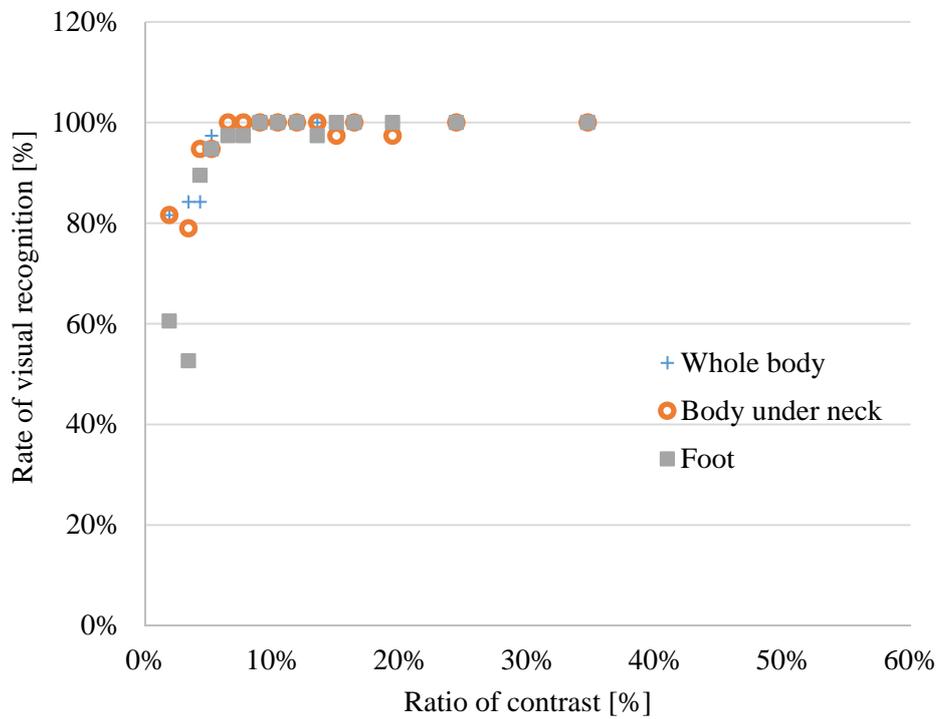
図 6-8 ADB による視認率の変化 (背景輝度 0.14 cd/m²)

6-4-2. 歩行者への照射範囲の違いによる視認率の影響

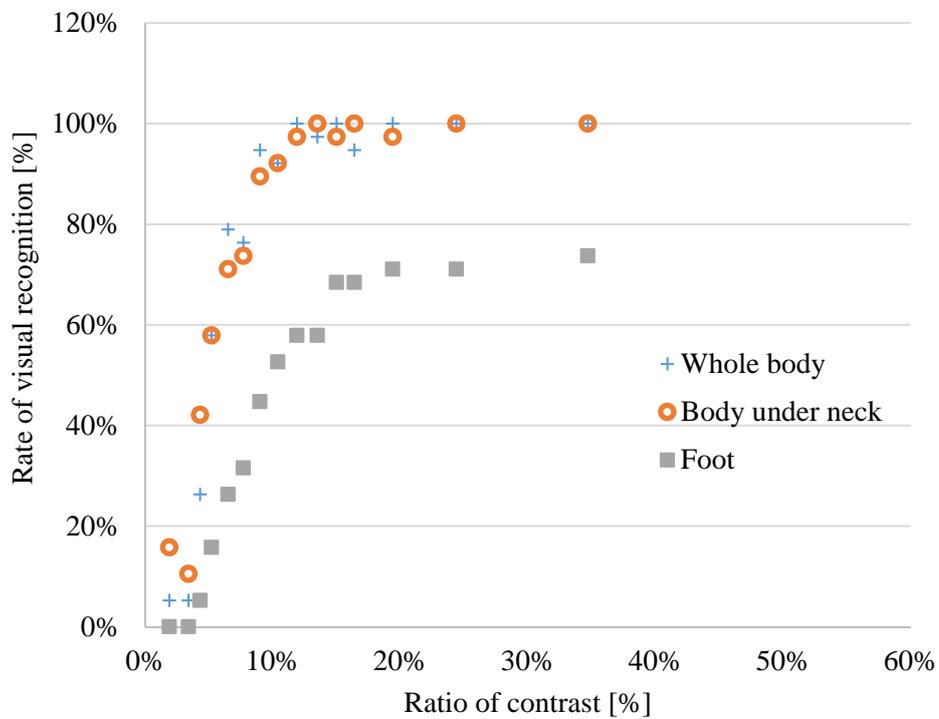
歩行者への照射範囲の違いによる視認率への影響を分析するために、走行ビームと ADB、すれ違いビームによる実験結果を比較した。図 6-9～17 は、各条件における走行ビームと ADB、すれ違いビームの物体知覚及び歩行者認知の視認率を示す。また、本解析は、すれ違いビームの照射限界距離が 65m であることを考慮して、歩車間距離 100, 150m の実験条件を除外した。

まず、図 6-9～17 から、走行ビームと ADB の物体知覚及び歩行者認知の視認率を比較すると、各条件において同程度の視認率であることを確認した。これはドライバーが物体知覚及び歩行者認知するためには、歩行者の首下を照射すれば充分であることを意味する。

次に、すれ違いビームと ADB の視認率を比較した。歩車間距離が 30m まで近くなると、物体知覚におけるすれ違いビームと ADB の視認率が同程度であることを確認した。歩行者や対向車が多い状況においては、歩行者及び対向車のドライバーに眩惑を与えないように ADB の機能が制限される可能性がある。その場合、すれ違いビームしか使用できず、歩車間距離が 30m の範囲でしか ADB と同程度の物体知覚における視認率を確保することができない。一方で、車両速度 50km/h からの停止距離は約 30m である⁽⁵²⁾。つまり、すれ違いビームしか使用できない状況においては、少なくとも車両速度を 50km/h まで下げることが、対歩行者の衝突事故を防ぐことにつながると考えられる。

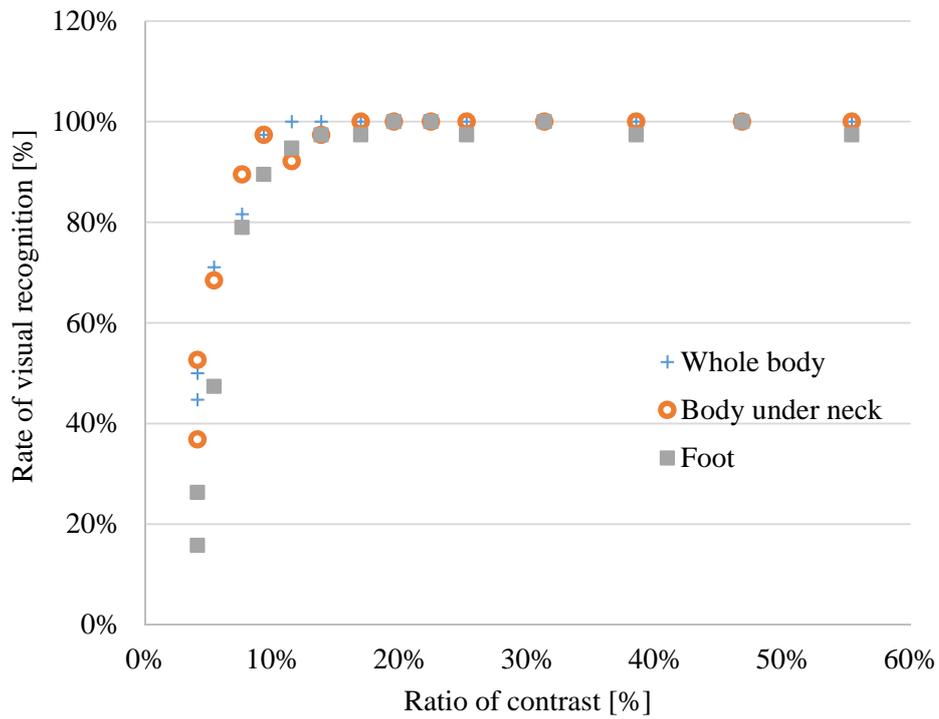


(a) 物体知覚

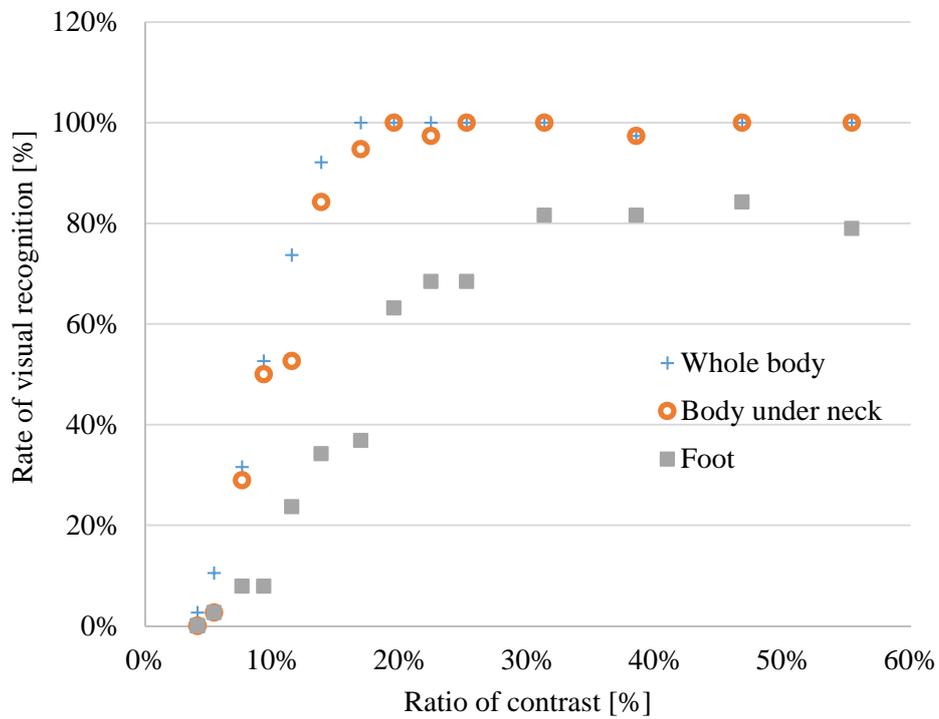


(b) 歩行者認知

図 6-9 照射範囲の違いによる視認率 (歩車間距離 : 30m, 背景輝度 : 0.96 cd/m²)

