

令和2年度 修士論文

ハイブリッドシステム表現を用いた
運転行動モデルにおける
ドライバ特性解析と主観評価

指導教員 早川聡一郎 准教授

三重大学大学院工学研究科

人間支援システム研究室

419M112 貴船元太

目次

第1章

序論

1.1 研究背景	- 5 -
1.2 本研究の目的	- 8 -
1.3 本論文の構成	- 9 -

第2章

ハイブリッドシステムに基づく運転行動モデル	- 10 -
-----------------------	--------

2.1 車両運動制御システム	- 10 -
2.2 ハイブリッドシステムに基づく人間行動モデル	- 11 -
2.3 乗員を考慮した車両運動制御システム設計手法	- 13 -

第3章

実験環境と走行環境	- 14 -
-----------	--------

3.1 ドライビングシミュレータの概要	- 14 -
3.1.1 ドライビングシミュレータで使用する装置	- 14 -
3.1.2 各パソコンの役割	- 16 -
3.1.3 各PCの接続	- 19 -
3.2 走行環境	- 20 -

第4章

追越行動モデルの構築	- 21 -
------------	--------

4.1 運転情報収集実験	- 21 -
4.1.1 運転情報収集実験方法	- 22 -
4.1.2 運転情報収集実験結果	- 23 -
4.1.3 運転情報収集実験結果の正規化	- 27 -
4.2 追越行動における運転行動モデル構築	- 28 -
4.3 追越車線進入行動モデルの構築	- 29 -
4.3.1 追越車線進入行動動作数の決定	- 29 -
4.3.2 追越車線進入行動の切替判断条件とモデルの導出	- 32 -
4.4 走行車線進入行動モデルの構築	- 45 -
4.4.1 走行車線進入行動動作数の決定	- 45 -
4.4.2 走行車線進入行動の切替判断条件とモデルの導出	- 47 -
4.5 構築した追越運転行動モデル	- 59 -

4.6 先行研究で構築された追越行動モデル.....	- 61 -
第5章	
追越行動モデルの評価とドライバ特性解析	- 62 -
5.1 自律追越行動実験.....	- 63 -
5.1.1 自律追越行動実験方法.....	- 63 -
5.1.2 自律追越行動実験結果.....	- 63 -
5.2 ドライバ特性解析実験.....	- 67 -
5.2.1 追越行動の分割	- 67 -
5.2.2 ドライバ特性解析実験方法.....	- 68 -
5.2.3 主観アンケート	- 69 -
5.2.4 実験結果	- 71 -
5.3 ドライバ特性解析.....	- 85 -
5.3.1 追越車線進入行動での主観評価解析	- 85 -
5.3.2 追越車線進入行動の各アンケート項目についての解析	- 87 -
5.3.3 走行車線進入行動の各アンケート項目についての解析	- 95 -
5.4 結果まとめ	- 102 -
第6章	
結論	- 103 -
6.1 本研究のまとめ	- 103 -
6.2 今後の課題.....	- 104 -
参考文献.....	- 105 -
謝辞	- 107 -

第 1 章

序論

1.1 研究背景

近年、交通事故発生件数、交通事故死亡者数は、Fig.1.1.1 や Fig.1.1.2 に示すように減少傾向にある。しかし、2020 年は交通事故発生件数は約 31 万件、交通事故死亡者数は約 3 千人と依然として大きな社会問題となっている。そこで交通事故の対策として、先進運転支援システム（以下 ADAS と略す）の研究が盛んに行われている。

自動車の運転には大きく「認知」「判断」「操作」の要素に分けられる。ドライバは通常、目や耳で周囲の状況を認知し、加速や停止、車線変更などの判断を脳で行い、そして手や足を使ってハンドルやアクセルペダルなどを操作して自動車を制御する。この「認知」、「判断」、「操作」のいずれか、あるいは全てをアシストするのが ADAS である。近年、ADAS を搭載した実車は、2019 年見込みでは約 4 千万台で、2018 年比では 111%と ADAS を搭載した実車の普及率は増加している。また、近年注目され始めている自動運転の普及には、まだまだ時間がかかる恐れがあり、ADAS を搭載された実車の普及率は今後さらに増加すると言われて

いる。

現在実装されている ADAS の例として、Adaptive Cruise Control System (以下 ACC と略す)、車線変更支援システムを挙げる。ACC とは、アダプティブ・クルーズ・コントロールのことで、前走車を検知し車間距離を一定に保ちながら走る「追従走行」機能である。前走車がない場合は、ドライバが任意に設定した速度を維持して走ることもできる。カメラやレーダーなどの外界センサから周囲の情報を検知し、画像認識技術などにより、前方車両及びその速度を検出する。検出したデータを元に、ドライバに替わってアクセルとブレーキ制御を行う。車線変更支援システムは、ドライバがウインカー操作などで車線変更の意思を自動車に伝え、後方と前方の安全をセンサで確認し、車線変更をこなす機能である。他車が周囲にい

る場合には車線変更は行わない。

しかし、ADAS の問題点として、個人特性を持たない平均的な仕様のものが多い。様々な特性を持つ人間が ADAS を利用することを前提に設計が行われ、ADAS を快適かつ安全と感じる人間が最も多くなるようにするためである。しかし、人間には、運転の際、自分のタイミングややりやすい操作方法などがある。平均的な仕様では、ある人間には ADAS が安全を意識しすぎて煩わしいと感じたり、自分のタイミングではないときに操作介入が行われ不安を感じる恐れがある。そうなってしまうと ADAS を頼ることがなくなり使用しなくなってしまう恐れがある。よって、より快適かつ安全な支援を目指すためには、個人に合った支援が必要となってくる。そのためには、個人の「認知」、「判断」、「動作」を正確に表現する高度なドライバモデルが必要となる。

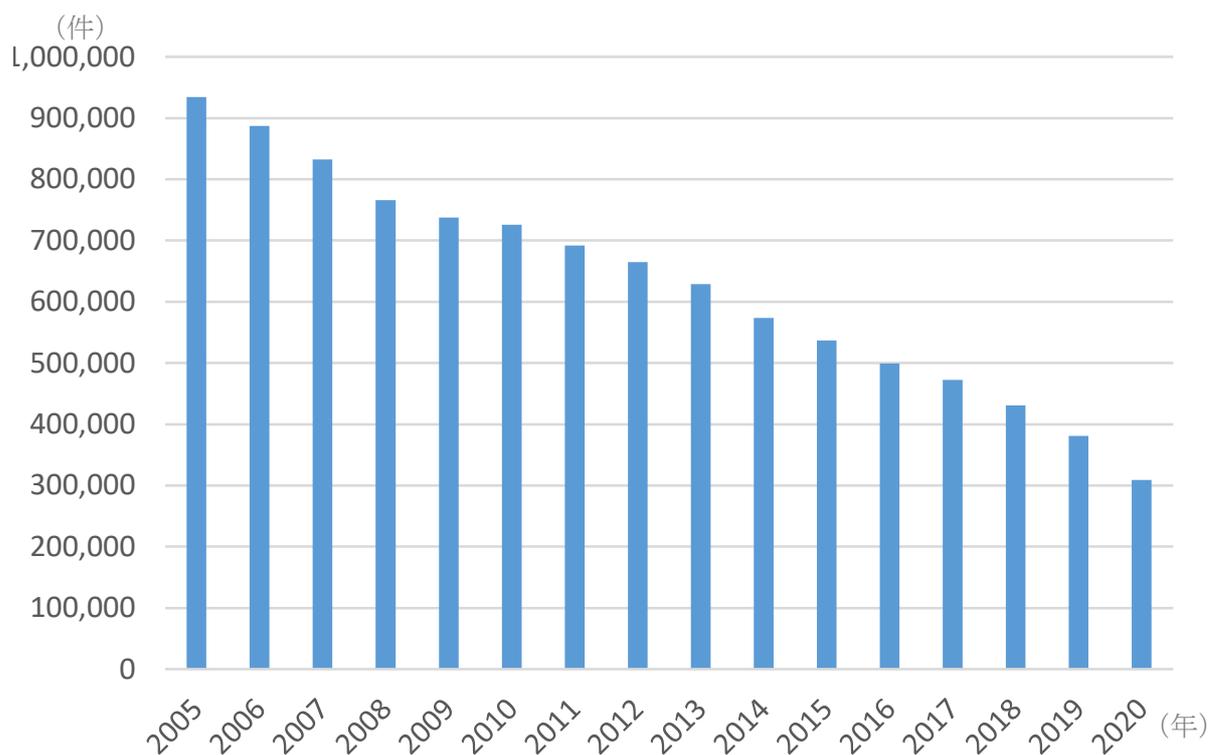


Fig.1.1.1 交通事故発生件数の推移

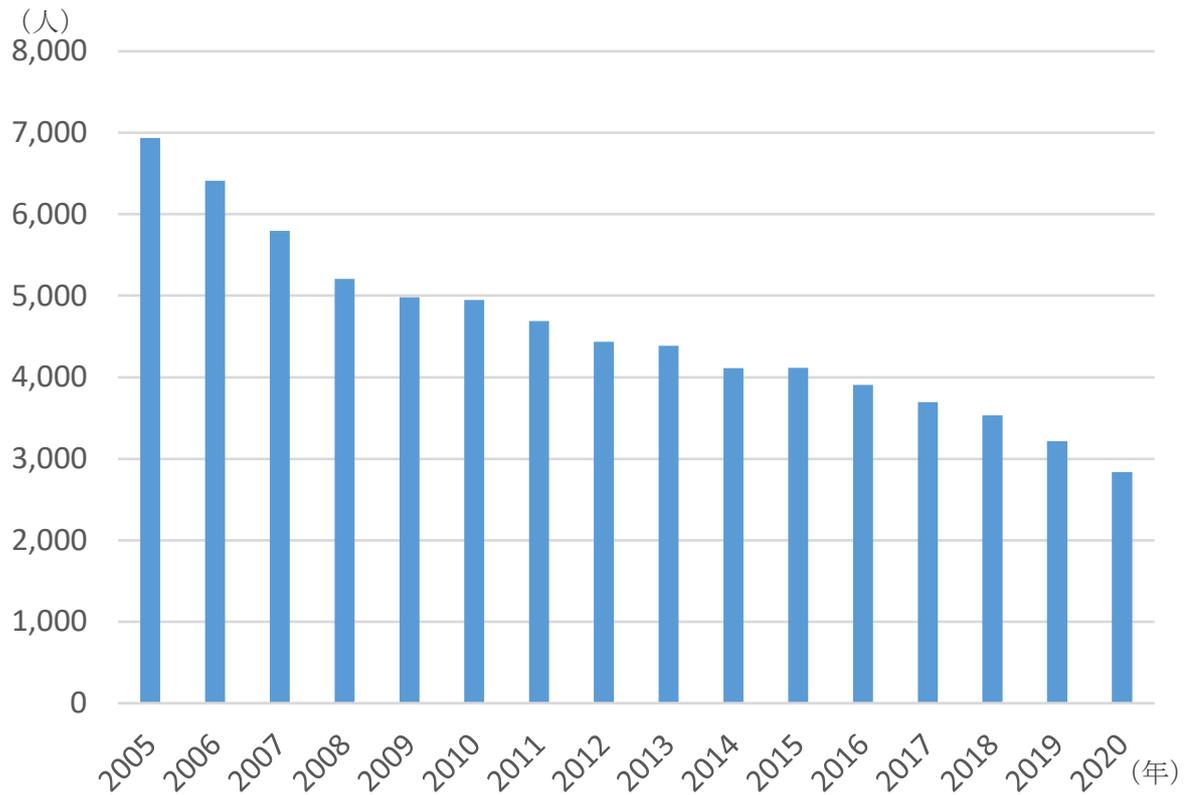
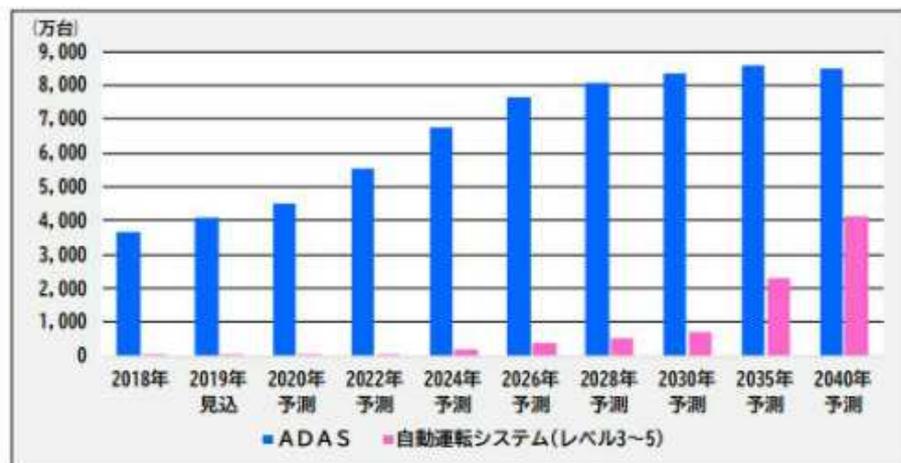


Fig.1.1.2 交通事故死亡者数の推移



	2019年見込	2018年比	2040年予測	2018年比
ADAS	4,077万台	111.4%	8,475万台	2.3倍
自動運転システム(レベル3~5)	7万台	7.0倍	4,112万台	4,112.0倍

Fig.1.1.3 ADAS 実車搭載率の予測

1.2 本研究の目的

より快適かつ安全な支援を目指すためには、個人それぞれに合った運転支援が必要となってくる。そのためには、個人の「認知」、「判断」、「動作」を正確に表現する高度なドライバモデルが必要となる。高度なドライバモデルの従来研究として、ドライバごとの車両軌跡の違いを統計的にモデル化し、初期条件と周囲状況に応じて車線変更の軌跡を予測する研究や、実際に観測した行動データに含まれる複数のサブタスクにおいて、どのように切り替えているのか追越行動におけるタスク切り換えモデルの構築を行う研究がある。また、本研究室では、ハイブリッドシステム表現に基づく運転行動モデルの研究をこれまで行ってきた。先行研究では、ハイブリッドシステム表現に基づき、追越行動についてドライバモデルを構築し、ドライビングシュミレータ（以下 DS と略す）にモデルを搭載したシステムを用い、自律走行実験を行った。このように従来研究や本研究室の先行研究に共通しているところは、追越行動について評価をする際に被験者と運転行動モデルの走行データの比較したものを提示し、被験者と運転行動モデルの走行データが類似しているということを示すのみである。しかし、これでは実際にドライバはどのように感じているのか分からない。高度なドライバモデルでも実際の運転と誤差が生じることが考えられる。多少運転行動モデルとずれていても違和感や不安感を覚えないかとも考えられる。

そこから、本研究ではデータ比較のみではなく主観評価を絡めた評価を行うことによりドライバ特性解析を行う。ドライバの普段の運転と運転行動モデル走行時のずれはどれくらい許容できるのか、どのように感じたとき快適と思うのか、また、快適と感じた際、どのようなパラメータの影響が大きいのか解析を行う。ここで快適とは、ドライバが普段の運転とどれだけ類似していて違和感がないと感じるかを定義する。まず、数人を対象にハイブリッドシステム表現における運転行動モデルを構築する。そして、構築した運転行動モデルを実装し DS にて自律走行実験を行う。そして、被験者に自分のデータから構築した運転行動モデルと他者のデータから構築した運転行動モデルに対する主観評価を行う。

本人走行データと運転行動モデルの走行データの比較のみではなく主観評価を関連づけた評価を行う。そのことによって、追越行動におけるドライバが快適と感じた際のパラメータが主観にどのような影響を及ぼしているのか解析することを研究目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。まず、第 2 章ではハイブリッドシステムに基づく人間の運転行動モデルの同定手法について説明する。次に第 3 章ではドライバモデルを構築するにあたり、本研究で使用するドライビングシュミレータと走行環境について説明する。第 4 章では追越行動を対象にハイブリッドシステムに基づく運転行動モデルの構築方法と構築結果を示す。第 5 章では、構築した運転行動モデルを用いドライバ特性解析実験を行い、解析を行う。最後に第 6 章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

第 2 章

ハイブリッドシステムに基づく運転行動モデル

本章では，自律走行車の車両運動制御システムと，ハイブリッドシステムに基づく人間行動モデルについて説明を行う．そして，人間の運転行動モデルを車両運動制御システムに実装する手法について述べる．

2.1 車両運動制御システム

自律走行車の車両運動制御システムは Fig. 2.1.1 に示すように，プランナーからの運転行動指示に従い，外部環境情報を踏まえて運転制御器を切り替える制御切り替え器と，いくつかの運転制御器より構成されているハイブリッド制御系構造を本研究では採用している．人間が乗ることを考慮した車両運動制御システムの設計として，人間の運転行動をモデル化し，車両運動制御システムに実装することを考え本研究室では研究を行ってきた．

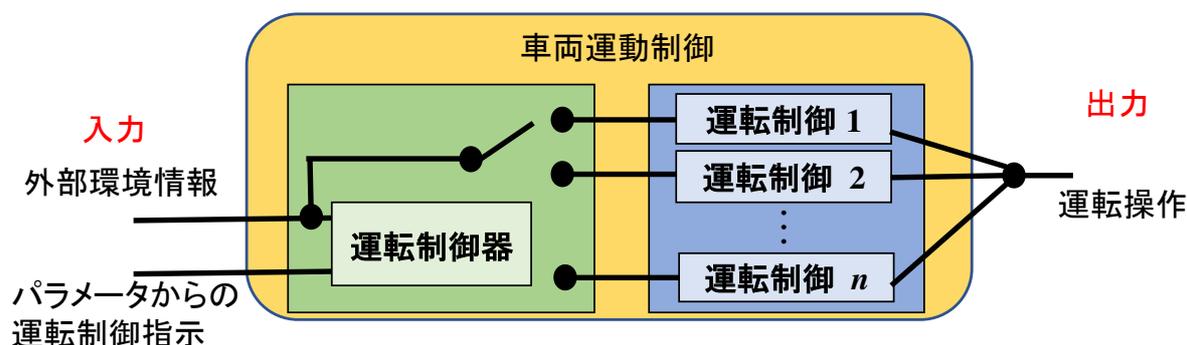


Fig.2.1.1 車両運動制御システム

2.2 ハイブリッドシステムに基づく人間行動モデル

人間は何らかのタスクを行う際、連続的な動作と離散的な判断を組み合わせてタスクを行っていると考えられる。本研究では、ハイブリッドシステムに基づいて、離散的な判断と連続的な動作に分けて、人間の行動を同定する手法を使用する。このことは人間行動を Fig.2.2.1 に示すようなシステムとしてモデル化することを意味する。人間は何らかのタスクを行う際、動作と判断を組み合わせてタスクを構成していると考えられる。つまり、人間は外界の情報を得て、その情報からある条件によって腕などの動かし方を変えながら腕や足などをあるダイナミクスに基づいて動かすことでタスクを行っていると考えられる。なお、本論文では目的となるタスクを行うための全体的な動きや判断を含めて「行動」(Behavior)と呼ぶことにし、行動を構成しタスクを達成するために必要な細分化した動きを「動作」(Action)と呼び、この「動作」を条件によって使い分けることを「判断」(Decision)と呼称する。

本研究では以下の三つの手順により人間の運転行動モデルを構築する。

1. 階層的クラスタ解析により人間の行動に含まれる動作モード数を決定し、動作モードに分割する
2. 分割された各動作モードは線形近似法を用いることにより推定する。(動作モデル)
3. 各動作モデル間の遷移条件はSupport Vector Machine (以下SVMと略す)を用いて推定する(判断モデル)

本研究では1の動作モード分割により動作モードを求め、2と3のモデル構造手法を用いてモデル同定を行う。

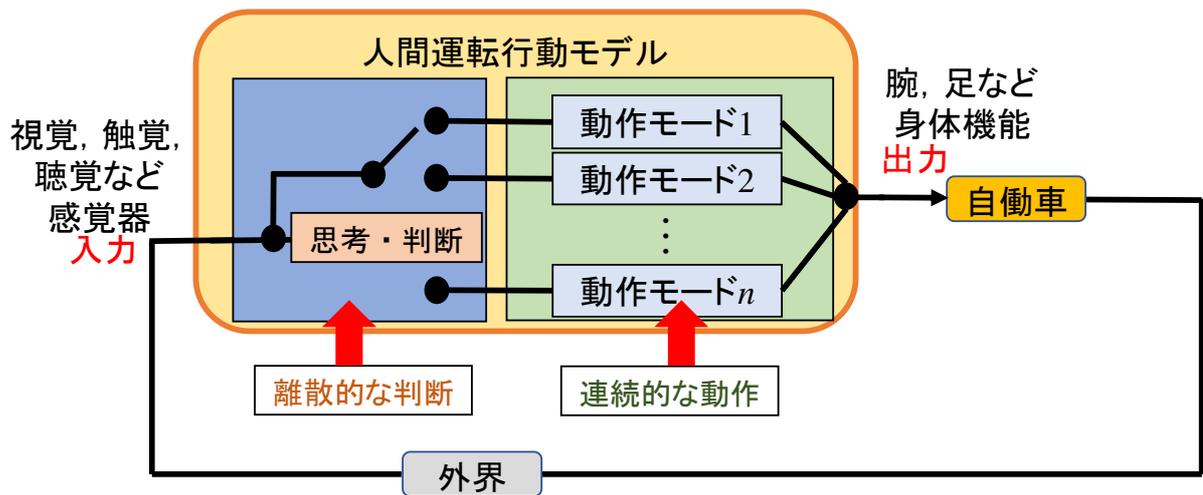


Fig.2.2.1 ハイブリッドシステムに基づいた人間行動モデル

動作モードを求める手法として、クラスタ解析を用いる。クラスタ解析は統計的な解析手法の1つで、複数のデータのうち類似するデータ同士をグルーピングするための手法であり、入出力データ、あるいは何らかの特徴量をクラスタリングすることにより、各モードに分割し、モード数を決定することができる。このモード数の決定はHDSとしてモデルを構成する際に重要であり、何らかの数値的な評価が行える解析的手法を用いるべきである。そこで、混合整数計画 (Mixed Integer Program :MIP) を用いる手法より多くのデータ点を扱うことができるクラスタ解析を用いる手法を踏襲、改良し、分割した動作の類似度を分割すると同時に確認することができる階層的クラスタリングを用いる。階層的な手法を用いる場合にはクラスタ数をあらかじめ決定しておくことなく結合する事ができる。また、各クラスタを結合していく際の結合距離 (これを可視化したものはデンドログラムと呼ばれる) を得ることができ、いくつかのクラスタ数に分離するべきかを決定するための指標として用いることができる。従って、本手法を用いることによってこれまで不可能であった動作数の解析的な決定が行える。

判断モデルの構築には、汎化能力が高く一般に機械学習やパターン認識に用いられるSVMを用いる。

動作モデルの構築には、今回は問題が単純化されているため、線形近似法を用いる。

2.3 乗員を考慮した車両運動制御システム設計手法

2.1 節では自律走行車の車両運動制御システムについて、2.2 節ではハイブリッドシステムに基づく人間行動モデルについて説明をしてきた。これらと比較したのを Fig.2.3.1 に示す。両者を比較するとその構造が類似している。ドライバのモデル化構造にあわせて車両運動制御システムをハイブリッド制御システムで設計したため同定した人間の運転行動モデルを自律走行車の車両運動制御システムにそのまま実装する手法を用いる。人間の運転行動モデルの構築には前節で示した手法を用いる。

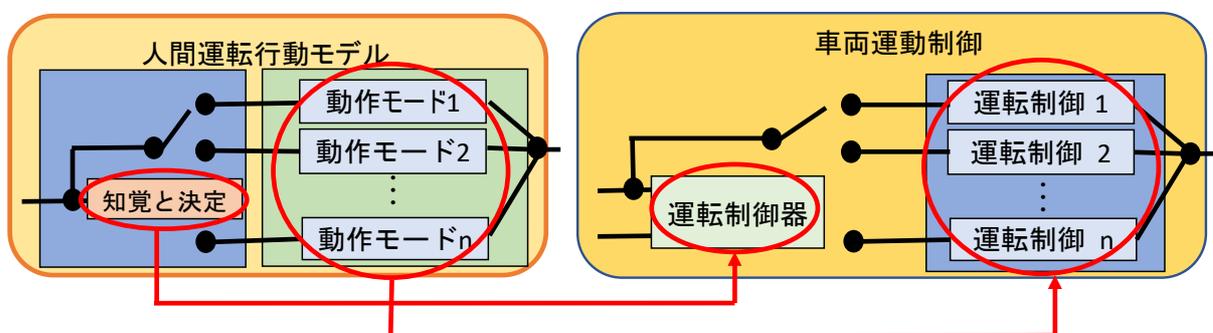


Fig.2.3.1 ハイブリッドシステムに基づく人間運転行動モデル

第 3 章

実験環境と走行環境

本章では，本研究室で開発した運転情報の収集が可能な DS について述べる．3.1 節では，DS の概要について述べる．3.2 節では，DS で行った実験環境について述べる．

3.1 ドライビングシミュレータの概要

3.1.1 ドライビングシミュレータで使用する装置

本研究室で用いる DS の構成図を Fig.3.1.1 とその用途を Table3.1.1 に示す．また，DS の外観を Fig.3.1.2 に示す．本 DS にはインパネを搭載しており，視界や雰囲気などの運転環境を実車に近づけている．ステアリングはインパネより L 字鉄骨棒を使用して固定できるようにし，急なステアリング操作にも耐えられる強度を持つ．スピーカーは運転席後方に設置し，運転に支障のない設計になっている．また，シートは座面高さや位置が変更可能なシートを運転席内の土台板上に固定し，シートベルトも備えている．

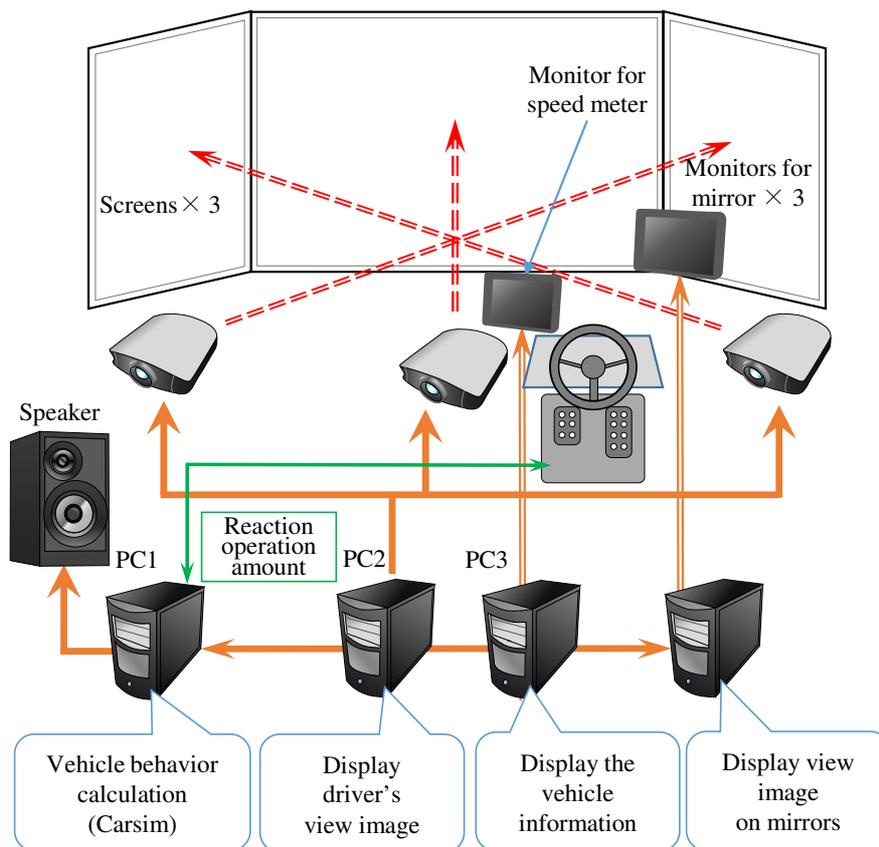


Fig.3.1.1 DS を構成する機材

Table 3.1.1 DS を構成する機材とその用途

Equipment	Amount	Use
PC	3	Calculate driving behavior and create images
Steering Gas pedal Brake	each 1	Used as cockpit
Screen	3	Be projected front view images
Projector	3	Project front view images
Small monitor	3	Display back side view images
Memolink	2	Connect each PC
Image distributor	2	Distribute images for screens and small monitors
Speaker	1	Engine Sound



Fig.3.1.2 DS の外観

3.1.2 各パソコンの役割

本 DS にはパソコン (以下, PC と呼ぶ) を 3 台用いている. 本項では各 PC の役割を説明する. また, 各 PC のスペック表を Table.3.1.2 に示す.

Table 3.1.2 各 PC のスペック

	For control (PC1)	For projection (PC2)	For side mirrors (PC3)
OS	Windows XP Home Edition	Windows XP Professional	Windows XP Professional
CPU	Intel Core 2 Duo 3.16 GHz	Intel Core 2 Quad 2.40 GHz	Intel Pentium D 3.40 GHz
Memory	3.3 GB RAM	2.98 GB RAM	3.20 GB RAM
Graphic board	NVIDIA GeForce 9500 GT	NVIDIA Quadro FX 5500	NVIDIA GeForce 9800 GT
Configuration software	Carsim (Ver. 5.15) C++ Builder Direct X library	Visual C++ DirectX library	Visual C++ Direct X library
Display device	Standard monitor	EB-1770W×3	8.0 inches LCD monitor×2 10.2 inches LCD monitor
Connected device	GT FORCE PRO Speaker	—	—

PC1 には USB を介してステアリングコントローラが接続されており、ステアリングコントローラからアクセルとブレーキへ接続されている。また、エンジン音の再生に使用するスピーカーも接続されている。開発用ソフトウェアとして統合制御プログラムには C++ Builder を使用し、CarSim には Visual C++ が使用されている。

CarSim は車両の運動情報を計算するために用いる。本研究では ver. 5.15 を用いている。CarSim はドライバの運転情報である、ステアリングとアクセル、ブレーキの操作情報や走行環境などのパラメータを入力として受け取り、車両ダイナミクスの計算をリアルタイムで行い、出力として車両の速度やエンジン回転数、車体姿勢などを出力する。また、これらの入力を自由に変更することができ、その条件を満たす車両挙動をシミュレーションすることができる。この CarSim は、それだけではステアリング操作などの各入力からの情報を受け取ることができないため、間に入るソフトとして統合管理ソフトを用い、運転情報をやりとりすることにより制御を可能にしている。

統合管理ソフトは主にステアリングなどのデバイスからドライバの運転情報を収集し、その情報を CarSim に送信するとともに CarSim からの車両の各種状態情報を受け取り、ロギングや反力などをデバイスに出力する。エンジン音はあらかじめ録音したエンジン音の一部を、CarSim の計算結果であるエンジン回転数に応じて統合制御プログラムが DirectX library を用いて音を生成し、スピーカーより出力している。

PC2 は運転席から前方と左右を見た様子を表示するために用いている。高速道路やトラック、乗用車の 3 次元モデルと 3 次元テクスチャを用意しており、メモリンクを介して PC1 から受信した現時刻の自車の動きと他車の動きを描画する。また、画面左上に現在の x 座標、 y 座標、自車速度、エンジン回転数が表示され、被験者が確認できるようになっている。ここで作成された映像は映像分配器を通して 3 台のプロジェクターに送られ、プロジェクターから 3 面型スクリーンへ投影される。

PC3 は PC2 と同様の働きをするが、映像表示方法がスクリーンではなく運転席上部とインパネ内に設置された小型ディスプレイと左右の小型ディスプレイを用いている。このディスプレイは速度計・タコメーターとしての計器の表示とサイドミラー・ルームミラーとして用いられており、送られてきた車両挙動を映像化する際に鏡像を作成してミラーとして用いている。また、このモニターにも現在の x 座標、 y 座標、自車速度、エンジン回転数の表示がされるようになっている。

3.1.3 各 PC の接続

ドライバの運転操作と映像の表示状態にずれが無いようにするため、3 台の PC はそれぞれ Interface 社の 3m 版メモリンクを用いてデータの送受信を可能にしている。メモリンクは、マスタースレーブ、終端スレーブ、増設スレーブの 3 種類あり、マスタースレーブより送られたデータが増設、終端スレーブに書き込まれる仕組みになっている。本研究では、PC1 にマスタースレーブ (PCI-4913)、PC2 に終端スレーブ (PCI-4914)、PC3 に増設用スレーブ (PCI-4919) を使用する。メモリンクを実際に接続している様子を Fig.3.1.3 に示す。

PC1 より送られた車両運動情報を基に、リアルタイムで現在の自車の運転席前方から見える風景を PC2 で表示する。



Fig.3.1.3 メモリンク接続の様子

3.2 走行環境

本研究において、運転情報収集のために用意した実験環境を Fig. 3.1.4 に示す。コースは簡素な直線の2車線高速道路である。天候は晴れ、路面は乾いたものとし、路面摩擦係数は0.7に設定した。また、この環境内で追い越し車線を走る自動車は120km/hで走行している。また、シミュレーション開始時の前方車は80km/hで走行している。



Fig.3.1.4 実験コース

第 4 章

追越行動モデルの構築

本章では，前章で示した人間の運転行動モデルを構築する．まず，4.1 節では人間の運転行動モデルを構築するために行った人間の運転情報収集実験について述べる．次に 4.2 節では追越行動における行動モデルの遷移条件の導出について述べる．4.3 節から 4.5 節では，収集した情報を用いて「追越行動」の各運転状態それぞれでのドライバの運転行動モデルの構築及び各運転行動の切り替え方法について述べる．最後に 4.6 節では，5 章で必要となってくる先行研究で構築された追越運転行動モデルについて述べる．

4.1 運転情報収集実験

ドライバの運転行動をモデル化するために，3 章で説明した DS を用いてドライバの運転情報収集実験を行った．本研究では，運転行動の中でステアリング操作の動きが大きく乗り心地への影響が特に大きい追越行動を対象としてモデル構築を行った．また，一般的な追越行動は、前方の走行車線走行車を追越するために追越車線に進入し定速走行を行い，走行車線走行車を追い抜いたら走行車線に戻る．このように追越行動ではおおまかに「追越車線進入行動」，「定速行動」，「走行車線進入行動」の 3 つの行動を組み合わせて行っている．よって，人間の運転行動の類似性への影響が特に大きい運転行動として，「追越車線進入行動」と「走行車線進入行動」を対象として追越行動モデルの構築を行った．

4.1.2 運転情報収集実験結果

各被験者の運転情報収集実験結果を Fig.4.2 から Fig.4.9 に示す。実験結果は、「追い越し車線進入行動」と「走行車線進入行動」に分けてそれぞれ示す。図中の横軸は時間[s]を表し実験データから車体角度が $0.2[\text{deg}]$ 大きくなったところを $0[\text{s}]$ とする。縦軸は上から加速度 $[\text{km/s}^2]$, 横方向位置[m], 横方向速度[m/s], 前方者車間距離[m], 車体角度[deg], ステアリング操作角[deg], 走行速度[km/h]を表す。この収集した運転情報を用いて人間の運転行動モデルを構築した。

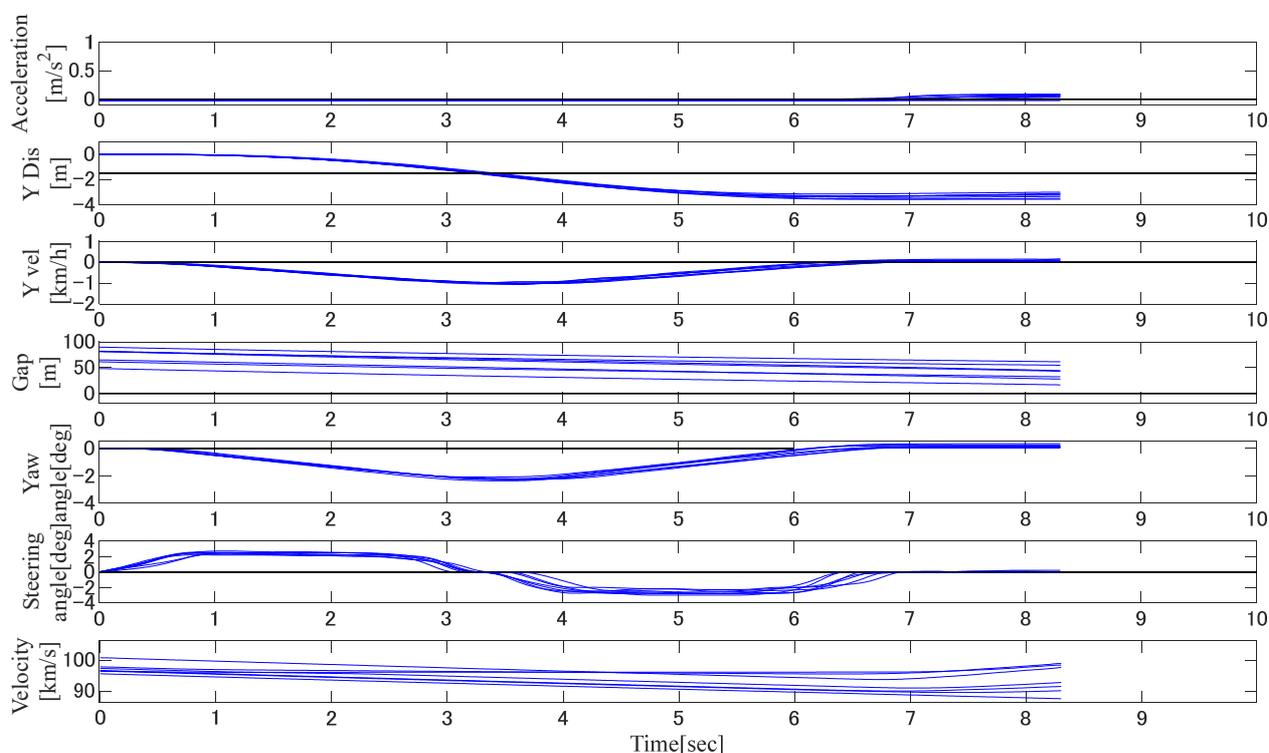


Fig.4.1.2 実験結果 追越車線進入行動 (ドライバ A)

