

修士論文

2019 年度

没入型シミュレータを用いた過渡期自動運転車に
対するドライバの行動分析

聶 中洋

(学籍番号 : 81833556)

指導教員 教授 小木 哲朗

2020 年 3 月

慶応義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科

システムデザイン・マネジメント専攻

論 文 要 旨

学籍番号	81833556	氏 名	聶 中洋
論 文 題 目			
没入型シミュレータを用いた 過渡期自動運転車に対するドライバの行動分析			
(内容の要旨)			
<p>近年自動運転車の導入が急速に進んでいるが、安全性についてはまだ解明されていない課題が多く存在している。多くのユーザーが自動運転システムを利用するときはヒヤットとするなどユーザーエクスペリエンスが下がる様な事態に遭う。考えられる原因としては従来のマニュアル運転の習慣がまだ残っているにもかかわらず、完全な新しい運転操作方法を使用しようとしているからだ。しかし、過渡期の自動運転モードは完全に新しいシステムではなく、最初はマニュアル運転の補助機能から始まっている。従って、移行段階は非常に複雑で混沌な状態である。</p> <p>この段階でドライバはどのような行動を取ればよいのかを指示するガイドラインはまだ作られていない。自動運転モード研究組織及び大手企業は技術向上に力を注いでいるのが普通で、完全な自動運転レベル5を目指して研究している。過渡期は必ず経過しなければならない。この段階のドライバの行動特性を明らかにするのがより円滑に過渡期を通過できると思われる。</p> <p>レベル2からレベル3の段階の自動運転モードを使用する時のドライバの役割は、従来のマニュアル運転と比べて大きく異なる。そのため、自動運転モードを使用する時に、ドライバがどのような行動を取るのか、またどのタイミングで何の情報を求めているのか等を明らかにすることで、より効果的なインタフェースを構築することが可能になる。これによって、自動運転車に対する乗車体験の改善及び安全性の向上が期待される。本研究の目的は、自動運転モードをより早く普及させるために、過渡期に対するドライバの行動特性を明らかにし、マニュアル運転から自動運転を利用する状態へ遷移時に必要なものを模索し、今後の研究方向について探索することである。</p> <p>結果としては、移行段階中の自動運転モードでもマニュアル運転と同様に、ドライバが求めている安全情報を共有した方が精神的な負荷が少ない。残存しているマニュアル運転スキルは新システムのユーザーエクスペリエンスに影響している可能性が高い、より早く旧類似システムのスキルを忘却させ、新システムへ意識を変換させるインタフェースの構築が求められると推測する。</p>			
キーワード (5語) : 自動運転, ドライバ行動, ドライビングシミュレータ, アイトラッキング, 行動分析			

SUMMARY OF MASTER' S DISSERTATION

Student Identification Number	81833556	Name	Zhongyang Nie
Title Analysis of Driver' s Behavior for Transition Period Autonomous Cars Using Immersive Simulator			
Abstract For safety and user experience, the behavior of drivers should be studied. Finding an improved solution for the driver to know what information they need, and what kind of interface design is more effective. An autonomous car is a vehicle that can sense the environment and driving automatically without human input. People who drive a car with auto driving system will behave differently from driving a normal car. In this research, the purpose is to study the driver behavior while sitting in an autonomous car which is Level-2 or Level-3, thus allowing autonomous cars to be driven safer and better. To approach, HRV measurement device, eye-tracking system and driving simulator software which is called PreScan are used in the immersive driving simulator. This experience is tested with several different driving scenario. During driving in the CAVE simulator, we used an HRV to measure subjects' RRI and an eye-tracking system which is called EMR9 to record the video of eye-movement. From the RRI data, calculate the RRV data to confirm the pressure during using automatic driving system. As a result, the lowest pressure is observed when system provided all safety information that drivers need to know when driving a normal car. Thus, for transition period autonomous cars, provide all the safety information which is as same as driving a normal car to drivers is the best solution.			
Keywords(5 words): Autopilot, Driving behavior, Eye-tracking, Driving simulator, Interface design			

目次

1 章 序論

1.1. 近年車の自動運転の概要	1
1.2. 問題提起	4
1.3. 本研究目的.....	5
1.4. 関連研究	5
1.4.1. 現状の概要	5
1.4.2. 運転時のドライバ行動分析及び自動運転利用時の不安について	6
1.4.3. 本研究の位置づけ	8

2 章 実験方法

2.1. 概要	10
2.2. 実験機器	10
2.2.1. シミュレーションソフト	10
2.2.2. 三面モニタ式ドライビングシミュレータ	11
2.2.2.1. 物理構成.....	11
2.2.2.2. ネットワーク構成	13
2.2.3. 没入型ドライビングシミュレータの開発	13
2.2.3.1. 物理構成.....	13
2.2.3.2. ネットワーク構成	15
2.2.4. 測定機器.....	15
2.2.4.1. アイマークレコーダーEMR 9	15
2.2.4.2. 心拍計 CHECKMYHEART	16
2.3. 実験条件	18
2.3.1. 車の自動運転関連要素.....	18
2.3.2. シナリオの選択方法	19

2.3.2.1. マニュアル運転時に求められる安全情報の種類.....	19
2.3.2.2. 安全情報種類を準じたシナリオ選択	19
2.4. 実験方法	20
2.4.1. 三面モニタシミュレータでの実験	20
2.4.1.1. 高速道路で右から合流車が来るシナリオ	21
2.4.1.2. 十字交差点で右折するシナリオ	22
2.4.2. CAVE シミュレータでの実験.....	23
2.4.2.1. 高速道路で右から合流車が来るシナリオ	28
2.4.2.2. 高速道路で合流車として走行するシナリオ.....	29
2.4.2.3. 右側通行の場合で走行するシナリオ	30
2.4.2.4. 市街地の十字交差点で左折するシナリオ	31
2.5. その他の追加シナリオ	33
2.5.1. 市街地の十字交差点で右折するシナリオ	33
2.5.2. 高架高速道路での走行.....	34
2.5.3. 高速道路で合流車としての走行.....	34
2.5.4. 高架高速道路での追い越し.....	36

3章 実験結果

3.1. 三面モニタシミュレータでの実験	37
3.1.1. 高速道路で右から合流車が来るシナリオの合流車を発見した距離.....	37
3.1.2. 十字交差点で右折するシナリオ.....	37
3.1.2.1. 視線特性について	37
3.1.2.2. 精神負荷について	39
3.2. CAVE シミュレータでの実験	40
3.2.1. 高速道路で右から合流車が来るシナリオ	40
3.2.2. 高速道路で合流車として走行するシナリオ.....	41
3.2.3. 右側通行の場合で走行するシナリオ.....	42
3.2.4. 市街地の十字交差点で左折するシナリオ	43
3.2.5. RRV 増減率	43

3.2.5.1. 高速道路で合流車として走行するシナリオ.....	44
3.2.5.2. 右側通行の場合で走行するシナリオ.....	45
3.2.5.3. 市街地の十字交差点で左折するシナリオ.....	46
3.2.6. 可視化及びまとめ.....	47

4 章 考察

4.1. 概要.....	49
4.2. 理想な自動運転車を使用するときのコンテキスト分析.....	49
4.3. ヒヤットとする原因とユーザーエクスペリエンスが低下する要因について.....	52
4.4. 移行段階中の自動運転車に対するインタフェースの再構築.....	55
4.4.1. ドライバと自動運転車の情報共有.....	55
4.4.2. 自動運転車と外部環境の情報共有.....	57
4.5. 情報共有に適合する感覚について.....	58
4.5.1. 視覚.....	58
4.5.2. 聴覚.....	58
4.6. 自動運転モードとマニュアル運転における内外部環境の変化と相互作用について.....	59
4.7. 音声インタフェースとドライバの運転負荷について.....	59
4.8. 安全確認情報共有の最適タイミングについて.....	60
4.9. 被験者属性と RRV 変化への影響について.....	61
4.10. 情報獲得時間点について.....	61
4.11. 学習された行動が類似行動へ与える影響について.....	62
4.12. 実験の順序効果及びより高度な分析について.....	62
4.13. 今後の展望と課題.....	66

5 章 結論

結論.....	67
---------	----

謝辞	69
参考文献	70
付録	78

1 章 序論

1.1 近年車の自動運転の概要

近年自動運転車の導入が急速に進んでいるが、安全性についてはまだ解明されていない課題が多く存在している。一台の車に数十個のカメラやセンサを装着して、周りの環境をセンシングし、障害物などの危険を確認しながら自律走行を目指しているのが現状である。車の自動運転にはアメリカのモビリティ専門家の非営利団体 Society of Automotive Engineers (SAE) によってレベルが定義されている。レベルは全部で5つがあって、大きく人が運転するのかシステムが運転するのかによって2つの段階が分けられている。レベル1、レベル2は、ドライバが運転タスクを担当し、システムはドライバの補助の役割を担当する。レベル1はドライバ支援 (Driver Assistance) で、アクセルまたはステアリングなど、単一機能の自動化を示している、この段階での自動運転システムは車の横方向または縦方向の制御ができる。レベル2は部分的な自動化

(Partial Driving Automation) 、複数機能の自動化の組み合わせで横方向及び縦方向の制御ができる。次の段階はシステムが運転をし、人間が補助役または単なる乗客役。レベル3～5はこの段階に該当する。レベル3は条件付自動運転モードで (Conditioned Driving Automation) 、主な運転タスクはシステムで実行していて、様々な状況とシナリオも対応可能ではあるが、運転において動的支援タスクはまだ人間の補助が必要な段階だ。レベル4は高度運転自動化 (High Driving Automation) 、この段階は自動運転が動的支援タスクもシステムが実行することが可能になる段階で、限定されているシナリオでは自律走行ができる。最後のレベル5は完全な自動運転 (Full Driving Automation) で、すべてのシナリオも自動的に対応が可能になり、完全にまたドライバ以上に運転ができるシステムを示している。

定義も何回かアップデートしてきた中、多くの会社や研究施設はレベル5を目指して研究をしている。しかし、現状では、実際に商品を出しているものの多くはレベル1、レベル2のドライバ支援システムだ。中国政府も自動運転に力を入れている、大手自動運転車メーカーのテスラと連携して、上海で実験的な

開発も進んでいるが、それでもレベル3の程度でレベル4に達している言えない状態だ。

何故自動運転がこのような人気が出るのか、それはやはり自動運転の実現による事故率の減少や道路利用率の上昇効果があるからだ。まずは事故率の減少について述べる。交通事故の原因は約9割が人為的過誤（ヒューマンエラー）、アメリカ運輸省道路交通安全局（NHTSA）が2015年に発表した調査データをもとに、以下表でまとめた。

表1 2015年度アメリカの交通事故原因ごとの数と割合

事故原因	数	割合
ドライバ	2,041,943	95.43%
車	44,643	2.09%
道路と天候	53,038	2.48%
合計	2,139,624	100.00%

アメリカの運転事情はこの様にだが、日本の場合もまとめてみた。以下図は警察庁が公開されたデータに基づいて作成したものを示している。死亡事故件数とドライバが原因の死亡事故件数の年代別推移と割合をまとめた。

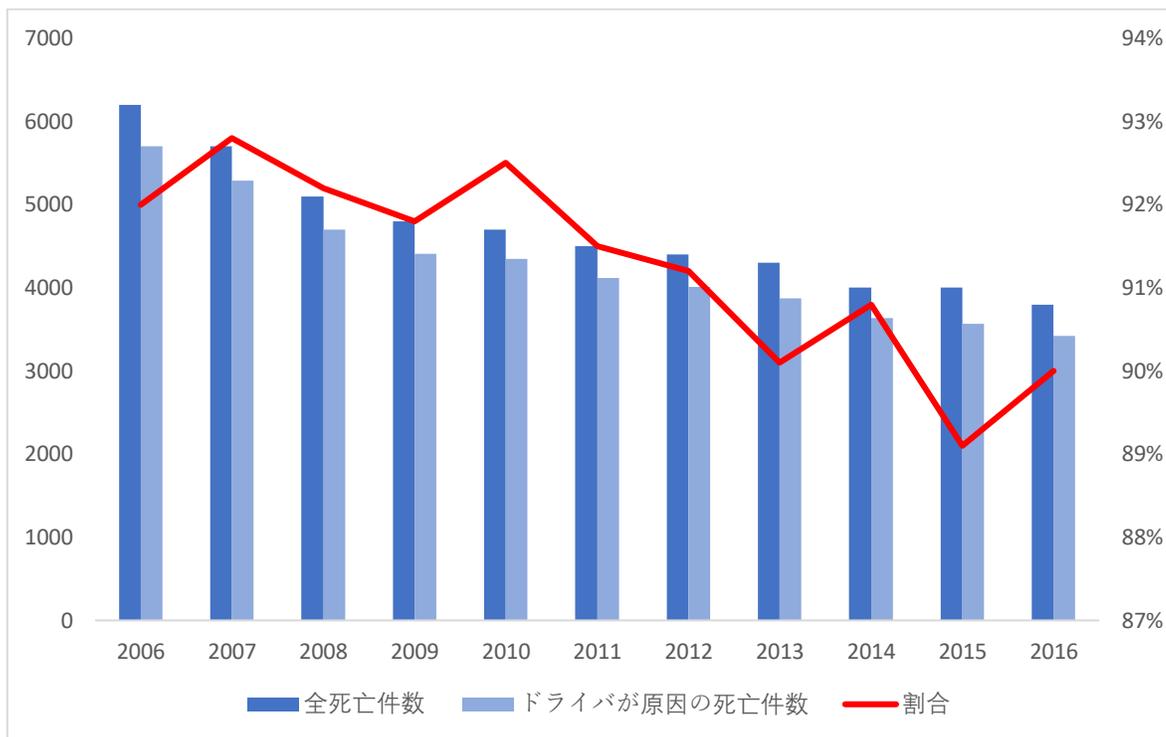


図1 日本の交通事故死亡件数とドライバが原因の死亡件数年代別推移

2006年から2016年のデータをまとめた。図からわかるように、2015年は89%以外すべての年もドライバが原因の死亡件数は9割以上を占めている。システムを構築するとき人間という不安定な要素を追加すれば、システム全体の信頼性は低くなるのが普通だ。では自動運転システムの追加による事故率の減少はできているだろうか。公益財団法人交通事故総合分析センター

(ITARDA)のデータをもとに富士重工業が発表した情報によると、スバルの自動運転技術「アイサイト (Ver2)」を使用した車は使用しない車と比べると事故件数が約61%減少した。この技術は主に衝突回避支援、安全運転支援、視界の拡張、運転負荷の軽減の機能が備えている。完全な自動運転ではないが、レベル2に相当するシステムだと推測する。完全な自動運転技術ではないとはいえ、事故軽減率の効果は非常に効果的なのは明らかだ。

道路利用率の上昇効果についても期待されている。道路利用率とはいえ、渋滞関連の状況改善は自動運転が主にもたらす効果だと推測できる。日本の場合は、自動車利用が道路の容量を上回っているのが要因だと思われる。渋滞についてだが、様々な説がある中、流体物理の観点から見ると、道路上の車は非常に遠い距離で観測すると、離散粒子系の様に見ることができ。そこで、渋滞の波はその粒子の流れ上に伝わっていく衝撃波として説明することができる。これがライトヒルの説である。しかし、理想の流体とは全く違う特性を持っていて、交通の動力学、ドライバーの意思決定などで、道路上の車という粒子はニュートン粒子ではなく、自分自身の意識で動く「自己駆動粒子」の集団で注目されるようになった。このドライバーの意識、操作行動などの不安定な要素は渋滞を起こす主な原因で、そこで、自動運転技術の導入によって、車の制御がより合理的に実行することができれば、より安定した流量で運輸はできるようになり、道路の理想容量も増えて、混雑と渋滞の改善ができるのではないかと推測する。

その他の利点もあるが、まとめると、実現することされできれば、国、地域に限らず莫大な価値をもたらすことができる技術であるのが事実だ。しかし、最初からレベル5の完全な自動運転システムを出すのが不可能のも現実だ。したがって、必ず通過するマニュアル運転から自動運転までの過渡期で如何に有効な手段と手法を模索し、普及をより早くさせるのが重要になってくる。

1.2 問題提起

では、どうすれば良い早く普及させるのか。過渡期の自動運転モードの特徴を把握し、ドライバーはこの状態の自動運転モードをどの様に利用したらより安心安全で運転負荷も軽減できる補助システムを作成するのが必要だと考える。しかし、従来のマニュアル運転とは似ているが、過渡期の自動運転モードでも完全に新しいシステムだと見なすべきである。運転タスクにおいて役割分担が

完全に違うので、危険状況に対する判断基準も違うのが現状だ。そこで、多くの利用者がヒヤッとしたりする。これが自動運転モードの普及に支障が出る要因の一つだと思われる。マニュアル運転の意識まだ残存しており、新しいシステムを使っているにもかかわらず、目に入った情報は似ているが、車の制御権はない。ドライバが求める情報の種類、車が持っている情報の種類、交換した情報の有効性、その間で生じた意思伝達のズレが発生する。この様々な条件にある些細な差と違和感がユーザーエクスペリエンスを下げる要因だと思われる。これについては後述する。

1.3. 本研究目的

本研究の目的は、自動運転モードをより早く普及させるために、まずはドライビングシミュレータを構築して、被験者に生体情報収集装置を用いて、生体情報の特徴を分析することで過渡期に対するドライバの行動特性を明らかにする。これに基づいて移行段階の自動運転モードを使用するのを妨げる要因を導き、改善案を探求する。

1.4. 関連研究

本節では関連研究及び関係分野の概要を説明する。

1.4.1. 現状の概要

自動運転は最終的に運転タスクをシステムで制御することになるため、多くの情報は自動車自身がセンシングして把握している。ドライバにどれくらい伝達すればよいのか、何を伝達すればよいのか明らかなガイドラインは作られていない。現状では、多くの自動運転の情報提示方法はドライバの前方にパネルやインストルメントクラスタを利用して車の状態や周りの障害物を表示する。これは1911年にフランスで初めてに車が装着された。当時はまだエンジンの回転計しかないが、その後、複数メーターを設置したダッシュボードも発展した。少しずつ表示される情報を追加しながら現在のインストルメントパネルに発展してきた。現状では、スピードは無論、ガソリン残量、エアコン温度、シ

ートベルトライト，ライトのアイコンなど様々な機能が追加してきた．自動運転モードに関しても，このインストルメントパネルの中に情報提示するシステムを追加している．以下は自動運転モードで追加した警告メッセージを表示する実験の様子を示している．



図2 インストルメントパネルの例

しかし，すべての情報全部をドライバの目の前に提示すれば良いのか，まだ再検討の余地がある．このタイプの情報提示方法についての先行研究が多く，パネルの角度，形状，色なども重要なデザイン要素として考えられている．問題点として考えられるのが情報を提示する量の最適化，ドライバの視点移動による前方焦点の喪失などがある．

1.4.2. 運転時のドライバ行動分析及び自動運転利用時の不安について

異なる属性のドライバに対して運転行動分析の先行研究が多い．車に搭載される HMI の設計に対して不可欠である．西崎氏の研究では（西崎 13）ドライバの特性と認知機能について研究した．研究では主に高速道路合流走行時に関する研究で，ドライバの認知機能として，注意機能と決然性を想定し，実験を通して，この二つの要素は運転行動を決定する重要な要因だと検証した．ドライバの年齢，性別，運転経験のみが行動を決定する要因ではないことを明らかにした．

高齢者についてのドライバ行動分析の研究もあった。細川氏の研究では、高齢者の日常運転行動を基づいて右折時不安全行動について研究した（細川 08）。自動車の三大機能走る、曲がる、止まる中には、曲がる時は危険を感じ、不安を感じ易い。細川氏の研究では、ドライビングシミュレータを使用して高齢者ドライバの運転行動パラメータを取得し、その行動特徴を把握して評価した。研究には被験者の生活、身体特徴が運転行動に与える影響についても評価した。結果としては高齢運転者という集団においては、運転行動が慎重型であることを検証した。

ここまでは通常運転、マニュアル運転の時のドライバの行動特徴を把握して分析する研究だった。自動運転を利用する時の不安についての研究も多く存在している。

嶋田氏の研究では自動運転車両における運転者の不安感について実験をし、評価をした（嶋田 17）。この研究では自動運転時に不安を感じるシーンをアンケートの形式で統計し、抽出し、合流、先行車両が急ブレーキをかける、カーブこの三つのシーンに対して実験をした。実験はシミュレータではなく、実際の運転コースを利用した実験だった。運転に自信ありなし、年齢層も別々の被験者を募集して実験を行ってアンケートで運転エクスペリエンスを確認した結果、人間と機械の信頼、機械の行動を把握する必要があると論じた。

人間が不安を発生に関する共通な要因の一つとしては「理想と現実に乖離があること」という説がある（松浦 17）。自動運転車を利用する時には特に車の移動はドライバ側が制御していないため、不安を感じやすい。しかしこれらの研究が想定している状態は自動運転モードでも、レベル1からレベル2の運転アシスタント程度の自動化。当然少し上のレベルの研究もあった。これはレベル4の自動運転車に相当する無人タクシーについての研究である。西堀氏は無人タクシーについて利用意向の要因分析を実行した（西堀 18）。前述通り自動運転は交通事故の削減、渋滞の緩和、環境負荷の軽減などの効果はある。しかしなかなか社会に受容されない。西堀氏の研究では、アンケート調査と試乗併用してユーザーが高レ

レベルの自動運転車に乗る時の意向をまとめた。不安を感じる要因としては自動運転車に対する意識、安全性の心配などが挙げられた。これが乗客として利用するときの意識調査だった。