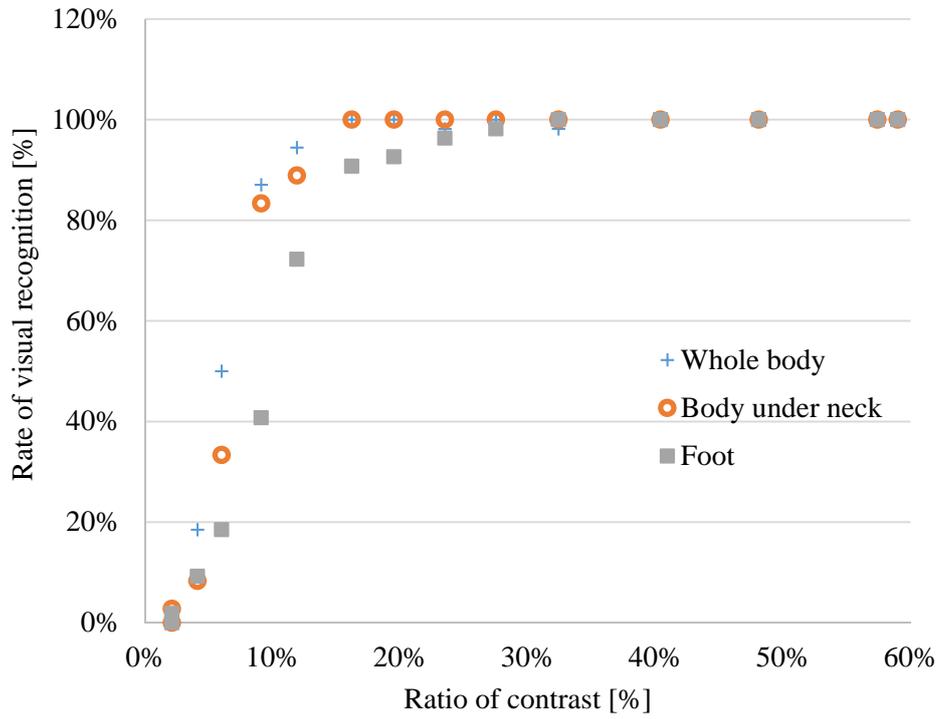


(a) 物体知覚

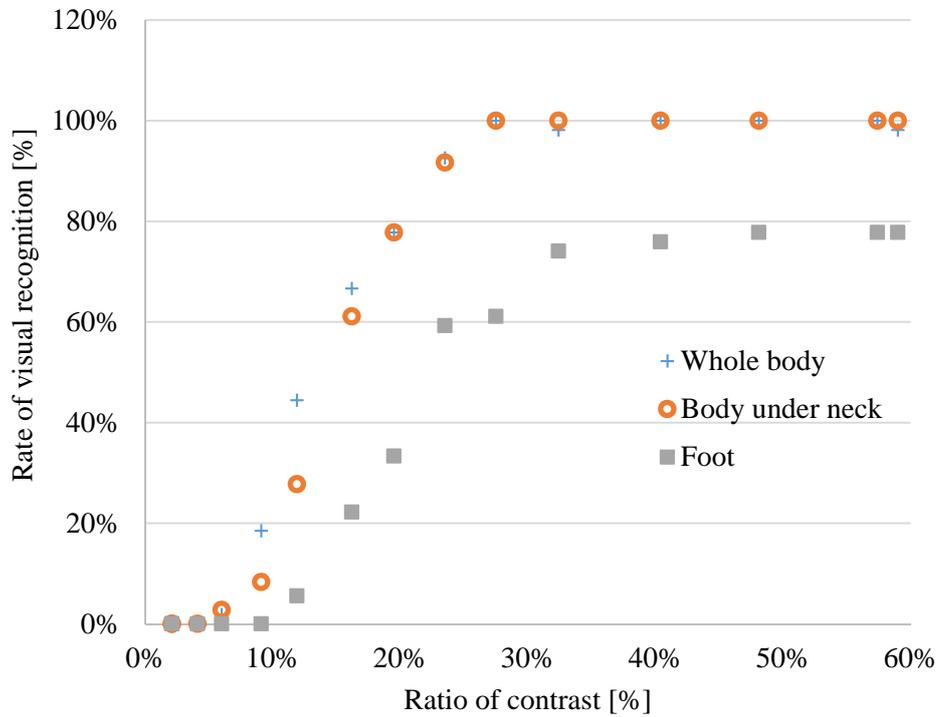


(b) 歩行者認知

図 6-10 照射範囲の違いによる視認率 (歩車間距離 : 30m, 背景輝度 : 0.33 cd/m²)