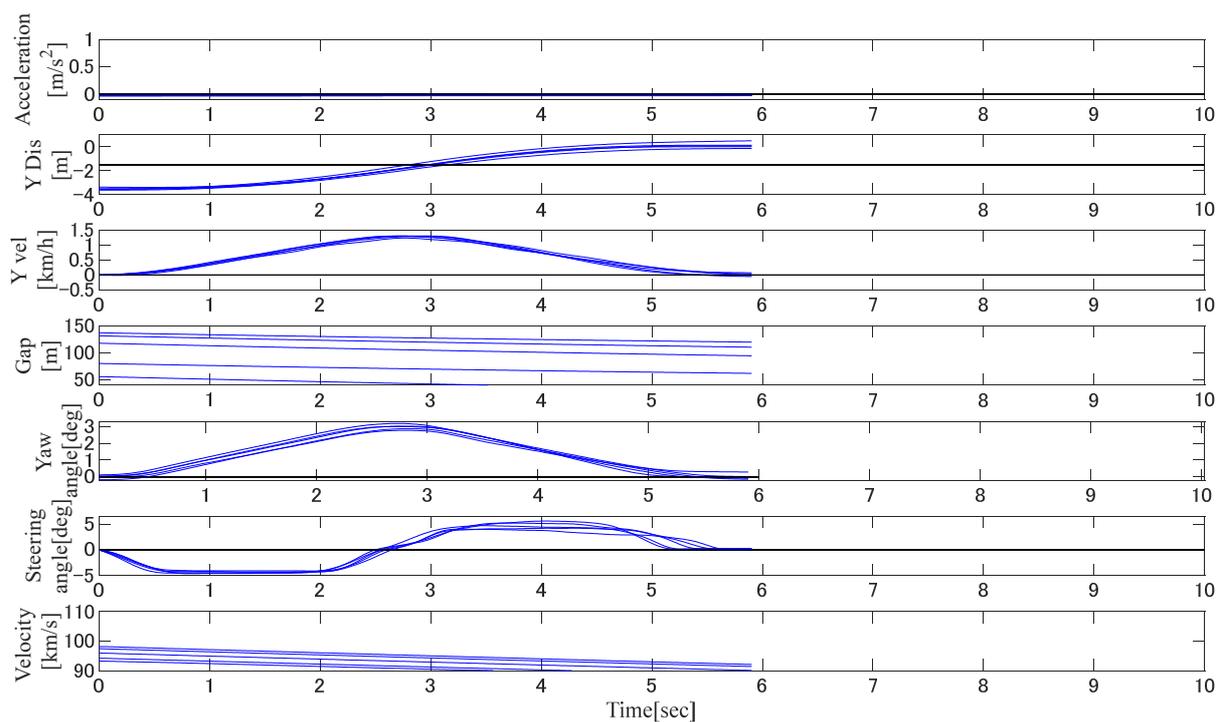


Fig.4.1.3 実験結果 走行車線進入行動 (ドライバ A)

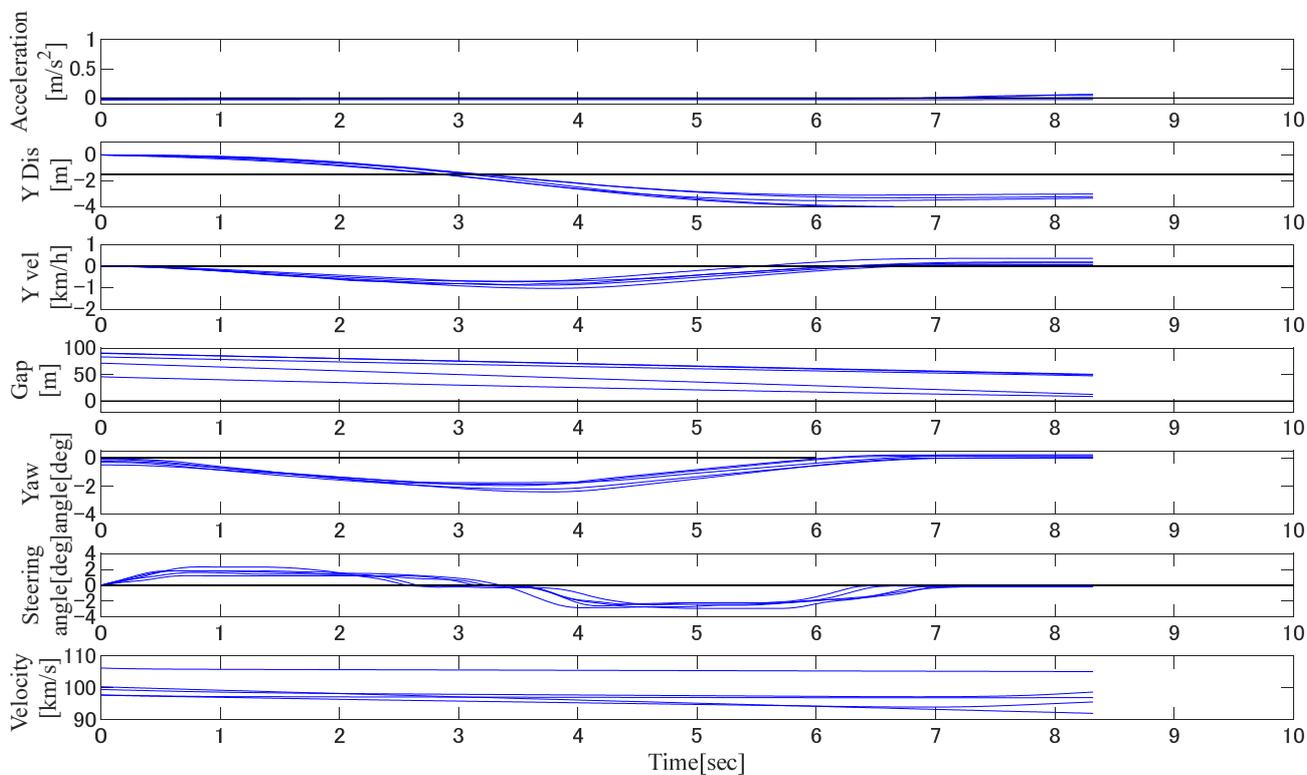


Fig.4.1.4 実験結果 追越車線進入行動 (ドライバ B)

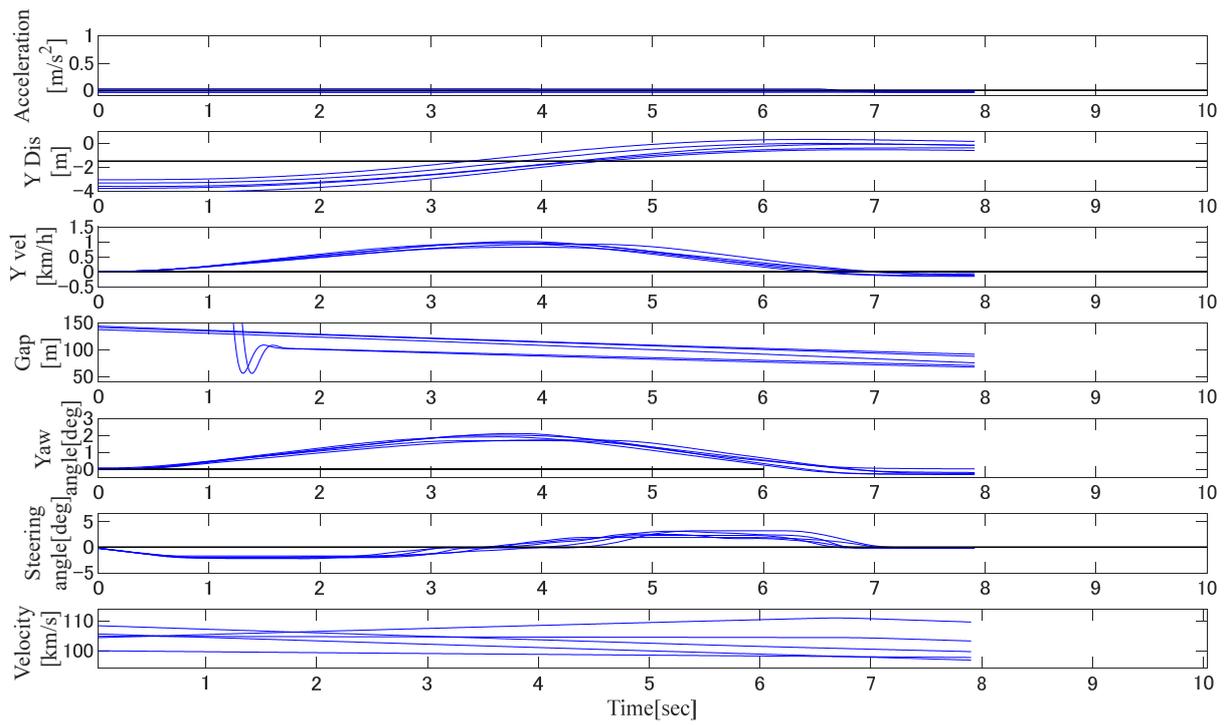


Fig.4.1.5 実験結果 走行車線進入行動 (ドライバ B)

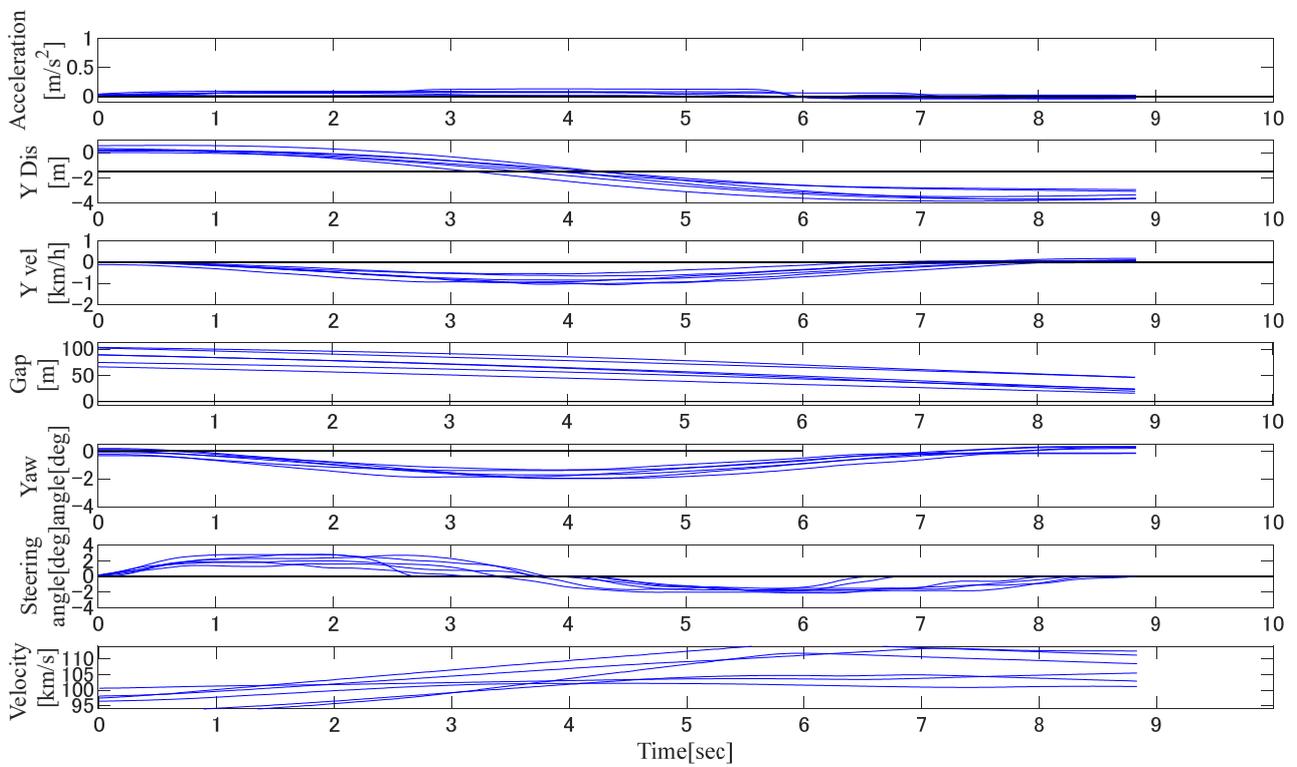


Fig.4.1.6 実験結果 追越車線進入行動 (ドライバ C)

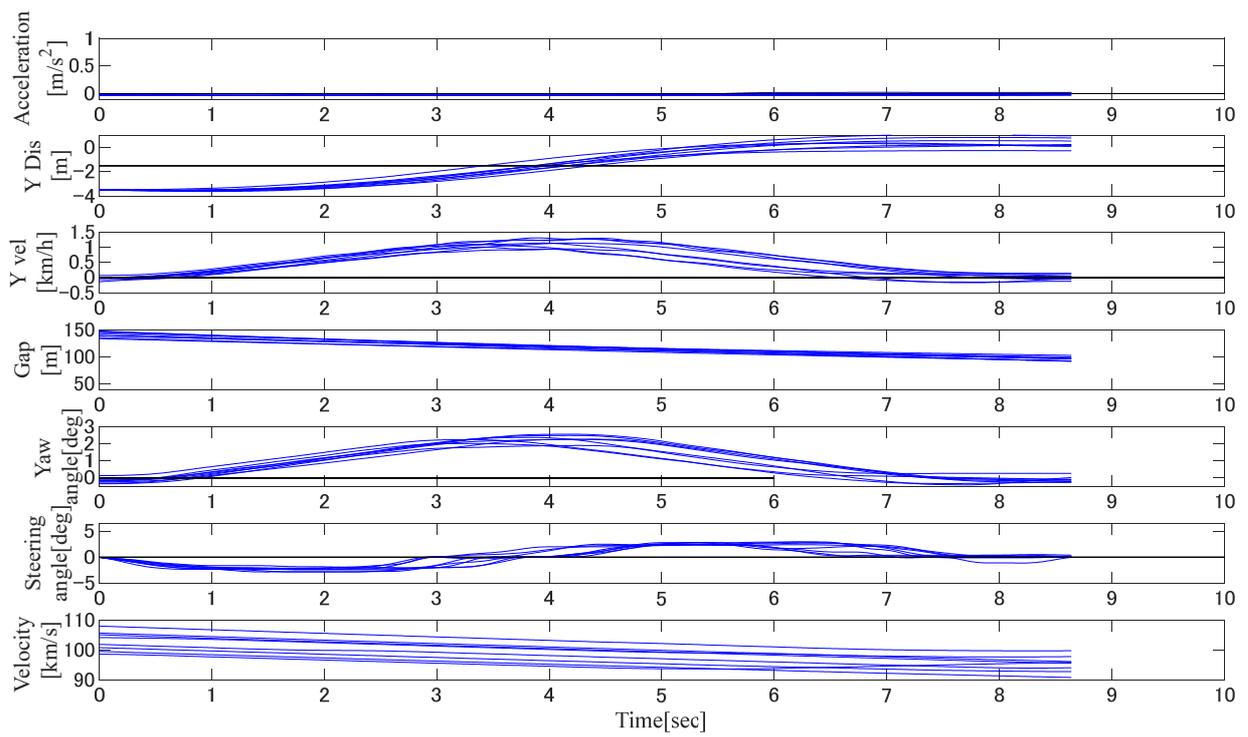


Fig.4.1.7 実験結果 走行車線進入行動 (ドライバ C)

4.1.3 運転情報収集実験結果の正規化

本節では運転情報収集実験について述べているが、次節 4.2 節以降にて運転情報収集実験の結果を基にドライバの運転行動モデルの同定を行なう。本研究では、ドライバが行なうステアリング操作について着目しており、ドライバ運転行動モデルが持つ動作数を決定する必要がある。着目する人間の運転行動に対して、階層的クラスタ解析を用いる手法によって動作数の決定を行なう。階層的な手法では階層的にクラスタの結合が行われ、デンドログラムによりその結合距離を得ることが出来るため、それぞれの動作の類似度を検討することが出来る。その類似度から行動がいくつかの動作から構成されているのかの検討が可能である。本研究では、クラスタ間距離として各データ間の Euclid 距離を用いた凝集型のクラスタ解析を用いる。距離として Euclid 距離を用いており、各情報に対し重み付けが一定となるようにデータには正規化処理を施す必要があるため、式(4.1.1)から式(4.1.3)を用いて正規化を行なった。被験者の車体角度、横方向位置等の各変数の最大の絶対値を調べ、それぞれの変数を最大の絶対値で割ることにより正規化した。

$$\bar{d}_y = \frac{d_y}{\max(|d_y|)} \quad (4.1.1)$$

$$\bar{v}_y = \frac{v_y}{\max(|v_y|)} \quad (4.1.2)$$

$$\bar{u} = \frac{u}{\max(|u|)} \quad (4.1.3)$$

ここで、 \bar{d}_y , \bar{v}_y , \bar{u} はそれぞれ正規化した横方向位置[-], 横方向速度[-], ステアリング角[-]である。

4.2 追越行動における運転行動モデル構築

収集した運転情報を用いて、追越行動におけるドライバの運転行動モデルの構築を行う。
「追越車線進入行動」と「走行車線進入行動」の切り替え、すなわちステアリング操作の切り替えには前方車車間距離と車体角度を用いる。運転情報収集実験結果より遷移条件を導出し、導出した遷移図を Fig.4.2.1 に示す。

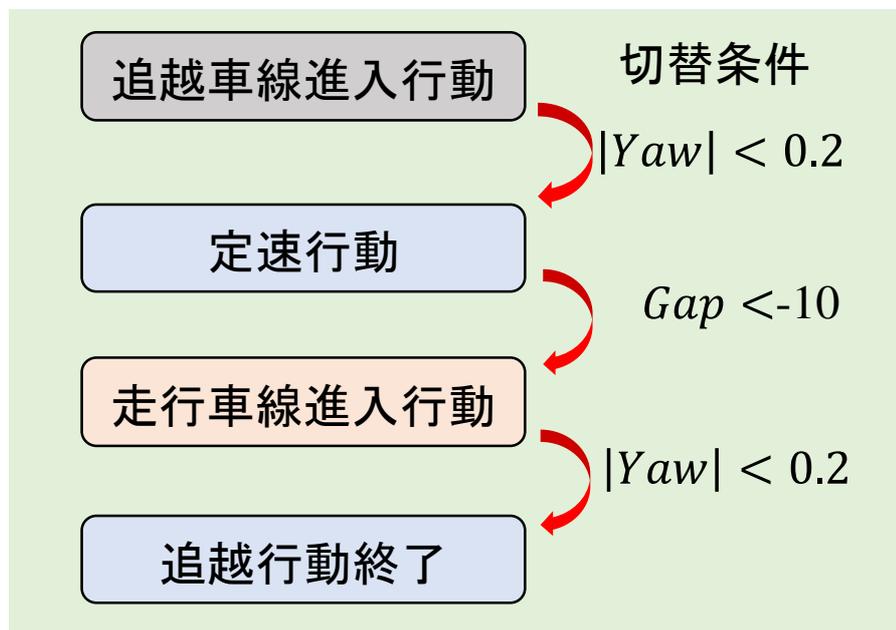


Fig.4.2.1 遷移条件図

4.3 追越車線進入行動モデルの構築

本節では、追越走行中における追越車線進入行動モデルの構築を行う。走行車線からステアリングを切り、その瞬間から車体角度が $-0.2[\text{deg}]$ より大きく $0.2[\text{deg}]$ より小さい範囲に達するまでの運転行動を「追越車線進入行動」とする。

4.3.1 追越車線進入行動動作数の決定

4.1.3 項で正規化した運転情報データをデータ点とし、 \bar{d}_y , \bar{v}_y , \bar{U} の3次元空間上の Euclid 距離を用いてクラスタ軌跡を行う。凝集型クラスタ解析では、その凝集法として Ward 法を用いる。HDS は区分モデルであるが、一般的に区分モデルを形成する際は区分数が多いほどモデル化誤差は小さくなるため、ある程度区分数が多い方が良い。しかし、本研究では、人間の運転行動モデルを構築し、人間がどのように運転操作を行っているかを読み解き、また自律走行車に適用が出来るような人間の行動モデル構築を行うことが必要であるため、あまりに区分数が多いモデルとなつては理解しやすいモデルを構築出来ず、また、自律走行車に適用する際には、区分数が多いと実装した場合でも実際には機能しないモードが生じるなどモデルが有効に機能しないことが考えられる。そこで、デンドログラムに基づいて区分数を少数程度で決める。クラスタ解析を用い、被験者3人のデンドログラムを Fig.4.3.1 から Fig.4.3.4 に示す。

デンドログラムの横軸には各時刻のデータサンプル点が初期クラスタとして時系列に関係なく配置されているが、点数が多すぎ煩雑となるために図中には残り 20 クラスタとなった以降の結合のみを表記してある。縦軸はそれらクラスタが結合される際の平方距離を示している。デンドログラムでは、ある分岐から次の分岐までの縦軸座標が離れているほど類似度の低いクラスタがまとめられていることとなり、逆に近づいているほど類似度の高いデータがまとめられていることを示す。図を見ると、クラスタ数が少なくなっていくにつれ結合距

離は大きくなっているのに、分割数はより少ないほうが好ましい。しかし、分割数を少なくしすぎると人間の追越行動を表現するのが難しい。「追越車線進入行動」は、ステアリングを右に切って戻し、その後左に切って戻すというおおまかに4つの動作から成り立っているところに着目し、4分割が適当であると考え。よって、被験者が追い越し車線へ進入する際のステアリング動作の持つモード数は4であるとして以下の解析を進める。以上により、「追越車線進入行動」は4つの動作モードで構成されるとする。

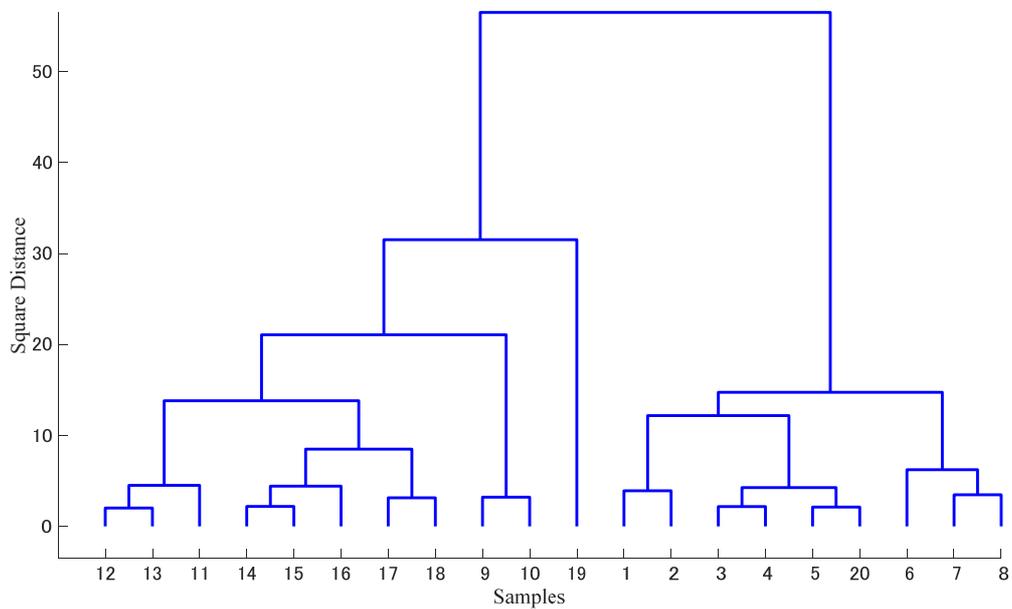


Fig.4.3.1 被験者 A 追越車線進入行動でのデンドログラム

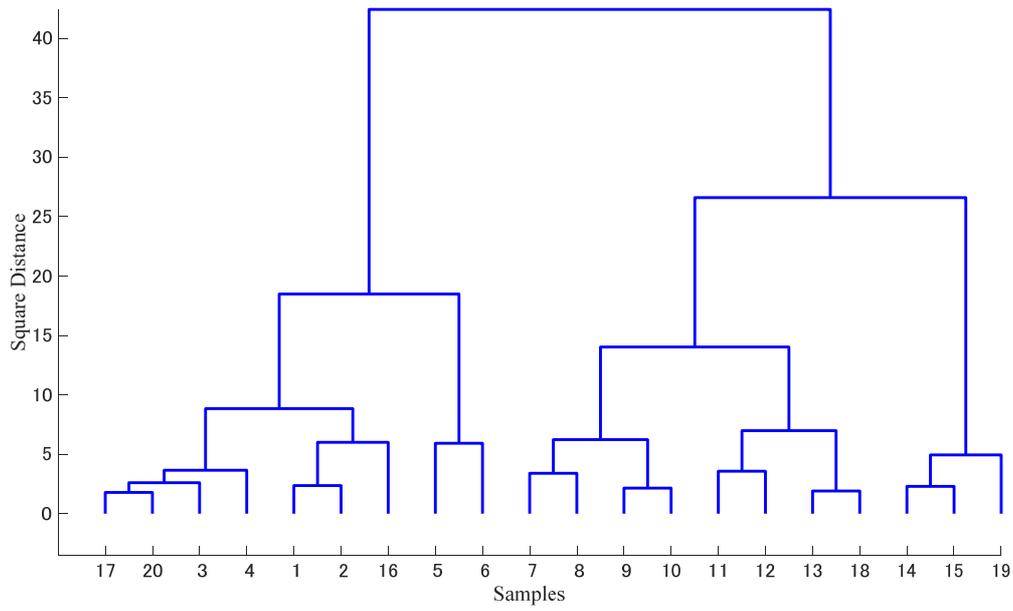


Fig.4.3.2 被験者 B 追越車線進入行動でのデンドログラム

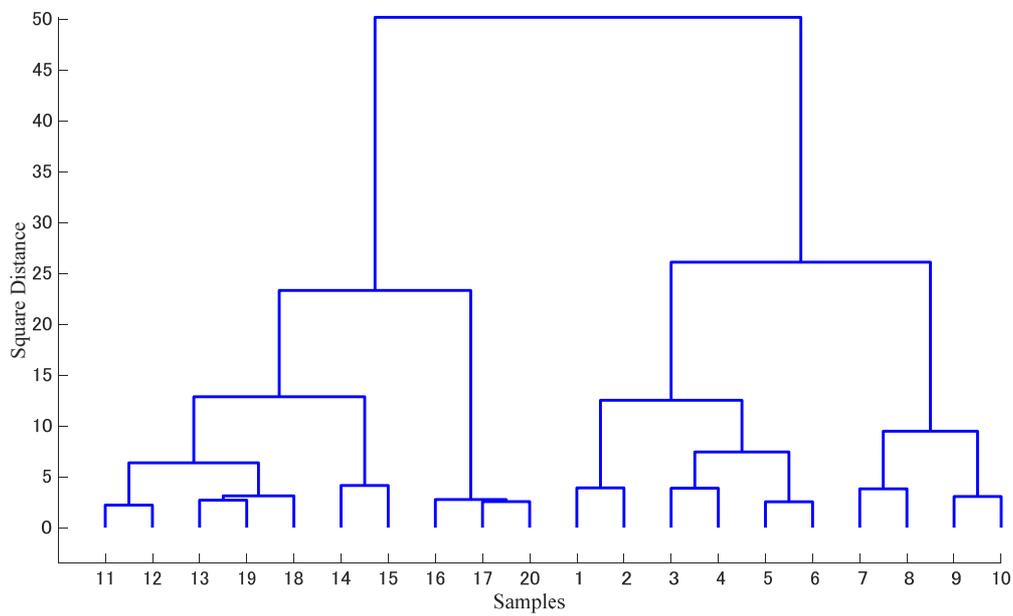


Fig.4.3.3 被験者 C 追越車線進入行動でのデンドログラム

4.3.2 追越車線進入行動の切替判断条件とモデルの導出

4.3.1 項ではクラスタ解析より得られるデンドログラムを用いて動作数の決定を行ったが、シンボル化のための部分集合への分割には以下の式(4.3.1)に示す k-means 法によるクラスタリングを行った。k-means 法とは、次の目的関数を最小化する分割最適化クラスタリングの代表的な手法である^[16]。

$$Err(\{X_i\}) = \sum_i^k \sum_{x \in X_i} \|x - \bar{x}_i\|^2 \quad (4.3.1)$$

ただし、データ集合 X は、ベクトル表現されたデータ x の集合である。クラスタ X_i は、データ集合の網羅的で互いに素な部分の集合である。 \bar{x}_i は X_i 中の重心（セントロイド）である。アルゴリズムを以下に示す。

入力はデータ集合 X 、クラスタ数 k 、及び最大反復数 maxIter とする。

1. 初期化：データ集合をランダムに k 個のクラスタに分割し、初期クラスタを得る。

2. 各クラスタについてセントロイド $x_i = \frac{1}{|x_i|} \sum_{x \in X_i} x$ を計算する。

3. 全てのデータ $x \in X$ を、各クラスタのセントロイド X_i との距離 $\|x - x_i\|$ を最小にするクラスタ X_i へ割り当てる。

4. 前の反復とクラスタに変化がない、または反復が maxIter を超えたら終了し、クラスタ X_i を出力する。

この k-means 法を用いると、任意のクラスタにデータを分割することが出来る。4.3.1 項より「追越車線進進行動」における被験者が持つ動作数は 4 と決定したので、分割数を 4 とし、k-means 法により横方向位置[m]、横方向速度[m/s]、ステアリング操作量[deg]を分割した。被験者 3 人の分割したステアリング動作を Fig.4.3.4 から Fig.4.3.6 に示す。

この図の横軸はステアリングを切った瞬間から車体角度が -0.2deg より大きく 0.2deg より小さい範囲に達するまでの時間を表している。縦軸は上から順に、横方向位置を正規化した値[-]、横方向速度を正規化した値[-]、ステアリング操作量を正規化した値[-]を示している。ドライバのデータは 4 つの動作に分割され、緑線が動作モード式 1、青線が動作モード式 2、赤線が動作モード式 3、黄線が動作モード式 4 を表している。

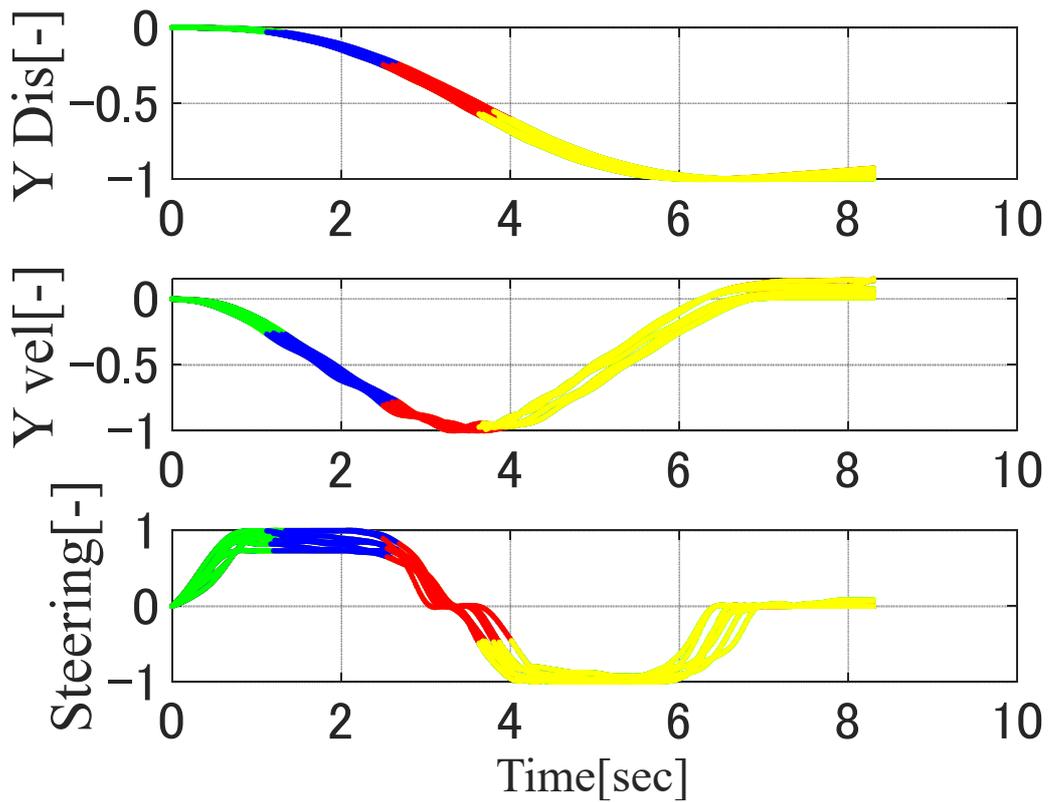


Fig.4.3.4 追越車線進入行動での動作モード分割後のデータ(被験者 A)

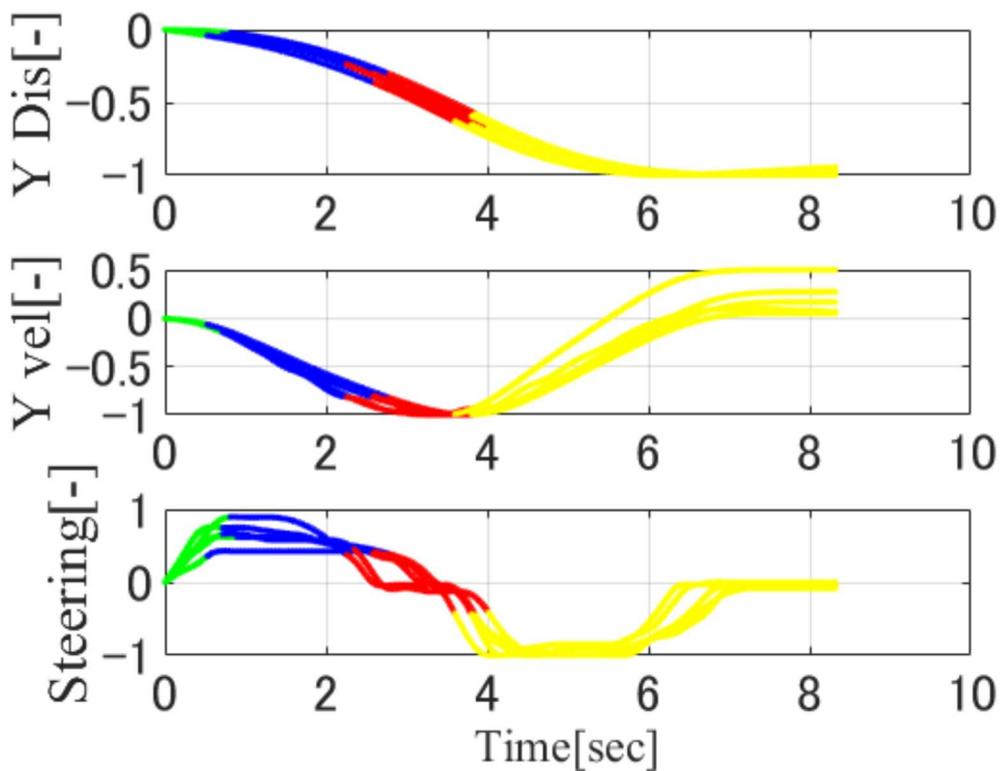


Fig.4.3.5 追越車線進入行動での動作モード分割後のデータ(被験者 B)

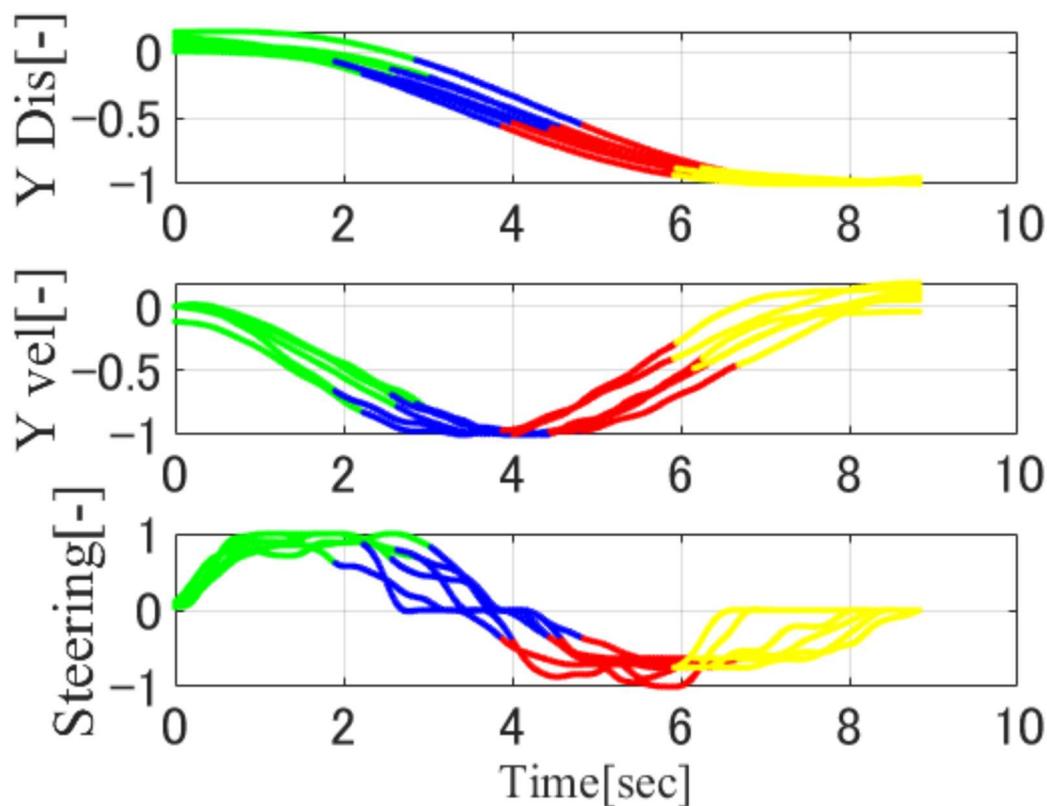


Fig.4.3.6 追越車線進入行動での動作モード分割後のデータ(被験者 C)

また、「追越車線進入行動」において収集データよりドライバは横方向位置 d_y [m], 横方向速度 v_y [km/h], ステアリング操作量 u [deg]に基づき, 各動作モードの切り替え判断を行なっていると考えられる. 隣の車線の中心を目標に車線変更を行っていると考えられるので横方向位置 d_y [m]を選択し, ステアリング操作は収集実験から被験者ごとに異なるがある一定値のステアリング操作量を目標としてステアリング操作を行う傾向が見られることから横方向速度 v_y [km/h]を選択した. 係数を a, b, c とすると関係式は以下の式(4.3.2)となる

$$u = a + b \cdot d_y + c \cdot v_y \quad (4.3.2)$$

そして, この式からステアリング操作を切り替える為の追越車線進入行動切替判断モデルを同定する. この追越車線進入行動切替判断条件の導出には SVM を用いる. 導出するべき

追越車線進入行動切替判断条件式を SVM を用いて求めたものが以下の Table 4.3.1 から Table 4.3.4 に示す.

Table 4.3.1 追越車線進入行動における切替判断式(被験者 A)

	a	b	c
1 - 2	0.2971	137.2768	-47.3987
2 - 3	0.3313	2.7073	-5.3933
3 - 4	-0.8679	0.2871	0.9104

Table 4.3.2 追越車線進入行動における切替判断式(被験者 B)

	a	b	c
1 - 2	0.2546	-0.5136	-0.6483
2 - 3	-0.3164	0.2153	0.1724
3 - 4	-0.9743	0.5491	-0.0809

Table 4.3.3 追越車線進入行動における切替判断式(被験者 C)

	a	b	c
1 - 2	0.8452	1.5899	-3.9557
2 - 3	-0.1291	-0.1817	0.1854
3 - 4	1.7844	1.0512	-0.4641

次に、ステアリング操作を行うための追越車線進入行動モデルを構築する。本研究では、構築したモデルを自律走行車の車両運動制御システムに実装することを想定しており、より複雑な運転行動に対応して実走を行うことも視野に入れる必要があるため、個々のモデルは出来るだけ単純なモデルを用いることが望ましい。そこで、線形二乗法を用いて追越車線進入行動モデルを同定する。人間は追越車線へ進入する際には、横方向位置 d_y [m]、横方向速

度 v_y [m/s], ステアリング操作量 u [deg]によって行動を決定していると考えられる. 係数を a, b, c とすると関係式は以下の式(4.3.3)となる.

$$u = a + b \cdot d_y + c \cdot v_y \quad (4.3.2)$$

そして, この「追越車線進入行動」を最小二乗法で求めたものが以下の Table 4.3.4 から Table 4.3.6 である.

