

平成 28 年度 修士学位論文

フィードバックモデル構造に基づいた ドライバ旋回操作モデルの構築と有効性検証

指導教員 早川聡一郎 准教授

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻

システム設計研究室

415M118 小嶋友輔

目次

第 1 章 序論

1.1	研究背景	1
1.2	本研究の目的	4
1.3	本論文の構成	5

第 2 章 人間の運転特性に基づく車両運動制御システム

2.1	ハイブリッドシステムに基づく人間行動モデル	6
2.2	運転行動モデルと車両運動制御システム	8
2.3	乗員を考慮した車両運動制御システム設計手法	9

第 3 章 実験装置と実験環境

3.1	ドライビングシミュレータ構成する装置	10
3.1	パソコンの役割	13
3.2.1	制御用コンピュータ (PC1)	13
3.2.2	スクリーン投影用コンピュータ (PC2)	13
3.2.3	ミラー用コンピュータ (PC3)	14
3.2.4	情報提示用コンピュータ (PC4)	14
3.2.5	各 PC の接続	14
3.2	実験環境	16
3.2.1	市街地コース 1	16
3.2.2	市街地コース 2	20

第 4 章 ドライバ旋回操作モデルの構築と検証

4.1	運転情報収集実験	22
4.1.1	実験方法	22
4.1.2	運転情報収集実験結果	24
4.2	ドライバ旋回操作モデルのモード数	29
4.2.1	ドライバ旋回操作モデルのモード数決定	29
4.2.2	運転情報収集実験のモード分割	33
4.3	旋回操作切替判断モデルの同定	37
4.3.1	旋回開始条件	37
4.3.2	モード 1 とモード 2 間の判断モデル	39
4.3.3	モード 2 以降の判断モデル	41

4.4	動作モデルの同定	44
4.4.1	予測車体角度	44
4.4.2	制御目標点追従のアルゴリズム	48
4.4.3	構成された新たな操作モデル	49
4.4.4	制御目標点の決定	52
4.5	構成したドライバ旋回操作モデル	54
第5章 自律旋回走行実験		
5.1	自律旋回走行実験方法	55
5.1.1	有効性検証実験	55
5.1.2	汎用性検証実験	55
5.2	自律旋回走行実験結果と考察	57
5.2.1	有効性検証実験結果	57
5.2.2	汎用性検証実験結果	63
第6章 結論		
6.1	本研究のまとめ	70
6.2	今後の課題	71
参考文献		72
謝辞		74

第 1 章

序論

1.1 研究背景

近年, 日本における交通事故件数・死者数は 1990 年代頃と比べると半減しているが, 依然として高い水準を示している. 平成 27 年には, 平成 12 年から減少傾向にあった交通事故死者数が 15 年ぶりに増加に転じる結果となった(Fig.1.1)^[1]. 交通事故防止や交通安全に関する様々な取り組みは, 法律の改正や取締り強化など行政的な観点だけではなく, 自動車メーカーがエアバッグなどを装備することで自動車そのものの安全性を高めるなど, 多方面から様々な取り組みが行われてきた. しかし, 現在年間約 54 万件の交通事故が発生しており, 年間約 67 万人の方々が負傷している. その中で年間 4000 人以上の方が交通事故で命を落としており, 交通事故は 21 世紀になった現在でも大きな社会問題であるといえる^{[2][3]}.

このような交通事故の原因の大半は, 人間のヒューマンエラーにより引き起こされるものである^{[4]-[6]}. 人間の注意力の欠如を補い, 未然に事故を防ぐ運転支援システムの研究開発は世界中で行われ, その運転支援システムの一部はすでに実用化され市販されている自動車に搭載されているものも存在する^{[7]-[18]}. さらに運転支援システムは高度化をめざし研究が進められている. 2016 年 5 月に三重県志摩市で開催された伊勢志摩サミットでは, トヨタ自動車一般道での自動運転走行を目指し開発中の Urban Teammate を搭載した新型の自動運転実験車(Fig.1.2)を提供した^[19]. この Urban Teammate は, 高速道路上で自動運転が可能な Highway Teammate に続く第 2 弾で, 歩行者, 二輪車, 障害物を検出だけではなく, 信号機認識や道路規則情報に従い走行することを可能とする予定である. また, 日産自動車は高速道路の単一車線上で実質的に自動運転可能な運転支援システム, 「プロパイロット」を搭載したミニバン, 「セレナ」(Fig.1.3)の販売を開始した. このような自動車メーカーの取り組みはこの 2 社だけに限らず, 世界各国の自動車メーカーで現在盛んに行われている.

近年, 上記のような様々な自動走行や自動車自身が考えて適切な支援が可能となるような, 高度な運転支援を行う先進運転支援システム, ADAS (Advanced Driving Assist System) が注目されている^{[20]-[22]}. ADAS とは, 自動車自身がカメラやレーダーによって危険を察知して行動し, 事故防止や事故の被害軽減を目的として, ドライバに適切な支援を与えることを可能とする, 従来の運転支援システムより安全性と利便性を向上させた高度な運転支援システムである. ADAS 開発の際には, コンピュータ上でシミュレーションを行ってシステムの有効性を検証した後に, 実際に実験車に搭載してテストコース等で製品化に向けて試験を行う. 実車に搭載する前に行われるシミュレーションは, コンピュータ上のみで行われるため人間が介入する余地がなく, ドライバを数値モデル化したドライバ運転行動モデルを実装した走行シミュレーションが行われるのみである. より高度な運転支援を目指す ADAS の設計するためにはより高度なシミュレーション結果が必要であり, そのためにはより精度の高いドライバモデルが必要となる. そのためには, 実車実装前のシミュレーションで用いられるドライバ運転行動モデルはより人間の運転行動の再現性の高いドライバ運転行動モデルが必要であるといえる. ADAS の制御システム構成は, ローカライザー, マッパー, プランナー, コントローラ部分に分けられる. この中でコントローラ部分となる車両運動制御システムの車両運動に密接に関わる部分である. 本研究ではこの車両運動制御システムに実装されているドライバ運転行動モデルに注目する.

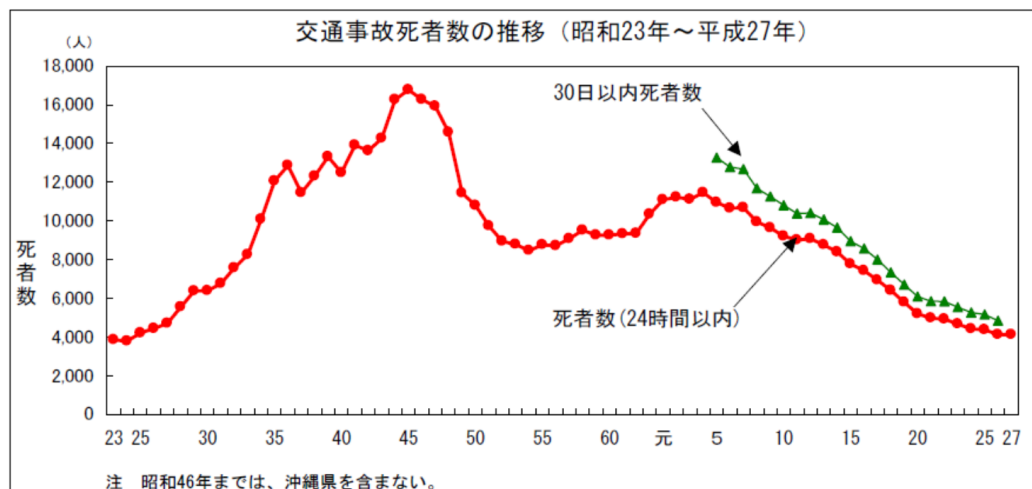


Fig 1.1 交通事故死者数の推移(2016 年)

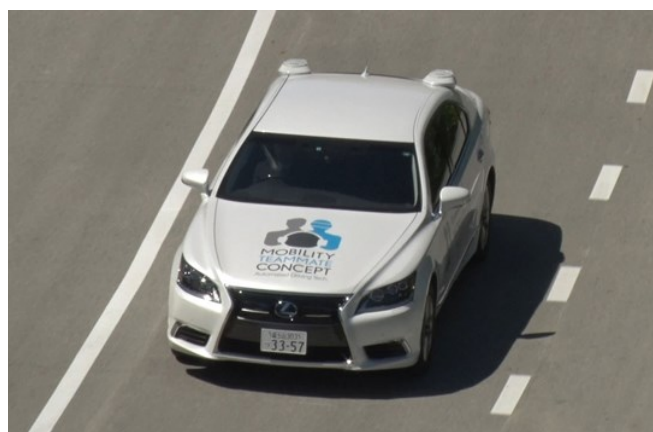


Fig 1.2 Urban Teammate(2016)



Fig 1.3 日産セレナ Pro Pilot(2016)

1.2 本研究の目的

前節で述べたように、自動運転や高度な運転支援を行うにはより人間の運転を的確に再現したドライバ運転行動モデルが必要である。現在、ADAS 開発のシミュレーションに使用されているドライバ行動モデルは人間の運転の再現性が低く、有効なものが存在しない。本研究室では、ハイブリッドシステム概念に基づく人間行動モデルの同定手法を用い、ドライバの様々な運転行動のモデル化についての研究を行ってきた^[12]。これらのドライバ運転行動モデルは無論 ADAS の開発シミュレーションにも使用できる。本研究室では、これまでにドライバの停止線への停止行動を対象としてモデル構築を行った。この研究では、ドライバのブレーキ操作をハイブリッドシステム概念に基づく人間行動モデルの同定手法を用い、直線コースにおける減速行動のモデルを同定した。そして、この同定したハイブリッドシステム表現に基づくドライバ減速行動モデルを実験車の車両運動制御システムに実装し、ドライバのペダル操作だけではなく、乗り心地の面に関して有効性は評価・検証を行い、操作性と乗り心地の両方でドライバと類似した運転を再現できることを確認してきた。

これまで、本研究室では直線道路における加速行動や減速行動のモデル同定に取り組んで、ドライバの運転行動の再現に成功してきた。しかしながら、重要な運転行動の一つである旋回行動については未だに有効なモデル構築が行えていないことが現状であった^[23]。そこで、先行研究ではドライバが旋回時に使用していると考えられる外部環境情報を視線計測によって明らかにし、その情報に基づいたドライバ旋回行動モデルを構築した^[24]。しかし、先行研究では視線変化やステイリング操作の変化を考慮して5つにモデルを分けて同定を行った結果、人間が本来目標にしている対象物とモデルが目標としている対象物が異なり、目標の数も人間が使用している数より多くなった。また、実験結果を考察しても人間の旋回軌跡とステアリング操作の類似性・再現性についてはまだ改善の余地が見られた。こうしたことから本研究ではさらにドライバの操作の再現性を向上させるため、人間が目標としている対象を再検討してモデルの目標数を人間と同等にする。そして、人間が旋回時に行っているアルゴリズムを正確に再現し、交差点の形状や大きさに問わず旋回可能な汎用性の高いドライバ旋回行動モデルの構築を目的としている。そのため、従来研究では人間の運転行動はフィードフォワード制御に基づき行われていると考えられてきたが、本研究ではフィードバック形式のPI制御のモデル形式を採用し、軌道追従性と汎用性の向上を目指す。そして、ドライビングシミュレータの車両運動制御システムに同定した新たなドライバ旋回行動モデルを実装し、本提案モデルの有効性と汎用性について検証を行う。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す．まず，第 2 章では本研究で使用する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．第 3 章では，本研究室で開発したドライビングシミュレータの構成と実験環境について説明する．第 4 章では，旋回行動を対象とし，収集した運転情報から旋回モデルの環境変数を選定してモデル同定を行う．第 5 章では，同定したドライバ旋回操作モデルで自律走行実験を行い，その結果から提案モデルの有効性と汎用性を検証する．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

人間の運転特性に基づく車両運動制御システム

本章では、ハイブリッドシステムに基づく人間行動モデルと自律走行車の車両運動制御システムとについて説明を行う。

2.1 ハイブリッドシステムに基づく人間行動モデル

人間が何らかの運転タスクを達成しようとする際に、五感を駆使して得られた情報や運転経験など様々な要因の元に複数の判断や動作を決定していると考えられる。そして、人間はこれらの連続的な動作と離散的な判断を組み合わせることに、多くの複雑な運転タスクを達成している。本研究室では、この人間の複雑な運転行動をハイブリッドシステムに基づいて、人間の行動を離散的な判断と連続的な動作に分けて同定する手法^[13]を用いて表現する。これは人間の運転行動を Fig.2.1 に示すようなモデル構造にて表現することを意味する。つまり、人間は外界から知覚した成功を使用して、様々な条件ごとにステアリング操作、或いはペダル操作を切替えながらあるダイナミクスに基づいて身体を動かすことでタスクを行っていると考えられる。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)と呼ぶこととし、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。

本論文では、文献[24]で明らかとなった交差点旋回時にドライバ使用していると考えられる外部環境情報と視線の切り替わるタイミングに基づく同定手法により、動作モデルと判断モデルの構築を行った。

本研究では以下の手順により人間の運転行動モデルを構築する。

1. 収集した運転情報と視覚情報からドライバの運転動作モード数を決定し、各動作モードに分割する
2. 分割された各動作モードを区分アフィン（Piece-Wise Affine : PWA）モデルとして同定する（動作モデル）
3. 各動作モデル間の遷移条件を SVM(Support Vector Machine)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。動作モードを求める手法として文献[25]提案では、人間のステアリング操作は前半クロソイド区間、ステアリング一定角区間、後半クロソイド区間と3つのモードに分けて表現する手法を提案した^[25]。さらに、前年度の先行研究では、ドライバの視線が変化すると同時にステアリング操作の角速度が変化することが明らかとなった。本論文では文献[25]で提案する3つのモードに分ける手法と文献[24]提案の視線変化とステアリング操作の変化の関係性を踏襲した手法を用いて、ドライバのステアリング操作の動作数の決定する。本手法を用いることによって人間のステアリング操作の動作数をより高精度に決定することが可能になると考えられる。

判断モデルの構築には、運転方法収集実験によって得られたドライバの運転情報を正規化して SVM(Support Vector Machine)を使用し、動作モード間を適切に分割して切替条件を決定する。

本研究では数ある運転行動の中の交差点右折時における旋回行動に着目している。本提案モデルは他の運転行動と共に自律走行制御システムに実装することを想定し、モデルを単純化する必要がある。そのため、動作モデルの構築には、通常のダイナミクスのシステム同定手法を各モードに適用するのではなく、本研究では区分アフィン(Piece-Wise Affice : PWA)モデルを用いる。

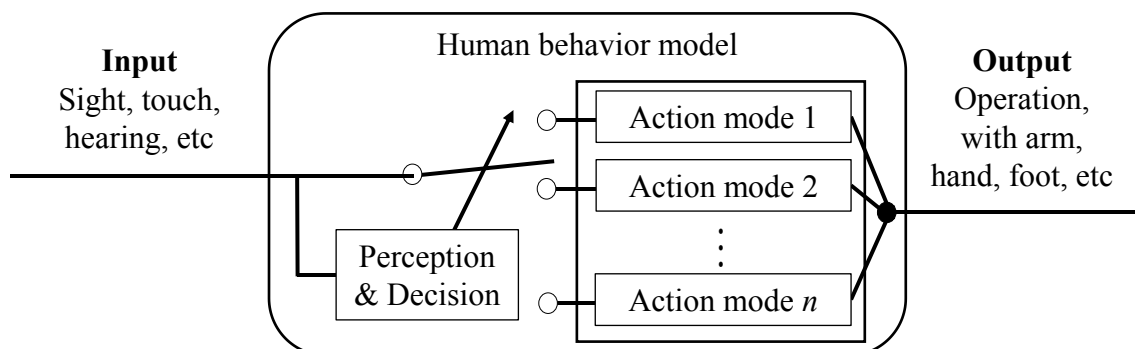


Fig 2.1 ハイブリッドシステム表現に基づいた人間行動モデル

2.2 運転行動モデルと車両運動制御システム

本研究室での自律走行車の車両運動制御システムは Fig.2.2 に示す．経路計画を行う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替器と，いくつかの運転制御器により構成されているハイブリッド制御系構造を採用している．現在，数多くの自律走行車やドライバ運転行動モデルに関する研究が行われているが，人間のステアリング操作などの運転特性を再現し，人間の運転のように振舞う車両運動制御システムの設計は行われていない．そこで，本研究室では人間の運転特性を再現可能な車両運転制御システムとして，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研究を行ってきた．

本研究室で採用している車両運動制御システムは，Fig.2.1 の人間の運転行動モデルの構造に合わせて設計されているため，モデル構造が類似している．故に，同定した人間の運転行動モデルを車両運動制御システムにそのまま実装することが可能である．

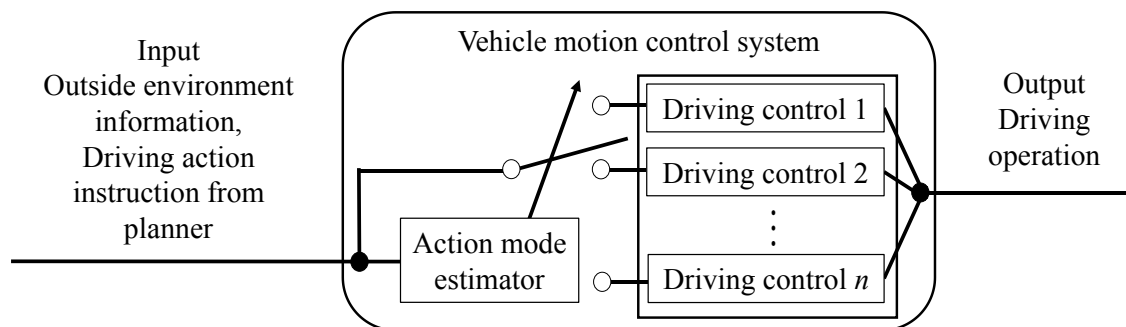


Fig 2.2 車両運動制御システム

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、2.2 節では自律走行車の車両運動制御システムについて説明をしてきた。これらを比較したのを Fig.2.3 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。

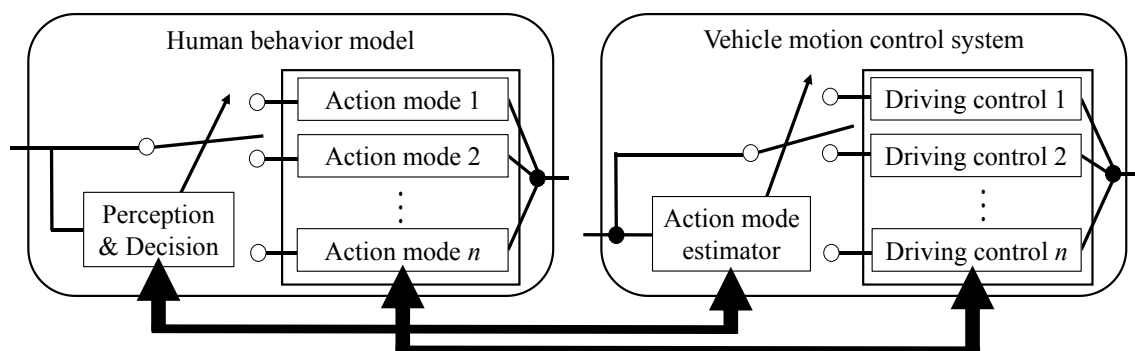


Fig 2.3 ハイブリッドシステムに基づいた人間行動モデル

第 3 章

実験装置と実験環境

本章では, 本研究室で開発した運転情報の収集が可能な三面型ドライビングシミュレーター (以下, DS と略す) について述べる. 3.1 節では, DS の構成について説明する. 3.2 節では, DS で使用している PC とその役割について説明する. 3.3 節では, 本研究で使用了実験環境について説明する.

3.1 ドライビングシミュレータを構成する装置

本研究で使用する DS の構成図を Fig.3.1 に, ドライビングシミュレータを構成する機材とその用途を Table3.1 に, DS の外観を Fig.3.2, 実験の様子を Fig.3.3 に示す. 本研究で使用する DS の構成機器は, 4 台の PC, ステアリングホイール, アクセルペダル, ブレーキペダル, スクリーン 3 枚, プロジェクタ 3 台, ミラー用と速度計用の小型の液晶モニタ 4 台, エンジン音出力用スピーカーである. DS 上部に設置されたプロジェクタから 3 枚のスクリーンへ三面化された DS の走行環境が映し出され, 交差点旋回で重要な車両の横方向の景色も再現可能となっており, 自動車の実際に運転しているかのような直接視界をドライバに与えて DS への没入感を増大させている. ドライビングシミュレータには実際の自動車の内装部品を使用して実車の寸法に合わせ設計されており, シート着座時の視界やシートポジションなど運転環境を実車に近づけている. また, 小型液晶モニタによりドアミラーやルームミラー再現しており, 運転時に実際に見ている間接視界をドライバは見る事が可能である. シートポジションはドライバが自由に設定・変更が可能であり, ドライバの体型に合わせて調整が可能となっている. また, ステアリングホイールは大径の製品を使用しており, 実物のステアリングホイールのような大きさで実際の操作感で普段自動車を運転できるように設計されている. また, スピーカーはドライバの運転の支障にならないよう運転席後方に設置されエンジン音が流れる. このように, 本研究で用いる DS は実際の自動車と同等の運転環境となるよう考慮され設計されているので, より正確な運転情報が収集が可能である.