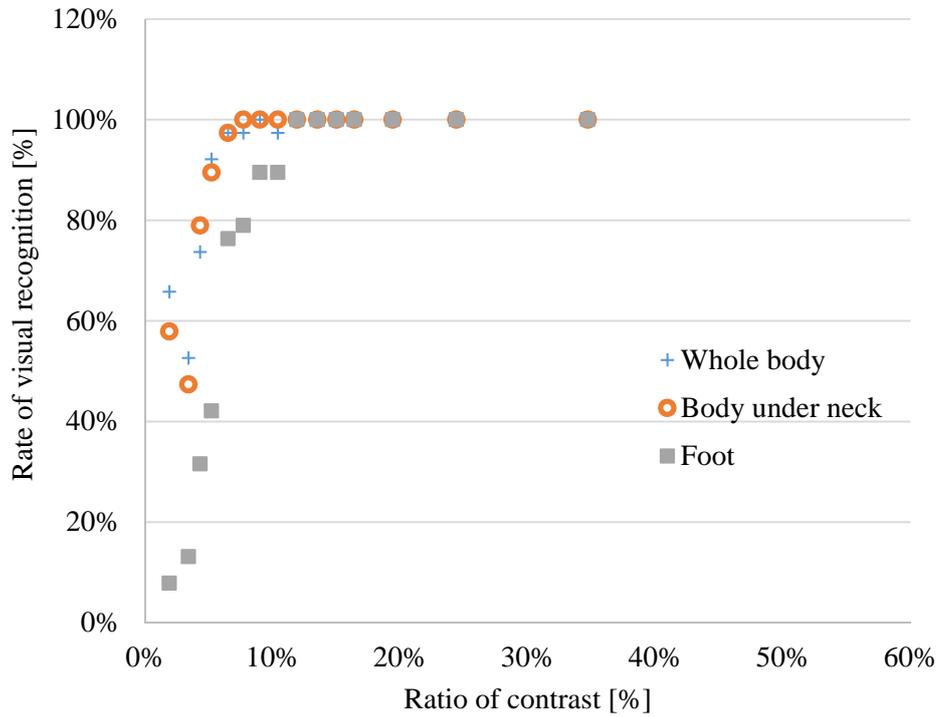


(a) 物体知覚

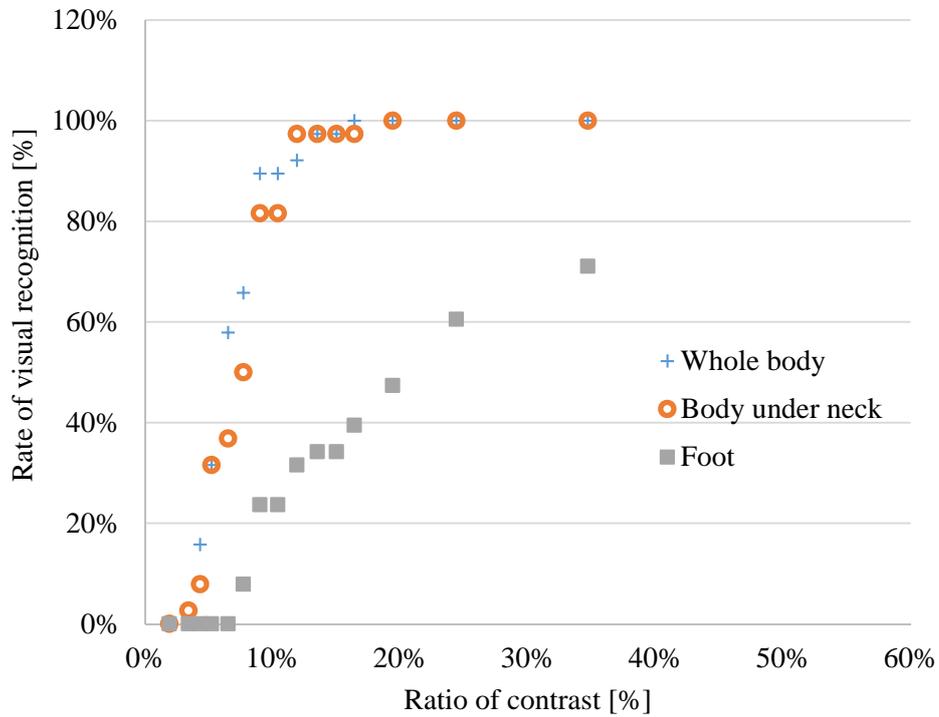


(b) 歩行者認知

図 6-11 照射範囲の違いによる視認率（歩車間距離：30m, 背景輝度：0.14 cd/m²）

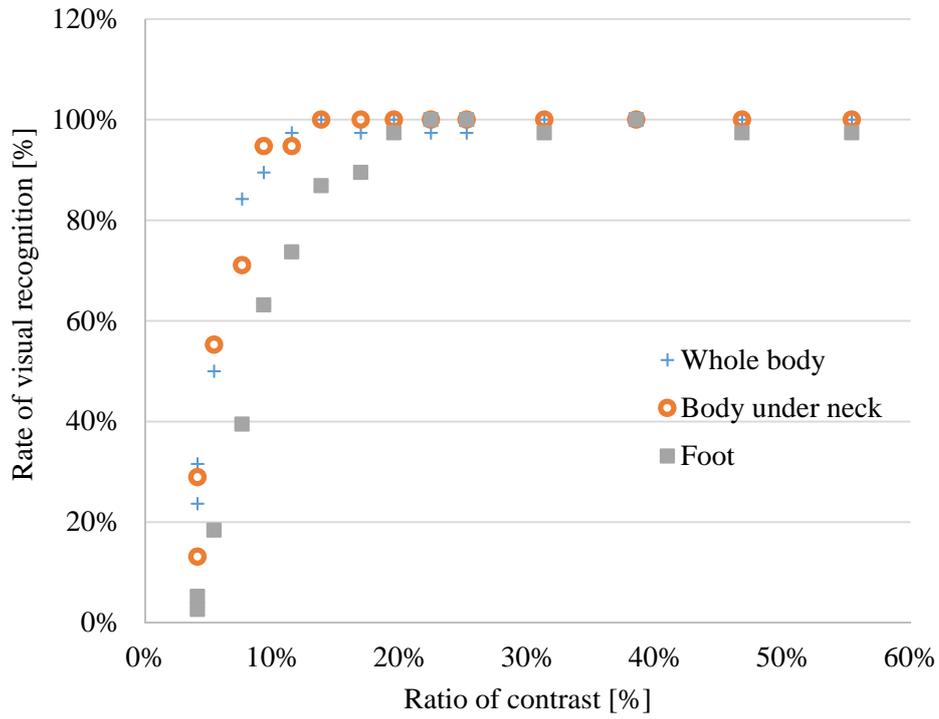


(a) 物体知覚

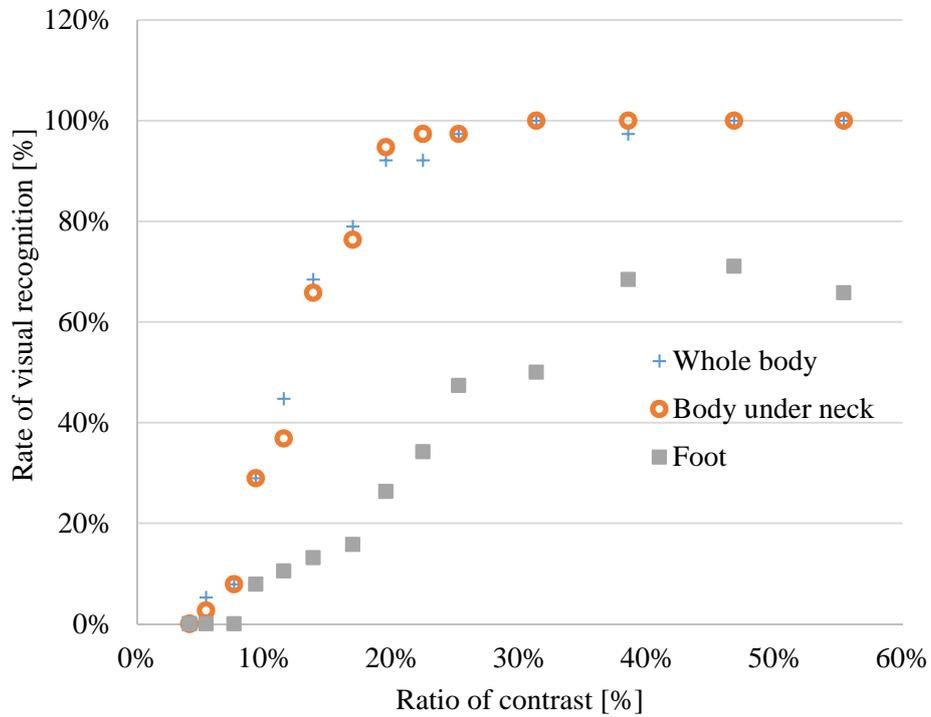


(b) 歩行者認知

図 6-12 照射範囲の違いによる視認率 (歩車間距離 : 40m, 背景輝度 : 0.96 cd/m²)

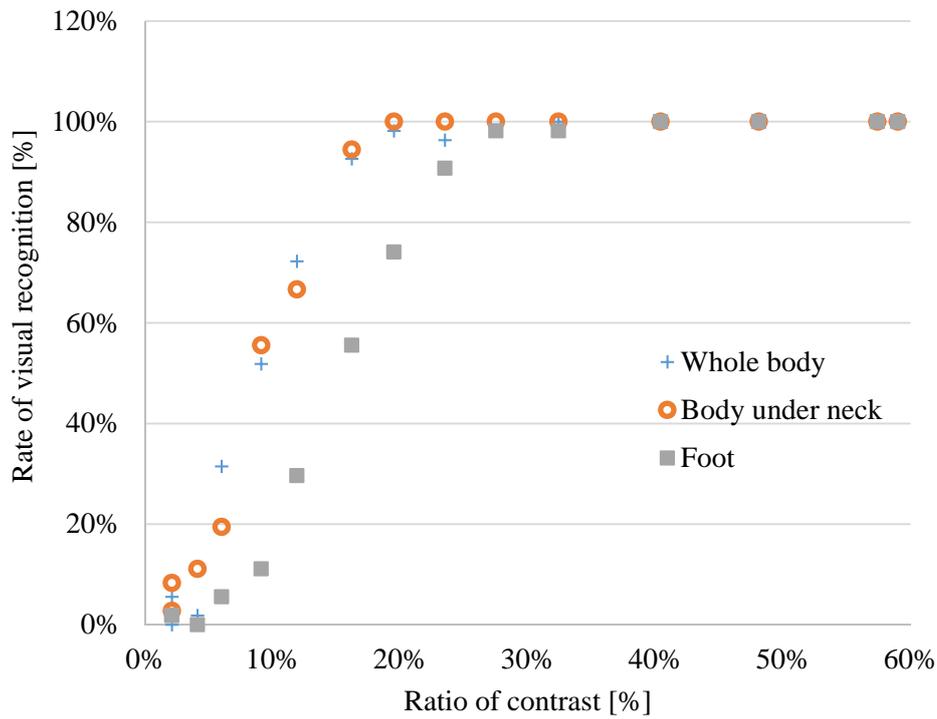


(a) 物体知覚

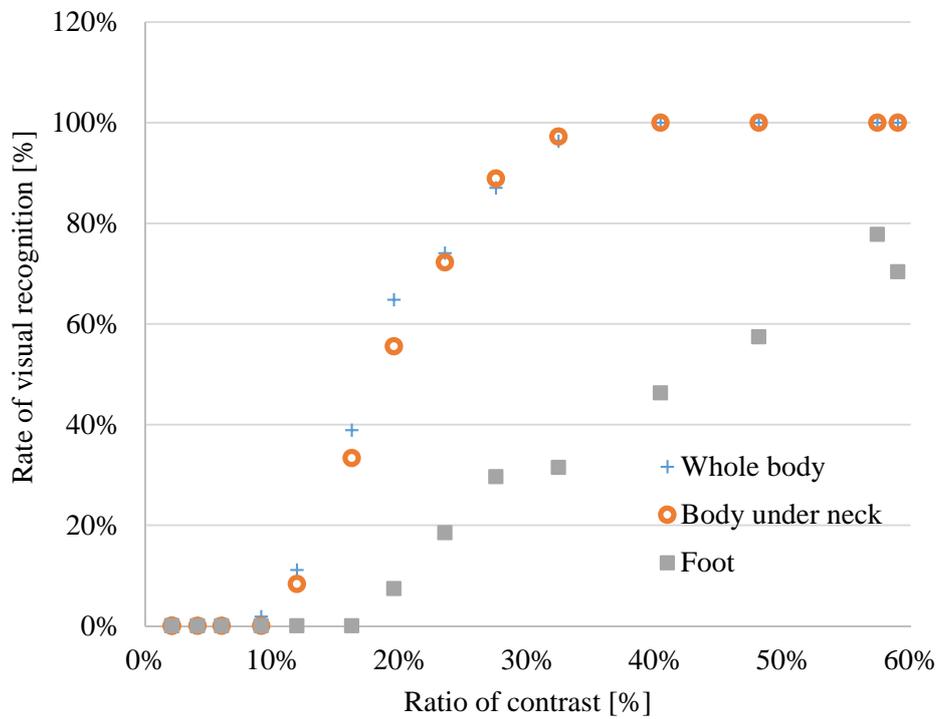


(b) 歩行者認知

図 6-13 照射範囲の違いによる視認率 (歩車間距離 : 40m, 背景輝度 : 0.33 cd/m²)