Table 4.3.4 追越車線進入行動における動作モード式(被験者 A)

	a	b	c
mode1	0.0487	93.823	-63.6582
mode2	1.8297	4.0312	-3.7928
mode3	3.1935	2.7539	-1.1925
mode4	6.0843	2.0067	4.3282

Table 4.3.5 追越車線進入行動における動作モード式(被験者 B)

	a	b	c
mode1	1.1723	1.833	-3.0448
mode2	1.7804	0.959	0.1235
mode3	-0.0602	1.0905	-0.9702
mode4	-0.9448	0.0273	3.2939

Table 4.3.6 追越車線進入行動における動作モード式(被験者 C)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
mode1	0.676	0.8801	-5.3669
mode2	1.5774	2.2558	-1.7935
mode3	0.3099	0.7138	-0.2155
mode4	2.1908	0.7839	4.3451

導出した被験者の追越車線進入行動切替判断条件と，導出したモデルによるステアリング操作の分割状態を Fig.4.3.7 から Fig.4.3.18 に示す．Fig.4.3.7，Fig4.3.11，Fig4.3.15，は，被験者 A，被験者 B，被験者 C それぞれの動作モード式，切替判断式全体を表している．

Fig.4.3.8 から Fig.4.3.10，Fig.4.3.12 から Fig.4.3.14，Fig.4.3.16 から Fig.4.3.18 は，それぞれの被験者の動作モード式間の切替判断条件式によるモードの切り替えの状態を表す．図の x 軸は横方向位置 d_y [m]， y 軸は横方向速度 v_y [km/h]， z 軸はステアリング操作量 u [deg]であり，水色の平面が動作モード動作モード 1 から動作モード 2 への遷移条件，ピンク色の平面がモード動作 2 から動作モード 3 への遷移条件，緑色の平面がモード動作 3 から動作モード 4 への遷移条件である．また，図中の黒線はドライバによる操作時の実測値を，緑線は動作モード 1，青線は動作モード 2，赤線は動作モード 3，黄線は動作モード 4 の動作モードを表す．実験データそれぞれの動作切り替え点を×印で示してある．動作毎に動作モードを切り替えることによりステアリング操作出力に類似した動作が再現されていることが分かる．

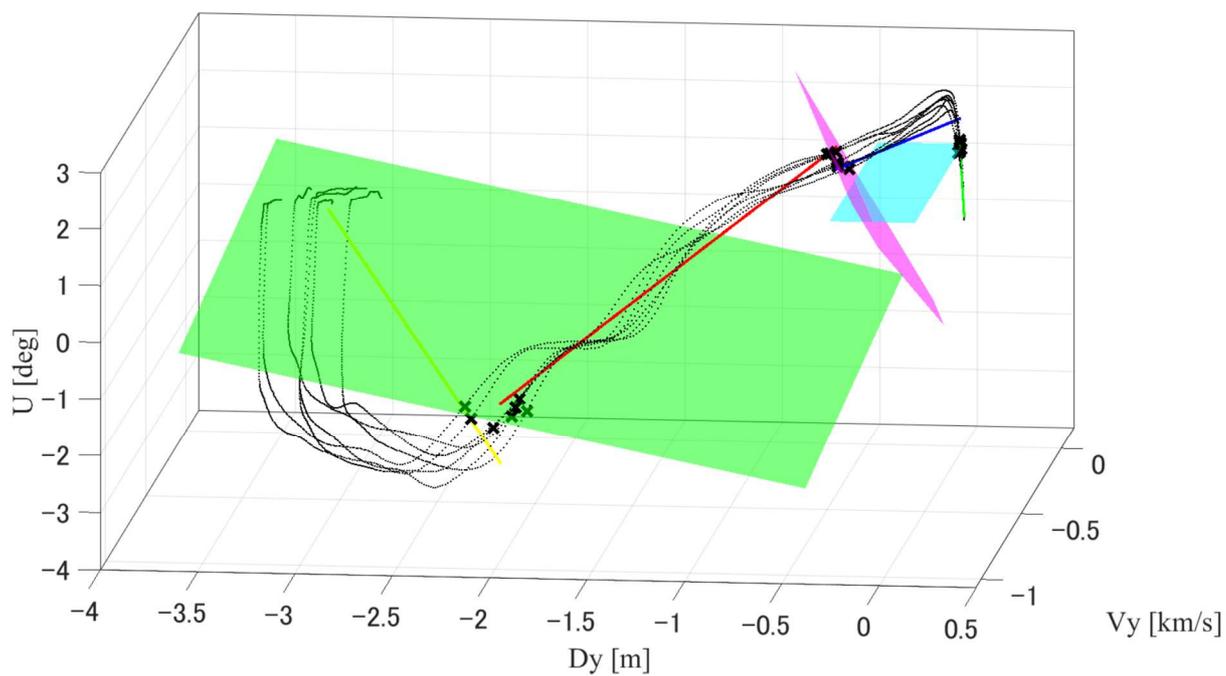


Fig.4.3.7 追越車線進入行動切替判断条件(被験者 A)

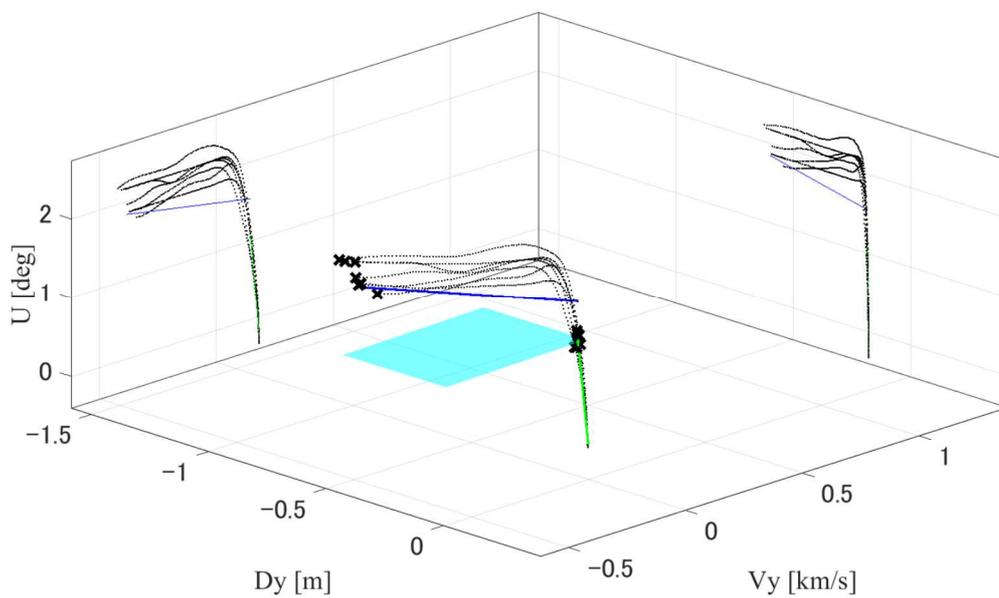


Fig.4.3.8 追越車線進入行動動作モード 1-2 切替判断条件(被験者 A)

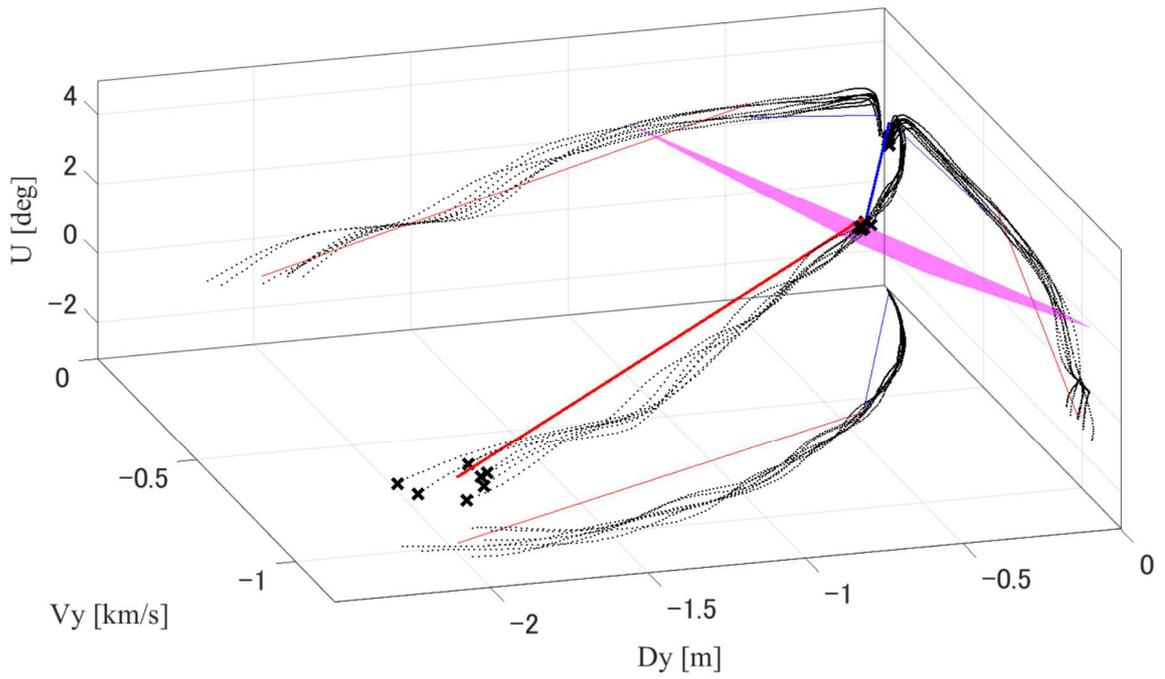


Fig.4.3.9 追越車線進入行動動作モード 2-3 切替判断条件 (被験者 A)

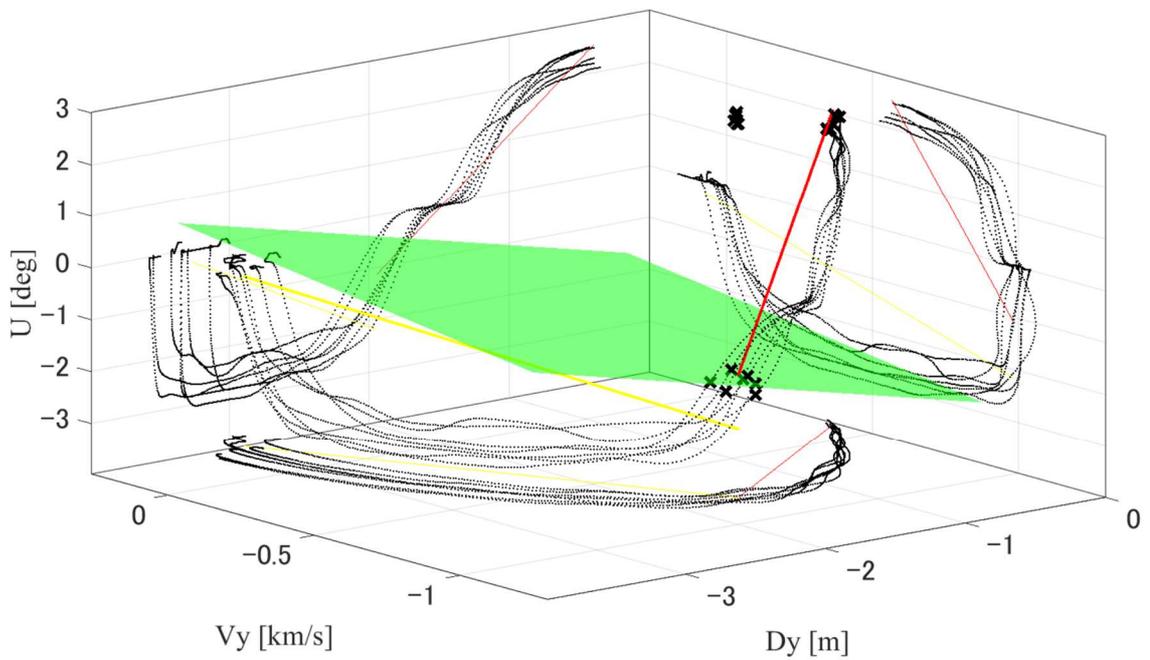


Fig.4.3.10 追越車線進入行動動作モード 3-4 切替判断条件 (被験者 A)

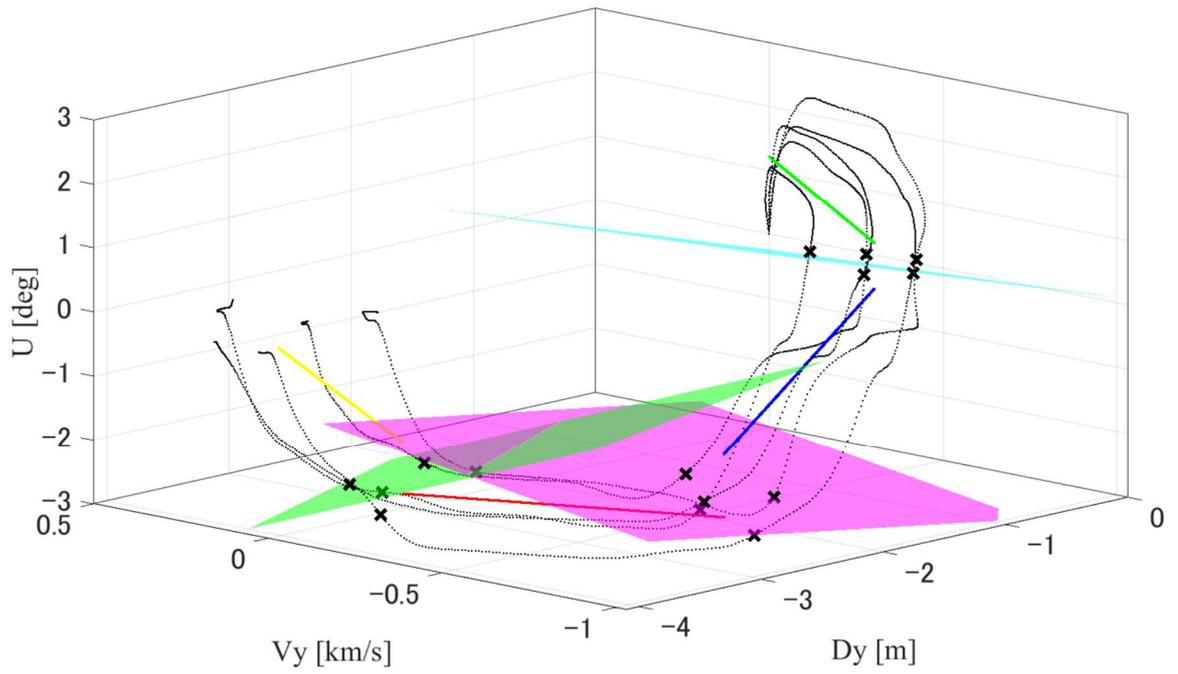


Fig.4.3.11 追越車線進入行動動作切替判断条件(被験者 B)

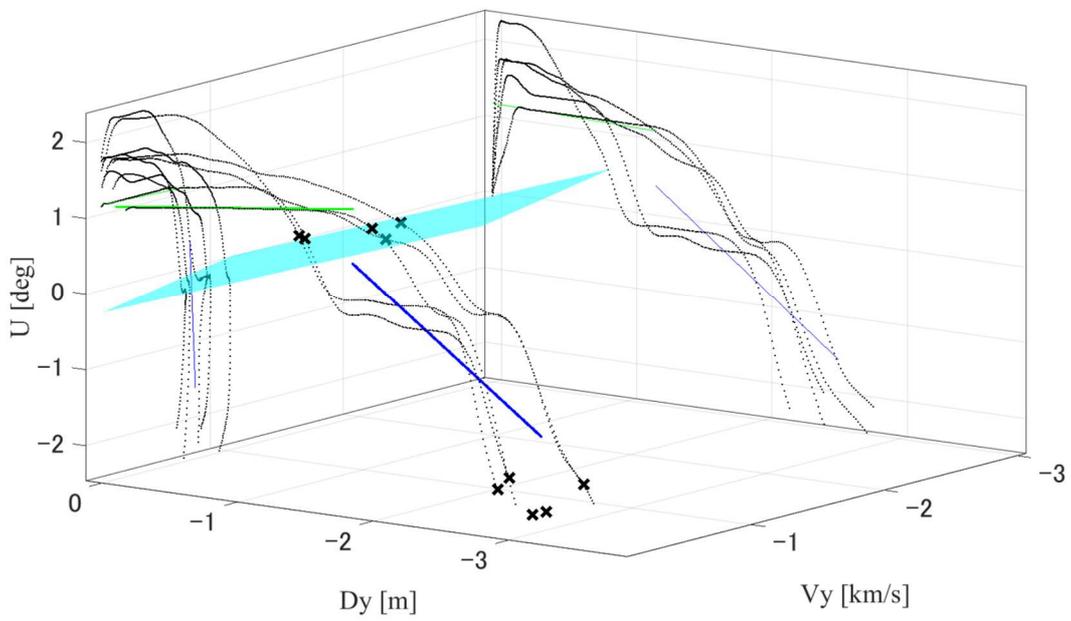


Fig.4.3.12 追越車線進入行動動作モード 1-2 切替判断条件(被験者 B)

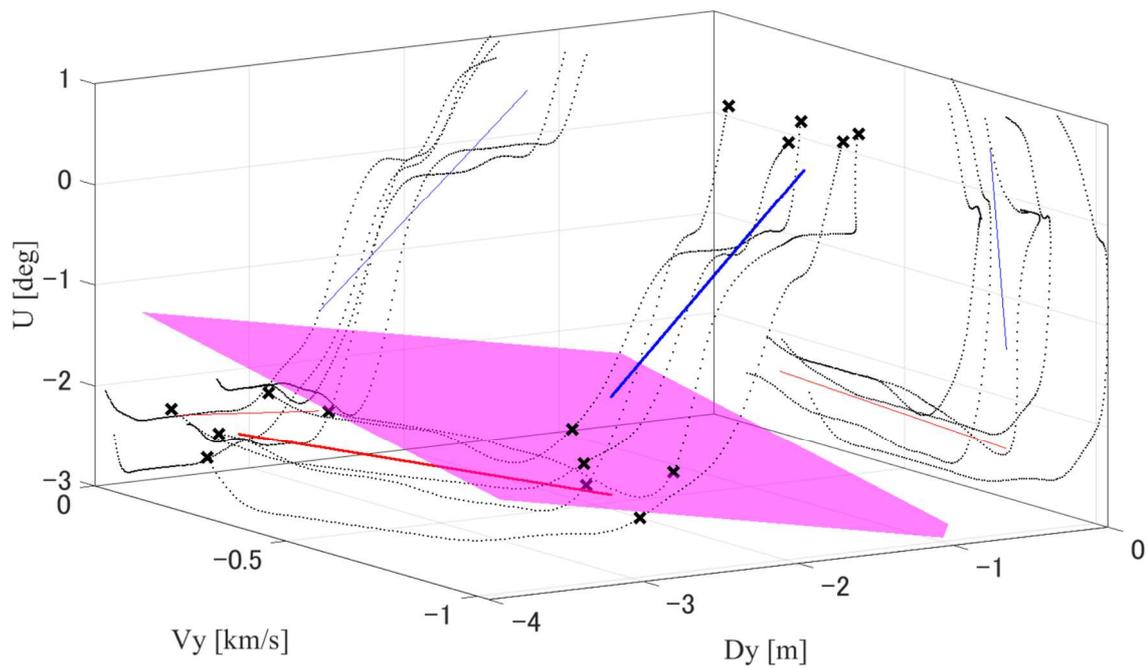


Fig.4.3.13 追越車線進入行動動作モード 2-3 切替判断条件 (被験者 B)

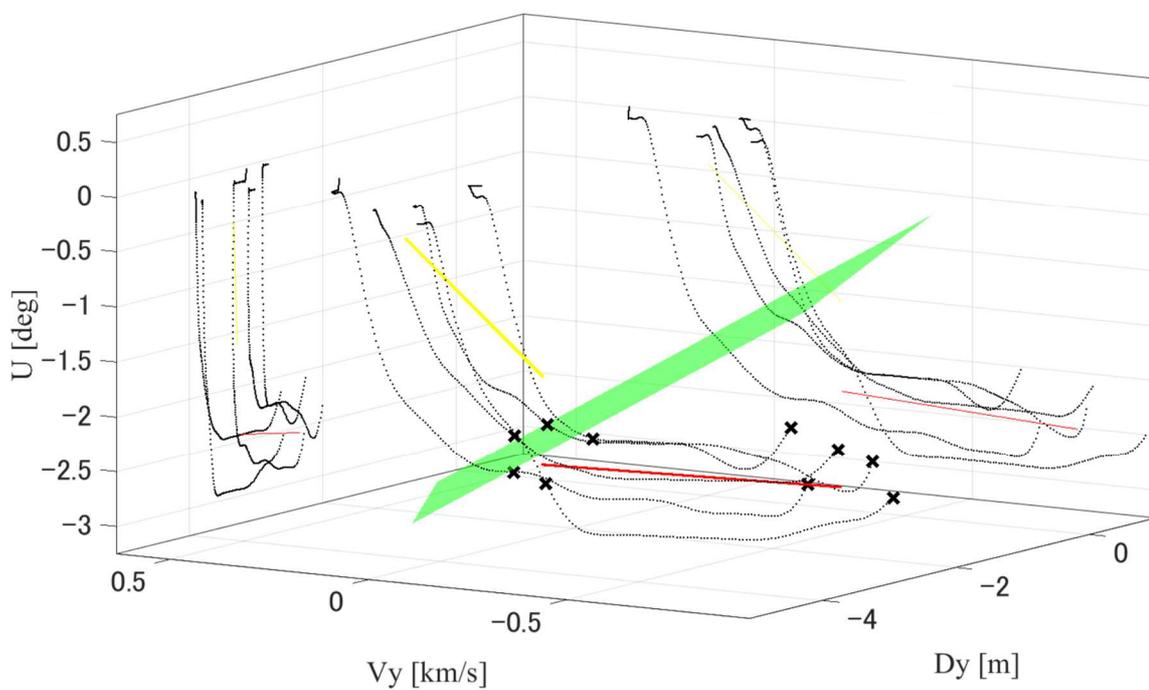


Fig.4.3.14 追越車線進入行動動作モード 3-4 切替判断条件 (被験者 B)

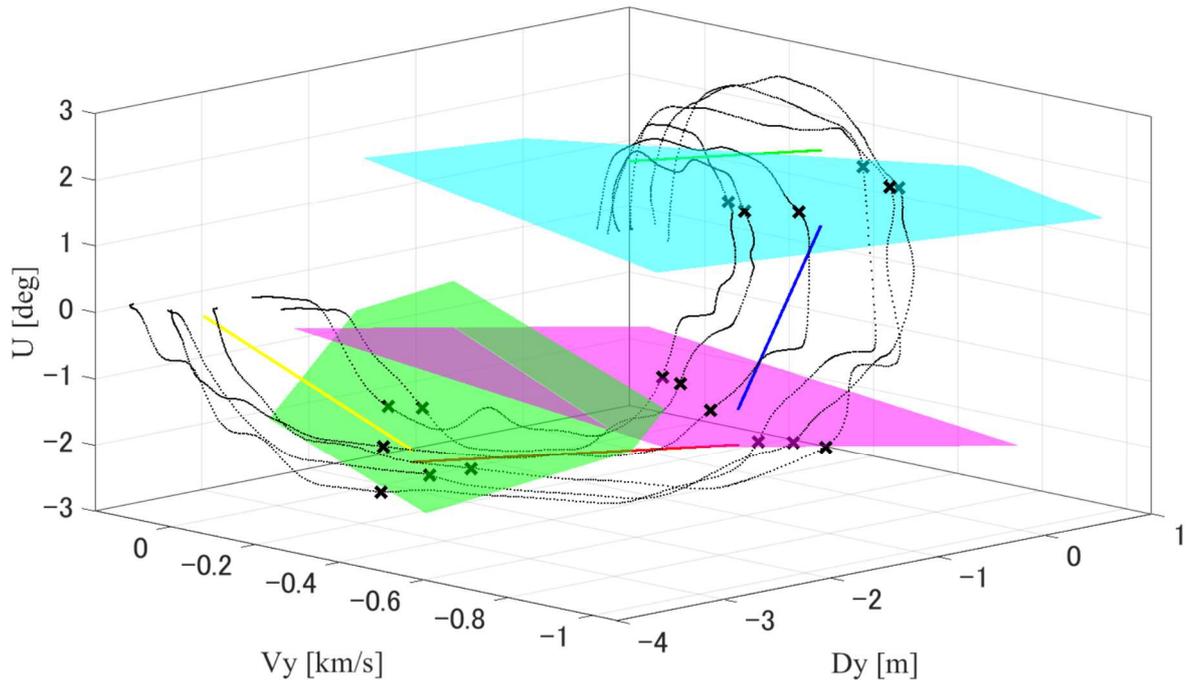


Fig.4.3.15 追越車線進入行動動作切替判断条件(被験者 C)

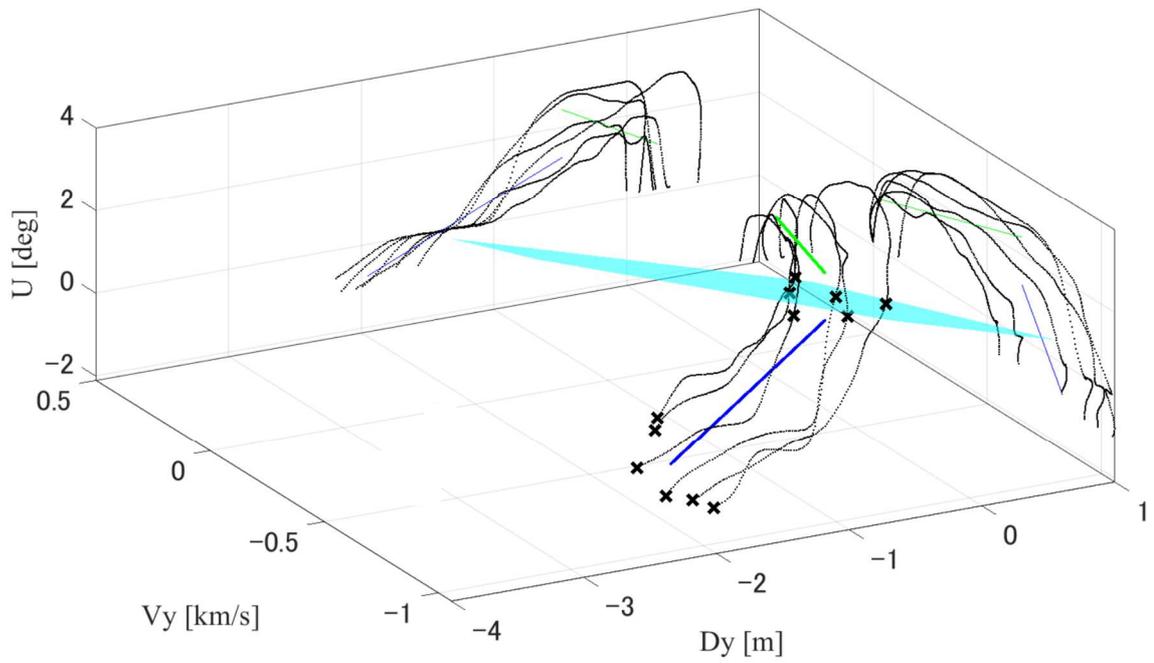


Fig.4.3.16 追越車線進入行動動作モード 1-2 切替判断条件(被験者 C)

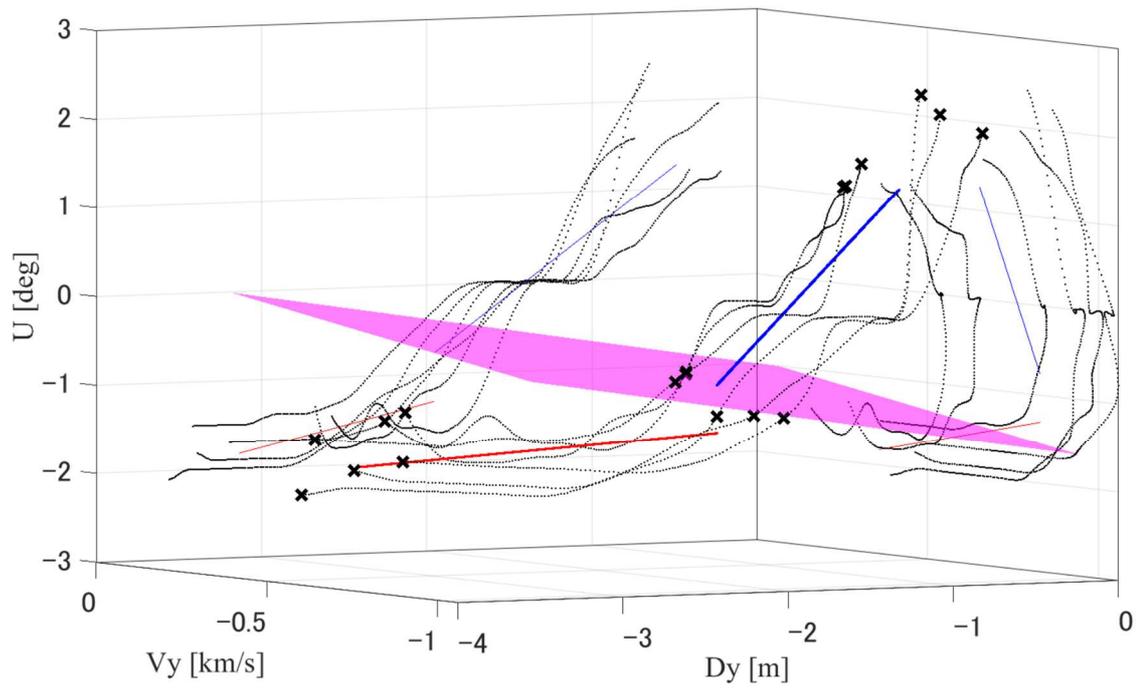


Fig.4.3.17 追越車線進入行動動作モード 2-3 切替判断条件 (被験者 C)

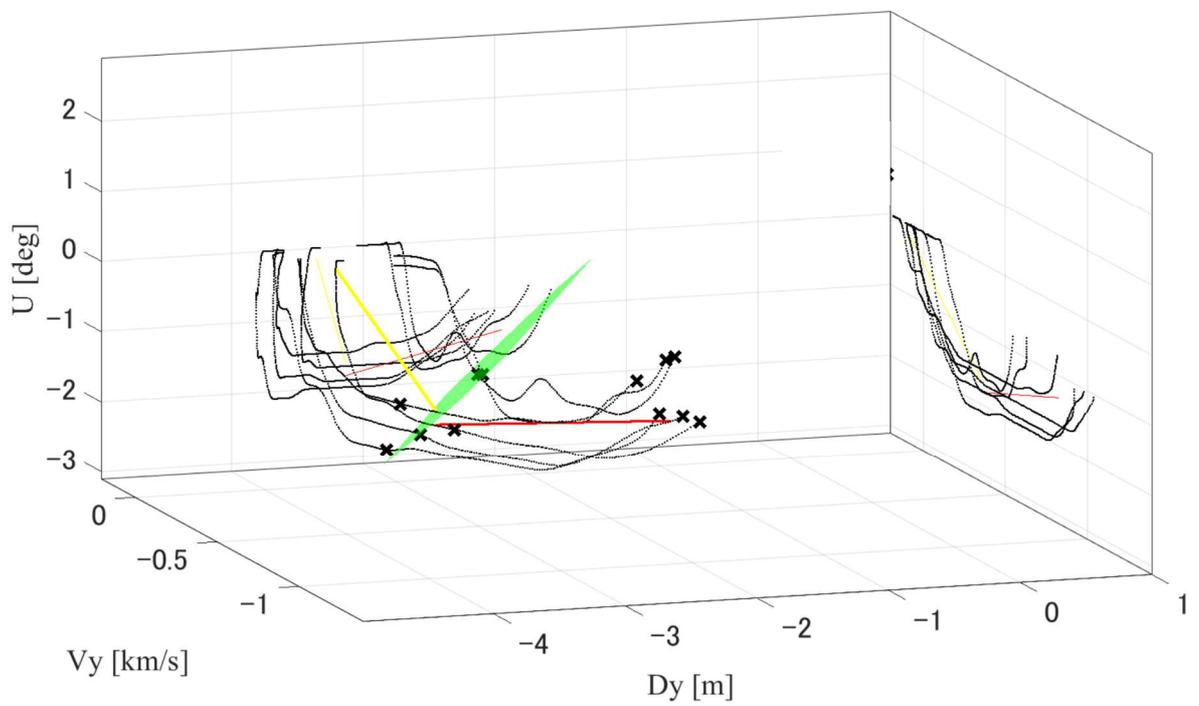


Fig.4.3.18 追越車線進入行動動作モード 3-4 切替判断条件 (被験者 C)

4.4 走行車線進入行動モデルの構築

本節では、追越行動中における走行車線進入行動モデルの構築を行う。自車と前方車との相対距離が-10mを超えた瞬間から車体角度が-0.2degより大きく0.2degより小さい範囲に達するまでの運転行動を「走行車線進入行動」とする。

4.4.1 走行車線進入行動動作数の決定

4.1.3項で正規化した運転情報データをデータ点とし、 \bar{d}_y , \bar{v}_y , \bar{u} の3次元空間上のEuclid距離を用いてクラスタ軌跡を行う凝集型クラスタ解析では、その凝集法としてWard法を用いる。4.3.1項で同定した追越車線進入行動動作数と同様にクラスタ解析を用い走行車線進入行動動作数を同定する。被験者の10試行分全ての時系列データを用いて解析を行った結果として得られたデンドログラムをFig.4.4.1からFig.4.4.3に示す。図を見ると、クラスタ数が少なくなっていくにつれ結合距離は大きくなっているため、分割数はより少ないほうが好ましい。しかし、分割数を少なくし過ぎると人間の追越行動を表現するのが難しい。追越車線進入行動は、ステアリングを左に切って戻し、その後右に切って戻すというおおまかに4つの動作から成り立っているところに着目し、4分割が適当であると考えられる。よって、被験者が走行車線へ進入する際のステアリング動作の持つモード数は4であるとして以下の解析を進める。以上により、「走行車線進入行動」は4つの動作モードで構成されるとする。

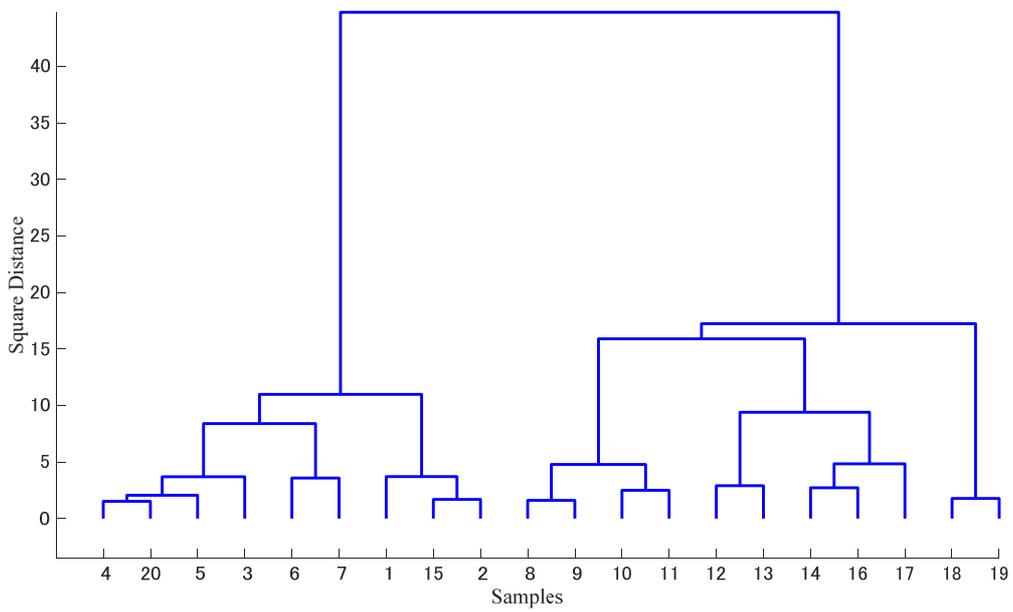


Fig.4.4.1 走行車線進入行動でのデンドログラム(被験者 A)

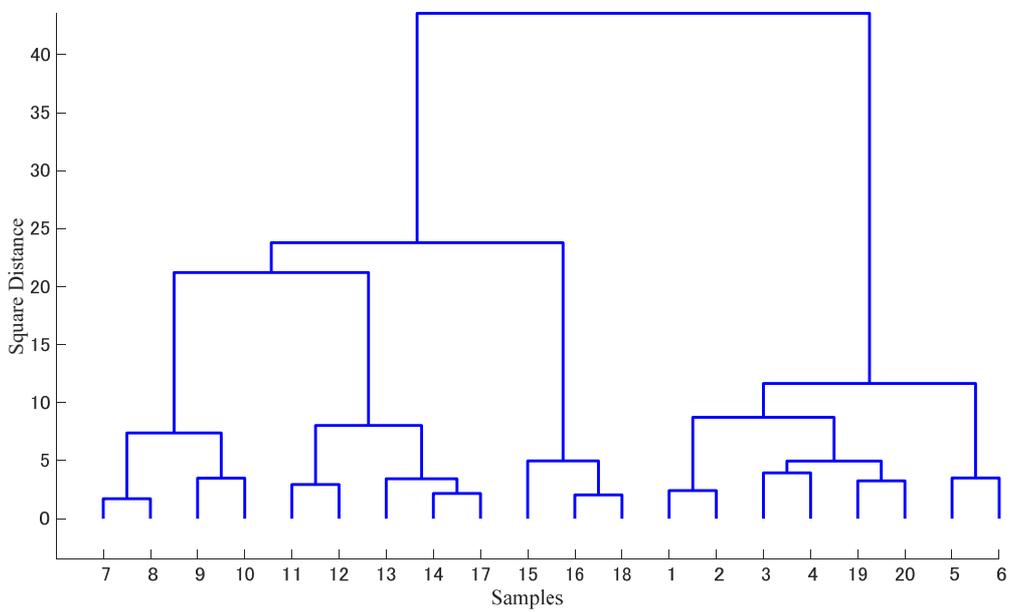


Fig.4.4.2 走行車線進入行動でのデンドログラム(被験者 B)