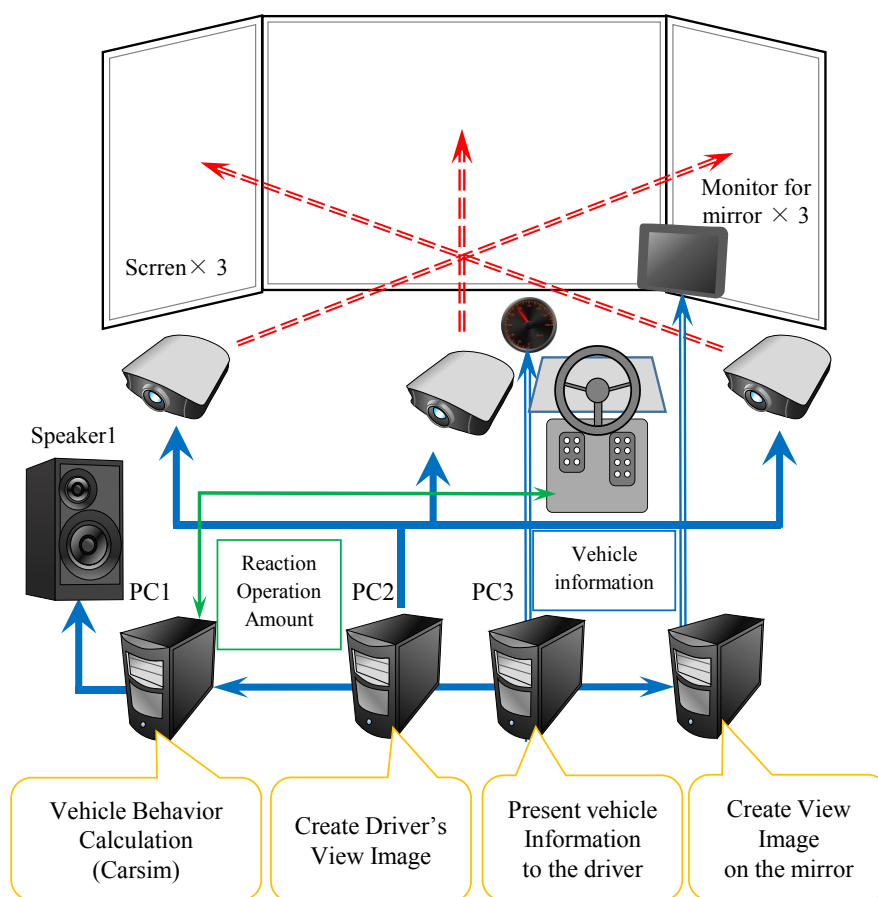


Fig 3.1 ドライビングシミュレータの構成図

Table 3.1 ドライビングシミュレータの構成

Equipment	Amount	Use
PC	4	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	4	Display back side view images
Memolink	4	Connect each PC
Image distributor	2	Distribute images for screens and small monitors
Speaker	1	Engine Sound



Fig 3.2 DS の外観

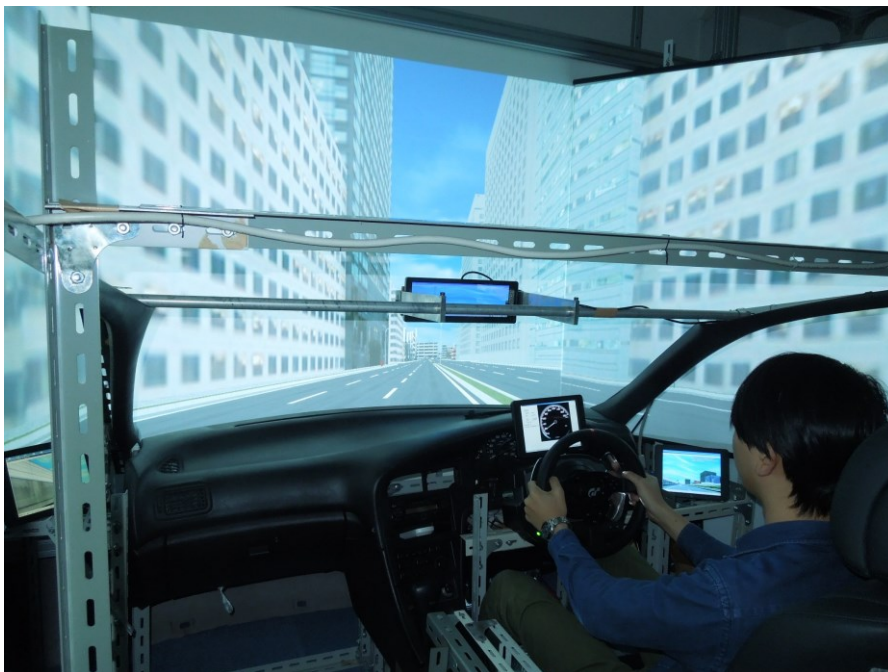


Fig 3.3 実験風景

3.2 パソコンの役割

本ドライビングシミュレータにはパソコン（以下、PC と呼ぶ）を 4 台使用している。本項では各 PC の役割の説明をする。また、各 PC のスペック表を Table 3.2 に示す。

3.2.1 制御用コンピュータ（PC1）

PC1 には USB ポートを介してステアリングコントローラが接続されている。ステアリングコントローラにはアクセルとブレーキのペダルも付属しており、ドライバの運転情報がこのコントローラで収集される。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++ を使用している。CarSim は自動車のダイナミクスを計算するために使用する。本研究室では CarSim の ver. 5.15 を用いている。CarSim はドライバのステアリング操作やアクセルワーク、ブレーキ操作など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う。制御周期は 16ms である。そして、出力として車両として車両の速度やエンジンの回転数、車両の挙動などを計算する。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仕様となっている。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の受け取りができないため、統合管理ソフトを用いることで受け取りを可能にして制御することを可能にしている。

統合管理ソフトは主にステアリングやアクセル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 に与える。また、CarSim から車両のダイナミクスについての状態情報を受け取り、その状況に応じたステアリング操作量を統合管理ソフトの車両運動制御システム上で計算して出力することが可能である。このソフトは C++Builder を用いて作成されている。また、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 で計算されたエンジンの回転数に応じて統合制御プログラムが DirectX library を用いて音を作成し、スピーカーより出力する。

3.2.2 スクリーン投影用コンピュータ（PC2）

PC2 は運転席からの前方の景色と左右の景色を表示するために用いている。市街地や高速道路などのさまざまな運転環境が用意されてるが、本研究では交差点旋回に焦点を当てているため市街地の実験環境を用いた。走行映像はメモリンクを介して PC1 から受信した現時刻の自車情報により、リアルタイムでドライバに表示される。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、それぞれプロジェク

ターからスクリーンへ投影されることにより、運転席から見える前方と左右の視界を再現している。

3.2.3 ミラー用コンピュータ (PC3)

PC3 はルームミラーとドアミラーの映像を表示するために用いている。走行映像はメモリンクを介して PC1 から受信した現時刻の自車情報により、リアルタイムでドライバに表示される。これらのモニタによって後方視界や側方視界の把握ができる。これらは実車の雰囲気再現するだけではなく、ドライバが自車の正確な走行位置を把握することに寄与している。

3.2.4 情報提示用コンピュータ (PC4)

PC4 は PC1 より送られてくる自車速度やエンジン回転数など情報をドライバに提示する。DS では速度感が実車と異なるため、補助的な役割を担っている。

3.2.5 各 PC の接続

ドライバの運転操作と走行画面の表示状態にずれが生じないよう 4 台の PC はそれぞれ Interface 社の 3m 版メモリンクを用いて接続されており、PC 間での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スレーブと終端スレーブに書き込まれる仕組みとなっている。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 と PC4 に増設スレーブ (PCI-4919) を使用している。PC1 より送られた車両の運動情報を基に、リアルタイムで現在の自車の運転席から見える前方の走行画面を PC2 で表示し、サイドミラーとルームミラーの映像を PC3 で表示する。PC4 では PC1 から送られてくる自車情報から速度などの情報をドライバに提示する。

PC2 と PC3 は映像分配器を用いて複数のスクリーン、または、小型液晶モニターへ走行風景を表示できるようにしている。PC4 は PC1 から送られてきた速度などの情報を小型液晶モニターに表示できるようにしている。

Table 3.2 DSを構成する各PCのスペック

	For control (PC1)	For projection (PC2)
OS	Windows XP Home Edition	Windows XP Professional
CPU	Intel Core 2 Duo 3.16 GHz	Intel Core 2 Quad 2.40 GHz
Memory	3.3 GB RAM	2.98 GB RAM
Graphic board	NVIDIA GeForce 9500 GT	NVIDIA Quadro FX 5500
Configuration software	Carsim (Ver. 5.15) C++ Builder Direct X library	Visual C++ DirectX library
Display device	Standard monitor	X4240N×3
Connected device	T500RS GT RACING WHEEL Speaker	—

Table 3.3 DSを構成する各PCのスペック

	For side mirrors (PC3)	For speedmeter (PC4)
OS	Windows XP Professional	Windows XP Professional
CPU	Intel Pentium D 3.40 GHz	Intel Core 2 Duo 2.80 GHz
Memory	3.20 GB RAM	2.00 GB RAM
Graphic board	NVIDIA GeForce 9800 GT	NVIDIA GeForce 8400 GS
Configuration software	Visual C++ Direct X library	Visual C++ Visual C## Direct X library
Display device	8.0 inches LCD monitor×2 10.2 inches LCD monitor	8.0 inches LCD monitor
Connected device	—	—

3.3 実験環境

本研究では，DS を用いてドライバ旋回操作モデル構築から有効性検証のための自律旋回走行実験を行う．その際，用途別に複数の実験環境を使用する．本節では，その実験環境についてそれぞれ説明していく．

3.3.1 市街地コース 1

本研究では，モデル検証と運転情報収集実験のために DS 上の市街地を模擬したコースに実験を行った．旋回操作モデル構築用の運転情報収集実験とモデル構築後の自律旋回走行実験のために使用する実験環境(以下，市街地コース 1)の模式図を Fig.3.4 に，上空からの映像例を Fig.3.5 に，運転席から見える交差点の映像例を Fig.3.6 から 3.10 に示す．市街地コース 1 は Fig.3.4 に示すように 2 本の片側 3 車線の直線道路が交わる交差点で，スタート側の道路の全長は約 400m，ゴール側の道路の全長は約 200m である．ドライバは旋回前の直線道路の追い越し車線の位置からスタートし，交差点進入して右折動作を行い，指定した車線に進入する．そして，交差点を旋回し終わったら，旋回後の進入した車線において，コースの終点まで加速し，一定速で走行した後に減速して停止する．天候は晴れた状態であり，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，このコース 1 の環境内を走行している自動車はドライバが運転する自車のみであるため，対向車などの周囲の自動車は存在せず，歩行者や自転車なども一切存在しない環境となっている．

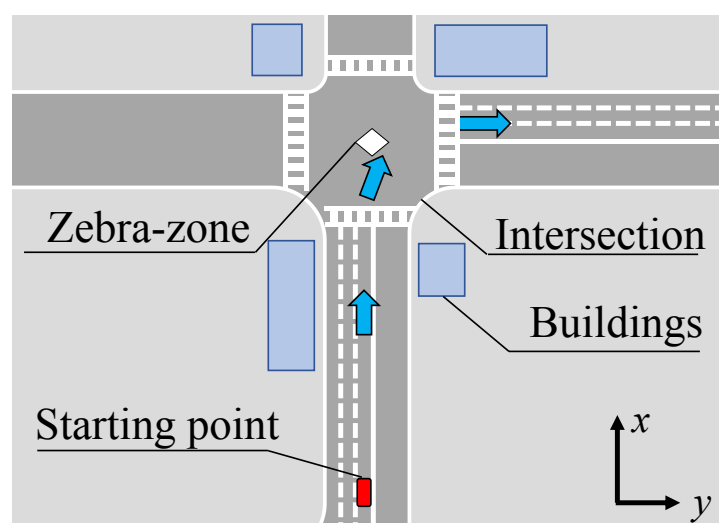


Fig 3.4 市街地コース 1 模式図



Fig 3.5 市街地コース 1 の上空からの映像例



Fig 3.6 市街地コース 1 の映像例(スタート時)



Fig 3.7 市街地コース 1 の映像例(交差点直前)



Fig 3.8 市街地コース 1 の映像例(ゼブラゾーン)



Fig 3.9 市街地コース 1 の映像例(旋回中)



Fig 3.10 市街地コース 1 の映像例(旋回終了時)

3.3.2 市街地コース 2

本研究では、提案モデルがモデル同定を行った交差点以外でも旋回が可能であるか、汎用性検証を行うため様々な実験環境を用意した。本節で説明する市街地コース 2 は市街地コース 1 と同様の交差点を使用するが、進入する車線が市街地コース 1 とは異なる。コース 1 と同様、2 本の片側 3 車線の直線道路が交わる交差点で、道路延長も同じであるが、コース 2 では右折する道路の対向車線に進入する。コース 2 の模式図を Fig.3.11 に、運転席から見える交差点の映像例を Fig.3.12 から 3.13 に示す（上空からの映像例や運転席からの映像例はコース 1 と重複する部分があるため、一部省略する）。天候や路面摩擦係数、他車や方向者が存在しない点はコース 1 と同様である。

この市街地コース 2 はコース 1 と同様の交差点を使用しているが、片側 3 車線道路の反対車線であるため、交差点の X 方向の大きさは 10m ほどコース 1 より短くなるためコース 1 とは別形状であるものとして扱える。また反対車線に進入することは道路交通法違反であるが、DS 上であるという特異な環境を使用しているため、交通事故などの危険性は考えられない。ただし、実験を行う際は普段自動車を運転する際と同様に速度などの交通法規は遵守して実験を行っている。

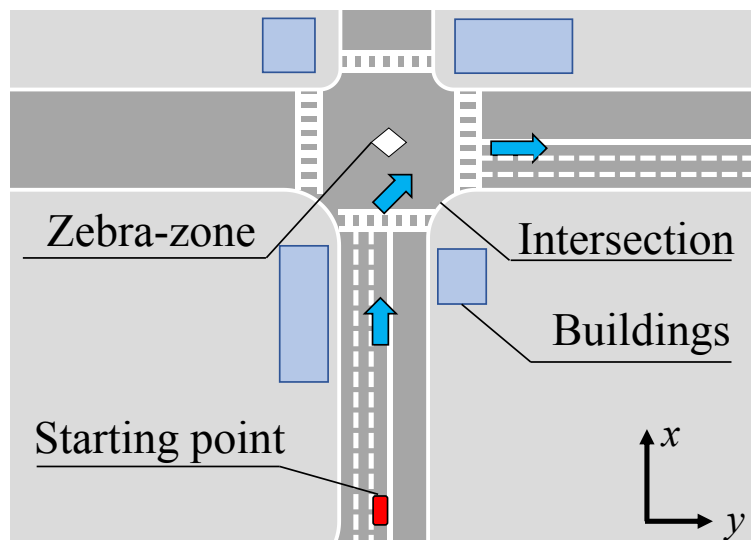


Fig 3.11 市街地コース 2 模式図



Fig 3.12 市街地コース 2 の映像例(旋回中)



Fig 3.13 市街地コース 2 の映像例(旋回終了時)

第 4 章

ドライバ旋回操作モデルの構築

本章では、第 2 章で示した人間の運転行動モデルを構築する。まず、4.1 節ではドライバ旋回操作モデルを構築するために行ったドライバの運転情報収集実験とその実験結果について述べる。次に 4.2 節では収集した運転情報からドライバが使用していると考えられる外部環境情報を選定し、ドライバの旋回行動モデルのモデルパラメータの決定について述べる。4.3 節では 4.2 節で決定した旋回操作モデルパラメータから判断モデル式の構築を行う。4.4 節では、動作モデルのアルゴリズムと同定についての説明を行う。最後に 4.5 節において判断モデルと動作モデルを組み合わせたドライバ旋回操作モデルについて説明する。

4.1 運転情報収集実験

4.1.1 実験方法

ドライバの運転情報を収集するため、第 3 章で説明した DS を用いてドライバの旋回操作に関する運転情報収集実験を行った。本節では実験の方法について述べる。本研究では、3.3 節で説明した実験環境を用いてコンピュータ上のみで実験を行った。ドライバ旋回操作モデル同定のための運転情報集実験は、市街地コース 1 のみを使用し、ドライバが交差点を右に旋回する時の運転情報の収集を行った。市街地コース 1 には、実験者以外に他車や歩行者は存在しない。被験者はスタート地点から発進し、交差点の手前で適切な速度に減速する。この際の速度指定はなく、被験者が道路交通法で定められた範囲内で任意で決定してできる。そして、交差点を右折・旋回を行う。ドライバには普段通りに運転を心がけるように指示してあり、安全な旋回を行ってもらう。また、右折時のドライバ旋回行動モデル同定のため、3 パターンの旋回方法を用意した。旋回パタ

ーンは Fig.4.1 に示す．1 つ目は交差点に進入したのち第 1 走行車線に進入するパターン．2 つ目は同様に旋回したのち第 2 車線に進入するのパターン．3 つ目は交差点に進入したのち第 3 車線に進入するパターンである．走行回数は各パターン 10 本で，被験者は 1 名で実験を行った．

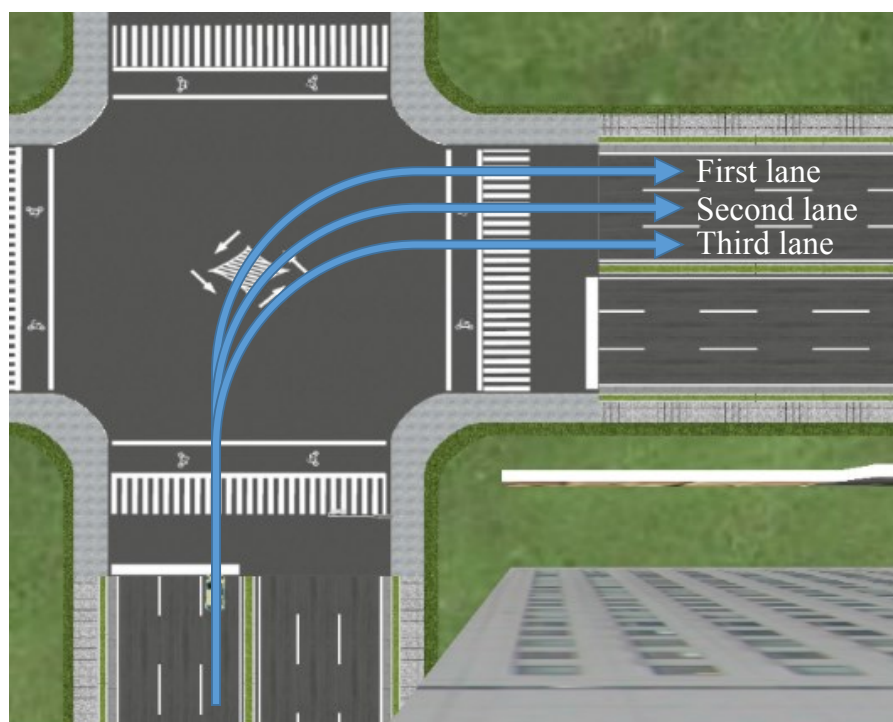


Fig 4.1 運転情報収集実験旋回パターン

4.1.2 運転情報収集実験結果

前節の手順で行った運転情報収集実験の各旋回パターンの結果例を Fig.4.2 から Fig.4.10 に示す. Fig.4.2, Fig.4.5, Fig.4.8 の横軸は時間[s]を表し, 縦軸は上から順に, 車両の速度[km/h], ペダル操作[-], ステアリング角度[deg]を示している. ペダル操作はアクセルを踏んでいる状態がプラス, ブレーキを踏んでいる状態がマイナスの値が出力される. また, Fig.4.3, Fig.4.6, Fig.4.9 の横軸は時間[s]を表し, 縦軸は上から順に, 車体角度[deg], 車体角速度[deg/s], 車体角加速度[deg/s²]を示している. また Fig.4.4, Fig.4.7, Fig.4.10 の横軸は相対座標における Y 方向変位[m], 縦軸は相対座標における X 方向変位[m]を示す.