高度運転支援に対する HMI の原則の研究もあった。向江氏の論文では、レベル 4～レベル 5 の高度の運転支援システムの HMI のガイドラインを研究した。高度な自動運転車を運転する時に、介入操作時にドライバ入力を制御システムに組み込む力学的な Shared Control の基礎検討を行った（向江 15）。整合性の検討も必要だと指摘したが、システムがドライバにどの情報を提供したら整合性向上になるのか、何を持っていれば調和された運転環境になるのかは今後の課題として言及した。

自動運転の時に、ドライバへの情報伝達方法についての先行研究について、役割の分担についての分析の研究も存在した。今までの研究では、長い時間システムが車を運転し、必要な場面でドライバに交代するのを想定し、その時のドライバの覚醒水準（Cha03）や反応時間を考えて、何をすればよりスムーズに交代できるかについての研究が多く見られる。作動限界時のドライバの運転行動を評価した研究があった（大谷 16）。普通に自動運転を使用する時に何もする必要がないので運転が楽になったという結果が見られた。その上被験者が眠気などの覚醒状態の低い状態で自動運転モードを使用する時に、操作が必要になる場合、マニュアル運転と同様にまたはより困難だと評価されている。

運転の時の精神負荷、即ちストレスも考える必要がある。先行研究では、肉体的なストレスの多少はドライバの運転時の負荷及び乗車体験に大きく影響する（岩倉 01）。

1.4.3. 本研究の位置づけ

多くの先行研究を概観すると、様々な要素が混ざっており、非常に困難で混沌な状態になっているのが明らかだ。ドライバの属性、心理要因、運転スキル、自

動運転に対する意識，覚醒水準，ストレスなど全部が影響すると分かった．しかし，自動運転の初期段階であるレベル1，またはハイレベルの自動運転レベル4～5の研究が多く，中間である過渡期に対する研究が少ない．そこで，本研究では，過渡期を中心にドライバの行動特性を明らかにする．従来の運転シミュレータに比べ，よりリアリティのある没入型のドライビングシミュレータを構築し，ドライバの生体情報を収集して実験をする．

2 章

実験方法

2.1. 概要

本章では、本研究で行った実験の実験方法及び機材について説明する。実験は前後二つ段階に分けて三面モニタ式のドライビングシミュレータ及び CAVE で構成したドライビングシミュレータを説明する。

2.2. 実験機器

本節では、実験で使用したソフトウェア及びハードウェアを説明している。

2.2.1. シミュレーションソフト

シミュレーションソフトは TASS International 社が開発したドライビングシミュレーションソフト PreScan を使用した。これはアドバンスドドライバアシスタンスシステム (ADAS) とアクティブセーフティのシミュレーションソフトである。特徴としては、ADAS が使用可能、シナリオドリブンの開発が可能、強力な可視化機能、交通と環境のモデリングも可能、MATLAB/Simulink で作成されたインタフェースで、MIL, STL, HIL アプリケーションで使用することも可能だ。これまでは多くの自動車会社に使用された実績があり、自動車メーカーで実験をするような環境を求め、PreScan に決定した。以下図は PreScan の操作インタフェース、実際の視点などを示している。

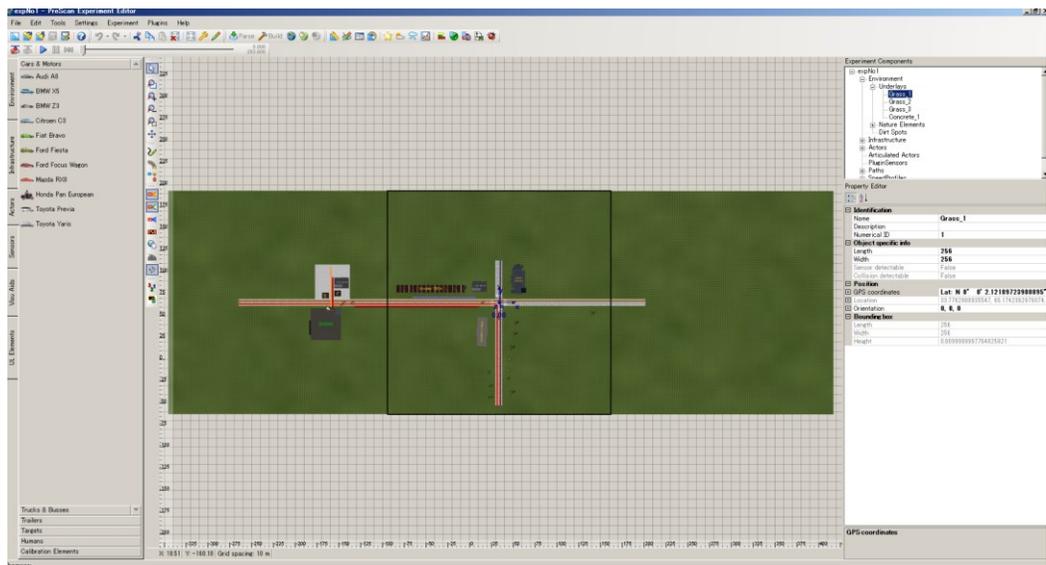


図3 PreScan の操作画面

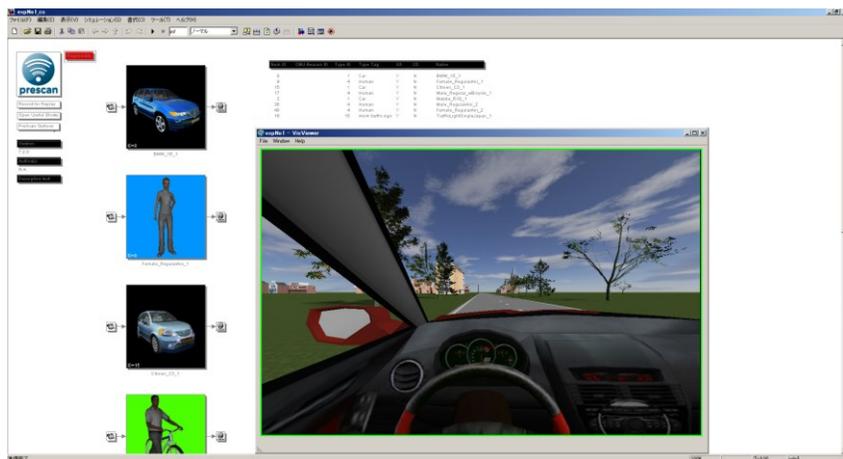


図4 PreScan のシミュレーション画面

2.2.2. 三面モニタ式ドライビングシミュレータ

本節では三面モニタ式ドライビングシミュレータの構成を説明している。

2.2.2.1. 物理構成

最初の基礎実験としては、モニタ三つで構成されているドライビングシミュレータを使用した。このドライビングシミュレータは主に運転コックピット及びモ

ニタで構成されている。以下図はドライビングシミュレータの物理構成を示している。コックピットにはハンドル、下にはアクセルとブレーキのペダルが配置されている。



図5 三面モニタ式ドライビングシミュレータ



図6 三面モニタ式ドライビングシミュレータのコックピット

2.2.2.2. ネットワーク構成

ネットワーク構成についてだが、このシステムの場合では、そのまま一台の PC を使用しているため、特に言及すべきものはない。

2.2.3. 没入型ドライビングシミュレータの開発

本節では没入型ドライビングシミュレータの開発について説明している。

2.2.3.1. 物理構成

CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) という仮想空間装置を使用してドライビングシミュレータを構築した。CAVE については慶應義塾大学が所持している K-CAVE を使用した。スペックは以下の表で示している。

表2 CAVE の仕様

ハードウェア種類	仕様
スクリーン	正面 リア投影 2.10m×2.63m、左右面 リア投影2.10m×2.10m、床面 フロント投影 2.10m×2.63m
プロジェクタ	NEC NP2150J (4200ルーメン、XGA) ×8台
立体視装置	円偏光立体視
計算機	シミュレータPC 1台、映像出力PC 1台 (グラフィックカードNvidia GTX1080 x 4枚)
3次元位置センサ	磁気センサ Ascension Flock of Birds (広域型)

スクリーンとしては正面リア投影 2.10m×2.63m 一枚、左右面リア投影 2.10m×2.10m 二枚、床面フロント投影 2.10m×2.63m で構成している。プロジェクタは NEC NP2150J を 8 台使用し、立体視の装置は円偏光立体視の方法を使用している。計算機としては、シミュレーションソフト PreScan をインストールしたシミュレータ PC 1 台、映像出力用 PC 1 台、合計 2 台を使用した。3次元位置セン

サは磁気センサ Ascension Flock of Birds（広域型）を使用した。以下は外見図を示している。

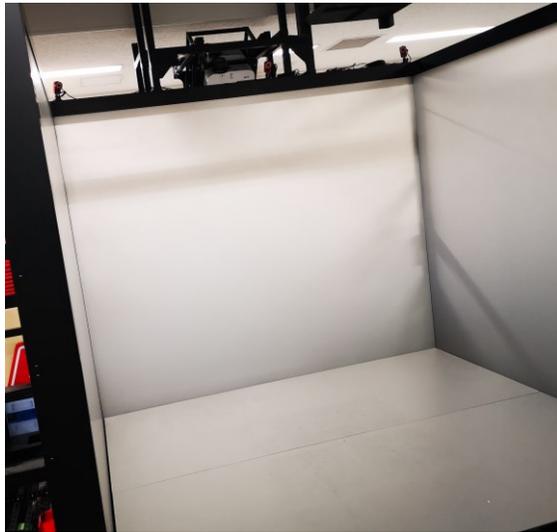


図7 CAVEの外見図



図8 CAVEで仕様されるプロジェクタ

2.2.3.2. ネットワーク構成

ネットワーク構成についてだが，K-CAVE はシミュレータの画像出力システムで，独自はすでに一つのネットワークを構成している．K-CAVE には専用のパソコン一台が存在し，4枚のグラフィックカードが配置されている．それぞれのグラフィックカードは1枚ごとに2台のプロジェクタと接続し，それで画像を出力している．機材の都合上，シミュレータの運用環境は別のPCで，ここで，ネットワークを構築する必要がある．PreScan が別のPCに出力するための RemoteViewer というプラグインを出している．このプラグインを使用して，シミュレーション PC と画像出力 PC とネットワークを構築した．以下図は構築したネットワーク構成を示している．

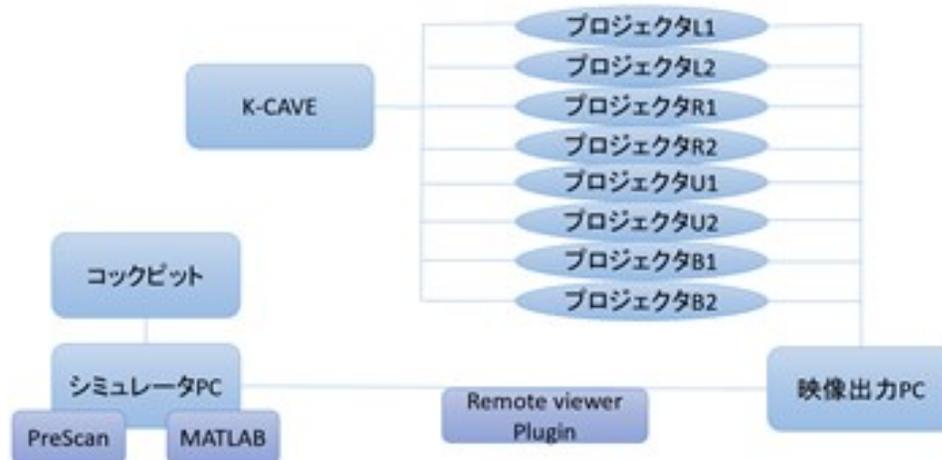


図9 再構築した CAVE シミュレータのネットワーク構成

2.2.4. 測定機器

本節では測定で使用する機器について説明している．

2.2.4.1. アイマークレコーダーEMR 9

視線の移動軌跡を記録する装置である．株式会社ナックイメージテクノロジーが生産したアイマークレコーダー．よりモバイルで軽量化を追求し，帽子型で使

しやすい。眼鏡も対応可能で、視線記録のために、これを決定した。EMR9は3つのカメラで構成されている。正面に1つ、左右の眼球下に各1つで構成している。瞳孔の検知方法としては撮影した画像を両極化し、黒と白の形で認知している。使用するときには被験者への負荷が少なく、瞳孔の検知も非常に良い精度で、容易に動くこともできる。以下図はアイマークレコーダーEMR9を示している。



図10 アイマークレコーダーEMR9

2.2.4.2. 心拍計 CHECKMYHEART

被験者の精神負荷を図るために心拍数、心拍間隔を図る必要がある。そのため、心拍計 CHECKMYHEART を使用した。株式会社 DailyCare が製造した心拍計だ。携帯型で生物電流を拡大して測定するタイプだ。一回の測定には消耗品である電極パットも必要。測定時間は一回300秒で、300秒を測定したら自動的に RRI を出力し、記録する。記録された RRI をテキストファイルで出力することも可能。専用ソフトウェアの中では被験者の心電図も観測することが可能。以下図は心拍計 CHECKMYHEART 及び被験者の心電図の一例を示している。



図 11 心電計 CheckMyHeart

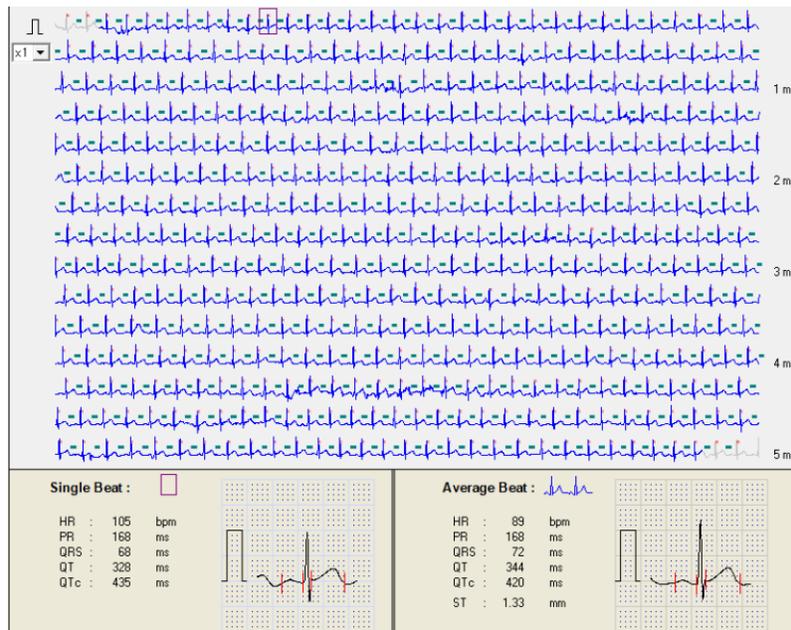


図 12 記録した被験者の RRI の一例

2.3. 実験条件

本節では実験についての条件設定などを説明している。

2.3.1. 車の自動運転関連要素

道路上で自動運転車を走行する時には関与してくる要素をまとめた。以下は想定されたレベル3，4の自動運転車についてのコンテキスト分析を示している。

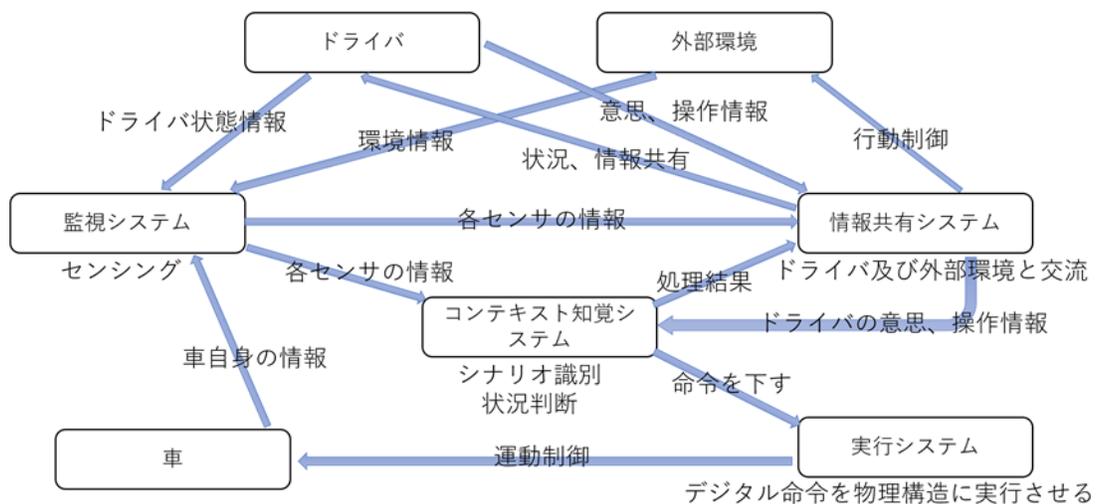


図 13 自動運転を使用するときの関連要素図

自動運転モードを使用する時に、自動運転システムを中心にコンテキストを分析してみた。自動車内部システム以外に関連しているのはドライバー、外部環境、車。外部環境については、道路と障害物で分けている。道路には、形状と構造で直線道路、曲線道路、上下坂道、平地、高架、トンネルで分けた。障害物は移動障害物と静止障害物二種類に分けて、走行車両、緊急車両、人・動物、逆走車、標識、停止車両、落下物、地面の欠陥で要素をまとめた。

2.3.2. シナリオの選択方法

本節ではシナリオの選択方法について説明している。

2.3.2.1. マニュアル運転時に求められる安全情報の種類

本研究では主にマニュアル運転と移行段階中の自動運転車を利用する時にどのポイントで情報共有すべきなのかを明らかにするのが目的で、マニュアル運転の時にドライバーが観測すべきポイントをまとめた。運転スキルアップ参考書によると、運転の時に基本的なシナリオは、発車、停車、左折、右折、バック、一時停止、車線変更、合流に分けられる。安全確認のポイントは左ミラ、ルームミラ、右ミラ、左目視、右目視、左にウインカーを出す、右にウインカーを出す、前方目視がある。これらのチェックポイントからドライバーが求められる安全確認の必要がある情報は以下に帰納できる。右方安全情報、左方安全情報、前方安全情報、後方安全情報。

2.3.2.2. 安全情報種類を準じたシナリオ選択

本研究は、過渡期自動運転モードを利用する時に、ドライバーの運転負荷を軽減できる安全情報の種類及び提示する最適なタイミングなどを模索するもので、できるだけ全ての安全情報を含めるのが望ましい。各基本シナリオで実行すべき安全確認動作を以下の表でまとめた。

表3 各単純シナリオについて安全確認のチェックポイント

安全確認のチェックポイント								
シナリオ	左ミラー	ルームミラー	右ミラー	左目視	右目視	左ウインカー	右ウインカー	前方目視
発車			✓		✓		✓	
停車	✓			✓		✓		
左折	✓			✓		✓		
右折			✓		✓		✓	
バック	✓	✓	✓	✓	✓			
一時停止	✓		✓	✓	✓			✓
車線変更	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
合流	✓		✓	✓	✓	✓	✓	

その結果、車線変更及び一時停止この二つの基本シナリオがあれば、すべての安全情報が含めることが可能になる。従って、選択したシナリオとしては、合流シナリオ、十字交差点で走行するシナリオ（一時停止あり）。その他、左側通行、右側通行二つの場合も考慮したいため、右側通行の合流シナリオも設定した。

2.4. 実験方法

本節では、実験方法について書いたものである。

2.4.1. 三面モニタシミュレータでの実験

一般的に使用されている三面モニタで画像を表示するシミュレータで実験をした。この段階の実験は主に移行段階中の自動運転車を利用する時のドライバーの行

動特性を明らかにするのが目的である。この節で説明した実験については、いずれもアイマークレコーダーを装着し、ドライバが自動運転モードを使用する時の視線移動特性を把握するために実行した。

2.4.1.1. 高速道路で右から合流車が来るシナリオ

最初は PreScan を使用して高速道路で右から合流車が来るシナリオを作成した。以下図はこの作成したシナリオの俯瞰図を示している。

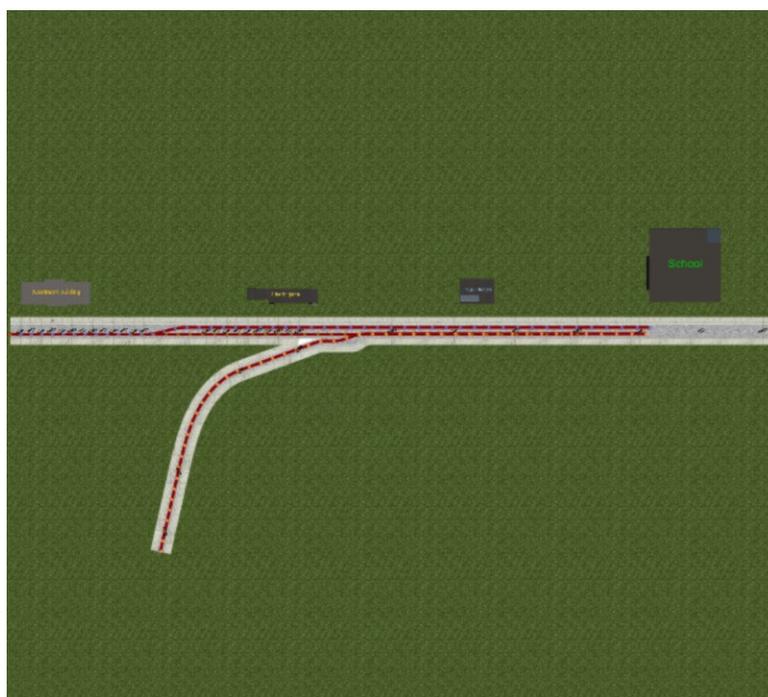


図 14 右側合流シナリオの俯瞰図

このシナリオでは、メイン道路で走行する車両 2 台、右から合流してくる車両 1 台で構成されている。このシナリオでは、マニュアル運転モード及び手動運転モード 2 種類で設定した。実験時、ドライバにアイマークレコーダー視線移動軌跡を記録した。主に視線移動軌跡の映像ファイルをもとに、ドライバが合流車を発

