

NAIST-IS-MT1651012

修士論文

自動走行時の車酔いと VR 酔いが併発する環境における 動揺病の評価

磯部 良太

2018 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

磯部 良太

審査委員：

萩田 紀博 教授 （主指導教員）

小笠原 司 教授 （副指導教官）

神原 誠之 准教授 （副指導教官）

自動走行時の車酔いと VR 酔いが併発する環境における 動揺病の評価*

磯部 良太

内容梗概

車両の自動走行化に伴い、従来の運転手であった人が搭乗者の一人となり、自車の車両挙動を予測することが難しくなることから、車酔いの増加が予測される。さらに、搭乗者の快適性の向上のため、AR 技術を用いた情報提示が行われると予想される。しかし、AR による映像は実環境に対して、遅延した映像を出力するため、視覚情報に遅延した運動感覚が伝わり、VR 酔いの要因の 1 つとなる。そのため、自動走行環境では、車酔いと VR 酔いの併発する新たな環境となる。本研究では、自動走行時に車酔いと VR 酔いが併発する動揺病を「自動走行酔い」と定義し、従来では起こり得なかった動揺病である自動走行酔いの搭乗者への影響を調査する。実験では、AR 技術を用いた情報提示による視覚情報の遅延と、車の加速度による前庭感覚の運動感覚の不一致で自動走行酔いが起こると仮説を立て、検証実験を行った。その結果、自動走行酔いの原因が AR 技術を用いた情報提示による視覚情報の遅延であると明らかになった。また、搭乗者への自動走行酔いの影響を調査するため、車酔い環境、自動走行酔い環境、VR 酔い環境の動揺病の比較実験を行った結果、車酔い環境より、自動走行酔い環境の方が強い動揺病になることが明らかになった。

キーワード

自動走行酔い、動揺病、VR 酔い、自動走行、AR、生理指標、快適性

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1651012, 2018 年 3 月 15 日.

Evaluation of Motion Sickness Caused by Autonomous Vehicles and Augmented Reality*

Ryota Isobe

Abstract

Autonomous vehicles may cause car motion sickness of passengers even though they never feel it during their driving. Augmented Reality (AR) providing passengers additional information may also cause another motion sickness, called VR sickness due to the delayed AR images. Therefore autonomous vehicles with AR may cause two kind of motion sickness simultaneously. This paper analyzes user influences for these two kind of motion sickness, named "self-driving sickness" in autonomous vehicles. We postulate that they are caused by the time-delay in displaying additional information and the sensory mismatch of vestibular sensation due to vehicle acceleration.

See-through head-up display (HUD) are used for causing self-driving sickness. Subjective and objective evaluations with physiological indices are made in the experiments of self-driving sickness for passengers. The experiment result shows that VR sickness from HUD causes more self-driving sickness than car motion sickness.

Keywords:

Motion sickness, VR sickness, Self-driving sickness, Self-driving, AR, Physiological indices, Comfortable

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651012, March 9, 2018.

目次

図目次		vi
第 1 章	はじめに	1
第 2 章	自動走行酔いにおける関連研究および本研究の位置づけ	3
2.1	快適性向上を目的としたストレス低減手法	3
2.1.1	挙動制御によるストレス低減	4
2.1.2	情報提示によるストレス低減	5
2.2	AR による情報提示の関連研究	6
2.3	動揺病のメカニズム	6
2.3.1	車酔いのメカニズムと要因	7
2.3.2	VR 酔いのメカニズムと要因	8
	両眼立体視	9
	視野	9
	フリッカー（ちらつき）	9
	リフレッシュレート（垂直走査周波数・水平走査周波数）	10
	遅延	10
	フレームレート	10
2.4	動揺病の主観的評価方法	10
2.4.1	MSI(Motion Sickness Incidence)	10
2.4.2	Graybiel Scale	10
2.4.3	Reason&Graybiel らによる指標	11
2.4.4	SSQ:(Simulation Sickness Questionnaire)	11
2.5	生理指標を用いた動揺病の客観的評価方法	12
2.5.1	唾液	14
2.5.2	心拍や脈拍	15
2.5.3	呼吸	16
2.5.4	胃電図	16
2.5.5	皮膚電気活動	16

2.6	本研究の位置づけ	17
第 3 章	自動走行酔いの検証実験	19
3.1	実験設備	19
3.2	実験環境	20
3.3	動揺病の評価方法	22
3.3.1	SSQ	23
3.3.2	唾液アミラーゼ	23
3.3.3	LF/HF	23
3.4	実験結果	23
3.4.1	SSQ	23
3.4.2	唾液アミラーゼ	24
3.4.3	LF/HF による評価	25
3.5	考察	26
第 4 章	自動走行酔いの評価実験	28
4.1	実験設備	28
4.1.1	車酔いの環境	28
4.1.2	自動走行酔いの環境	28
4.1.3	VR 酔いの環境	32
4.2	実験環境	32
4.3	動揺病の評価方法	33
4.4	実験結果	33
4.4.1	SSQ による評価	33
4.4.2	唾液アミラーゼによる評価	35
4.4.3	LF/HF, HF による評価	36
4.5	考察	37
第 5 章	おわりに	39
謝辞		40

参考文献	41
発表リスト	47

図目次

2.1	感覚矛盾説に基づいた動揺病の発症機序モデル [32]	7
2.2	走行時の頭部の傾き	8
2.3	交差法による両眼立体視	9
2.4	各症状と Reason&Graybiel らによる指標の関係 [46]	12
2.5	唾液アミラーゼモニタ, ニプロ (株) [48]	14
2.6	ECG の波形	15
2.7	SC 測定時の電極の取り付け位置 [53]	17
2.8	各動揺病の感覚矛盾	18
3.1	実験パターン	19
3.2	自動走行酔いの検証実験で使用するディスプレイ	20
3.3	車内環境	21
3.4	実験風景	21
3.5	走行経路	22
3.6	SSQ の集計グラフ	24
3.7	唾液アミラーゼ活性値の集計グラフ	25
3.8	LF/HF のグラフ	26
4.1	実験パターン	28
4.2	HUD の映像内容: 実環境に位置合わせしたカメラ映像	29
4.3	自動走行酔いの評価実験の HUD の概要図	30
4.4	HUD の外観	31
4.5	VR 酔い環境の車内風景	31
4.6	車内環境	33
4.7	SSQ の集計グラフ	34
4.8	唾液アミラーゼ活性値の集計グラフ	35
4.9	LF/HF の集計グラフ	36
4.10	HF の集計グラフ	37

第 1 章 はじめに

交通事故の防止，渋滞緩和，および移動支援を目的とした，自動走行車両の実用化を目指し，日本，米国および欧州において自動走行の技術開発が盛んに行われている [1]．一般的に，自動走行には，表 1.1 に示すように，レベル 0-5 までの 6 段階で定義されている [2]．特に，自動走行レベル 3 では，今後自動走行車の普及にあたり，車両の挙動が予測できないことによるストレスや自動走行システムに対する不安などへの対策として，搭乗者の快適性を向上させることが重要になると予測される．しかし，現在の自動走行分野における研究の多くは，交通事故の防止のための「安全性」や経路計画・渋滞改善のための「効率性」を重視したものが多く，自動走行車の普及に重要な搭乗者の「快適性」に関する研究事例は少ない [3]．搭乗者の快適性の阻害要因として，自動走行車両の知能である認知，判断，操作のそれぞれが搭乗者と共有されないことにより発生するストレスが挙げられる [4]．最近では，車両に対する不安によって発生するストレスの低減を目的として，車両の挙動制御 [5] や車両の進行方向を搭乗者と共有する情報提示 [6] による研究が行われている．

しかし，これらの研究だけでは，搭乗者の快適性を十分に確保することはできず，更なる快適性向上のためには，一般的に「酔い」と呼ばれる動揺病を軽減させることが重要とされている．車両の自動走行化に際して，従来は運転手だった人が搭乗者となることで車両挙動を予測することが難しくなり，車酔いの増加が予想される [7, 8]．そこで，自動走行時の動揺病に対し，有効な軽減方法がいくつか提案されている [9, 10]．

運転手に対する運転支援や，搭乗者のストレス低減などを目的とした，AR 映像による情報提示を行うデバイスとして，ヘッドアップディスプレイ（以降 HUD）が注目されている．HUD は，今後の市場の成長も見込まれ，HUD の搭載車両が増加することが予想されている [11]．しかし，HUD による情報提示は，搭乗者のストレスを低減するメリットがあるが，AR 映像を表示するため，従来の車両には起こり得なかった VR 酔い誘発の要因となりうる点がデメリットとして考えられる．その理由として，AR 映像は実環境に対して，原理的に遅延して出力される [12]，視覚情報に遅延した運動感覚が伝わり，VR 酔いの要因の 1 つとなる．これまで，自動走行中に，車酔いについて検討した研究例はいくつか存在するが，車酔いと VR

酔いの併発環境について検討した研究事例はない。

そこで、本研究では、自動走行時に車酔いと VR 酔いが併発する動揺病を「自動走行酔い」と定義し、従来では起こり得なかった自動走行酔いの発生について検証する。具体的には、AR 映像の特徴の 1 つである遅延によって、車内で VR 酔いが引き起こされやすい環境の中で、動揺病をアンケートによる主観的評価と生理指標による客観的評価を行う。

以降からの構成は以下のとおりである。2 章では、自動走行酔いが起こる根拠として、関連研究について紹介し、本研究の位置づけについて説明する。3 章では、自動走行酔い検証実験について述べ、4 章では、自動走行酔いの評価実験について述べる。最後に、5 章では本論文のまとめと今後の展望について述べる。

表 1.1 自動走行レベルの定義と概要 [2]

レベル	概要	運転の対応主体
レベル 0	運転手が全ての運転タスクを実施	運転手
レベル 1	システムが前後、左右のいずれかの車両制御を運転タスクを実施	運転手
レベル 2	システムが前後、左右の両方の車両制御を運転タスクを実施	運転手
レベル 3	限定領域内において、システムが全ての運転タスクを実施するが緊急時にはドライバーが対応	システム
レベル 4	限定領域内において、システムが全ての運転タスクを実施する	システム
レベル 5	システムが全ての運転タスクを実施する	システム

第 2 章 自動走行酔いにおける関連研究および本研究の位置づけ

自動走行において、安全性を確保した車両に搭乗したとしても、搭乗者は必ずしも安全と感じるとは限らないとされている [13, 14]. このことから、従来の車にはなかった快適性を阻害する要因が発生する. 今後、自動走行車の普及において、搭乗者の快適性が必要不可欠となる. 快適性の向上には主に、自動走行に対するストレス低減と動揺病の軽減の 2 つが挙げられる.

本章では、本研究に関連する研究として、はじめに自動走行時の搭乗者のストレス低減手法について車両挙動と情報提示の観点からそれぞれ紹介する. また、情報提示の手法の 1 つとして、AR 用いた情報提示を行うためのデバイスとして HUD の関連研究について述べる. 一方で、動揺病の発症原理として有力な感覚矛盾説（感覚混乱説）について説明し、従来の車酔いの要因と VR 酔いの要因を説明する. そして、AR による情報提示が自動走行酔いになりうる可能性があることを述べる. 最後に、動揺病の評価方法として、主観的評価方法と客観的評価方法を紹介し、これらの関連研究を含め、本研究の位置づけおよび仮説について述べる.

2.1 快適性向上を目的としたストレス低減手法

本節では、自動走行車の搭乗者の快適性向上を目指したストレス低減の研究について述べる. 従来、手動走行時では、運転手だった人が自動走行時では 1 人の搭乗者となる. そのため、搭乗者は車両挙動の予測が難しくなりストレスが生じる. そこで、自動走行時に搭乗者が感じるストレス要因を推定する研究 [15] やストレス要因を分類する研究 [16] が行われている. 自動走行車に搭乗することで発生するストレス要因を環境の種類によって以下の 3 種に分類している.