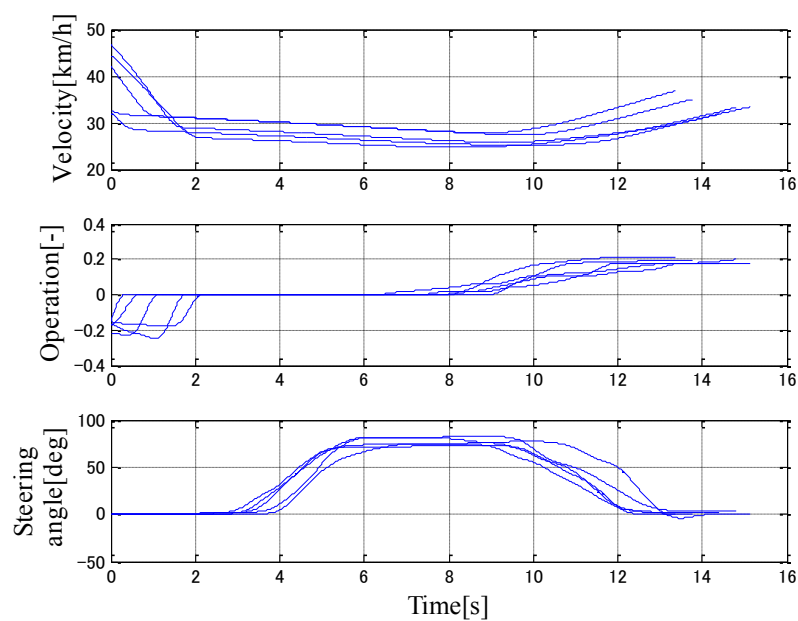


Fig.4.2 運転情報収集実験結果(自車速度・ペダル操作・ステアリング操作, 第1走行車線)

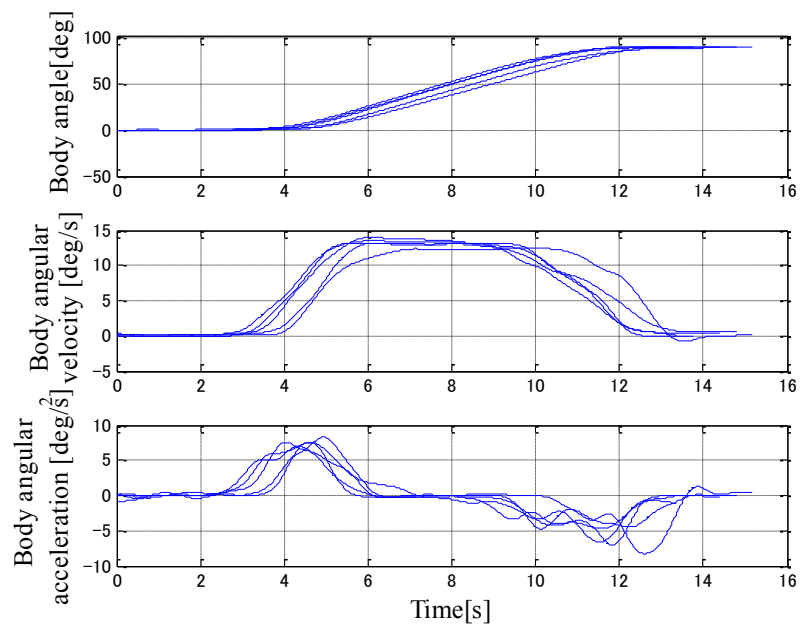


Fig 4.3 運転情報収集実験結果(車体角度・角速度・角加速度, 第1走行車線)

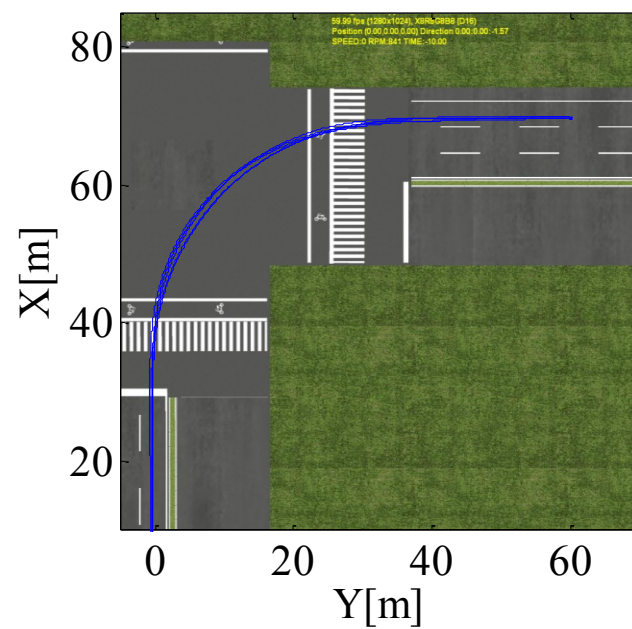


Fig 4.4 運転情報収集実験結果(旋回走行軌跡, 第1走行車線)

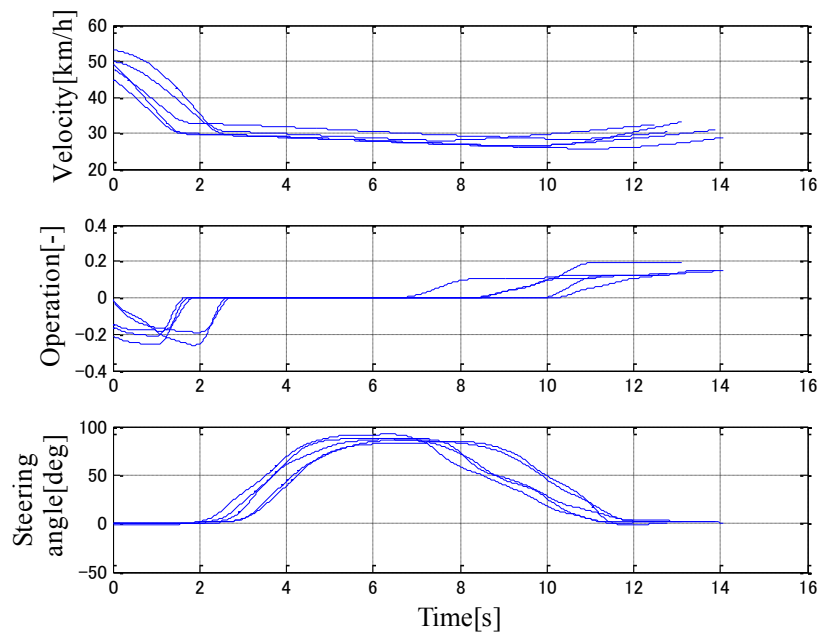


Fig 4.5 運転情報収集実験結果(自車速度・ペダル操作・ステアリング操作, 第2走行車線)

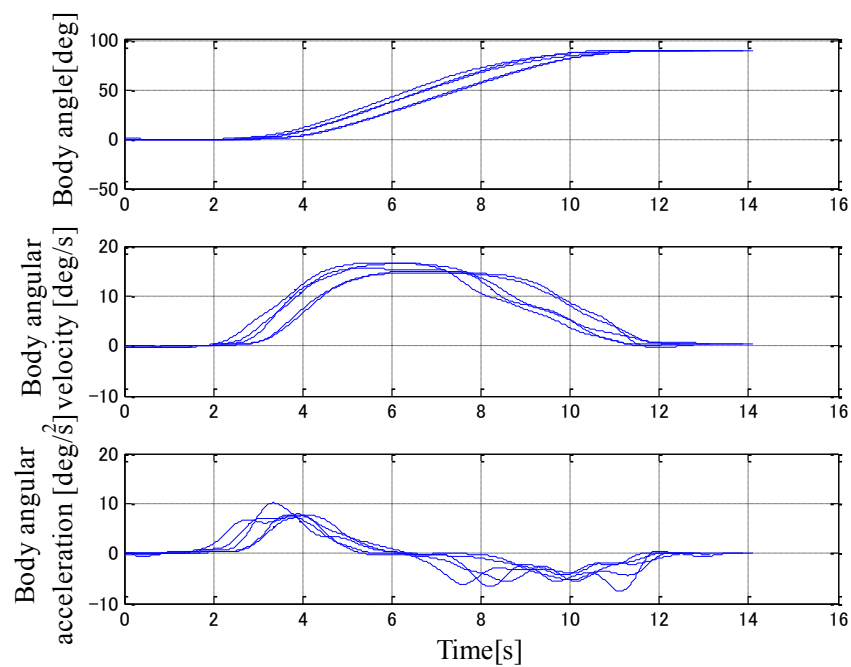


Fig 4.6 運転情報収集実験結果(車体角度・角速度・角加速度, 第2走行車線)

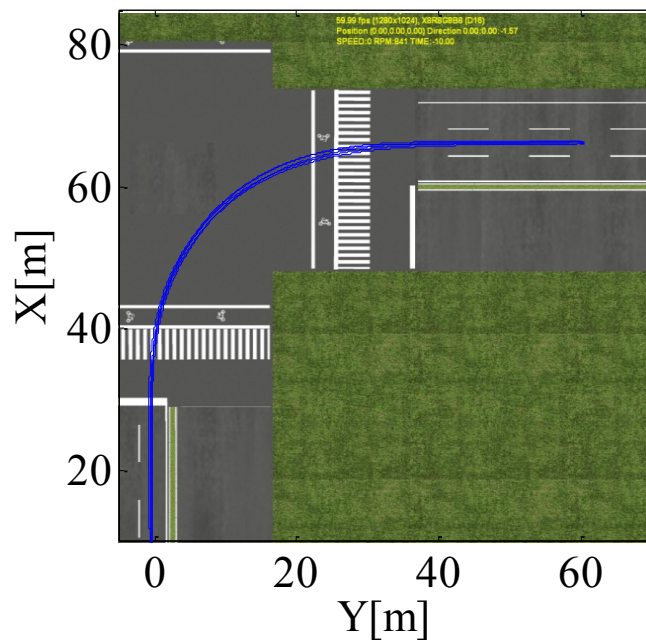


Fig 4.7 運転情報収集実験結果(旋回走行軌跡, 第2 走行車線)

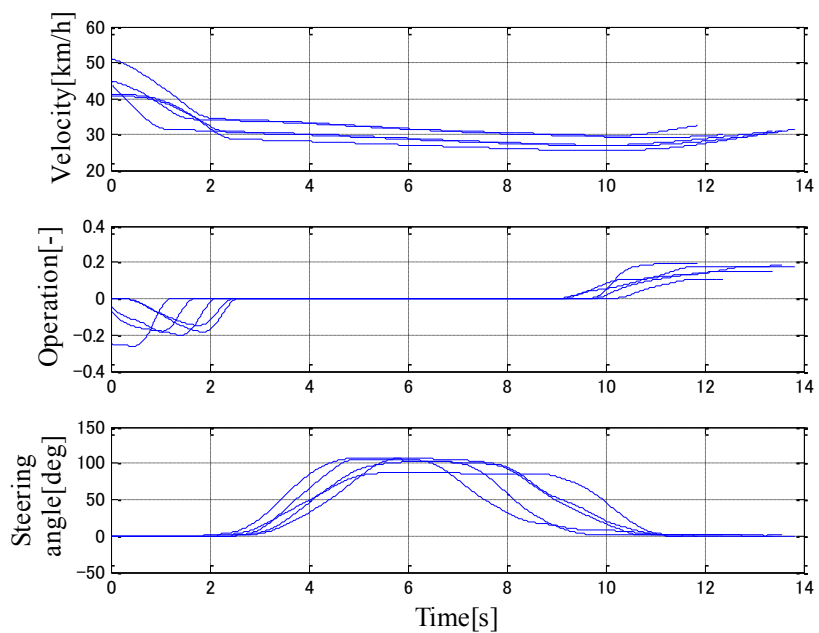


Fig 4.8 運転情報収集実験結果(自車速度・ペダル操作・ステアリング操作, 第3 走行車線)

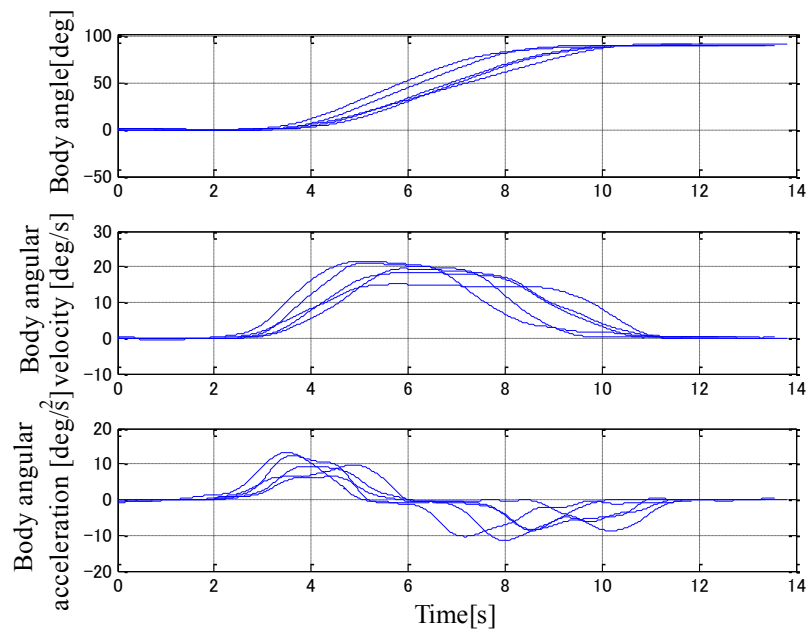


Fig 4.9 運転情報収集実験結果(車体角度・角速度・角加速度, 第3走行車線)

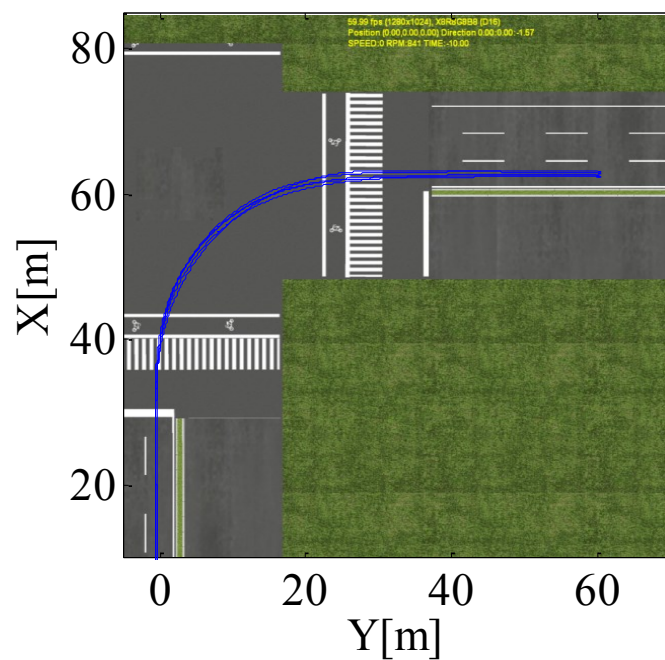


Fig 4.10 運転情報収集実験結果(旋回走行軌跡, 第3走行車線)

4.2 ドライバ旋回操作モデルのモード数

4.2.1 ドライバ旋回操作モデルのモード数決定

本節では、ハイブリッドシステム表現でモデル構築を行う際に考えなければならない、ドライバ旋回操作モデルのモード数についての考察を行う。まず、本研究の従来研究では、ドライバの旋回操作は3つのモードに分けることができると考えてきた^[25]。人間の旋回操作を Fig.4.11 に示す。Fig.4.11 は横軸が時間、縦軸がステアリング操作角となっている。ドライバはまず旋回の前半は一定の角速度でステアリングを切り込むことにより、旋回を開始していく。その際の自動車の奇跡はクロソイド軌跡をしていることから、文献[25]ではこの区間を前半クロソイド区間と定義した。そして、旋回の中盤ではステアリングの角度を最大角の状態に保った状態で、定常円を描いて自動車は旋回していく。この区間をステアリング一定角区間とする。そして、最後にドライバはステアリングを一定角速度で真っ直ぐな状態に戻していき、旋回操作を終了して道路上の白線に従って直線的な走行を行う。この区間を後半クロソイド区間とする。このように本研究室では、ドライバの旋回操作は前半クロソイド区間、ステアリング一定角区間、後半クロソイド区間の3つに分けることができると考えてきた。文献[25]提案のステアリング操作と旋回軌跡の関係は Fig.4.12 に示す関係となっている。なお、Fig.4.11 では前半クロソイド区間が青色、ステアリング一定角区間が赤色、後半クロソイド区間が緑色となっている。

しかし、文献[24]の研究ではドライバの視線が変化するタイミングでステアリング操作にも変化があることが確認された。文献[24]の研究では視線計測装置を使用して旋回時のドライバの視線の変化を計測した^[24]。その視線情報収集実験結果からドライバの視線は旋回直前から旋回序盤は交差点中心の道路表記（交差点中心の描かれているゼブラ模様の導流体、以下ゼブラゾーンとする）を見ながら、ステアリングを切り込むための情報を得ていることが分かった。そして自車が交差点に進入した直後から、ドライバは視線を交差点にあったゼブラゾーンから旋回後に進入する車線に移し、目標が切替わったタイミングでステアリング操作を変化させていることが確認できた。そして、旋回終了直前には視線を進入した車線の遠方に移しており、旋回動作から実質的にレーンキープの動作に移り変わっていることが分かった。これらの視線変化とステアリング操作の変化の関係を Fig.4.13 に示す。横軸が時間、縦軸がステアリング角、ステアリング操作の各区間の色などは Fig.4.11 と同様である。Fig.4.13 の赤色の区間は旋回開始からドライバの視線が交差点中心のゼブラゾーンから進入する先の車線へ切替わる点までの区間を表している。また、黄色の区間は視線が進入先の車線に切替わった直後から、ドライバの視線が進入する車線から車線の遠方に切替わるまでの区間を表している。最後に、

緑色の区間はドライバの視線が車線遠方に切替わった直後から旋回操作が終了するまでの区間を表している。Fig.4.13 を見ると赤色の区間から黄色の区間に切替わる際に、グラフの傾きが変化しており、黄色から緑色に移り変わるタイミングでも同様に傾きが変化していることが確認できる。これらは、目標が切替わるタイミングでドライバが意図的にステアリングの角速度を調整しているためであり、目標ごとに異なる制御をするためである。したがって、本提案モデルでは文献[25]提案の3モードのモデルに、文献[24]提案の視線変化点でのステアリング操作変化を考慮して5モードのモデル構造を採用する。ドライバのステアリング操作を5モードに分割した図を Fig.4.14 に示す。横軸が時間、縦軸がステアリング角、ステアリング操作の各区間の色などは Fig.4.11, Fig.4.13 と同様である。