見する時の運転している車と合流車の直線距離を計算した。以下は実験時の様子を
示している。



図 15 三面モニタ式シミュレータで実験する様子

2.4.1.2. 十字交差点で右折するシナリオ

次に少し複雑である市街地の十字交差点で右折するシナリオを設定し、実験を行った。市街地での運転を想定し、PreScan を使用して運転シナリオを作成した。十字交差点を右折するように設置し、横断歩道を通過する歩行者を設定した。この際、ドライバに EMR9 を装着し、自動運転モードと手動運転モードでそれぞれ運転してもらった。自動運転モードではシナリオ上ドライバは何もせずに運転することが可能であるが、事前に被験者には状況によってドライバの補助が必要になる場合があることを伝えてある。このシナリオにおいて自動運転、手動運転の各モードでドライバの視線移動を記録し、視線の移動範囲を分析して比較した。以下は作成したシナリオの俯瞰図を示している。



図 16 市街地で右折するシナリオの俯瞰図

本シナリオは十字交差点で右折する時に歩行者が通過するのを設定した。そこで一時停止し、再発進した。

2.4.2. CAVE シミュレータでの実験

前節の実験では三面モニタ式のシミュレータを使用することで、ドライバの視線移動軌跡を研究した。実験が終わった後、被験者にインタビューをしたところ、実際車と運転している環境とだいぶ違うので、自分の反応も違うと意見をもらった。考察してみると、三面モニタ式のシミュレータは 120 度の視野角を描画されているが、コックピットで実際の視野角は約 90 度であった。以下の図は使用された三面モニタ式シミュレータの実際の視野角と描画角を示している。

三面モニタ式シミュレータ

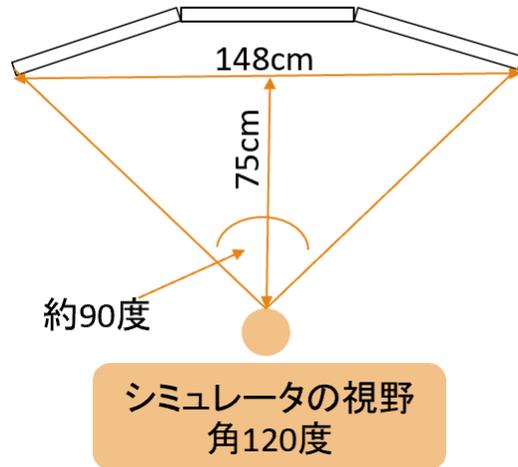


図 17 三面モニタ式の視野角

そこで正確性が足りないと感じ、やはり実寸大のドライビングシミュレータを構築した方がよいと思い、研究室にある CAVE 装置は視野角約 230 度で、ドライバの視野を正面、左右全部を再現できて、それ以上に少し後方の視野も描画できる実寸大のシミュレータを構築すべきと思い、CAVE でドライビングシミュレータを開発することにした。以下図は CAVE の描画角を示している。

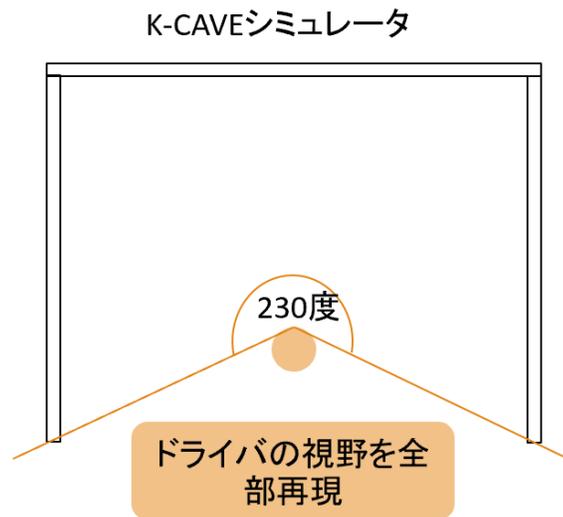


図 18 CAVE シミュレータの視野角

以下図は CAVE を使用してドライビングシミュレーションを実行している様子を示している。



図 19 CAVE シミュレータで実験する様子

描画される視野角などの設定は以下の図で示している。

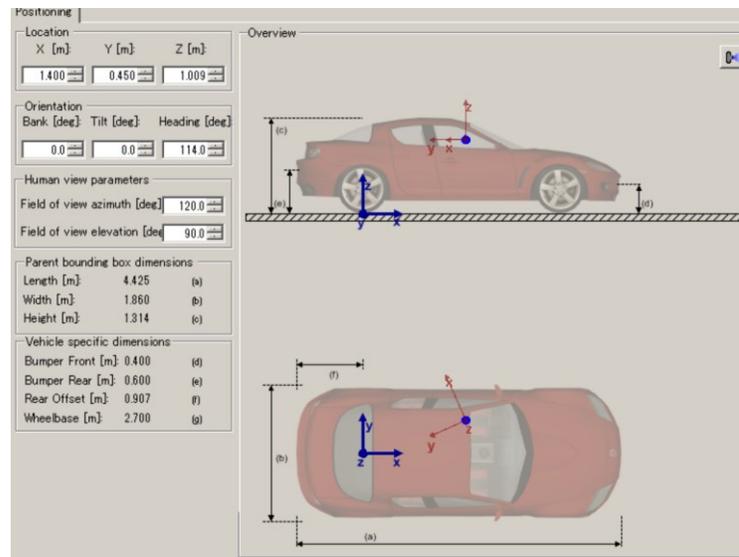


図 20 左方向描画角度の一般設定

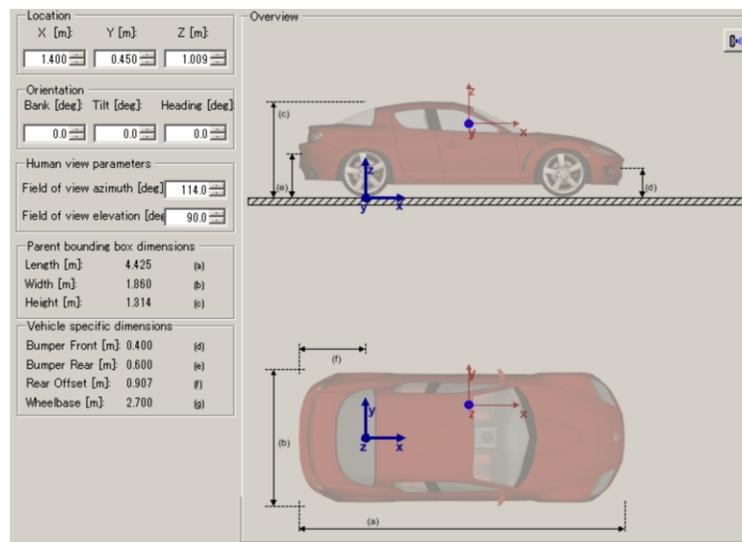


図 21 正面方向描画角度の一般設定

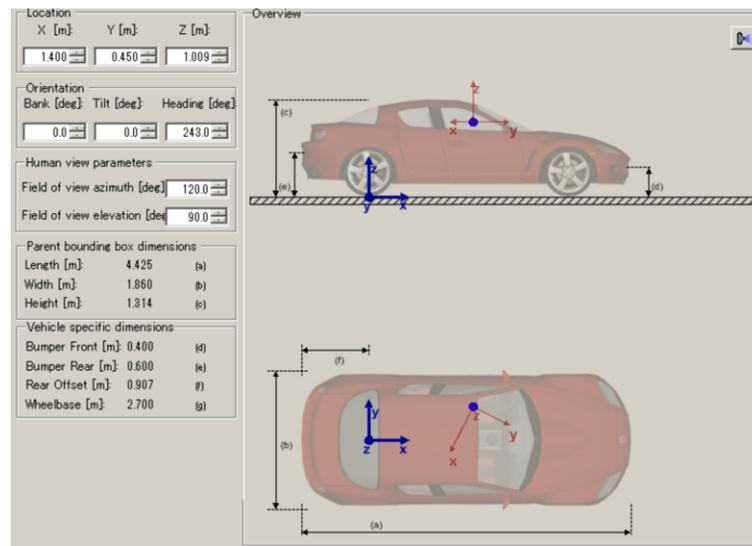


図 22 右方向描画角度の一般設定

理想の描画角度と少しずれがあるのがプロジェクタの配置及びスクリーンの位置関係で、微調整しながら、違和感のない角度を選定した。遠隔画像送信プラグイン RemoteViewer Plugin を使用して映像を映像出力用 PC に送信し、その PC を通して、8 台のプロジェクタから映像を K-CAVE のスクリーンに投影していると前節で説明した。RemoteViewerPlugin の設定は以下の図で示している。

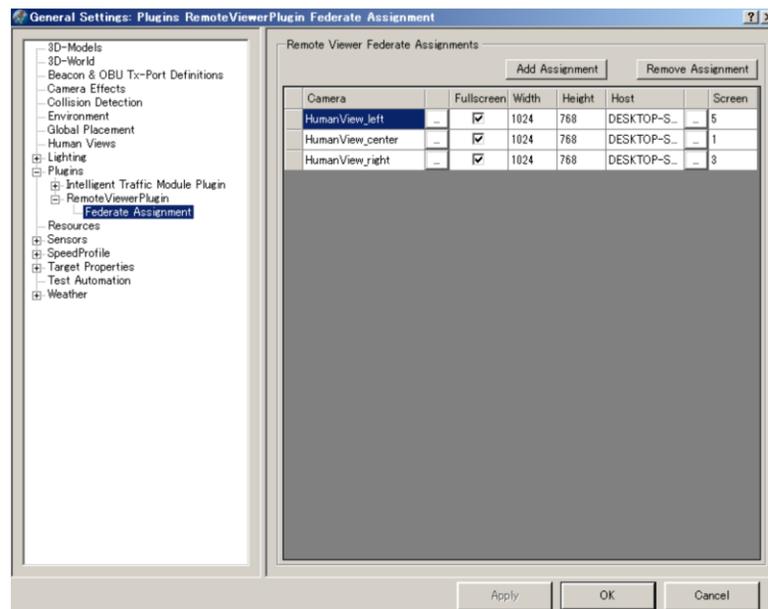


図 23 RemoteViewerPlugin の設定

2.4.2.1. 高速道路で右から合流車が来るシナリオ

高速道路で右から合流車が来るシナリオで実験を行った。被験者にアイマークレコーダー及び心電計を装着して、自動運転モードを使用した車に乗り、右側から合流車が走行してくるシナリオを設定した。以下図はシナリオの俯瞰図を示している。左からスタートになる。



図 24 右から合流車が来るシナリオの俯瞰図

条件としては右側通行，自動運転モード利用，合流車が運転している車の前に合流する。速度の変化なし，緊急状況における運転権限交代もない。安全情報

提示方法としては、一定距離ごとに「右方向に合流車を発見しました」を警告音として流す。情報提示なし、30m、60m、90m、120m、150mの各条件をランダムに設定し、被験者に安全確認情報として「右方向に合流車を発見しました」という音声を流した。被験者は心電計を装着してRRIを測定し、その後RRVを計算して、音声情報提示の運転負荷軽減効果を確認した。

2.4.2.2. 高速道路で合流車として走行するシナリオ

高速道路で合流車として走行するシナリオで実験を行った。被験者にアイマークレコーダー及び心電計を装着して、自動運転モードを使用した車に乗り、右側から合流車として走行するシナリオを設定した。以下図はシナリオの俯瞰図を示している。マップは4.2.1で使用したと同じもので、スタート地点は下になる。



図 25 合流車として走行するシナリオの俯瞰図

条件としては右側通行、自動運転モード利用、合流車が運転している車の前に合流する。速度の変化なし、緊急状況における運転権限交代もない。安全情報提示方法としては、3つの方法を設定した。情報提示の量によって、従来のマニュアル運転で求める情報の半分を提示するタイプ、全部提示するタイプ及び自動運転モード独自の情報提示方法。このシナリオの場合は左方向の安全情報及び前方の安全情報を求めているので、半分の場合は左側の安全情報を提示すると設定した。情報の提示方法としては音声提示で、セリフとしては、左側安全情報「左

方向に障害物を検知しました。安全です」前方の安全情報「前方状況安全です」と独自の情報提示方法「安全確認実行中、異常ありません」いずれも合流車と自動運転車の直線距離が50メートルの時に提示するように設定した。収集するデータとはドライバーの視線移動映像及び心電計で計測した心拍間隔である。

2.4.2.3. 右側通行の場合で走行するシナリオ

右側通行の場合で走行するシナリオで実験を実行した。これは主に海外（中国）を予想してシナリオを設定した。以下はこのシナリオの俯瞰図を示している。

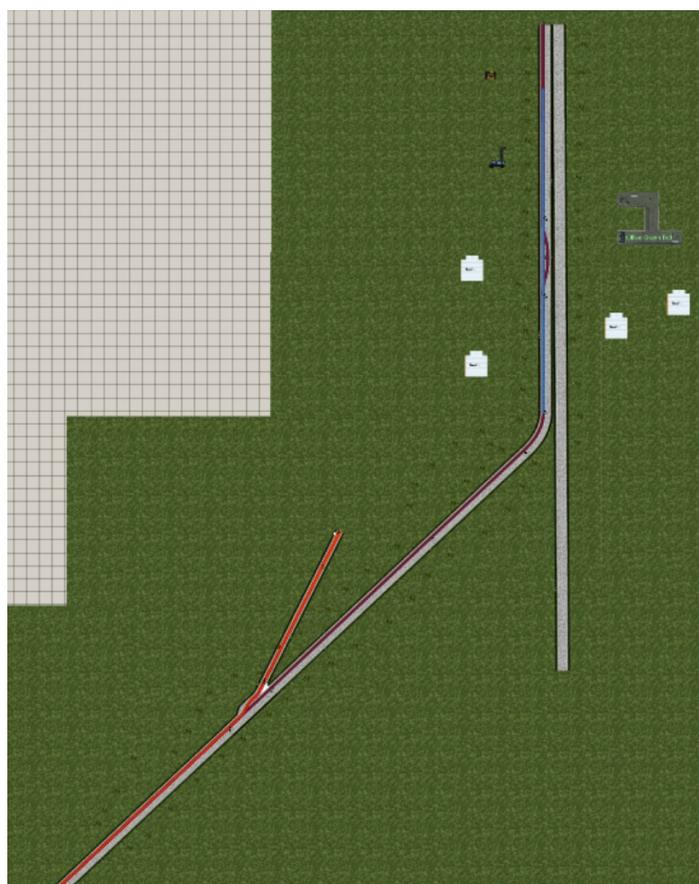


図 26 右側通行の場合で走行するシナリオの俯瞰図

このシナリオでは二つのフェーズで構成されている。追い越しフェーズ及び合流フェーズ。そしてこのシナリオで求められる情報の種類は4種類になる。条件としては左側通行、自動運転モード利用、合流車が運転している車の前に合流する。速度の変化なし、緊急状況においての運転権限交代もない。安全情報提示方法としては、3つの方法を設定した。情報提示の量によって、従来のマニュアル運転で求める情報の半分を提示するタイプ、全部提示するタイプ及び自動運転モード独自の情報提示方法。このシナリオの場合は左方向の安全情報、右方向の安全情報、前方の安全情報及び後方の安全情報を求めているので、半分の場合は左側の安全情報と前方の安全情報を提示すると設定した。情報の提示方法としては音声提示で、セリフとしては、左側安全情報「左方向に障害物を検知しました。安全です」、右の安全情報「右方向安全です」前方の安全情報「前方状況安全です」、後方の安全情報「後方状況良好、安全です」と独自の情報提示方法「安全確認実行中、異常ありません」いずれも合流車と自動運転車の直線距離が50メートルの時に提示するように設定した。収集するデータとはドライバの視線移動映像及び心電計で計測した心拍間隔である。

2.4.2.4. 市街地の十字交差点で左折するシナリオ

市街地の十字交差点で左折し、学校前で一時停止して歩行者を待ってから再発進するシナリオを設定して実験を行った。以下はシナリオの俯瞰図を示している。

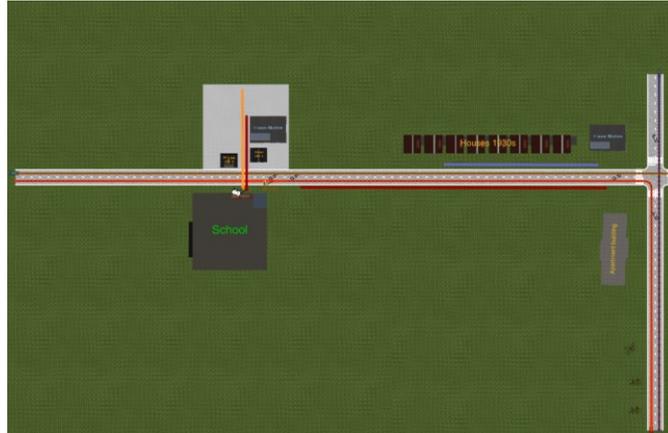


図 27 市街地の十字交差点で左折するシナリオの俯瞰図

市街地での運転を想定して、一時停止のフェーズを入れて作成した。このシナリオは左折するフェーズ及び一時停止二つのフェーズで構成している。そしてこのシナリオで求められる情報の種類は4種類になる。条件としては左側通行、自動運転モード利用、合流車が運転している車の前に合流する。速度の変化なし、緊急状況においての運転権限交代もない。安全情報提示方法としては、3つの方法を設定した。情報提示の量によって、従来のマニュアル運転で求める情報の半分を提示するタイプ、全部提示するタイプ及び自動運転モード独自の情報提示方法。このシナリオの場合は左方向の安全情報、右方向の安全情報、前方の安全情報及び後方の安全情報を求めているので、半分の場合は左側の安全情報と前方の安全情報を提示すると設定した。情報の提示方法としては音声提示で、セリフとしては、左側安全情報「左方向に障害物を検知しました。安全です」、右の安全情報「右方向安全です」前方の安全情報「前方状況安全です」「前方に歩道を横断する歩行者を検知しました、一時停止します」、後方の安全情報「後方状況良好、安全です」と独自の情報提示方法「安全確認実行中、異常ありません」。左折する3秒前及び歩行者を発見し、一時停止するポイントまで5秒前で安全情報を提示した。収集するデータとはドライバの視線移動映像及び心電計で計測した心拍間隔である。

2.5. その他の追加シナリオ

上述したシナリオで実験するのが最終段階だが、ここに至るまでは様々な実験シナリオを構築し、実験を試行し、方向性を探索してきた。以下は探索的な実験を行うときに使用したシナリオを記述下もの。

2.5.1. 市街地の十字交差点で右折するシナリオ

市街地で自動運転モードを利用して十字交差点で右折するシナリオである。以下図 8 は PreScan で作成したシナリオの俯瞰図である。



図 28 市街地の十字交差点で右折するシナリオの俯瞰図

シナリオ時間は約 30 秒で、市街地の十字交差点での右折シナリオです。往來の車両及び路肩で移動する歩行者と自転車を設置した。学校から飛び出し学生を設定して、緊急停車行動を設置した。市街地での低速状態の緊急停車をメインに RRV の変化を測定し、ドライバの行動特徴を模索する。

2.5.2. 高架高速道路での走行

低差環境変化の影響を明白するシナリオです。上がるときに追い越しすることを設定しています。後半に合流車もやって来ます。こちらも追い越し及び合流の時の安全情報提示の有無及び距離ごとに分けて測定する予定です。以下図9は高架高速道路の走行シナリオの俯瞰図である。



図 29 高架高速道路での走行シナリオの俯瞰図

実験で観測するのが傾斜度一定の上り坂での追い越しをするときに被験者の RRV，及び高い高速道路での合流，追い越しされる時の RRV 変化，その変化と情報共有の有無に分けて実験を行う予定。これによって環境変化時，同じ安全情報の提示効果に及ぼす影響について明らかにする事が可能になる。

2.5.3. 高速道路で合流車としての走行

合流車として道路に入るシナリオである。以下図10はシナリオの俯瞰図を示している。



図 30 高速道路で合流車としての走行シナリオの俯瞰図（メイン道路で走る車の先に合流）

自動運転利用者が側面からメイン道路に入るといふシナリオである。心拍計及びアイマークレコーダーによってドライバの生態情報を記録し、それらを運用してドライバの行動特徴を考察する。馴化による緊張度増減の影響を軽減するため、合流する時に先に走行して合流するシナリオ及びメイン道路で走行している車が通るのを待ってから合流する二種類に分けた。