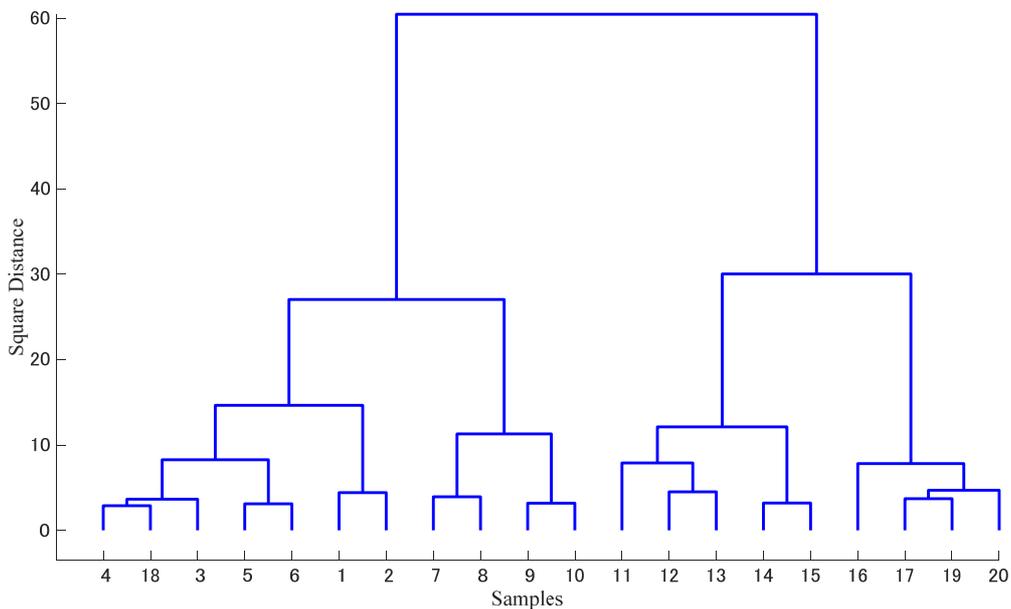


Fig.4.4.3 走行車線進入行動でのデンドログラム(被験者 C)

4.4.2 走行車線進入行動の切替判断条件とモデルの導出

4.3.2 項で導出した追越車線進入行動の切替判断条件と同様に k-means 法を用いてクラスタリングを行う。4.4.1 項より「走行車線進入行動」における被験者が持つ動作数は 4 と決定したので、分割数を 4 として k-means 法により横方向位置[m]，横方向速度[m/s]，ステアリング操作量[deg]を分割した。被験者 3 人の分割した「走行車線進入行動」を Fig.4.4.4 から Fig.4.4.6 に示す。この図の横軸は自転車と前方車との相対距離が-10m を超えた瞬間から車体角度が-0.2deg より大きく 0.2deg より小さい範囲に達する時までの時間を表している。縦軸は上から順に車体角度を正規化した値[-]，横方向位置を正規化した値[-]，横方向速度を正規化した値[-]，ステアリング操作量を正規化した値[-]を示している。ドライバのデータは 4 つの動作に分割され，緑線が動作モード式 1，青線が動作モード式 2，赤線が動作モード式 3，黄線が動作モード式 4 を表している。

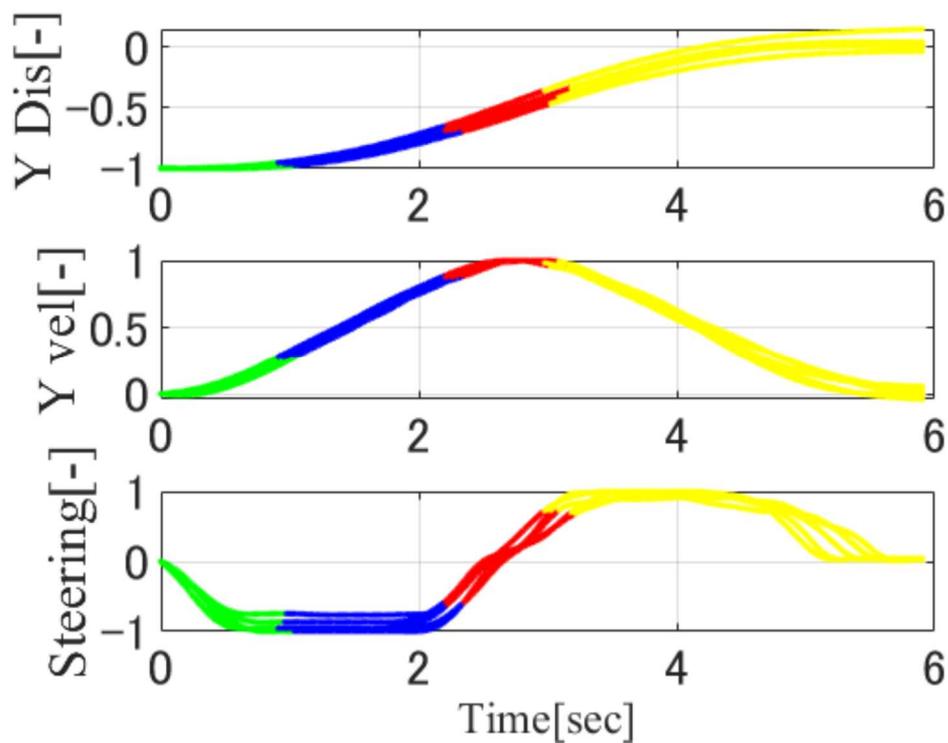


Fig.4.4.4 走行車線進入行動での動作モード分割後のデータ (被験者 A)

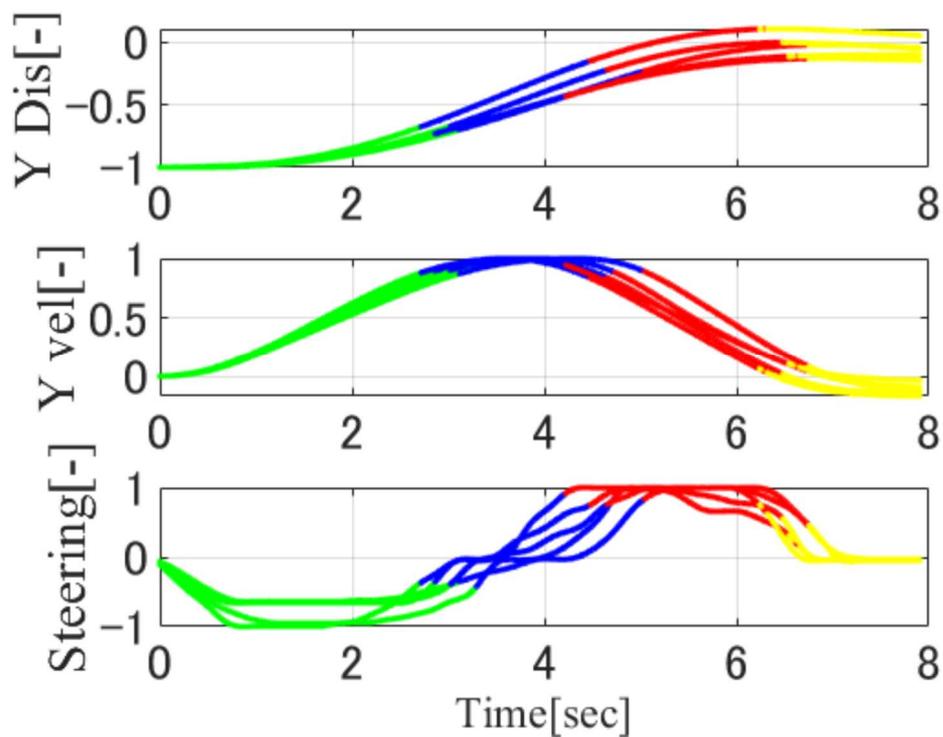


Fig.4.4.5 走行車線進入行動での動作モード分割後のデータ (被験者 B)

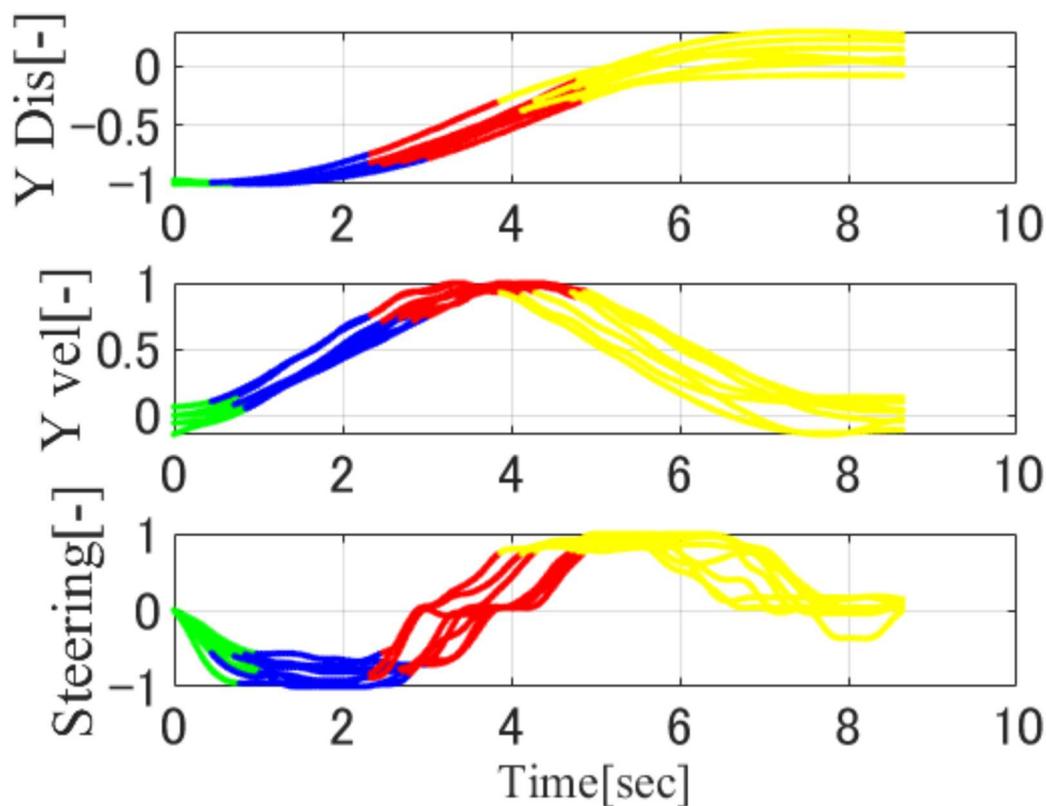


Fig.4.4.6 走行車線進入行動での動作モード分割後のデータ（被験者 C）

また、走行車線進入行動においてドライバは横方向位置 d_y [m]，横方向速度 v_y [m/s]，ステアリング操作量 u [deg]に基づき，各動作モードの切り替え判断を行なっていると考えられる．そこで，ステアリング操作を切り替える為の走行車線進入行動切替判断モデルを同定する．この走行車線進入行動切替判断条件の導出には SVM を用いる．導出すべき走行車線進入行動切替判断条件式を SVM を用いて求めたものが以下の Table 4.4.1 から Table 4.4.3 となる．式(4.4.1)がモード B-1 からモード B-2 への切替判断条件式，式(4.4.2)がモード B-2 からモード B-3 への切替判断条件式である．

Table 4.4.1 走行車線進入行動における切替判断式(被験者 A)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1 - 2	-0.7979	0.964	-0.8795
2 - 3	-10.1296	-2.0933	0.4181
3 - 4	0.3111	1.3925	3.9984

Table 4.4.2 走行車線進入行動における切替判断式(被験者 B)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>C</i>
1 - 2	0.4044	0.1761	-1.227
2 - 3	0.5933	0.7947	2.3718
3 - 4	0.3385	-0.0519	0.524

Table 4.4.3 走行車線進入行動における切替判断式(被験者 C)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1 - 2	-2.3136	-0.634	-6.885
2 - 3	-1.5719	-0.8064	0.4382
3 - 4	0.2854	2.7905	5.672

次に、ステアリング操作を行うための走行車線進入行動モデルを構築する。本研究では、最小二乗法を用いて走行車線進入行動モデルを同定する。人間は走行車線へ進入する時、横方向位置 d_y [m]、横方向速度 v_y [m/s]、ステアリング操作量 u [deg]によって行動を決定していると考えられる。この走行車線進入行動を最小二乗法で求めたものが以下の Table 4.4.4 から Table 4.4.6 である。

Table 4.4.4 走行車線進入行動における動作モード式(被験者 A)

	a	b	c
mode1	-2.3323	-0.2934	-10.8413
mode2	-4.4851	-0.0831	-0.4549
mode3	3.7851	4.0288	2.9635
mode4	0.2747	4.2869	6.7235

Table 4.4.5 走行車線進入行動における動作モード式(被験者 B)

	a	b	c
mode1	14.5103	4.3302	-5.5933
mode2	3.1464	1.439	-0.3131
mode3	1.6973	1.8452	3.0975
mode4	-0.0233	0.0036	0.6254

Table 4.4.6 走行車線進入行動における動作モード式(被験者 C)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
mode1	-3.5638	-0.7657	-6.1715
mode2	-0.3459	0.6039	-0.1884
mode3	4.3648	1.615	-1.3456
mode4	0.1401	0.3809	3.1343

導出した被験者の走行車線進入行動切替判断条件と，導出したモデルによるステアリング操作の分割状態を Fig.4.4.3 に示す．図の x 軸は横方向位置 d_y [m]， y 軸は横方向速度 v_y [m/s]， z 軸はステアリング操作量 u [deg]であり，水色の平面が動作モード動作モード 1 から動作モード 2 への遷移条件，ピンク色の平面がモード動作 2 から動作モード 3 への遷移条件，緑色の平面がモード動作 3 から動作モード 4 への遷移条件である．また，図中の黒線はドライバによる操作時の実測値を，緑線は動作モード 1，青線は動作モード 2，赤線は動作モード 3，黄線は動作モード 4 の動作モードを表す．実験データそれぞれの動作切り替え点を×印で示してある．動作毎に動作モードを切り替えることによりステアリング操作出力に類似した動作が再現されていることが分かる．

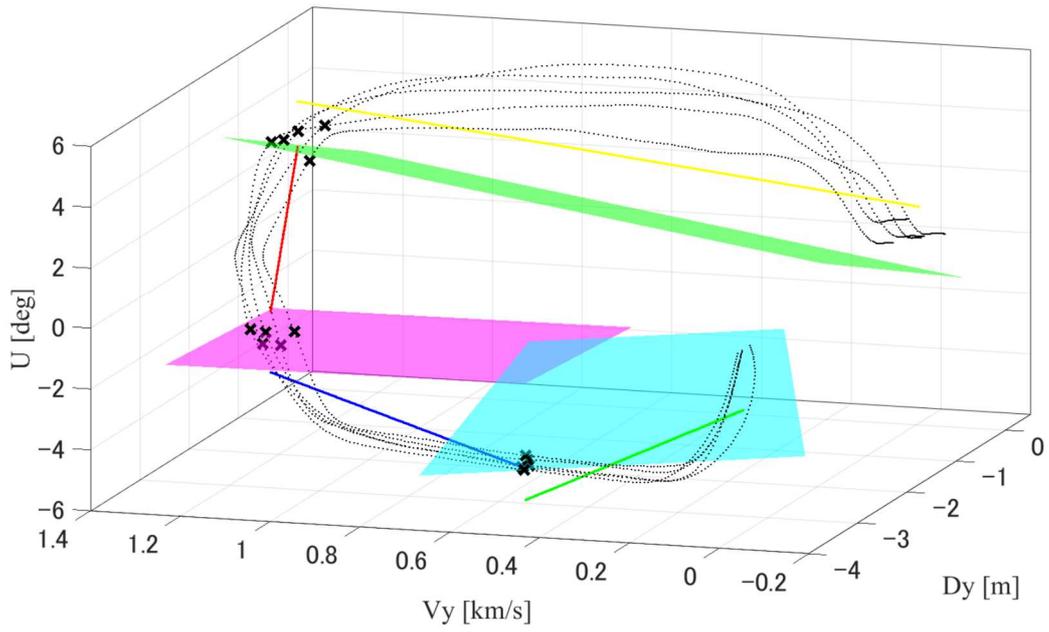


Fig.4.4.7 走行車線進入行動動作切替判断条件(被験者 A)

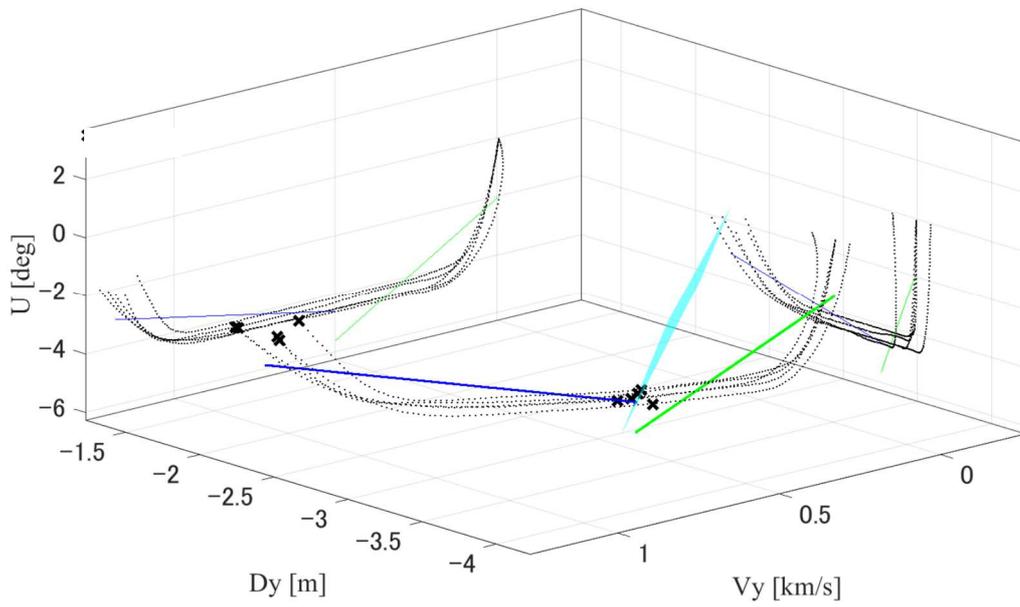


Fig.4.4.8 走行車線進入行動動作モード 1-2 切替判断条件(被験者 A)

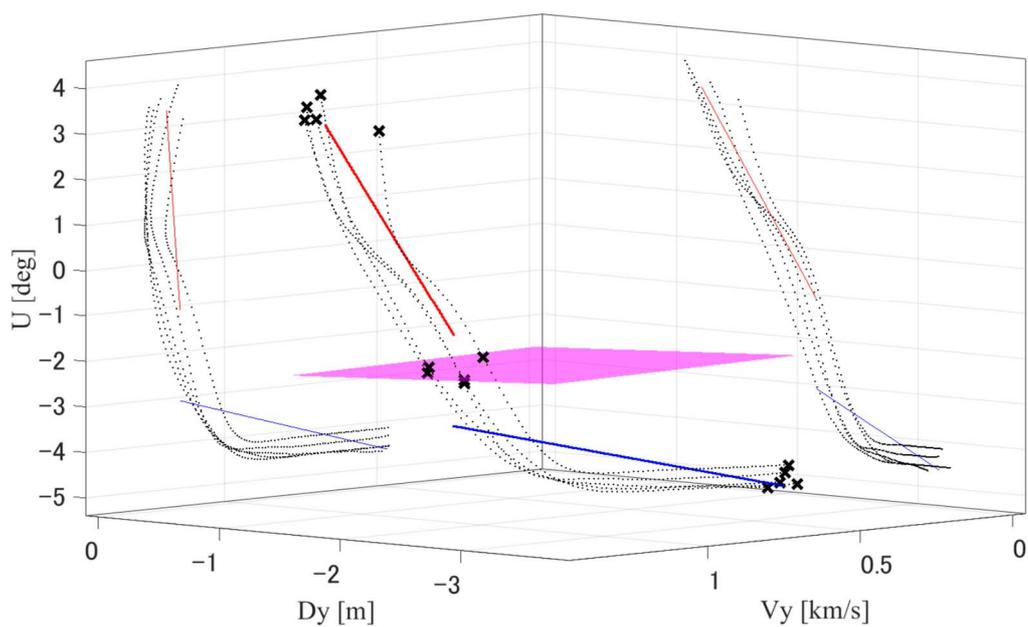


Fig.4.4.9 走行車線進入行動動作モード 2-3 切替判断条件(被験者 A)

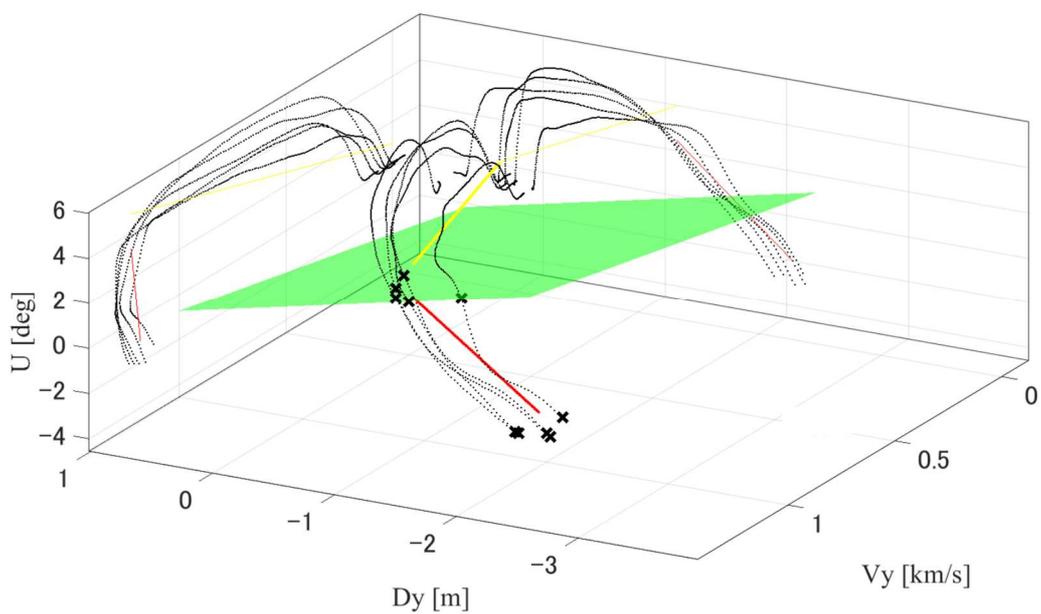


Fig.4.4.10 走行車線進入行動動作モード 3-4 切替判断条件(被験者 A)

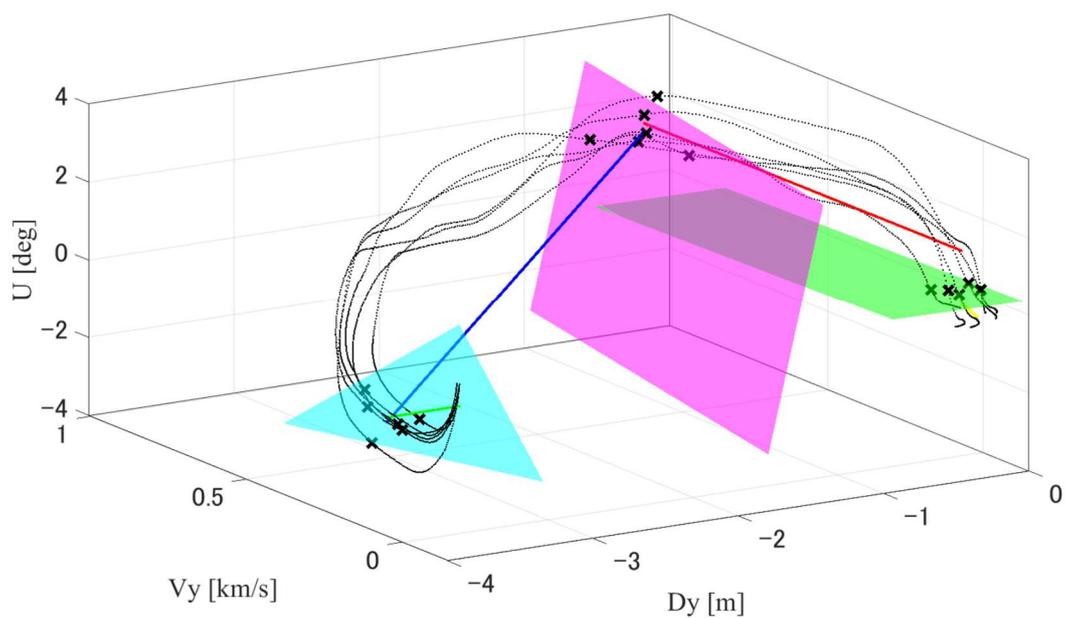


Fig.4.4.11 走行車線進入行動動作切替判断条件(被験者 B)

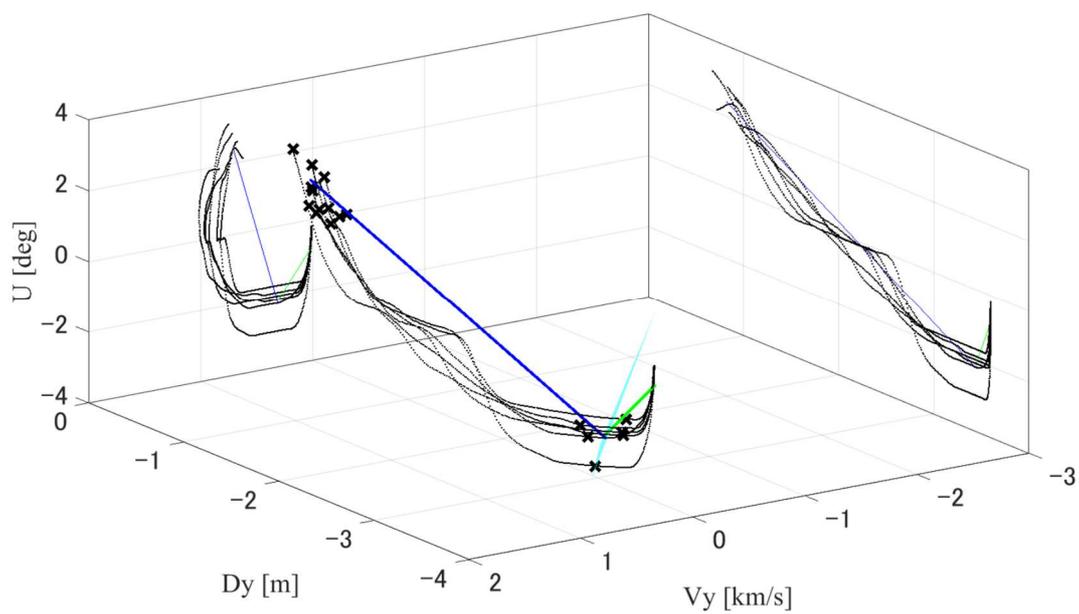


Fig.4.4.12 走行車線進入行動動作モード 1-2 切替判断条件(被験者 B)

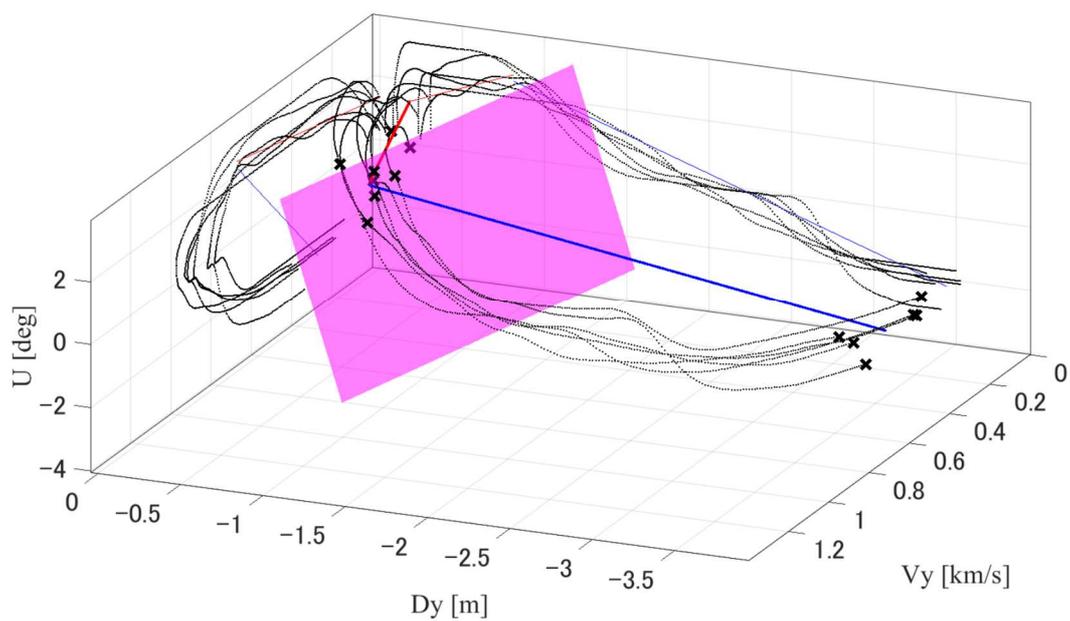


Fig.4.4.13 走行車線進入行動動作モード 2-3 切替判断条件 (被験者 B)

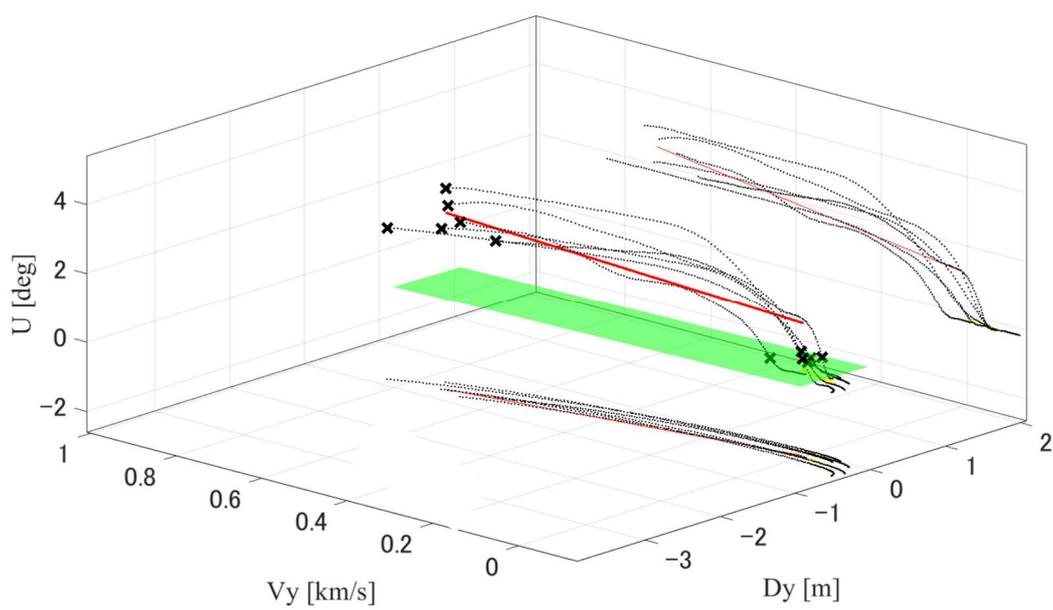


Fig.4.4.14 走行車線進入行動動作モード 3-4 切替判断条件 (被験者 B)

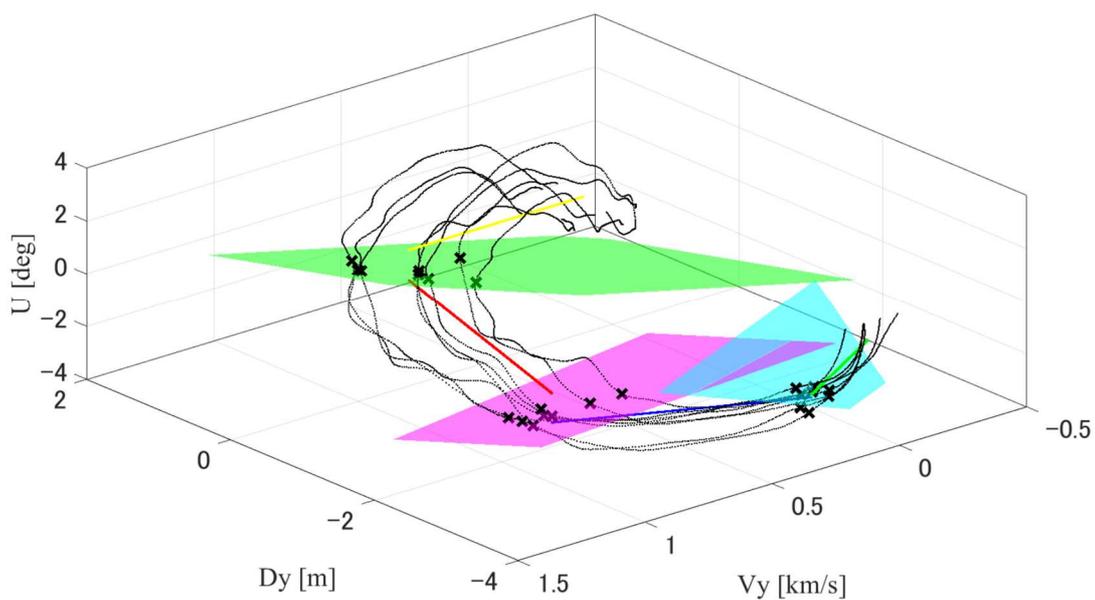


Fig.4.4.15 走行車線進入行動動作切替判断条件(被験者 C)

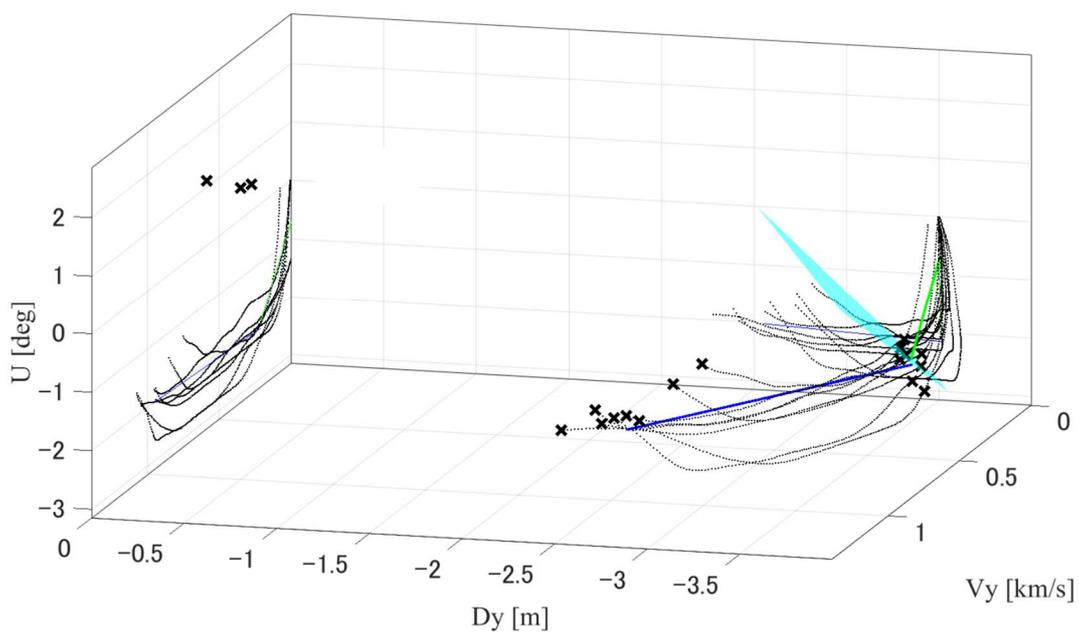


Fig.4.4.16 走行車線進入行動動作モード 1-2 切替判断条件(被験者 C)

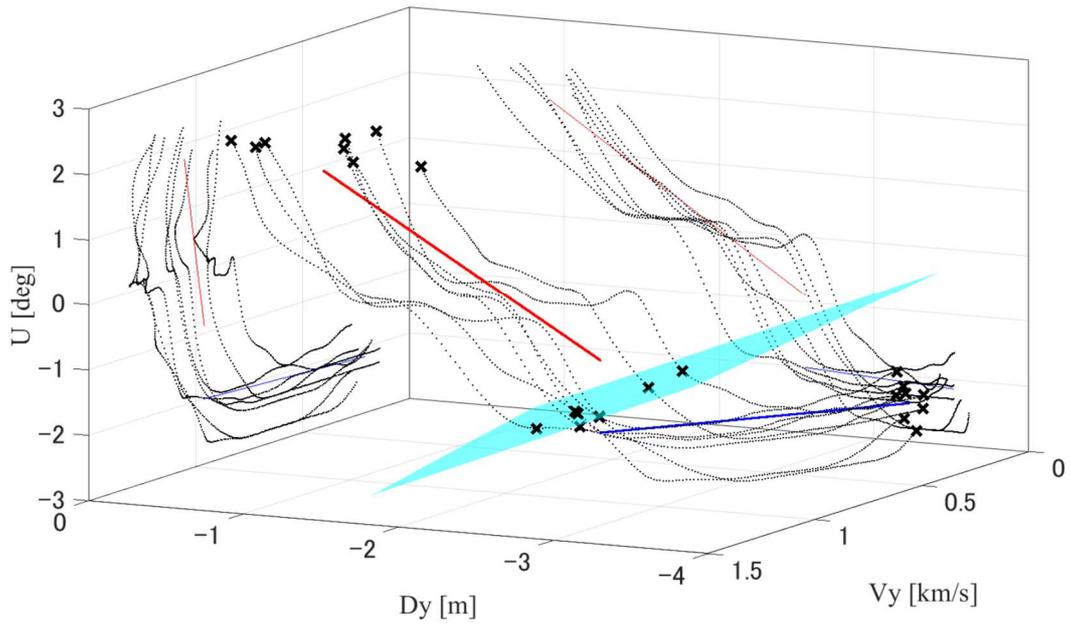


Fig.4.4.17 走行車線進入行動動作モード 2-3 切替判断条件 (被験者 C)

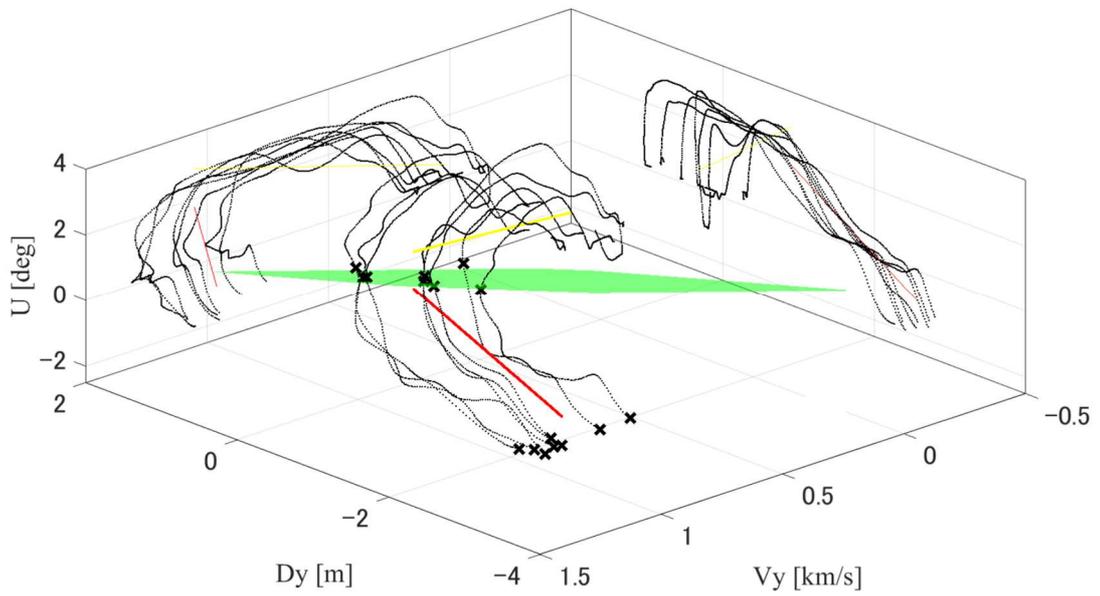


Fig.4.4.18 走行車線進入行動動作モード 3-4 切替判断条件 (被験者 C)