以上の実験結果より本提案モデルのモード数は5に決定した。次節では、収集した運転情報を5モードに分割する方法について説明する。

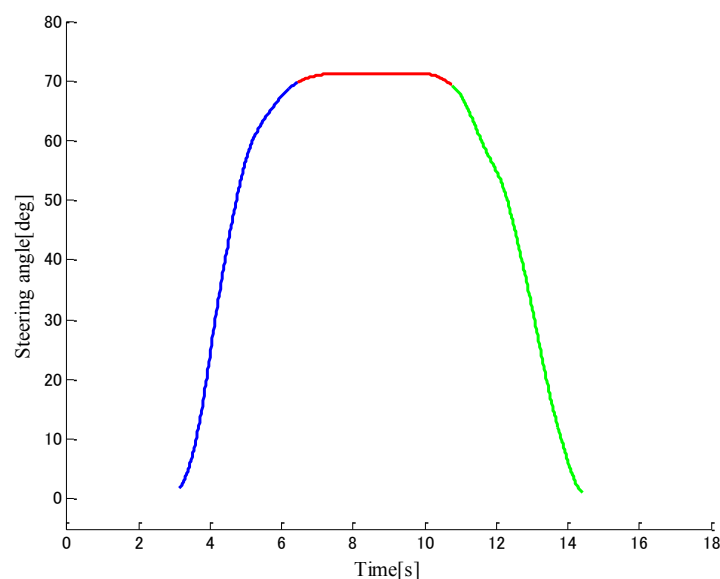


Fig 4.11 旋回時のドライバのステアリング操作

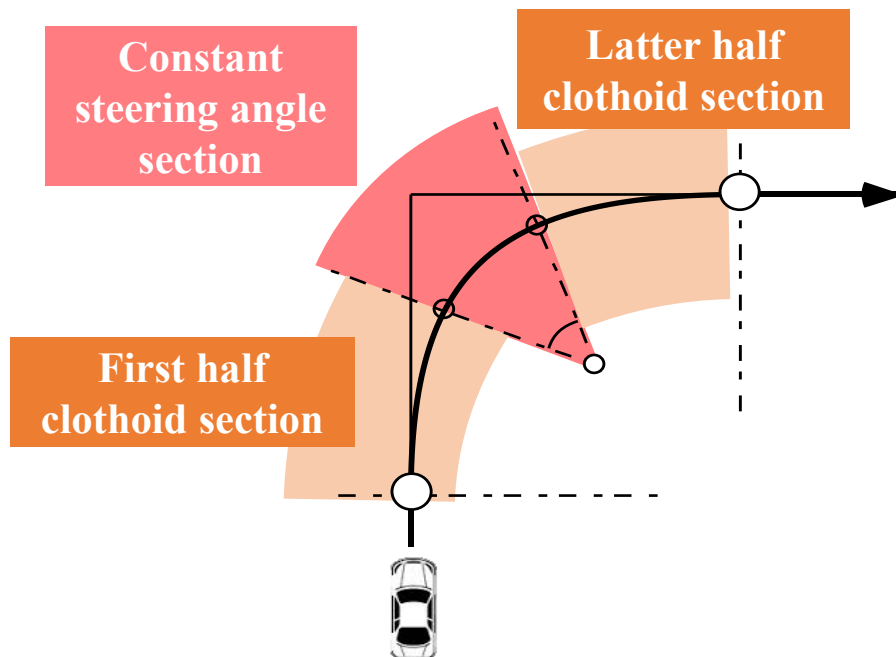


Fig 4.12 ドライバのステアリング操作と旋回走行軌跡の関係

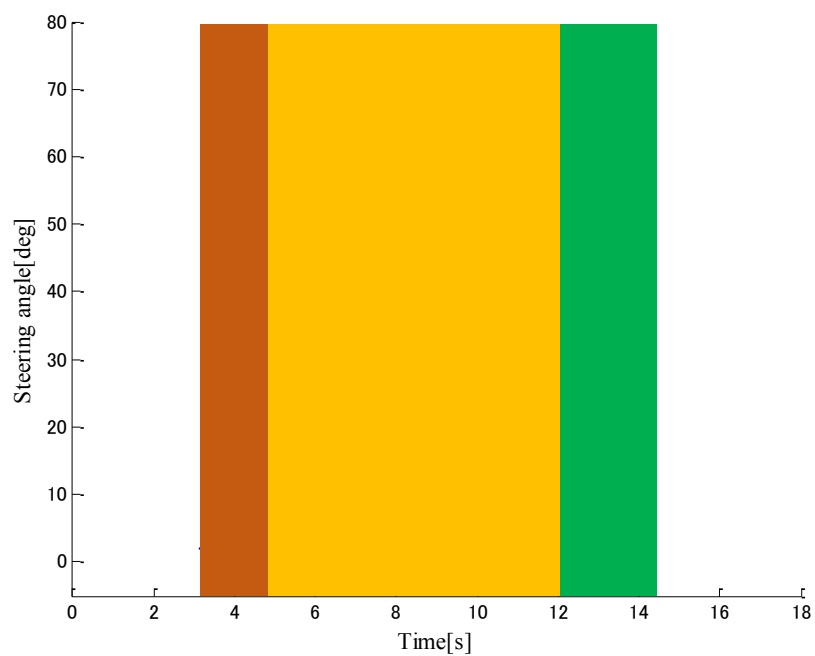


Fig 4.13 ドライバのステアリング操作と視線変化の関係

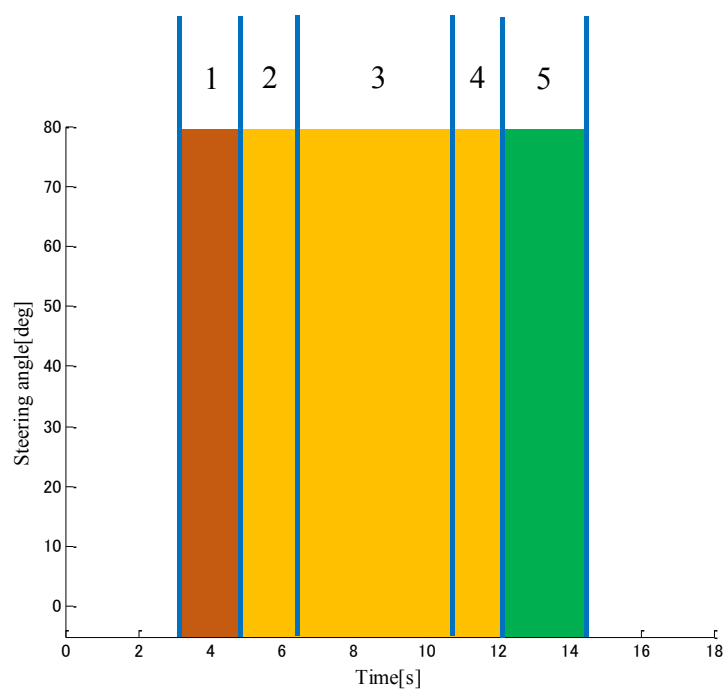


Fig 4.14 ドライバステアリング操作の5モード分割結果

4.2.2 運転情報収集実験のモード分割

前節で本提案モデルのモード数は5に決定した。本節では、モデル構築を行うために収集した運転情報のモード分割について説明する。まず、旋回操作の区間のモデル構築を行うために直線区間のデータと旋回操作区間のデータの分割を行った。本研究での直線区間の定義は、交差点外の領域で行われた操作、かつ、ステアリング操作の角速度が -10deg/s 以上、 10deg/s 以下の範囲であると定義した。そして、項手法により分割された旋回操作区間のデータから、前半クロソイド区間、ステアリング一定角区間、後半クロソイド区間をそれぞれ抽出する。旋回操作区間を3つに分割するため、ステアリングが一定角に保たれている区間を抽出する。ステアリング一定角区間の定義は、交差点内で行われた操作であること、かつ、ステアリング操作の角速度が -10deg/s 以上、 10deg/s 以下の範囲であると定義した。そして、項手法によりステアリング一定角区間を抽出し、その前の区間を前半クロソイド区間、その後の区間を後半クロソイド区間であるとした。

ここまで分割は、文献[25]提案の3モードのモデルである。文献[24]提案の視線変化を考慮した5モードの分割方法は、先ほどのような計算に基づいた分割方法が確立されていないため、視線計測装置から得た視線情報をから視線の変化する点を各データ毎に抽出する。そして、その視線の変化点の前後でデータの分割を行った。

以上の手法により5モードに分割された運転情報を Fig.4.15 から Fig.4.20 に示す。Fig.4.15, Fig.4.17, Fig.4.19 の横軸は時間、縦軸はステアリング角を表しており、Fig.4.16, Fig.4.18, Fig.4.20 の横軸は相対座標における Y 方向変位[m]、縦軸は相対座標における X 方向変位[m]を示す。また、モード1のデータは青色、モード2は緑色、モード3は赤色、モード4がシアン、モード5がマゼンタの配色となっている。

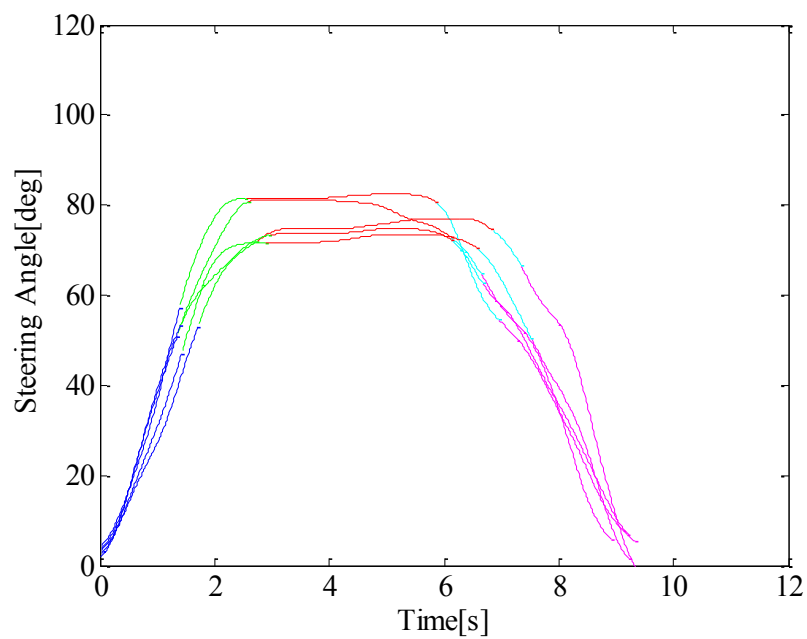


Fig 4.15 5モード分割した運転情報(ステアリング操作, 第1走行車線)

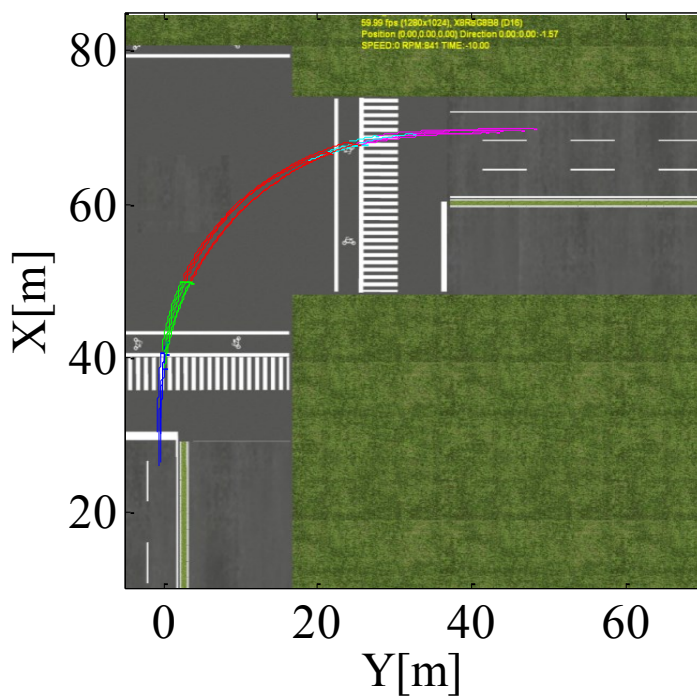


Fig 4.16 5モード分割した運転情報(旋回走行軌跡, 第1走行車線)

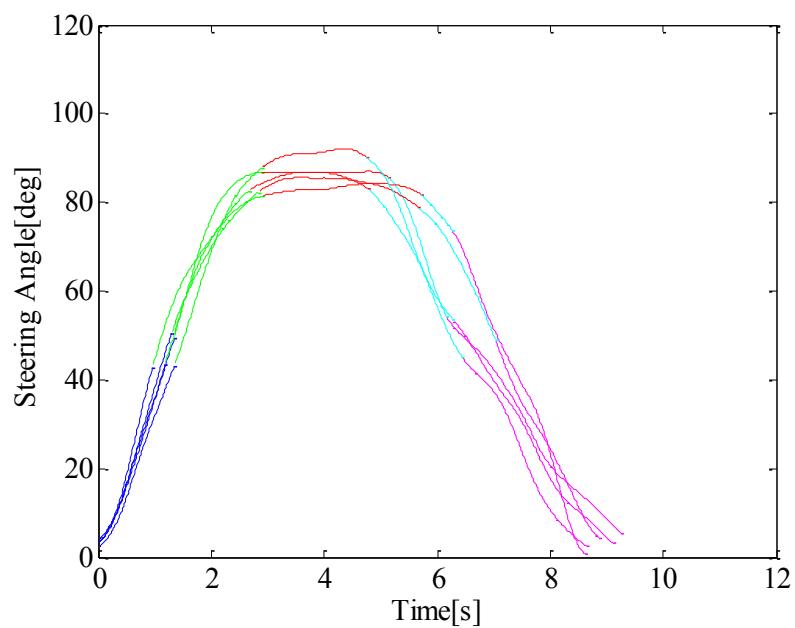


Fig 4.17 5モード分割した運転情報(旋回走行軌跡, 第2走行車線)

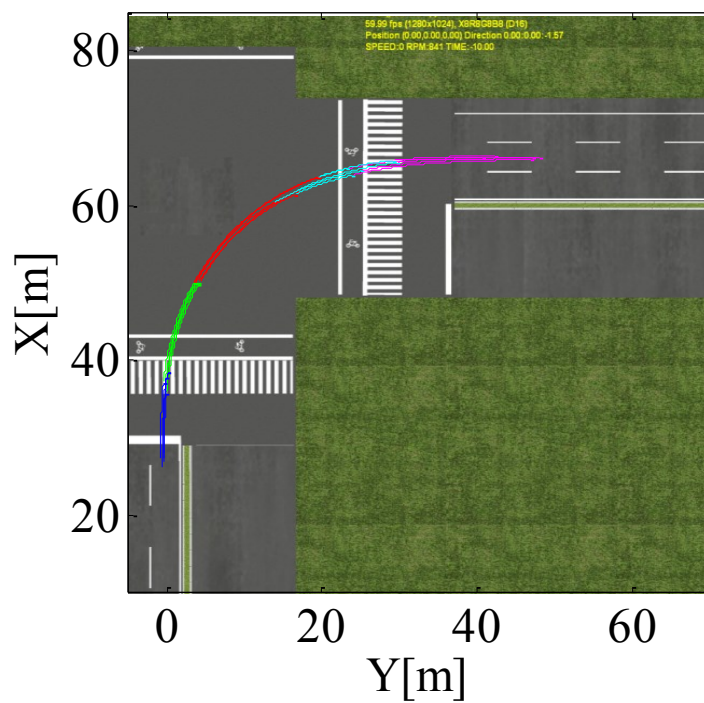


Fig 4.18 5モード分割した運転情報(旋回走行軌跡, 第2走行車線)

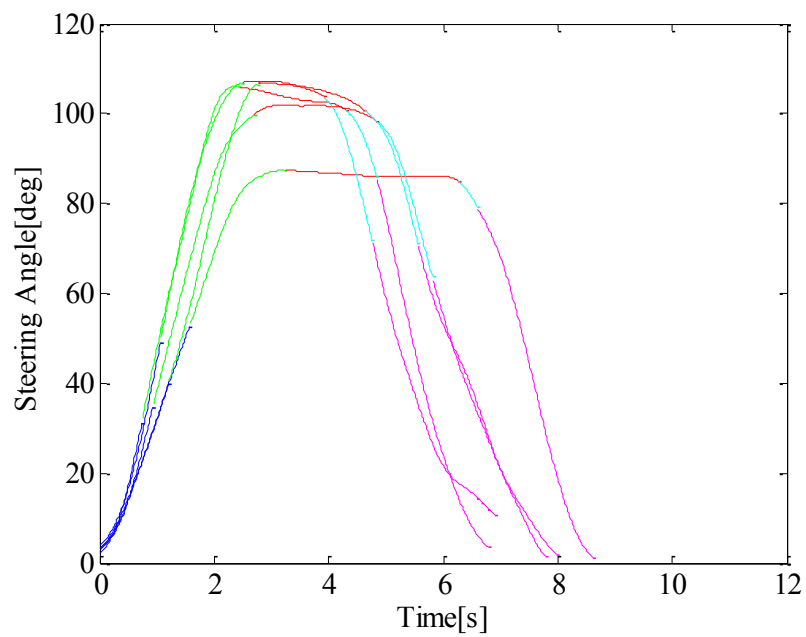


Fig 4.19 5モード分割した運転情報(ステアリング操作, 第3走行車線)

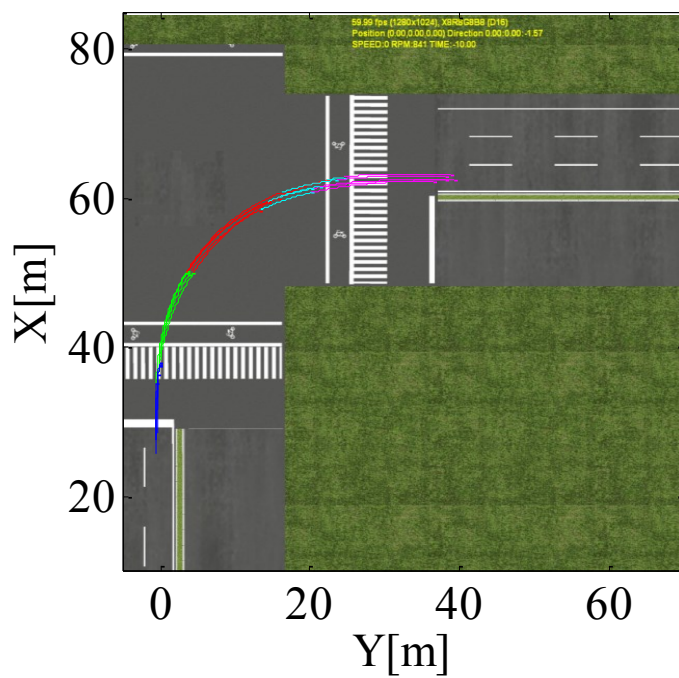


Fig 4.20 5モード分割した運転情報(旋回走行軌跡, 第3走行車線)

4.3 旋回操作切替判断モデルの同定

本節ではハイブリッドシステム表現において重要である考えの 1 つである，判断モデルの同定を行う．判断モデルはドライバが外部環境情報に基づいて行っている操作切替をモデル化したものである．ドライバの判断は旋回しているセクションごとに使用している外部環境情報が異なるため，各セクション毎に同定を行った．また SVM にて判断モデルのパラメータ同定を行う際に，Matlab 向けに開発された Toolbox である OH-Pack を使用した^[28]．

4.3.1 旋回開始条件

まず，直線から旋回操作に切り替わる際のモデルについて説明を行う．本研究の先行研究では，旋回開始やブレーキ操作の判断を行う際にドライバは目標との距離と自車速度に基づいて操作の切替判断を行っていると考えてきた．Fig4.21 に旋回開始時の X 座標と自車速度の関係を示す．横軸が X 座標[m]，縦軸が自車速度[km/h]を表している．また，実線のデータは第 1 走行車線，点線は第 2 走行車線，一点鎖線は第 3 走行車線のデータを表しており，黒線は旋回前のデータを，青線は旋回開始後のデータを，黒線と青線の境界の赤い×印は旋回開始点を表している．Fig.4.21 の結果を見ると旋回開始位置は 26m から 28m 付近に分布しているのが確認できる．また，旋回開始位置は各旋回パターンや速度において顕著な特徴は確認できない．このことから，ドライバは交差点のある位置に自車が到達したときには旋回する車線に関係なくステアリングを切り始めているのが確認できる．このことから，旋回開始条件は位置のみによって判断していると考えられる．本研究では，旋回の開始位置は X 座標が 30m に存在する停止線を旋回開始位置として設定する．よって，旋回開始条件判断式は以下のような式(4.1)の形式とした．

$$x - 30 > 0 \quad (4.1)$$

式中の x は進行方向 X 方向の自車位置を表している．旋回開始条件を式(4.1)のような簡便な形式とした理由は，本研究の最終的な目的である，他の交差点でも旋回可能となるような汎用性をモデルに与えるためである．これは，停止線はどの交差点にも存在することから，市街地コース 1 以外の交差点でもモデルの適応が可能であるためである．

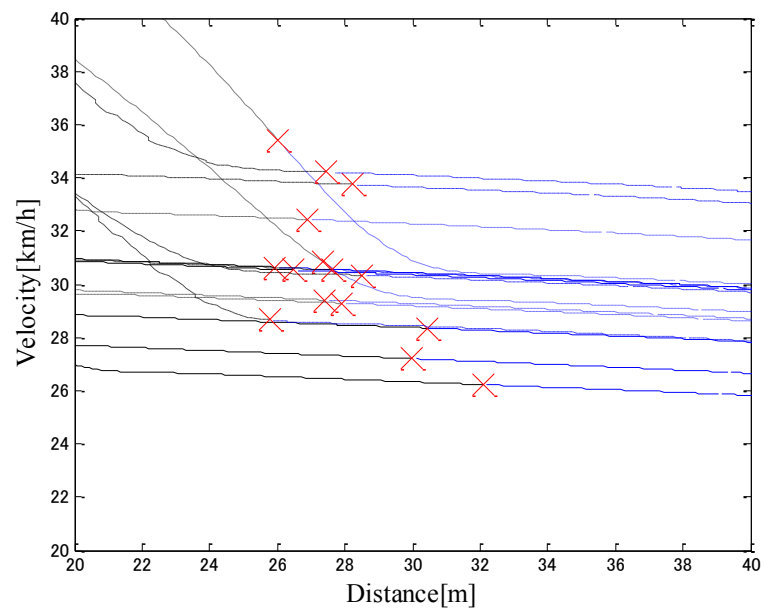


Fig 4.21 旋回開始位置と速度の関係

4.3.2 モード 1 とモード 2 間の判断モデル

先行研究において、旋回の序盤でドライバは交差点中心のゼブラゾーンを見ながら自車位置を確認してステアリング操作を切替えるタイミングを判断していることが明らかとなった。ドライバはゼブラゾーンを見ている時、動的に自車速度 v [m/s] と交差点中心のゼブラゾーンまでの距離 x_r [m] より旋回開始の判断を行っていると考えられる。そこで、これらの情報に基づき旋回開始判断条件を同定する。今回は SVM(Support Vector Machine)を使用して操作切替判断条件式を導出する。まず、SVM で判断条件を導出するにあたって第 4.2 節で抽出した交差点旋回区間であるモード 1 からモード 5 のデータを正規化して計算を行った。計算は以下の手順で行った。

1. 交差点旋回データ(モード 1 からモード 5 間)15 本から導出に必要な X 座標と速度の最小値を求め、旋回データからそれらの最小値を引いてそれぞれのモード 1 の開始点が 0 となるように処理する。
2. 1 で処理したデータ 15 本の中から X 座標、速度について最大値を算出する。
3. 旋回データ 15 本のそれぞれのデータを 2 で求めた最大値で除することにより正規化を行う。
4. 3 で正規化したデータに基づき、モード 1 とモード 2 に境界のデータを用いて SVM で境界条件を導出する。

上記の手法により導出した旋回開始判断の条件式は以下のような式の形式とした。

$$\alpha x + \beta v + \gamma > 0 \quad (4.2)$$

ここで、 x は正規化した X 座標、 v は正規化した速度である。また、 α 、 β は X 方向距離と自車速度の係数で、 γ は定数項である。切り替え判断条件は汎用性を持たせるため、モデル構築用の各車線 5 本、合計 15 本の運転データから導出した。旋回開始判断モデルの各パラメータは Table 4.1 のように得られた。導出した切替判断条件と、X 座標と自車速度の関係を Fig.4.22 に示す。この図の横軸は X 座標[m]を、縦軸は自車速度[m/s]を示しており、赤線が導出した判断線、青線がモード 1 のデータ、緑線がモード 2 のデータを表している。