- (1) 自動走行車の挙動
- (2) 静的な外部環境
- (3) 動的な外部環境

(1) は、加減速によるタイミングや量、経路変更などの自動走行の挙動に起因す

るストレスが含まれる。これは、一般的に挙動制御の改善や搭乗者にフィードバックすることで解決できると考えられる。

(2) は、壁や障害物への接近などの静的外部環境との関係に起因するストレス要因が含まれる。これを低減するには、挙動情報に加え、地図情報などの静的外部環境の情報が必要となる。

(3) は、歩行者や車などの移動体との接近や衝突予測などの動的外部環境との関係に起因するストレス要因が含まれる。これを低減するには挙動情報、静的外部環境情報に加え、動的外部環境の情報が必要となる。

これらは、下に進むほどストレス低減に必要な情報が多くなる。そのため、ストレス低減を実現するには、高精度・広範囲なセンシング及び円滑で安定した情報共有の基盤が必要となる。また、これらの解決手法として、従来研究を車両挙動と情報提示の2つに大別することができる。以下、それぞれの従来研究について紹介する。

2.1.1 挙動制御によるストレス低減

挙動制御によるストレス低減として、Gulati ら [17, 18] は、自動走行の望ましい動作に必要な要件として、安全性、滑らかな動作、適切な速度、直感的な操作の4つを定義した。また、滑らかな動作と適切な速度による2つの観点から、シミュレーションにより評価した。さらに、その制御手法を実装した車椅子ロボットを用いて実環境での検証を行っている。

静的外部環境に起因するストレス要因については、Morales ら [19] による車椅子が壁に接近することで搭乗者が受けるストレスを検証した研究が挙げられる。また、レーザレンジファインダによって静的外部環境の位置情報を取得し、その情報から搭乗者の視認性を推定し、視認性とストレスの関係性の検証を行っている。さらに、それに基づいた搭乗者の快適性を考慮した経路設計手法の提案も行っている [20, 21]。

野村ら [22] は、車椅子ロボット搭乗時に搭乗者が静的外部環境から受けるストレスを軽減することを目的とした経路設計アルゴリズムの提案を行っている。この研究は、車椅子ロボットが周囲の壁までの距離や車両挙動パラメータ、生理指標の示

すストレス値を入力としてデータベースを作成し、機械学習により最もストレスが軽減される経路を候補の中から選択する実験である。

動的な外部環境に起因するストレス要因については、澤邊ら [23] が見通しの悪い経路において、死角部分に存在するかもしれない歩行者との衝突予測によって発生するストレスを対象とした研究を行っている。この研究では、走行予定経路において他の移動体と接触する可能性があるると予測される範囲の視認性として挙動依存視認性を定義し、これを確保するように速度制御を行うことで搭乗者のストレス軽減を実現し、生理指標により評価を行っている。

2.1.2 情報提示によるストレス低減

情報提示によるストレス低減手法の従来研究として、橋本ら [6] による、車両内部環境に起因するストレス要因については車椅子ロボットの挙動情報を搭乗者に提示することで、搭乗者のストレス低減を行う研究が挙げられる。この研究では、急発進や蛇行、壁への接近などの複数のストレス要因から生理指標（心拍及び発汗）の反応を調べることで、ストレス要因の刺激の強弱や長さとの関係性を検証している。この方法から自動走行車両の挙動情報を搭乗者に提示することでストレスを軽減することに成功している。

また、静的な外部環境に起因するストレス要因については、笹井ら [24] による、自動車の搭乗者にとって死角となる車両の下前方領域の道路面の映像をダッシュボードに投影する手法がある。これを行うことで、シースルー映像のように搭乗者に提示すると同時に、その映像内に車両前輪の軌跡を重ね表示する拡張現実を用いたシステムを構築し、前輪と路面状況との位置関係を直感的に表示することで脱輪や障害物接触の不安に起因するストレスを低減する研究がある。この研究においても生理指標計測によって有効性を評価している。

動的な外部環境に起因するストレス要因については、渡辺ら [25] による、車椅子ロボットに登場した搭乗者と歩行者が屋内のまっすぐな廊下で正面からすれ違う場合のストレスを軽減手法を提案した。その方法として、車椅子ロボットに搭載されているプロジェクターから床面に走行経路の情報を投影し、すれ違いの際に情報提示を行っている。この研究では搭乗者・歩行者の両者に対するアンケート及び歩行者

のすれ違い時における速度方向の変化量により有効性の評価をしている。

2.2 AR による情報提示の関連研究

AR による情報提示を行うデバイスとして HUD がある。HUD は、従来のカーナビゲーションに対し、フロントガラス上やダッシュボード上の投影器機に映像を表示するため、視線移動の必要がないことから運転支援システムとして開発されてきた。また、従来のカーナビゲーションに比べ焦点距離を伸ばせることから、焦点の調節にかかる時間も短縮でき、障害物等の認識を早めることができるため、安全性を向上できるデバイスとして考えられてきた。さらに、最近の自動走行技術の発展により、搭乗者に安全性を明示させ、快適性を向上させるデバイスとしての用途も考えられている [26]。以下に、最近の HUD の開発の動向について記述する。

Panasonic 社 [27] は、従来の HUD では、サイズの問題で小型車種に搭載することができない理由から、従来の性能を落とさずに小型化を図り、小型車種にも搭載可能なユニットサイズを実現している。Fujifilm 社 [28] は、HUD の性能は画面サイズ、輝度、画質、ユニットのサイズであると定義し、画質向上のため、ミラーの位置や形状を光学系に最適化することで、全領域内で瞳の位置による像の歪曲を極小化した。Pioneer 社 [29] では、十分な AR 表示に必要な領域を確保するため、レーザープロジェクタを使用し、サンバイザー付近にユニットとコンバイナを組み合わせた装置を開発することで、虚像の画角 (度) $17.1(H) \times 5.7(V)$ 、搭乗者と虚像までの距離が 3m と虚像までの距離を維持したまま視野の拡大に成功している。

2.3 動揺病のメカニズム

動揺病は、車酔い、船酔いなど乗り物の種類別に名称が付けられている他、シミュレータ酔い、VR 酔い、宇宙酔いなど広義の意味でも使用されている。これまでに、動揺病に関する研究は数多く行われてきたが、その原理については、未だ明確に解明されていない。しかし、現在、動揺病発生の原理について最も有力な説として感覚矛盾説（感覚不一致説）がある [30, 31, 32, 33]。図 2.1 に感覚矛盾説の発症機序モデルを示す。以下に動揺病が発症するまでの流れを記述する。

1. 視覚，前庭感覚，体性感覚のそれぞれの感覚器官から得た運動感覚を統合させる
2. 現在の運動情報から脳内のニューラルストアと呼ばれる中枢神経系に記憶された過去の空間知覚情報のパターンと照合する
3. 両パターンの整合が取れない場合，ニューラルストアに新たな感覚情報パターンを記録する
4. 3 と同時にミスマッチ信号が発生し，自律神経系が不安定になる
5. 自律神経が不安定になることで，動揺病の症状である頭痛や吐き気などの症状が発生する

以下に，感覚矛盾説の観点から車酔い，VR 酔いのメカニズムについて記述する．

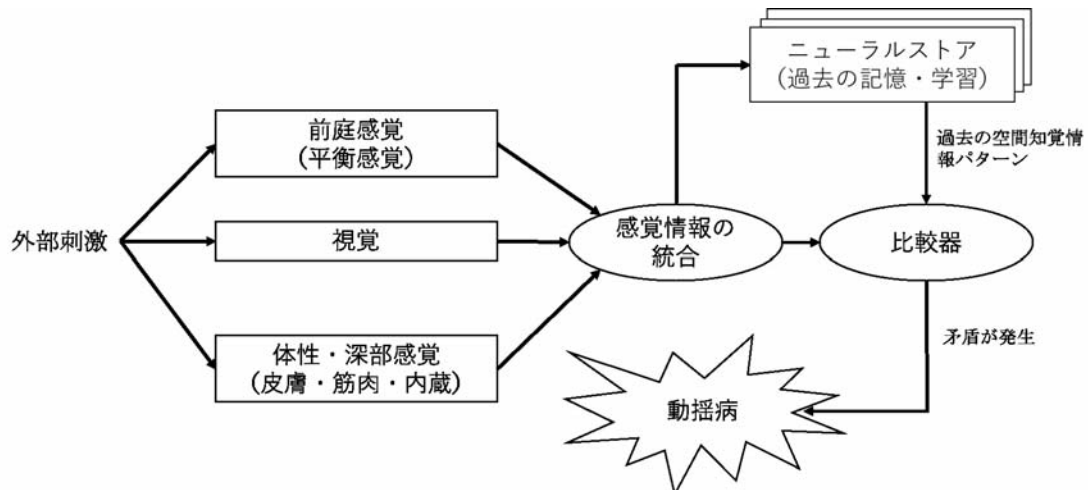


図 2.1 感覚矛盾説に基づいた動揺病の発症機序モデル [32]

2.3.1 車酔いのメカニズムと要因

図 2.2 に頭部の傾きによる車酔いの要因を示す。車酔いは，断続的な加速度刺激により，前庭感覚が刺激されているにも関わらず，速い景色の移り変わりに視覚情報と体は静止しているという体性感覚の矛盾から感覚の不一致が発生する．具体的には，走行中の急な発進，停止やカーブ時では，体は座席からほとんど動いていな

いにも関わらず，頭は前後左右に揺れている．そのため，体性感覚と前庭感覚で受ける加速度に違いが生じ，感覚の不一致が生じる [34]．

体幹に対する首の角度

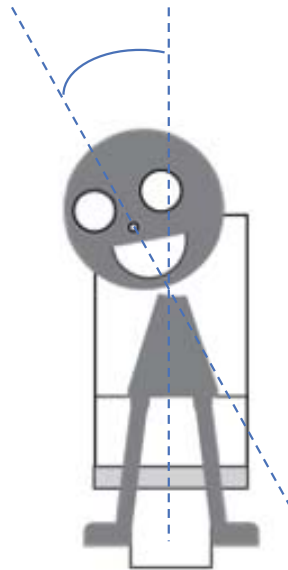


図 2.2 走行時の頭部の傾き

2.3.2 VR 酔いのメカニズムと要因

VR 酔いは，サイバー酔い，3D 酔い，VE(Virtual Environment) 酔いと同義である．一方で，シミュレータ酔いに関しては，実機による経験が豊富なほど動揺病になりやすいことから VR 酔いとは異なるという意見もある．VR 酔いは，バーチャルリアリティの要件を満たしていなくとも，視覚に映像による運動感覚が入力されて動揺病の症状が現れた場合，VR 酔いとして扱われる [35]．

VR 酔いの原因は，映像から得られる視覚情報と現実空間から得られるその他の感覚器官に入力される情報との不整合が生じることで引き起こされると考えられている．また，VR 酔いの要因は主に映像よるものだが，これまで VR 酔い・シミュレータ酔いに関連がある映像内容についての研究が多く行われてきた．以下に現在

までに明らかになっている VR 酔いに関連する映像の要因について記述する。

両眼立体視

図 2.3 に交差法による両眼立体視の原理を示す。これまで長時間の交差法による両眼立体視は、調節・輻輳の不一致から VR 酔いや頭痛，眼球疲労などが報告されている [36]。

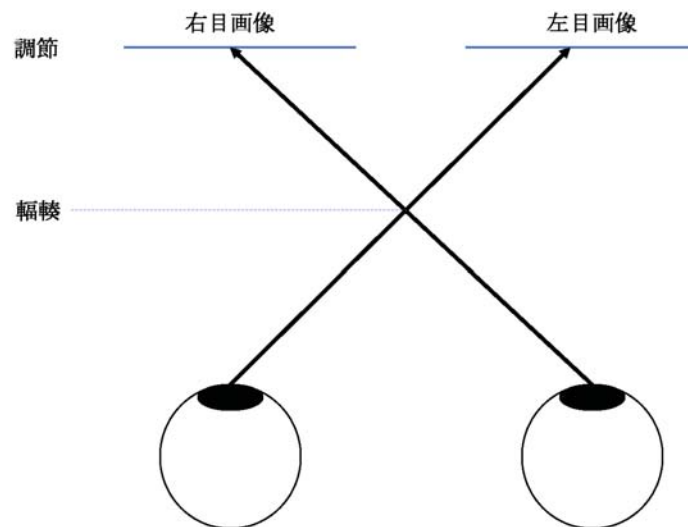


図 2.3 交差法による両眼立体視

視野

視野の小さい映像よりも視野の大きい映像のほうが VR 酔いになりやすい [37]。

フリッカー（ちらつき）

映像のちらつきが眼球疲労を起こし，VR 酔いに関連している [38]。また，視野・ちらつき・リフレッシュレートには，従属の関係にあり，視野が広いとちらつきが知覚されやすくなる。さらに，視野が増加するとリフレッシュレートも増加しなければ，映像が滑らかでなく違和感を感じるようになり，VR 酔いになりやすくなる [39]。

リフレッシュレート（垂直走査周波数・水平走査周波数）

リフレッシュレートとは，1 秒間に画面を何回書き換えるかを表す指標である．上述したように，60[Hz] 未満の遅いリフレッシュレートは，ちらつきを知覚しやすくなり，眼球疲労を誘発し，VR 酔いが起こりやすくなる [40]．

遅延

ドライブシミュレータを使った実験では，視覚による遅延は，VR 酔いになりやすい．また，視覚による遅延は，前庭感覚による遅延よりも VR 酔いになりやすい [41]．一方で，遅延が大きすぎる場合，視覚的遅れによる VR 酔い影響は確認できなかったという報告もある [42]．

フレームレート

フレームレートとは，動画において，1 秒間に処理させるフレーム数として表す指標である．フレームレートが低い場合，視覚の遅れが発生するため，VR 酔いになりやすい [43]．

2.4 動揺病の主観的評価方法

2.4.1 MSI(Motion Sickness Incidence)

被験者に症状を報告させて 1 – 6 の評点を与え，嘔吐のあった場合は 7 とする [44]．何 % の人が吐いたかという表現で近年多用されているが，嘔吐せずに苦しむ人や，他の自覚症状は軽いのにすぐ嘔吐に至る人など，適応に問題のある場合がある．