4.5 構築した追越運転行動モデル

構築した追越行動における被験者 A の運転行動モデルの模式図を Fig.4.5.1, 被験者 B の運転行動モデルの模式図を Fig.4.5.2, 被験者 C の運転行動モデルの模式図を Fig.4.5.3 に示す。各運転行動がプランナーからの指示により切り替えられる。外部環境情報を入力として、状態遷移図に示されるようにステアリング操作切替判断がプランナーより出される切替条件である。定速行動は区間が非常に短い時間であったのでステアリング固定とした。

また、本研究では今後、追越行動における被験者 A から構築された運転行動モデルを Model A, 被験者 B から構築された運転行動モデルを Model B, 被験者 C から構築された運転行動モデルを Model C と表現する。

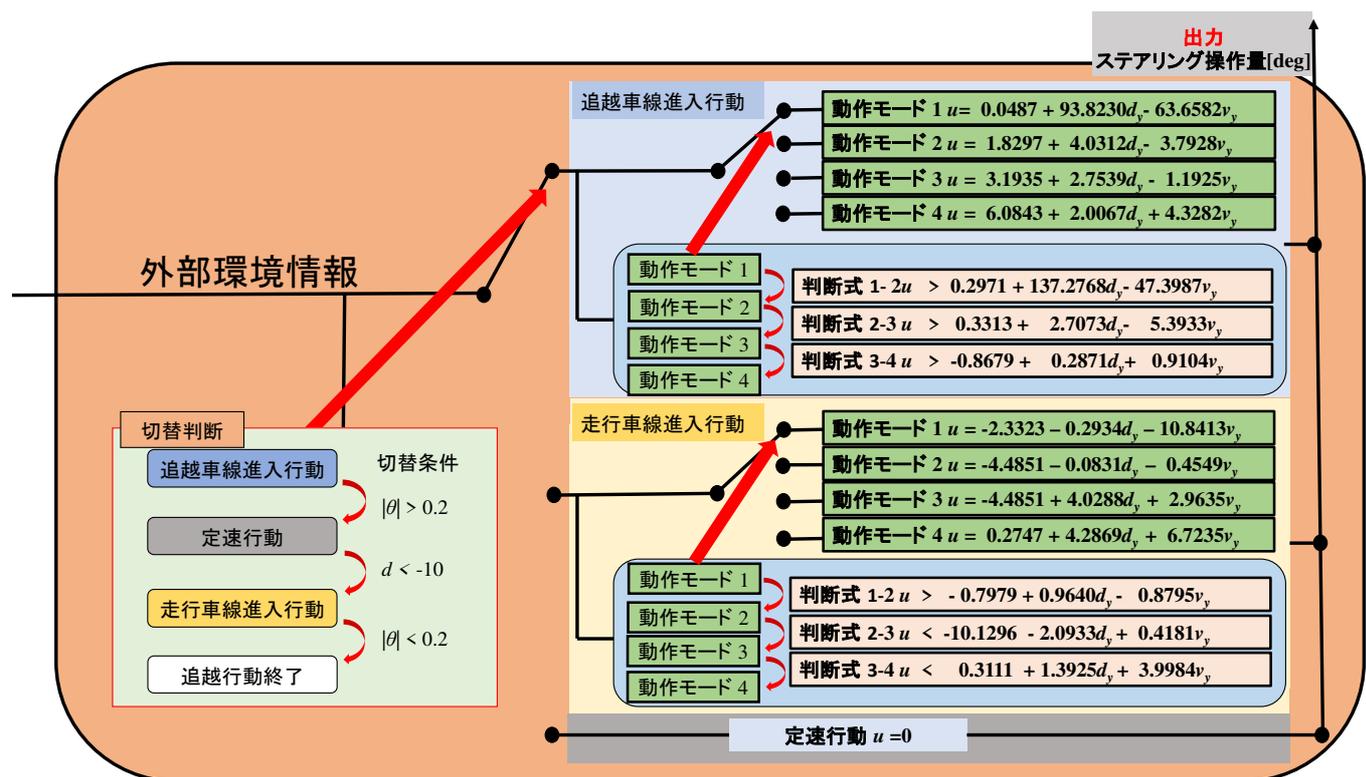


Fig.4.5.1 Model A の運転行動モデル図

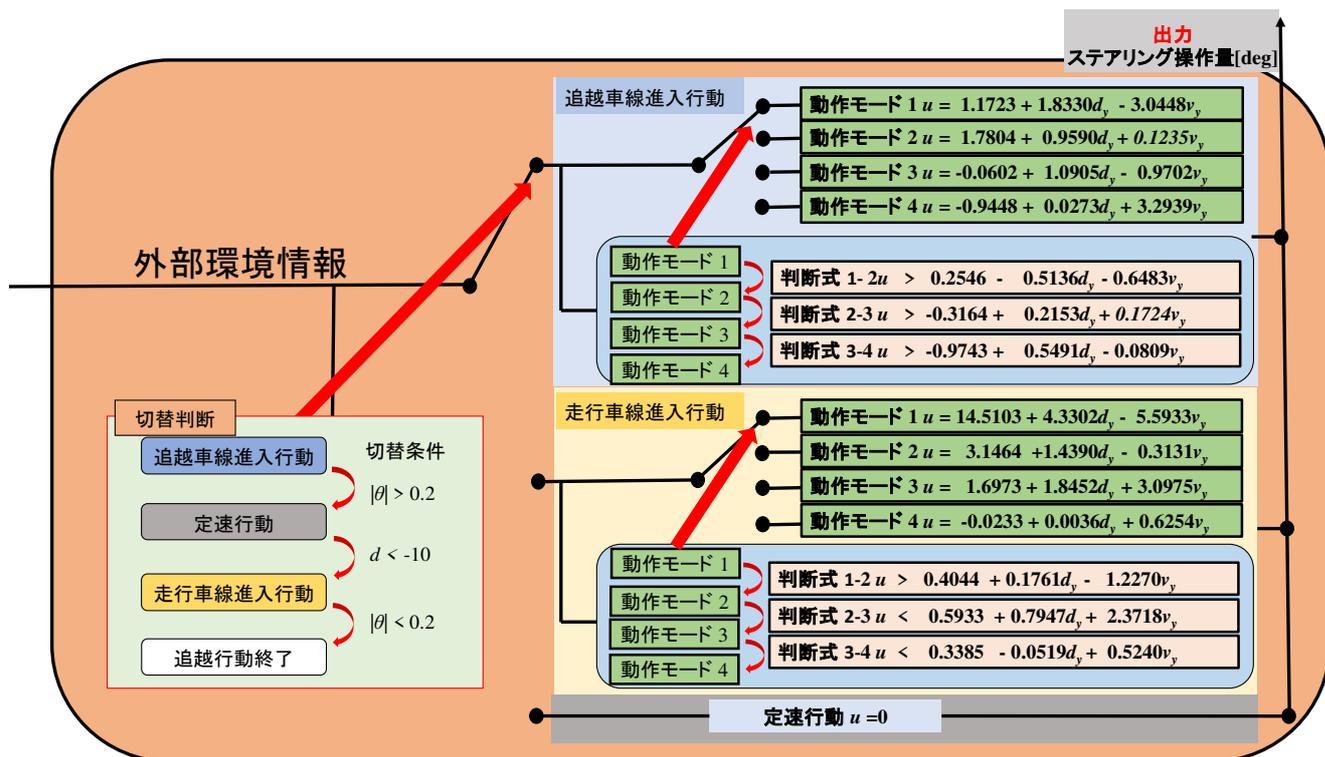


Fig.4.5.2 Model B の運転行動モデル図

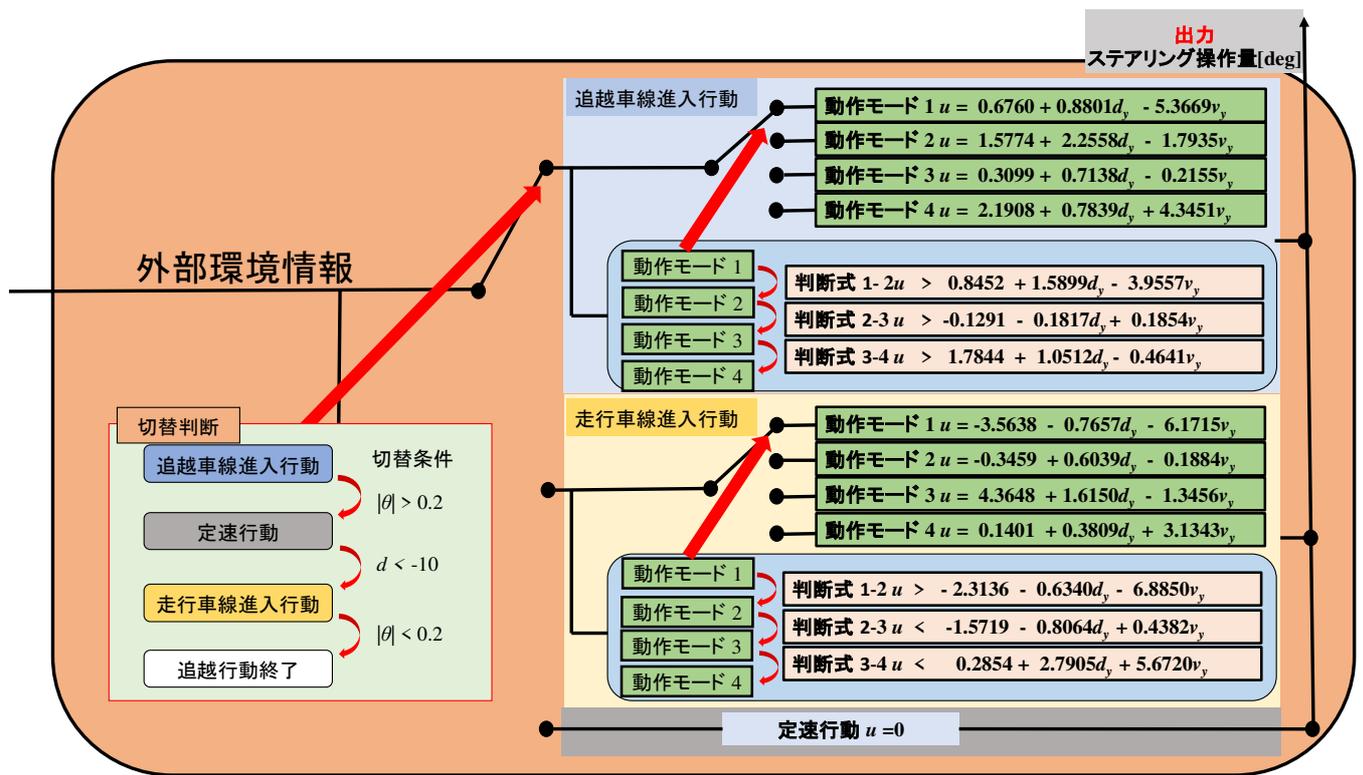


Fig.4.5.3 Model C の運転行動モデル図

4.6 先行研究で構築された追越行動モデル

次章である5章において、ドライバ特性解析実験として前節で構築した被験者A, B, Cの運転行動モデルに加え先行研究で構築された追越行動における運転行動モデルを用い主観評価実験を行う。そこで本節では、先行研究で構築された運転行動モデルについて説明する。先行研究で構築された運転行動モデルを以下Model Dとする。Model Dの模式図をFig.4.6.1に示す。Model Dも本研究と同じくハイブリッドシステムに基づき構築されており、本節の4.1節から4.4節の構築方法と同様に構築されている。本研究と異なる点は主に3つにモード分割され構築されている点と横方向位置とステアリング操作量のみでステアリング操作量を同定して構築している点が挙げられる。

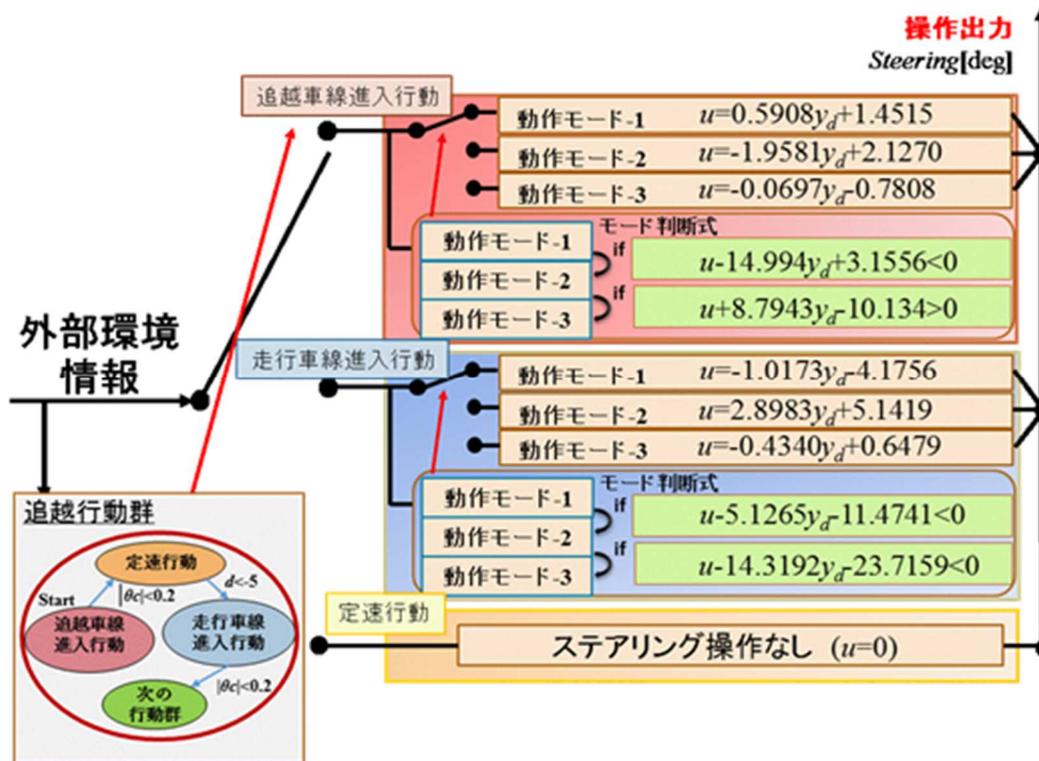


Fig.4.6.1 Model D の運転行動モデル図

第 5 章

追越行動モデルの評価とドライバ特性解析

本章では、前章でハイブリッドシステムに基づき構築した運転行動モデルの評価と追越行動におけるドライバの特性解析を行う。5.1 節では、自律追越行動実験を行い、構築した運転行動モデルが被験者の運転と類似しているのか検証を行う。5.2 節では、主観評価を含めたドライバ特性解析実験を行い結果を述べる。最後に 5.3 節では、5.2 節で得られた結果から解析した結果を述べる。5.4 節では、5.3 節で解析した結果をまとめる。

5.1 自律追越行動実験

本節では、ハイブリッドシステムに基づき構築された追越行動モデルを車両運動制御システムに実装した。

5.1.1 自律追越行動実験方法

構築した運転行動モデルを車両運動制御システムに実装し、DSにて自律追越行動実験を行った。2車線の直線高速道路を想定し、スタート地点を走行車線に設定し、停止した状態からスタートする。アクセル、ブレーキの操作は手動とし、100[km/h]を目標に加速し到達したら定速維持をする。前方の走行車線走行車に近づくとシステムが作動し構築した運転行動モデルを基に自動で追越行動を行う。

5.1.2 自律追越行動実験結果

自立追越行動実験結果を Fig.5.1.1 から Fig.5.1.6 に示す。横軸は時間[s]を表し、縦軸は上から横方向位置[m]、横方向速度[km/h]、車体角度[deg]、ステアリング操作角度[deg]を表す。図中の赤色の線が構築した運転行動モデルに基づく自律走行結果で、青線がモデル導出に使用したドライバの実際の運転結果である。ほとんどのパラメータで青線と赤線が合致しており、被験者の運転に類似しており運転を再現しているように見える。この結果より今後追越行動におけるドライバ特性解析では、これらの運転行動モデルが個人それぞれのドライバ特性を表現しているとし、解析を行う。

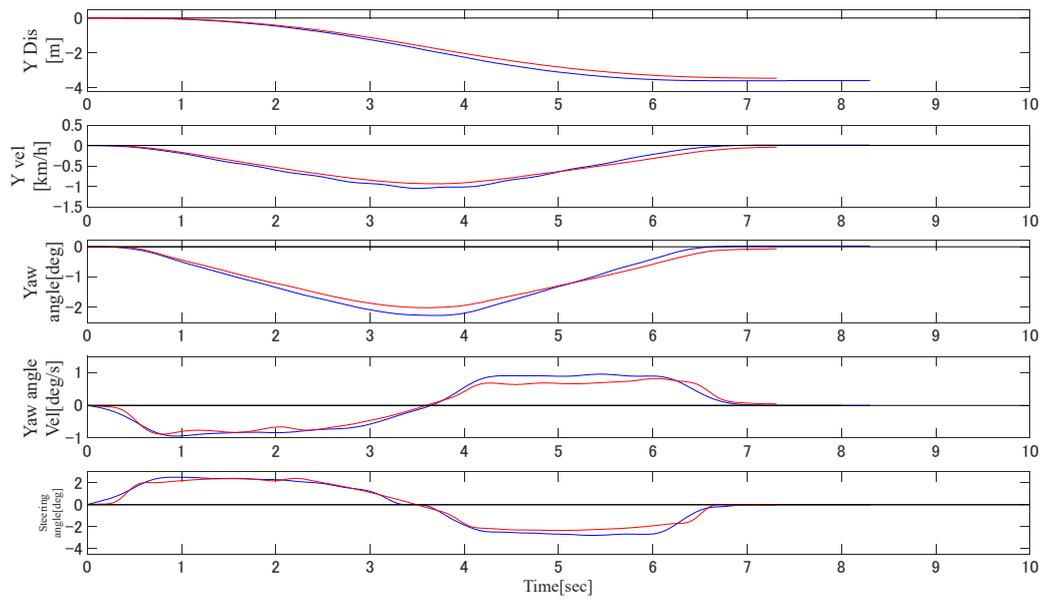


Fig.5.1.1 自立追越行動実験追越車線進入行動結果(被験者 A)

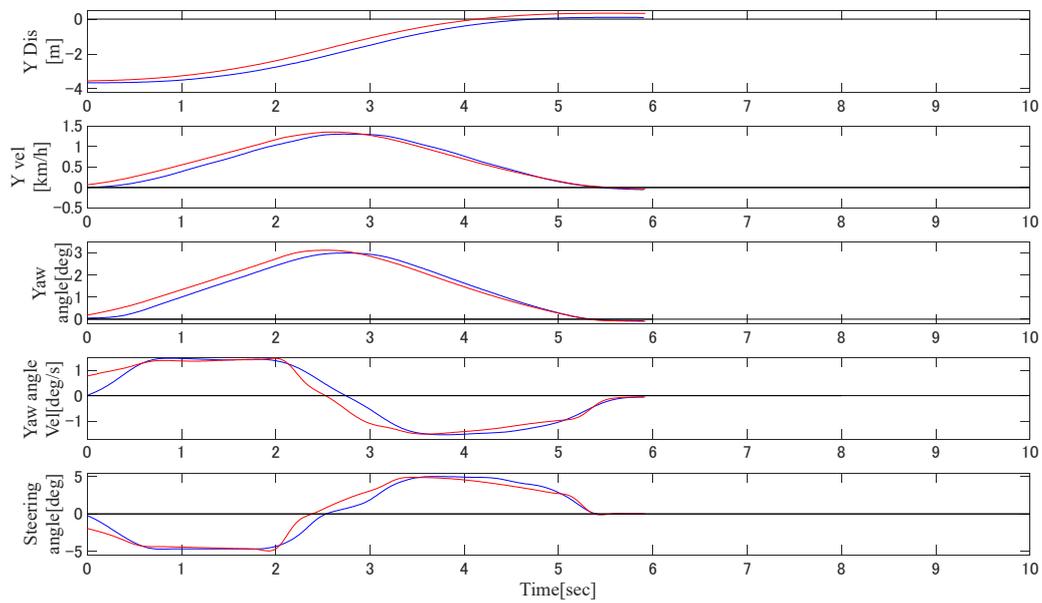


Fig.5.1.2 自立追越行動実験走行車線進入行動結果(被験者 A)

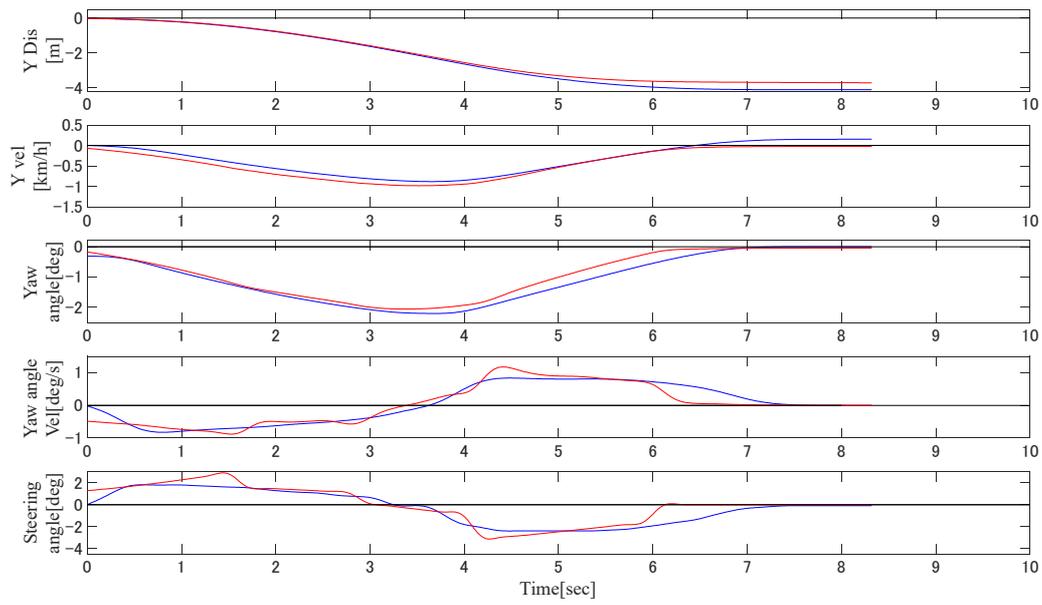


Fig.5.1.3 自立追越行動実験追越車線進入行動結果(被験者 B)

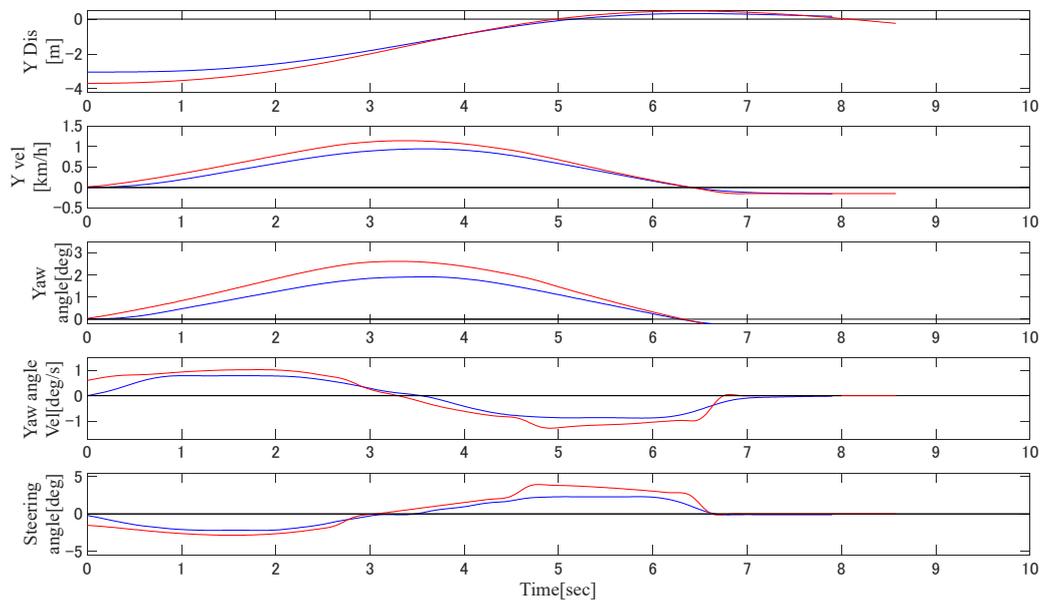


Fig.5.1.4 自立追越行動実験走行車線進入行動結果(被験者 B)

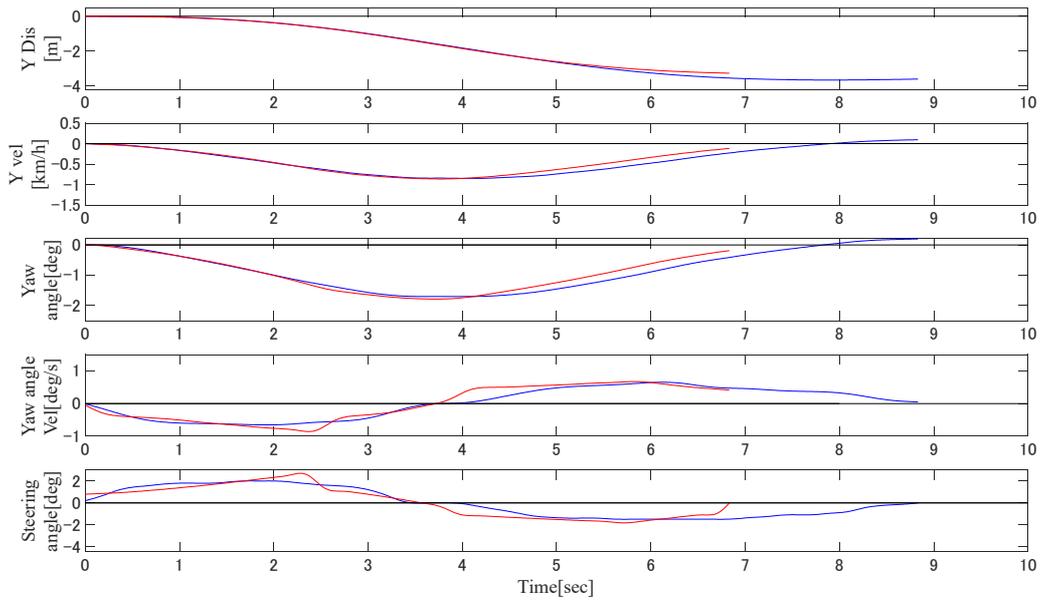


Fig.5.1.5 自立追越行動実験追越車線進入行動結果(被験者 C)

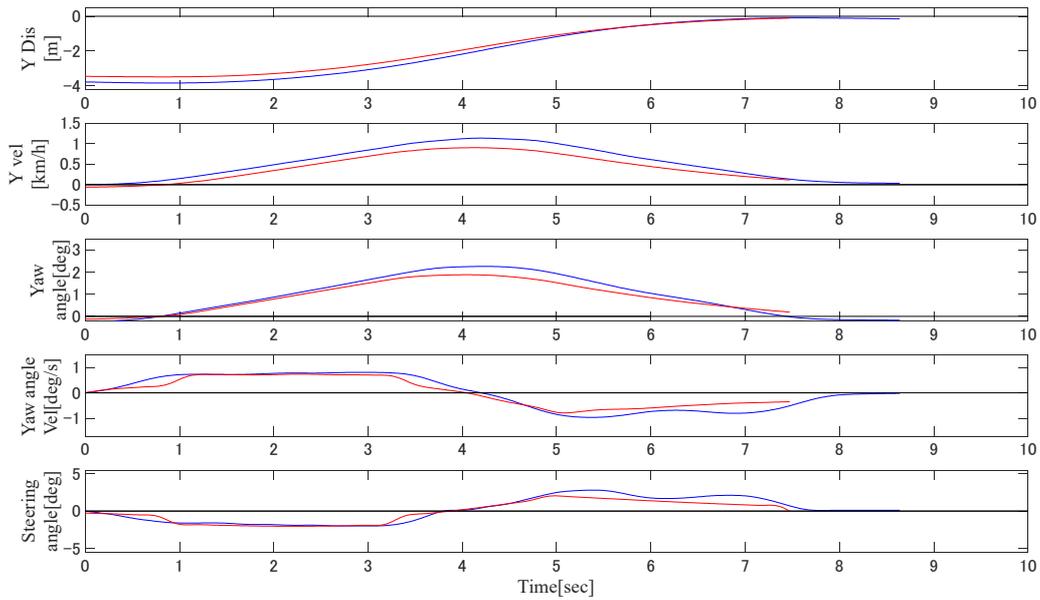


Fig.5.1.6 自立追越行動実験走行車線進入行動結果(被験者 C)

5.2 ドライバ特性解析実験

本節では，追越行動モデルを用いドライバ特性の解析のためドライバ特性解析実験を行う．

5.2.1 追越行動の分割

自律追越走行中の被験者の主観評価実験を行う．主観評価実験をする際，どの位置のときにどの操作をしているか，また，その時に主観的にどのように感じているか明らかにするため，追越行動をさらに細分化する必要がある．細分化の模式図を Fig.5.2.1 に示す．まず 4.1 節で述べたように追越行動を大きく「追越車線進入行動」，「定速行動」，「走行車線進入行動」に分けて考える．そして，それをさらに細かく分ける．追越行動では，前方の走行車線走行車に近づいたらステアリングを右に切り追越車線に進入する．その後，目標とする追越車線中央に近づいたらステアリングを左に切り，車体を車線と平行になるようにする．その後，定速で走行し，走行車線走行車を追い抜いたらステアリングを左に切り，走行車線に進入する．そして，走行車線の中央に近づいたらステアリングを左に切り，車線に平行になるようにする．これらの行動から「追越車線進入行動」では，最初の方の走行車線走行車に近づきステアリングを切ろうとするタイミングを①追越車線進入開始のタイミング，ステアリングを切り追越車線に進入しているときの動作を②車線変更動作，目標とする追越車線中央に近づきステアリングを左に切り車体角度が戻り始めるタイミングを③車線平行開始タイミング，車体が車線と平行になるようにステアリングを左に切り，車体角度が小さくなっていくときの動作を④レーンキープ動作に分ける．「走行車線進入行動」では，走行車線走行車を追い抜き走行車線に戻り始めるタイミングを⑤走行車線進入開始タイミング，ステアリングを切り走行車線に進入しているときの動作を⑥車線変更動作，目標とする走行車線中央に近づきステアリングを右に切り車体角度が戻り始めるタイミングを⑦車線平行開始タイミング，車体が車線と平行になるようにステアリングを右に切り，車体角度が小さくなっていくとき

の動作を⑧レーンキープ動作に分ける。定速行動では、ステアリング操作が行われずドライバ特性に依存するところが少ないため、本研究では着目しない。①、③、⑤、⑦はすべてタイミングで次の動作が行われる瞬間とする。②、④、⑥、⑧は、動作を表し、次の動作が行われるタイミングまで続く一連の動作を対象とする。

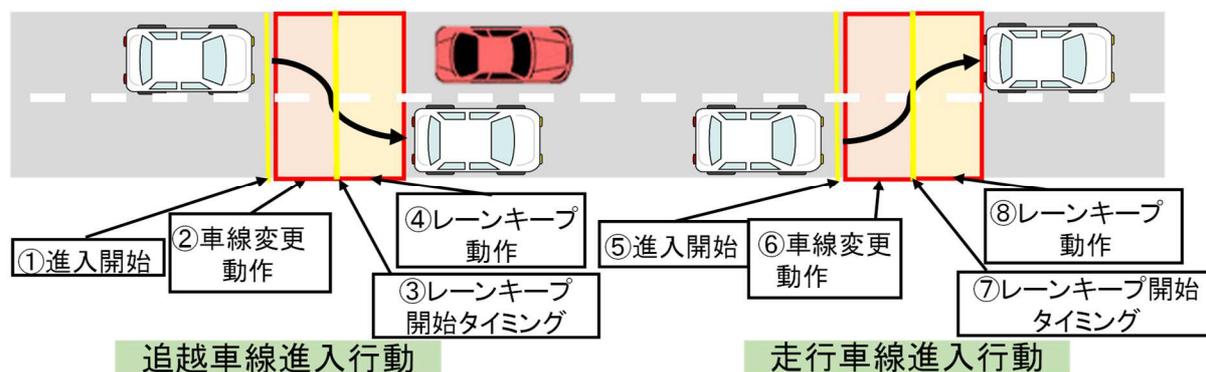


Fig.5.2.1 自律追越行動分割の模式図

5.2.2 ドライバ特性解析実験方法

スタート状況と走行環境は、5.11 節で述べたものと同ーとする。被験者にはまず、追越行動の感覚の基準を定めてもらうために練習走行として 4.1 節の運転情報収集実験と同様に自分でアクセル、ブレーキ、ステアリングを操作してもらい追越行動をしてもらう。その後、ハイブリッドシステムに基づき構築された運転行動モデルを実装した車両運動制御システムによる自立追越走行を主観評価してもらう。最初に練習運転してもらった感覚を基準に主観評価アンケートに回答してもらう。

5.2.3 主観アンケート

主観アンケート内容を Fig.5.2.2 に示す。アンケート項目は 5.2.1 節で述べた細分化されたもののひとつひとつにそれぞれ一答してもらう。まず、①追越車線進入開始タイミングでは、前方の走行車線走行車との車間距離について短く感じたか長く感じたか回答してもらう。②追越車線への車線変更動作では、動作中の車体角度の大きさについて回答してもらう。③レーンキープ開始タイミングでは、車体を平行に戻すタイミングの早さについて回答してもらう。④レーンキープ動作では、車体角度の大きさについて回答してもらう。⑤走行車線進入開始タイミングは、④の動作が終了してから走行車線進入開始までの時間が長かったかどうか回答してもらう。⑥走行車線への車線変更動作では②と同様に車体角度の大きさについて回答してもらう。⑦レーンキープ開始タイミングは、③と同様車体を平行に戻すタイミングが早いかどうか回答してもらう。⑧レーンキープ動作は④と同様車体角度の大きさについて回答してもらう。

追越車線進入行動					
快適度(不快⇄快適)	-2	-1	0	1	2
	とても不快	不快	どちらでもない	快適	とても快適
安全性(危険⇄安全)	-2	-1	0	1	2
	とても危険	危険	どちらでもない	安全	とても安全
①追越車線進入開始タイミング					
車間距離(短い⇄長い)	-2	-1	0	1	2
	とても短い	短い	普通	長い	とても長い
②追越車線への車線変更動作					
車体角度(小さい⇄大きい)	-2	-1	0	1	2
	とても小さい	小さい	普通	大きい	とても大きい
③レーンキープ開始タイミング					
車線に平行に戻すタイミング(遅い⇄早い)	-2	-1	0	1	2
	とても遅い	遅い	普通	早い	とても早い
④レーンキープ動作					
車体角度(小さい⇄大きい)	-2	-1	0	1	2
	とても小さい	小さい	普通	大きい	とても大きい

走行車線進入行動					
快適度(不快⇄快適)	-2	-1	0	1	2
	とても不快	不快	普通	快適	とても快適
安全性(危険⇄安全)	-2	-1	0	1	2
	とても危険	危険	普通	安全	とても安全
⑤走行車線進入開始タイミング					
追越車線進入行動終了から走行車線進入行動開始までの時間(短い⇄長い)	-2	-1	0	1	2
	とても短い	短い	普通	長い	とても長い
⑥走行車線へ車線変更動作					
車体角度(小さい⇄大きい)	-2	-1	0	1	2
	とても小さい	小さい	普通	大きい	とても大きい
⑦レーンキープ開始タイミング					
車線に平行に戻すタイミング(遅い⇄早い)	-2	-1	0	1	2
	とても遅い	遅い	普通	早い	とても早い
⑧レーンキープ動作					
車体角度(小さい⇄大きい)	-2	-1	0	1	2
	とても小さい	小さい	普通	大きい	とても大きい

Fig.5.2.2 主観アンケート内容

5.2.4 実験結果

構築した運転行動モデルと先行研究で構築した 1 モデルの計 4 モデルを、本研究で構築した 3 つの運転行動モデルの基となったデータを収集した被験者 3 人にランダムに体験してもらった。本節では、実際に体験してもらった走行データを Fig.5.2.3 から Fig.5.2.28 に「追越車線進入行動」と「走行車線進入行動」に分けて示す。横軸は、車線変更を開始してから経過した時間[s]を表し、縦軸は上から横方向位置[m]，横方向速度[km/h]，車体角度[deg]，車体角速度[deg/s]，ステアリング操作角度[deg]を示す。赤線が運転行動モデルの走行データを表し，青線が被験者の走行データを表す。横軸と垂直方向にある赤線は，運転行動モデルの車体角度の絶対値が最大の位置を表し，運転行動モデルの走行データのアンケート項目②のレーンキープ開始タイミングを表す。横軸と垂直方向にある青線は被験者の走行データの車体角度の絶対値が最大の位置を表し，被験者の走行データのアンケート項目②のレーンキープ開始タイミングを表す。主観評価の結果を Table 5.2.1 に被験者 A の主観アンケートの結果，Table 5.2.2 に被験者 B の主観アンケートの結果，Table 5.2.3 に被験者 C の主観アンケートの結果に示す。