図 31 高速道路で合流車としての走行シナリオの俯瞰図（メイン道路で走る車の後に合流）

2.5.4. 高架高速道路での追い越し

高低差環境変化がある場合での追い越しシナリオである。以下図 12 はこのシナリオの俯瞰図を示している。

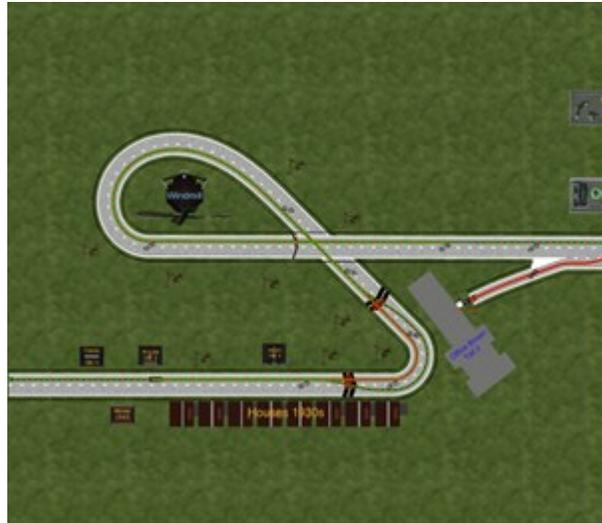


図 32 高架道路での追い越しシナリオの俯瞰図

上り坂の曲がるポイントで追い越しを実行したシナリオである。観測するポイントは追い越し時点の心拍変動量。

3 章

実験結果

3.1. 三面モニタシミュレータでの実験

本節では三面モニタ式シミュレータで実行した実験の実験結果を示している。

3.1.1. 高速道路で右から合流車が来るシナリオの合流車を発見した距離

実験結果については、被験者にアイマークレコーダーを装着して記録した映像ファイルを分析し、合流車を発見する時の自車と合流車との距離を計測した。この結果から、一般的にマニュアル運転の場合は自動運転モードと比べ、より多く車間距離を取る傾向が観察された。以下図5は合流車両発見時の車両間の距離を示したものである。この車両間の距離の比較から、合流車を発見するタイミングもマニュアル運転の方が早いことが分かった。また、合流車の発見のタイミングは視力との相関はあった。以下図は合流車を発見した時に運転している車と合流車の直線距離を示している図である。

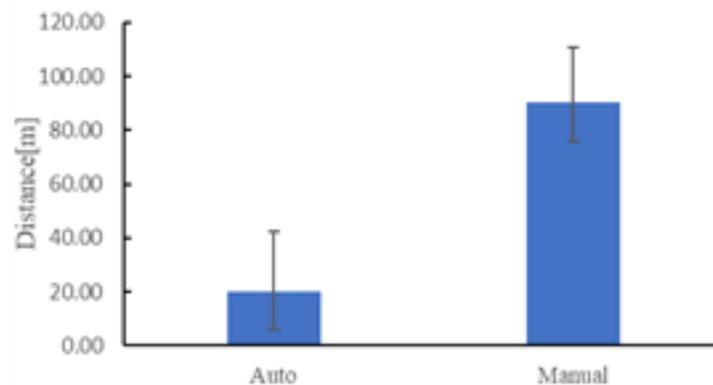


図 33 合流車を発見下時に運転している車と合流車の直線距離

3.1.2. 十字交差点で右折するシナリオ

本節では十字交差点で右折するシナリオについて結果を示している。

3.1.2.1. 視線特性について

実験では、市街地での運転を想定し、交差点での右折シナリオを作成した。十字交差点を設置し、ドライバをその十字交差点で右折するように指示した。まず

3面式ドライビングシミュレータを使用し、実験時はドライバにアイマークレコーダーを装着し、視線移動を記録した。マニュアル運転と自動運転モードに分けて比較実験を行った。実験結果からは、記録した映像ファイルを分析し、ドライバが自動運転モードを使用する時の視線移動の特性を調べた。実験では、被験者11名を募集して実験を行った。視線移動の特性を分析した結果、マニュアル運転の場合、視線の移動範囲は前方道路上に約50度の範囲で集中していたことが分かった。移動範囲は比較的狭く、特に右折する時には、交差点に配置された歩行者に集中していた。一方、自動運転モードの場合は、被験者の視線移動範囲はマニュアル運転と比べて広がっており、前方約110度の範囲を見ていることが分かった。この結果から、ドライバは自動運転モードを使用している時には、運転に必要な情報以外にも広く周囲を見る余裕があり、多くの情報を手に入れようとしていることが分かった。視線の分析については、以下図の様にEMR9で記録された視線記録映像を再生し、マニュアル測定をした。



図 34 EMR9 で記録された視線追跡映像

画面上の四角マークは左の視点で、丸マークは右の視点で、十字マークは視線の中心になる。

3.1.2.2. 精神負荷について

前の実験では、被験者へのヒアリングから自動運転モードでの合流時には、ドライバがヒヤッとすることが報告された。これは、自動運転モードでは最適化されるためにマニュアル運転時よりも車間距離が短くなることと、自動運転車が合流車をセンシングしてもドライバに知らされていないこと等が原因と考えられる。すなわち、自動運転車とドライバ間で必要とする情報の共有が欠けていることが考えられ、必要な安全確認の情報を共有することで精神的な負担を軽減できると推測できる。

次の実験では、被験者に自動運転モードで車を運転してもらい、右から合流車が来るシナリオで、「右方向に合流車を発見しました」という合流車の存在を知らせる音声情報提示有り無しに分けて、HRV測定器で被験者のRRIを計測した。実験後、RRIデータから心拍変動量RRVを計算し、ドライバの緊張度合いを確認した。RRVは心拍間隔RRIの分散値であり、この指標は人間が緊張しているかリラックスしているかを示す指標として使えることが知られている。RRVが高いと被験者はリラックスしており、RRV低いと被験者は緊張していると言われている。RRVの計算方法としては、一定時間内の分散を計算する必要があることと、時間軸に沿う時系列変化を見る必要があることから、RRIの5拍毎の移動平均を計算し、その分散を計算して本研究のRRVにした。この実験では、音声による安全確認情報を共有することが、行動負荷と乗車体験にどう影響したかの分析も実行した。以下の図は、例として被験者の一人のRRVの結果を示している。このグラフからは、計測開始から100秒までは実験の準備を行っており、100秒から音声情報提示なしの1回目の実験が始まると、RRVがリラックスしている時と比べて低下していることが分かる。125秒から200秒までの間は休憩時間で、

RRV は上昇している。次の 200 秒から 225 秒は音声情報提示がある場合の二回目の実験で、ここでは RRV の低下は観測されるが、一回目の実験と比べて、明らかに低下する度合いが減少していることが分かる。結果としては、HMI を使用した音声情報提示により、欠如した安全確認の情報を共有することで、ドライバの精神負担と行動負荷が軽減されることが示唆された。

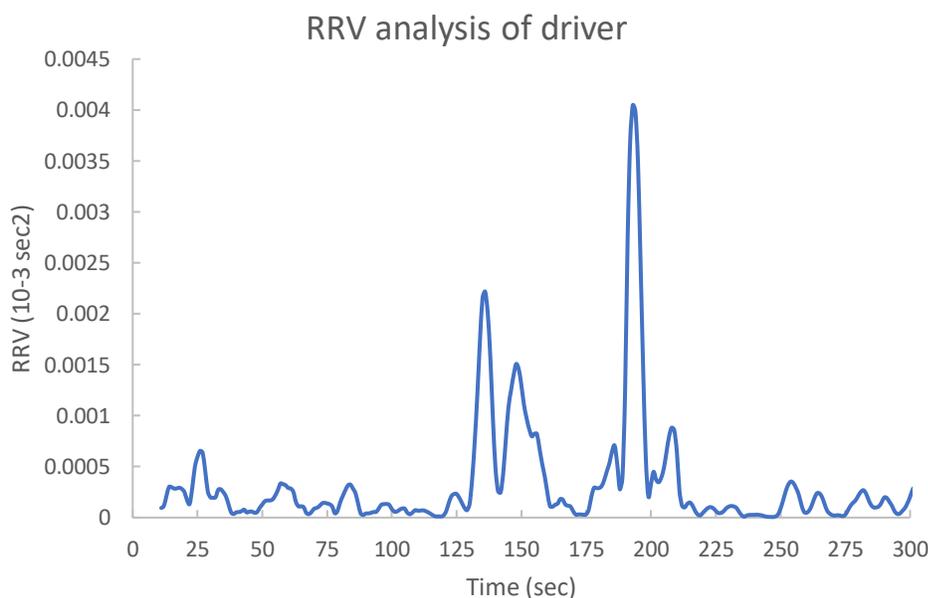


図 35 被験者 RRV 時間変化図の一例

3.2. CAVE シミュレータでの実験

本節では CAVE シミュレータで実行した実験の結果を示している。

3.2.1. 高速道路で右から合流車が来るシナリオ

被験者 10 名を募集して、各被験者に対して同じ条件の実験を 2 回ずつ実行した。以下図 7 はその結果を示したものである。横軸は情報提示のタイミングを示している。条件としては、情報提示なし、車両間距離 30m, 60m, 90m, 120m, 150m の時に音声情報を流した。縦軸は、実験中の RRV と各実験前約 30 秒の休

憩時間の RRV と比べて増減したパーセンテージである。この結果から、情報提示なしまたは提示するタイミングが遅すぎた場合には、明らかに被験者の RRV は低下したことが分かった。距離 30m の遅すぎる情報提示は、提示なしの場合よりドライバを緊張させる結果となった。一方、車両間距離が 90m 以上の場合は、RRV は大きい値を示しドライバの緊張度合いは緩和していることが分かった。一番上昇率が高かったのは車間距離が 150m の時に情報提示を行った場合であった。前述の実験結果から、120m～150m の車両間距離はマニュアル運転の場合の合流車発見の平均距離よりも大きく、このことと関係していると推測される。以下図は安全情報提示タイミングと RRV の増減率を示している。

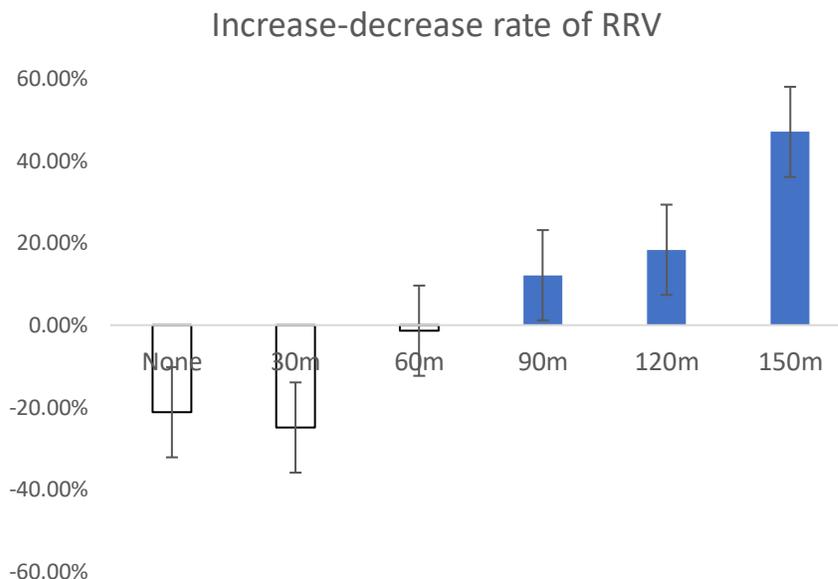


図 36 各距離で情報共有したら RRV の増減図

3.2.2. 高速道路で合流車として走行するシナリオ

収集した RRI をもとに RRV を計算して以下の表でまとめた。

表 4 高速道路で合流車として走行するシナリオの被験者 RRV 記録

No.	性別	年齢	運転歴(年)	RRV			
				0	50%	100%	S
1	男	23	5	2.09E-04	8.97E-04	4.82E-04	3.44E-04
2	男	24	3	3.69E-05	2.75E-05	3.14E-05	4.56E-05
3	男	29	5	1.04E-04	3.25E-04	1.32E-04	2.45E-04
4	女	24	1	1.78E-04	5.42E-04	3.36E-04	2.84E-04
5	男	26	6	2.69E-05	2.46E-05	2.79E-04	3.96E-05
6	男	28	3	3.78E-05	2.74E-05	2.26E-05	8.38E-05
7	女	24	2	4.03E-05	2.83E-05	4.99E-05	3.57E-05
8	女	25	3	3.22E-05	3.89E-05	3.21E-05	2.99E-05
9	男	29	2	9.20E-05	5.40E-04	4.50E-04	3.90E-04
10	男	23	4	3.20E-05	2.74E-05	3.99E-05	4.24E-05

3.2.3. 右側通行の場合で走行するシナリオ

収集した RRI をもとに RRV を計算して以下の表でまとめた。

表 5 右側通行の場合で走行するシナリオの被験者 RRV 記録

No.	性別	年齢	運転歴(年)	RRV			
				0	50%	100%	S
1	男	23	5	1.28E-04	2.96E-04	2.96E-04	2.75E-04
2	男	24	3	1.63E-05	2.63E-05	1.45E-05	2.55E-05
3	男	29	5	1.67E-04	1.43E-04	2.48E-04	1.54E-04
4	女	24	1	1.97E-04	2.28E-04	2.55E-04	1.94E-04
5	男	26	6	3.85E-05	1.39E-04	2.66E-05	2.17E-05
6	男	28	3	1.55E-05	3.49E-05	9.94E-06	1.45E-05
7	女	24	2	5.44E-05	2.32E-05	3.56E-05	2.57E-05
8	女	25	3	4.53E-05	4.43E-05	4.85E-05	3.99E-05
9	男	29	2	2.45E-04	3.40E-04	3.60E-04	2.90E-04
10	男	23	4	4.85E-05	3.22E-05	3.78E-05	2.48E-05

3.2.4. 市街地の十字交差点で左折するシナリオ

集した RRI をもとに RRV を計算して以下の表でまとめた。

表 6 市街地の十字交差点で左折するシナリオの被験者 RRV 記録

No.	性別	年齢	運転歴(年)	RRV			
				0	50%	100%	S
1	男	23	5	1.63E-04	4.72E-04	6.27E-04	8.26E-04
2	男	24	3	1.22E-05	6.35E-05	8.66E-05	4.80E-05
3	男	29	5	1.21E-04	1.28E-04	1.61E-04	2.43E-04
4	女	24	1	2.12E-04	2.85E-04	2.59E-04	5.66E-04
5	男	26	6	7.43E-05	4.15E-05	1.88E-05	2.84E-05
6	男	28	3	2.15E-05	1.58E-05	6.65E-05	1.96E-05
7	女	24	2	1.77E-05	5.13E-05	8.32E-05	5.53E-05
8	女	25	3	5.84E-05	4.41E-05	5.13E-05	9.94E-05
9	男	29	2	2.20E-04	3.40E-04	3.70E-04	3.90E-04
10	男	23	4	3.55E-05	2.13E-05	4.18E-05	3.44E-05

3.2.5. RRV 増減率

休憩時の RRV を基準に，RRV の増減率を計算し，以下の各表でまとめた。

3.2.5.1. 高速道路で合流車として走行するシナリオ

下表は高速道路で合流車として走行するシナリオについて RRV の増減率をまとめたものである。

表7 高速道路で合流車として走行するシナリオの被験者 RRV 増減率

No.	性別	年齢	運転歴(年)	RRV 増減率			
				0	50%	100%	S
1	男	23	5	-95.2%	-89.0%	-89.0%	-89.8%
2	男	24	3	-76.7%	-62.3%	-79.2%	-63.5%
3	男	29	5	-22.2%	-33.7%	15.2%	-28.4%
4	女	24	1	-56.9%	-50.1%	-44.2%	-57.5%
5	男	26	6	-78.2%	-21.1%	-84.9%	-87.7%
6	男	28	3	-61.9%	-14.0%	-75.5%	-64.1%
7	女	24	2	22.8%	-47.6%	-19.6%	-42.0%
8	女	25	3	-39.9%	-41.2%	-35.7%	-47.1%
9	男	29	2	-68.3%	-56.1%	-53.5%	-62.5%
10	男	23	4	35.9%	-9.8%	5.9%	-30.5%

3.2.5.2. 右側通行の場合で走行するシナリオ

下表は右側通行の場合で走行するシナリオについて RRV の増減率をまとめたものである。

表 8 右側通行の場合で走行するシナリオの被験者 RRV 増減率

No.	性別	年齢	運転歴(年)	RRV 増減率			
				0	50%	100%	S
1	男	23	5	-92.2%	-66.6%	-76.6%	-87.2%
2	男	24	3	-47.2%	-60.6%	23.9%	-34.8%
3	男	29	5	-51.7%	51.1%	-25.3%	14.1%
4	女	24	1	-61.1%	18.6%	-43.3%	-37.9%
5	男	26	6	-84.8%	-86.1%	-89.3%	-77.6%
6	男	28	3	-6.8%	-32.3%	64.1%	106.8%
7	女	24	2	-9.0%	-36.1%	87.8%	-19.4%
8	女	25	3	-57.3%	-48.4%	-32.0%	-60.3%
9	男	29	2	-88.1%	-30.2%	-52.2%	-49.6%
10	男	23	4	-10.4%	-23.2%	17.1%	18.8%

3.2.5.3. 市街地の十字交差点で左折するシナリオ

以下表は市街地の十字交差点で左折するシナリオについて RRV の増減率をまとめたものである。

表 9 市街地の十字交差点で左折するシナリオの被験者 RRV 増減率

No.	性別	年齢	運転歴(年)	RRV 増減率			
				0	50%	100%	S
1	男	23	5	-93.9%	-82.4%	-82.0%	-69.2%
2	男	24	3	-82.6%	-9.1%	-55.0%	-31.3%
3	男	29	5	-43.7%	-40.6%	-38.5%	13.2%
4	女	24	1	-53.6%	-37.6%	-26.5%	23.9%
5	男	26	6	-57.9%	-76.5%	58.1%	-83.9%
6	男	28	3	-47.1%	-61.1%	-44.3%	-51.5%
7	女	24	2	-60.0%	15.8%	12.6%	24.8%
8	女	25	3	-22.5%	-41.5%	-57.4%	31.8%
9	男	29	2	-71.6%	-56.1%	-41.9%	-49.6%
10	男	23	4	-0.6%	-40.3%	11.8%	-3.6%

3.2.6. 可視化及びまとめ

以上の表を図にして可視化すると，以下の図になる．

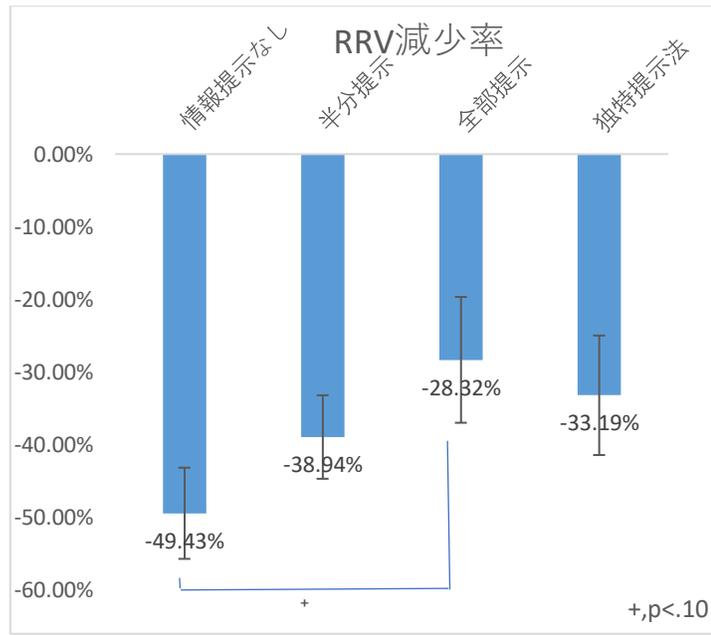


図 37 情報提示方法ごとの RRV 増減率

有意確率を計算したものは以下の表でまとめている．

表 10 得た実験結果の有意確率についての計算

ソース	タイプ III 平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
修正モデル	8.955 ^a	14	0.640	6.411	0.000
切片	2.825	1	2.825	28.313	0.000
情報提示方法	0.742	3	0.247	2.477	0.065
シナリオ	0.678	2	0.339	3.396	0.037
運転歴	6.165	4	1.541	15.446	0.000
年齢	4.722	4	1.180	11.830	0.000
誤差	10.477	105	0.100		
総和	36.278	120			
修正総和	19.433	119			

a. R2 乗 = .461 (調整済み R2 乗 = .389)

表 11 多重分析

(I) 情報提示方法		平均値 の差 (I- J)	標準 誤差	有意 確率	95% 信頼区間	
					下限	上限
.00	0.5	-0.105	0.082	0.574	-0.318	0.108
	1	-0.211	0.082	0.053	-0.424	0.002
	S	-0.162	0.082	0.198	-0.375	0.051
0.5	.00	0.105	0.082	0.574	-0.108	0.318
	1	-0.106	0.082	0.564	-0.319	0.107
	S	-0.057	0.082	0.895	-0.270	0.155
1	.00	0.211	0.082	0.053	-0.002	0.424
	0.5	0.106	0.082	0.564	-0.107	0.319
	S	0.049	0.082	0.933	-0.164	0.262
S	.00	0.162	0.082	0.198	-0.051	0.375
	0.5	0.057	0.082	0.895	-0.155	0.270
	1	-0.049	0.082	0.933	-0.262	0.164

有意確率の計算では、情報提示方法に対しては 0.065 で、5%有意に達していないが、10%で有意。以下の傾向が見られる。何の情報提示もない場合は、新しい自動運転システムを使用するときの RRV が最も下がった。RRV が低いほど緊張するという関係性があるため、何も提示しない場合は最も緊張度が高い。マニュアル運転の様に、ドライバーが求めるすべての必要な方角に対する安全確認情報を提示した全部提示の場合は最も緊張度が低い。自動運転モードに慣れていないドライバーに対して、従来のマニュアル運転のように安全情報を求める傾向があり、それに合わせて、マニュアル運転で確認するポイントで安全情報を全部提示すれば、自動運転システムを使用した運転において RRV の下がり具合が軽減し、緊張が減る傾向が見える。