2.4.2 Graybiel Scale

自覚症状および観察による症状を点数化し，総合点から動揺病の重症度を 5 段階に分けて尺度化する [45]．動揺病の診断基準としてよく用いられている．

表 2.1 Graybiel Scale による動揺病の基準表

カテゴリ	特有症状 16 点	重度症状 8 点	軽度症状 4 点	微弱症状 2 点	付加的症状 16 点
吐き気症候群	嘔吐または空嘔	吐き気 III, II	吐き気 I	前胃部の不快感	前胃部の存在感
顔色		蒼白 III	蒼白 II	蒼白 I	紅潮
冷や汗		III	II	I	
唾液分泌の増加		III	II	I	
眠気		III	II	I	
痛み					頭痛
中枢神経					めまい
					閉眼時 II 以上
					開眼時 III
合計による動揺病の程度の尺度化					
	明確な動揺病 (S)	重度の不快 (M III)	中程度の不快 A (M IIA)	中程度の不快 B (M IIB)	軽度の不快 (M I)
	16 点以上	8-15 点	5-7 点	3-4 点	1-2 点

III=重度, II=中程度, I=軽度

2.4.3 Reason&Graybiel らによる指標

図 2.4 に各症状と Reason&Graybiel らによる指標の関係を示す。被験者は、動揺病の各症状について回答してもらい、各症状に合った 1-10 の不快感指数で表す [46]。Graybiel Scale とも対応する。

2.4.4 SSQ:(Simulation Sickness Questionnaire)

SSQ は、一般的にドライブシミュレータや飛行機シミュレータによる VR 酔いの診断のために考案された指標である [47]。表 2.2 に SSQ のアンケート項目を記述する。SSQ では 16 項目のそれぞれの症状を 0~3 の 4 段階で回答してもらい、Nausea (N: 吐き気), Oculomotor (O: 眼球運動), Disorientation (D: 平衡感覚) それぞれに該当する項目には ○ の記号を記している。評価値は、各合計値に重みを掛けて評価する (式 2.4.1)。また、それぞれを足し合わせ、重みを掛けた合計値 (Total Score: TS) で動揺病の総合的な指標が得られる。

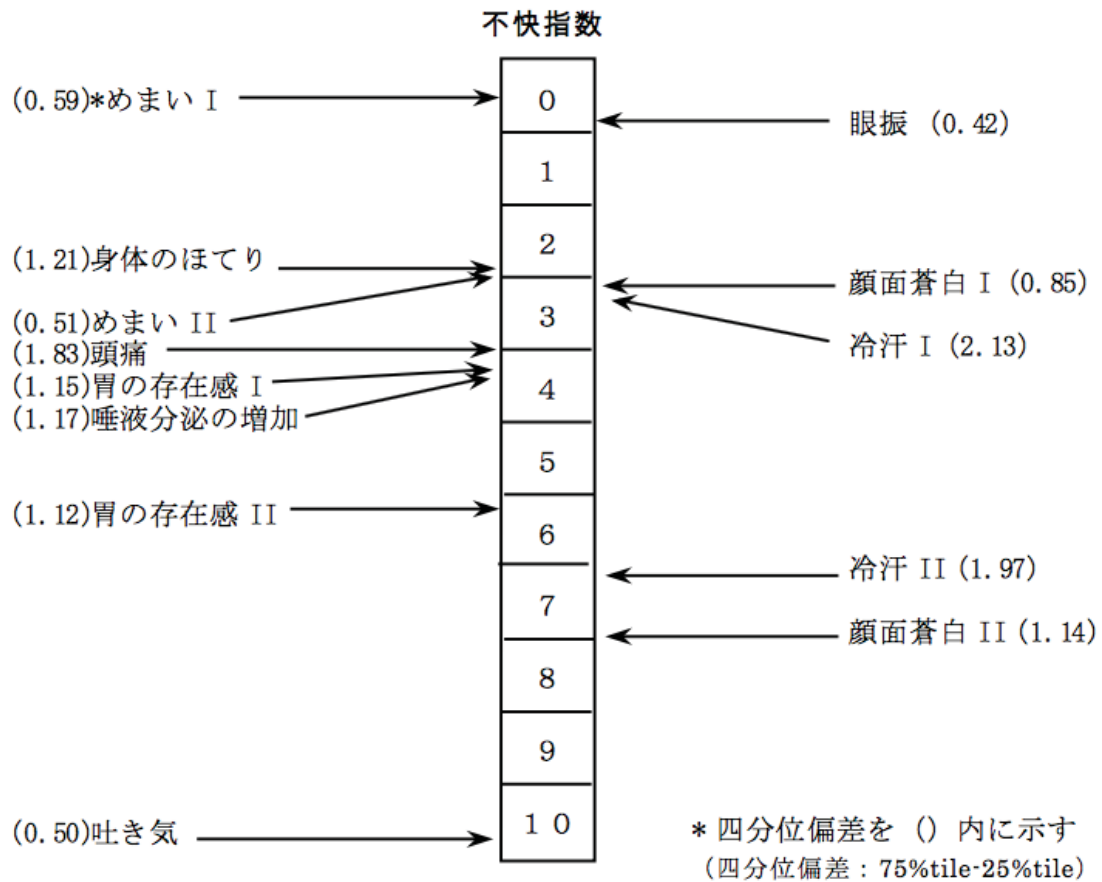


図 2.4 各症状と Reason&Graybiel らによる指標の関係 [46]

$$\begin{cases} N = a \times 9.54 \\ O = b \times 7.58 \\ D = c \times 13.92 \\ TS = (a + b + c) \times 3.74 \end{cases} \quad (2.4.1)$$

2.5 生理指標を用いた動揺病の客観的評価方法

現在、客観的指標として動揺病の生理指標用いたモデルは確立されておらず、動揺病の評価精度においては、主観的評価の方が主流である。明確な動揺病の客観的

表 2.2 SSQ のアンケート項目

各項目	Nausea	Oculomotor	Disorientation
全体的に気分が良くない	○	○	-
疲れた	-	○	-
頭痛がする	-	○	-
目が疲れた	-	○	-
焦点が合いにくい	-	○	○
唾液がよく出る	○	-	-
汗をかいている	○	-	-
吐き気がする	○	-	○
集中できない	○	○	-
頭がぼんやりする	-	-	○
目が霞む	-	○	○
目を開けているとふらふらする	-	-	○
目を閉じているとふらふらする	-	-	○
ぐるぐるとめまいがする	-	-	○
胃に違和感がある	○	-	-
げっぷが出る	○	-	-
各合計値	a	b	c

評価指標はない。

2.3 節で記述したように、動揺病は感覚矛盾による自律神経の乱れから引き起こされている。そのため、精神的ストレスと動揺病には密接な関連があり、動揺病は、一種の自律神経失調症であると考えられている。一般的に、動揺病発症時は、自律神経系の副交感神経が優位になっていることが知られている。そのため、自律神経系の指標である生理指標は動揺病に関する有用な情報を含んでいると考えられている。以下に、代表的な生理指標の測定方法について説明する。

2.5.1 唾液

唾液を用いた評価方法は、唾液アミラーゼ活性を測定することで、一般的にストレスの評価として用いられている [48]。唾液アミラーゼは不快な刺激に対して、唾液のアミラーゼ活性が上昇し、快適な刺激ではアミラーゼ活性が低下する。また、唾液アミラーゼの活性値は、動揺病の症状に関連があるという報告もされている [49]。

唾液アミラーゼの計測は、唾液アミラーゼ式交感神経モニタ（図 2.5）が活用されている例が多い。この機器の計測方法として、テストストリップの先端を舌下部に入れ、唾液を採取し、本体にテストストリップを挿入するだけでアミラーゼ活性の計測が可能である。この機器では、わずか 30 [μ L] 程度の唾液を 30 秒でテストストリップに採取し、30 秒程度で分析するため、約 1 分ほどでアミラーゼ活性を計測が行える。そのため、アミラーゼ活性には、非侵襲で簡便性に優れた採取が特徴である。



図 2.5 唾液アミラーゼモニタ，ニプロ（株） [48]

2.5.2 心拍や脈拍

心拍は胸部に電極もしくはバンドを装着することで心電図（ECG：Electrocardiogram）を計測する．脈拍は，指先に光電式ピックアップを装着して，末梢血管中のヘモグロビンの量の変化を計測することが多い．心電図の波形と脈拍の波形は周期的なものであり，その周期は，自律神経系である交感神経と副交感神経に深く影響を受けている．図 2.6 の波形の例を示す．一般的に，ECG の R 波と R 波の間隔（R-R 間隔）を周波数解析することで，自律神経系指標の 2 つのパワースペクトル成分を抽出できる [50]．パワースペクトルの低周波成分の領域（LF:0.05-0.15Hz），高周波成分の領域（HF:0.15-0.40Hz）の強度の積分値を用いる．HF 成分は，副交感神経が活性化している場合にのみに現れる．LF 成分は，交感神経が活性化している場合と副交感神経が活性化している場合の両方に現れる．そのため，交感神経の活動指標を求めるためには，一般的に LF と HF の比をとり，LF/HF を交感神経の活動指標として取り扱っている．

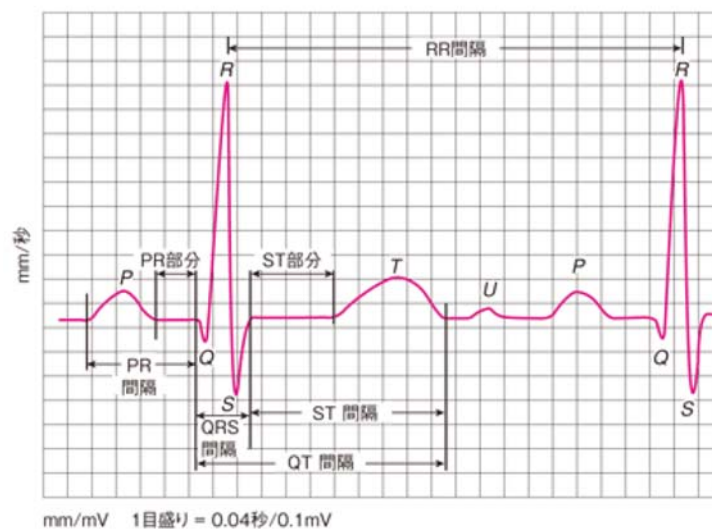


図 2.6 ECG の波形

2.5.3 呼吸

自律神経活動には，呼吸の速度，深さ，不安定性が反映されている [51]．特に，交感神経が活性時には呼吸が速く規則的であり，副交感神経が活性時では，呼吸数が少なくなる．呼吸の計測方法は，マスクかマウスピースをつけて呼吸流量を計測する．しかし，いずれの装着も被験者に対し，不快感を与える可能性があり，ストレスとなる問題が発生する．

2.5.4 胃電図

胃電図（EGG：Electrogastrgram）は，胃の活動電位測定したものである [52]．本来は，電極を胃壁に装着する方が高精度だが，医療行為に該当するため，現実的ではない．また，腹部表面に電極を装着し，計測することも可能である．EGG は周波数解析により，SW（Slow Wave），TG（Tachygastria），BG（Bradycastria）の 3 つのスペクトルに分類することができる．特に，動揺病には，TG のスペクトルに影響が生じると言われている．しかし，EGG は，腹筋活動電位の影響を大きく受けるため，体を固定する必要があるため，計測に制約が多く，簡便な方法ではない．

2.5.5 皮膚電気活動

精神性発汗を電氣的に計測する指標を皮膚電気活動（Electrodermal Activity: EDA）である．これは，掌もしくは指に 2 つの電極を装着し，電極間のコンダクタンスを計測する方法（SC: Skin Conductance）もしくは，電極間の電位差を計測する方法がある．この際，電極は図 2.7 の 3 パターンのいずれかに装着する．いずれも交感神経活動の発汗を電氣的に計測する．ストレスを感じる刺激を受けて波形の立ち上がりまで 1-3 秒の遅延があり，反応終了まで 1-3 秒増加する．このときの立ち上がりの大きさは 0.1-1.0 マイクロ秒と言われている [53]．特にスキンコンダクタンスは鋭敏に反応し，瞬間的なストレスの検知として用いられ，慢性的なストレスの検知には不向きである．

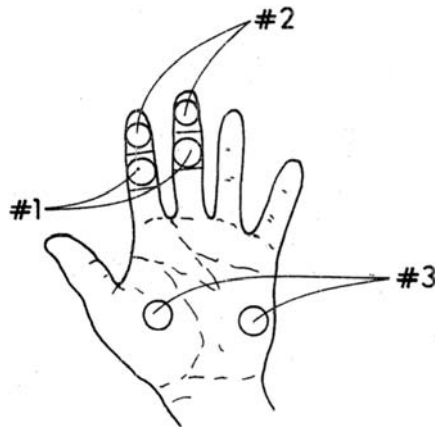


図 2.7 SC 測定時の電極の取り付け位置 [53]

2.6 本研究の位置づけ

これまで、車酔い、VR 酔いそれぞれの研究例はいくつかあるが、車酔い、VR 酔いが併発する動揺病である自動走行酔いの研究例はない。本研究では、車酔いと VR 酔いが併発する環境での動揺病を「自動走行酔い」と定義し、自動走行酔いが搭乗者へ与えるの影響の調査を目的とする。AR は、実環境に対して遅延や位置ずれが起こりやすい特徴がある。これにより、仮説として、車両による加速度刺激が前庭感覚に入力されることで、遅延した視覚と前庭感覚に不整合が生じて自動走行酔いが引き起こされる。また、図 2.8 は、上記で記述した感覚矛盾を前庭感覚と視覚の観点から車酔い、自動走行酔い、VR 酔いでまとめたものである。図 2.8 より、感覚矛盾の観点から各動揺病の重症度は、車酔い、自動走行酔い、VR 酔いの順に小さいと考えられる。