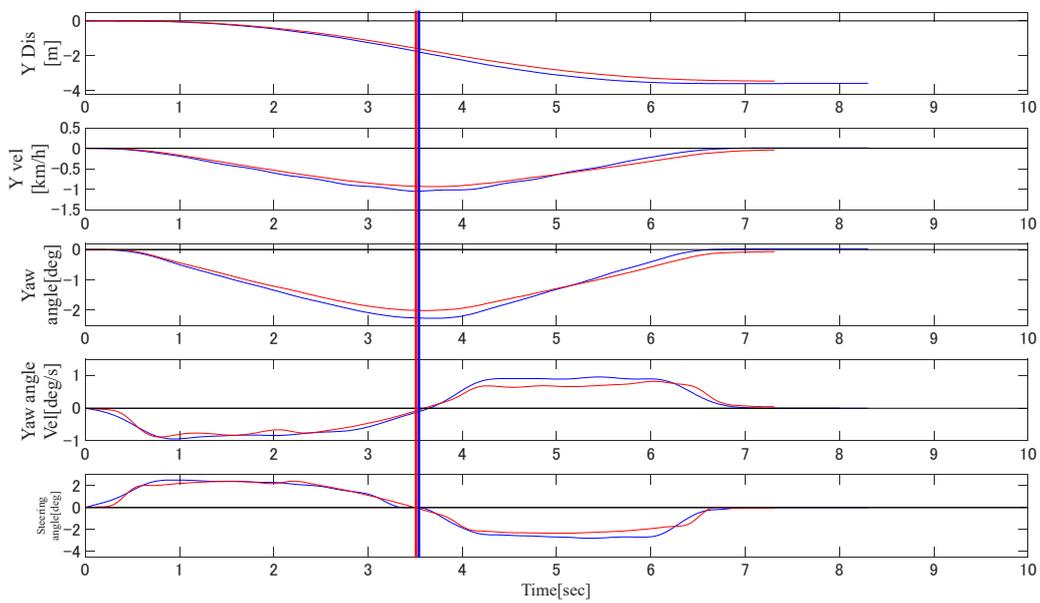


Fig.5.2.3 追越車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 A-Model A）

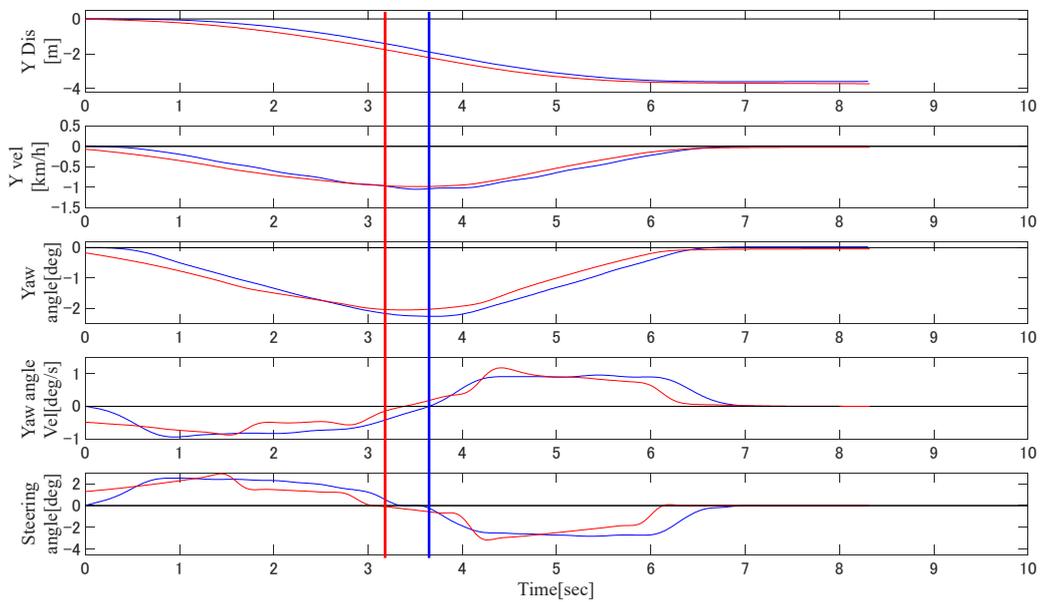


Fig.5.2.4 追越車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 A-Model B）

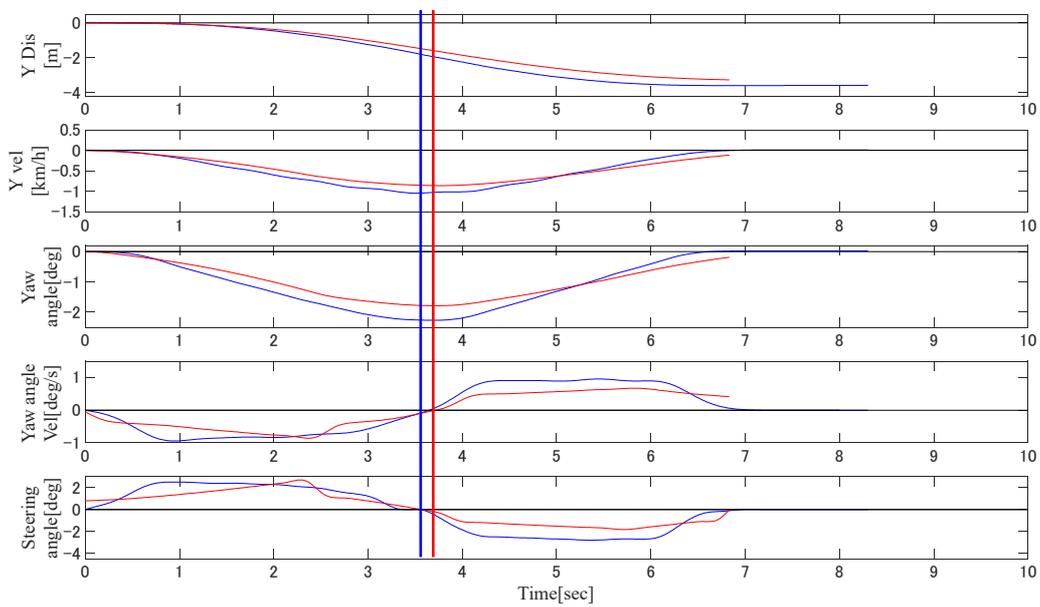


Fig.5.2.5 追越車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 A-Model C）

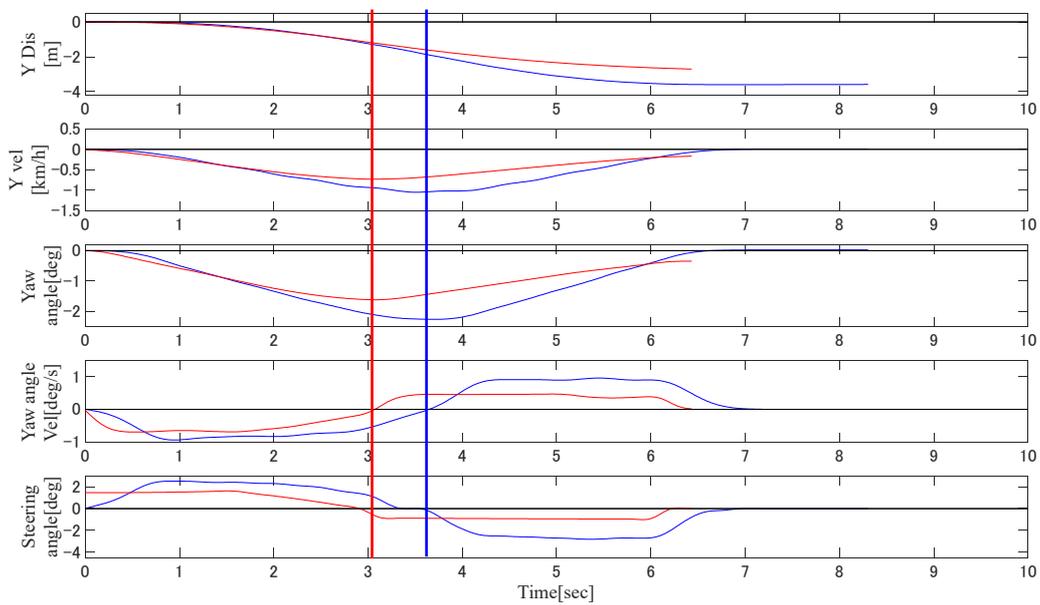


Fig.5.2.6 追越車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 A-Model D）

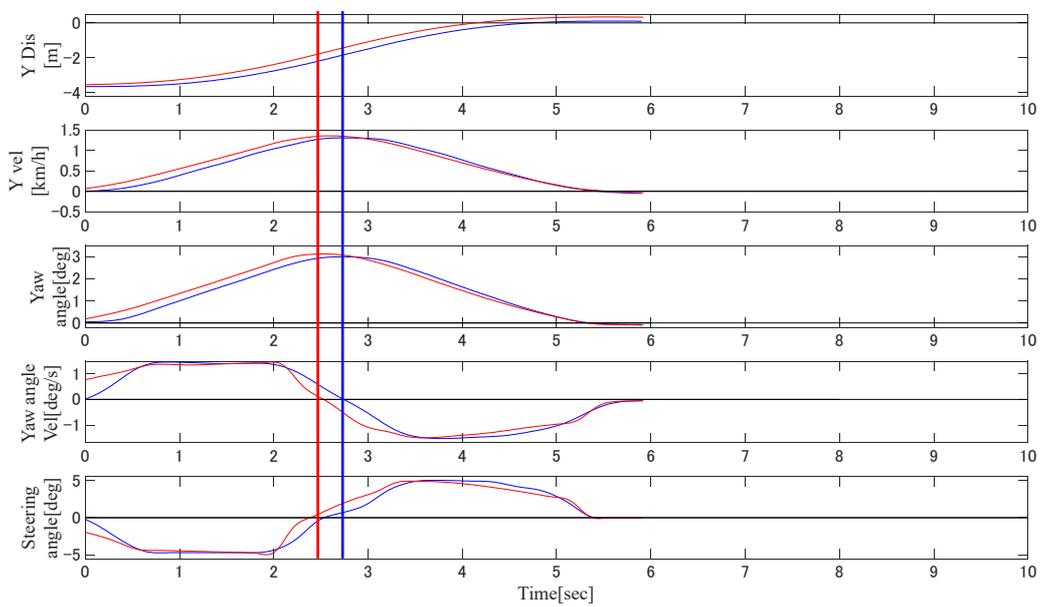


Fig.5.2.7 走行車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 A-Model A）

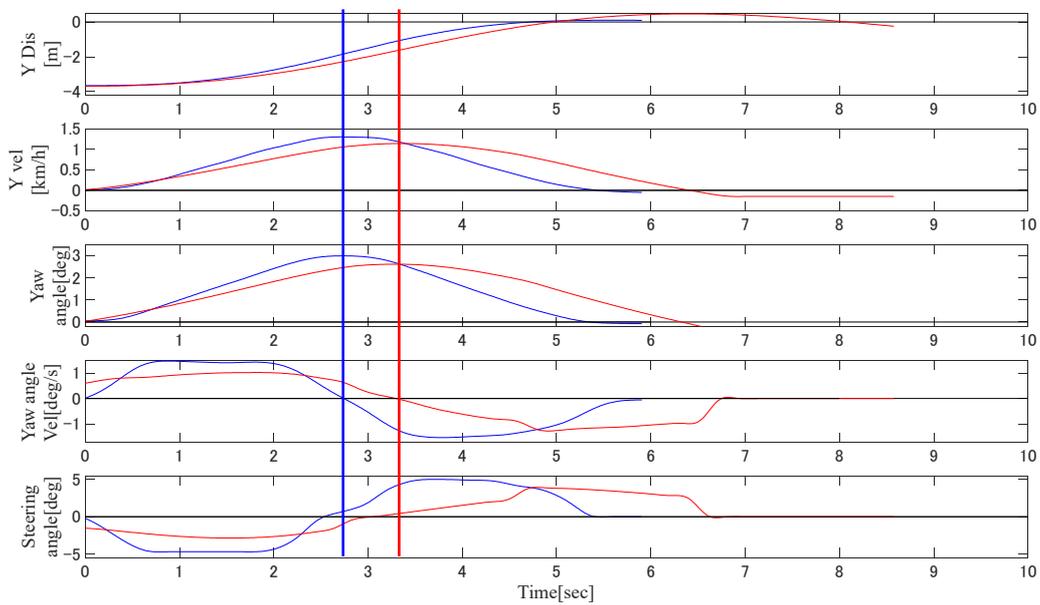


Fig.5.2.8 走行車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 A-Model B）

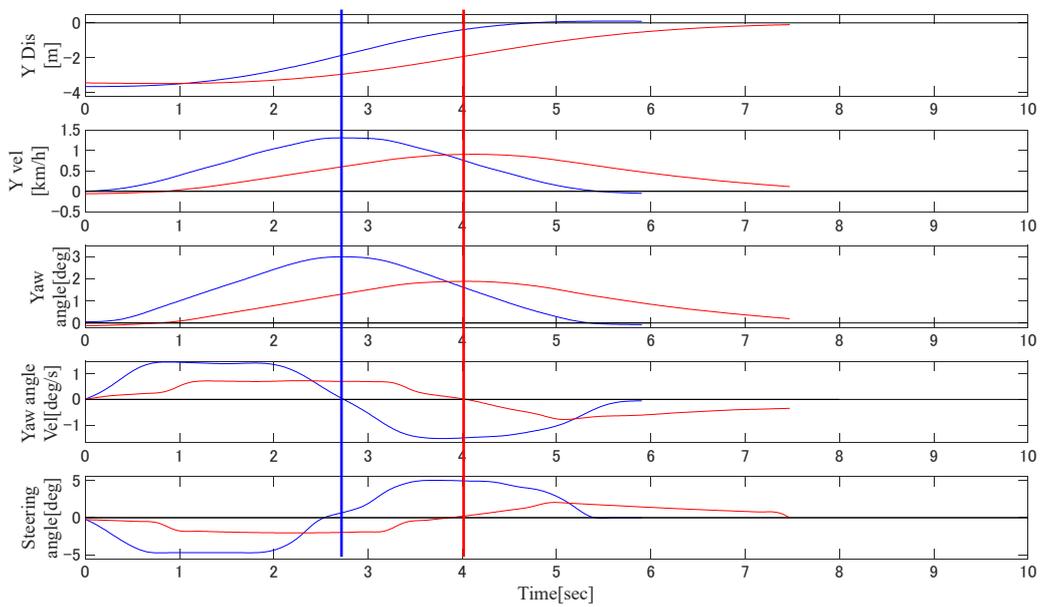


Fig.5.2.9 走行車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 A-Model C）

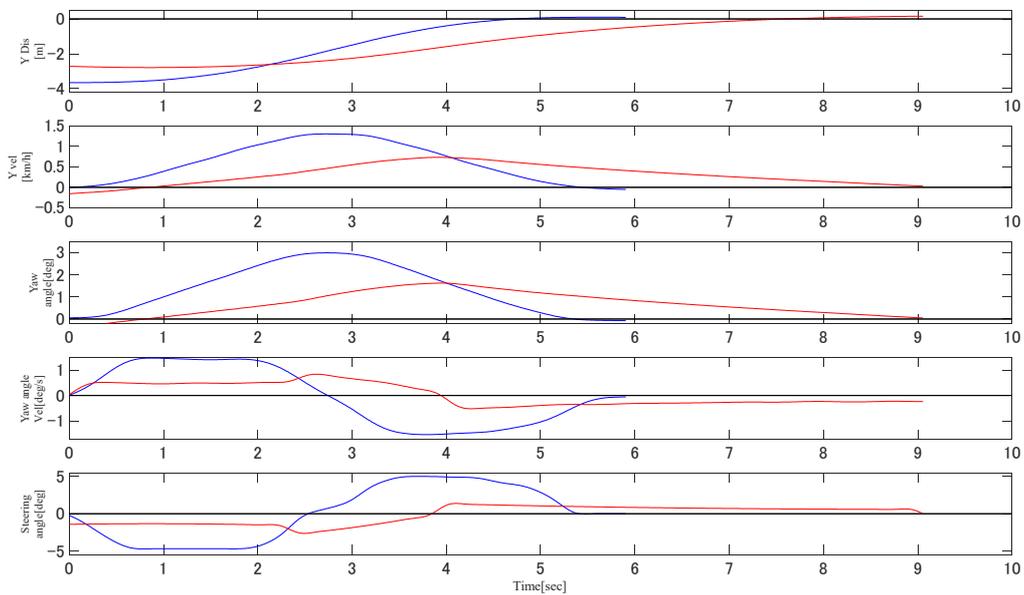


Fig.5.2.10 走行車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 A-Model D）

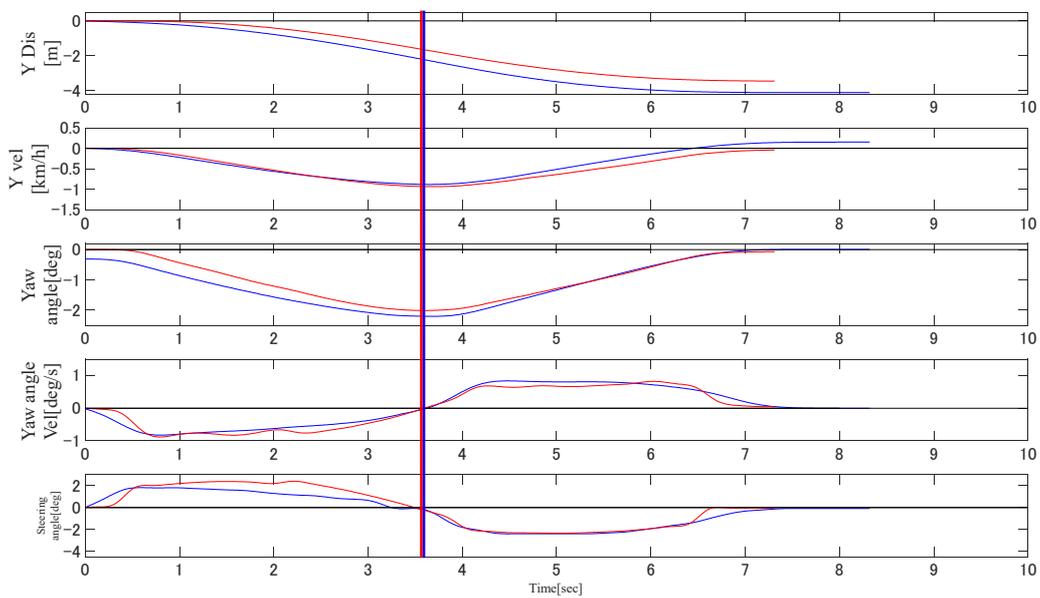


Fig.5.2.11 追越車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 B-Model A）

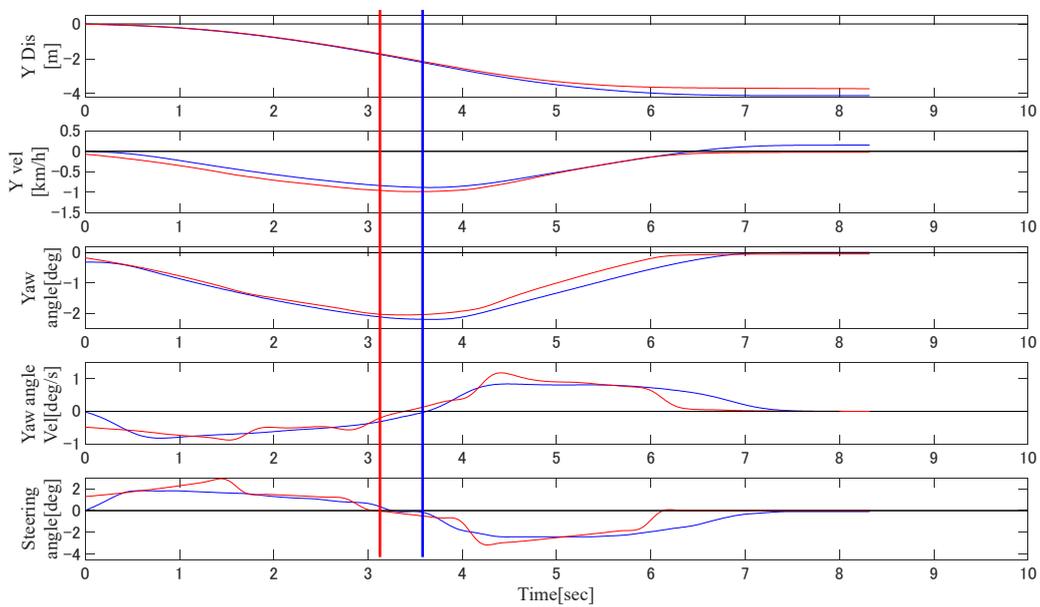


Fig.5.2.12 追越車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 B-Model B）

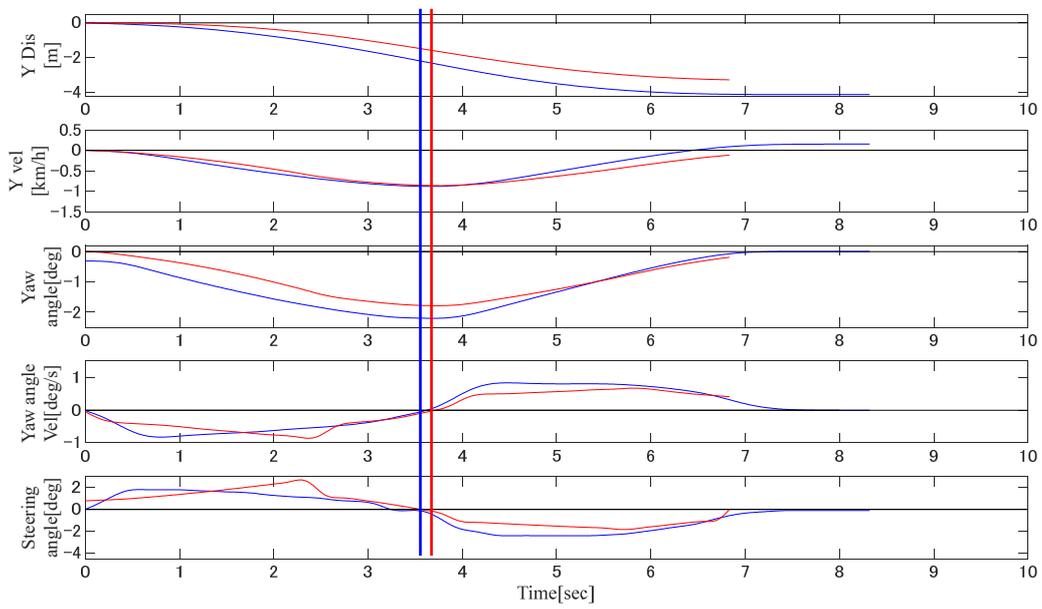


Fig.5.2.13 追越車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 B-Model C）

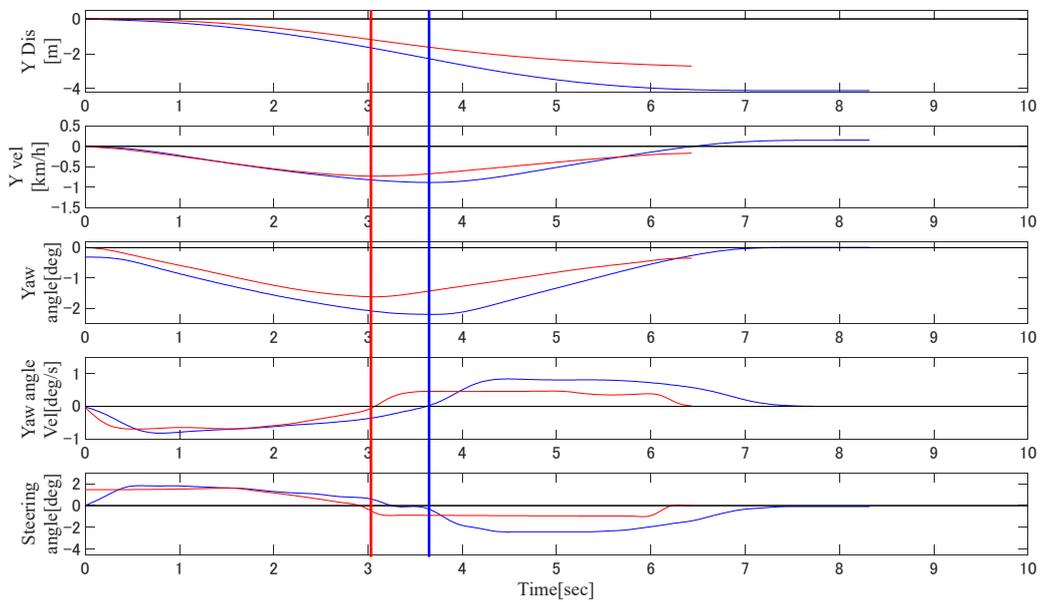


Fig.5.2.15 追越車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 B-Model D）

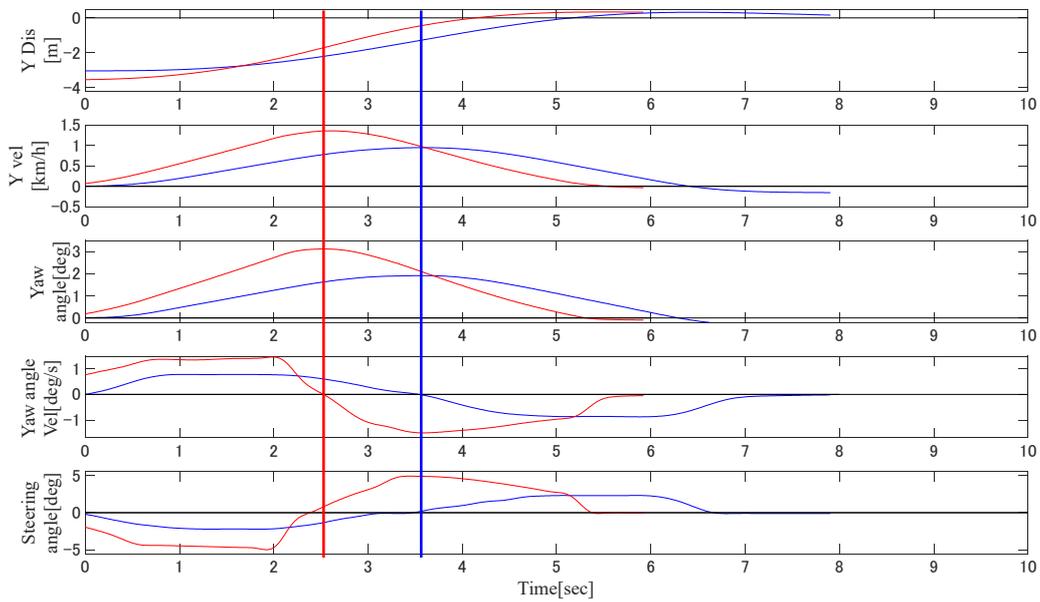


Fig.5.2.16 走行車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 B-Model A）

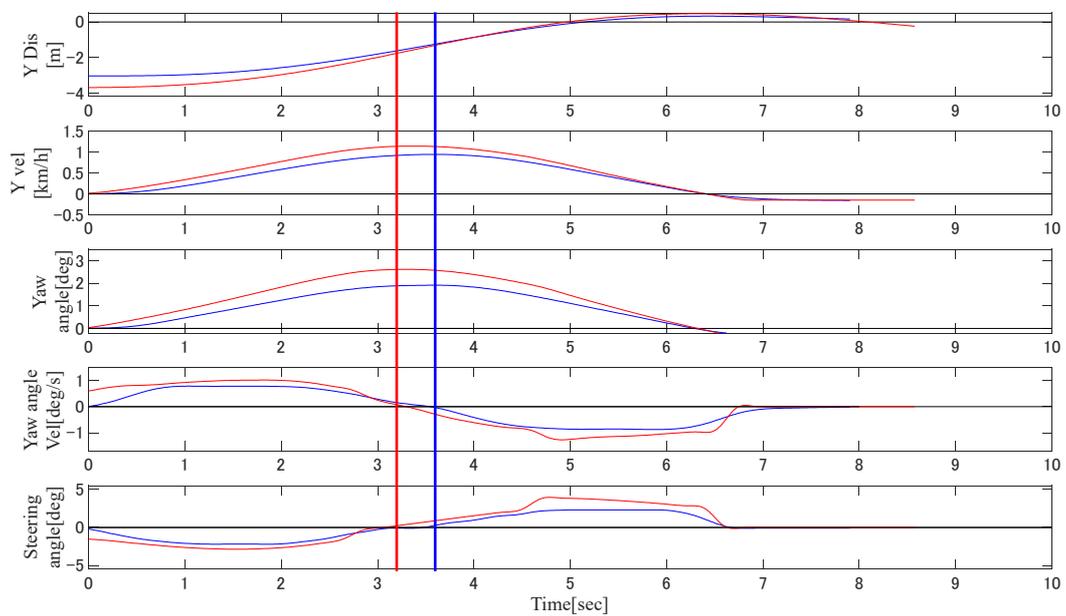


Fig.5.2.17 走行車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 B-Model B）

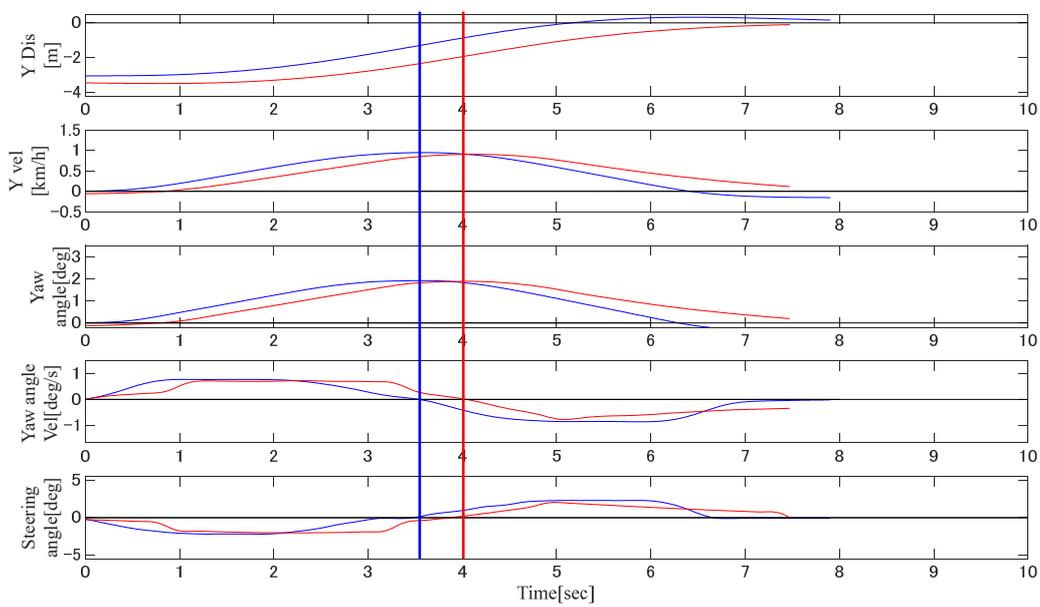


Fig.5.2.18 走行車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 B-Model C）

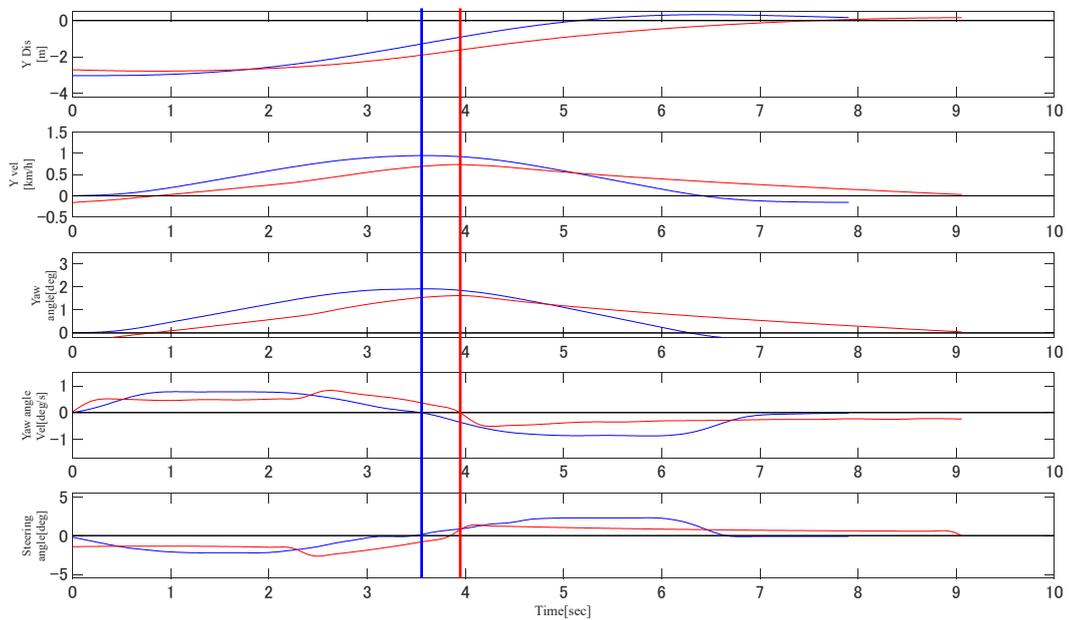


Fig.5.2.19 走行車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 B-Model D）

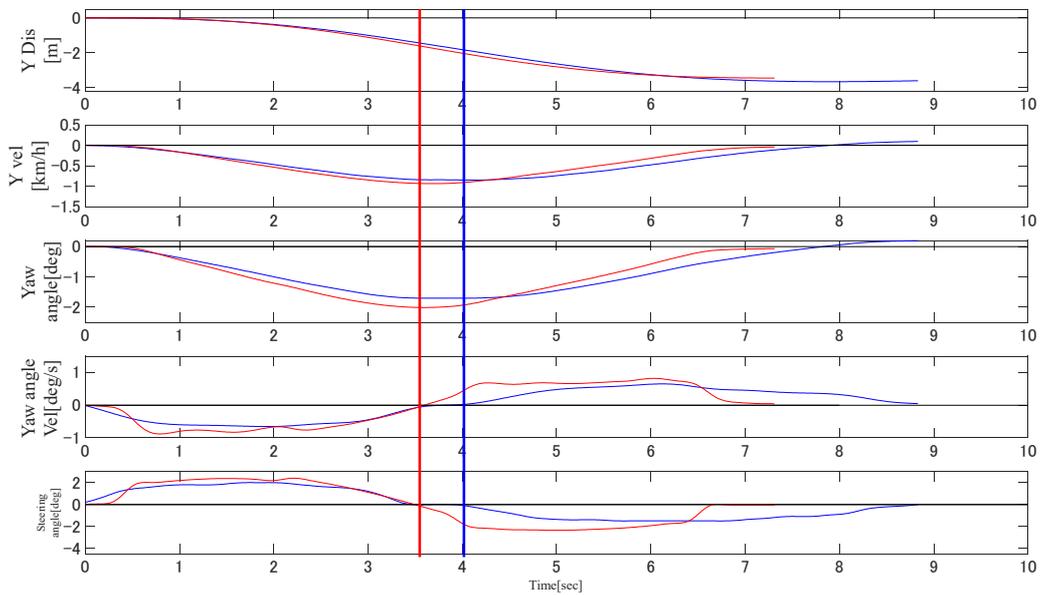


Fig.5.2.20 追越車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 C-Model A）

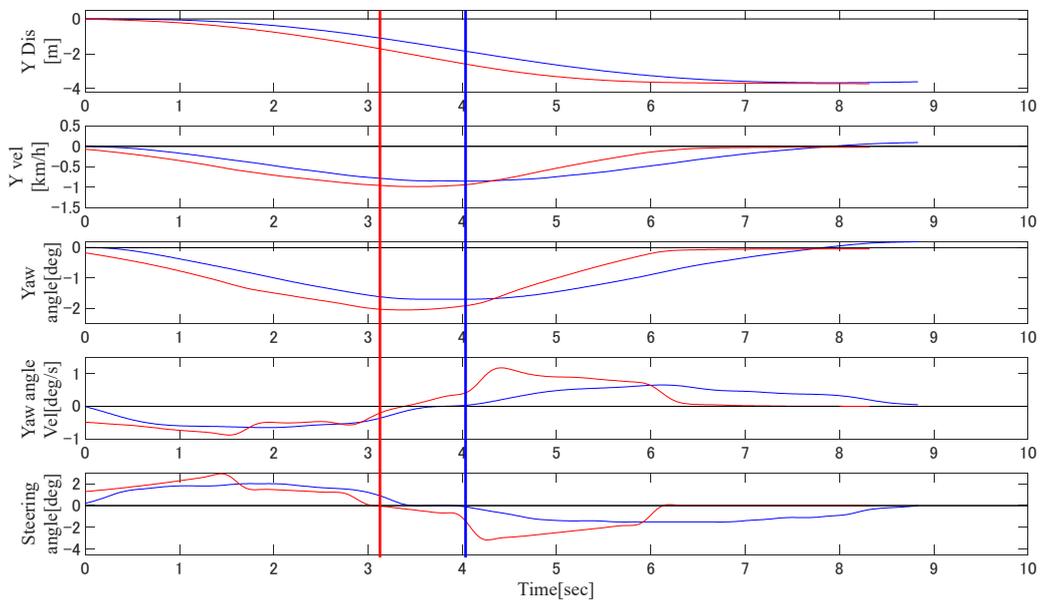


Fig.5.2.21 追越車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 C-Model B）

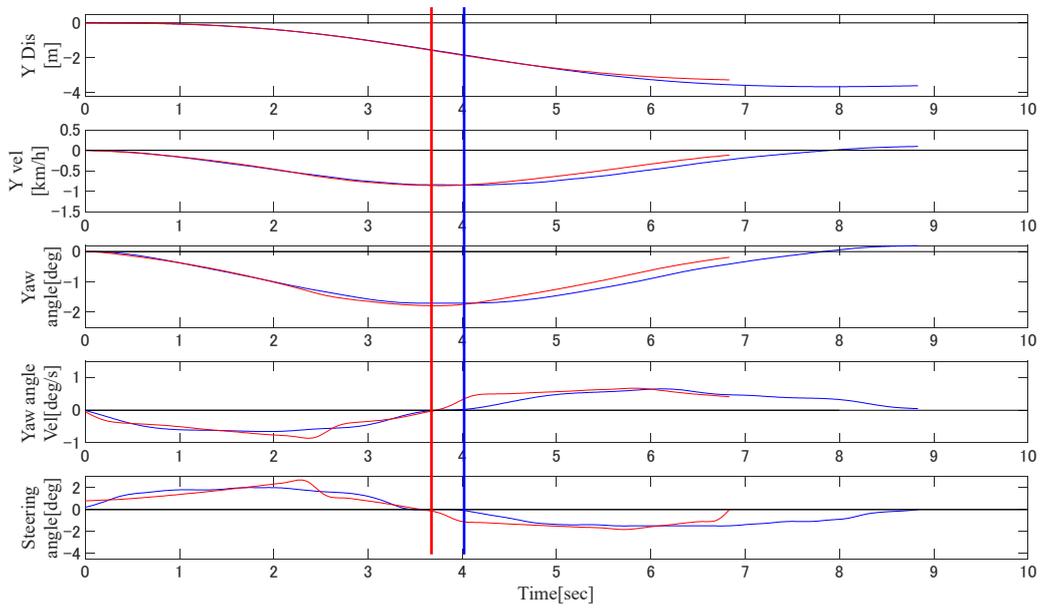


Fig.5.2.23 追越車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 C-Model C）

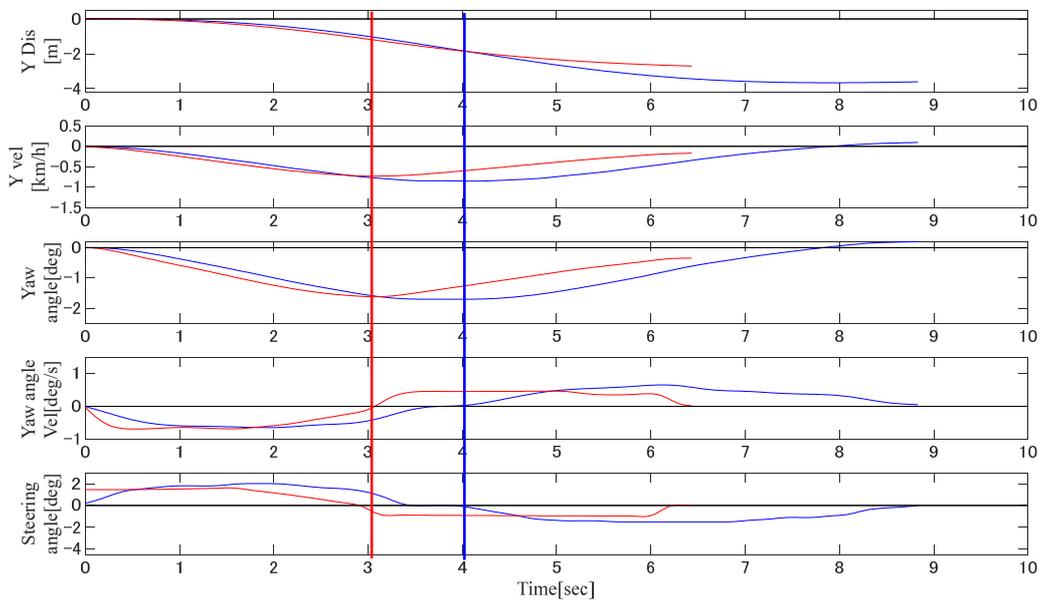


Fig.5.2.24 追越車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 C-Model D）

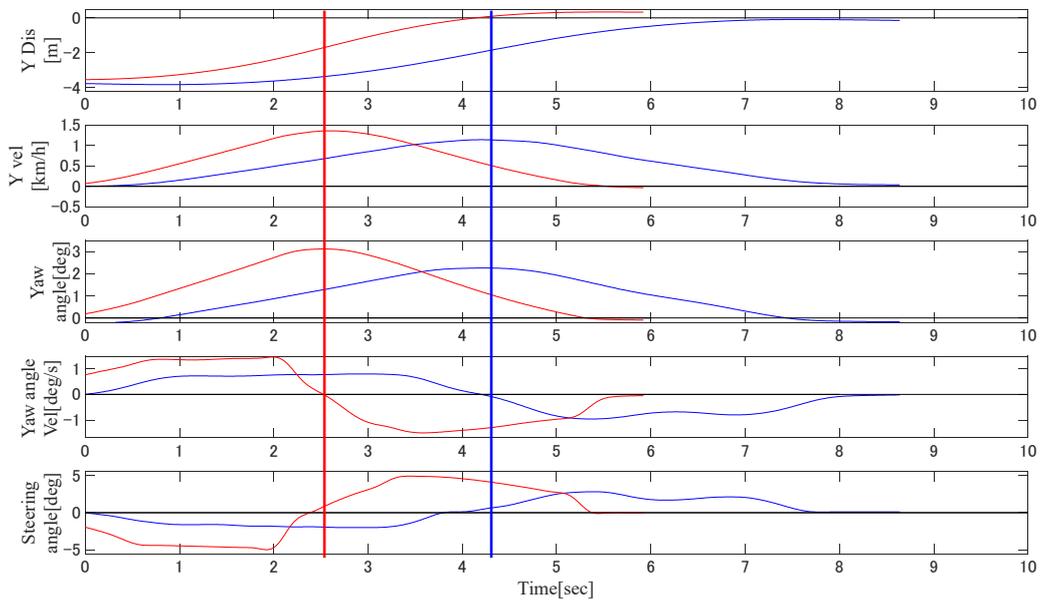


Fig.5.2.25 走行車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 C-Model A）

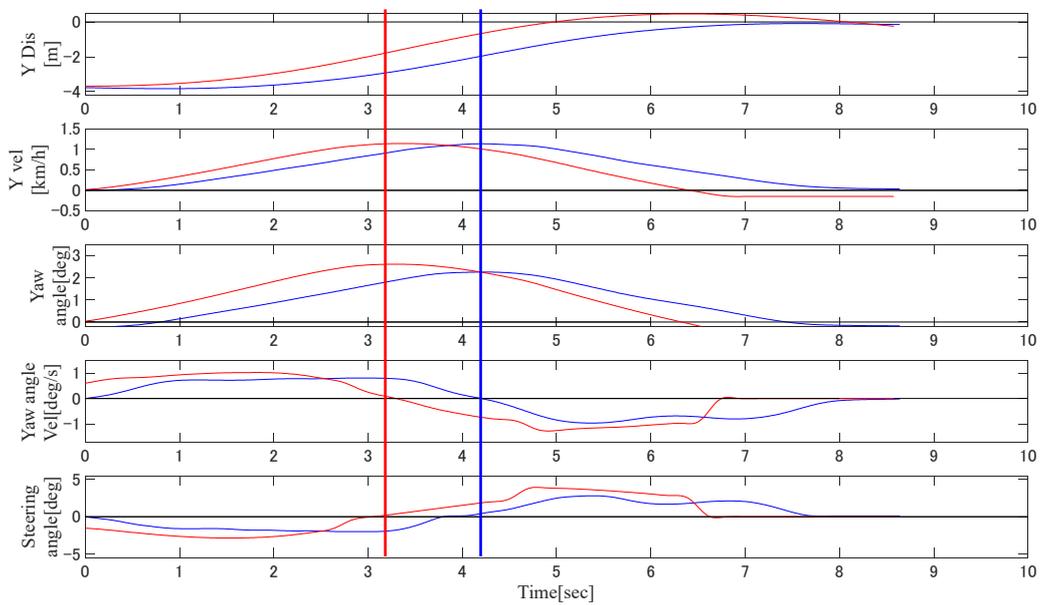


Fig.5.2.26 走行車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 C-Model B）

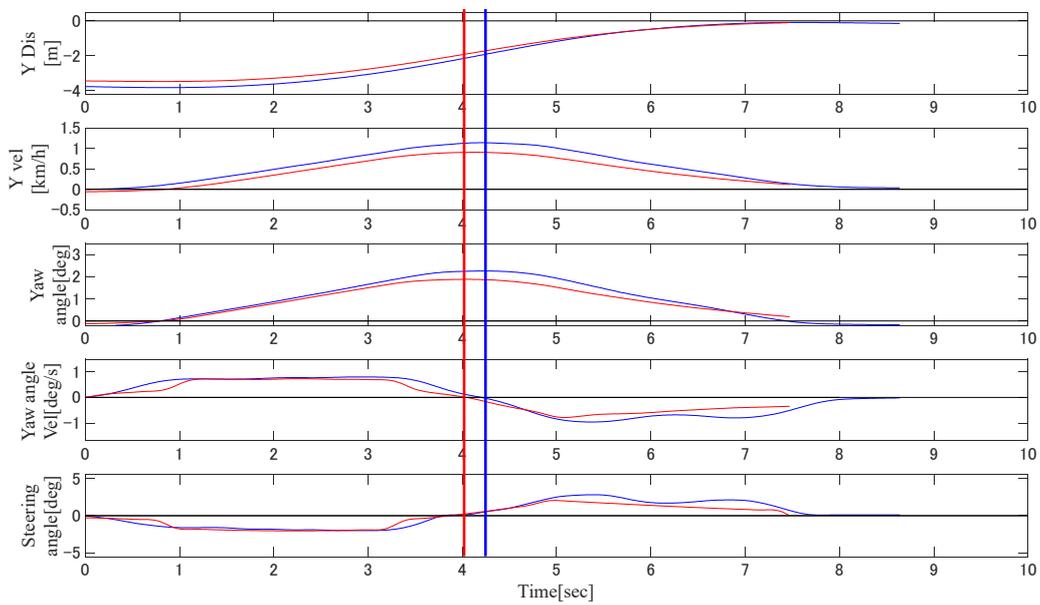


Fig.5.2.27 走行車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 C-Model C）

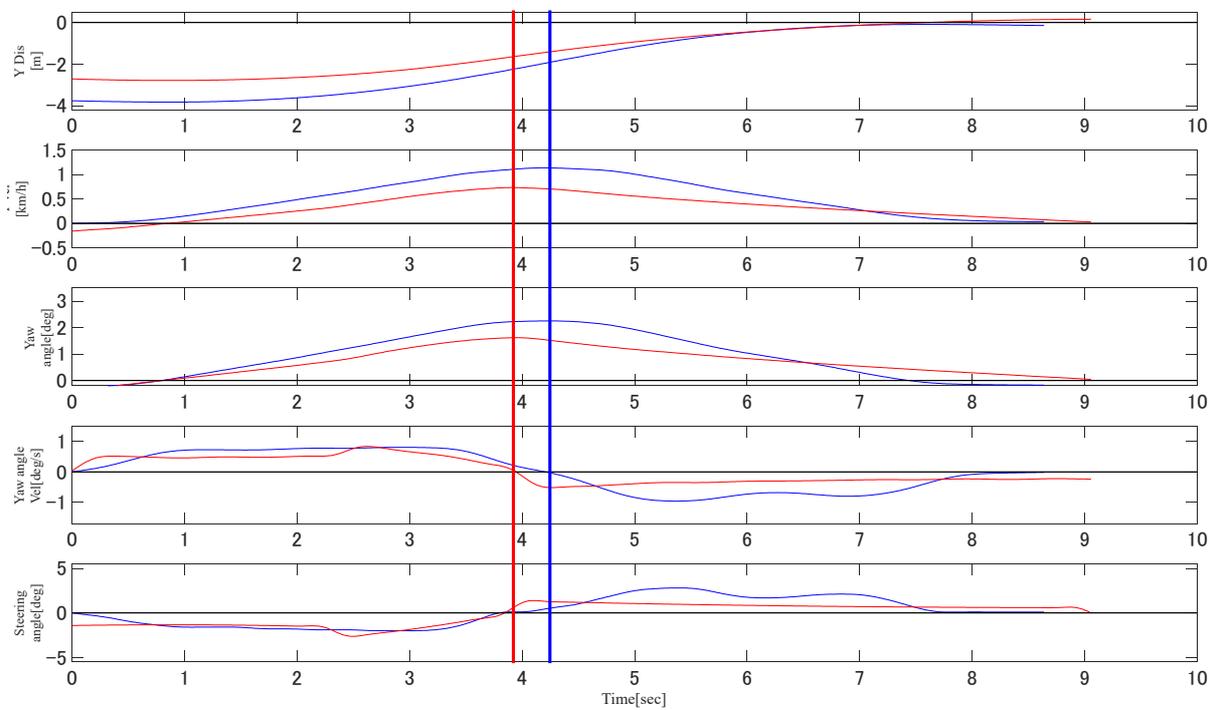


Fig.5.2.28 走行車線進入行動運転行動モデルと被験者の走行データ比較（被験者 C-Model D）

Table 5.2.1 主観評価結果(被験者 A)

被験者 A	Model A	Model B	Model C	Model D
①	0	-1	-1	-2
②	-1	-1	-2	-2
③	0	-1	-1	1
④	-1	0	-1	-2
快適	1	-1	-1	-1
安全	2	-1	1	-1
⑤	1	0	1	-2
⑥	1	2	0	-1
⑦	0	-1	-1	1
⑧	0	-1	-1	-1
快適	0	1	0	-1
安全	2	0	1	-1

Table 5.2.2 主観評価結果(被験者 B)

被験者 B	Model A	Model B	Model C	Model D
①	0	0	0	-2
②	-1	0	0	0
③	-1	-1	0	2
④	-1	-1	0	-2
快適	1	1	1	-1
安全	1	0	1	-2
⑤	-1	0	-1	0
⑥	2	1	0	-2
⑦	0	0	-1	-1
⑧	0	0	0	-2
快適	1	0	-1	-1
安全	-1	0	0	0

Table 5.2.3 主観評価結果(被験者 C)

被験者 C	Model A	Model B	Model C	Model D
①	-1	-1	-1	-2
②	1	1	0	-1
③	0	0	0	-1
④	1	1	1	-1
快適	-1	0	1	1
安全	-1	-1	0	-1
⑤	1	1	0	-1
⑥	1	2	0	-1
⑦	0	0	-1	-1
⑧	1	0	1	-1
快適	-1	0	2	-1
安全	-1	-1	2	0

5.3 ドライバ特性解析

本節では、5.2 節で取得した走行データの比較結果、主観アンケート結果から主観評価を含めたドライバ特性解析を行う。

5.3.1 追越車線進入行動での主観評価解析

本節では、追越車線進入行動全体をと通して回答してもらった項目である「快適」と「安全」の項目について述べる。

まず、「安全」について述べる。Table 5.3.1 に安全評価と快適評価の関係を表す。安全評価が「とても安全」と回答された場合、快適評価が「快適」と回答された。また安全評価が「とても危険」と評価された場合、快適評価は「とても不快」、「不快」と回答された。しかし、「安全」、「どちらでもない」、「不快」と回答された場合、快適評価はばらつきがあり関係が得られなかった。Table 5.3.2 に安全評価とアンケート項目①の関係を表す。①の評価が0の普段通りのとき、安全評価は、どちらでもない以上の評価が得られた。安全評価が「不快」以下

の評価では、アンケート項目①が普段通り以外の評価が多い傾向が得られた。この結果から、追越車線進入行動での安全評価では、追越行動を開始する車間距離の大きさが影響を与えていると考えられる。

次に快適評価について述べる。「とても快適」、「快適」と回答した場合、アンケート項目②から④の評価が「普段通り」の評価をした場合と②と④が「小さい」、③が「遅い」と回答する傾向がある。しかし、アンケート項目②、④で「とても小さい」と回答された場合「不快」と思われる傾向がある。また、②、④で「大きい」、「とても大きい」と回答される傾向がある。

快適評価について以上をまとめると普段の運転より車体角度が大きい追越行動を行うと不快に感じ、車体角度が普段と類似しているか小さい追越行動を行うと快適に感じる傾向があることがわかった。しかし、小さすぎると感じた場合には不快と感じる傾向があるので、できるだけ普段通りの追越行動に近いほうが快適に感じる傾向があるということがわかった。

Table 5.3.1 安全評価と快適評価の関係