4 章 考察

4.1. 概要

本章では、主に前章で説明した実験結果に対する考察を述べる。過渡期の自動運転モードを利用する時の環境は非常に複雑且つ影響要因が多く、様々なものを明らかにするのが望ましい。現時点ではこの混沌の時期において、有効なガイドラインはまだないため、少しずつ模索しながら研究していくのが適宜だ。新たなシステムを普及させるためには新しい意識の普及をしなければならない。問題点の一つとしては、自動運転モードは新システムではあるが、過渡期は従来のマニュアル運転を補助するシステムで、マニュアル運転を使用する時の意識は残存していながら、多くの新システム要素がある。似ているシステムだが、完全に新システムで、新旧の間で生じたズレが主に違和感とユーザーエクスペリエンスを下げる要因だと考えられる。その意識の変革を補助するインタフェースが過渡期自動運転モードの普及にとって大きな影響要因になると想定される。

4.2. 理想な自動運転車を使用するときのコンテキスト分析

理想的な自動運転モードを利用するときのコンテキストを分析してまとめた。自動運転モードを利用する目的としては、周囲環境をより安全に、効率化のため、まずは関連要素を整理した。以下はMメソッド（松岡13）を利用して整理したもの。

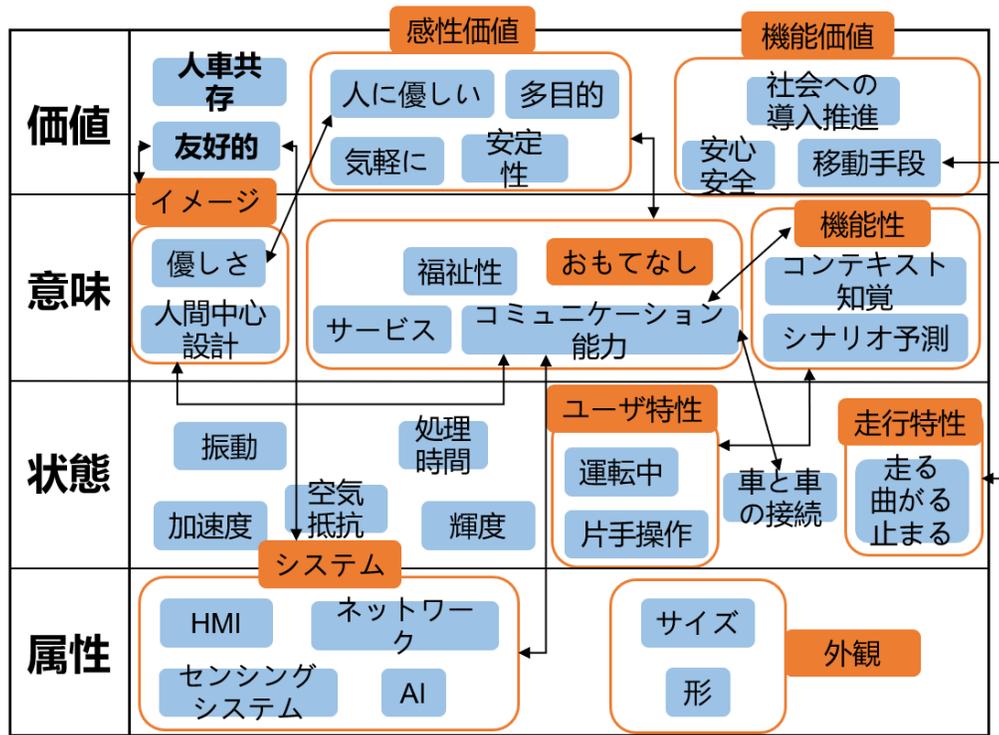


図 38 M メソッドを利用した自動運転関連のキーワード整理

注目すべきものは、過渡期の自動運転モードにおいては、当然のような車関係のものではなく、おもてなしグループだ。今後の自動運転モードを利用するときにはコミュニケーションを取るための前提として人間が存在している。自動運転モード最終的にはドライバが要らなくなるが、人間というシステム要素は取り除くが、過渡期では、まだ役割が残っているので、人間中心設計が必要。以下は自動運転に関連する要素を説明する図を示している。

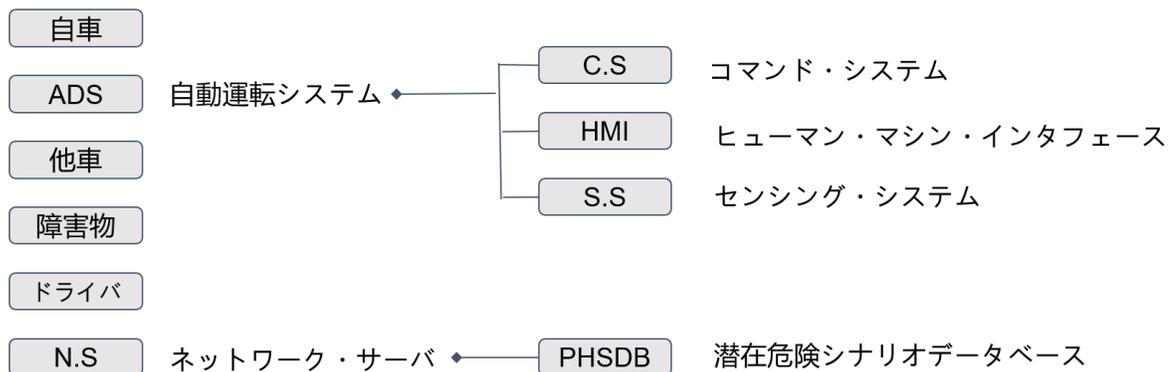


図 39 自動運転に関する要素図

関連要素としては自分が運転している自車，自動運転システム（Automatic Driving System），他の車，障害物，ドライバとネットワーク・サーバが構成している。自動運転システムの中にはまた3つの基本システムが分けられている。様々な情報を処理して行動を決めるコマンドシステム，人とシステムとの相互作用を完結させるヒューマン・マシン・インタフェースと周りの環境を把握するためのセンシングシステムで構成されている。これらの関連要素で構成した自動運転システムを使用するときのコンテキスト分析は以下の図で示している。

ADSを使用する時のコンテキスト図

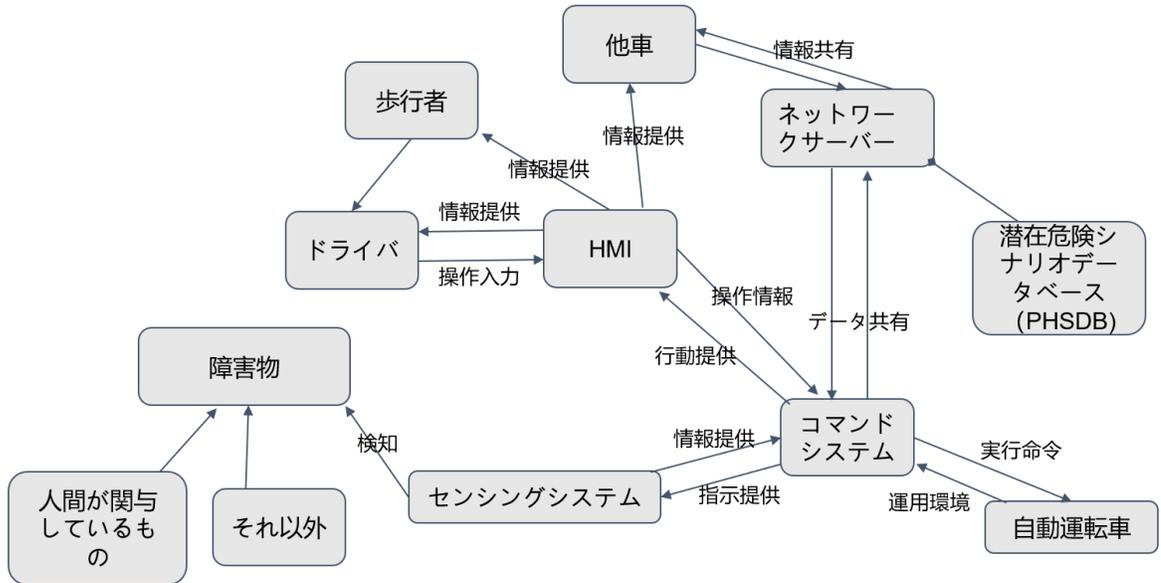


図 40 ADS を使用する時のコンテキスト図

図から分かるように、過渡期の自動運転モードを使用するとき、ドライバーは直接に外部環境の監視などはしていない。主にシステムがセンシングシステムを使用して周りの環境及び障害物をセンシングしている。安全状況は常に確認している。その後 HMI を通してドライバーに提示するのが流れだ。

4.3. ヒヤットとする原因とユーザーエクスペリエンスが低下する要因について

自動運転においての合流はどの環境でも被験者はヒヤットすると観測された。このヒヤットとする原因を少し考察すると、二つ原因はがあると推測している。まず一つは、自動運転の時に、車のセンサで安全確認しているが、その安全確認した情報はドライバーに即時に反応していない。これは従来のマニュアル運転から自動運転へ変更した時に、ドライバーの役割が変化したのも影響の要因だと考えている。もう一個は自動運転を使用する時にドライバーが合流車を気づくタイミングが遅すぎた、発見する場合はもう従来の自分が危険だと認知する距離で、不安になる。ということは適宜のタイミングでの情報共有によって、

このヒヤットとする原因は解消できると推測できる。では、この役割の変化によって、ドライバの行動はどう変化したか、少し考察してみた。以下図はマニュアル運転で追い越しをする場合の流れを示す図である。

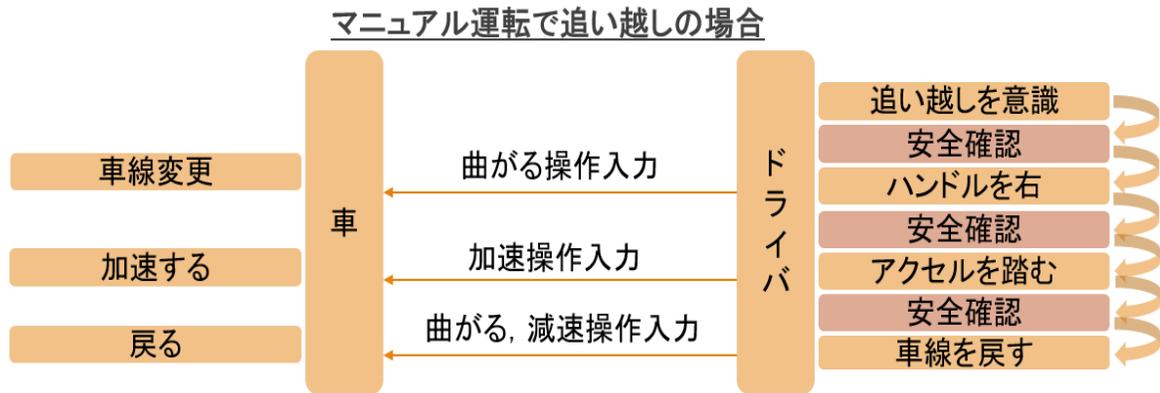


図 41 マニュアル運転で追い越しをする場合の流れ図

マニュアル運転で追い越しをしたいときは、最初はドライバが追い越しを意思始める。その後、後方の安全確認をしてハンドルを右に曲がる。前方の安全確認をしてアクセルを踏んで加速する。最後はまだ安全確認をしてもとの車線に戻る動作で追い越しを完成する。図からわかるように、この場合はドライバが安全確認をしている、それと同時に安全情報を得て、安心して運転している。一方、以下図は移行段階中の自動運転モードを使用するときの操作流れを示している。

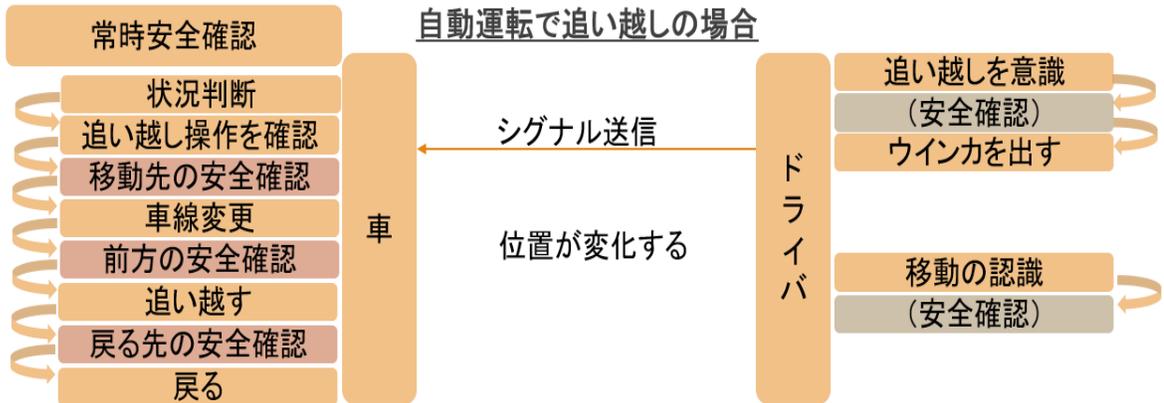


図 42 自動運転で追い越しをする場合の流れ図

これはウインカーを出すと追い越し操作を実行する自動運転モードを想定している。この場合はまずドライバーが追い越したいとウインカーを出して、自動運転システムに追い越しの命令を下す。車側が常に安全確認をしているので、命令を受けたら、内部のシステムの処理Queueに応じて、状況を判断し、安全を確認しながら追い越し動作を完成させる。以下図は自動運転モード内部で処理する行動決定のシーケンス図を示している。

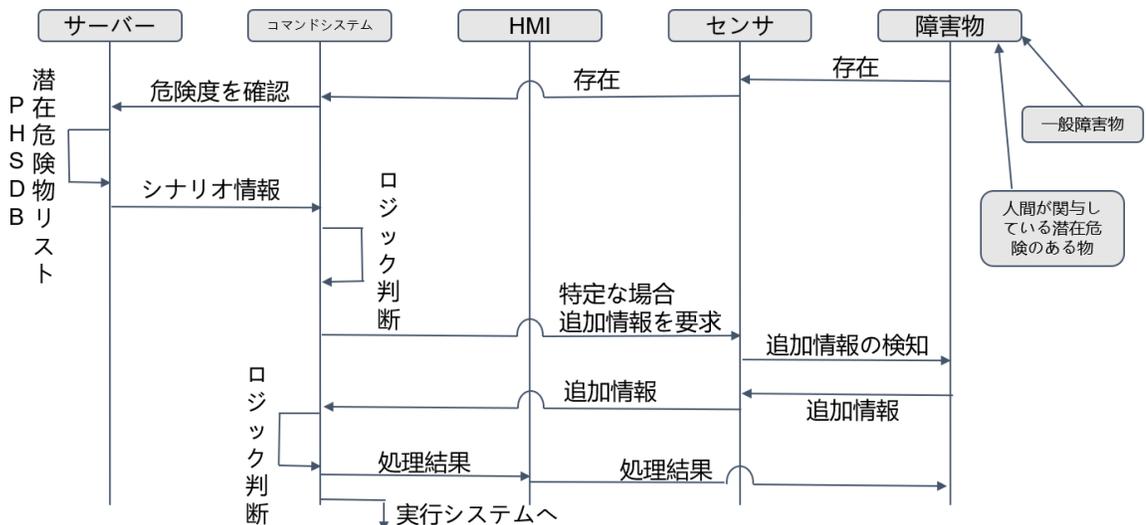


図 43 自動運転モード内部で処理する行動決定のシーケンス図

この場合、安全確認は全部車側で処理している。車がドライバに何の情報も提示しない場合、ドライバは単純に車の位置変化を感知して、安全かどうか分からなく、不安になる可能性が高い。しかも従来のマニュアル運転習慣による安全確認の習慣はまだ残っており、車線変更するたびに安全確認はしたくなるのも現状だ。習得スキルはその場の状況によって反射的に作動する可能性があるため、状況が似ている移行段階中自動運転モード利用時とマニュアル運転時の意識が混合してしまう可能性が高く、これもユーザーエクスペリエンスを低下させる要因だと考えられる。

4.4. 移行段階中の自動運転車に対するインタフェースの再構築

移行段階中の自動運転モードを利用するときのインタフェースについても考察してみた。理想な情報種類及び情報提示の方法についても考えた。情報の共有は主に対象の関係性で2つに分けられる。ドライバと自動運転システムの情報共有及び自動運転車と外部環境の情報共有。

4.4.1. ドライバと自動運転車の情報共有

最初は自動運転システム内部ユニット、コマンドシステムとHMIの相互作用を分析した。以下図はそれを示す図である。

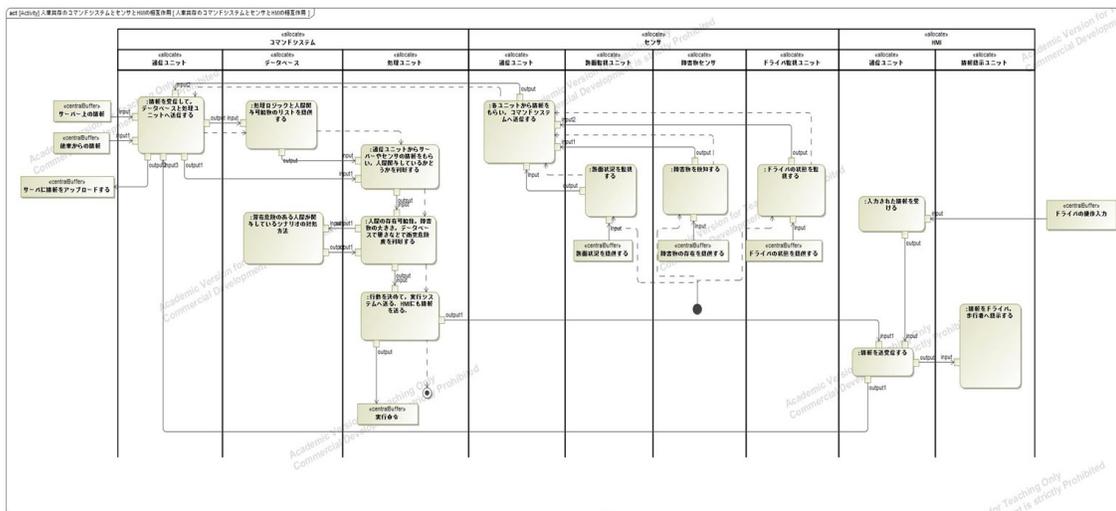


図 44 コマンドシステムとHMIの相互作用

流れとしてはシステムがセンサを通して外部から様々な情報を得ている。センサには各ユニットから得た情報をコマンドシステムへ送信する通信ユニット、路面状況を監視する路面監視ユニット、障害物の存在を検知する障害物センサ、ドライバの状態情報を収集するドライバ監視ユニットで構成されている。各ユニットで得た情報は処理ユニットに送信し、処理ユニットは事前に設定されたロジックに基づいて、行動を判断して車を制御している。ここで情報はHMIを通して自動運転システム外部にいるドライバや他の歩行者、車に送信される。したがって、HMIのデザインは情報伝達の重要なポイントになる。以下図はHMIと人の相互作用をまとめたものを示している。

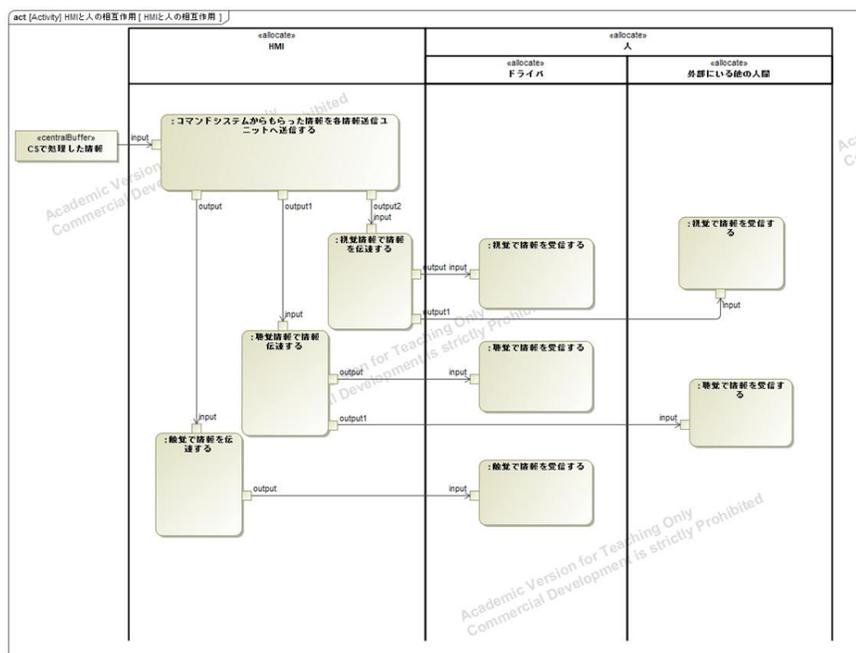


図 45 HMI と人の相互作用

人間の情報受信器は限られている。視覚、聴覚、臭覚、触覚などがある。車を運転するためには、視覚聴覚及び触覚が必要となる。HMIもこの3つの感覚を通してドライバに情報を送受信しかない。

4.4.2. 自動運転車と外部環境の情報共有

自動運転モードは非常にIoTな技術でもあって、近年は5Gなどの通信技術と連携して様々な新しいサービスが開発されている。そこでのキーポイントは即時性のある情報の伝達及び運用にある。国土交通省もすでに平成23年に通信利用型運転支援システムのガイドラインを出している。これを利用したデータベースの構築は非常に実用性が出てくる。最終的にレベル5の自動運転には、独自でシナリオを解析し、最適化された行動をシステム単体で完結する必要があるため、移行段階中の自動運転モードはこれについてのインターフェースも更新しなければならない。以下図は外部環境と情報共有するイメージを表示する図を示している。



図 46 自動運転が情報共有するイメージ図

過渡期の自動運転モードのもう一つ重要な役割は教師データの収集にある。完全な自動運転モードの処理ロジックを完成させるためには非常に絶対数の大きいデータベースを構築する必要があると想定されるため、移動通信技術と連携してこのインターフェースを構築するのが理想だ。

4.5. 情報共有に適合する感覚について

4.5.1. 視覚

視覚は人間の情報入力 of 80%と言われてきた。近年は情報の90%は視覚からだと言われるようになって、非常に優位な感覚だと思われている。実際、基本文献によると、最も代表的な文献「産業教育機器システム便覧」と「屋内照明のガイド」（1978年出版）である。この2つの文献は人間の五感である視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚に分けて、各感覚が全感覚の比率をパーセンテージで示されている。「産業教育機器システム便覧」では、視覚は感覚入力の83%を占めると説明している。「屋内照明のガイド」では、感覚によって情報を収集する能力が違って、視覚が最も重要で情報収集能力も高く、全感覚で得る情報の87%を占めている。照明に関する書類なので、視覚は重要だと説明しただけだ。定量化分析ができたのはシュミット（1980）「感覚生理学」、塚原伸晃（1984）「脳の情報処理」がある。

しかし、視覚情報によってすべての安全情報を伝達するのが本当に良いのか。非常に量が多い情報が流れ込む視覚には、そこで情報を追加して、他の大量な情報と同時に処理するには、注意力が必要だ。しかし移行段階中のドライバはハンドルを離してはいけない、注意力もある程度前方道路上に集中する必要がある。視覚情報は視野内部にあるかどうかも確定できない状態であって、有効性についてはまだ再検討の必要がある。

反応時間についてだが、視覚刺激検知に要した時間は平均で195msec、感覚の中では早い方。

4.5.2. 聴覚

聴覚は空気の振動を感知して音を知る人間が持つ機能で、感覚の一種である。聴覚器官の耳は外耳、中耳および内耳に分類されている。聴覚は全感覚から入力された情報の約3%に占めていると言われている。一つの器官で約3%の情報を

処理しているので、かなり精度の高い処理能力及び注意喚起がしやすくなる感覚とも言える。

反応時間については、聴覚刺激検知に要した時間は平均で 231msec.