これらを検証するため、まず、走行中の前庭刺激に対して、遅延した視覚情報を入力することで自動走行酔いになるか検証実験を行う。次に、自動走行酔いが搭乗者へ与える影響を調査するため、車酔い、自動走行酔い、VR 酔いの比較実験を行う。本研究では、動揺病を主観的に評価する指標として、動揺病の因子を吐き気 (Nausea)、眼球運動 (Oculomotor)、平衡感覚 (Disorientation) の観点から評価できる SSQ を使用する。また、客観的評価では、搭乗者に負担を与えず、慢性的なストレスを計測するため、唾液アミラーゼと心拍センサを使用する。

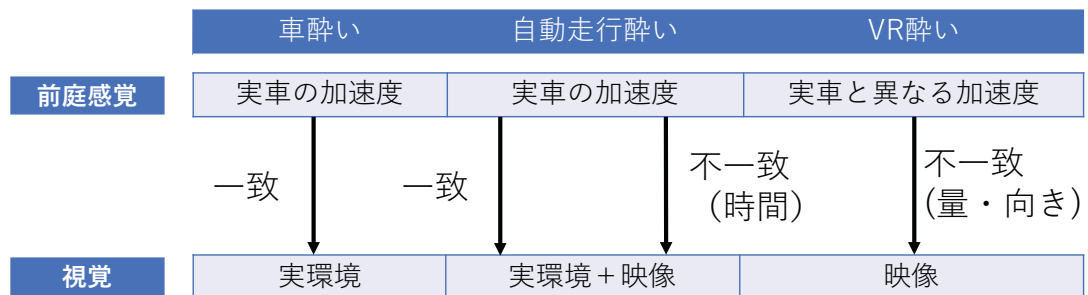


図 2.8 各動揺病の感覚矛盾

第 3 章 自動走行酔いの検証実験

本実験では，前庭感覚に対して，遅延した視覚情報が入力された時に生じる感覚矛盾が自動走行酔いを引き起こす原因になりうるかを検証する．図 3.1 に自動走行酔いの検証を行うための実験パターンを示す．前庭感覚に対して，遅延した視覚情報を提供する方法として，ビデオシースルーによるカメラ映像を搭乗者が視聴しながら走行する（以下，ビデオシースルー走行）．これに対し，実環境を見ながら走行する環境（通常走行）と比較し，自動走行酔いの検証を行う．

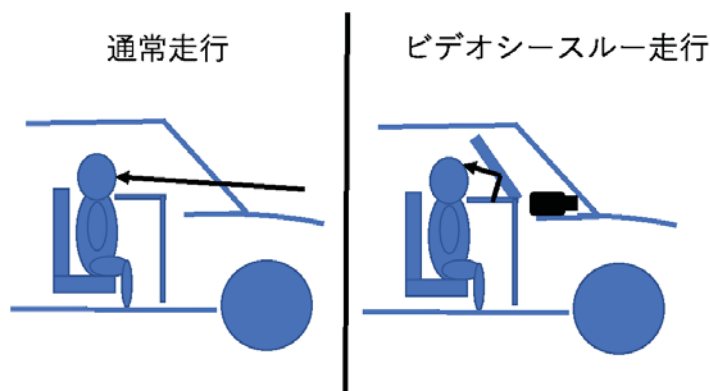


図 3.1 実験パターン

3.1 実験設備

ビデオシースルーは，実環境を直接見ることができないが，カメラを通じて実環境をディスプレイに出力させ，視聴する．これにより，実環境をカメラで捉えて，ディスプレイに表示するまでのタイムラグが発生するため，実環境に対し，遅延した視覚情報の提示が可能となる．

図 3.2 に実験で使用するディスプレイを示す．実験で使用するディスプレイは，一般的に使用される液晶ディスプレイから発生する光をハーフミラーで反射させ，搭乗者に提示させる．ビデオシースルーのディスプレイは，このハーフミラーの可視光の透過率を 0% にすることで外部の光を完全に遮断し，カメラ映像のみを視

界に入れることができる。本ディスプレイは搭乗者から虚像までの距離は約 60cm で、視野角は水平約 46 度、垂直約 27 度である。

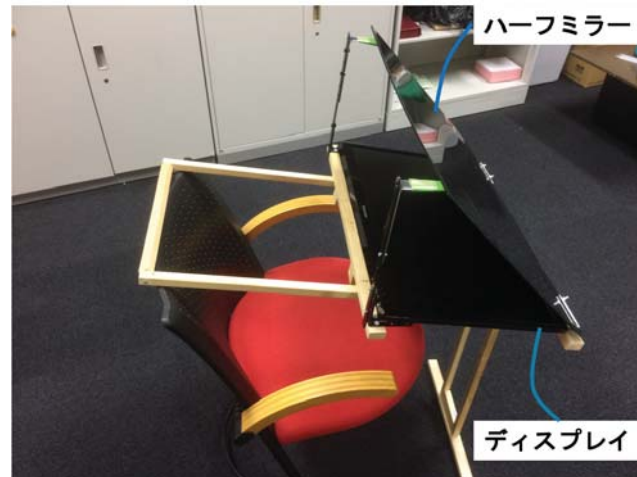


図 3.2 自動走行酔いの検証実験で使用するディスプレイ

3.2 実験環境

図 3.3, 図 3.4 に車内の環境図および実験風景を示す。本実験では、自動走行環境として、車の助手席に搭乗させて走行実験を行う。被験者は、インフォームド・コンセントとして、実験中に動揺病になる可能性を十分に説明し、同意を得た 20 代の男性 7 名を対象とする。運転手は日常的に運転している男性 1 人に協力を要請した。図 3.5 に実験経路を示す。実験経路は、短時間かつ効率的に動揺病になりやすい環境として、信号の待ち時間や直線経路による動揺病の回復要因を減らすため、図 3.5 の奈良先端科学技術大学院大学付近の入りくんだ道を 2 往復で 1 実験あたり約 15 分の経路を選択する。実験は、図 3.1 に示したとおり、走行経路を通常走行、ビデオシースルー走行する場合の 2 パターンの 1 サイクルで行う。また、実験条件を揃えるために、通常走行の場合でも、ディスプレイは被験者の正面に設置し、ハーフミラーの透過率を上げることで、外部環境を視認できるようにする。実験手順は、被験者のストレスを定常状態にするために車が停車した状態で 5 分間安静にし、約 15 分間走行実験を行い、再び 5 分間停車した状態で安静状態にする。本実

験では、視覚的遅延がある状態で走行した場合に動揺病を引き起こすか確認するため、カメラ映像の遅延は約 1 秒に設定する。また、カメラ、ディスプレイの解像度は 1920×1080 、フレームレートは 30fps でディスプレイに投影する。

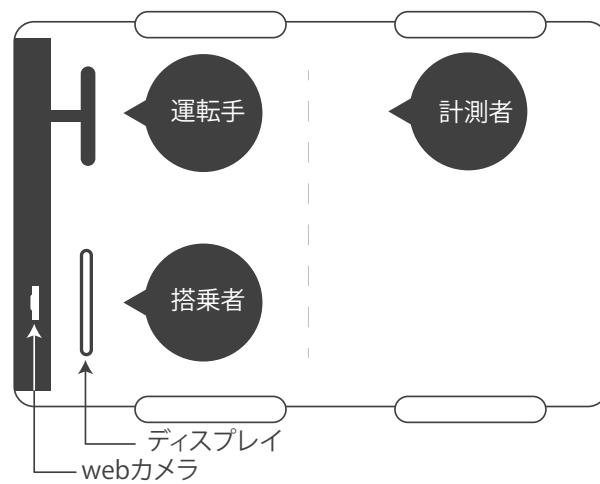


図 3.3 車内環境

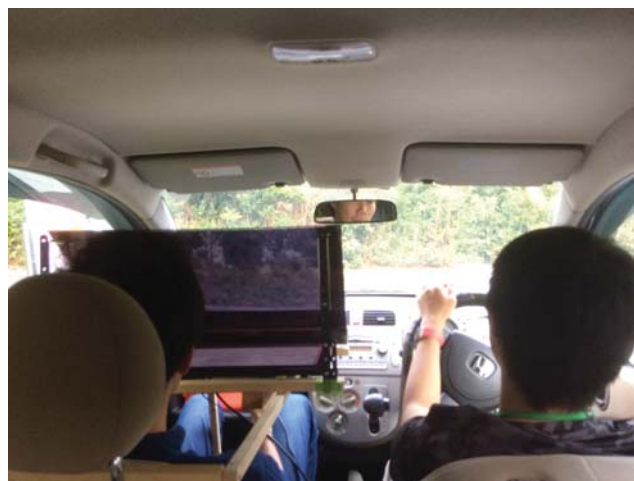


図 3.4 実験風景

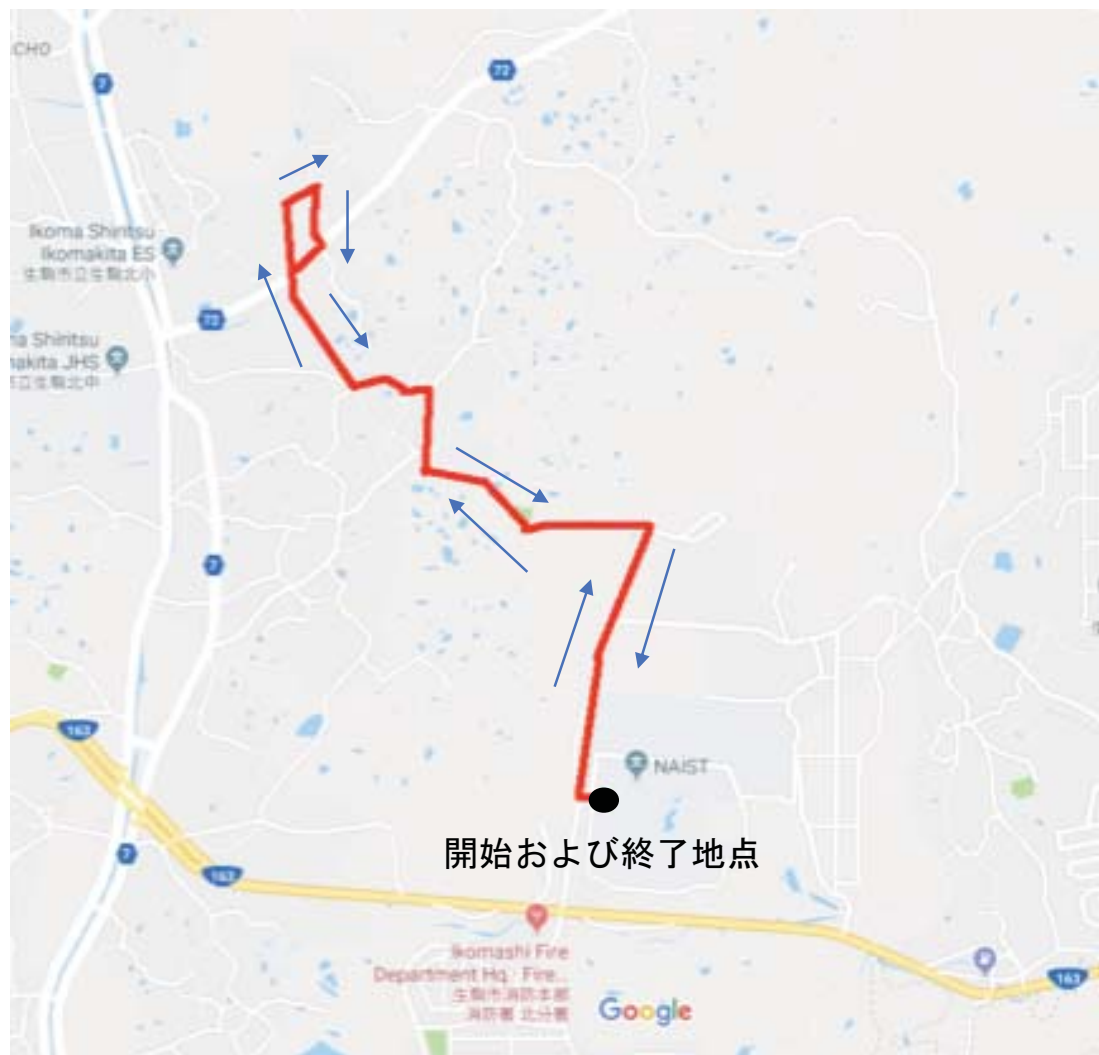


図 3.5 走行経路

3.3 動揺病の評価方法

動揺病の評価方法は、2.6 節で記述したとおり、SSQ・唾液アミラーゼ・LF/HF から評価する。

3.3.1 SSQ

SSQ は，走行終了後に 16 項目のアンケートを被験者に回答してもらう．

3.3.2 唾液アミラーゼ

唾液アミラーゼは，実験開始時を含め 5 分間隔で計測し，実験終了 5 分後まで計測を行う．唾液アミラーゼの評価式を式 3.3.1 に示す．実験開始前に被験者には安静してもらう時間を設けている．そのため，精神負荷がかかっている正常状態を実験開始時のアミラーゼ活性値 S_0 として設定し，実験中および実験終了 5 分後の最大値 S_{MAX} と実験開始時のアミラーゼ活性値で差分を取り， S_0 で割って正規化した値 S を各実験で比較を行った．

$$S = \frac{S_{MAX} - S_0}{S_0} \quad (3.3.1)$$

3.3.3 LF/HF

LF/HF は，搭乗者に心拍センサによって走行中にリアルタイムで計測する．その時の LF/HF の値を正規化し，実験開始から 30 秒間と実験終了 30 秒間のそれぞれの平均値の差を比較する．