Table 4.1 旋回開始判断モデルのパラメータ

α	β	γ
-2.9918	-1.7412	2.0946

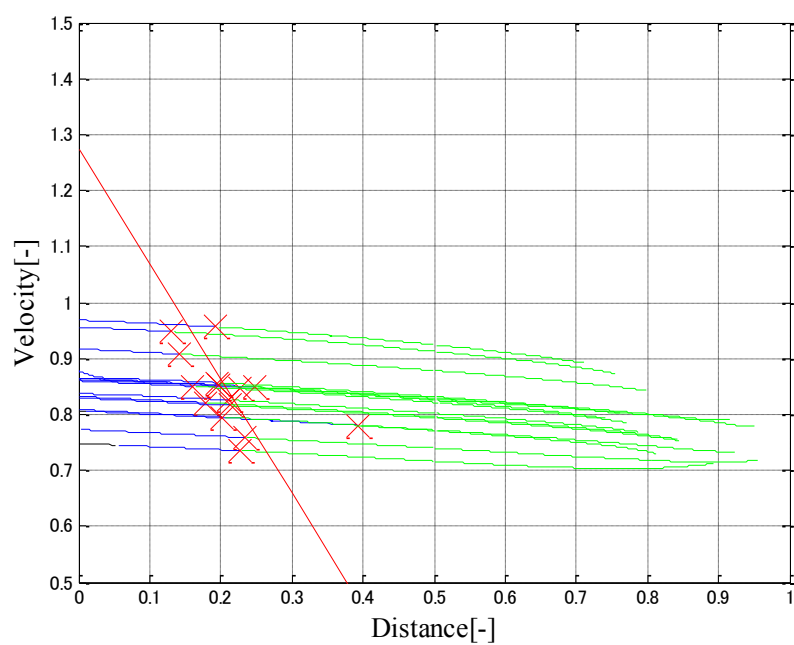


Fig 4.22 切替判断条件と X 座標・自車速度の関係

4.3.3 モード 2 以降の判断モデル

次に、動作モード 2 以降の切り替え判断条件の導出を行う。先行研究において、旋回中盤にドライバは旋回先の車線の白線を見て、現在の自車位置と車体角度を認識していることが明らかとなった。よって、旋回中盤にドライバは目標までの X 方向距離, Y 方向距離, 車体角度 θ を用いて操作切替のタイミングを判断していると考えられるので、モード 2 以降の切替判断条件式のパラメータには上記の 3 つパラメータを使用する。切替判断条件式の導出は前節と同様に SVM を用いる。手順は以下に内容の通りである。

1. 交差点旋回データ(モード 1 からモード 5 間)15 本から導出に必要な X, Y 座標と車体角度の最小値を求め、旋回データからそれらの最小値を引いてそれぞれモード 1 開始点が 0 になるように処理する。
2. 1 で処理したデータ 15 本の中から X, Y 座標と車体角度について最大値を算出する。
3. 旋回データ 15 本のそれぞれのデータを 2 で求めた最大値で除することにより正規化を行う。
4. 3 で正規化したデータに基づき、モード 1 とモード 2 に境界のデータを用いて SVM にて各モード間の境界平面を導出する。

上記の手法により導出した旋回開始判断の条件式は以下のような式の形式とした。

$$mx+ny+o\theta+p < 0 \quad (4.3)$$

ここで、 x は正規化した X 座標, y は正規化した Y 座標, θ は正規化した車体角度である。また、 m, n, o は X 方向距離, Y 方向距離と車体角度の係数で、 p は定数項である。切り替え判断条件は汎用性を持たせるため、モデル構築用の各車線 5 本, 合計 15 本の運転データから導出した。旋回開始判断モデルの各パラメータは Table 4.2 のように得られた。導出した各モード間の切替判断面と、X 方向距離, Y 方向距離, 車体角度の関係を Fig.4.23 から Fig.4.25 に示す。これらの図の水平方向の軸はそれぞれ X 座標[m], Y 座標[m]を、鉛直方向の軸は車体角度 θ [deg]を示している。モード 1 のデータは青色, モード 2 は緑色, モード 3 は赤色, モード 4 がシアン, モード 5 がマゼンタの配色となっている。Fig.4.23 はモード 2 とモード 3 の境界平面を, Fig.4.24 はモード 3 とモード 4 の境界平面を, Fig.4.25 はモード 4 とモード 5 の境界平面を現している。

Table 4.2 旋回判断モデルの各パラメータ

Action mode	m	n	o	p
2→3	-1768.5	186.4	74.3	963.5
3→4	0.0781	-0.7031	-1.9125	1.0127
4→5	-0.9332	-1.2190	-3.3723	3.0150

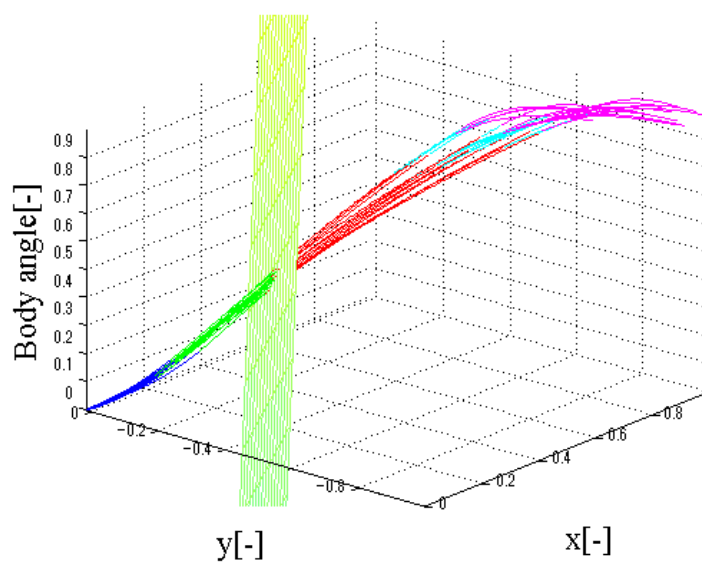


Fig 4.23 mode2 と mode3 の切替判断面

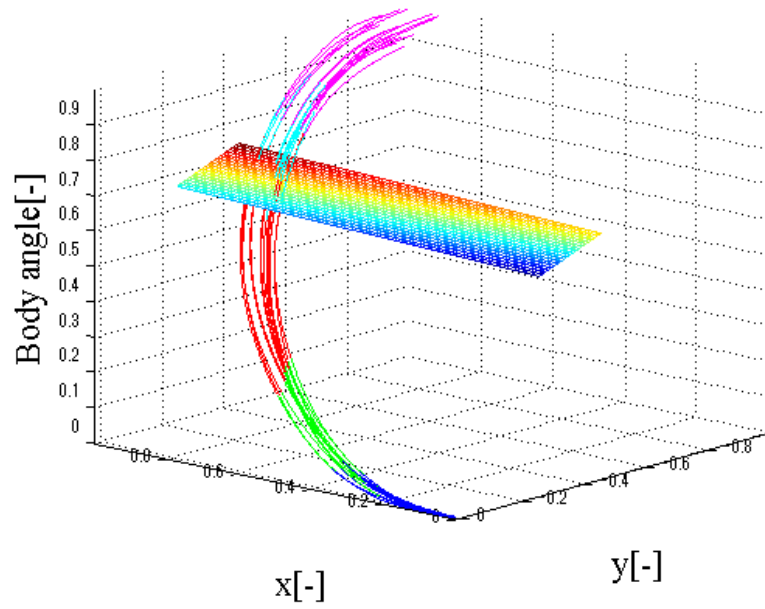


Fig 4.24 mode3 と mode4 の切替判断面

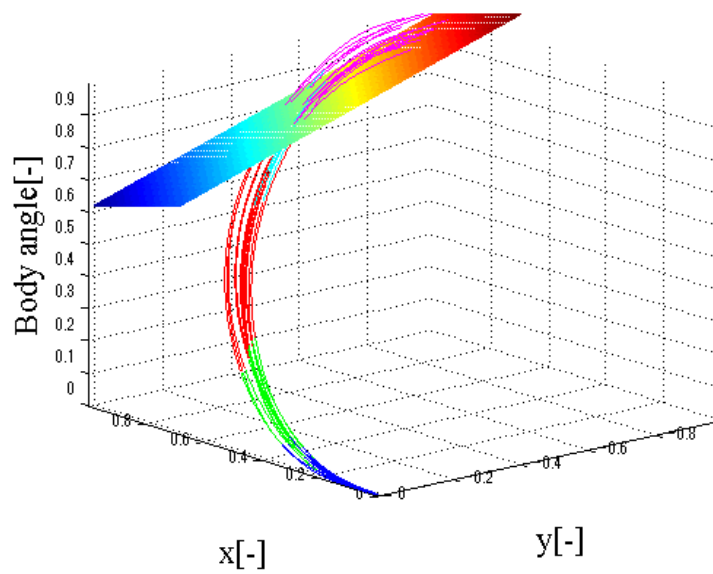


Fig 4.25 mode4 と mode5 の切替判断面

4.4 動作モデルの同定

4.4.1 予測車体角度

本研究室では過去に旋回についての研究を行っており、これまでにいくつかの旋回用の動作モデルを構築してきた。最初は X, Y 座標, 車体角度をパラメータとした PD 制御形式のモデルを構築した^[23]。しかし、このモデルは旋回軌跡とステアリング操作の再現性が高いモデルとはいえなかった。再現精度が低い原因は人間が使用しているであろうパラメータを試行錯誤的に決定したため、本来人間が使用しているものとは異なったパラメータでモデル構築を行ったのが原因ではないかと考えられる。

この問題に対して昨年度、先行研究で文献[24]では視線計測装置を用いてドライバの視線を計測し、旋回時に使用しているであろうパラメータの選定を行った。その視覚情報収集実験や主観評価を行っていく過程で、人間は旋回中に目標としている対象物、操作に用いている情報など明らかにしていった。旋回動作というのは旋回前と旋回後では基準にしてきた軸が異なる動作である。例えば、最初は X 軸に沿って走行してきたが、90 度右に旋回することで次は Y 軸に沿って走行することとなる。まして、旋回中は常に自車の座標と角度が常に変化しており、どの座標系を基準として自分が操作を行っているのかが定かではない状況である。そのような問題に対して文献[24]提案ではドライバは旋回時に X, Y 座標をパラメータとして扱っていないのではないかと考えた（完全に使用していない訳ではなく、距離などとして間接的には使用していると考えていた）。そこで文献[24]では車体角度に注目した。ドライバは旋回中に自車が回転していく中で自分の座標を性格に認識することは困難であるため、フロントガラスを流れていく景色の速さによってステアリングを制御しているのではないかと考えた。旋回序盤はステアリングを右に切り込んでいくことで車窓の景色が自分左方向に流れていき、その速度は上昇していく。ある程度の速度のなるとステアリングを止めるので車窓の速度は一定となる。そして旋回終盤、目標としている車線が車窓の右側から現れる。そして、ドライバは目標としてる車線が車窓の真ん中に来るように、車窓を流れる速度が 0 になるようにステアリングを制御しているのではと考えた。この際、車窓を流れていく景色の速さは自車の車体角速度に由来するものである。そのため、文献[24]では車体角度をベースとした動作モデルを構築しようと考えた。したがって、先行研究ではドライバの旋回時のステアリング操作のアルゴリズムは次の式(4.3)のような形式で考えられていた。また、模式図を Fig.4.26 に示す。

$$\dot{u}(t) = K_i \left\{ \theta_D(t) - \dot{\theta}(t) \frac{d(t)}{v(t)} \right\} \quad (4.3)$$

$\theta_D(t)$ [deg] は現在の車体角度 $\theta(t)$ [deg] と目標地点までに自動車回転しておかなければ

ばいけない目標車体角度 $\theta_T(i)$ [deg] の差分であり，計算方法は式(4.4)に示す．なお， i はモード番号($i=1,2,3,4,5$)を表している． $\dot{\theta}(t)$ [deg/s] は現在の自動車の車体角速度を表している． $d(t)/v(t)$ は現在位置と目標地点までの直線距離 $d(t)$ [m] を現在自車速度 $v(t)$ [m/s] で割った値であり，これは現在の座標から目標地点の座標までの予想到達時間である．距離 $d(t)$ [m] の導出式は式(4.5)に示す．この予想到達時間に先ほどの車体角度をかけてできた項， $\dot{\theta}(t) \cdot d(t)/v(t)$ [deg] は現在の自車の状態で自車が目標までに何度回転するかを表す予測車体角度となる．なお，ステアリングは時計回りの方向を正の方向としているため，ステアリング角速度量 $\dot{u}(t)$ は右旋回時には正の値をとる．

$$\theta_D(t) = \theta_T(i) - \theta(t) \quad (4.4)$$

$$d(t) = \sqrt{\{x_T(i) - x(t)\}^2 + \{y_T(i) - y(t)\}^2} \quad (4.5)$$

ここで， $x(t)$ [m]， $y(t)$ [m] は自車の現在地の X，Y 座標を表しており， $x_T(i)$ [m]， $y_T(i)$ [m] は目標地点の X，Y 座標を表している．ドライバは， $\theta_D(t)$ [deg] と $\dot{\theta}(t) \cdot d(t)/v(t)$ [deg] の偏差をとることによって，ステアリング角速度量 $\dot{u}(t)$ を制御していると考え，式(4.3)のモデルを提案した．ここで， K_i は式(4.3)のパラメータであり，このパラメータの大小でステアリング操作が変化するため，この値が人間固有の特徴を現している．なお，ステアリング角速度を制御式に採用した理由は，ステアリング角度を制御式にするとモデル式のアルゴリズム上，ステップ状の角度入力を与えられることが考えられるためである．ステップ上に角度入力加わるとステアリング角度に不連続な部分が生じて人間のような滑らかなステアリング操作とは異なる．そのような急激な操作を防止するため，本研究ではステアリング角速度を用いた制御式を採用した．

しかし，このモデルには制御目標点である座標を通らない問題点があった．ドライバ操作については改善の見られたモデルであったが，軌道追従性が低く，ドライバの走行軌跡と比較した際に類似した結果が得られなかった．

そこで，本研究ではモデルを式(4.3)を以下の式(4.6)，(4.7)の形式に変更した．また，模式図を Fig.4.27 に示す．

$$\dot{u}(t) = K_{pi} \theta_e(t) + K_{ii} \int \theta_e(t) dt \quad (4.6)$$

$$\theta_e(t) = \theta_D(t) - \dot{\theta}(t) \frac{d(t)}{v(t)} - \frac{1}{2} \ddot{\theta}(t) \left\{ \frac{d(t)}{v(t)} \right\}^2 \quad (4.7)$$

式(4.7)の $\ddot{\theta}(t)$ [deg/s²] は自車の現在の車体角加速度である．その他のパラメータと項は式(4.3)と同様である．式(4.7)の $\theta_e(t)$ は車体角加速度の項を追加して精度を向上させた予測車体角度と $\theta_D(t)$ [deg] との偏差である．式(4.6)は偏差 $\theta_e(t)$ のフィードバック構造を導入した PI 制御形式の動作モデルを表している．本研究室の従来研究では，ステアリ

ング操作の動作モデル式はフィードフォワード制御の形式を用いていた。しかし、本研究では動作モデル式に予測車体角度と $\theta_D(t)$ [deg] との偏差 $\theta_e(t)$ を使用したフィードバック形式のモデル構造を採用する。人間のステアリング操作はフィードフォワードに基づく部分が多いが、フィードフォワードの部分はステアリングを切る瞬間のきる速さや量など、経験的な知見から決定している操作開始直後の部分であると考えられる。しかし、その後の目標に向かってステアリングを修正していく部分に関してドライバは何らかの外部環境情報を用いて目標との誤差を修正するようにステアリングを制御していると考えた。そして、このモデル構造の動作モデルを用いて実験を行い、ステアリング操作についてはドライバと類似する結果が確認できたが、制御目標点との誤差は改善は見られたが 0 に収束していくことはなかった。この原因はフィードバック項に X, Y 座標を含んでいないというモデル自体の設計限界であると考えた（フィードバックの項に車体角を目標値として与えていたため、目標点での車体角度の偏差は 0 に近い結果となった）。

この結果を踏まえてさらに軌道追従性を高めるため、制御目標点を通るようなモデルの設計が必要となった。新たなモデルの構築について次節で説明する。

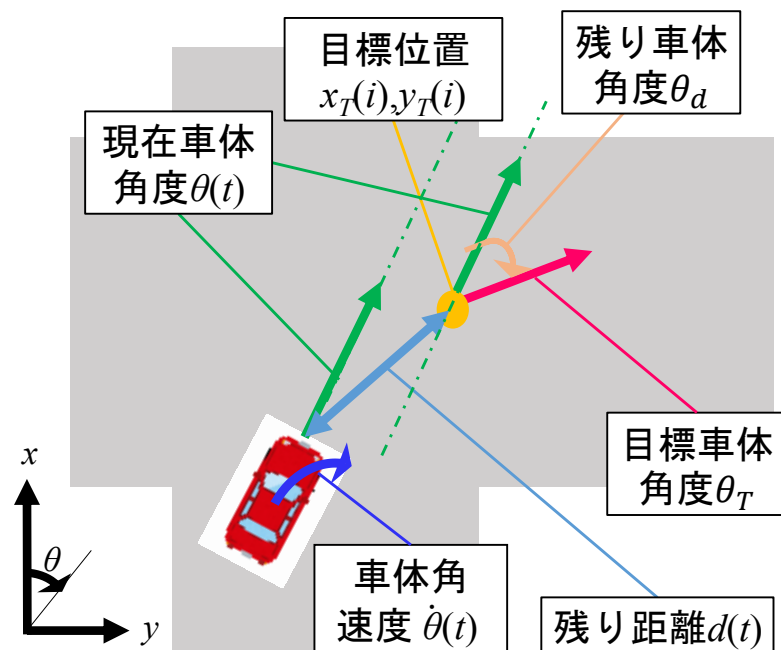


Fig 4.26 文献[24]提案のドライバ旋回操作のアルゴリズム

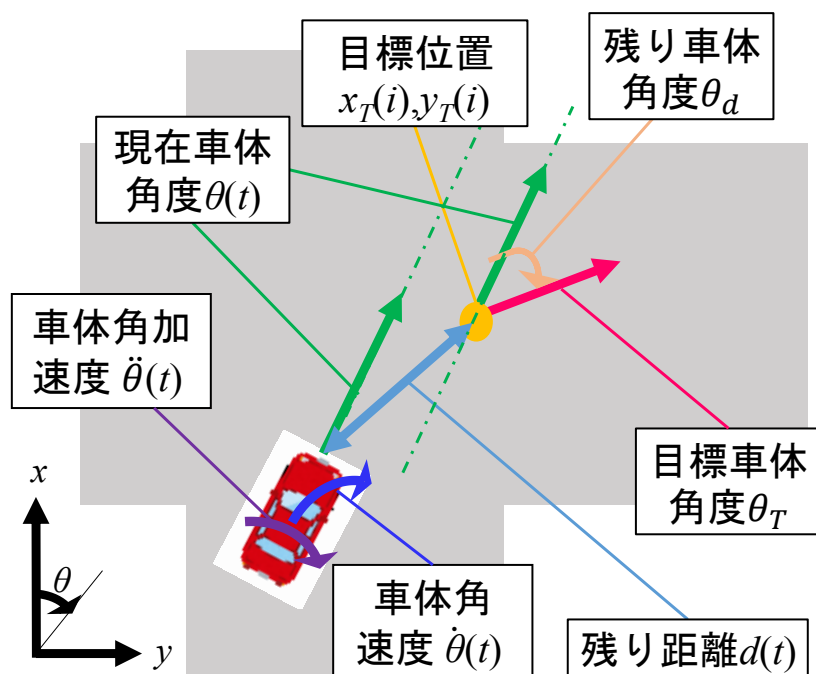


Fig 4.27 車体角加速度を導入したドライバ旋回操作のアルゴリズム

4.4.2 制御目標点追従のアルゴリズム

前節で従来モデルの問題点が浮き彫りになった。従来モデルでは、制御の目標値として X 座標, Y 座標, 車体角度を与えていたが, 車体角度ベースの制御モデルであったため車体角度は目標との偏差が小さくなったが, 制御目標点との偏差は小さくならなかった。そのため, 本研究では次の式(4.8)のモデル構造の式を提案する。また, 模式図を Fig.4.28 に示す。

$$\theta_F(t) = \theta_f(t) - \theta(t) \quad (4.8)$$

式(4.8)の $\theta(t)$ [deg] は現在の自車の車体角度であり, $\theta_f(t)$ [deg] は現在地から見える制御目標位置の方向の絶対角度である。 $\theta_F(t)$ [deg] は $\theta_f(t)$ [deg] と $\theta(t)$ [deg] の偏差でありある。この偏差が小さくなることで, 自車が制御目標点に向かって走行することが可能となる。目標点に向かって走行することで前節のモデルで問題となっていた制御目標点との偏差が小さくなるため, このモデル構造を提案する。本節では, ドライバはこの $\theta_F(t)$ が小さくなるようにステアリングを制御していると考えた。