聴覚は少ない情報量を処理している器官で、視覚の様に大量な情報を一気に流れ込むことはないが、反応時間が少し長い。それと同時に、自動運転の環境では、ドライビングシミュレーションと違って、音の環境については非常に複雑だと想定される。音声情報による安全情報の伝達に適合するのかわり高度な検証計画が必要。

4.6. 自動運転モードとマニュアル運転における内外環境の変化と相互作用について

自動運転モードを使用する時は、マニュアル運転と比べたドライバの役割の変化が最大のコンテキスト変化である。レベル5のような完全な自動運転モードでは、ドライバの役割である車を運転する操作はなくなるが、現段階で普及しているレベル2からレベル3では、必要に応じてドライバに運転の権限が譲渡される。マニュアル運転では、車、ドライバ、運転支援システム及び外部環境の間では、ドライバが主導的に車を操作して他のものとかかわっていた。この場合、ほぼすべての情報はドライバに直接に入出力される。一方、レベル2からレベル3の自動運転モードでは、条件付けで車が主導権を握り、センシングシステムを使用して安全確認などを行っている。この状態では、運転に関する情報の一部は車が把握しているため、マニュアル運転と比べ、ドライバはより少ない情報しか持っていない。そのため、従来の運転習慣による、行動前に安全確認を行うという動作の機能ができなくなる。そこで、ドライバと車の間で情報共有を行うことで、運転体験を向上させることができる。すなわち、自動運転モードでも、マニュアル運転の運転習慣を考慮して、ドライバへの情報共有を高めることで、運転時の精神負荷や行動負荷を軽減できるようなインタフェースの構築が望まれる。

4.7. 音声インタフェースとドライバの運転負荷について

本実験では、情報共有とドライバの運転負荷との関係について検討を行うため、音声情報提示による情報共有実験を実施した。実験結果では、音声情報の提示により、被験者の RRV が相対的に大きくなるという結果が観察された。これは音声情報を提示することで、ドライバが車との情報交換を活発に行うことで、ドライバは周囲環境からの情報収集を行い、車をコントロールできているという安心感を持つことに貢献していると考えられる。人間は五感を持ち、聴覚による情報共有だけではなく、視覚、触覚、臭覚等の他の感覚についても同様な、またはこれ以上の効果を持つことも考えられる。そこで、今後の研究では、他の感覚についても検討を行い、どの感覚を用いることが最適な情報共有につながるかについて明らかにし、移行段階における自動運転車のインタフェースとしてより適正の高い安全安心なシステムを構築したい。

4.8. 安全確認情報共有の最適タイミングについて

ここでの実験から、情報共有のタイミングが非常に重要な要素であることが分かった。今回は安全情報に注目して実験を行った結果、情報は適切なポイントで提示することが有効に作用することが検証された。タイミングが遅すぎると提示なしよりドライバを緊張させる可能性がある。今回の実験で不足している条件としては、150m 以上のドライバの視野範囲外で情報を提示した場合は顧慮しなかった。広範囲で計測を行い、ドライバの RRV の減少率の増減が確認されれば、安全確認情報の最適な提示点を明らかにすることができる。今後の実験ではより広い範囲のシミュレーション空間を作る必要がある。

また、情報提示実験でのドライバの観察からは、レベル 2 からレベル 3 の自動運転モードを使用するドライバは、依然としてマニュアル運転の運転習慣で車に乗っていると推測できる。そこで、自動運転モードのインタフェースを設計する際には、自動運転のユースケースを考えるだけではなく、よりドライバを

安心させるために、従来のマニュアル運転の習慣を考慮しながら、操作インタフェースの設計を行うことが望ましいと考えられる。

4.9. 被験者属性と RRV 変化への影響について

実験の中では、自動運転モードに対する意識に差がある場合を記録された。特に自動運転に対する信頼感が自動運転モードを使用する時に大きな影響を与えていると推測している。インタビューをしたところで、同じ車で運転スキルも大体同じなドライバーに対して、利用時は常にブレーキを踏もうとしている人と完全に足をリラックスしている人があった。心拍変動量及び精神負荷についての影響はデータの絶対数が足りないため、有意な結果を得られなかったが、影響を与える可能性は否定できない。

その他、運転スキルや性格も RRV 変化に影響を与える可能性が高い。考えられる要素としては、繊細や臆病な性格が著しく RRV の変化が激しい可能性が推測できる。しかし、これらの生態情報や主観的なデータを可視化、定量化にするのが本実験では非常に困難であったため、あくまでも考察するまでである。

4.10. 情報獲得時間点について

マニュアル運転の時に、ドライバーは多種たる事を常に確認しながら運転してきた。安全確認のチェックポイントだと言えよう。例を挙げると、追い越しをする時に、複数回安全確認をするのが普通である。隣車線が空いているか、前方に障害物はあるか、後方に障害物や車両はあるか、追い越し行動を完成できる距離は足りるかなど複数のチェックポイントはあるはずだ。一方、自動運転モードを使用する時に、追い越しという作業は単純にウインカーを出すまたは音声命令で自動運転システムへ実行命令を下すだけで、自動運転車はそのまま周りの安全確認をして、追い越し実行可能かどうかを判定してから実行する。もしこの場合で何の情報も共有しないであれば、ドライバーは自動運転が安全だと分かっている場合、慣れないうち、自動運転に対する信頼度は極めて高い以外の場合、ヒヤットとする可能性が高い。何故なら不完全な自動運転に対して、操

作行動はマニュアル運転と類似しているが、差はある。このいくつかの差が操作感覚にズレを生じさせ、車が完全に自分の制御ではないと意識させ、不必要なヒヤッとする感覚が発生すると推定している。

4.11. 学習された行動が類似行動へ与える影響について

認知及び意識方面で行動特徴をまとめる必要もあると思われる。我々人間も動物の一つで学習及び記憶についての仕組みによると、一旦学習を通してある行動を記憶し、数回繰り返すことによって体も自然にその条件に反応して、反射的な行動は起こる。従来マニュアル運転をしてきたドライバーは、マニュアル運転についての技能及び習慣はまだ残っている。運動と少しは違うが、同じく練習と経験を重なって上達してきた運転スキルはそのまま記憶に刻まれていた。この経験によって得られたスキルは移行段階中の自動運転車を利用する時に邪魔する。同じくハンドルを握る動作ではあるが、マニュアル運転はすべて自分でコントロールしている。一方、自動運転モードは自動運転システムが多くの環境をコントロールしている。ハンドルを握っているため、脳の認知では、自分はマニュアル運転している錯覚する可能性がある。それでマニュアル運転の感覚で操作を試し、反射的に回避動作をするなど、しかし、自動運転システムが作動しているので、そのような行動を取るのができない。ここで生じた不調和感がヒヤッとする要因の一つだと考えられる。

4.12. 実験の順序効果及びより高度な分析について

心拍数 RRI は時間と共に変化する量で、実験回数を重ねることで落ち着くと考えられる。時間経過要因である学習効果や飽きなどを考慮して、実験の順番を入れて分析した。また、シナリオや情報提示の変数をより分かりやすくするため、変換下変数を増やした。「S=特殊な情報提示」というデータは、情報量は半分提示と同じで、及び提示方法が特殊と二つの要因を持っている。そこで、分解して新しい変数を作って分析してみた。そこで、以下の表で示す三つの結果を統制しても、情報量がない時より、全情報を提示し

た方が RRV の低下が軽減し、落ち着くことを 5%有意で示せた。また、特殊な情報提示方法を外し、純粋な情報量だけで比較した結果、よりいい結果となった。それに、情報量は半分な場合でも、有意ではないものの、情報量がない場合よりは、RRV の低下が軽減し、落ち着くという結果だった。データは以下通りに変化した。情報提示量：なし = 0，半分提示 = 1，全部提示 = 2，情報の質：特殊 = 1，それ以外 = 0，シナリオ難易度：A = 2，B = 0，C = 1（数字が大きいほどシナリオが複雑になり、難易度が高い），性別：男性 = 1，女性 = 0。

表 12 データ変換した解析結果

(I) 情報量	平均値の差 (I-J)	標準誤差	有意確率	95% 信頼区間		
				下限	上限	
.00	1.00	-0.133621491	0.070465736	0.145	-	0.0338814552
	2.00	-.2110978262*	0.081366823	0.029	-	-
1.00	.00	0.133621491	0.070465736	0.145	-	0.3011244373
	2.00	-0.077476335	0.070465736	0.517	-	0.0176820840
2.00	.00	.2110978262*	0.081366823	0.029	0.0338814552	0.3011244373
	1.00	0.077476335	0.070465736	0.517	0.2449792814	0.0900266111

観測平均値に基づいています。

誤差項は平均平方（誤差） = .099 です。

*. 平均値の差は 0.05 水準で有意です。

順序を入れて解析した結果は以下の表で示している。

表 13 順序を入れた解析結果

(I) 情報量	平均値の差 (I-J)	標準誤差	有意確率	95% 信頼区間	
				下限	上限
.00 1.00	-0.1336214910	0.06955338315	0.138	-	0.0318789752
				0.2991219573	
2.00	-.2110978262*	0.08031332897	0.027	-	-
				0.4022013037	0.0199943487
1.00 .00	0.1336214910	0.06955338315	0.138	-	0.2991219573
				0.0318789752	
2.00	-0.0774763352	0.06955338315	0.508	-	0.0880241311
				0.2429768014	
.00	.2110978262*	0.08031332897	0.027	0.0199943487	0.4022013037
1.00	0.0774763352	0.06955338315	0.508	-	0.2429768014
				0.0880241311	

観測平均値に基づいています。
 誤差項は平均平方 (誤差) = .097 です。
 *. 平均値の差は 0.05 水準で有意です。

特殊な情報提示方法要素を外し、純粋な情報量で解析した結果は以下の表で示している。

表 14 純粋な情報量で解析した結果

(I) 情報量	平均値の差 (I-J)	標準誤差	有意確率	95% 信頼区間	
				下限	上限
.00 1.00	-0.1048995589	0.07886186558	0.383	-	0.0838266535
				0.2936257714	
2.00	-.2110978262*	0.07886186558	0.025	-	-
				0.3998240386	0.0223716138
1.00 .00	0.1048995589	0.07886186558	0.383	-	0.2936257714
				0.0838266535	
2.00	-0.1061982673	0.07886186558	0.374	-	0.0825279452
				0.2949244797	
.00	.2110978262*	0.07886186558	0.025	0.0223716138	0.3998240386
1.00	0.1061982673	0.07886186558	0.374	-	0.2949244797
				0.0825279452	

観測平均値に基づいています。
 誤差項は平均平方 (誤差) = .093 です。
 *. 平均値の差は 0.05 水準で有意です。

重回帰分析も実行してみた。RRV を Y にして重回帰分析をした。以下表は重回帰分析の結果を示している。結果によると、時間経過要因である実験順番を統制しても、情報量の影響は5%水準、シナリオ難易度は10%水準で有意に出た。情報量が多いほど、またシナリオ難易度が低いほど、RRV の低下が軽減され、被験者が落ち着く。また、前者の効果が最も高いことが分かった。

表15 重回帰分析

モデルの要約

モデル	R	R2 乗	調整済み R2 乗	推定値の標準誤差
1	.341 ^a	0.116	0.069	0.38990240100

a. 予測値: (定数)、[%1:, 順番:

分散分析^a

モデル		平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
1	回帰	2.254	6	0.376	2.471	.028 ^b
	残差	17.179	113	0.152		
	合計	19.433	119			

a. 従属変数 RRV

b. 予測値: (定数)、[%1:, 順番:

モデル		非標準化係数		標準化係数	t 値	有意確率
		B	標準誤差	ベータ		
1	(定数)	-0.576	0.456		-1.262	0.209
	年齢	0.015	0.017	0.083	0.867	0.388
	運転歴	-0.027	0.031	-0.101	-0.880	0.381
	性別	-0.130	0.106	-0.148	-1.221	0.225
	情報量	0.105	0.050	0.185	2.091	0.039
	シナリオ難易度	-0.093	0.049	-0.189	-1.882	0.062
	順番	-0.001	0.012	-0.011	-0.112	0.911

a. 従属変数 RRV

4.13. 今後の展望と課題

本研究では、過渡期自動運転モードに対してドライバの行動を明らかにするためにドライビングシミュレータを構築し、没入型ドライビングシミュレータを開発して実験を行った。過渡期初期では、ドライバはマニュアル運転のスキルによって、自動運転モードを使用するときに予想外の動きによるユーザーエクスペリエンスの低下が観測された。これに対して、マニュアル運転の様に求められる安全情報及び周囲環境の状況をドライバに共有することで低下は軽減できる。しかし、完全にマニュアル運転と同様に情報を提示すれば、自動運転モードのドライバ運転負荷軽減の機能はできなくなる。運転負荷の低減とユーザーエクスペリエンスの保持のバランスポイントを模索するのが重要になる。今回実験では、自動運転モード独自の安全情報提示方法を試したが、実際の運転上の精神負荷軽減効果はまだ効果的だといえない状態。しかし、今回の被験者は全員ハイレベルの自動運転モードを使用した軽減がないのが原因で、完全に新しいシステムを使用している。熟練していないシステムを使用するときに、ワークロードが高くなるのが普通。熟練した後の状態での検証も必要となる。しかし人間は新しいシステムの操作方法や使用方法を熟練したら、他のスキルへの影響が出る可能性も高い。過渡期を再定義してより適合している運転スキルと意識の遷移補助システムを構築するのが今後の課題になるだろう。

5 章

結論

結論

本研究では，移行段階いわば過渡期の自動運転モードに対して，没入型のドライビングシミュレータを構築し，観測及び実験を通して，ドライバはどのような行動を取るのかを明らかにした．その後，ドライバに対し，どのような情報を提示したら，より安心して乗れるかを検証した．これらのことを用いて，より円滑に過渡期を通過するようなインタフェースの設計に方向を示した．以下は本研究で得た結論をまとめたものである．

- 1) 自動運転モードはマニュアル運転より車間距離をとる傾向がある．
- 2) 過渡期の自動運転モードを使用するときでも，ドライバの集中及び覚醒度はマニュアル運転より低く，合流車などの障害物を発見する距離が短い．
- 3) 手段を問わず，移行段階中の自動運転モードを利用するドライバに対し，即時の情報共有することで，より安心して乗れることが分かった．
- 4) 過渡期の自動運転モードを使用する自動運転に対する習熟度が低いドライバに対して，従来のマニュアル運転の様にチェックポイントで安全情報を提示することで，自動運転モードを使用する精神負荷を軽減することができる傾向が観測された．
- 5) 必要な方向の半分安全情報を提示することより，同じ程度の頻度で方向指定なし，周りが安全という結果を示した方がより効果的．

- 6) 情報獲得の最適な時間点はドライバの運転スキルによるもので、過渡期の自動運転モードを利用するときも同様で、マニュアル運転の時にチェックポイントをチェックするタイミングと同じの方は効果が高い傾向がある。

- 7) 過渡期の自動運転モードの普及をより円滑にするため、マニュアル運転スキルによる自動運転モード使用感覚の干渉を取り除くため、新システムを使用することを意識して、無駄な反射行動によるヒヤットとする状況を解消することが可能と推測する。

- 8) 過渡期の自動運転システムには教師データの構築ユニットを実装する必要がある。

謝辭

謝辞

本研究をすすめることにあたり、丁寧なご指導を頂いた慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科小木哲朗教授及び谷口尚子教授を始めとする、先生方、講師の方々に深く感謝いたします。

実験環境を構築する当初にあたっては、OBの伊藤様、システムデザイン・マネジメント研究科西村研究室のユン様、三浦様、手嶋様に実験機器の構築への援助及びシナリオ作成に対する助言を賜りましたことを、厚く御礼申し上げます。

また実験に際しては、多忙にも関わらず実験に参加し、検証実験を協力していただいた被験者の皆様にも、深く感謝の意を表します。

最後に、研究を進めるにあたりご助力頂いた、諸先輩方及び同期の方々に深く感謝するとともに、心底から敬意を表します。

参考文献

堀内 尚行, 早川 聡一郎, 池浦 良淳, 沢井 秀樹, 三浦 祥太, 三田 誠一, “RRV法を用いた自律走行車の減速動作の乗り心地評価”, 生体計測とヒューマンファクタ年次大会講演論文集: JSME annual meeting 2010(7), pp. 411-412.

江本 正喜, 正岡 顕一郎, 菅原 正幸 “広視野映像システムの臨場感評価”, 電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎(2007) 106(496), pp. 25-30.

西村 秀和, “2014年度ソフトウェア工学分野の先導的研究支援事業「システムモデルと繰り返し型モデル検査による次世代自動運転車を取り巻く System of Systems のアーキテクチャ設計」 成果報告書”. 慶応義塾大学, (201)

雨宮 智浩, 安藤 英由樹, 何 寛, “五感インタフェースによるノンバーバルコミュニケーション” NTT コミュニケーション科学基礎研究所, NTT 技術ジャーナル (2007), pp35-37.

広瀬 通孝, “五感工学の基礎”映像情報メディア学会誌(2007)Vol.61, No.10, pp1405-1411.

船橋新太郎, “学習と記憶のメカニズム”一般社会法人電気学会学会誌
(1995)Vol.115, No.12

嘉戸直樹, 伊藤正憲, “運動学習はここまで変わった”J. Kansai Phys. Ther.
8(2008), pp49-52

教育機器編集委員会 委員長石川淳二編: 「産業教育機器システム便覧」, 第1
版, 日科技連出版社, 4,1972

社団法人照明学会編「屋内照明, のガイド」, 電気書院, 1978.

Schmidt, R.F(Ed): Fundamentals of Sensory Physiology, Springer-Verlag, New
York, 1978, 岩村吉晃 (他訳), Schmidt 編「感覚生理学」, 金芳堂, 1980.

塚原仲晃 (編) 「脳の情報処理」, 朝倉書店, 1984.

SAE (2016). Taxonomy and definitions for terms related to driving automation
systems for on-road motor vehicles. J3016.

樋渡涓二「視覚と聴覚はどう違うか」, テレビジョン, 第31巻, 第11号, 1977

藤原 由貴, 吉田 誠, 貝野 彰, 星野 陽子, 岩下 洋平, 山本 康典, 入戸野 広, 「インストルメントパネルのデザインが車載機器の視認性・操作性に及ぼす影響」 *Cognitive Studies*, 25(4), 411-420 (Dec.2018)

小木 哲朗, 廣瀬 通孝 「データ・センシュアライゼーション環境の開発」, *Human Interface News and Report*, 8, pp.139-144(1993)

野間 春生, 岩田 洋夫 「フォースディスプレイを用いた高次元ボリュームデータの力覚表現」, 9th Symposium on Human Interface 講演論文, pp. 121-128 (1993)

加藤 宏 「『視覚は人間の情報入力の80%』説の来し方と行方」 *National University Corporation Tsukuba University of Technology Techno Report Vol.25* (1), 2017

石田 久之, 視覚障害の心理的影響, 佐藤泰正編著, 「視覚障害心理学」, 学芸図書, 1988

Zimmerman, M.: *Neurophysiology of Sensory Systems*. In “Fundamentals of sensory Physiology”, Schmidt, R.F. Ed., Springer-verlag, 1978 (岩村吉晃 他訳「感覚生理学」(1980), 金芳堂。

永井 大介, 長谷川賢一 「聴覚・視覚刺激反応時間に関する研究」 *昭医会誌* 第46巻 第1号 [27-34頁, 1986]

桑原 大樹, 井口 裕介, 濱上 齊, 山本 晋「Driver Distraction Control 機能の開発」富士通テン技報 Vol.33 No.1

平岡 敏洋, 橘 崇弘, 葛西 誠, 松本 修一「目標車頭時間の視覚情報提示が先行車追従行動に与える影響」土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.71, No.5 (土木計画学研究・論文集第 32 巻), 2015

丸茂喜高, 鈴木宏典, 片山硬: 対向右折車への優先行動が交通流へ及ぼす影響, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.10, pp.614-621, 2012.