3.4 実験結果

3.4.1 SSQ

図 3.6 は，通常走行，ビデオシースルー走行の実験で被験者から回答してもらった SSQ を Nausea, Oculomotor, Disorientation, Total Score の 4 つに分類して集計した結果である．図 3.6 では t 検定で有意確率 $p < 0.05$ であれば有意差有りと判定し，グラフに*の記号を記している．また， $0.05 < p < 0.1$ であれば有意傾向有りと判定し，†の記号を記している．表 3.1 に Nausea, Oculomotor, Disorientation,

Total Score の各項目における t 検定の結果を示す。Nausea において、通常走行とビデオシースルー走行で t 検定を行った結果、有意傾向は出たものの、有意差を得られなかった。また、Oculomotor, Disorientation, Total Score はそれぞれ有意差を得た。

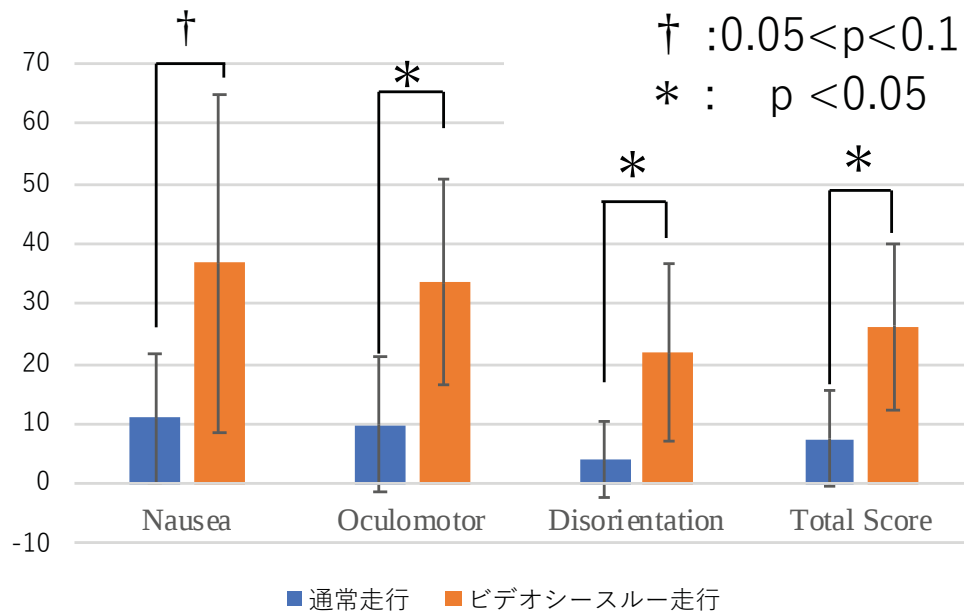


図 3.6 SSQ の集計グラフ

表 3.1 SSQ の t 検定結果

	Nausea	Oculomotor	Disorientation	Total Score
p 値	0.058	0.024	0.021	0.018

3.4.2 唾液アミラーゼ

図 3.7 に 7 名の被験者の平均値と標準偏差を示す。また、各実験間において t 検定を行った。結果から平均値においては、ビデオシースルー走行の方が通常走行よ

り唾液アミラーゼ活性値が高かったものの、個人間で分散が大きい。そのため、t 検定を行った結果、 $p=0.249$ であり、有意差を得られなかった。

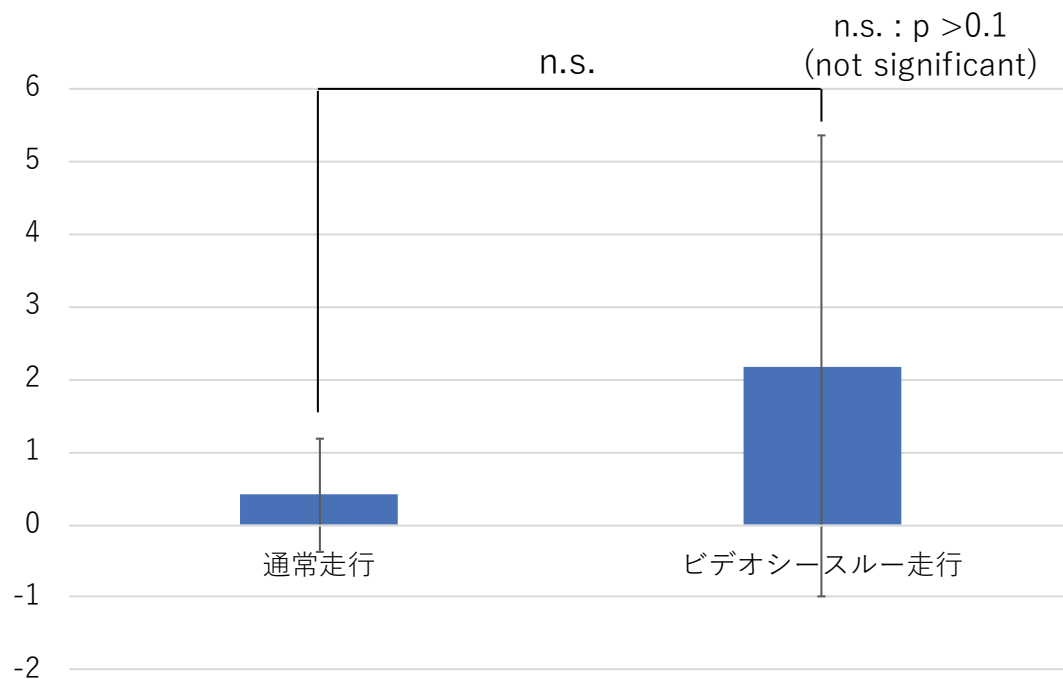


図 3.7 唾液アミラーゼ活性値の集計グラフ

3.4.3 LF/HF による評価

図 3.8 に 7 名の被験者の結果を示す。その結果、平均値では、ビデオシースルー走行より通常走行の方が僅かに高い結果となった。また、分散が大きく、t 検定で $p=0.456$ となり、有意差は得られなかった。

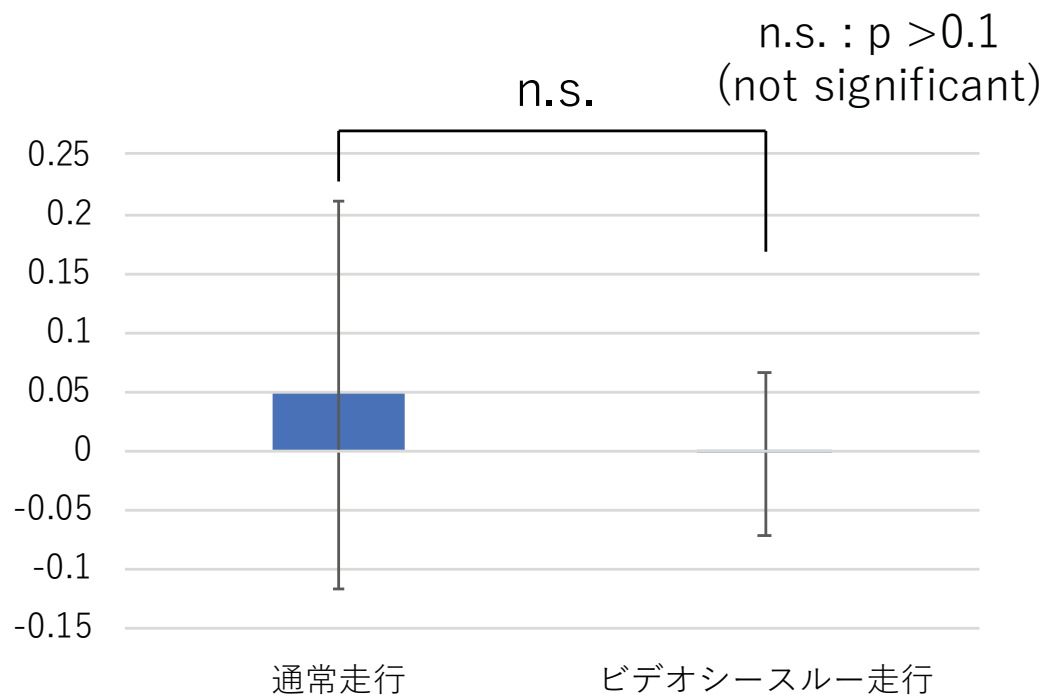


図 3.8 LF/HF のグラフ

3.5 考察

通常走行とビデオシースルー走行と動揺病の症状の比較を行った結果、SSQ からビデオシースルー走行の方が深刻な動揺病であることが確認できる。その理由として、仮説どおり、ビデオシースルー走行では、前庭感覚に対して遅延した視覚情報が入力された時に生じる感覚矛盾が VR 酔いを引き起こしたためであると考えられる。また、SSQ の Disorientation の p 値が最も低い。その理由として、ビデオシースルー走行では、前庭感覚と視覚の運動感覚のずれが平衡感覚に影響したためであると考えられる。さらに、被験者からのコメントでも「加速に対して映像が遅延しているため、違和感を感じた」など、複数の証言があったことから視覚的遅延が動揺病の大きな要因であると裏付けられる。

しかし、主観的評価方法では各実験において有意差を得られたが、客観的評価方

法では、有意差を得られなかった。これについてそれぞれ考察していく。まず、唾液アミラーゼについては、気分が良くないと証言した被験者であっても唾液アミラーゼの活性が現れていない場合が見られた。このことから、動揺病の状態でも唾液アミラーゼの活性が起こる被験者と起こらない被験者に分かれ、個人によって体質が異なるものであると考えられる。そのため、本実験では、被験者数が少なかったことから個人差の影響が結果に大きく反映されたと考える。次に、LF/HF に関しては、予想と逆の結果が出ているが、通常走行とビデオシースルー走行にほとんど差はないことがわかる。このことから、LF/HF は、交感神経系の活動指標であるため、通常走行とビデオシースルー走行で交感神経の活性度は、ほぼ同等であると考えられる。LF/HF では、自律神経系の交感神経系の活動しか確認できないため、副交感神経の活動指標である HF からの評価も必要であると考えられる。

これらを踏まえて、通常走行時の動揺病よりもビデオシースルー時の動揺病の方が症状が深刻である。このことから前庭感覚の運動感覚に対して、AR による遅延した視覚情報が自動走行酔いになることが明らかになった。

第 4 章 自動走行酔いの評価実験

本実験では，自動走行酔いが搭乗者に与える影響を調査するため，自動走行酔いの評価実験を行う．図 4.1 に自動走行酔いの評価を行うための比較実験の実験パターンを示す．その方法として，車酔い環境，自動走行酔い環境，VR 酔い環境での動揺病の症状の比較を行う．



図 4.1 実験パターン

4.1 実験設備

4.1.1 車酔いの環境

車酔い環境は，3 章の通常走行と同様に従来の車内環境を想定しており，映像の出力は行わず，実環境を見ながら走行する．

4.1.2 自動走行酔いの環境

自動走行酔い環境は，HUD の特徴である光学シースルーによる AR 映像を視聴できる環境で実験を行う．図 4.2 に HUD に出力する AR 映像の概要を示す．AR 映像に関しては，搭乗者視点の背景に対して，位置合わせしたカメラ映像を用いる．これにより，カメラ映像は実環境に対して遅延が発生することから背景に追従するような映像を表示することができ，AR の特徴である遅延や位置ずれを表現する．

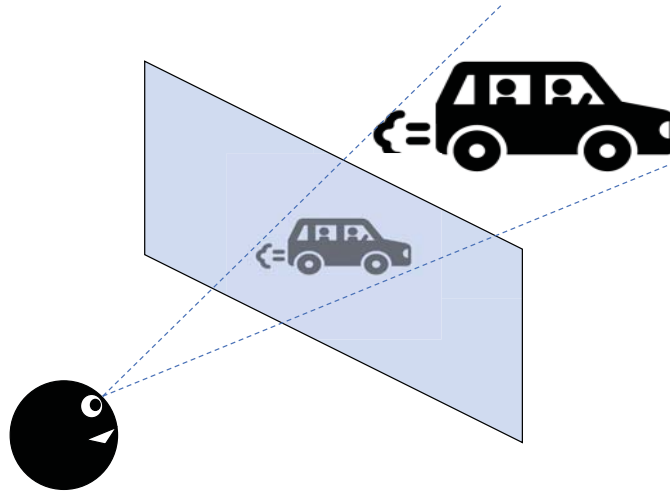


図 4.2 HUD の映像内容：実環境に位置合わせしたカメラ映像

HUD の性能は画面サイズ，輝度，画質，ユニットのサイズの観点から評価される．また，AR による情報提示を十分に行うためには人間の有効視野に相当する水平 30 度，垂直 20 度程度が望ましいとされている [54]．さらに，焦点の調節時間が最小となるように搭乗者と虚像との距離を 2.5m 以上離している．