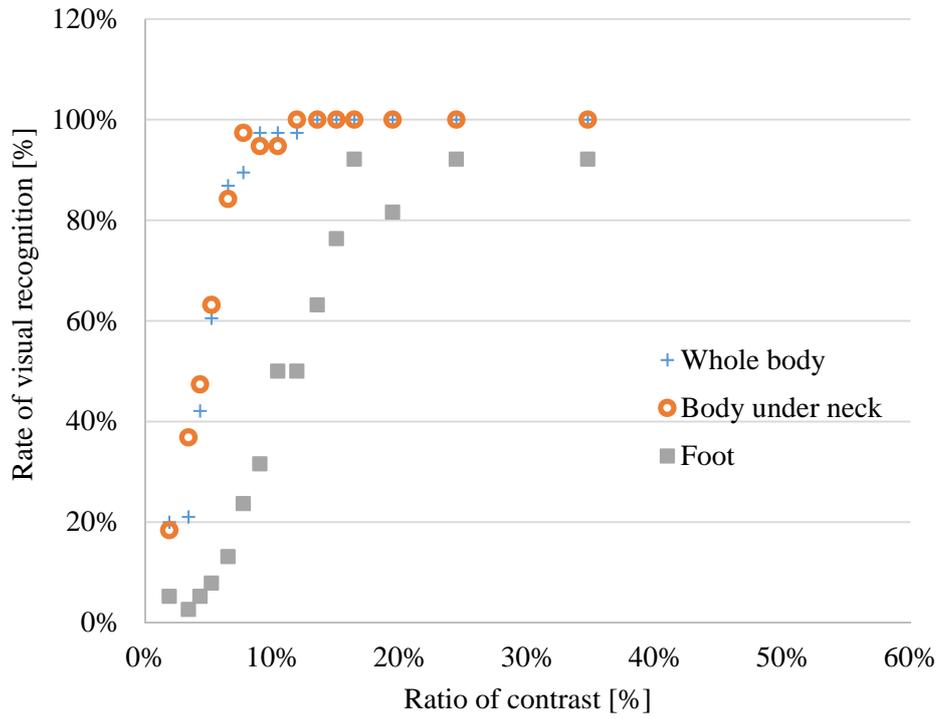


(a) 物体知覚

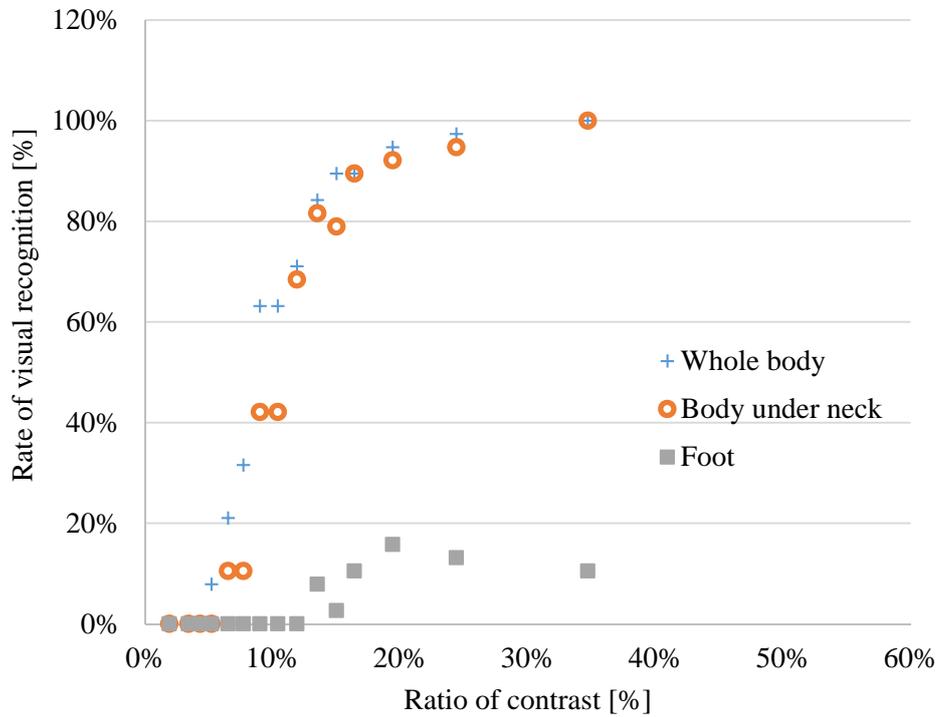


(b) 歩行者認知

図 6-14 照射範囲の違いによる視認率 (歩車間距離 : 40m, 背景輝度 : 0.14 cd/m²)

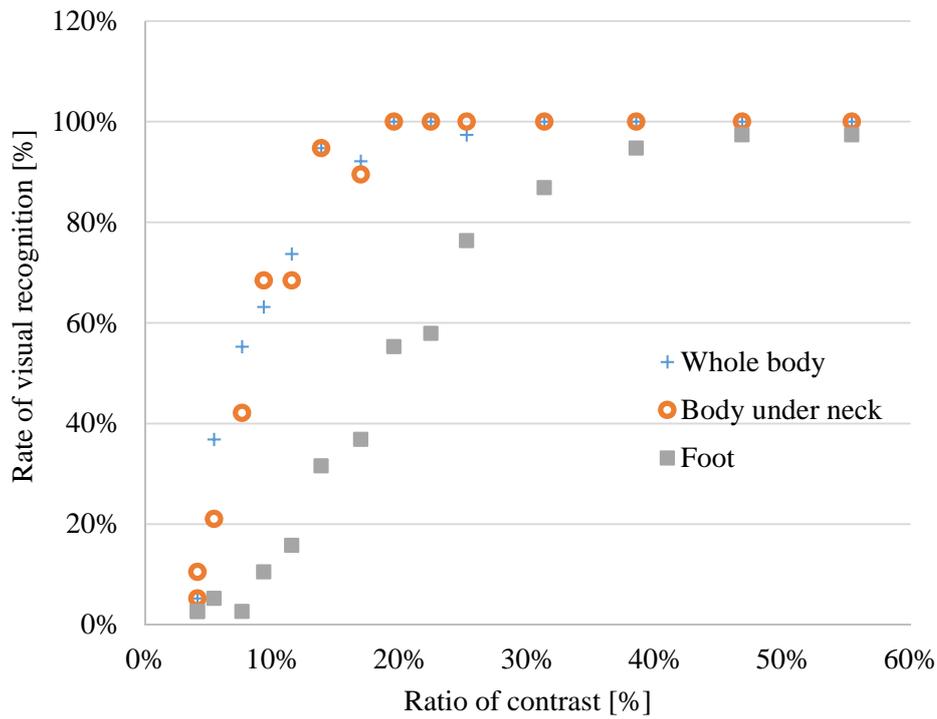


(a) 物体知覚

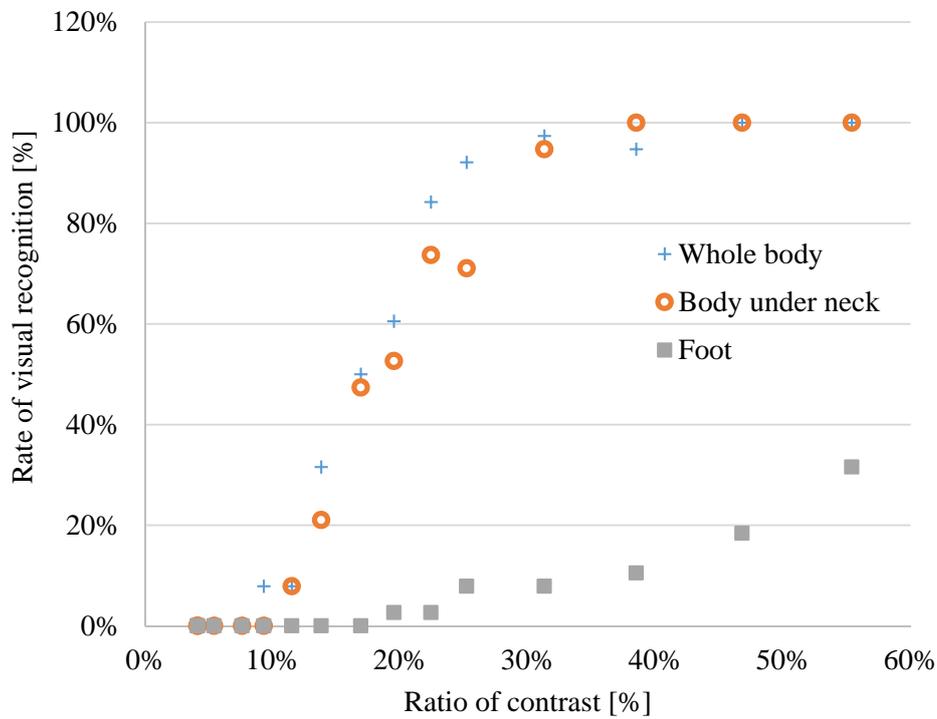


(b) 歩行者認知

図 6-15 照射範囲の違いによる視認率 (歩車間距離 : 60m, 背景輝度 : 0.96 cd/m²)