本研究で提案する最終的なモデルは前節と本節で説明した両モデルを組み合わせたモデル構造を提案する。詳しい説明については次節で説明する。

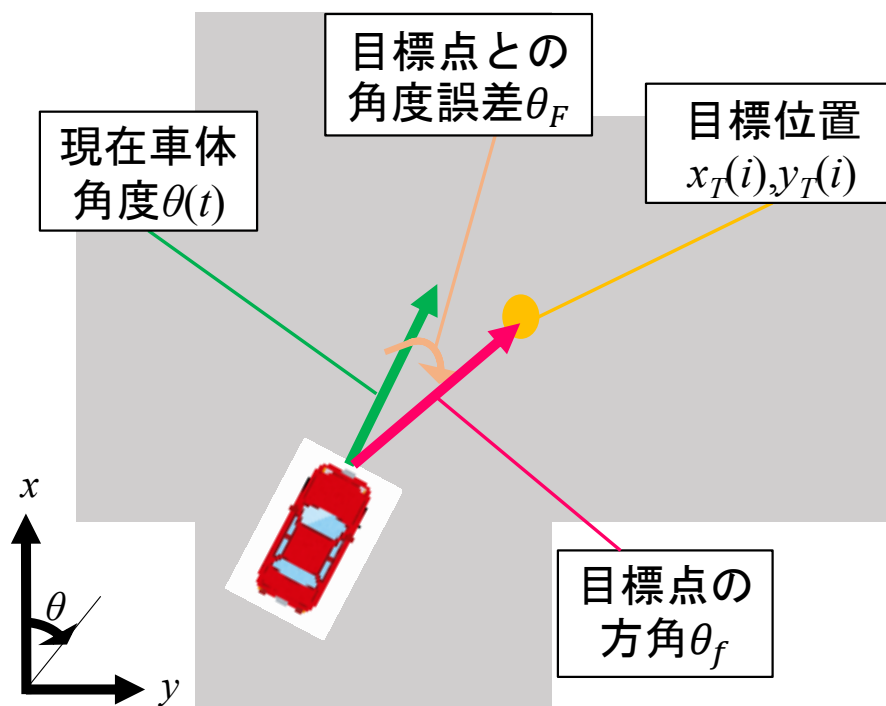


Fig 4.28 目標点に追従するアルゴリズム

4.4.3 構築された新たな動作モデル

前節で説明したモデルを組み合わせてできたモデルを式(4.9)に示す．また、模式図を Fig.4.29 に、この式のパラメータを Table 4.3 に示す．

$$\dot{u}(t) = K_P \theta_e(t) + K_I \int \theta_e(t) dt + K_F \theta_F(t) \quad (4.9)$$

本提案モデルは、予測車体角度に基づくアルゴリズムと制御目標点を追従するアルゴリズムの双方の特性を取り入れたフィードバック形式の動作モデルとなっている．ドライバはこれらの偏差を用いてステアリング角速度量 $\dot{u}(t)$ [deg/s] を制御していると考えた．なお、式(4.9)中の $\theta_e(t)$ などの変数は前節で使用したものと同様であり、計算方法も同じであるため、ここでは説明は省略する．また、本提案モデルは複雑であり、かつ、人間の運転情報を使用しているためパラメータの導出方法が確立されていない．パラメータの導出に関しては、自律旋回実験で得たデータを基に試行錯誤的にチューニングを行った．その際に、予測車体角度と目標点追従の各項のゲインが同等の値をとるように、また、両ゲインが互いに正負となるような、実際に自律走行を行っても安全なように慎重なチューニングを行った．なお、旋回モード3に関してはステアリングを一定角に保つ操作のためパラメータは設定していない．

ここで、式(4.9)の各項の詳しい説明を行う．本提案モデルはフィードバック形式のモデルであるため、互いに異なる方向のゲインが働くようになっている．旋回前半と旋回後半で予測車体角度と目標点追従の項の役割が変化するので分けて説明を行う．旋回前半のステアリングを切り込んでいく区間では、目標点追従のゲインである $\theta_F(t)$ が大きく働く．それは、旋回前半は制御目標点が旋回先の道路にあるため、車体角度と目標の方角には大きな差があり、おのずと $\theta_F(t)$ は大きな入力となる． $\theta_F(t)$ は旋回が進むにつれて、車体が次第に目標の方角に近づいていくことから小さくなっていくゲインである．また、 $\theta_F(t)$ は車体角度が急激に右に回転しない限り、式(4.8)のアルゴリズムでは負の値をとることはない．負の値をとると想定される状況は通常の右折旋回時の軌道よりも内側をショートカットする状況や、意図的に車体をスライドさせて走行する状況が考えられるが、これは自律走行車などで使用するモデルなので上記のような、道路交通法から逸脱した走行を行うケースに陥ることは考えにくい．よって、 $\theta_F(t)$ は常に正の値をとる．しかし、 $\theta_F(t)$ のみのフィードバック制御の場合、旋回序盤に急激に目標方向に向かってステアリングを切り込むようなゲインを発生させることになり、走行軌道は急激に右に曲がり、交差点内をショートカットするように旋回する制御になることが考えられる．そのような制御では人間との類似性は期待できない．そこで、 $\theta_F(t)$ の急激な制御を打ち消すように予測車体角度 $\theta_e(t)$ の項を調整する．旋回序盤には $\theta_F(t)$ が急激なゲインを発生させるため、一旦車体は急激に回転しようとするため、車体角速度と車体角加速度の値が上昇する．しかし、このまま目標まで走行すると目標旋回角以上に車体が旋回することになることが予測され、式(4.7)の予測車体角度の項が目標車体角度 $\theta_D(t)$ より大きな値をとり、 $\theta_e(t)$ は負の値をとる．そうすることで、急激なステアリング操作を修正するように $\theta_e(t)$ が働く．これらの力がお互いに拮抗し合うことで、ドライバがステアリングを滑らかに切り込むような旋回が可能となる．よって、旋回序盤はス

テアリングが切り込まれるように $\theta_F(t)$ の方のゲインが大きくなるようにパラメータチューニングを行った(なお, $\theta_e(t)$ と $\theta_F(t)$ は背反する力であるので安全に作用するようにお互いに近い値をとるようにパラメータを決定した). 故に, 旋回前半は式(4.9)が正の値, つまり, ステアリングを切り込んでいく方向の角速度を発生させるため, ドライバが行うような滑らかなステアリング操作が行われる.

また, 旋回後半のステアリング切り戻していく区間では, 車体角度は目標の方向に近づいていくため $\theta_F(t)$ のゲインは正の方向から 0 に収束していく. 加えて, 旋回中にステアリングを切り戻す瞬間が車体角速度, 車体角加速度ともに最大であるため, 予測車体角度の値が目標車体角度 $\theta_D(t)$ を上回る状態となり, $\theta_e(t)$ が負の値となる. 旋回後半はステアリングを真っ直ぐに切り戻していく区間であるので, 負の角速度量が必要となる. 旋回後半では急激にステアリングを切り戻そうとする $\theta_e(t)$ に対し, $\theta_F(t)$ が反対方向に働きかけることによってステアリングをゆっくりと切り戻していく制御となる. そのため, 旋回後半は $\theta_e(t)$ 側に重きをおいてパラメータ設定を行った.

以上が本提案モデルの旋回アルゴリズムである. 式のパラメータは Table 4.3 に示す. また, 本提案モデル式は, ステアリング角度をモデル化しているため DS に実装する際には式(4.10)のように, DS の車両運動制御システムの制御周期 $T[s]$ をかけてステアリング角度 $\theta_s(t)[deg]$ に変換している. DS の制御周期 T は 16[ms] である.

$$\theta_s(t) = \sum \dot{u}(t) \cdot T \quad (4.10)$$

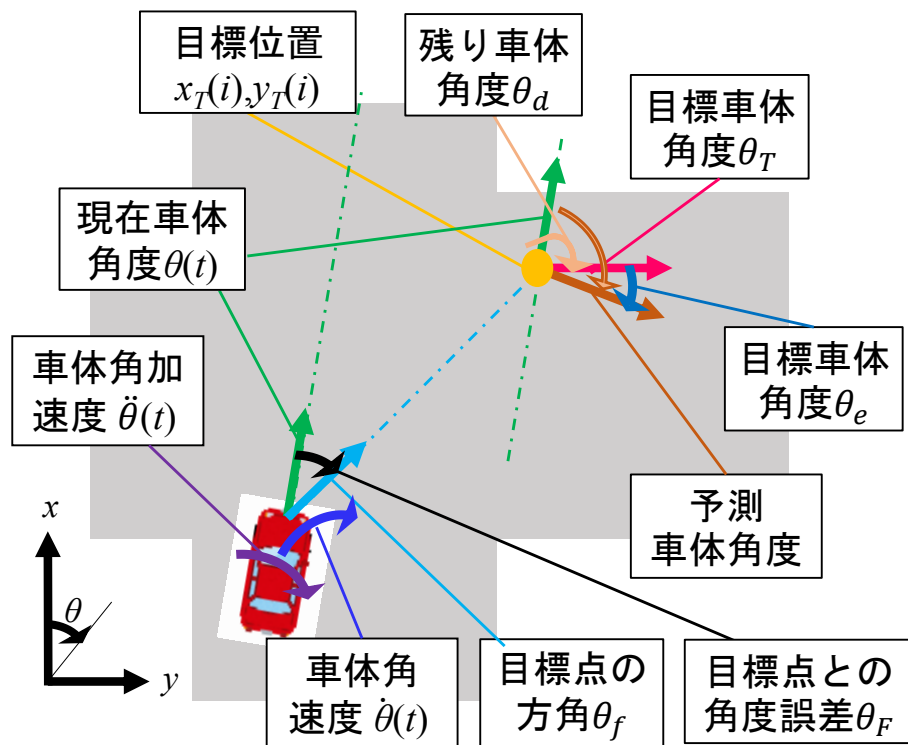


Fig 4.29 車体角加速度を導入した動作モデル

Table 4.3 各車線のパラメータの同定結果

	model1	mode2	mode3	mode4	mode5
K_{Pi}	0.10	1.00	-	0.50	0.20
K_{Ii}	3.00	4.20	-	0.10	0.10
K_{Fi}	0.02	0.02	-	0.10	0.10

4.4.4 制御目標点の決定

先行研究では、制御目標点は各モードごとに設定されていた。しかし、我々が交差点を旋回している際に 5 個も目標を定めて旋回しているわけではない。先行研究で明らかになったように、ドライバはまず交差点中心のゼブラゾーンを見ながら旋回を開始するタイミングとステアリングを切り込んでいくタイミングを計算している。次に、旋回していく予定の車線末端を見ながらステアリングを制御していき、最終的に進入した車線遠方を見ながら車線の中心を自車が走行するようにステアリングを制御していく。このように、ドライバは旋回時に 5 個も目標は設定していない。また、前年度のモデルが上手く旋回できなかった原因の 1 つに目標点の設定が本来のドライバ使用の目標点と異なっていたからではないかと推測できる。実際に走行中のドライバのドライバの注視点は一般的に 30km/h なら 30m 先と言われており、速度に応じて変化していく。今回の旋回実験での速度域は 20~30km/h であり、制御目標がドライバの注視点よりも近くにあることが問題だった。自動車を運転している人間は速度に見合った先の距離を見ることで安定した運転が可能になるが、近くを見ながら操作を行うと自動車の挙動は不安定になる。この考えと視覚情報収集実験の結果を踏まえ、制御目標点を Table 4.5 から Table 4.7 のように設定した。モード 1 区間はゼブラゾーンを見ている区間であり、モード 2 からモード 5 は進入する車線の末端、または、遠方を見ている区間である。このように見ている対象物ごとに制御目標点を設定した。モード 1 の制御目標点は走行データからゼブラゾーンの再接近点を算出した。モード 2 からモード 5 の制御目標点は汎用性を持たせるため、Fig4.30 の計算方法で算出した。

Table 4.4 第1, 第2, 第3 走行車線の各パラメータ

車線	mode	$x_T(i)$	$y_T(i)$	$\theta_T(i)$
第1走行車線	mode1	56.182	6.725	33.547
	mode2	69.588	39.588	90.000
	mode4			
	mode5			
第2走行車線	mode1	55.034	7.360	35.127
	mode2	65.935	35.935	90.000
	mode4			
	mode5			
第3走行車線	mode1	54.451	7.234	39.521
	mode2	62.721	32.721	90.000
	mode4			
	mode5			

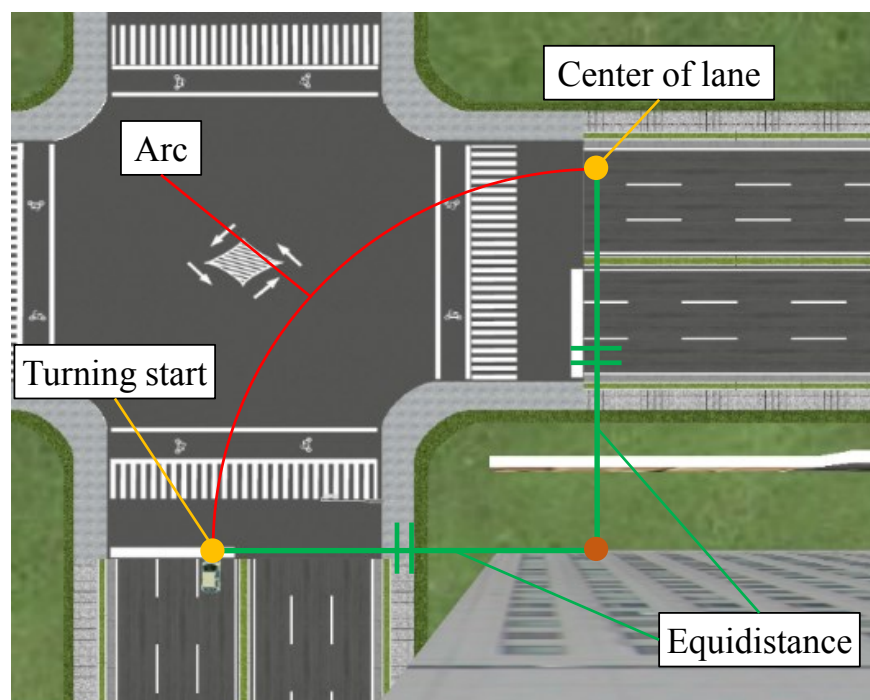


Fig 4.30 旋回終了点の定義

4.5 構築したドライバ旋回操作モデル

以上の過程によって構築されたドライバ旋回操作モデルの模式図を Fig.4.33 に示す。旋回行動における判断，動作部分にドライバ旋回操作モデルを組み込んでいる。本研究ではステアリング操作のみをモデル化の対象としており，アクセル・ブレーキの操作のモデル化は行っていない。

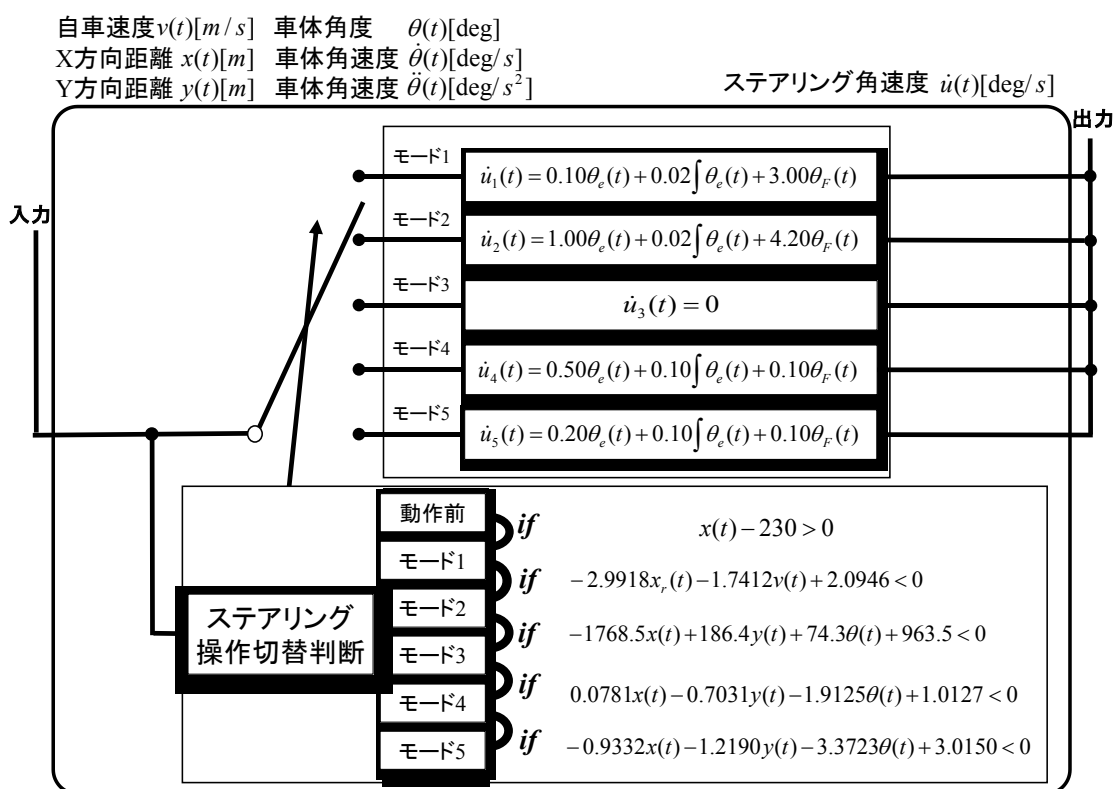


Fig 4.31 構築されたドライバ旋回操作モデル

第 5 章 自律旋回走行実験

構築された旋回操作モデルを DS に実装し，自動旋回実験を行った．5.1 節では自動旋回実験の方法を，5.2 節には自律旋回走行実験の結果について述べる．

5.1 自律旋回走行実験方法

5.1.1 有効性検証実験

提案モデルの有効性を検証するため，モデル構築を行った市街地コース 1 にて有効性を検証した．提案モデルを DS の PC1 の車両運動制御システムに実装して自動運転で交差点右折を行った．その際，旋回時の車体に旋回とは関係のない挙動が発生しないように，本実験ではペダル操作も簡易的に自動化して実験を行った．交差点直前までアクセルを一定量踏み込んだ状態にし，交差点直前でアクセルの入力を切り，ドライバが旋回した速度を再現する．そして，自律走行車は惰力で旋回を行い，旋回終了後アクセルを踏み加速していく．このように，減速時のピッチやロールなどの挙動が旋回に影響しないため，また，実験条件が同じになるようにペダル操作に関しても自動化を行った．

5.1.2 汎用性検証実験

本研究では，提案モデルがモデル同定を行った交差点以外でも旋回が可能であるか，汎用性の検証を行った．この検証には，市街地コース 2 を用いる．これらのコースは市街地コース 1 とは X 方向，Y 方向共にサイズが異なる実験環境である．この検証は，本研究の最終的な目標でもある人間のような旋回が可能かどうか，アルゴリズムが妥当であったか確認を行う．

また，自律走行車は目的地を与えないと走行できないので，市街地コース 2 において，ドライバが事前に走行した運転情報を基に中間目標点，最終目標点を決定した．自律走行車に与えた目標点を Table5.1 に示す．

Table 5.1 第4, 第5, 第6 走行車線の制御目標点

車線	mode	$x_T(i)$	$y_T(i)$	$\theta_T(i)$
第4走行車線	mode1	51.643	8.459	45.689
	mode2	57.690	32.690	90.000
	mode4			
	mode5			
第5走行車線	mode1	50.264	8.483	48.967
	mode2	54.139	37.429	90.000
	mode4			
	mode5			
第6走行車線	mode1	47.512	9.047	52.776
	mode2	50.638	25.638	90.000
	mode4			
	mode5			

5.2 自律旋回走行実験結果と考察

5.2.1 有効性検証実験結果

市街地コース1にて行った本提案モデルの有効性検証実験の結果をFig5.1からFig5.6に示す。Fig.5.1, Fig.5.2, Fig.5.3はそれぞれ第1, 第2, 第3走行車線の旋回軌跡を表している。ドライバ旋回軌跡はモード1は青色, モード2は緑色, モード3は赤色, モード4がシアン, モード5がマゼンタで, ドライバの走行軌跡は青色の点線である。ドライバの軌跡はモデル同定に用いた5本の走行データを平均化下もである。ドライバの軌跡上にある「*」は制御目標点を表しており, 提案モデルと制御目標点との誤差をTable.5.2に示す。Fig.5.4, Fig.5.5, Fig.5.6はそれぞれ第1, 第2, 第3走行車線のステアリング角度, 角速度, 角加速度, 車体角度, 角速度, 角加速度, 躍度を表しており, 配色はすべて旋回軌跡と同様である。Fig.5.1, Fig.5.2, Fig.5.3とTable.5.2を見ると, 旋回中盤でドライバよりも外側に軌跡が膨らんでいるが, ドライバと同様の軌跡を描いていることが確認できる。ステアリング操作はドライバと類似しているに見えるが, 旋回直後と旋回終了時のステアリング角加速度がドライバより高いことが確認できる。これは, 提案モデルが制御開始点でステアリングを強く切り込むことが原因と考えられる。制御終了時についても同様のことが発生していると考えられる。それ以外でのモード切換え時には滑らかに次のモードに移行できており, 角速度, 角加速度もドライバと同等の数値を示しており類似していることが確認できる。また, 車体角度, 角速度はドライバと同等の数値であるが, 先ほども述べた旋回開始点と終了点での制御切替の際のステアリング操作が影響し, 車体角加速度と躍度に関してはドライバよりも急激な変化が確認できる。また, 車体角を見ると旋回時に車体の挙動はドライバ同様であり, 乱れていないことが確認できる。これらの結果より, 本提案モデルは旋回中はドライバのように滑らかにステアリングを操作できることが, 制御開始と制御終了時のステアリング操作がドライバと異なっているが車体挙動に影響がない範囲であった。故に, 本提案モデルはモデル同定を行った交差点においてはドライバと同様の旋回軌跡, ステアリング操作ができており, 有効性が確認できた。また, 旋回開始時と終了時の制御の切替については, ドライバのように穏やかに制御が切替わるような制御アルゴリズムを今後導入しなければならない。