安全評価/快適評価	1	0	-1	-2
2	1回			
1		1回	1回	
0	2回			
-1	1回	1回	3回	
-2			1回	1回

Table 5.3.2 安全評価とアンケート項目①の関係

安全評価/①	1	0	-1	-2
2		1回		
1		1回		
0		1回		
-1	1回	1回	3回	2回
-2			1回	1回

5.3.2 追越車線進入行動の各アンケート項目についての解析

本節では、運転行動モデル4つを被験者3人にそれぞれすべて体験してもらい、運転行動モデルの走行データと被験者の走行データの各パラメータの差から「追越車線進入行動」における各アンケート項目についてどのパラメータが主観評価に影響を及ぼしたのか解析した。

アンケート項目②の車体角度の大きさについて述べる。運転行動モデルの走行データと被験者の走行データすべてのパターンのパラメータの差を比較した結果、最大車体角度の差と車体角度変化率が主観的に感じる車体角度の大きさに影響を与えているのではないかと考えられる。まず、車体角度の傾きについて説明する。車体角度は車線変更を開始すると0[deg]付近から線形に近い形で減少していき最大車体角度に達すると線形に近い形で増加し0[deg]に戻る。このように線形に近い変化をすることから車体角度の絶対値 $|\theta| > 0.2$ を超えたところから最大車体角度の絶対値 $|\theta_{max}| < 0.2$ までの区間で最小二乗近似を行い、この最小二乗近似の傾きを車体角度変化率としている。このことによって、「追越車線進入行動」開始から最大車体角度に到達するまで、最大車体角度到達から「追越車線進入行動」終了までそれぞれの車体角度の増加傾向をみることができる。②では、車体角度変化率の前半が該当するため、運転行動モデルの車体角度の傾きを Fig.5.3.1 に被験者の車体角度の傾きを Fig.5.3.2 に示す。横軸が時間[s]を表し、縦軸が車体角度[deg]を表す。

最大車体角度の差と車体角度変化率の差の関係を表したものを Fig.5.3.3 に示す。横軸が車体角度変化率の運転行動モデルと被験者の走行データの差[deg/s]を表し、縦軸を最大車体角度の運転行動モデルと被験者の走行データの差[deg]を表し、縦軸、横軸どちらも運転行動モデルの絶対値が被験者より小さい場合を負で表し、大きい場合を正で表す。正方形が被験者 A、三角形が被験者 B、アスタリスクが被験者 C でそれぞれが運転行動モデルを体験したものを表す。アンケート項目②の評価として、緑に塗りつぶしたものが評価-2 だったもの、青に塗りつぶしたものが評価-1 だったもの、黒に塗りつぶしたものが評価 0 だったもの、桃に塗りつぶしたものが評価 1 だったもの、赤に塗りつぶしたものが評価 2 だったものを表す。

最大車体角度の差が大きい、すなわち、被験者の最大車体角度の絶対値より運転行動モデルの最大車体角度の絶対値が大きいとき、被験者は評価 1、すなわち車体角度が大きい感じる傾向がある。また逆に小さくなるにつれ、被験者は評価-1 から-2 と車体角度が小さいと感じる傾向がある。その中で、横軸に注目すると車体角度変化率の差が 0 に近いとき評価 0、普段通りと感じていることがわかる。これは、運転行動モデルが普段の運転と類似した車体角度の変化をしているためと考えられる。

次に外れ値について述べる。Fig.5.3.3 の黄線で囲まれた被験者 C、被験者 B のデータでは、車体角度変化率の差は正になっているが評価はどちらも-1 で小さいと感じられた。この結果の要因として、車体角度変化率の差と最大車体角度時の横方向位置の差が挙げられ、Fig.5.3.4 に関係を示す。この横方向位置の差は、レーンキープ開始タイミングでの横方向位置の差を表す。黄線で囲まれたものが Fig.5.3.3 での外れ値を示している。外れ値は車体角度変化率の差が大きいと普段の運転より横方向位置が浅い位置でレーンキープ動作に移行しているため車体角度が小さいと感じたと考えられる。よって、横方向位置についても車体角度の主観に影響を与えていると考えられる。

次にアンケート項目③のレーンキープ開始タイミングについて述べる。運転行動モデルの走行データと被験者の走行データすべてのパターンのパラメータの差を比較した結果、最大車体角度時の経過時間の差[s]と最大車体角度時の横方向位置の差[m]の関係が主観的に感じるレーンキープ開始タイミングに影響を与えているのではないかと考えられる。最大車体角度時の経過時間の差と最大車体角度時の横方向位置の差の関係を Fig.5.3.5 に表す。横軸は最大車体角度時の経過時間の差[s]を表し、縦軸は最大車体角度時の横方向位置の差[m]を表す。縦軸は、運転行動モデルの絶対値が被験者より遅い場合を負で表し、大きい場合を正で表す。横軸は、運転行動モデルの絶対値が被験者より大きい場合を負で表し、小さい場合を正で表す。正方形が被験者 A、三角形が被験者 B、アスタリスクが被験者 C でそれぞれが運転行動モデルを体験したものを表す。アンケート項目③の評価として、緑に塗りつぶしたものが評価-2 だったもの、青に塗りつぶしたものが評価-1 だったもの、黒に塗りつぶしたものが評価 0 だったもの、桃に塗りつぶしたものが評価 1 だったもの、赤に塗りつぶしたものが評価 2 だ

ったものを表す。

レーンキープ開始タイミングの差が 0 付近であると主観的に普段通りだと感じるが大きい差がある場合でも評価が 0、普段通りと感じる傾向がある。レーンキープ開始タイミングの差が大きく評価が 0 の場合は、より横方向位置の差が 0 に近い傾向がある。このようにレーンキープ開始タイミングには横方向位置が影響を与えていると考えられる。

次に外れ値について述べる。Fig.5.3.5 の黄線で囲まれた被験者 A、被験者 B のデータでは、レーンキープ開始タイミングは 0 付近に位置するが評価はどちらも-1 で遅いと感じられた。

この結果の要因として、車体角度の傾きの差と最大車体角度時の横方向位置の差が挙げられ、Fig.5.3.6 に関係を示す。タイミングが近くても車体角度変化率が 0 から遠ざかると横方向位置の差に影響されていると考えられる。よって、車体角度変化率についても主観に影響を与えていると考えられる。

次にアンケート項目④の車体角度の大きさについて述べる。運転行動モデルの走行データと被験者の走行データすべてのパターンのパラメータの差を比較した結果、アンケート項目②と同様、最大車体角度の差[deg]と車体角度変化率の差[deg/s]の関係が主観的に感じる車体角度に影響を与えているのではないかと考えられる。②では、車体角度変化率の前半が該当するため、選手行動モデルの車体角度の傾きを Fig.5.3.7 に被験者の車体角度の傾きを Fig.5.3.8 に示す。横軸が時間[s]を表し、縦軸が車体角度[deg]を表す。

最大車体角度の差と車体角度変化率の差の関係を表したものを Fig.5.3.9 に示す。横軸が車体角度の運転行動モデルと被験者の走行データの差を表し、縦軸を最大車体角度の運転行動モデルと被験者の走行データの差を表し、縦軸、横軸どちらも運転行動モデルの絶対値が被験者より小さい場合を負で表し、大きい場合を正で表す。正方形が被験者 A、三角形が被験者 B、アスタリスクが被験者 C でそれぞれが運転行動モデルを体験したものを表す。アンケート項目④の評価として、緑に塗りつぶしたものが評価-2 だったもの、青に塗りつぶしたものが評価-1 だったもの、黒に塗りつぶしたものが評価 0 だったもの、桃に塗りつぶしたものが評価 1 だったもの、赤に塗りつぶしたものが評価 2 だったものを表す。

最大車体角度の差が大きい、すなわち、被験者の最大車体角度の絶対値より運転行動モデ

ルの最大車体角度の絶対値が大きいとき、被験者は評価 1, すなわち車体角度が大きい感じる傾向がある。また逆に小さくなるにつれ、被験者は評価-1 から-2 と車体角度が小さいと感じる傾向がある。その中で、横軸に注目すると車体角度の傾きの差が 0 に近いとき評価 0, 普段通りと感じていることがわかる。これは、運転行動モデルが普段の運転と類似した車体角度の変化をしているためと考えられる。

次に外れ値について述べる。Fig.5.3.9 の黄線で囲まれた被験者 C, 被験者 B のデータでは、車体角度の差は正になっているが評価はどちらも-1 で小さいと感じられた。この結果の要因として、車体角度の傾きの差と最大車体角度時の横方向位置の差が挙げられ、Fig.5.3.10 に関係を示す。この横方向位置の差は、レーンキープ開始タイミングでの横方向位置の差を表す。黄線で囲まれたものが外れ値を示している。外れ値は車体角度の傾きの差が大きいが普段の運転より横方向位置が浅い位置でレーンキープ動作に移行しているため車体角度が小さいと感じたと考えられる。よって、横方向位置についても車体角度の主観に影響を与えていると考えられる。

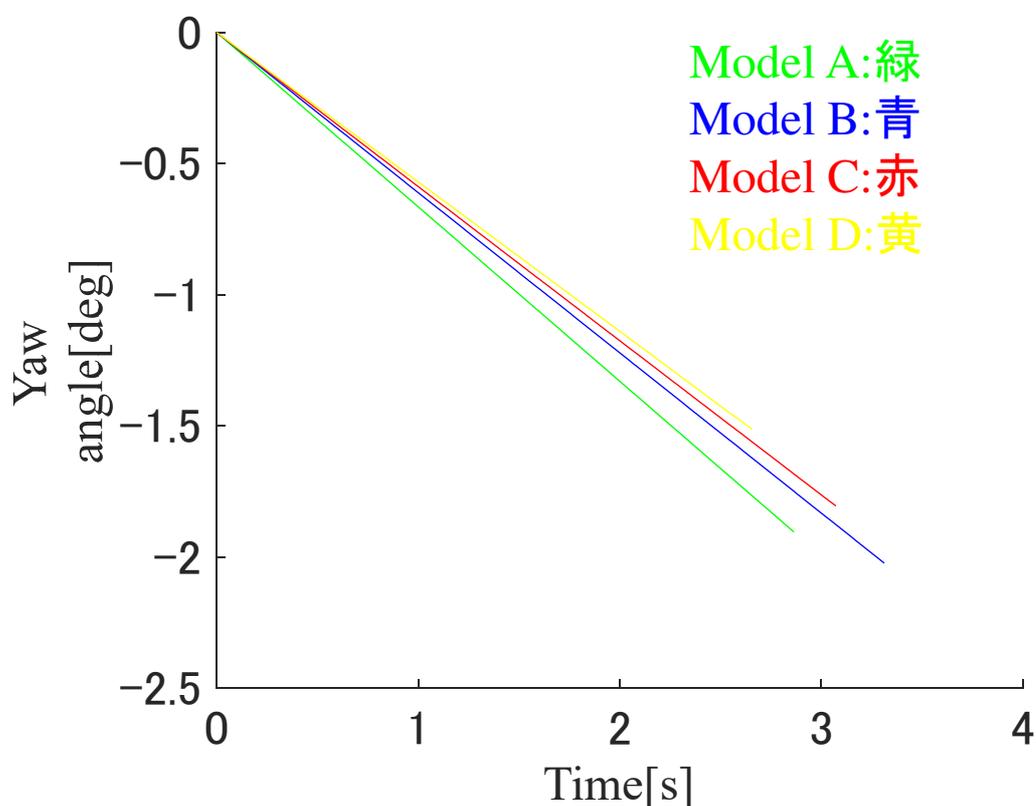


Fig.5.3.1 運転行動モデルの車体角度の傾き（前半）

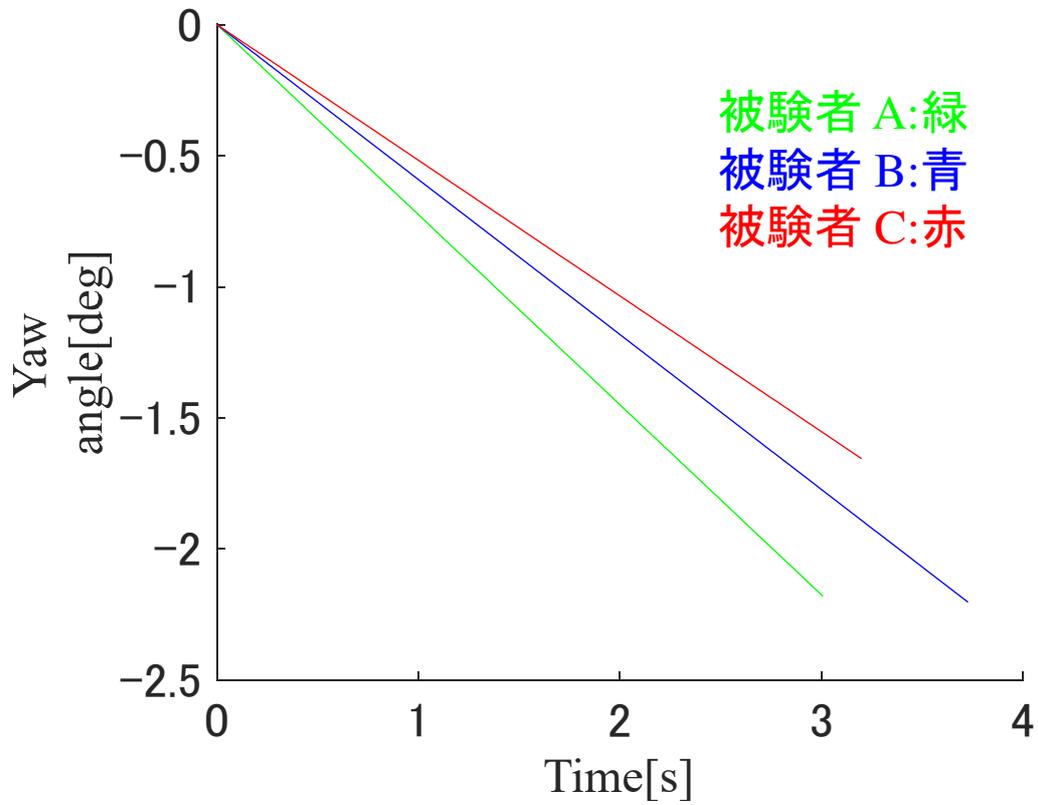


Fig.5.3.2 被験者の車体角度変化率（前半）

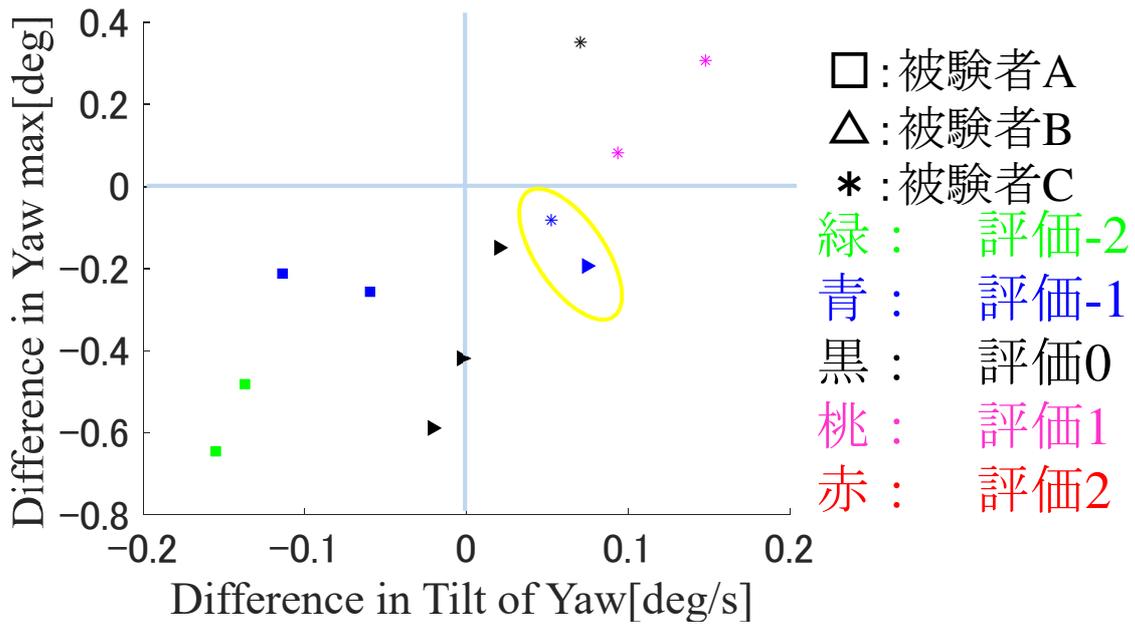


Fig.5.3.3 車体角度変化率の差-最大車体角度の差

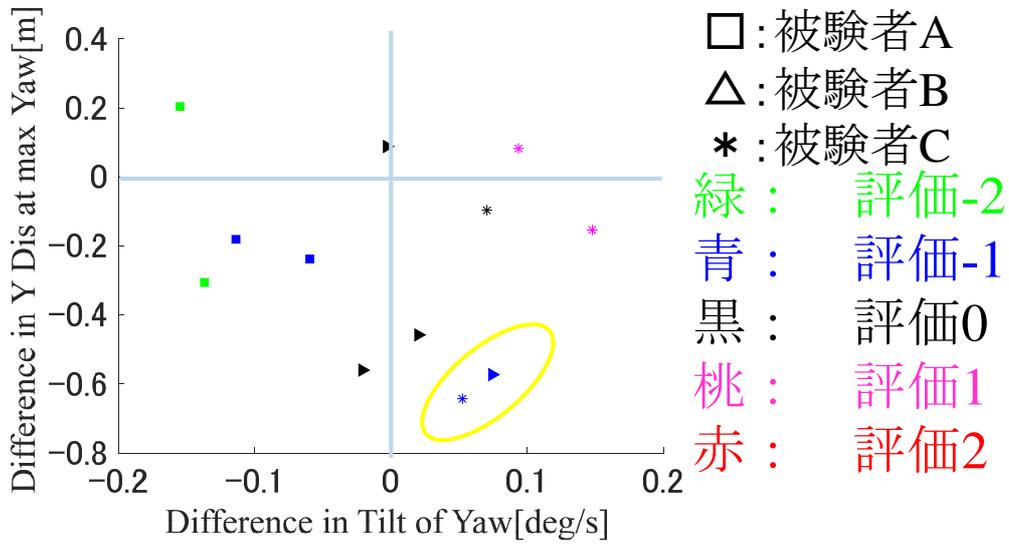


Fig.5.3.4 車体角度変化率の差-最大車体角度時の横方向位置の差

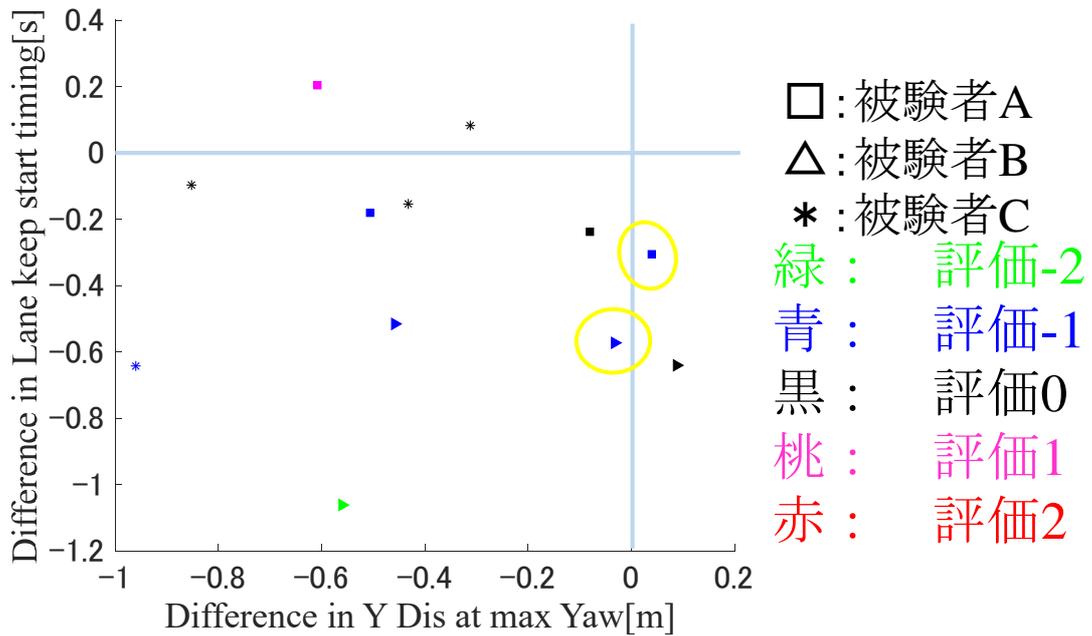


Fig.5.3.5 車体角度変化率の差-レーンキープ開始タイミングの差

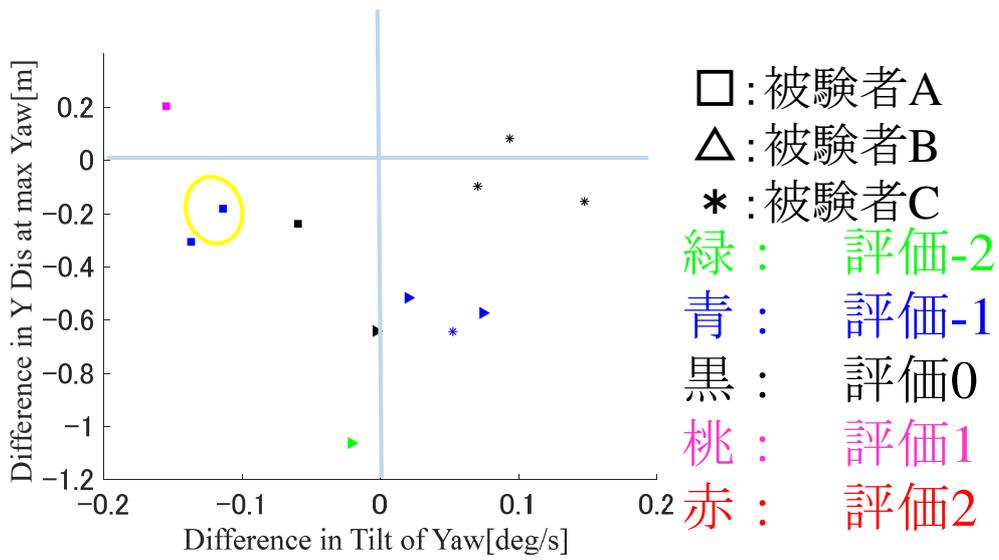


Fig.5.3.6 車体角度変化率の差-最大車体角度時の横方向位置の差

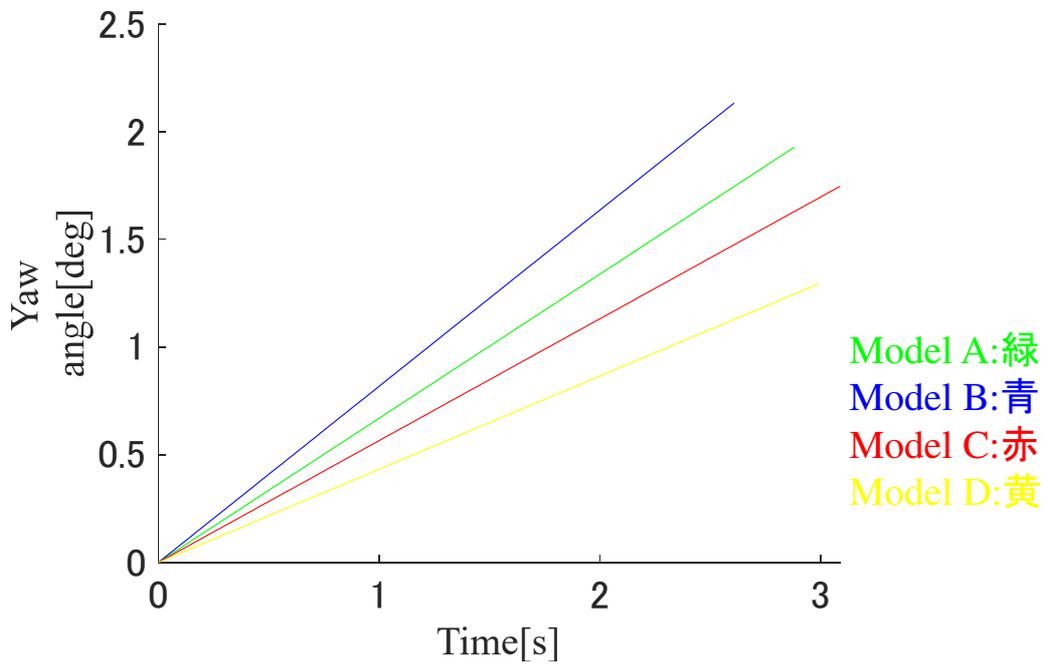


Fig.5.3.7 運転行動モデルの車体角度変化率 (後半)