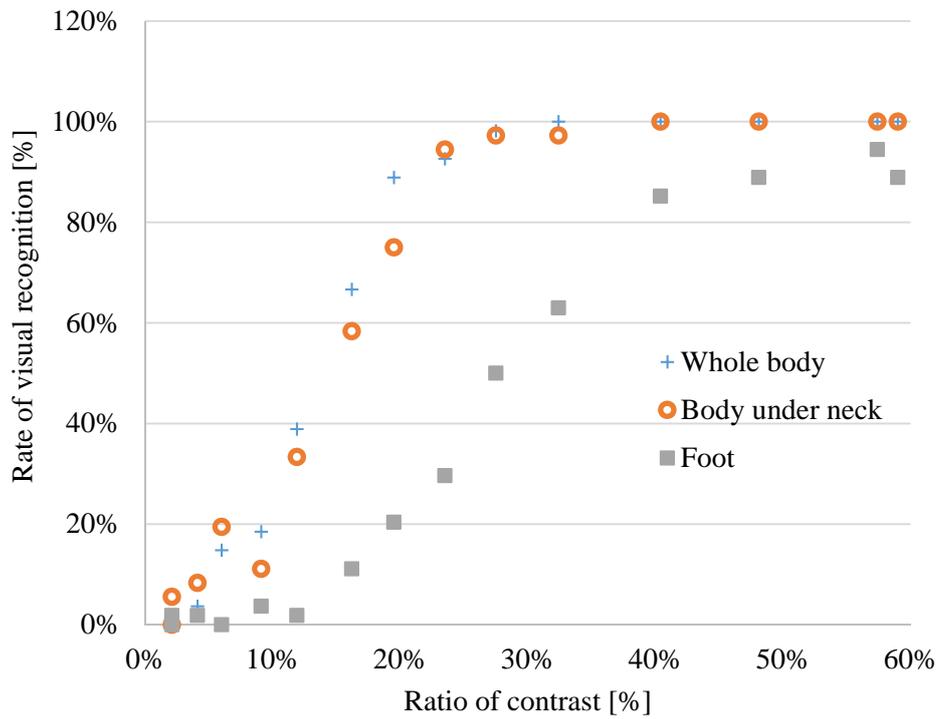


(a) 物体知覚

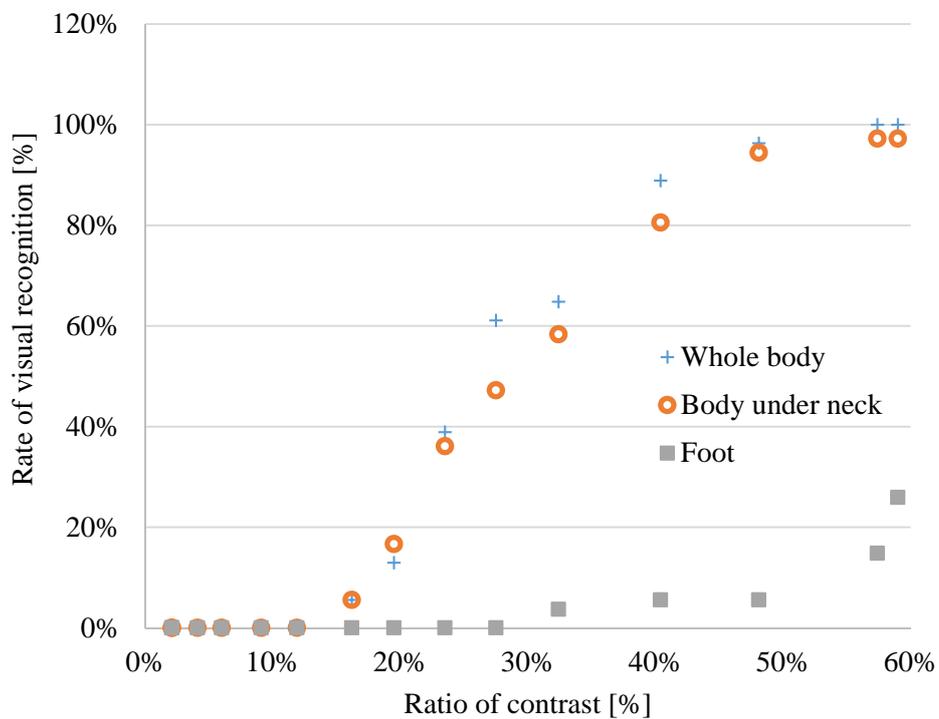


(b) 歩行者認知

図 6-16 照射範囲の違いによる視認率 (歩車間距離 : 60m, 背景輝度 : 0.33d/m²)



(a) 物体知覚



(b) 歩行者認知

図 6-17 照射範囲の違いによる視認率 (歩車間距離 : 60m, 背景輝度 : 0.14m²)

6-5. 結論

自動運転システムレベル4の使用方法について整理すると、市街地ではドライバが自動運転システムから運転操作を引き継ぐこととなる。つまり、自動運転システムレベル4が普及しても、市街地での交通事故は引き続き発生する可能性が高い。市街地で発生する交通事故は、夜間において対歩行者の衝突事故が最も多く、歩行者の被視認性が問題となっている。また、自動運転システムレベル5では、夜間の市街地も含めた完全自動運転を実現することが必要となり、車両のヘッドライトがカメラ等のセンシングのための視界確保の向上につながる。このような状況を想定すると、対向車や歩行者に眩惑をさせないように視界確保をすることが可能であるADBが、自動運転システムの根幹を支える技術になると考えられる。本研究では、ADBに対する歩行者の被視認性を明らかにすることを目的とし、被験者による評価実験を実施した。また、ADBによる歩行者の被視認性は、走行ビーム及びすれ違いビームに対する歩行者の被視認性と比較検討することとした。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) ADBの物体知覚と歩行者認知の視認率を分析すると、背景輝度とコントラスト比が高くなるにつれ、また歩車間距離は短くなるにつれて、歩行者の被視認性が高まる。また、ADBは、歩車間距離40mを想定して、背景輝度 0.96cd/m^2 において歩行者輝度が 1.19cd/m^2 以上、背景輝度 0.33cd/m^2 において歩行者輝度が 0.48cd/m^2 以上、 0.14cd/m^2 において歩行者輝度が 0.23cd/m^2 以上になるような設計をすることにより、ドライバが歩行者との衝突を回避するための支援が可能になる。
- (2) ADB及び走行ビームの物体知覚及び歩行者認知の視認率に差はなく、ADBは走行ビームと同程度の歩行者に対する被視認性を確保することができる。つまり、歩行者の認知には、首下を照射すれば充分である。また、歩行者や対向車が多く、ADBの機能が制限され、すれ違いビームしか使用できない環境下では、少なくとも車両速度を 50km/h まで下げることが歩行者との衝突を防ぐことにつながる。

本研究においては、道路の脇で横断するタイミングを伺っている歩行者（静止画像）についての被視認性を分析した。今後の検討課題として、道路を横断する歩行者（動画）についての被視認性の分析を実施する必要がある。また、本実験は中心視野を想定して実験を実施したが、ドライバの運転で重要となる周辺視野の被視認性についても合わせて分析をする必要がある。

第7章 結論

7-1. 各テーマに対する結論

以下に本研究で実施した各研究に対する結論を整理する。

- 自動運転システムの前後方向の車両制御の安全性評価手法検討に係る研究

本研究では、自動運転システムの制動制御パターン及び追従車間距離を適用することができる DS 環境を構築し、自動運転システムの制動制御の安全性を、後方を追従するドライバの主観評価及び運転行動によって評価する実験を実施した。自動運転システムの後方を追従するドライバが自動運転システムの制動制御を評価する場合、車間距離及び、自動運転システムによる制動制御の減速度が重要な実験条件となる。そこで、ドライバの運転データを計測し、その運転データをもとに評価する自動運転システムの制動制御を設計することとした。この設計した制動制御について、安全性を評価する実験を実施した。その結果、追従の車間距離が、平均的な距離である 28.3m であった場合、自動運転システムの制動制御が 7.42m/s^2 (160%) 以下であれば危険を感じずに追従できる可能性が高いことが確認された。また、車間距離が、平均車間距離- σ (標準偏差) である 18.7m となると、自動運転システムの制動制御が 4.64m/s^2 を越えた段階で追突の危険を感じる可能性が高くなり、 9.28m/s^2 程度になると追突する可能性が高いことが確認された。さらに、車間距離が、平均車間距離- 2σ (標準偏差) である 9.1m まで接近すると、危険を感じずに追従して制動制御を行うことはほぼ不可能となり、制動制御が 7.42m/s^2 程度となった段階で追突を回避できなくなる可能性が高いことが確認された。本実験結果から、以下の結論を得た。なお、本評価手法のデータ解析は、平均値を用いているが、例えば最小値等を用いることも可能である。また、危険感覚の閾値も 2.5 としているが、3 を採用することも可能である。このようにデータ解析の取り扱い方法や閾値の値の選定については、自動運転システムの車両制御を設計するエンジニアが任意に決めることで、臨むべき制御範囲を見出すことが可能となる。