そのため，本実験で用いる HUD は以下の性能を目標に製作する．

- 搭乗者と虚像の距離が 2.5m 以上
- 視野角が水平 30 度，垂直 20 度程度
- 日中でも搭乗者が視認できる輝度

図 4.3 に本実験で使用する HUD の概要図を示す．本 HUD は，搭乗者の頭部付近に取り付けられているプロジェクタから照射された光が，ハーフミラーによって反射し，ハーフミラー上部に取り付けた再帰性反射材によって，再帰性反射された光が再びハーフミラーによって反射し，プロジェクタ付近に光が返ってくる仕組みである．理論上は，再帰性反射材が正確に再帰性反射する場合，光はプロジェクタの発光位置に一点に戻ってくる．しかし，本実験で使用する再帰性反射材は，反射光がある程度拡散する．そのため，プロジェクタ付近に搭乗者の頭部があるため，

反射されたプロジェクタの光を搭乗者の眼に投影される．図 4.4 に試作した HUD の外観を示す．視野角に関しては，プロジェクタの性能に依存しており，プロジェクタから虚像までの距離が約 160cm，画面サイズが約 50×35cm，搭乗者からプロジェクタまでの距離が約 20cm であるため，視野角は約 16×11 度，搭乗者から虚像までの距離が約 180cm である．また，ハーフミラーは，アクリル板に市販のカーフィルムを貼っており，外部から入ってくる可視光はある程度軽減されるため，日中でもプロジェクタの映像の視認が可能となる．

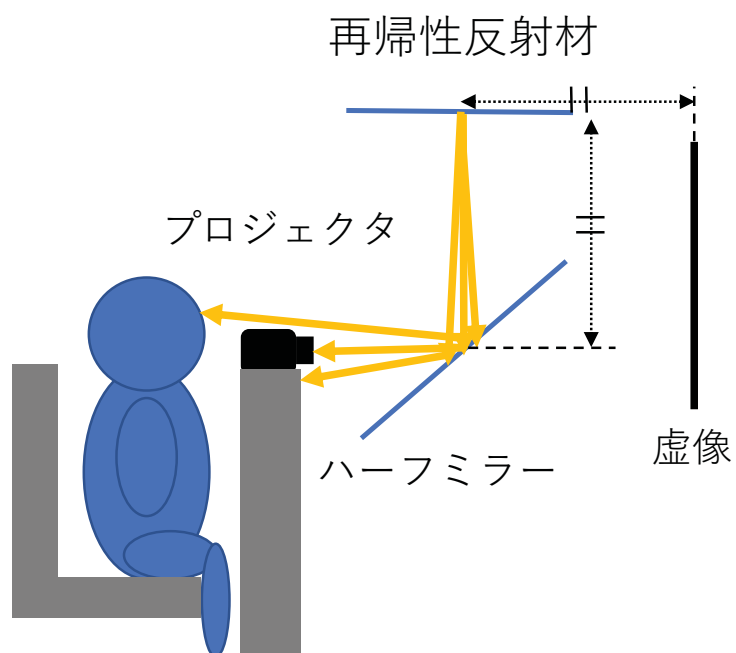


図 4.3 自動走行酔いの評価実験の HUD の概要図

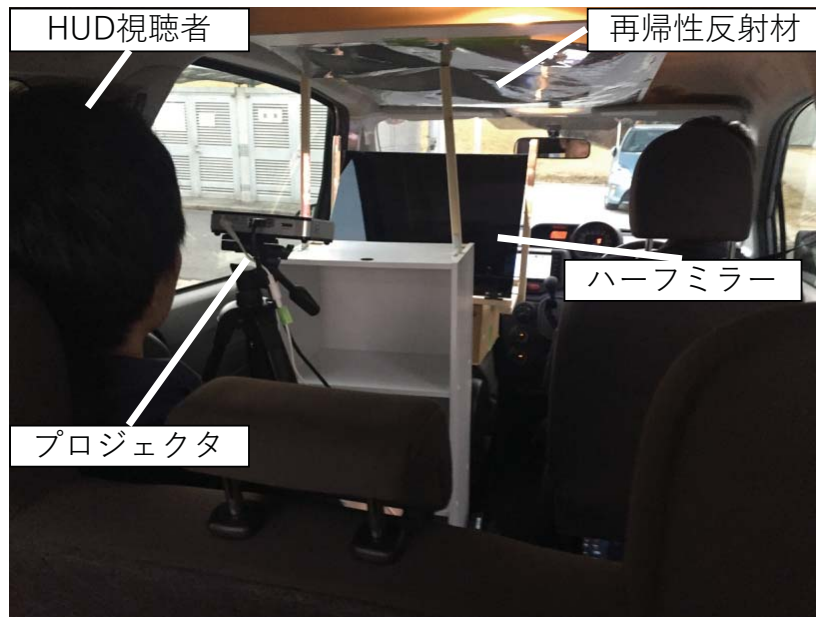


図 4.4 HUD の外観

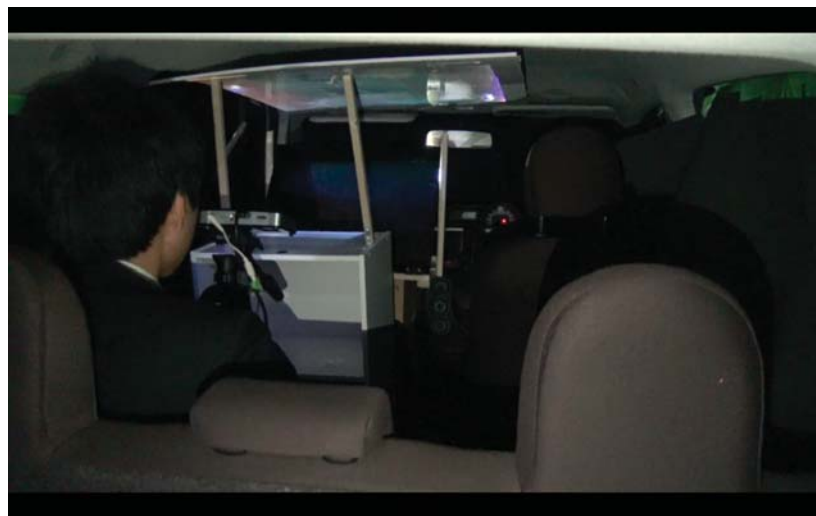


図 4.5 VR 酔い環境の車内風景

4.1.3 VR 酔いの環境

VR 酔い環境の車内風景を図 4.5 に示す。VR 酔い環境は、視覚と前庭感覚の運動感覚が全く一致しない環境を用意する。そのため、実験は走行を行わず、被験者は走行動画を視聴する。しかし、姿勢が安定している場合、VR 酔いになりにくいいため、揺れた車内環境で被験者は、走行動画を視聴する。揺れた車内環境を表現するために車外から手で車体を揺らしている。また、没入感を向上させるため、車外の環境を見えないようにするため、車体の窓を暗幕で覆っている。

4.2 実験環境

図 4.6 に車内の環境図を示す。本実験では、搭乗者と AR 映像との距離を離すために、車の後部座席に搭乗させて走行実験を行う。助手席を折りたたむことで、助手席の真後ろの後部座席から、ハーフミラー越しで、視界が開けた状態にしている。被験者は、インフォームド・コンセントとして、実験中に動揺病のになる可能性を十分に説明し、同意を得た 20 代の男性 9 名を対象とする。運転手は運転経験が豊富である男性 2 名に交代で協力を要請した。実験経路に関しては、3 章で走行した経路と同様に図 3.5 の経路を使用した。実験は、図 3.5 の走行経路を車酔い環境、自動走行酔い環境、VR 酔い環境の 3 パターンの 1 サイクルで行う。また、被験者には、映像の注視時間を均一化するため、自動走行酔い環境、VR 酔い環境では、映像を意識して視聴するように指示している。さらに、実験条件を揃えるために、通常走行の場合でも、HUD を被験者の正面に設置し、ハーフミラーの透過率をそのまま、外部環境が見える状態で走行する。実験手順は、3 章と同様に被験者のストレスを定常状態にするために車が停車した状態で 5 分間安静にし、約 15 分間の走行実験を行い、再び 5 分間の停車した状態で安静状態にする。本実験でのカメラからプロジェクタに出力するまでのシステムの遅延時間は約 0.2 秒である。また、カメラ、ディスプレイの解像度は 1280×720、フレームレートは 30fps でディスプレイに投影する。

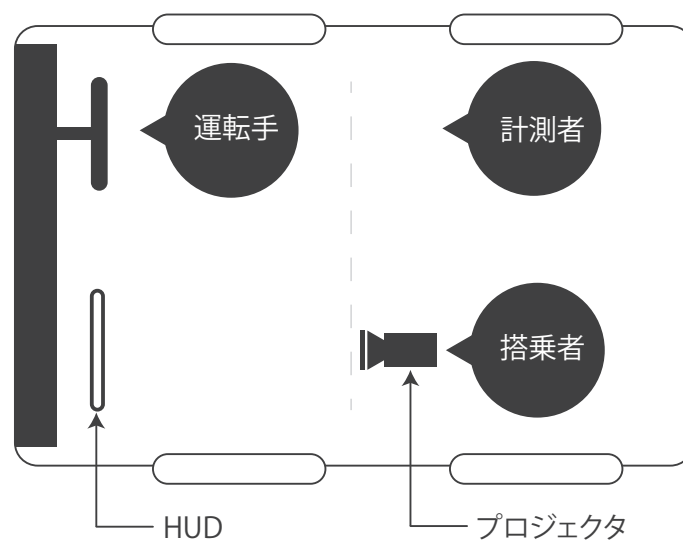


図 4.6 車内環境

4.3 動揺病の評価方法

動揺病の評価方法は、3 章同様の手法である SSQ, 唾液アミラーゼ活性, LF/HF を用いる。また、心拍変動に関しては、交感神経系の指標である LF/HF だけでなく、副交感神経系の指標である HF による評価を用いる。HF は、走行開始時と走行終了時の比較を行うため、走行開始時間から 30 秒間と走行終了前 30 秒間で比を取り、その値を評価値とする。

4.4 実験結果

4.4.1 SSQ による評価

図 4.7 は、車酔い環境、自動走行酔い環境、VR 良い環境のそれぞれの実験で被験者から回答してもらった SSQ のアンケート項目を Nausea, Oculomotor, Disorientation, Total Score の 4 つに分類して集計した結果である。図 4.7 では t 検定で有意確率が $p < 0.05$ であれば有意差有りと判定し、*の記号を記している。表 4.1 に車酔い環境と自動走行酔い環境の Nausea, Oculomotor, Disorientation,

Total Score の各項目における t 検定の結果を示す。車酔い環境と自動走行酔い環境で t 検定を行った結果、全ての項目において有意差を得られた。また、表 4.2 に自動走行酔い環境と VR 酔い環境の Nausea, Oculomotor, Disorientation, Total Score の各項目における t 検定の結果を示す。自動走行酔い環境と VR 酔い環境での t 検定では、全ての項目において有意差は得られなかった。

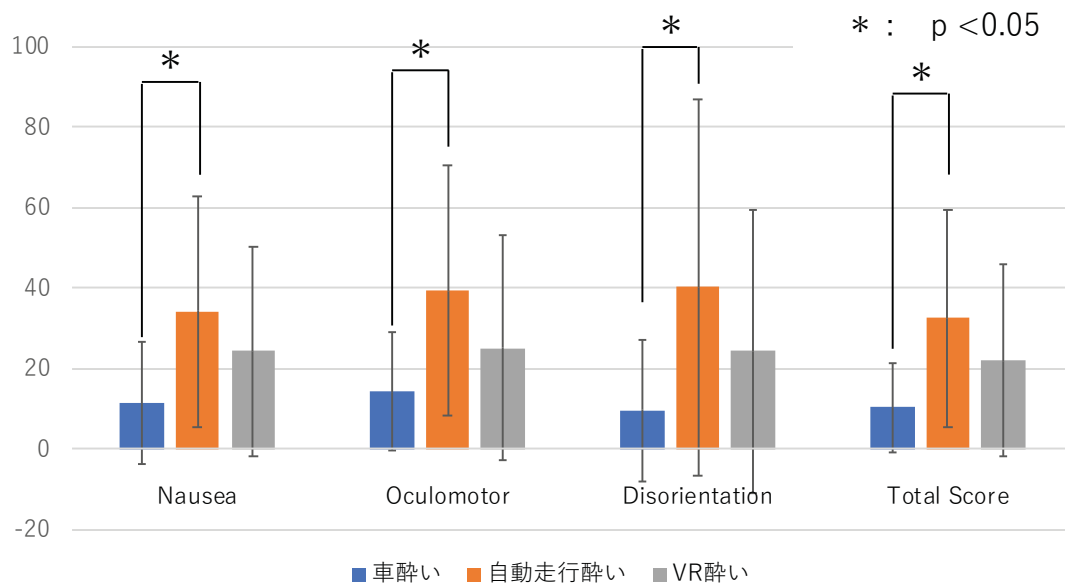


図 4.7 SSQ の集計グラフ

表 4.1 SSQ の t 検定結果 車酔い-自動走行酔い

	Nausea	Oculomotor	Disorientation	Total Score
p 値	0.047	0.007	0.026	0.018

表 4.2 SSQ の t 検定結果 自動走行酔い-VR 酔い

	Nausea	Oculomotor	Disorientation	Total Score
p 値	0.287	0.134	0.111	0.073

4.4.2 唾液アミラーゼによる評価

図 4.8 に被験者の唾液アミラーゼ活性値の平均値と標準偏差を示す．また，表 4.3 に各実験間において t 検定の結果を示す．結果から平均値においては，VR 酔い環境，自動走行酔い環境，車酔い環境の順に高いことがわかる．しかし，分散が大きいことから各実験間において t 検定を行った結果，有意差を得られなかった．