Table 5.2 市街地コース 1 各走行車線の走行軌跡の誤差

目標点誤差[m]	中間目標点	最終目標点
第1走行車線	0.283	0.078
第2走行車線	0.456	0.046
第3走行車線	0.276	0.042

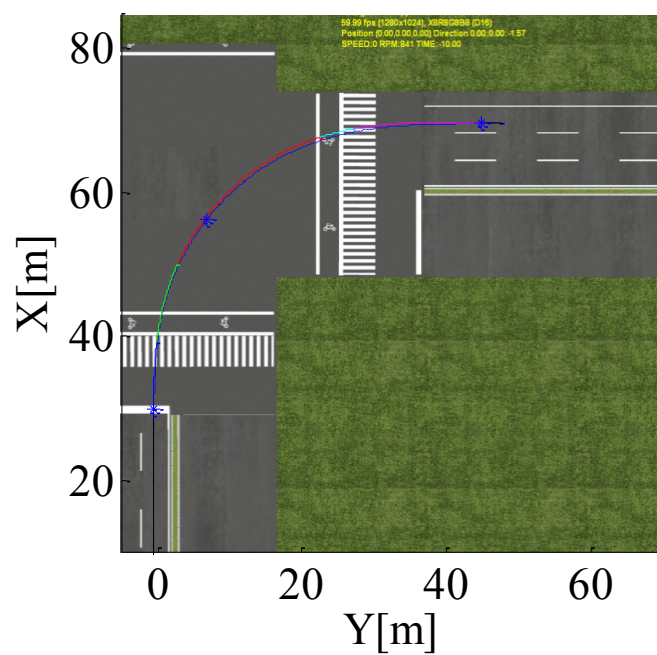


Fig 5.1 第1 走行車線(巡回軌跡, 制御目標点)

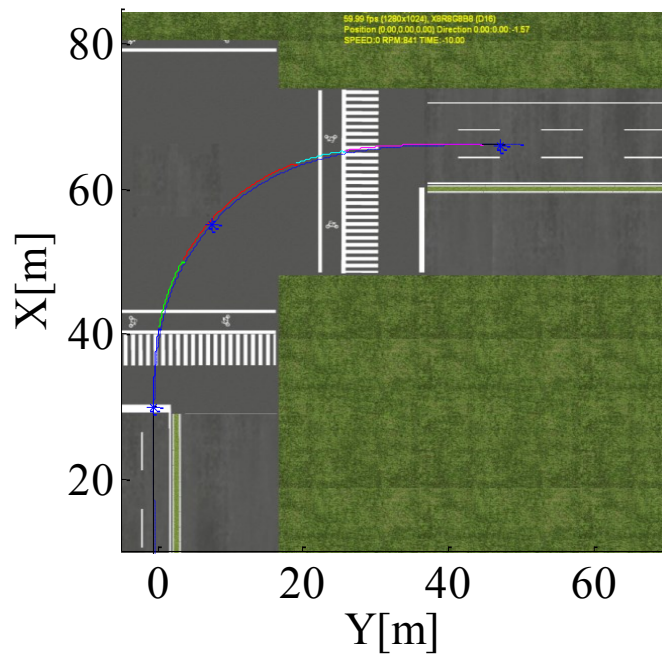


Fig 5.2 第2 走行車線(旋回軌跡, 制御目標点)

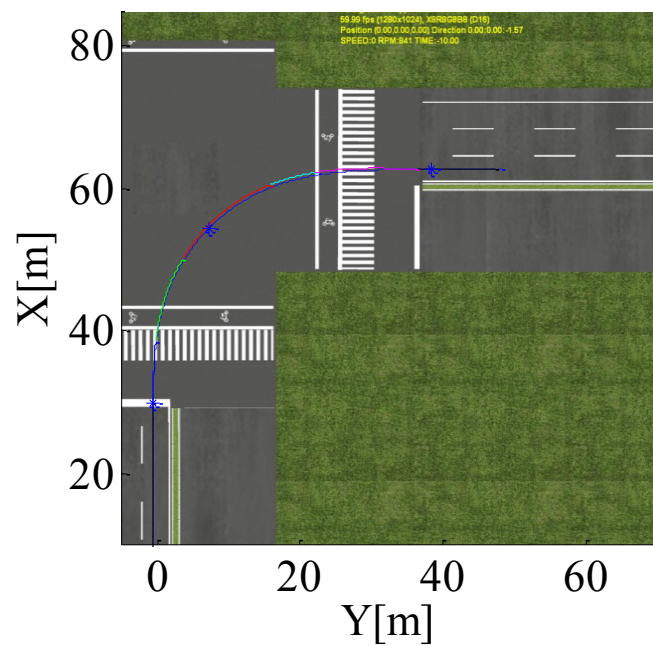


Fig 5.3 第3 走行車線(旋回軌跡, 制御目標点)

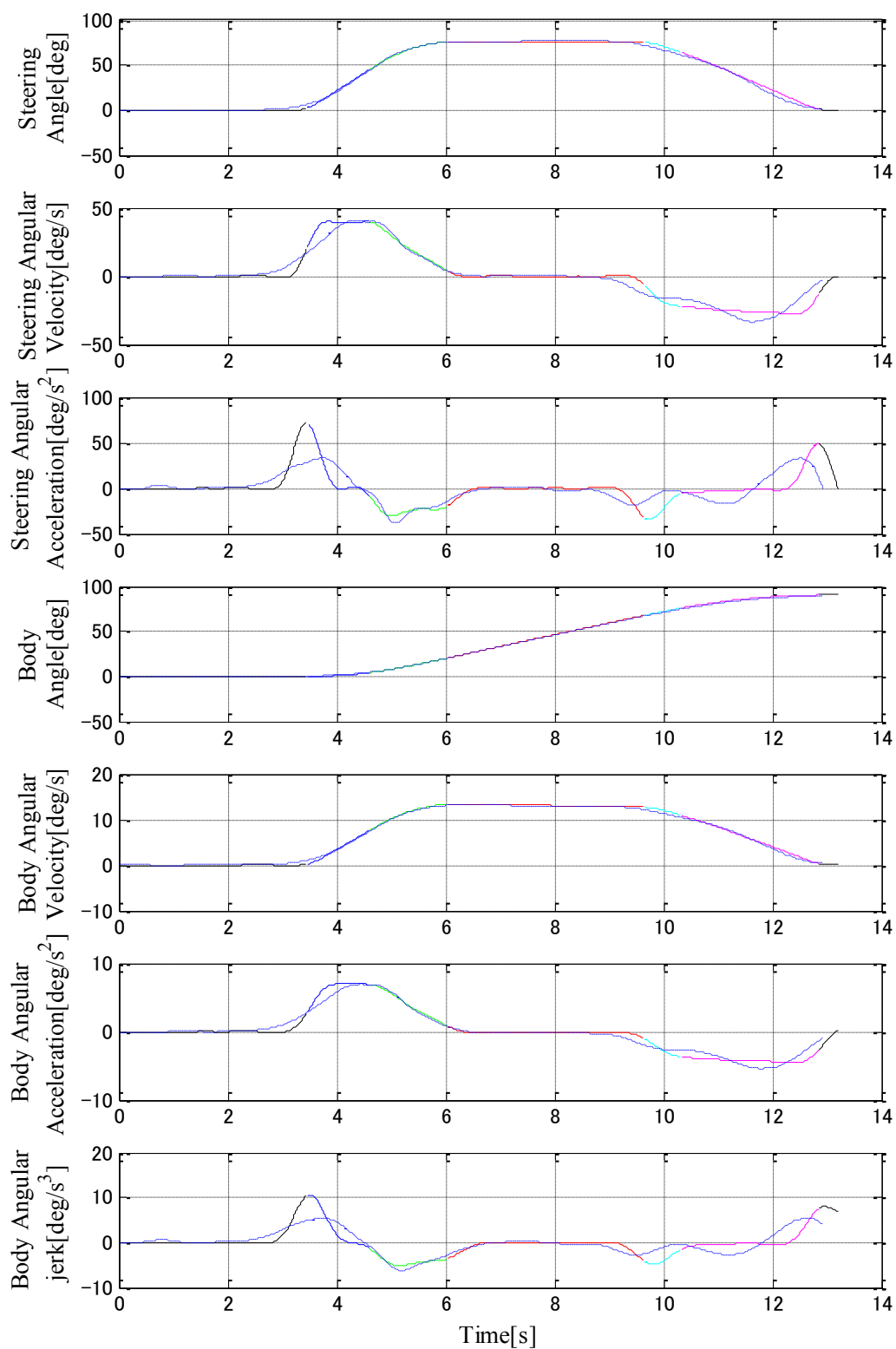


Fig 5.4 第1 走行車線自律旋回走行実験結果
(ステアリング角度・角速度・角加速度, 車体角度・角速度・角加速度・躍度)

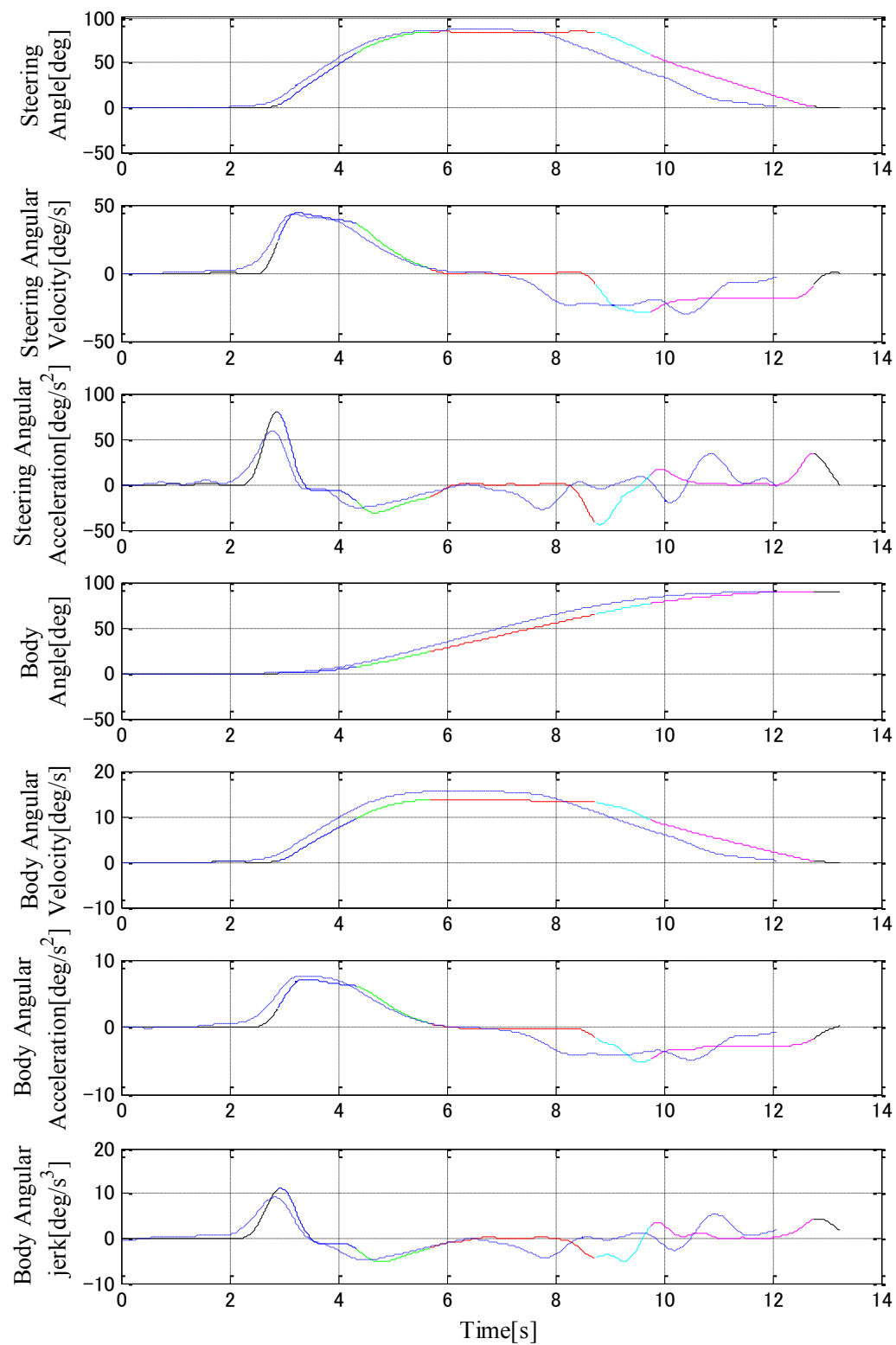


Fig 5.5 第2 走行車線自律旋回走行実験結果
(ステアリング角度・角速度・角加速度, 車体角度・角速度・角加速度・躍度)

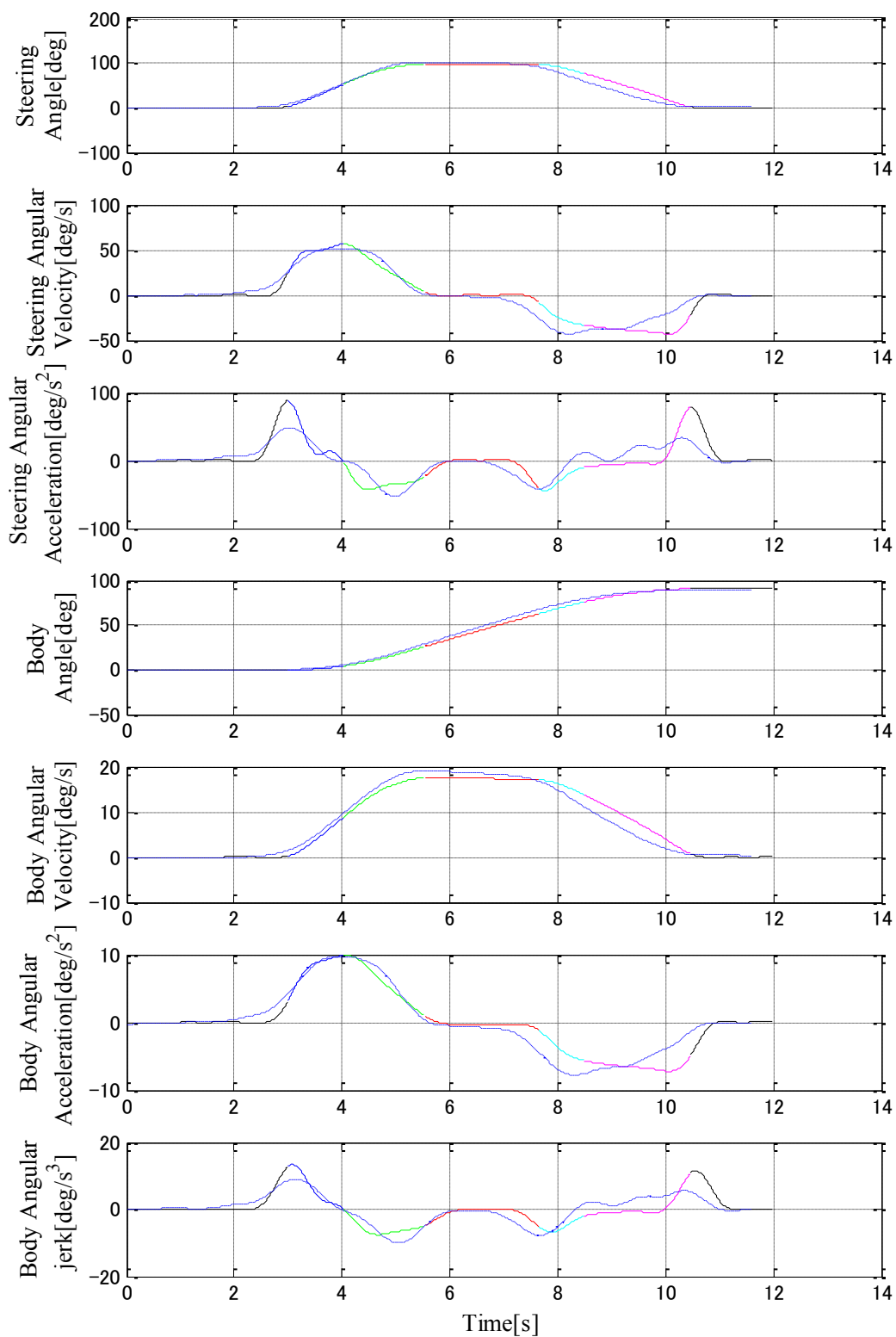


Fig 5.6 第3 走行車線自律旋回走行実験結果
(ステアリング角度・角速度・角加速度, 車体角度・角速度・角加速度・躍度)

5.2.2 汎用性検証実験結果

市街地コース 2 にて行った本提案モデルの汎用性検証実験の結果を Fig5.7 から Fig5.12 に示す. Fig.5.7, Fig.5.8, Fig.5.9 はそれぞれ第 4, 第 5, 第 6 走行車線の巡回軌跡を表している. ドライバ巡回軌跡はモード 1 は青色, モード 2 は緑色, モード 3 は赤色, モード 4 がシアン, モード 5 がマゼンタで, ドライバの走行軌跡は青色の点線である. ドライバの軌跡上にある「*」は制御目標点を表しており, 提案モデルと制御目標点との誤差を Table.5.3 に示す. Fig.5.10, Fig.5.11, Fig.5.12 はそれぞれ第 4, 第 5, 第 6 走行車線のステアリング角度, 角速度, 角加速度, 車体角度, 角速度, 角加速度, 躍度を表しており, 配色はすべて巡回軌跡と同様である. Fig.5.7, Fig.5.8, Fig.5.9 と Table.5.3 を見ると, 第 5 走行車線においてはドライバと同様の軌跡を走行しているが, 第 4 走行車線と第 6 走行車線では巡回中盤でドライバの軌跡よりも外を走行しており, 第 6 走行車線では特に顕著である. 第 4, 第 5 走行車線では市街地コース 1 での実験結果のようなステアリング操作が見られるが, ドライバよりステアリングを操作している時間が長い. 第 6 走行車線ではドライバよりもステアリング最大角が大きい結果となった. これは, 巡回の前半で発生した目標軌道との誤差を小さくするためにステアリングを大きく切り込んだためであると考えられる. このため, 他の車線と比較してもステアリングを操作している時間が短くなっており, ステアリング角速度, 角加速度もドライバを上回る結果となった. また, 車体挙動は市街地コース 1 と比較すると再現性は低いことが分かる. 第 4 走行車線ではドライバと同等の挙動を示しているが, 第 5 走行車線ではドライバと比較するとゆっくりとした巡回操作を行っていることが確認できる. さらに, 第 6 走行車線ではドライバより急なステアリング操作を行っていることが確認できる.