- (1) 後方を追従するドライバの追突の危険性及び、ドライバが感じる危険感から自動運転システムの制動制御の安全性を評価することが可能である。
- (2) 本評価によって得られた自動運転システムの制動制御に関する安全性評価は、自動運転システムの制動制御アルゴリズムを修正することや制動制御アルゴリズム構築の目安となる。

- 出眠時における手動運転に遷移する際のドライバの運転特性に関する検討

自動運転レベル4について整理すると高速道路の出口付近において、ドライバは自動運転システムから運転操作を引き継ぐ必要がある。しかし、高速道路を自動運転中に、ドライバが睡眠状態になると、出口付近にて運転操作を引き継いだ出眠したばかりのドライバは市街地を適切に運転できない可能性がある。そこで、本研究では、出眠したばかりのドライバが運転操作を引き継ぎ、市街地を走行中に飛び出してくる歩行者に対して、適切にブレーキ操作を行うことができるのかを評価することとした。その結果、以下の実験結果と結論を得た。

(1) 歩行者との衝突する割合

睡眠グループの実験参加者は衝突を回避できた割合が5%（1人）であり、衝突した割合が95%（19人）であった。覚醒グループの実験参加者は、歩行者との衝突を回避できた割合が75%（15人）であり、衝突した割合が25%（5人）であった。

(2) ブレーキ反応時間

睡眠グループの実験参加者のブレーキ反応時間の平均値は、約1.0sであった。一方、覚醒グループの実験参加者のブレーキ反応時間の平均値は、約0.5sであった。出眠したばかりのドライバは、歩行者を認知し、ブレーキ操作を行うまでの時間が遅く歩行者との衝突を避けられないと考えられる。

(3) ブレーキペダル踏力

睡眠グループの実験参加者のブレーキペダル踏力の最大値の平均値は、100N以下であった。一方、覚醒グループの実験参加者のブレーキペダル踏力の最大値の平均値は、約300Nであった。出眠したばかりのドライバは、適切にブレーキペダルを踏み込むことができず、歩行者との衝突を避けられないと考えられる。

(4) ブレーキ踏力の立ち上がり時間

睡眠グループの実験参加者のブレーキ踏力立ち上がり時間は、0.5~2秒の間で推移していた。一方で、覚醒グループの実験参加者のブレーキ踏力立ち上がり時間は、0.5~1.5秒の間で推移していた。睡眠グループ及び覚醒グループを比較するとブレーキ踏力の立ち上がり時間については、明らかな違いが見受けられなかった。

(5) 脳波の分析

本実験では、睡眠グループの実験参加者が本当に睡眠状態であったのかを確認するために脳波を計測した。実験開始直後に比べて、実験を開始してから2時間後の脳波には、 δ 波帯域が多く出現しており、実験参加者は高速道路での自動運転中に深い睡眠状態であったといえる。

以上の実験結果から、高速道路出口付近において、出眠したばかりのドライバーが自動運転システムから運転操作を引き継ぎ、市街地を走行すると、歩行者の飛び出しに対して、ブレーキ反応時間が遅く、ブレーキペダルを適切に踏み込めないことにより、歩行者と衝突する危険性が高いことが示唆された。そこで、出眠したばかりのドライバーが市街地を適切に運転するには、ドライバーモニタリングや脳波等の生体情報からドライバーの覚醒状態を確認したうえで運転操作を引き継ぐことやドライバーを短時間で覚醒させる手法の検討が必要である。

● 出眠時における手動運転に遷移する際の刺激による覚醒効果に関する研究

本研究の目的は、高速道路での自動運転中にドライバーが睡眠を取することを想定し、出眠時のドライバーが覚醒時と同等の運転操作を行うことが可能な覚醒手法について検討することである。そのため、本研究では自動運転システムレベル4を対象とした実験を実施した。ドライバーの覚醒手法検討実験は、まずドライバーが自動運転システムを使用し、高速道路の左車線を走行中に睡眠を取る。その後、高速道路出口付近で自動運転システムがドライバーに警告し出眠させた後、運転操作を遷移させる（計画的なシステム OFF）。ドライバーは自身で市街地を手動運転し、停止しているトラックの死角から飛び出してくる歩行者を避けるためにブレーキ操作を行うものである。ドライバーの覚醒手法として、警告を出した後、エアコンの送風と座席の振動による2つの刺激を2分間、または5分間与えた場合を比較検討することとした。また、ドライバーが常に覚醒状態にある状況においても実験を行い比較検討することで、覚醒手法が得られる効果を定量的に評価することとした。その結果、以下の結論を得た。

- (1) ドライバーに刺激を与える時間を増やすことによって、ドライバーは覚醒状態の運転操作に近づき歩行者との衝突を回避できるという結果を得た。
- (2) 2分間の刺激では、ドライバーへの覚醒効果は不十分であり、5分間の刺激を与えることによって、覚醒状態の反応時間とブレーキ最大踏力を引き出すことが可能となり、ドライバーは自動運転システムから運転操作を移譲し覚醒時と同等の運転操作を行うことができる。

また、刺激は短時間において繰り返し提示されることにより、その刺激に対する反応が徐々に薄くなっていく馴化の問題があり、先行研究によって数々の報告⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾がされている。先行研究のようなドライバーの居眠りを防止するための刺激は、数分間隔で与える必要がある。一方で、本研究のような高速道路において自動運転中に睡眠を取ったドライバーを起こす場合、再度ドライバーが高速道路で睡眠を取って起こすまでに数時間の間隔があくこととなる。このような状況下における馴化の影響についても今後の課題として検討すべき事案である。また、刺激を提示することにより車両の停車時間内(5分間)でドライバーを覚醒させることが可能だと判明した一方で、基準化を想定すると必要最低限の刺激提示時間や刺激として選定したエアコンの設定温度や風量、振動機器の周波数等による効果については引き続き検討する必要がある。

- 前照灯照射範囲の違いによる歩行者の被視認性の検討

自動運転システムレベル4の使用方法について整理すると、市街地ではドライバが自動運転システムから運転操作を引き継ぐこととなる。つまり、自動運転システムレベル4が普及しても、市街地での交通事故は引き続き発生する可能性が高い。市街地で発生する交通事故は、夜間において対歩行者の衝突事故が最も多く、歩行者の被視認性が問題となっている。また、自動運転システムレベル5では、夜間の市街地も含めた完全自動運転を実現することが必要となり、車両のヘッドライトがカメラ等のセンシングのための視界確保の向上につながる。このような状況を想定すると、対向車や歩行者に眩惑をさせないように視界確保をすることが可能であるADBが、自動運転システムの根幹を支える技術になると考えられる。本研究では、ADBに対する歩行者の被視認性を明らかにすることを目的とし、被験者による評価実験を実施した。また、ADBによる歩行者の被視認性は、走行ビーム及びすれ違いビームに対する歩行者の被視認性と比較検討することとした。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) ADBの物体知覚と歩行者認知の視認率を分析すると、背景輝度とコントラスト比が高くなるにつれ、また歩車間距離は短くなるにつれて、歩行者の被視認性が高まる。また、ADBは、歩車間距離40mを想定して、背景輝度 0.96cd/m^2 において歩行者輝度が 1.19cd/m^2 以上、背景輝度 0.33cd/m^2 において歩行者輝度が 0.48cd/m^2 以上、 0.14cd/m^2 において歩行者輝度が 0.23cd/m^2 以上になるような設計をすることにより、ドライバが歩行者との衝突を回避するための支援が可能になる。
- (2) ADB及び走行ビームの物体知覚及び歩行者認知の視認率に差はなく、ADBは走行ビームと同程度の歩行者に対する被視認性を確保することができる。つまり、歩行者の認知には、首下を照射すれば充分である。また、歩行者や対向車が多く、ADBの機能が制限され、すれ違いビームしか使用できない環境下では、少なくとも車両速度を 50km/h まで下げることが歩行者との衝突を防ぐことにつながる。

本研究においては、道路の脇で横断するタイミングを伺っている歩行者（静止画像）についての被視認性を分析した。今後の検討課題として、道路を横断する歩行者（動画）についての被視認性の分析を実施する必要がある。また、本実験は中心視野を想定して実験を実施したが、ドライバの運転で重要となる周辺視野の被視認性についても合わせて分析をする必要がある。