関根英仁, 大畑和也, 松永誠二: 安全車間距離保持のための「0102(ゼロイチ, ゼロニ)」称呼の評価に関する研究, 日本交通心理学会大会発表論文集, Vol.73, pp.43-46, 2008.

平岡敏洋: ドライバに安全運転を促す運転支援システム, 計測と制御, Vol.51, No.8, pp.742-747, 2012.

西成活裕「渋滞のサイエンスとその解消法」pp170-173, 日本物理学会誌 Vol. 71, No. 3, 2016

牧野 浩志, 鈴木 一史, 鹿野島 秀行, 山田 康右, 堀口 良太「車線変更行動に着目した

サグ部渋滞発生要因に関する一考察」土木学会論文集 D3 (土木計画学) 特集号,
Vol.71,No. 5

伊藤弘大, 大倉典子「心電を用いた VR システムの感性評価の研究 ～「サマーレ
ッスン」プレイ時の「ドキドキ感」の男女間での比較～」 「エンタテインメント
コンピューティングシンポジウム (EC2017) 」2017 年 9 月

伊藤弘大他: 生理指標を用いた車載機器の情報提示による「わくわく感」の評価ー
車外風景に関する事前情報付与の影響の HRV 解析ー, 日本感性工学会論文誌,
TJSKE-D-16-00083 (2017).

伊藤弘大他: 心電を用いた VR システムの感性評価の研究 ～「サマーレッスン」プ
レイ時の「ドキドキ感」評価 ～, 信学技報, vol. 117, no. 30, HIP2017-26, pp. 173-
175 (2017)

西崎友規子, 永井聖剛, 河原純一郎, 佐藤稔久, 根本英明「ドライバの認知機能
特性に基づく運転行動分析」自動車技術会 Vol.44,No.4,pp.1059-1065,July 2013.

山田 純嗣「実車とシミュレータを用いた高齢者ドライバの安全運転特性の分析に
関する研究」慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科, シス
テムデザイン・マネジメント専攻 2011 年度 修士論文

大谷亮 道路周辺環境がドライバの危険度評価と運転行動との関係に及ぼす影響—
運転シミュレータに見通しの良い道路と住宅街を模擬した実験から— 交通心理学
研究 25(1) 1-12 (2009)

西村秀和「2014 年度ソフトウェア工学分野の先導的研究支援事業『システムモデ
ルと繰り返し型モデル検査による次世代自動運転車を取り巻く System of Systems
のアーキテクチャ設計』成果報告書」慶應義塾大学, 2016

日高 洋祐, 牧村 和彦, 井上 岳一, 井上 佳三, 「MaaS モビリティ革命の先にある全
産業のゲームチェンジ」日経 BP, 2018

古川 修, 「自動運転の技術開発—その歴史と実用化への方向性」グランプリ出
版, 2019

湯 進「2030 中国自動車強国への戦略 世界を席卷するメガ EV メーカーの誕生」日
本経済新聞出版社, 2019

松岡 由幸, 氏家 良樹, 浅沼 尚, 高野 修治, 伊豆 裕一, 佐藤 浩一郎, 加藤 健郎, デザイ
ン塾 「M メソッド: 多空間のデザイン思考」近代科学社, 2013

松浦 隆信, 佐藤 啓太「臨床心理学に基づく自動運転における不安の類型化と
対策」自動車技術会論文集, Vol.48(2017)No.1, pp141-146

Cha.D: Driver workload comparisons among road sections of automated highway systems, In proceedings of the society of automotive engineers 2003 world congress, technical paper 2003-01-0119(2003)

細川崇, 小竹元基, 鎌田実, 金森等, 不破本義孝, 梅村祥之「高齢運転者の日常運転行動記録を基にした右折時不安全行動の把握とその評価」自動車技術会論文集, Vol.39, No.4, pp.141-146, July 2008

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

西堀泰英, 森川高行, 谷口綾子, 富尾祐作「無人タクシー試乗体験時の利用意向の要因分析」自動車技術会論文集, Vol.49, No.4, pp.874-879, 2018

向江秀之, 村岸裕治, 小野英一, 沼崎一志, 葉山良平「高度運転支援システムのHMI原則」計測と制御, 第54巻, 第11号, pp.841-844, 2015

大谷亮, 江上嘉典, 佐藤健治, 三井一志, 阿部正明「自動運転状況下におけるドライバへの情報伝達方法」自動車技術会論文集, Vol.47, No.4, pp.961-966, 2016

岩倉成志, 西脇正倫, 安藤章「長距離トリップに伴う運転ストレスの測定-AHSの便益計測を念頭に-」土木計画学研究・論文集, Vol.18, No.3, pp.439-444, 2001

島田和典, 島田英昭, 毛利広, 今関隆志, 風間恵介「自動車運転者における交通安全能力への意識とその構造」自動車技術会論文集 Vol50, No.3, pp891-896, 2019

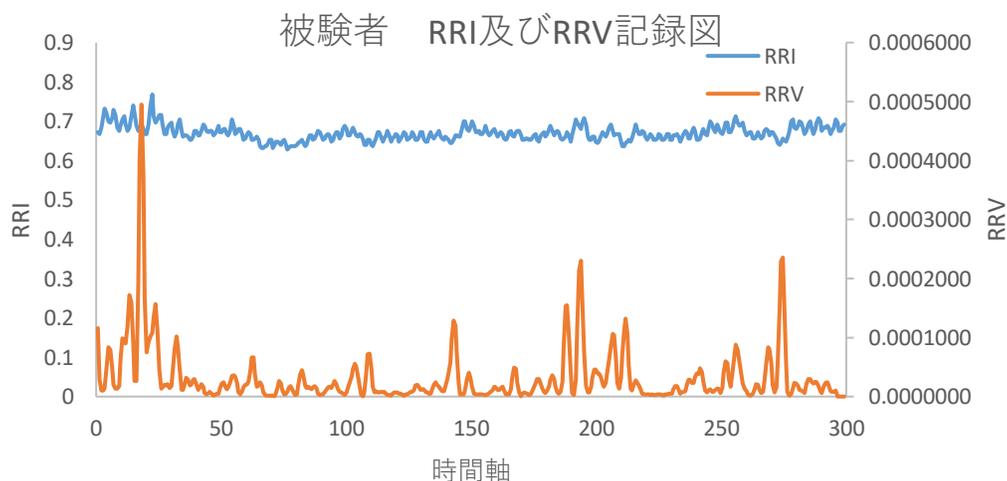
付録

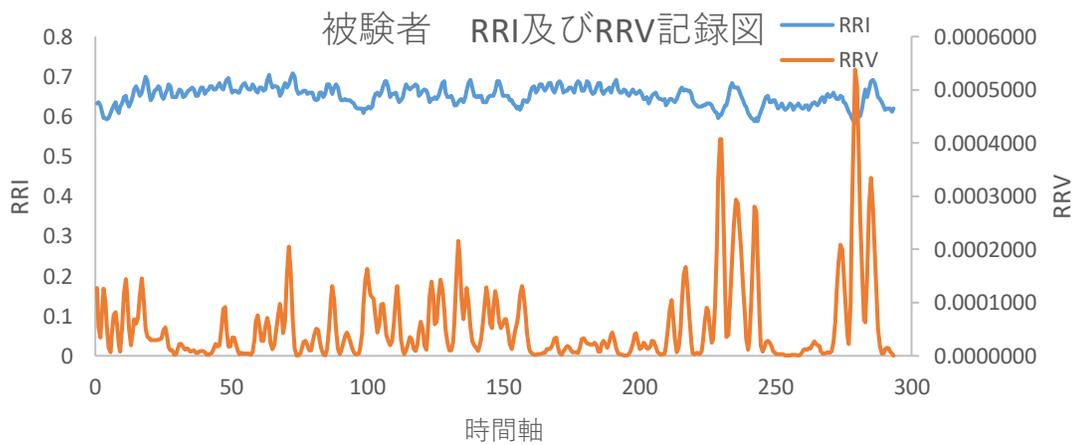
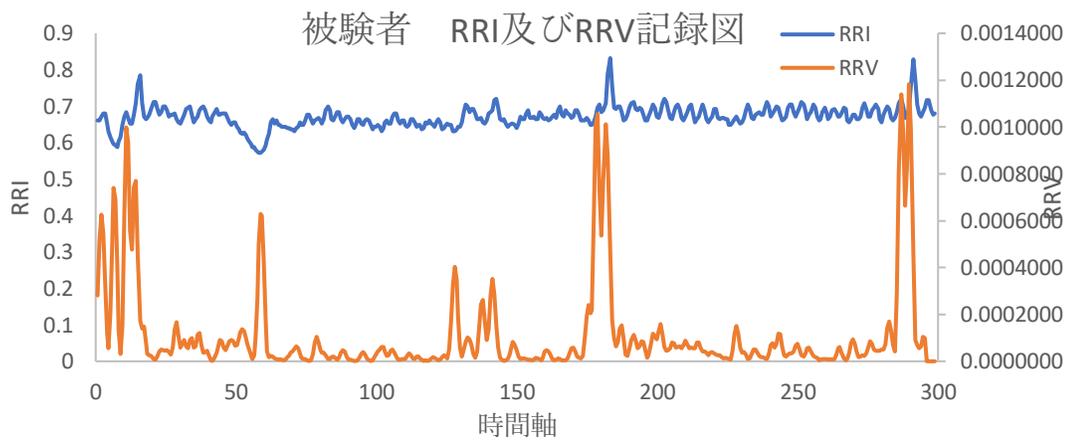
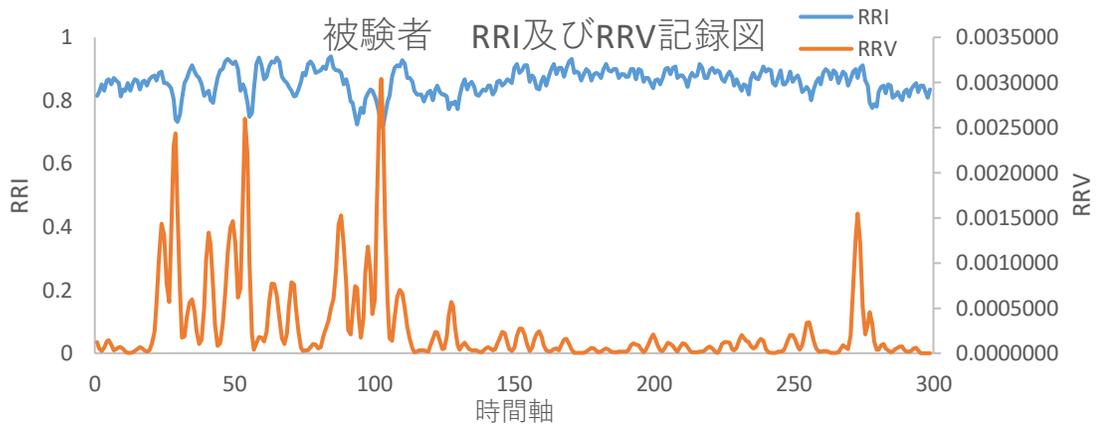
実験の記録データ

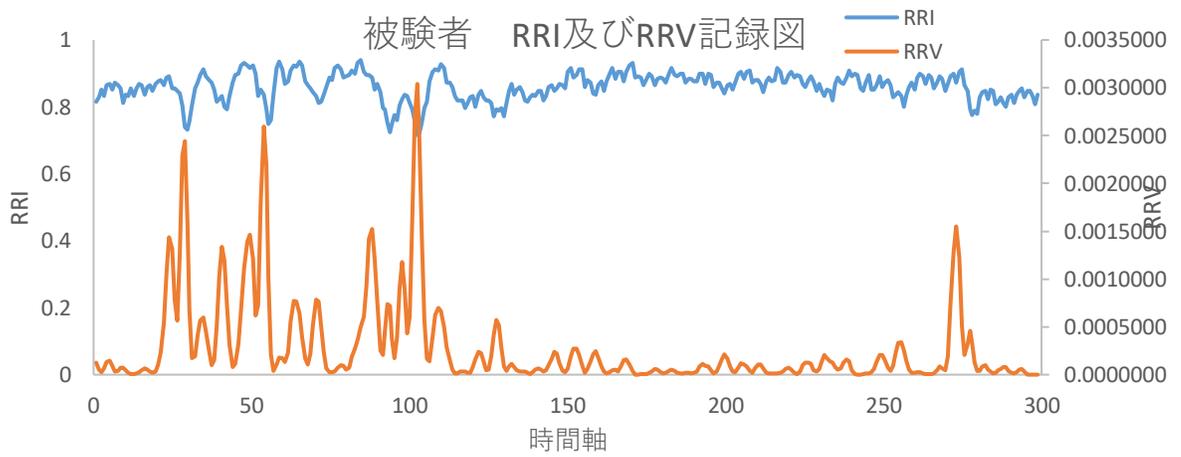
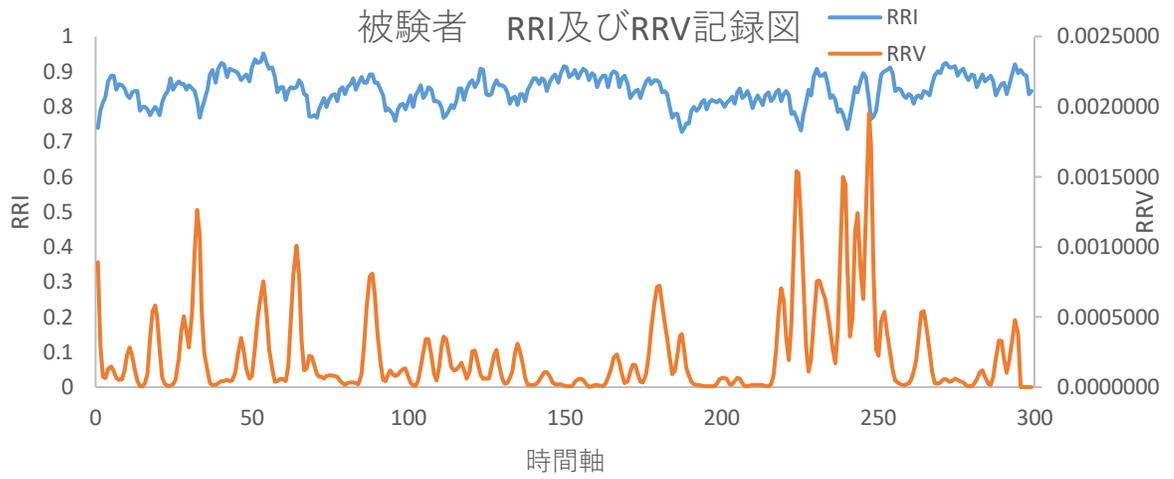
最終実験の段階では被験者一人あたり実験は 20 分から 30 分の心拍間隔を記録した。個々の心拍間隔が異なるが，データの数としては一人あたり約 2000 個，表にまとめたら非常に量が多く，直観性も足りないと判断し，図にしてまとめた。心拍変動量 RRV も RRI の移動平均値の分散で，数も一人あたり約 2000 個で，同様に，図にしてまとめた。同一実験同一被験者での重複実験のデータは割愛した。

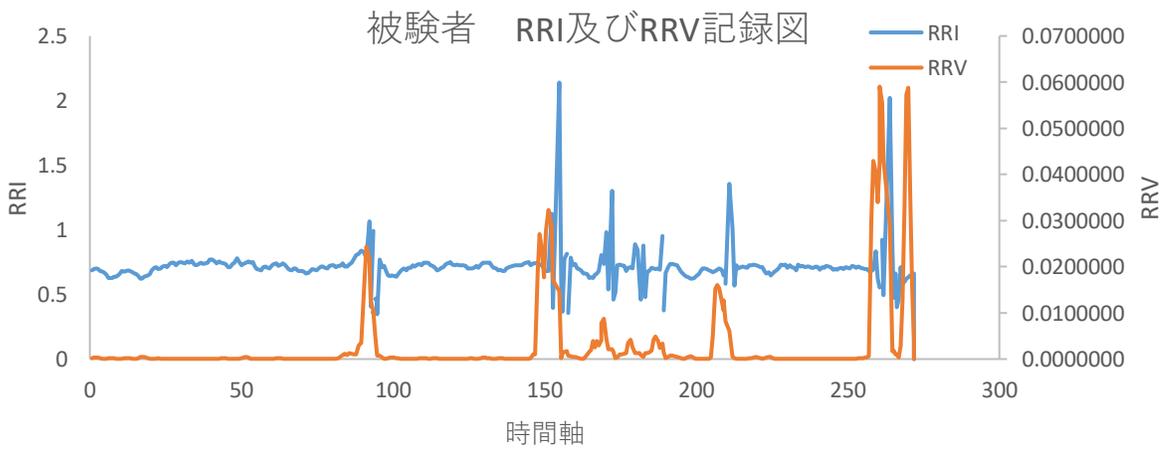
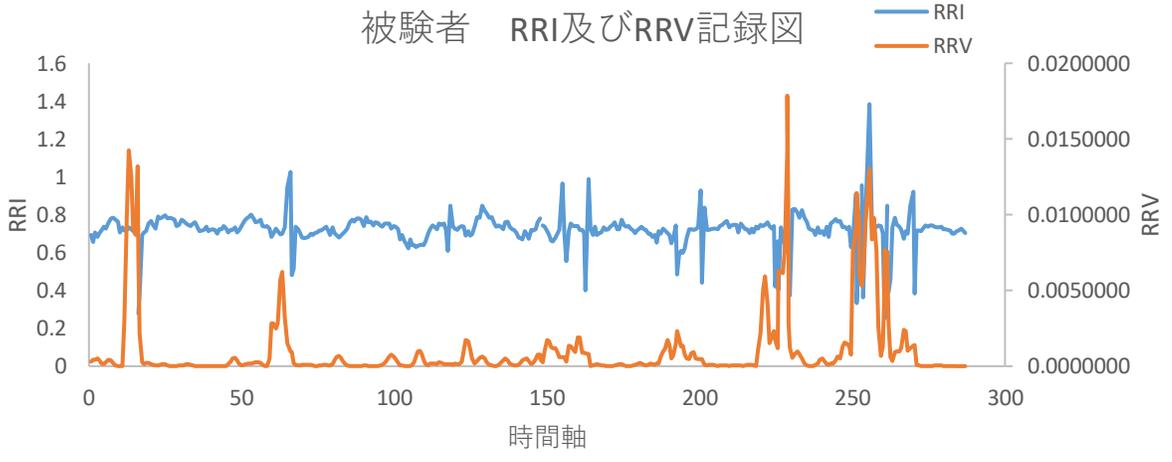
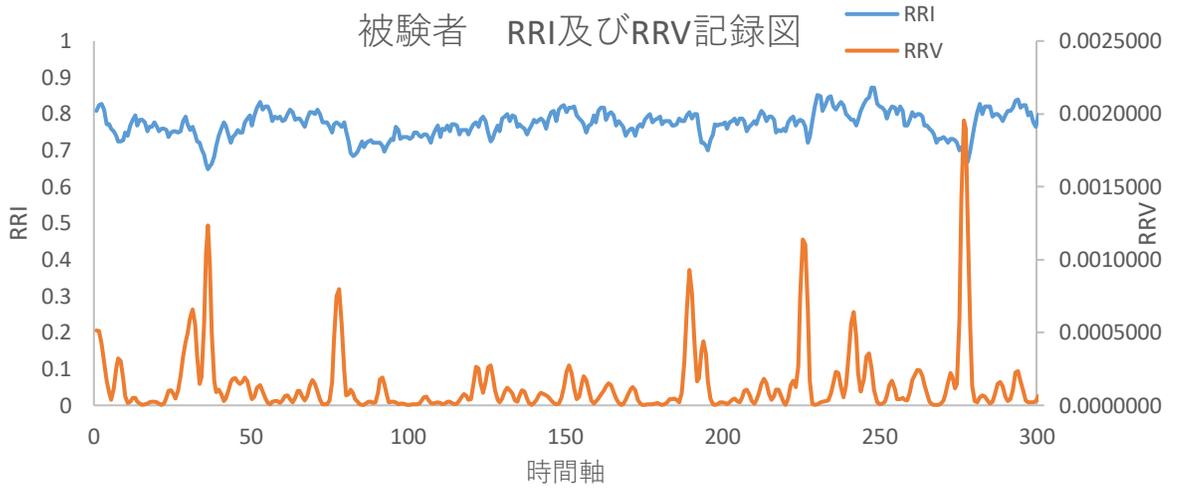
以下図は被験者の RRI 及び RRV を示したものである。HRV は一回 300 秒を記録するもので，以下の図も 300 秒ごとのデータを示している。図番号は省略している。