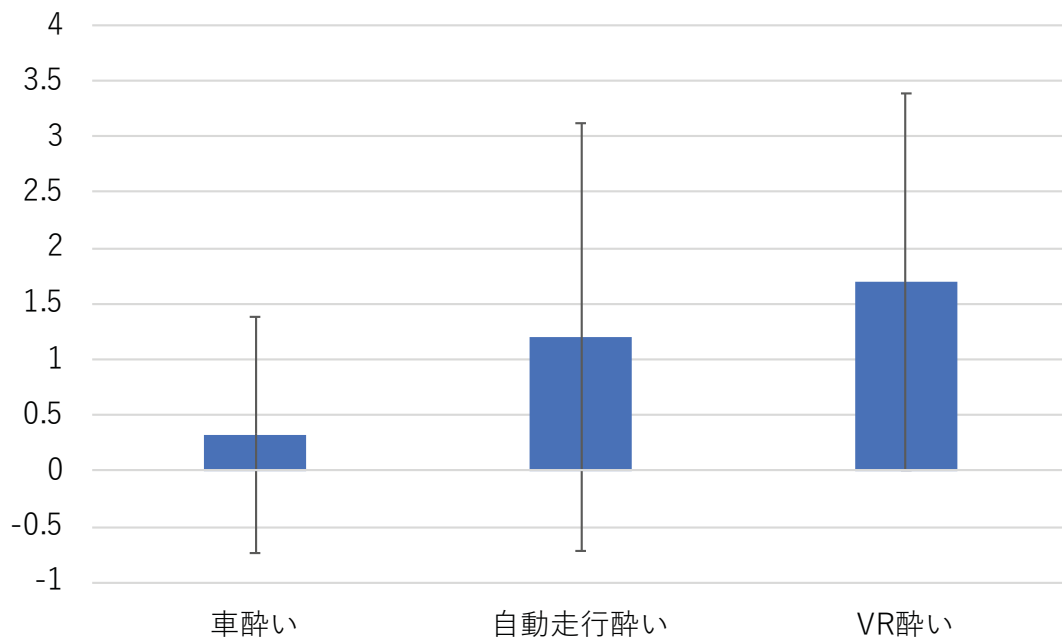


図 4.8 唾液アミラーゼ活性値の集計グラフ

表 4.3 唾液アミラーゼ活性値の t 検定結果

	車酔い-自動走行酔い	自動走行酔い-車酔い
p 値	0.326	0.680

4.4.3 LF/HF, HF による評価

まず、図 4.9, に LF/HF の結果を示す. この結果から, LF/HF では, 平均値において, 車酔い環境, 自動走行酔い環境, VR 酔い環境でほとんど変わらないことがわかった. また, 表 4.4 に, LF/HF の t 検定の結果を示す. 各実験間において有意差は得られなかった.

次に, 図 4.10 に HF の結果を示す. この結果から, 平均値において, SSQ と同様に自動走行酔い環境, VR 酔い環境, 車酔い環境の順で評価値が高い結果となった. また, 表 4.5 に, HF の t 検定の結果を示す. その結果, 車酔い環境と自動走行酔い環境では有意差が得られ, 自動走行酔い環境と VR 酔い環境では有意差が得られなかった.

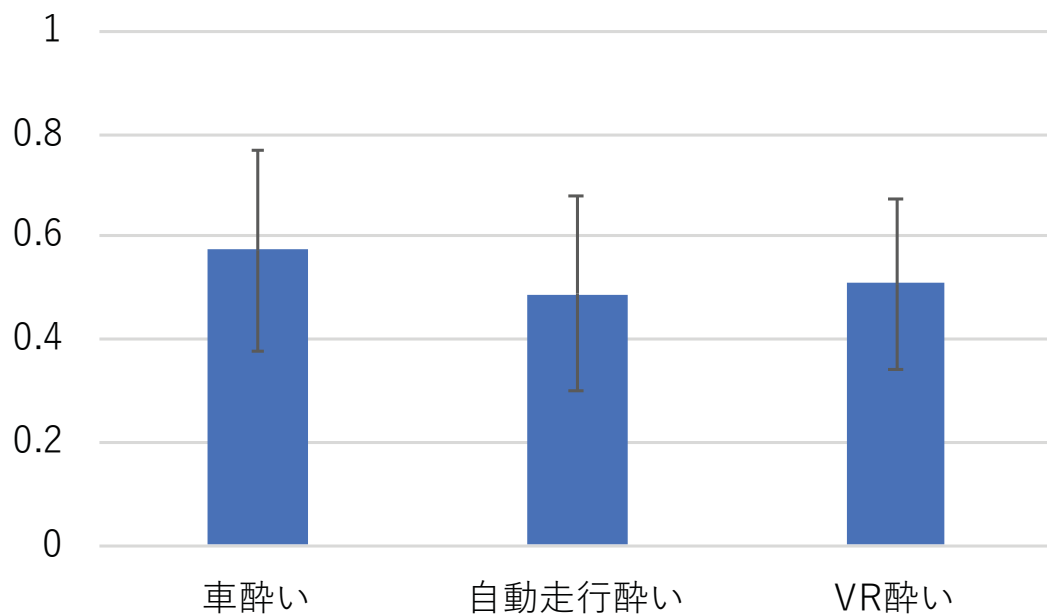


図 4.9 LF/HF の集計グラフ

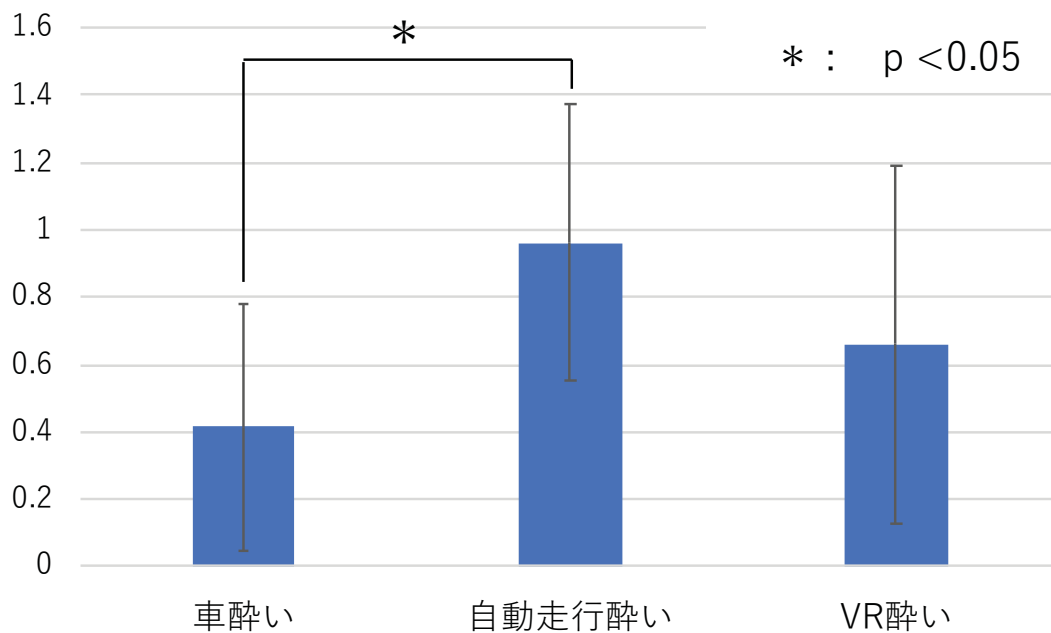


図 4.10 HF の集計グラフ

表 4.4 LF/HF の t 検定結果

	車酔い-自動走行酔い	自動走行酔い-車酔い
p 値	0.257	0.821

表 4.5 HF の t 検定結果

	車酔い-自動走行酔い	自動走行酔い-車酔い
p 値	0.024	0.185

4.5 考察

車酔い環境，自動走行酔い環境，VR 酔い環境の各実験間で動揺病の症状の比較を行った結果，SSQ と HF から車酔い環境より自動走行酔い環境の方が強い動揺病になりやすいことがわかった．特に，将来的には HUD は，本実験で使用した HUD

よりも高画角の映像表示が可能となるため、より顕著に動揺病に差が現れると考えられる。しかし、自動走行酔いと VR 酔いでは、有意差が得られない結果となった。自動走行酔いと VR 酔いで有意差が出なかった理由として、主に 3 つ挙げられる。1 つ目が、HUD の画角が理想的な HUD に対して、不足している問題がある。そのため、VR 酔い環境では、没入感が不足し、VR 酔いになりにくかったと考える。2 つ目が、VR 酔い環境の揺れの問題がある。VR 酔い環境での揺れは、車外から車体を手で周期的に押しているため、被験者は、一定周期かつ横方向の揺れの中で映像を視聴する。それによる揺れに対する慣れが生じたため、被験者は VR 酔いになりにくかったと考える。そのため、実験環境として、縦揺れも含みつつ、不規則な揺れでの実験を行う必要がある。3 つ目が、個人差による影響である。本実験では、9 名の被験者で動揺病の評価を行ったが、そのうちの半分程度が自動走行酔い環境と VR 酔い環境で全く動揺病が現れない結果になった。そのため、動揺病になりやすい被験者を集める必要がある。さらに、視覚刺激に弱い被験者と前庭感覚に弱い被験者に分類した上で自動走行酔い環境と VR 酔い環境を比較することで、有意差が出やすくなると考える。

また、本実験では、車酔い環境、自動走行酔い環境、VR 酔い環境の各環境間で比較を行った。しかし、自動走行酔い環境内の画角・映像コンテンツ・注視時間などのパラメータは一定にしてあるため、これらのパラメータを変更した上で自動走行酔いの症状の比較を行う必要がある。

第 5 章 おわりに

本研究では、自動走行時に実環境に応じた映像 (AR) を視聴することで車酔いと VR 酔いが併発する環境での動揺病を「自動走行酔い」と定義した。そこで、自動走行酔いの原因が、AR 映像の情報提示による視覚情報の遅延によるものだと仮説を立て検証を行った。そのため、まず、カメラ映像をディスプレイに出力してビデオスルーを行い、前庭感覚に対して視覚情報の運動感覚の遅延で動揺病が起きるかを被験者 7 名に対して、実車を用いて走行実験を行った。その結果、SSQ において、Oculomotor, Disorientation と、Total Score で有意差を示し、Nausea に関しても有意傾向を示したことから、視覚情報の遅延が自動走行酔いを引き起こすことが確認できた。次に、自動走行酔いが搭乗者に与える影響を調査するため、被験者 9 名に対して車酔い環境、自動走行酔い環境、VR 酔い環境にてそれぞれの動揺病の比較を行った。その結果、SSQ によるアンケートから Nausea, Oculomotor, Disorientation と、Total Score のそれぞれと副交感神経系の活動指標である HF で自動走行酔い環境と VR 酔い環境においては、有意差は得られなかった。しかし、車酔い環境よりも自動走行酔い環境の方が重度の動揺病になりやすいことがわかった。

今後の展望として、自動走行酔い環境と VR 酔い環境で、条件を変えてより詳しく比較していく。また、自動走行酔い環境の画角や映像内容などの各パラメータの条件を変えて調査することで、自動走行酔いの傾向を明らかにし、自動走行酔いの軽減方法を提案する。

謝辞

本研究の全過程を通じて懇切な御指導，御鞭撻を賜りました，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科環境知能学研究室萩田紀博教授に深く感謝の意を表します．副指導教員である奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科ロボティクス研究室の小笠原司教授には中間報告において研究に関する鋭い御指摘，御助言を賜りました．ここに感謝の意を表します．本研究の全過程を通じ，また研究に関してのみならず，学生生活においても多くの御指導，御助言を頂きました，副指導教員である奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科環境知能学研究室神原誠之准教授に心より感謝致します．2016 年度まで奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科環境知能学研究室に所属しており，現在，豊田工業大学知能情報メディア研究室に所属している浮田宗伯教授には，研究に関してのみならず，研究室特論や授業でもご指導，ご鞭撻を賜り，心より感謝いたします．研究に際して直接の御支援，御助言を頂きました，環境知能学研究室博士後期課程の澤邊太志さん，西村祥吾さんに深く感謝いたします．環境知能学研究室同期の阪口栄穂君，鈴木裕貴君，向井田一平君には，研究のみならず充実した学生生活を送れたことに感謝の意を表します．また，研究に際してご助言，実験の支援をして頂きました，坂田大直君，坂本大生君，櫻井皓平君，津崎圭佑君，中村卓也君，松本慎太郎君に感謝の意を表します．環境知能学研究室秘書の南あずささんに深く感謝致します．