7-2. 各テーマを統括する結論

本研究を通して、自動運転システム自体の車両制御の安全性を評価するためには、周りのドライバーが感じる危険感覚を評価することによって、最適な車両制御範囲に納めることが可能である事を示した。また、自動運転システムレベル4の運用にあたり、高速道路で自動走行中に睡眠したドライバーが運転操作を引き継ぎ、市街地を運転すると、歩行者の飛び出しに対して適切にブレーキ操作を行えないことを示した。なお、ドライバーが運転操作を引き継ぎ、覚醒時と同等のブレーキ操作を行うには、シート振動とエアコンの送風による刺激を5分間与えることによって、ドライバーを覚醒させることが効果的である。加えて、ドライバーが運転操作を引き継ぎ、市街地での走行を想定すると、夜間での交通事故を防ぐためのABDのようなドライバーの視認性を確保する灯火システムが必要となり、本システムの視認性はハイビームと同等である事を示した。本システムは、自動運転システムレベル5で重要となる夜間での市街地における自動運転を実現するためのカメラの視認性の向上にもつながると考えられる。このように個々の要素技術に対して実験参加者が評価することにより、ユーザーの信頼たる技術が確立したうえで、複合的に機能することが自動運転システムの実現につながる。

謝辞

本論文は筆者が芝浦工業大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。本博士論文を提出するにあたり、多くの方々にご指導とご助力をいただきました。この場をお借りして感謝申し上げます。

まず、同専攻廣瀬敏也准教授には指導教官として、本研究の実施の機会を与えていただき、その遂行にあたってお忙しい中、ご指導をいただきましたことに感謝を申し上げます。また、廣瀬准教授には修士論文からのご指導をいただき、重ねて感謝を申し上げます。

また、本論文を提出するにあたり、4名の先生に副査として指導をいただきました。芝浦工業大学 長谷川浩史教授、平川豊教授、松日楽信人教授、東京大学 中野公彦教授には、研究としての位置づけや研究に関する細部までご指導いただき、有益なアドバイスをいただきことができましたこと、深く感謝を申し上げます。

最後に、本論文の成果は、私が所属する独立行政法人自動車技術総合機構交通安全環境研究所においての研究成果も用いており、同研究所の自動車安全研究部部長である河合英直氏、主任研究員の田中信壽氏には、投稿論文の作成にあたりご指導いただきましたこと、深く感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 内閣府：第10次交通安全基本計画，
https://www8.cao.go.jp/koutu/kihon/keikaku10/pdf/kihon_keikaku.pdf, (参照 2019.09.11).
- (2) 警視庁：平成30年中の交通事故死者数について，<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031782696&fileKind=2>, (参照 2019.09.11)
- (3) 公益財団法人 交通事故分析センター：ITARDA INFORMATION73, pp.1-12 (2008).
- (4) 戦略的イノベーション創造（SIP）：戦略的イノベーション創造プログラムの概要，
<https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sipgaiyou.pdf>, (参照 2019.09.11).
- (5) 公益財団法人 交通事故分析センター：AEBによる追突事故低減効果の分析，交通事故分析統合センター 第21回研究発表会, pp.1-12.
- (6) NHTSA：Department of Transportation Releases Policy on Automated Vehicle Development, 14-13Thursday, May 30, 2013.
- (7) Christina Rodel, Susanne Stadler, Alexander Meschtscherjakov, ManfredTscheligi：Towards Autonomous Cars: The Effect of Autonomy Levels on Acceptance and User Experience, Sigmund-Haffner-Gasse 18, 5020 Salzburg, Austria.
- (8) SAE：Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, J3016, January 16, 2014.
- (9) UNECE：WP29, Regulation No.79 Automatically Commanded Steering Function (ACSF), Results of the Study on ACSF Transition Time (ACSF-04-15),
<https://wiki.unece.org/display/trans/ACSF+4th+session>, (参照 2019.09.11).
- (10) 経済産業省：自動走行ビジネス検討会「自動走行の実現に向けた取組方針」，
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/automobile/Automated-driving/report-Version2.0.pdf, (参照 2019.09.11).
- (11) Ministry of Land：Infrastructure and Transport of Japan, Abstract of Autopilot system, Autopilot system project, Vol. 4.
- (12) 内閣府，官民 ITS 構想・ロードマップ 2018，
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20180615/siryou9.pdf>, (参照 2019.09.11).
- (13) 本間亮平，若杉貴志，小高賢二：高度自動運転における権限移譲方法の基礎検討，自動車技術会論文集, Vol.47, No.2, pp. 532-542 (2016).
- (14) 本間亮平，若杉貴志，小高賢二：高度自動運転における権限移譲方法の基礎検討（第2報），自動車技術会論文集, Vol.48, No.1, pp. 127-132 (2017).
- (15) 本間亮平，若杉貴志，小高賢二：高度自動運転における権限移譲方法の基礎検討（第3報），自動車技術会論文集, Vol.48, No.4, pp. 909-914 (2017).
- (16) 本間亮平，若杉貴志，小高賢二：高度自動運転における権限移譲方法の基礎検討（第4報），自動車技術会論文集, Vol.49, No.4, pp. 396-402 (2018).

- (17) 本間亮平, 若杉貴志, 小高賢二: 高度自動運転における権限移譲方法の基礎検討 (第4報), 自動車技術会論文集, Vol.50, No.4, pp. 517-523 (2019).
- (18) 国土交通省自動車局: 自動運転システムの安全技術ガイドライン, <https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sipgaiyou.pdf>, (参照 2019.09.11).
- (19) 谷田公二, 木村真弘, 吉田雄一: 自動運転システム制御へ向けた高速道路での合流行動モデル, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.4, pp. 885-890 (2017).
- (20) 米陀佳祐, 三田誠一, ヤンチェンシー, ドーコクファイ, テヘラニホセイン, 江川万寿三, 武藤健二: 自動運転システム用のレーンチェンジ経路計画, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1, pp. 165-170 (2016).
- (21) 住岡忠使, 西宮憲治, 飽田好恭: 非線形モデル予測制御とグラフ理論を用いた他車混合交通状況における自動運転制御, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.6, pp. 1353-1358 (2017).
- (22) 住岡忠使, 西宮憲治, 飽田好恭: 非線形モデル予測制御と動的計画法を用いた他車混合交通状況における車両軌道と速度生成, 計測自動制御学会論文集, Vol.53, No.2, pp. 198-205 (2017).
- (23) 加藤晋, 橋本尚久, 津川定之: 隊列走行システムのHMIにおける隊列形成支援と受容性検討, 自動車技術会論文集, Vol.43, No.2, pp. 643-648 (2012).
- (24) 須田義大, 青木啓二: 自動運転技術の開発動向と技術課題, 情報管理, Vol.57, No.11, pp. 809-817 (2015).
- (25) 飯田克弘, 浅田真敬, 多田昌裕, 筑後智弘, 西田将之, 安時亨, 澤田英郎: ACC 車両が混在する高密度交通流の挙動と運転者挙動への影響, 交通工学論文集, Vol.5, No.1, pp. 80-89 (2017).
- (26) 和田隆弘: 自動運転と手動運転をつなぐ権限共有モード, 横幹連合コンファレンス予稿集(2017).
- (27) 岸浩司, 赤松幹之, 遠藤照昌: 自動運転中の運転への準備レベルについての一考察, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.4, pp. 903-908 (2017).
- (28) 萩原亨, 清水一喜: 低速走行時における自動運転から運転操作に戻るリクエストに対する ドライバ応答に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.49, No.4, pp. 832-838 (2016).
- (29) 久米拓弥: 車載装備を利用した漫然状態の検出および解消手法の開発, DENSO TECHNICAL REVIEW, Vol.21, pp.117 (2016).
- (30) Keisuke S., Katsuya G., Shun'ichi D., Toshihiko T., Kazunori H., Keiichi S., Study on Advanced Head-light Distribution Pattern to Enhance Driver's Visibility, The 17th Japan-Korea Joint Symposium on Ergonomics 2015, Vol.51, pp. S518-S521 (2015).