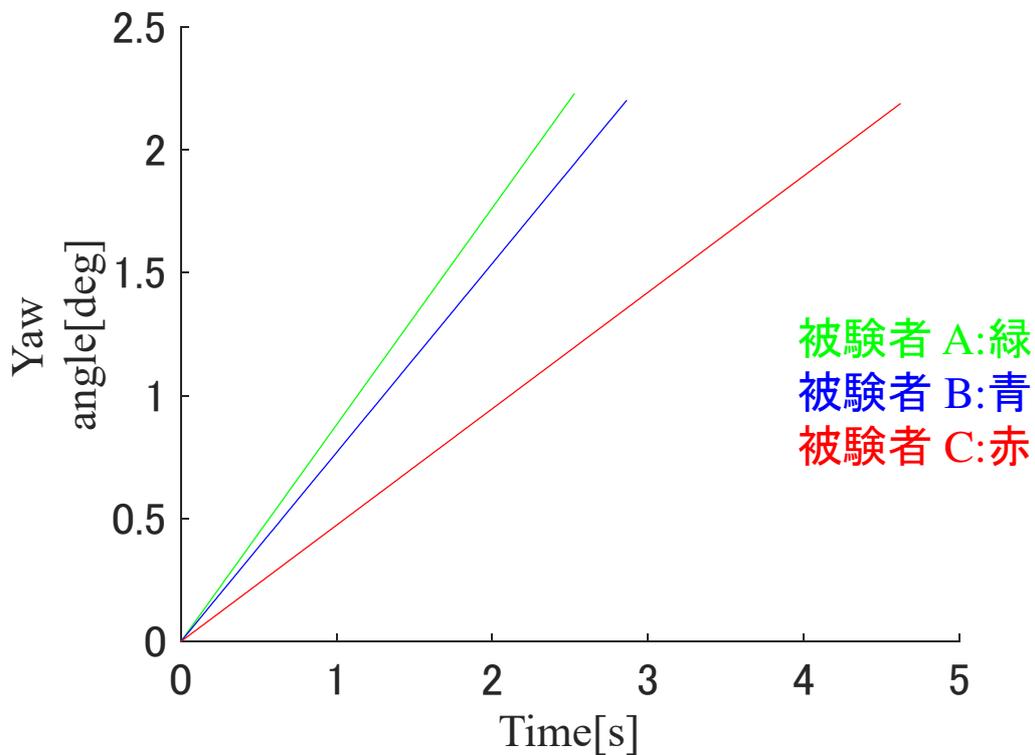


Fig.5.3.8 被験者の車体角度変化率（後半）

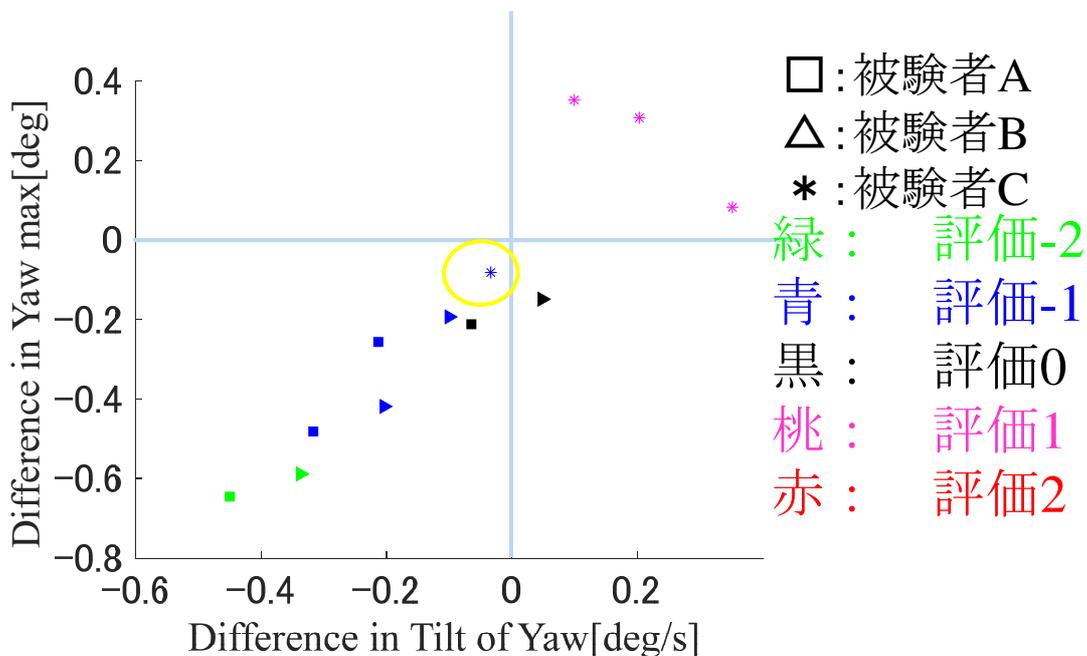


Fig.5.3.9 車体角度変化率の差-最大車体角度の差

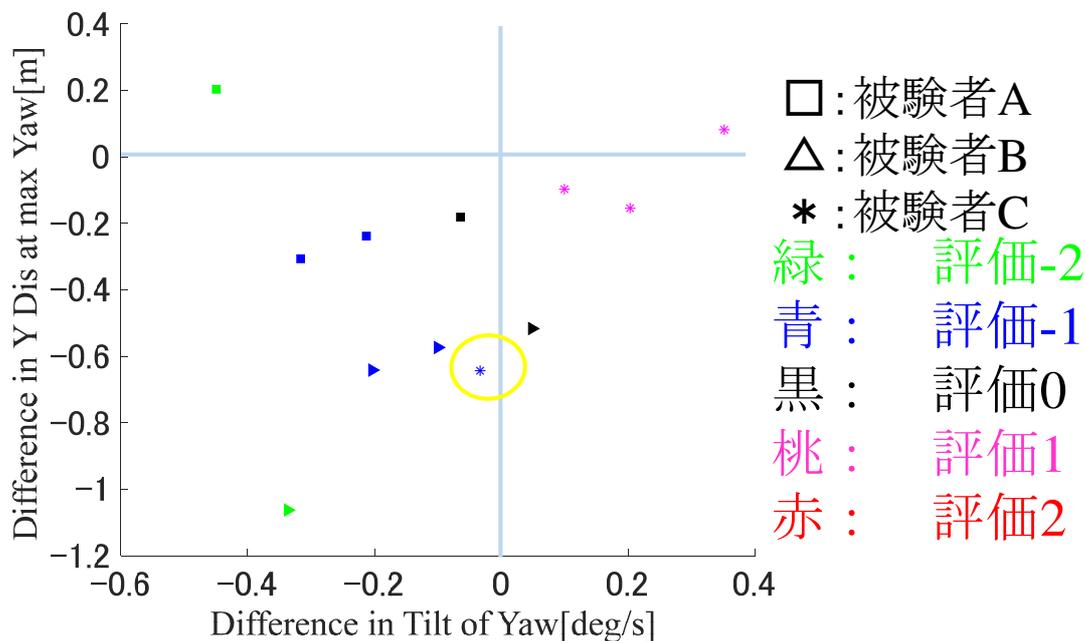


Fig.5.3.10 車体角度変化率の差-最大車体角度時の横方向位置の差

5.3.3 走行車線進入行動の各アンケート項目についての解析

本節では、転行動モデル4つを被験者3人にそれぞれすべて体験してもらい、運転行動モデルの走行データと被験者の走行データの各パラメータの差から「走行車線進入行動」における各アンケート項目についてどのパラメータが主観評価に影響を及ぼしたのか解析した。

アンケート項目⑥の車体角度の大きさについて述べる。運転行動モデルの走行データと被験者の走行データすべてのパターンのパラメータの差を比較した結果、「追越車線進入行動」のアンケート項目②と同様、最大車体角度の差と車体角度変化率の関係が主観的に感じる車体角度に影響を与えているのではないかと考えられる。「走行車線進入行動」における車体角度変化率の運転行動モデルについて Fig.5.3.11、被験者について Fig.5.3.12 に示す。最大車体角度の差と車体角度変化率の差の関係を表したものを Fig.5.3.13 に示す。横軸が車体角度変化率の運転行動モデルと被験者の走行データの差[deg/s]を表し、縦軸を最大車体角度の運転

行動モデルと被験者の走行データの差[deg]を表し、縦軸、横軸どちらも運転行動モデルの絶対値が被験者より小さい場合を負で表し、大きい場合を正で表す。正方形が被験者 A、三角形が被験者 B、アスタリスクが被験者 C でそれぞれが運転行動モデルを体験したものを表す。アンケート項目②の評価として、緑に塗りつぶしたものが評価-2 だったもの、青に塗りつぶしたものが評価-1 だったもの、黒に塗りつぶしたものが評価 0 だったもの、桃に塗りつぶしたものが評価 1 だったもの、赤に塗りつぶしたものが評価 2 だったものを表す。

「追越車線進入行動」のアンケート項目②と同様、被験者の最大車体角度の絶対値より運転行動モデルの最大車体角度の絶対値が大きいとき、車体角度が大きい感じる傾向がある。また逆に小さくなるにつれ、被験者は車体角度が小さいと感じる傾向がある。その中で、横軸に注目すると車体角度の傾きの差が 0 に近いとき評価 0、普段通りと感じていることがわかる。これは、運転行動モデルが普段の運転と類似した車体角度の変化をしているためと考えられる。

次にアンケート項目⑦のレーンキープ開始タイミングについて述べる。運転行動モデルの走行データと被験者の走行データすべてのパターンのパラメータの差を比較した結果、「追越車線進入行動」のアンケート項目③と同様、最大車体角度時の経過時間の差と最大車体角度時の横方向位置の差の関係が主観的に感じるレーンキープ開始タイミングに影響を与えているのではないかと考えられる。最大車体角度時の経過時間の差と最大車体角度時の横方向位置の差の関係を Fig.5.3.14 に表す。横軸は最大車体角度時の経過時間の差[s]を表し、縦軸は最大車体角度時の横方向位置の差[m]を表す。縦軸は、運転行動モデルの絶対値が被験者より遅い場合を負で表し、大きい場合を正で表す。横軸は、運転行動モデルの絶対値が被験者より大きい場合を負で表し、小さい場合を正で表す。正方形が被験者 A、三角形が被験者 B、アスタリスクが被験者 C でそれぞれが運転行動モデルを体験したものを表す。アンケート項目③の評価として、緑に塗りつぶしたものが評価-2 だったもの、青に塗りつぶしたものが評価-1 だったもの、黒に塗りつぶしたものが評価 0 だったもの、桃に塗りつぶしたものが評価 1 だったもの、赤に塗りつぶしたものが評価 2 だったものを表す。

レーンキープ開始タイミングの差が 0 付近であると主観的に普段通りだと感じるが、大き

い差がある場合普段通りと感じる傾向がある。レーンキープ開始タイミングの差が大きく評価が 0 の場合は、より横方向位置の差が 0 に近い傾向がある。このようにレーンキープ開始タイミングには横方向位置が影響を与えていると考えられる。

次にアンケート項目⑧の車体角度の大きさについて述べる。運転行動モデルの走行データと被験者の走行データすべてのパターンのパラメータの差を比較した結果、アンケート項目②と同様、最大車体角度の差と車体角度変化率の関係が主観的に感じる車体角度に影響を与えているのではないかと考えられる。②では、車体角度変化率の前半が該当するため、運手行動モデルの車体角度変化率を Fig.5.316 に被験者の車体角度変化率を Fig.5.3.17 に示す。横軸が時間を表[s]し、縦軸が車体角度[deg]を表す。

最大車体角度の差と車体角度変化率の差の関係を表したものを Fig.5.3.18 に示す。横軸が車体角度の運転行動モデルと被験者の走行データの差を表し、縦軸を最大車体角度の運転行動モデルと被験者の走行データの差を表し、縦軸、横軸どちらも運転行動モデルの絶対値が被験者より小さい場合を負で表し、大きい場合を正で表す。正方形が被験者 A、三角形が被験者 B、アスタリスクが被験者 C でそれぞれが運転行動モデルを体験したものを表す。アンケート項目④の評価として、緑に塗りつぶしたものが評価-2 だったもの、青に塗りつぶしたものが評価-1 だったもの、黒に塗りつぶしたものが評価 0 だったもの、桃に塗りつぶしたものが評価 1 だったもの、赤に塗りつぶしたものが評価 2 だったものを表す。

最大車体角度の差が大きい、すなわち、被験者の最大車体角度の絶対値より運転行動モデルの最大車体角度の絶対値が大きいとき、被験者は評価 1、すなわち車体角度が大きい感じる傾向がある。また逆に小さくなるにつれ、被験者は評価-1 から-2 と車体角度が小さいと感じる傾向がある。その中で、横軸に注目すると車体角度変化率の差が 0 に近いとき評価 0、普段通りと感じていることがわかる。これは、運転行動モデルが普段の運転と類似した車体角度の変化をしているためと考えられる。

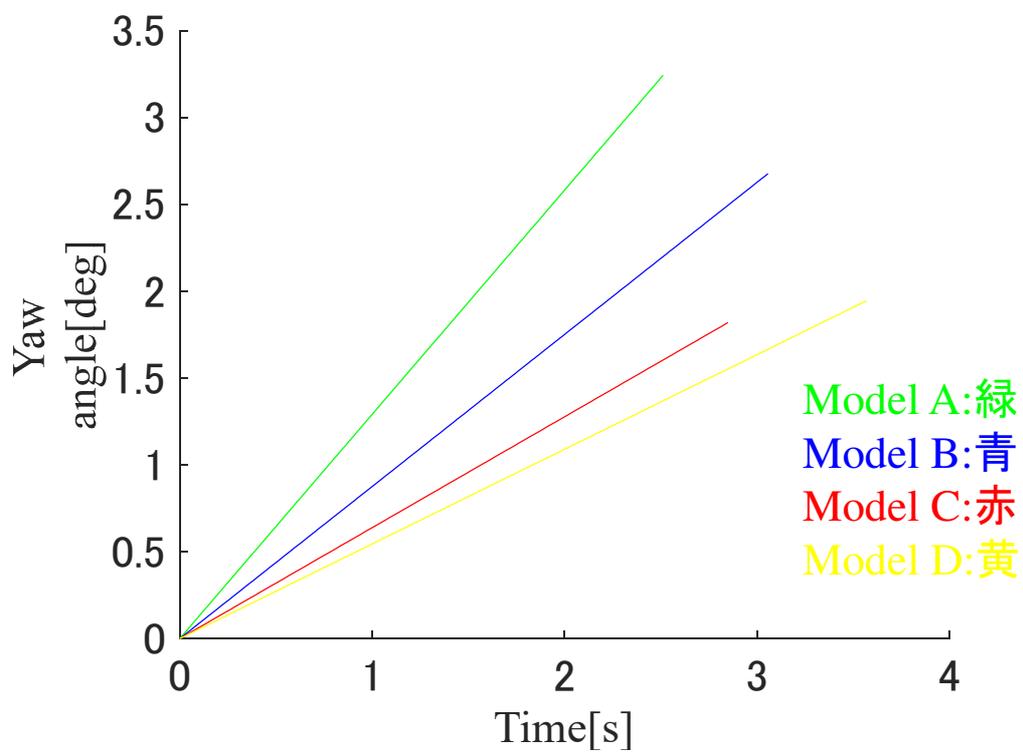


Fig.5.3.11 運転行動モデルの車体角度変化率（前半）

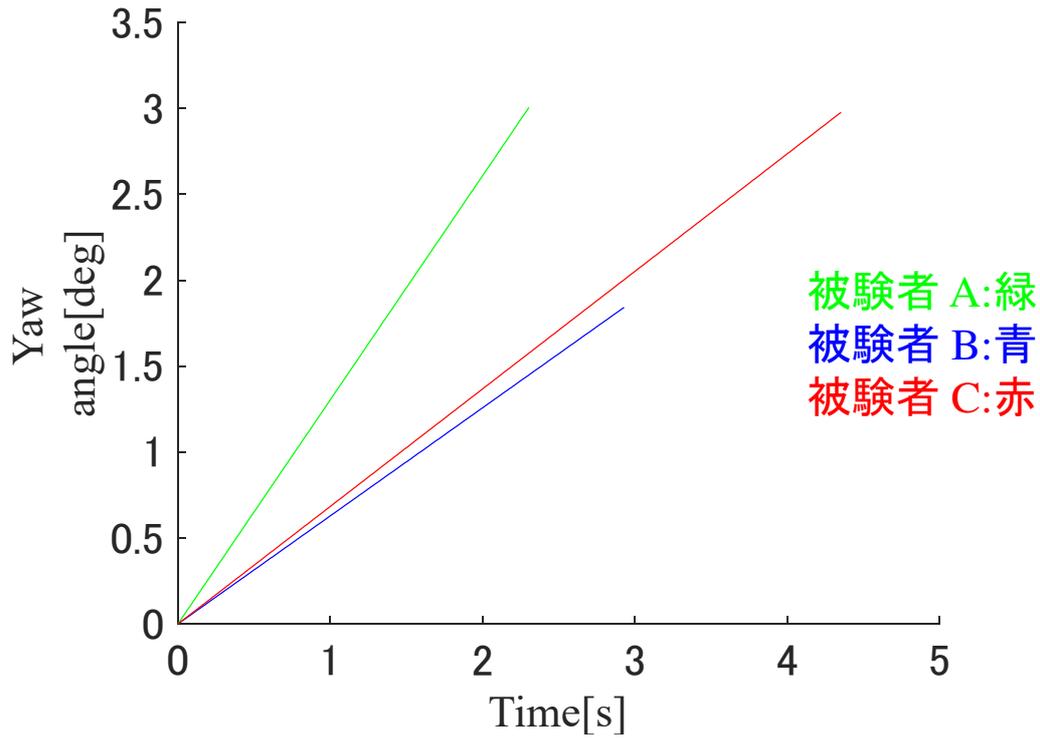


Fig.5.3.12 被験者の車体角度変化率（前半）

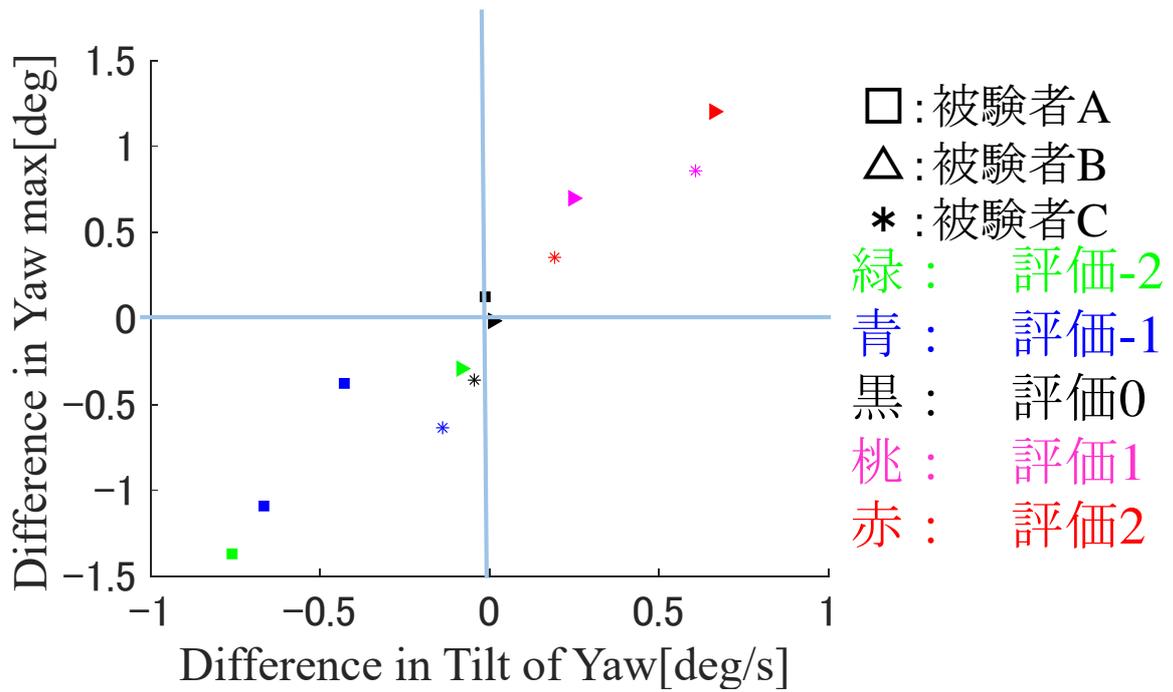


Fig.5.3.13 車体角度変化率の差-最大車体角度の差

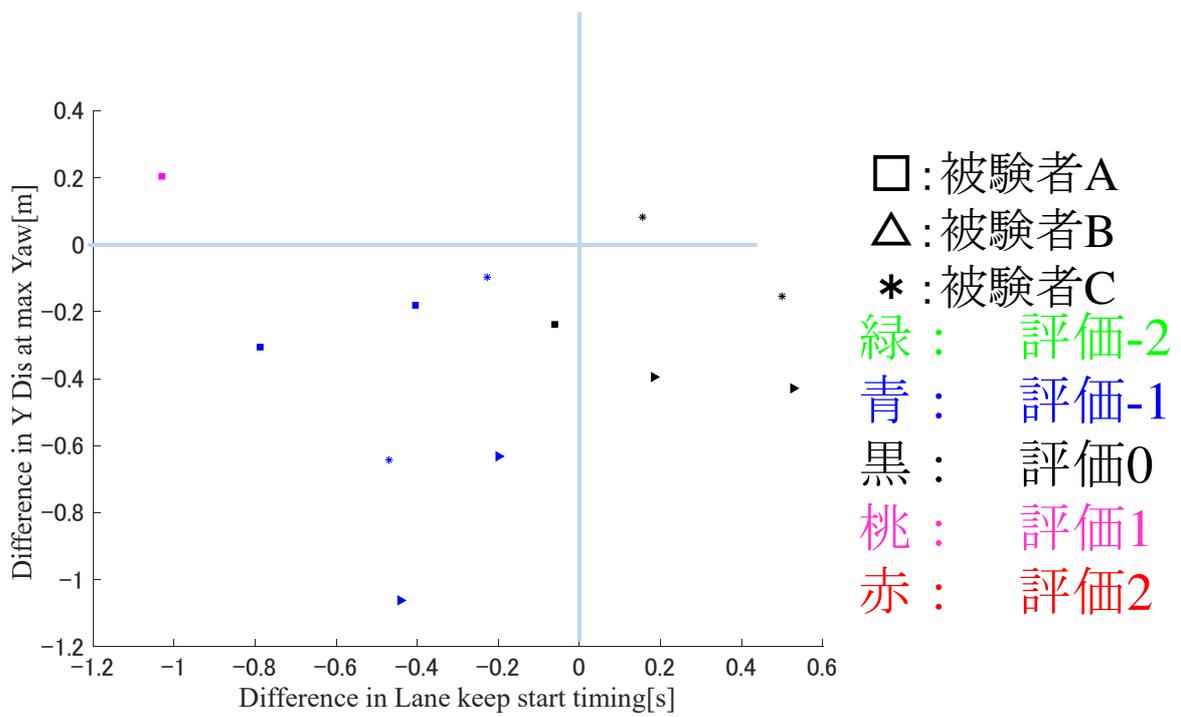


Fig.5.3.14 レーンキープ開始タイミングの差-最大車体角度時の横方向位置の差

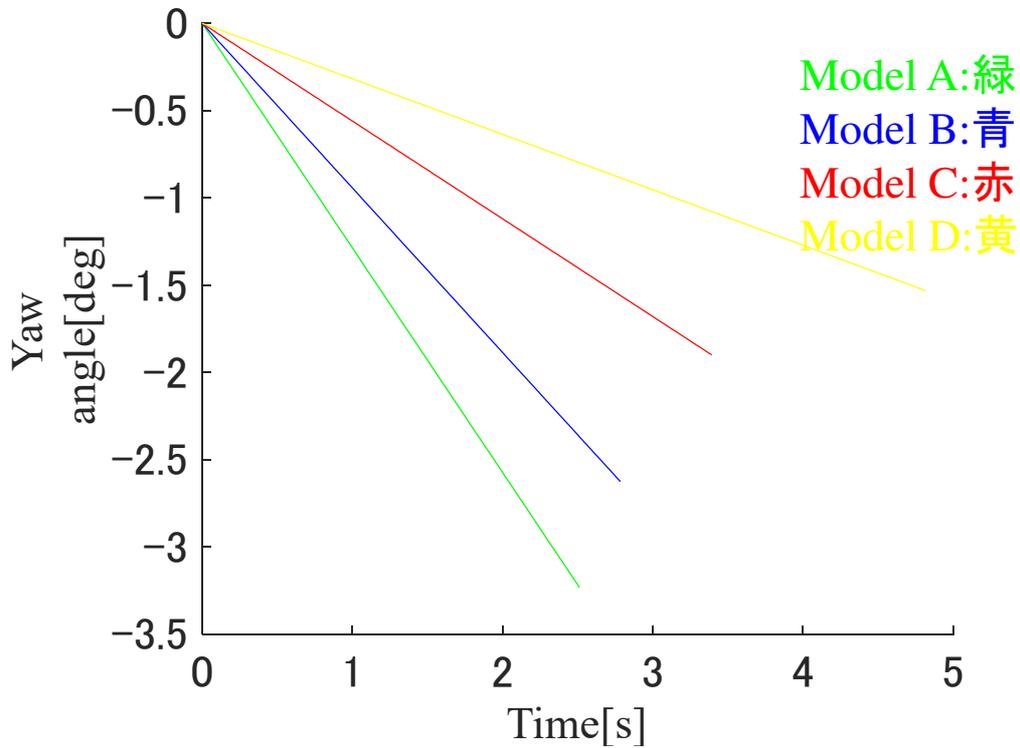


Fig.5.3.15 運転行動モデルの車体角度変化率 (後半)

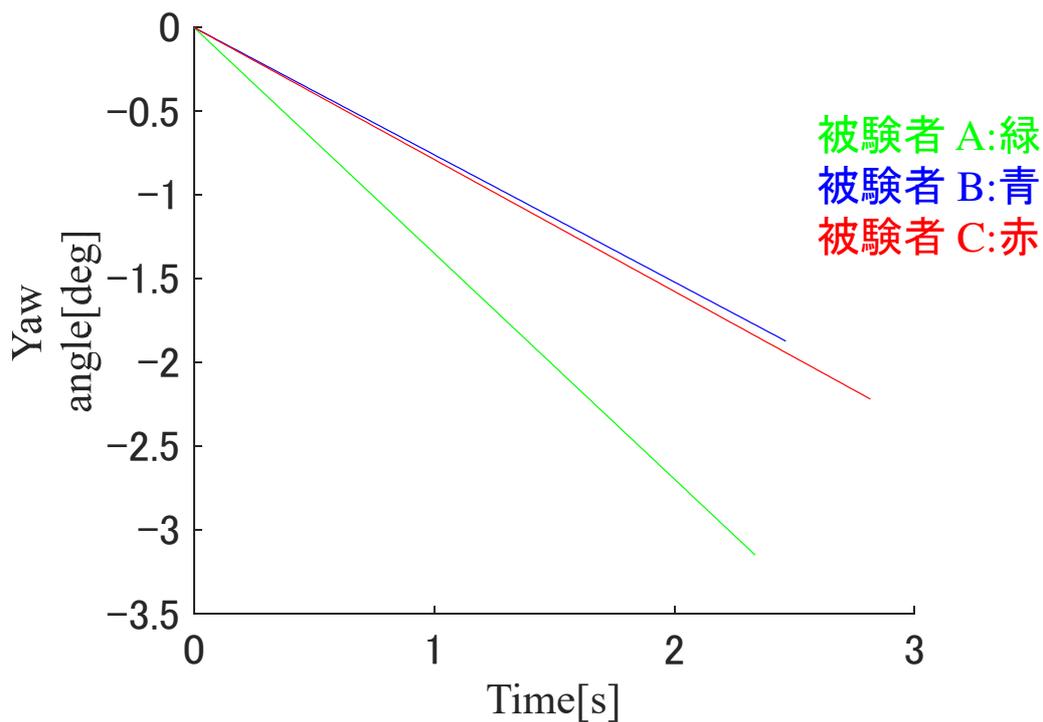


Fig.5.3.16 被験者の車体角度変化率（後半）

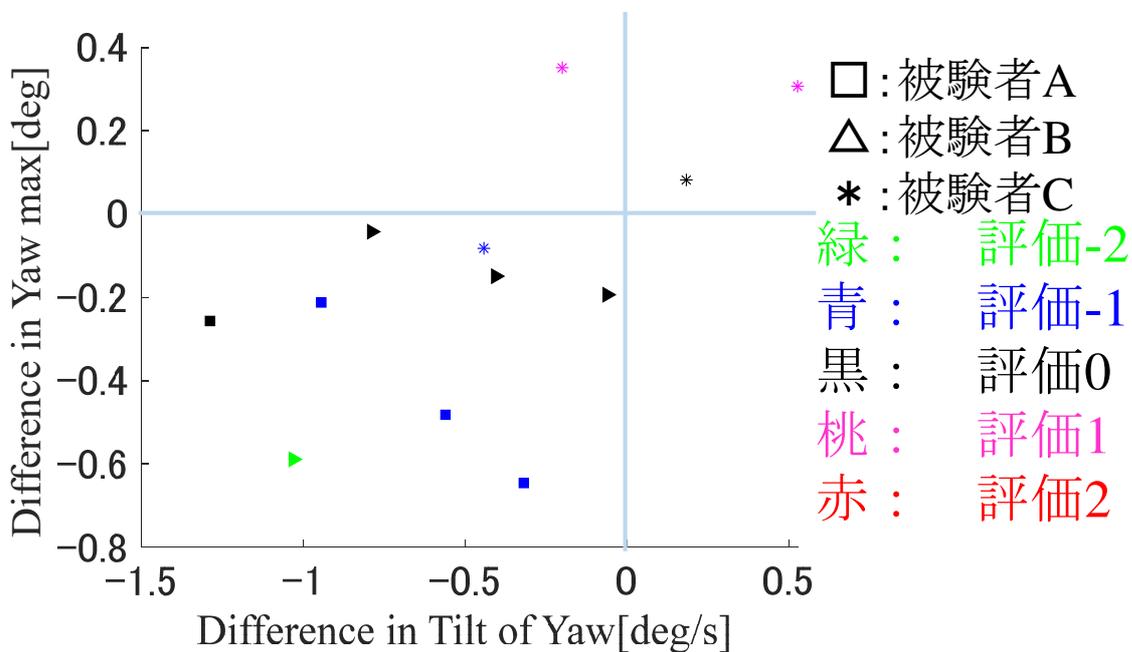


Fig.5.3.17 車体角度変化率の差-最大車体角度の差

5.4 実験結果まとめ

本節では、5.3 節で考察したものをまとめる。まず、「追越車線進入行動」、「走行車線進入行動」それぞれの全体評価としての「快適」と「安全」について述べる。「安全」は、アンケート項目①の車間距離の大きさに影響されているということがわかった。「快適」は、「追越車線進入行動」、「走行車線進入行動」どちらもアンケート項目②から④の車線変更動作からレーンキープ動作までの一連の動作とタイミングで運転行動モデルと被験者の運転が類似しているほど快適であると感じられ、運転行動モデルが被験者より小さい車線変更、遅いレーンキープ開始タイミングであれば快適と感じる傾向があるということがわかった。しかし、とても小さい車線変更や運転行動モデルが被験者より大きいと不快に感じるという結果を得た。このようにドライバーが快適と感じるには車体角度の大きさとレーンキープ開始タイミングが影響を与えていることがわかった。そこで、5.3 節ではどのようなパラメータが車体角度の大きさ、レーンキープ開始タイミングに影響を与えているのか解析を行った。車体角度の大きさでは、最大車体角度の大きさが主に影響を与えているが、車体角度変化率、つまり車線変更開始から最大車体角度に到達するまでの車体角度の時間に対する増加量が類似していると車体角度の大きさは類似していると感じるということがわかった。これらより、車体角度の大きさは最大車体角度と車体角度変化率に影響されているということが言える。次にレーンキープ開始タイミングでは、実際にレーンキープ開始タイミングの運転行動モデルと被験者の差が 0 に近いと被験者は普段の運転と類似していると感じるが、差が 0 と離れている場合でも普段の運転と類似していると感じることがあった。この場合は最大車体角度時の横方向位置の差が 0 に近いときに見られた。よって、レーンキープ開始タイミングは、主にレーンキープ開始タイミングと最大車体角度時の横方向位置が影響を及ぼしているということが言える。

以上より本研究で用いたハイブリッドシステムに基づく追越行動モデルの構築の際は、最大車体角度、車体角度の傾き、レーンキープ開始タイミング、最大車体角度時の横方向位置を考慮してステアリング操作量同定を行う必要があると考える。

第 6 章

結論

6.1 まとめ

本研究では、追越行動において様々な運転行動モデルを体験したときどのようなパラメータの影響が大きいのかを解明することを目的として、主観評価を絡めたドライバ特性解析実験を行った。ハイブリッドシステムに基づく追越行動における運転行動モデルを構築し、その運転行動モデル構築の基となった被験者 3 人に構築した運転行動モデル 3 つと先行研究で構築されている運転行動モデル 1 つの計 4 つのモデルをランダムに体験してもらった。

まず、運転行動モデルを構築するにあたり直線の 2 車線高速道路を対象に運転情報収集実験を行った。そのデータを基にハイブリッドシステムに基づき、運転行動モデルを構築した。そして、被験者 3 人に 4 つのモデルを体験してもらった。その際に主観アンケートによる主観評価をしてもらった。追越行動においてどの動作、タイミングでどのようにかんじているのかを明確にするため、追越行動を大きく「追越車線進入行動」、「走行車線進入行動」にわけ、それぞれをさらに分割し、それぞれの動作、タイミングでアンケート項目に回答してもらった。その後、ドライバ特性解析実験を行った。その結果、普段の運転と近い運転行動モデルは快適と感ずることがわかった。また、普段よりも小さい車体角度、遅いレーンキープ開始タイミングでも快適と感ずる傾向があるということがわかった。しかし、普段の運転より大きい車体角度での車線変更、とても小さい車体角度での車線変更動作、早いレーンキープ開始タイミングでは不快に感ずるとということがわかった。次にどのパラメータが車体角度、レーンキープ開始タイミングに影響を与えドライバが普段の運転と類似しているのかを解析を行った。その結果、車体角度では、最大車体角度が類似している場合、快適と感ずる傾向があり、また、最大車体角度が類似していなくても車体角度変化率が類似していればドライバは

快適と感じる傾向があるということがわかった。レーンキープ開始タイミングでは、そもそもレーンキープ開始タイミングが類似していれば、快適と感じるが、類似していなくてもレーンキープ開始タイミング時の横方向位置が普段の運転と類似していれば快適と感じる傾向があるということがわかった。以上のことから運転行動モデルの構築の際に最大車体角度、車体角度の傾き、レーンキープ開始タイミング、横方向位置というパラメータを基にステアリング操作量を同定するとより快適な運転行動モデルが構築できると考えられる。

6.2 今後の課題

本研究の今後の課題としては以下のことが挙げられる。本研究では、追越行動において重要となるパラメータの解析までを行った。本研究の結果から重要となったパラメータを用いて実際に運転行動モデルを構築し検証を行う必要がある。また、本研究では、直線 2 車線高速道路での追越行動を対象にしており、他のシチュエーションでの追越行動や他の運転行動へと対象を拡大していく必要もある。また、DS を用いたシミュレーションでの実験であったので、実車を用いた解析実験を用いることでよりリアルな主観評価が得られると考える。今後、可能であれば、実車での検証を行っていく必要があると考える。

参考文献

- [1] “交通事故発生状況の推移 2020 年度版”，警視庁 [online]
<https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/toukeihyo.html>
- [2] “令和 2 年版交通安全白書”，内閣府（2020 ） [online]
https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r02kou_haku/index_zenbun_pdf.html
- [3] “官民 ITS 構想・ロードマップ 2019”，高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議 [online] <https://cio.go.jp/node/2509>
- [4] “2019 次世代カーテクノロジーの本命予測と未来自動車像”，富士キメラ総研 [online]
<https://www.fcr.co.jp/report/191q08.htm>
- [5] “トヨタの安全技術とは～Toyota Safety Sense～”，トヨタ自動車 [online]
https://toyota.jp/safety/?padid=ag461_safety_scene_highway01_pankuzu_2
- [6] 加藤晋，“自動車の自動運転システムの研究と現状”，人工知能学会誌，Vol.22，No.4，pp.510-516（2007）
- [7] 川定之，“自動車の自動運転技術の変遷”，自動車技術，Vol.60，No.10，pp.4-9（2006）
- [8] ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク，稲田一成，永井正夫，“超小型電気自動車の通常運転行動モデルに基づく個別適合運転支援システムの開発”，日本ロボット学会誌，Vol.27，No.8，pp.885-891（2009）
- [9] 三浦将太，早川聡一郎，三田誠一，土田縫夫，棚橋潤紀，“自律走行車制御系へのドライバのブレーキ操作スキルの実装”，電気学会産業応用部門大会講演論文集，p.90（2009）
- [10] 上瀧嘉久，牧野俊昭，藤崎樹也，三枝省三，“高齢者用電動車の自律走行操舵の検討”，日本機械学会年次大会講演論文集，Vol.2008，No.7，pp.223-224（2008）
- [11] 奥雲正樹，黒川尊史，大北正昭，大木誠，田中淳，大槻和志，横田州史，木村昭彦，“車椅子自律移動ロボット DREAM-3 のブレーキ機能を考慮した走行制御”，鳥取大学工学部研究報告，Vol.36，pp.15-21（2005）
- [12] 熊谷正朗，菅原真，“トレーラーロボットの自律運転に関する研究”，計測自動制御学

会東北支部 第 240 回研究集会 (2007)

[online] <http://www.topic.ad.jp/sice/papers/240/240-5.pdf>

[13]奥田裕之, “人間行動のハイブリッドシステムに基づいた人間-機械協調型ロボットシステムの切替型制御機器設計”, 電学論D, Vol.128, No.6, pp.810-818 (2008)

[14]影山一郎, “高度運転システムに向けたドライバモデル構築に関する研究”, 自動車技術会論文集, Vol.48, pp431-437(2017)

[15]平松真知子, “自動走行における運転スタイル個人適合手法の提案 (第 2 報)”, 自動車技術会論文集, Vol51, No3, pp460-465(2020)

[16]神嶋敏弘, “データマイニング分野のクラスタリング手法(1) —クラスタリングを使ってみよう! —”, 人工知能学会誌, Vol.18, No.1, pp.59-65 (2003)

[17]西脇由博, “確率的手法を用いた車線変更軌跡のモデル化” 情報処理学会論文誌, Vol.51, No.1, pp131-140 (2010)

[18]奥田裕之, “高速道路における追越し行動におけるプリミティブタスクの切り換え条件推定”, 自動車技術会論文集, Vol46 No.2, pp527-531 (2015)

[19]竹原昭一郎”操舵行動におけるドライバ個人特性解析に関する研究”, 自動車技術会論文集 Vol40 No.3, pp899-904(2009)

[20]田口峻, “運転行動における判断の定量化とそれに基づく行動特性解析”, 計測自動制御学会論文集, Vol.44, No.3, pp.269-277 (2008)

謝辞

本研究を遂行するにあたり，所属研究室である人間支援システム研究室 池浦良淳 教授には学部四年から修士二年までの三年間という長い間，日頃から多大なる御指導，御鞭撻を親身になって行って頂き，心より深く感謝しております。厚く御礼申し上げます。

また，大変お忙しい中本論文を査読して頂くと共に，多数のご教示，ご助言を賜りました三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 加藤典彦准教授に厚く御礼申し上げます。

また，本研究を進めるにあたり多数のご教示，ご助言を賜りました人間支援システム研究室 早川聡一郎 准教授に厚く御礼申し上げます。

また，本研究を進めるにあたり多数のご教示，ご助言を賜りました人間支援システム研究室 堤成可 助教に厚く御礼申し上げます。

実験装置の作製にあたり，親身なご協力，アドバイスを頂きました 澤井秀樹 研究員に厚く御礼申し上げます。

また，本研究を行う上で様々な提案，助言を頂いた人間支援システム研究室の方々に感謝申し上げます。

最後となりましたが，大学生活をおくるうえで，惜しめない援助を送ってくれた両親に感謝いたします。