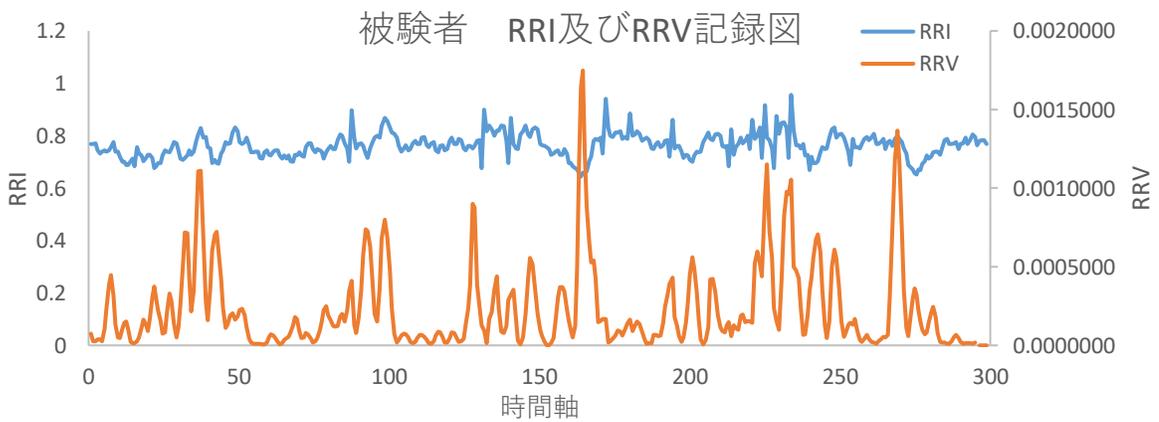
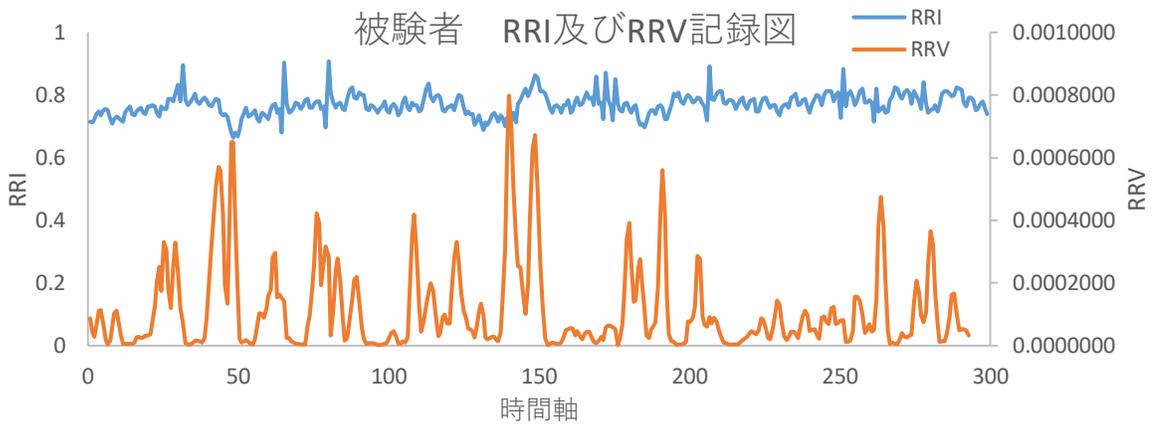
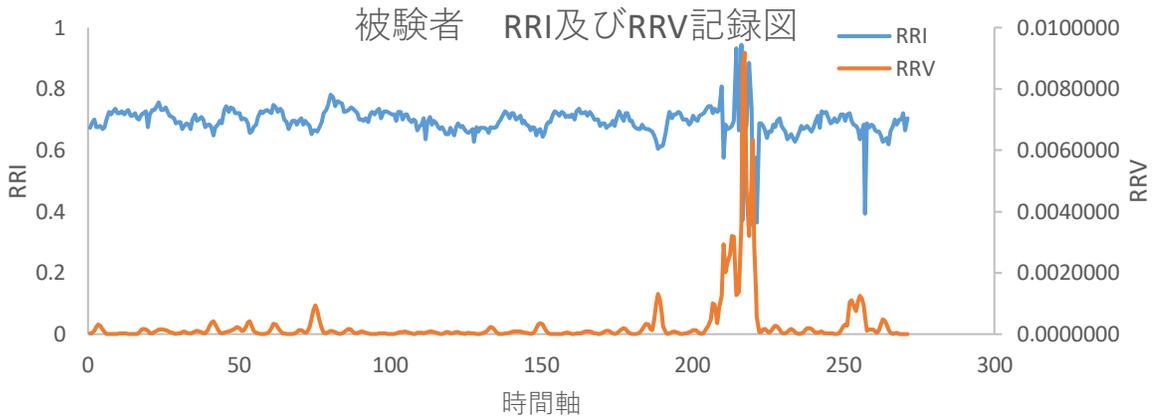
1. 合流シナリオで音声提示タイミングによる精神負荷軽減実験に関するデータ。三面モニタ式及び CAVE で実行した実験。図番号は省略している。

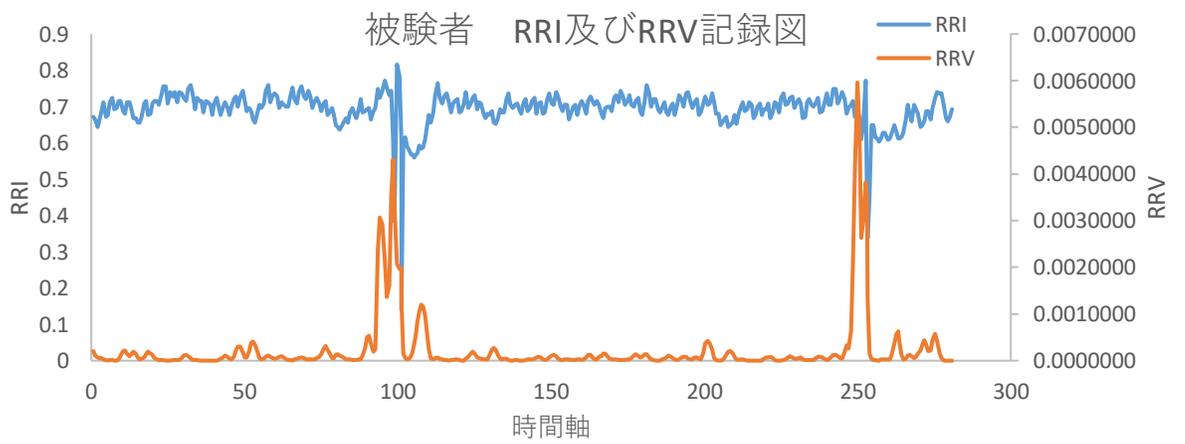
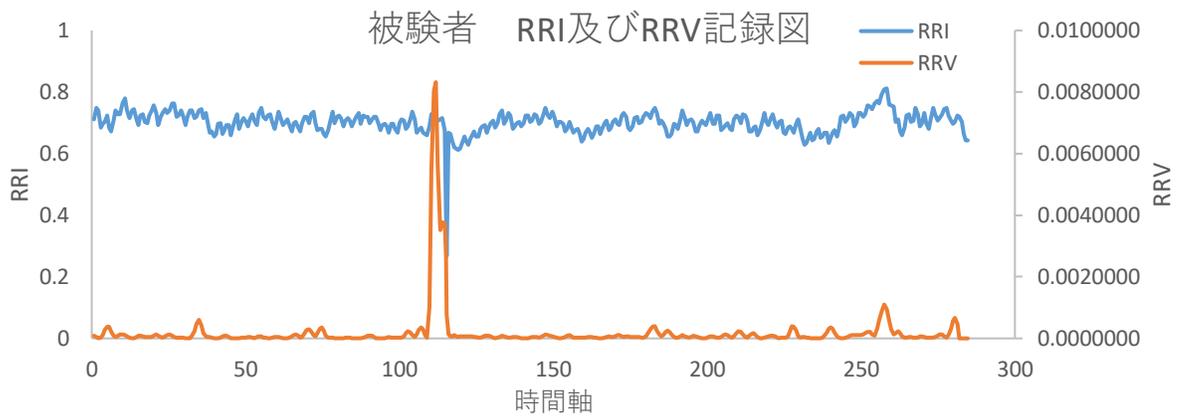
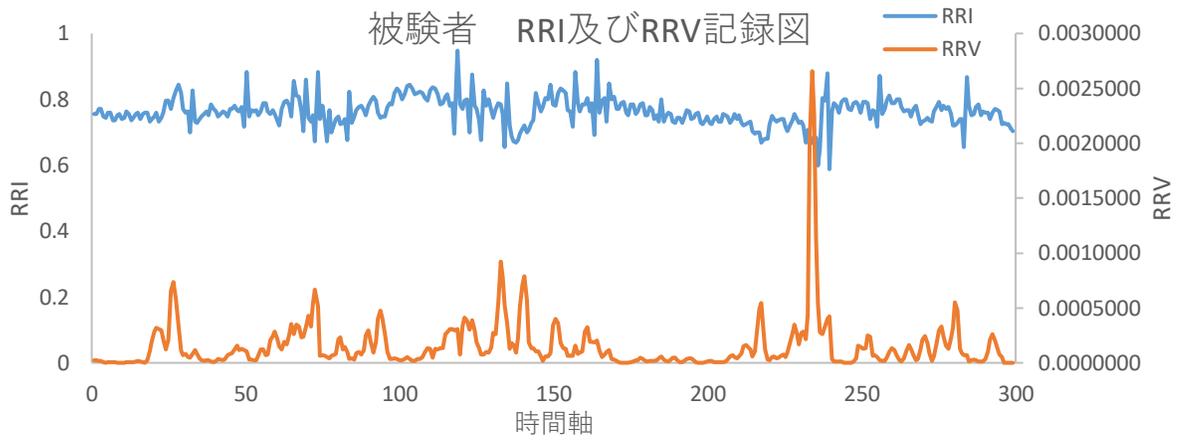


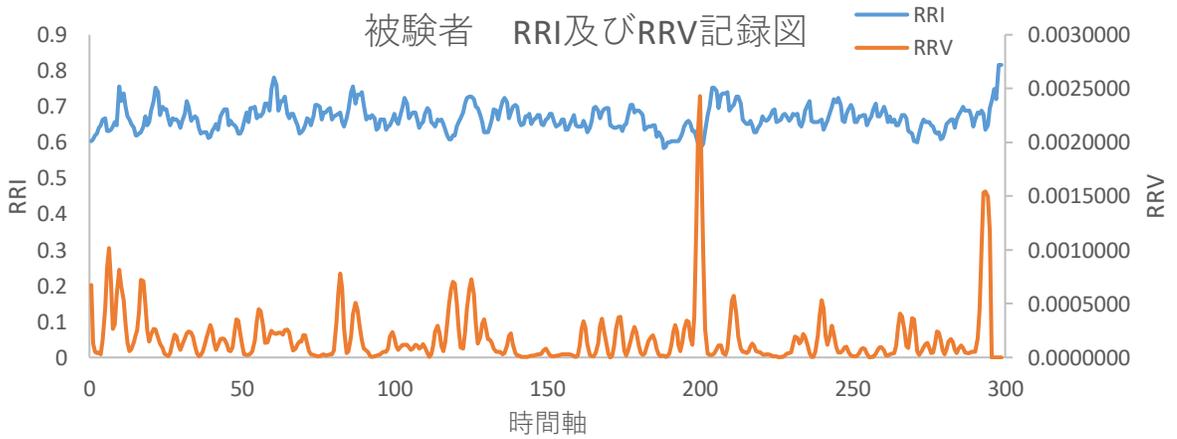
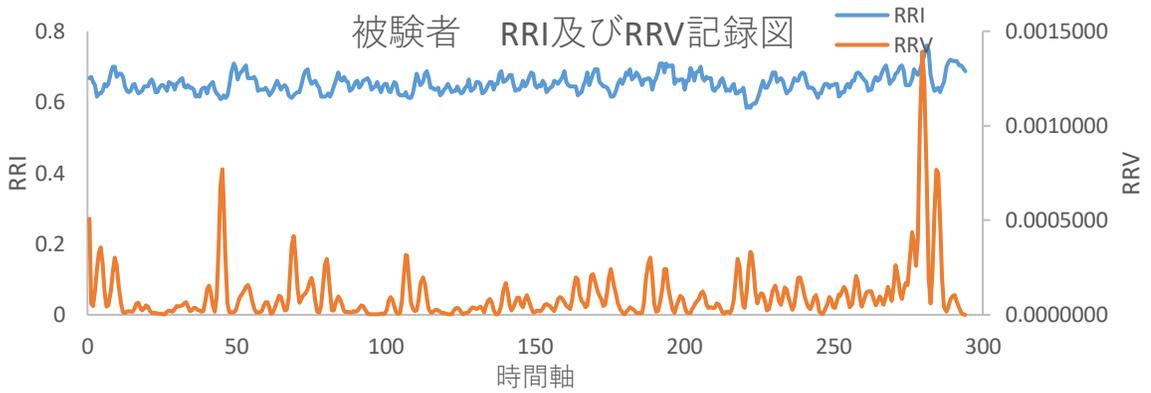
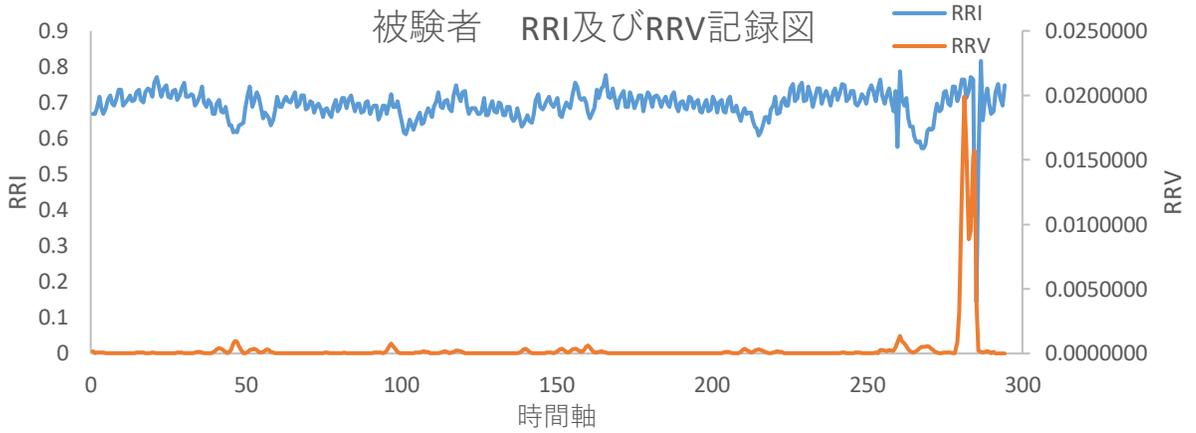


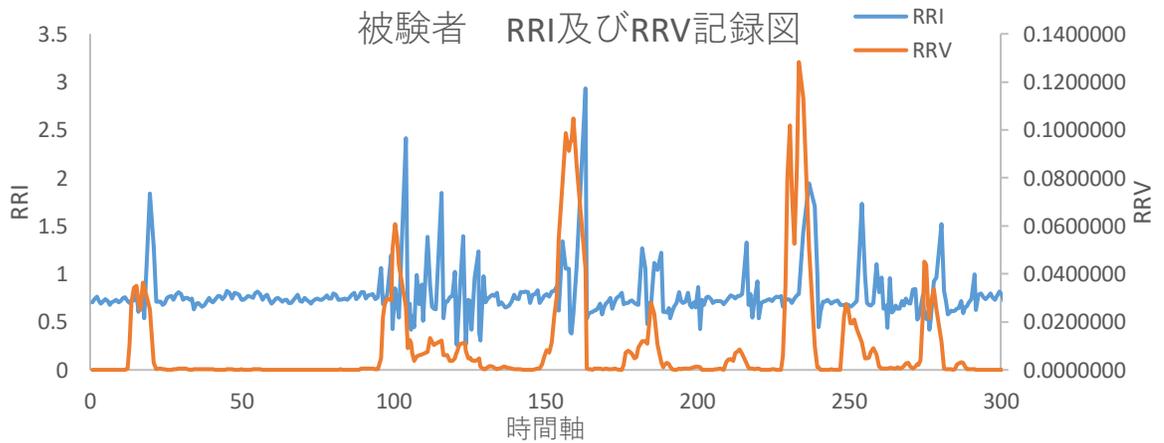
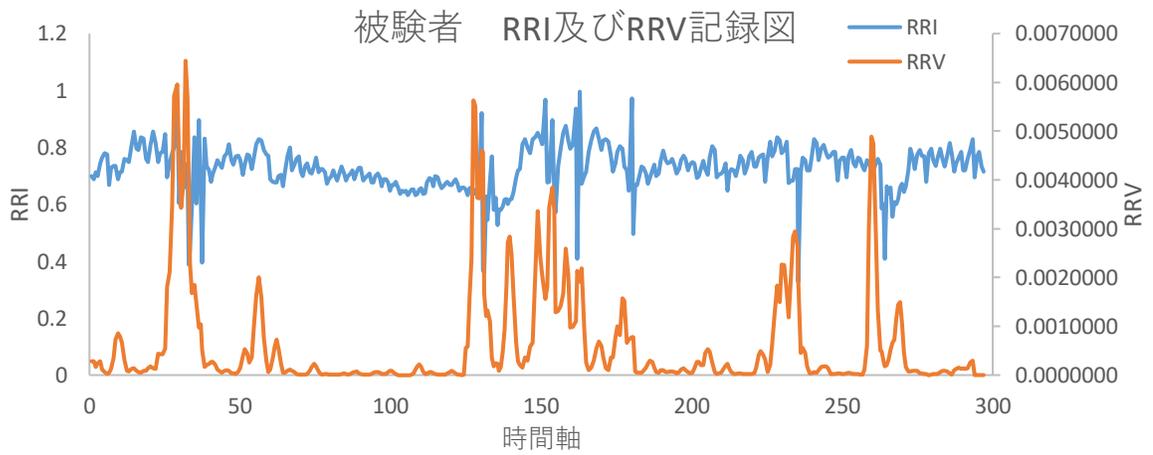
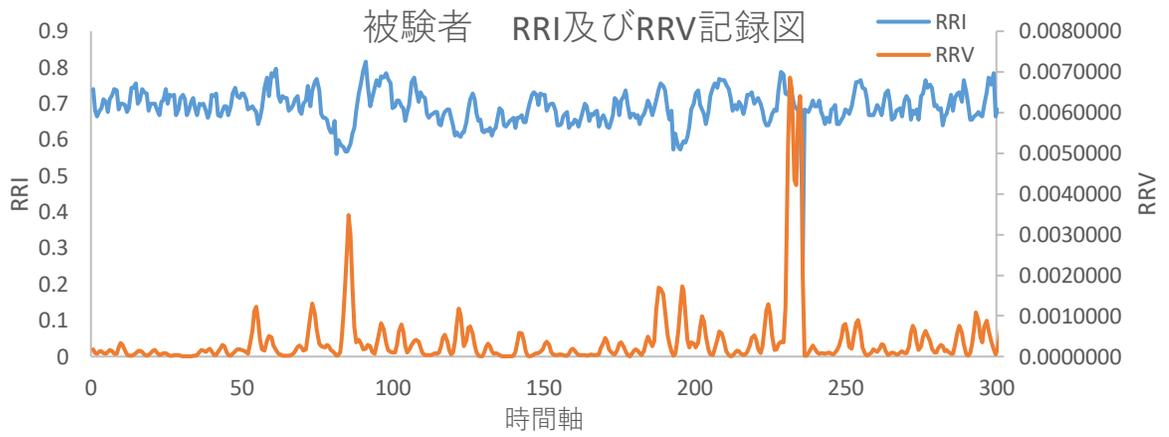


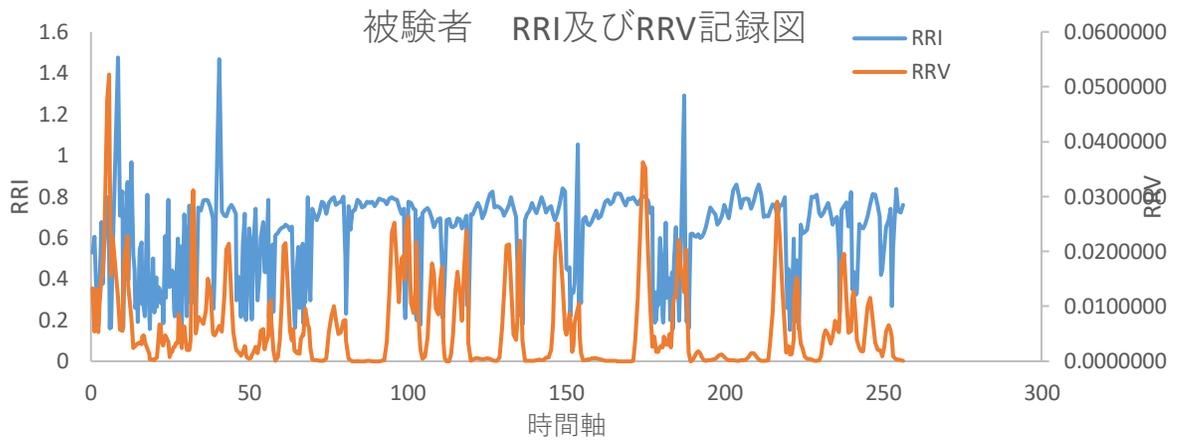












以下図は最終段階で CAVE を用いる各シナリオの実験データを示している。