- (31) Keisuke S., Katsuya G., Shun'ichi D., Toshihiko T., Kazunori H., Keiichi S., Evaluation of the effectiveness of advanced driving headlights using a driving simulator, Mechanical Engineering Journal 2016, Vol. 3, No. 4, pp.16-00090 (2016).
- (32) Gokan, M., Tanaka, N., Furukawa, Y., Iwase, T., Hirowatari, T., Study on a Method for Evaluating the Safety of the Braking Control Algorithm for Automated Driving System When Following, SAE Technical Paper 2019-01-1015 (2019).
- (33) Gokan, M., Yamaguchi, D., Hirose, T., Driving Characteristics when Autonomous Driving Change to Driver in Low Alertness and Awake from Sleeping, SAE Technical Paper 2018-01-1081 (2018).
- (34) 後閑雅人, 廣瀬敏也 : ドライバの出眠時における自動運転から手動運転に遷移する際の覚醒手法に関する研究,交通科学学会論文集, Vol.19, No.1 (2019)
- (35) 後閑雅人, 青木義郎, 田中信壽, 安本まこと, 山村志, 中澤美紗子 : 前照灯照射範囲の違いによる歩行者の被視認性の変化, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.4, pp. 873-878 (2017).
- (36) 公益財団法人 交通事故統合分析センター : 交通統計平成 28 年版
- (37) 公益財団法人 交通事故統合分析センター : 交通統計平成 27 年版
- (38) 公益財団法人 交通事故統合分析センター : 交通統計平成 26 年版
- (39) 公益財団法人 交通事故統合分析センター : 交通統計平成 25 年版
- (40) 公益財団法人 交通事故統合分析センター : 交通統計平成 24 年版
- (41) 公益財団法人 交通事故統合分析センター : 交通統計平成 23 年版
- (42) Jasper H. H : The ten twenty electrode system of the international federation, Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, No.10, pp.371-375 (1958).
- (43) 研究ノート脳波の謎 : リズムとその存在理由, 多摩大学研究紀要経営情報研究, No.21, pp.94-95 (2017).
- (44) 脳波の基礎知識 : 臨床神経生理学, Vol.42, No.6, pp.365 (2014).
- (45) 林光緒 : 居眠りの競りのメカニズム, 国際交通安全学会誌, Vol.38, No.1, pp.53-54 (2013).
- (46) European New Car Assessment Program : Euro NCAP 2018 5 Star Requirements, https://www.testsitesweden.com/sites/default/files/content/euro_ncap_asta_zero testers_day_2017-04-25.pdf, (参照 2019.09.11).
- (47) Kales Anthony, Rechtschaffen Allan : A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects, Bethesda, Md. U. S. National Institute of Neurological Diseases and Blindness, Neurological Information Network, 1968.
- (48) 警視庁 : 平成 26 年中の交通事故の発生状況 (2015) <http://www.npa.go.jp/toukei/koutuu48/H270220.pdf> (参照 2019.09.11).

- (49) 茨城県警察本部交通企画課：ライト切り替えによる交通事故防止,
https://www.pref.ibaraki.jp/kenkei/a02_traffic/archives/blockprint/pdf/h31/h31-08.pdf,
(参照 2019.09.11)
- (50) 交通事故分析センター：ITARDA INFORMATION83, pp.1-12 (2010).
- (51) CIE Technical Report：Commission International de L' eclairage (1995).
- (52) 交通事故分析センター：ITARDA INFORMATION111, pp.1-8 (2015).

研究業績

【研究論文】

1. 後閑雅人, 青木義郎, 田中信壽, 安本まこと, 山村志, 中澤美紗子 : 前照灯照射範囲の違いによる歩行者の被視認性の変化, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.4, pp. 873-878 (2017).
2. 後閑雅人, 廣瀬敏也 : ドライバの出眠時における自動運転から手動運転に遷移する際の覚醒手法に関する研究, 交通科学学会論文集, Vol.19, No.1 (2019)
3. Hirose, T, **Gokan, M.**, Kasuga, N., Sawada, T., A Study on Modeling of Driver's Braking Action to Avoid Rear-End Collision with Time Delay Neural Network, SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2014-01-0201

【国際会議】

1. **Gokan, M.**, Yamaguchi, D., Hirose, T., Driving Characteristics when Autonomous Driving Change to Driver in Low Alertness and Awake from Sleeping, SAE Technical Paper 2018-01-1081
2. **Gokan, M.**, Tanaka, N., Furukawa, Y., Iwase, T., Hirowatari, T., Study on a Method for Evaluating the Safety of the Braking Control Algorithm for Automated Driving System When Following, SAE Technical Paper 2019-01-1015
3. Hirose, T, **Gokan, M.**, Kasuga, N., Sawada, T., A Study on Modeling of Driver's Braking Action to Avoid Rear-End Collision with Time Delay Neural Network, SAE Technical Paper, 2014-01-0201
4. Hirose, T, Ohtsuka, Y., **Gokan, M.**, Activation Timing of a Collision Avoidance System with V2V Communication, SAE Technical Paper 2017-01-0039
5. Miyata, A., **Gokan, M.**, Hirose, T., Accuracy of a Driver Model with Nonlinear Autoregressive with exogenous Inputs (NARX), SAE Technical Paper 2018-01-0504
6. Suzuki, K., **M., Gokan, M.**, Hirose, T., Effect of Driver Posture on Driving Characteristics when Control is Passed from an Autonomous Driving System to a Human Driver, SAE Technical Paper 2018-01-1173

【解説書】

1. 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2019年7月発行, 車載式故障診断装置を活用した自動車検査手法の概要, 自動車技術, Vol.73, No7, pp. 43-46 (2019).

【特許】

1. 田中信壽, 後閑雅人, 制動評価装置, 自動制動パターンのデータ構造, 制動評価方法, 制動評価閾値の生成方法, 自動制動パターンの基礎データの収集方法 (特許出願中) .

【国内発表】

1. 後閑雅人, 青木義郎, 田中信壽, 安本まこと, 山村志, 中澤美紗子, 2016年10月発表, 前照灯照射範囲の違いによる歩行者の被視認性の変化 (第一報), 自動車技術会秋季大会
2. 後閑雅人, 田中信壽, 安本まこと, 小林撰, 2016年12月発表, 自動運転システムに求められる故障診断システムのあり方, 交通研フォーラム
3. 後閑雅人, 田中信壽, 小林撰, 2017年10月発表, 通信利用型歩行者情報提示システムがドライバの反応速度に及ぼす影響に関する研究, 自動車技術会秋季大会
4. 後閑雅人, 田中信壽, 安本まこと, 小林撰, 2017年10月発表, 歩行者支援システムがドライバの運転に与える影響に関する研究, 交通研フォーラム

【共著者発表】

1. 青木義郎, 後閑雅人, 田中信壽, 安本まこと, 山村志, 中澤美紗子, 2016年10月発表, 前照灯照射範囲の違いによる歩行者の被視認性の変化 (第二報), 自動車技術会秋季大会
2. 田中信壽, 後閑雅人, 松村英樹, 2017年10月発表, 衝突回避・被害軽減ブレーキの不要作動性に関する評価手法の検討, 自動車技術会秋季大会
3. 青木義郎, 後閑雅人, 田中信壽, 安本まこと, 山村聡志, 中澤美紗子, 2017年12月発表, 高齢者等の交通弱者に配慮した自動車前照灯に関する評価解析, 交通研フォーラム
4. 谷川靖典, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2018年3月発表, Deep Learning を用いたドライバの覚醒度の評価に関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
5. 大塚康史, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2018年3月発表, 車車間・歩車間通信を用いた一般道における自動運転システムの減速方法に関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
6. 菊地真, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2018年3月発表, 車車間通信システムを用いた情報提供の作動タイミングに関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
7. 貝田智子, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2018年3月発表, ドライビングシミュレータを用いた脳波によるドライバの運転意図の推定に関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会

8. 朝倉夢生, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2018年3月発表, 自動運転から手動運転への切り替え時における低覚醒ドライバの運転特性, 自動車技術会関東支部学術講演会
9. 中村浩昭, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2018年3月発表, 自動運転使用時における出眠状態のドライバの運転特性に関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
10. 湯浅力斗, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2018年3月発表, 車車間・歩車間通信を用いた一般道における自動運転システムのHMIに関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
11. 石岡司, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2018年3月発表, 交差点における出会い頭事故を対象とした自転車と自動車の走行特性に関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
12. 穴戸天栄, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2018年3月発表, ドライビングシミュレータの車両運動の模擬に関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
13. 田中信壽, 安本まこと, 青木義郎, 後閑雅人, 山村聡志, 北澤達磨, 大野智之, 2018年10月発表, 予防安全支援システム効果評価シミュレータ (ASSESS) による Adaptive Driving Beam の設計パラメータの有用性に関する検討, 自動車技術会秋季大会
14. 田中信壽, 安本まこと, 後閑雅人, 青木義郎, 山村聡志, 北澤達磨, 大野智之, 2018年12月発表, コンピュータシミュレーションによる ADB (Adaptive Driving Beam) の有用性に関する検討, 交通研フォーラム
15. 斉藤陽之, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2019年3月発表, 市街地における車車間・歩車間通信を用いた情報提供の評価に関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
16. 秋山綾佑, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2019年3月発表, AEBS (Advanced Emergency Braking System) における情報提供の効果に関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
17. 高橋良総, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2019年3月発表, 一般道での自動運転を想定した情報提供のHMIに関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
18. 阿部雄一, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2019年3月発表, シニアカーの自動運転化に向けた都市における建築物高層部を利用した高精度三次元地図の構築に関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
19. 高田拓実, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2019年3月発表, 無信号交差点での自転車と車両の出会い頭事故を防止するためのHMIに関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
20. アレナスジョニー, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2019年3月発表, 自動運転使用時における出眠状態のドライバ特性に関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
21. 戸田健登, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2019年3月発表, 自動運転から手動運転への切り替え時における低覚醒ドライバの運転特性, 自動車技術会関東支部学術講演会

22. 小川敦史, 廣瀬敏也, 後閑雅人, 2019年3月発表, サッカーD誘導刺激および嗅覚刺激によるドライバ覚醒度維持に関する研究, 自動車技術会関東支部学術講演会
23. 青木義郎, 後閑雅人, 田中信壽, 戸高 信一, 守屋 輝人, 後藤 亮, 2019年5月発表, グレアレス ADB 配光による歩行者へのグレア低減と行動特性への影響, 自動車技術会春季大会