参考文献

- [1] 内閣府, ” 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 自動走行システム研究開発計画”, 2017.
- [2] NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration, "Updated: Autonomous Driving Levels 0 to 5: Understanding the Differences", 2016.
- [3] M. Elbanhawi, M. Simic, and R. Jazar, "In the Passenger Seat: Investigating Ride Comfort Measures in Autonomous," Intelligent Transportation Systems Magazine, Vol.7, No.3, pp.4-17, 2015.
- [4] 太田翔平, 神原誠之, 浮田宗伯, 北原格, 亀田能成, 大田友一, 池田徹志, Yoichi Morales, 篠沢一彦, 萩田紀博, "自動走行ストレス ~生理指標を用いた自動走行車両の搭乗者のストレスに関する検討 ~", 電子情報通信学会信学技報, Vol.114, No.369, pp.1-6, 2014.
- [5] 嶋田淳, 河原健太, 城戸恵美子, 朴信映, 吉武良治, ” 自動運転車両における運転者の不安感評価”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.19, No.4, pp.333-342, 2017.
- [6] 橋本稜平, 野村亮太, 神原誠之, 浮田宗伯, 池田徹志, Yoichi Morales, 篠沢一彦, 萩田紀博, ” 生理指標に基づいた車椅子ロボットの挙動情報共有による搭乗者の快適性向上検証”, 電子情報通信学会技術研究報告 (CNR2014-14), Vol.114, No.227, pp.27-32, 2014.
- [7] M. Sivak, and B. Schoettle, "Motion Sickness in Self-Driving Vehicles", The University of Michigan Transportation Research Institute, Technical Report, 2015.
- [8] N. Karlsson, and H. Tjrnbro, "Motion Sickness in car Physiological and Psychological Influences on Motion Sickness", Department of Product and Production Development Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden, 2012.
- [9] T. Wada, H. Konno, S. Fujisawa and S. Doi, "Can Passenger' s Active Head Tilt Decrease The Severity of Carsickness? - Effect of Head Tilt on Severity of Motion Sickness in a Lateral Acceleration Environment - ", Accepted in

- Human Factors, Vol.54, No.2, pp.71-78, 2012.
- [10] T. Sawabe, M. Kanbara, and N. Hagita, "Diminished Reality for Acceleration - Motion Sickness Reduction with Vection for Autonomous Driving -", International Symposium on Mixed and Augmented Reality(ISMAR) Adjunct Proceedings, pp.297-299, 2016.
 - [11] H. Nicolaus, and R. Hutchins, "自動車の HUD にプラスチックマイクロオプティクス", Laser Focus World Jpn, pp.42-44, 2015, July.
 - [12] 日本バーチャルリアリティ学会, "バーチャルリアリティ学", コロナ社, 2010.
 - [13] 藤井 聡, "安全と安心の心理学", 日本建築学会総合論文誌, Vol.7, pp.29-32, 2009.
 - [14] L. Bainbridge, "Ironies of automation", Automatica, Vol.19, No.6, pp.775-779, 1983.
 - [15] 萩原康平, 浮田宗伯, 神原誠之, 萩田紀博, "自動運転車両の搭乗者のための車載映像を用いたストレス要因推定", 信学技報, IEICE-ITS2016-88, Vol.116, No.502, pp.69-74, 2017.
 - [16] 太田翔平, 神原誠之, 浮田宗伯, 北原格, 亀田能成, 大田友一, 池田徹志, Yoichi Morales, 篠沢一彦, 萩田紀博, "生理指標を用いた自動走行車両の搭乗者のストレスに関する検討", 日本交通心理学会第 80 回大会, pp.54-57, 2015.
 - [17] S. Gulati, and B. Kuipers, "High Performance Control for Graceful Motion of an Intelligent Wheelchair, " International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp.3932-3938, 2008.
 - [18] S. Gulati, C. Jhurani, B. Kuipers, and R. Longoria, "A Framework for Planning Comfortable and Customizable Motion of an Assistive Mobile Robot", International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4253-4260, 2009.
 - [19] Y. Morales, J. Even, N. Kallakuri, T. Ikeda, K. Shinozawa, T. Kondo and N. Hagita, "Visibility Analysis for Autonomous Vehicle Comfortable Navigation", International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp.2197-2202, 2014.
 - [20] Y. Morales, N. Kallakuri, K. Shinozawa, T. Miyashita, and N. Hagita,

- "Human-Comfortable Navigation for an Autonomous Robotic Wheelchair," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013.
- [21] Y. Morales, A. Watanabe, F. Ferreri, J. Even, T. Ikeda, K. Shinozawa, T. Miyashita, and N. Hagita, "Including human factors for planning comfortable paths", International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp.6153-6159, 2015.
- [22] 野村亮太, 橋本稜平, 浮田宗伯, 神原誠之, 池田徹志, Yoichi Morales, 渡辺敦志, 篠沢一彦, 萩田紀博, " 生理指標に基づく搭乗者の快適性を考慮した車椅子ロボットの経路設計", 電子情報通信学会技術研究報告 (PRMU), Vol.114, No.356, pp.123-128, 2014.
- [23] T. Sawabe, M. Kanbara, N. Ukita, T. Ikeda, L. Y. M. Saiki, A. Watanabe, and N. Hagita, "Comfortable Autonomous Navigation Based on Collision Prediction in Blind Occluded Regions", International Conference on Vehicular Electronics and Safety(ICVES), pp.75-80, 2015.
- [24] 笹井翔太, 北原格, 亀田能成, 太田友一, 浮田宗伯, 神原誠之, 池田徹志, Yoichi Morales, 篠沢一彦, 萩田紀博, "自動走行ストレス：拡張現実提示によるストレス軽減の試み", 電子情報通信学会技術研究報 (ITS2014-36), pp.93-98, 2014.
- [25] A. Watanabe, T. Ikeda, Y. Morales, K. Shinozawa, T. Miyashita, and N. Hagita, "Communicating Robotic Navigational Intentions", in Proceedings of The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2015.
- [26] Y. Hatanaka, N. Kanaomori,"Head up Display for Automotive Visibility and Trend", DENSO TECHNICAL REVIEW, Vol.21, 2016.
- [27] 笠澄研一," ヘッドアップディスプレイにおける小型化技術と拡張現実感システム", Panasonic Technical Journal, Vol.61, No.1, 2015.
- [28] K. FUJITA, K. ITO, K. YONEYAMA, T. BABA, M. KAWANA, K. HARADA, and H. OSHIMA, "Development of an Automotive Head-Up Display using a Free-Form Mirror Based Optical System", FUJIFILM RE-

- SEARCH & DEVELOPMENT, No.62, pp.51–55, 2017.
- [29] Pioneer Inc. (2014), Augmented Reality Head-up Display, <<http://continental-head-up-display.com/ar-hud/>>2018年3月9日アクセス.
 - [30] Money KE, "Motion Sickness", *Physiol Rev*, Vol.50, pp.1-39, 1970.
 - [31] Reason JT, "Man in Motion. The Physiology of Travel", Weidenfeld & Nicolson, 1974.
 - [32] Reason JT, Brand JJ, "Motion Sickness", Academic Press, 1975.
 - [33] Reason JT, "Motion Sickness Adaptation: A Neural Mismatch Model", *J Ro Soc Med*, Vol.71, pp.819-829, 1978.
 - [34] 野田哲哉 (2013), 乗り物酔い研究室 (のだ耳鼻咽喉科内) 乗り物酔いについて <<http://www.norimonoyoi.jp/about/>>2018年3月9日アクセス.
 - [35] 井須尚紀, "バーチャルリアリティにおける酔いの発症と軽減", *日本バーチャルリアリティ学会誌*, Vol.22, No.3, pp.11-19, 2017.
 - [36] 松浦康之, 高田宗樹, "立体映像刺激による映像酔いの生体影響", *日本衛生学会誌*, Vol.71, No.1, 2016.
 - [37] Kennedy R. S., Lilienthal M. G., Berbaum K. S., Baltzley D. R., & Mcauley M. E., "Simulator sickness in U.S. Navy flight simulators", *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Vol.60, No.1, pp.10-16, 1989.
 - [38] Harwood K, & Foley P, "Temporal resolution: An insight into the video display terminal (VDT) "Problem"", *Human Factors*, Vol.29, No.4, pp.447-452, 1987.
 - [39] Boff K. R., & Lincoln J. E., "Engineering data compendium: Human perception & performance", AAMRL, Wright-Patterson AFB, OH, pp.166-191, 1988.
 - [40] Farrell J. E., Casson E. J., Haynie C. R., & Benson B. L. " Designing flicker-free video display terminals" , *Displays*, Vol.9, No.7, pp.115-122, 1988.
 - [41] Frank L. H., Casali J. G., & Wierwille W. W., "Effects of visual display and motion system delays on operator performance and uneasiness in a driving simulator", *Human Factors*, Vol.30, No.2, pp.201-217, 1988.

- [42] Uliano K. C., Lambert E. Y., Kennedy R. S., & Sheppard D. J., "The effects of asynchronous visual delays on simulator flight performance and the development of simulator sickness symptomatology", Orlando, FL: Naval Training Systems Center, NAVTRASYSCEN 85-D-0026-1, 1986.
- [43] Pausch R., Crea T., & Conway M. , "A literature survey for virtual environments: Military flight simulator visual systems and simulator sickness", Presence, Vol.1, No.3, pp.344-363, 1992.
- [44] O'hanlon, J. F. and MacCauley, M. E.: Motion Sickness Incidence as a Function of the Frequency and Acceleration of Vertical Sinusoidal Motion., Aerospace Med., Apr., pp.366-369, 1974.
- [45] Graybiel, A., Wood. C. D., Miller, E. F. and Cramer, D. B.: Diagnostic Criteria for Grading the Severity of Acute Motion Sickness., Aerospace Med., May, pp.453-455, 1968.
- [46] Reason, J. T. and Graybiel, A., "Changes in Subjective Estimates of Well-being during the Onset and Remission of Motion Sickness Symptomatology in the Slow Rotation Room", Aerospace Medicine, 41, pp.166-171 455, 1968.
- [47] Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S. and Lilienthal, M.G.: Simulation Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness., Int. J. Aviat. Psychol., Vol.3, No.3, pp.203-220, 1993.
- [48] 山口昌樹, 花輪尚子, 吉田博, "唾液アミラーゼ式交感神経モニタの基礎的性
能", 生体医工学. Vol.45, No.2, 2007.
- [49] 村井康二, 高田和, 矢野吉治, 才木常正, 石倉歩, 林祐司, "船体動揺環境下
における身体重心動揺とストレス評価に関する基礎研究", 神戸大学大学院海事
科学研究科紀要, Vol.7, pp.75-80, 2010.
- [50] 松本佳昭, 森信彰, 三田尻涼, 江鐘偉, "心拍揺らぎによる精神的ストレス評
価法に関する研究", ライフサポート, Vol.22, No.3, pp.19-25, 2010.
- [51] 中川千鶴, "総説・特集 3 人間工学のための計測手法 第4部: 生体電気現象
その他の計測と解析 (5)", 人間工学, Vol.52, No.1, 2016.
- [52] 塩見真由美, 今井賢治, 咲田雅一, "胃電図を指標とした optokinetic motion
sickness に対する鍼刺激の影響について", 全日本鍼灸学会雑誌, Vol.53, No.1,

pp.71-80, 2003.

- [53] M.E. Dawson, A.M. Schell, D.L. Fillion, “7 The electrodermal system” , Handbook of psychophysiology, pp.159-181, 2007.
- [54] Y. Tanahashi, O. Kasono, T. Yanagisawa, T. Nomoto, I. Kikuchi, T. Ezuka, "Development of Full-Color Laser Head-Up Display," PIONEER R&D, Vol.22, pp.1-7, 2013.
- [55] “眼・色・光 より優れた色再現を求めて” , 日本印刷技術協会, Chapter1 pp.8-9, 2007.

発表リスト

- [1] 磯部良太, 澤邊太志, 神原誠之, 萩田紀博, ” 自動走行酔い:車酔いと VR 酔いの併発空間に関する検討,” 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2C2-03, 2017.
- [2] 磯部良太, 澤邊太志, 神原誠之, 萩田紀博, ” 自動走行酔い:車酔いと VR 酔いの併発環境におけるストレス評価,” 日本バーチャルリアリティ学会研究報告:VR 学研報 (VRSJ Research Report), Vol.22, No.CS-3, pp.77-82, 2017.
- [3] 松本慎太郎, 磯部良太, 澤邊太志, 神原誠之, 萩田紀博, ” 再帰性反射材を用いた HUD のための両眼立体視に関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告:信学技報 (IEICE Technical Report), Vol.117, No.483, pp.1-4, 2018.