以上の結果から, 市街地コース 2 で汎用性実験の考察を行う. 第 4 走行車線で巡回軌跡, ステアリング操作, 車体挙動に関してドライバと類似性のある結果が得られた. 第 5 走行車線では巡回軌跡の誤差こそ 3 つの走行車線の中で一番誤差が小さい結果を示せたが, ステアリング操作がドライバと比較すると時間をかけていること, またそれによって車体挙動も変化していることなどが言える. さらに, 第 6 走行車線では巡回軌跡はドライバよりも外側を走行しており, ステアリング操作も類似していない上, 車体の挙動もドライバより急であった. 上記の 3 走行車線の実験結果から, 第 4 走行車線から第 6 走行車線に移行するにつれて, ドライバとの類似性が低下していることが確認できた. この原因について私はモード切替に原因があると考えた. モード切替というのが判断モデルに問題があるわけではなく, モード分割に問題があると考ええる. 本来はコースにあったモード分割を行う必要があると私は考える. コース形状を見ると, 市街地コース 2 は市街地コース 1 と比較するとおおよそ半分の大きさである. 我々の研究では, 人間のステアリング操作は前半クロソイド区間, ステアリング一定角区間, 後半クロソイド区間の 3 つに分けて巡回操作を考えてきたが, 人間がその 3 つをどのような割合で使い分けられているかは今回の研究では明らかにしておらず, 市街地コース 1 で行った運転情報収集

実験よりパラメータを同定した判断モデルを使用して実験を行った。日常的に我々が同社を運転して交差点を右折する時にステアリングを一定に保つ割合がどの形状の交差点でも同じであるとは考えにくい。経験的に考えると、大きな交差点では走行距離が長くなるためステアリングを一定に保つ区間は長くなると予測される。また、形状の大きな交差点ではステアリングの操舵角も小さく、ステアリングを切り込む時間も短くなるので必然的にステアリング一定角区間は長くなることが考えられる。しかし、形状の小さい交差点でステアリング一定角区間について考察してみる。形状の小さい交差点は走行距離も短く、小さい範囲で旋回させなければいけないため、ステアリングの操舵角は大きくなる傾向がある。そのためステアリングを切り込む時間、切り戻す時間は必然的に長くなり、ステアリング一定角区間の割合は小さくなると考えられる。このため、本来は交差点形状によって我々が提唱する 3 つステアリング操作区間の割合は適切でなければならない。

以上の理由から考察を行うと、第 4 走行車線はモデル同定を行った市街地コースとコースの大きさが近かったため走行軌跡、ステアリング操作、車両挙動、モード分割がドライバと比較すると類似する結果となった。しかし、交差点形状が小さい第 5、第 6 走行車線では、そもそも操作区間の割合が同定した判断モデルと異なるため、モード切替が適切に行われず旋回軌跡やステアリング操作などに影響が出たと考えられる。

この問題を解決するためには人間が交差点形状によってどのようにステアリング操作区間を割り当てているか解明させなければいけない。そのアルゴリズムを解明し、その結果に基づいた汎用的な判断モデルを設計しなければならない。

また、動作モデル部分について見てみると、提案モデルはどの車線においても旋回先の目標には旋回することは確認できた。これはモデル式に目標値との偏差を小さくする特性を持ったフィードバック構造を取り入れたことで、目標変化に対応可能になったためであると推測できる。よって、動作モデルに関しては他の交差点においても旋回が可能であるという汎用性を示すことができた。

故に、本提案モデルは同定した交差点と大きさが近いとドライバと類似した結果を示すことができたが、形状が小さくなるにつれてドライバとの類似性が低下する結果となった。これはドライバが本来交差点ごとにステアリング操作区間の割合を変化させて旋回を行っているが、本実験では単一の判断モデルを使用していたためモード切替判断が適切に行われなかったことが原因であると考えられる。この問題を解決するには人間がどのようにステアリング操作区間の割合を変化させているかを解明し、その結果に基づいた汎用的なステアリング操作切替判断モデルを設計してドライバ旋回操作モデルに組み込まなければならない。また、動作モデルは目標が変化しても旋回可能であったため、他の形状の交差点に対しても旋回可能であるという可能性を示すことができた。

Table 5.3 市街地コース 2 各走行車線の走行軌跡の誤差

目標点誤差[m]	中間目標点	最終目標点
第4走行車線	0.592	0.358
第5走行車線	0.185	0.077
第6走行車線	0.894	0.111

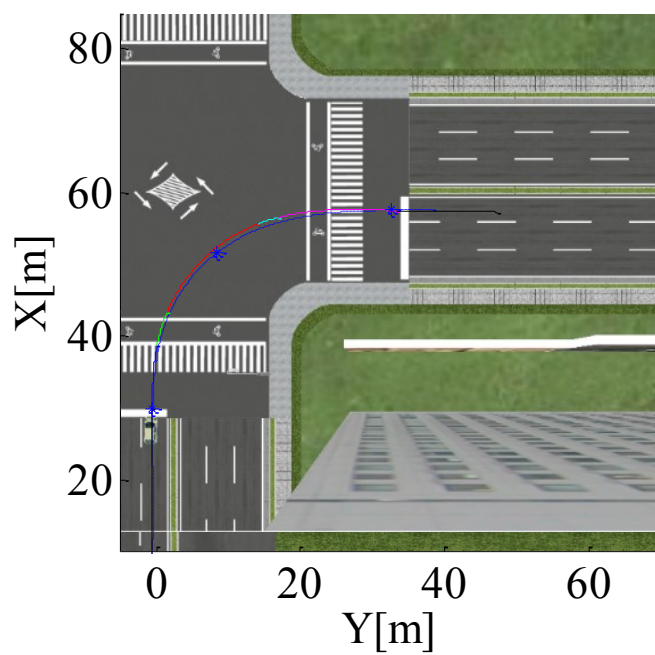


Fig 5.7 第4 走行車線(巡回軌跡, 制御目標点)

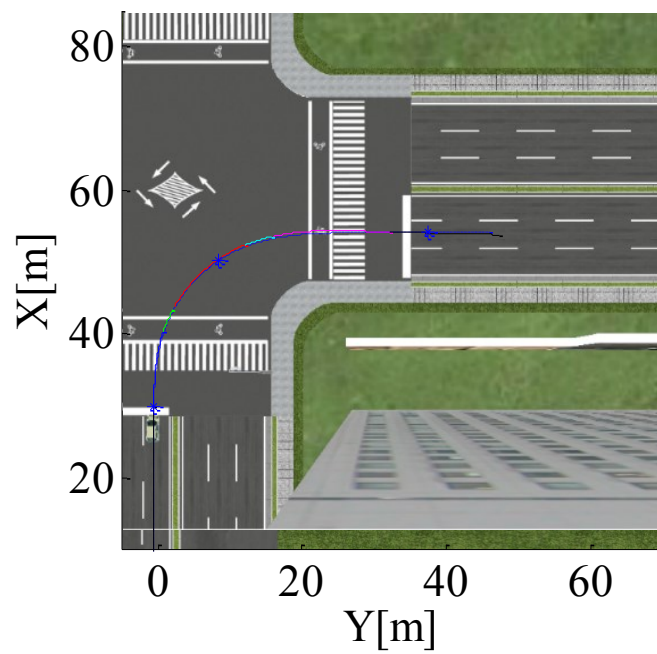


Fig 5.8 第5 走行車線(旋回軌跡, 制御目標点)

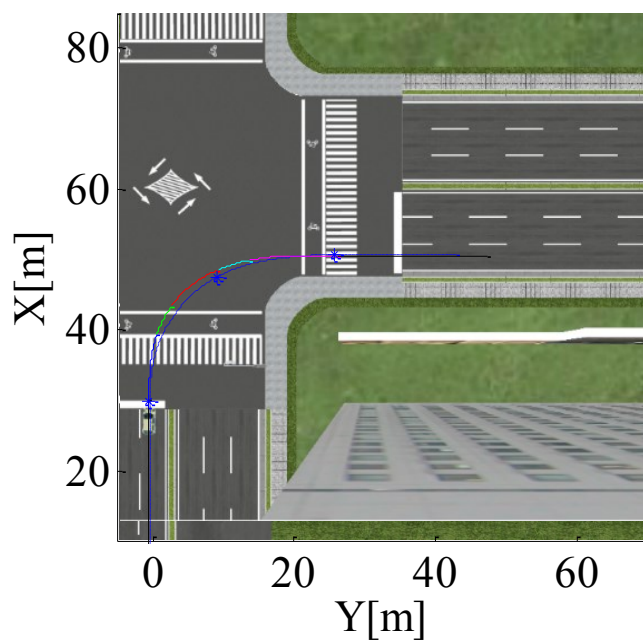


Fig 5.9 第6 走行車線(旋回軌跡, 制御目標点)

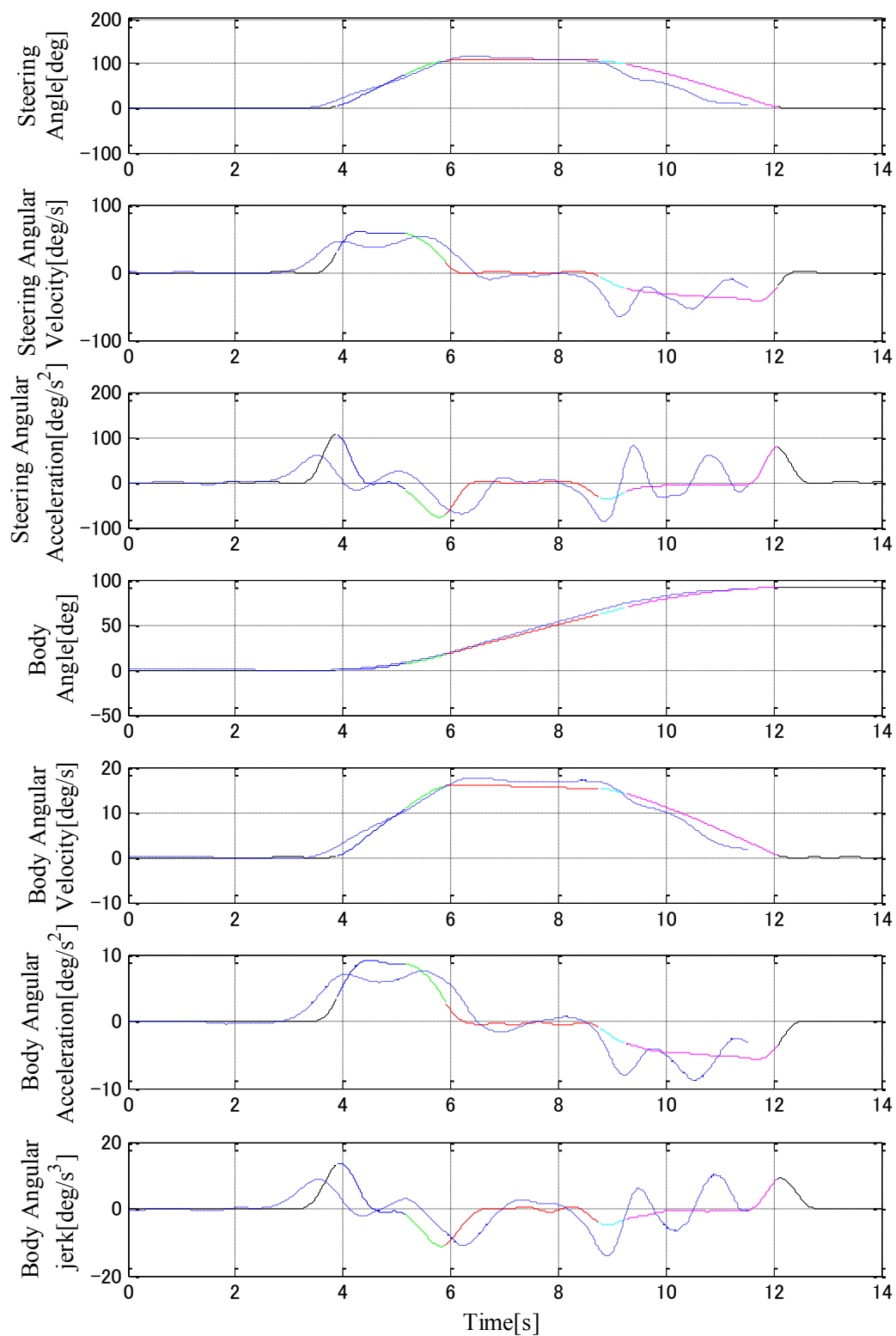


Fig 5.10 第4 走行車線自律旋回走行実験結果
(ステアリング角度・角速度・角加速度, 車体角度・角速度・角加速度・躍度)

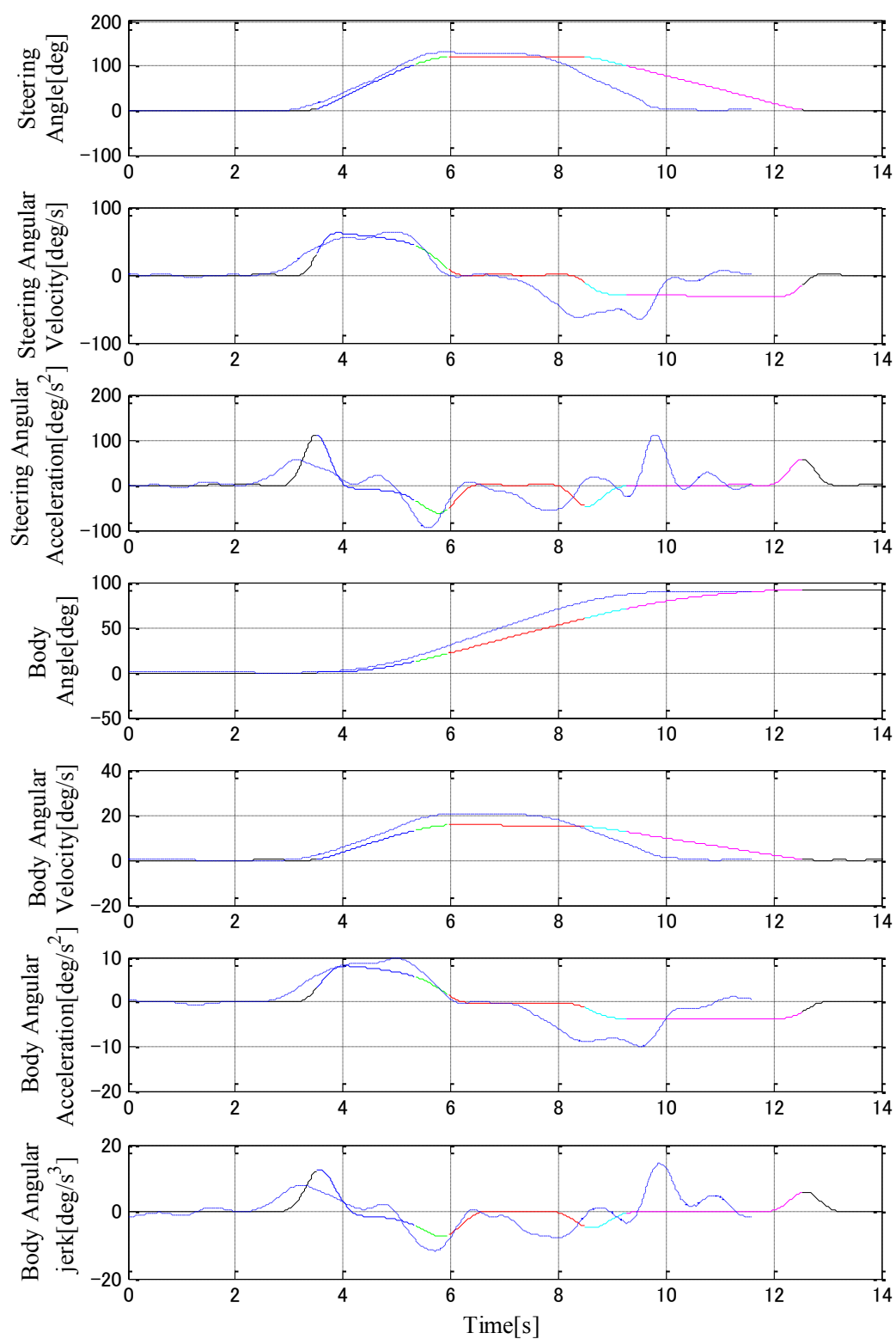


Fig 5.11 第5 走行車線自律旋回走行実験結果
(ステアリング角度・角速度・角加速度, 車体角度・角速度・角加速度・躍度)

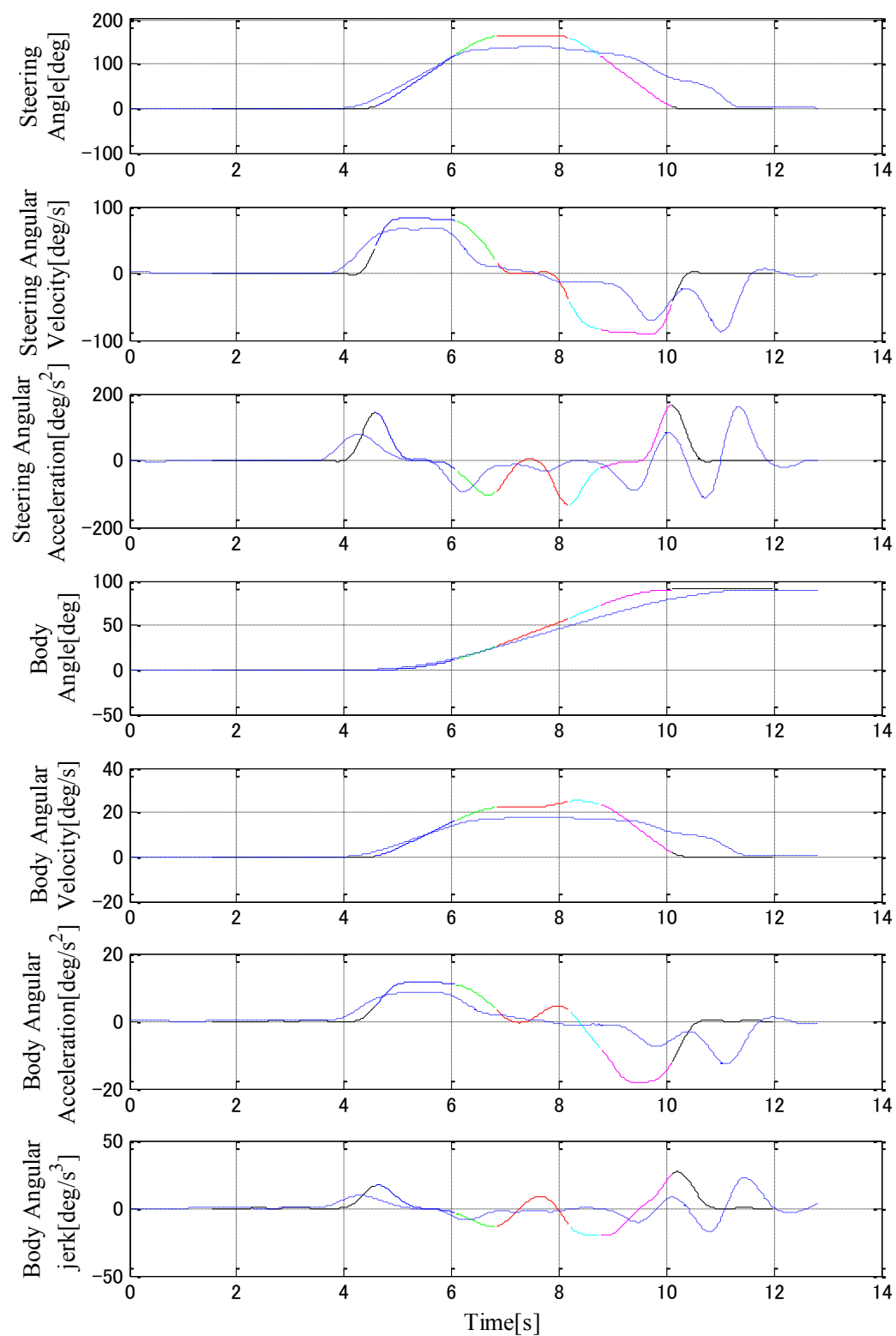


Fig 5.12 第6 走行車線自律旋回走行実験結果
(ステアリング角度・角速度・角加速度, 車体角度・角速度・角加速度・躍度)

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

本稿では、ドライバと類似した旋回を行う車両運動制御システムの実現を目的として、ドライバ使用の外部環境情報に基づき、新たにフィードバック構造を導入したドライバ旋回操作モデルを提案し、自律旋回走行実験を行い、客観的に評価して提案手法が有効で、かつ、汎用的であるか検証した。

まず、ハイブリッドシステムに基づくドライバ運転行動モデル構築を行うために、DSにて運転情報実験を行った。本研究では提案する自律走行車の車両運動制御システムはハイブリッドシステム構造としており、離散的な判断と連続的な動作に分けてドライバの運転行動をモデル化するハイブリッドシステムに基づく運転行動モデルと構造は類似しており、同定したモデルをそのままDSの車両運動制御システム部分に実装が可能である。本研究では、先行研究で明らかとなった外部環境情報に基づき、提案モデルが目標とする経路点の点数を交差点の中間と旋回後のみに設定し、ドライバと同様の点数に変更を行った。また、各モードに対してドライバと同様の目標となるよう各モードの経路点の割り振りを再検討した。そして、ドライバが使用している外部環境情報に基づき動作モデル、判断モデルの同定を行った。これまでのドライバモデルではフィードフォワード制御のモデルを採用してきたが、本提案モデルでは軌道追従性と目標変化に対応するためにフィードバック制御を導入した新たなドライバ旋回操作モデルを提案した。そして、同定したモデルをDSの車両運動制御システムに実装して自律旋回走行実験を行った。有効性を検証するため同定したコースにて自律走行を行った結果、本提案モデルは旋回軌跡、ステアリング操作、車両挙動についてドライバとの類似性が確認できた。また、汎用性を検証するために同定を行ったコースとは異なる実験環境にて自律旋回走行実験を行った結果、同定を行った交差点から形状が小さくなるにつれてドライバとの類似性が低くなるという結果が得られた。これはモード分割が本来交差点毎に異なるため、モード切替タイミングが適切でなかったことが考えられる。また、動作モードに関しては目標が変化しても旋回できているため、他の交差点でも本提案モデルは旋回可能であるという可能性を示すことができた。

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，ドライバの旋回時にステアリング操作を再現するドライバモデルの構築を行った．しかし，交差点形状が大きく異なる環境では，類似性が低下する結果となった．その原因として，モード切替のタイミングがドライバと異なっていたことが考えられる．本来の走行では，交差点形状が異なるとステアリング操作を切り替えるタイミングや操作区間の割合は異なってくる．様々な交差点形状に対して，人間はどのようにステアリング操作を変化させているのか，そのアルゴリズムを解き明かし，その結果に基づいた判断モデルをドライバ旋回操作モデルに組み込むことが必要であると考ええる．また，動作モデル部分に関して，本提案モデルでは試行錯誤的にパラメータをチューニングしたが，今後は動作モデルのパラメータ同定手法を確立させなければいけない．

今後の予定は更なるモデル改良を行い、様々な形状の交差点や速度域でも本提案モデルが有効であるか検証する必要がある．

参考文献

- [1] “平成 27 年中の交通事故死者数について”，総務省統計局「政府統計の総合窓口」
交通事故統計(2016)
[online] <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001142617>
- [2] “平成 27 年中の交通死亡事故の発生状況及び道路交通法違反取締り状況について”，
総務省統計局「政府統計の総合窓口」(2016)
[online] <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001150519>
- [3] “平成 27 年における交通事故の発生状況”，総務省統計局「政府統計の総合窓口」
(2016) [online] <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001150496>
- [4] 安部博晶，中易秀敏，三好哲也，“自動車運転時の知覚・認知・応答過程でのヒューマンエラー解析”，日本機械学会九州支部講演論文集 2010(63)，pp.325-326(2010)
- [5] 田中啓人，伊藤誠，稲垣敏之，“歩行者回避におけるドライバのヒューマンエラー”，電子情報通信学会技術研究報告. SSS，安全性 110(242)，pp.5-10(2010)
- [6] 民田 和也，二瓶 美里，小竹 元基，鎌田 実，“2208 高齢者講習における運転実習時の記録データに基づく高齢ドライバの運転行動分析”，交通・物流部門大会講演論文集，Vol.19，No.10-54，pp.283-286，(2010)
- [7] 二宮芳樹，竹内栄二郎，加藤真平，鈴木達也，村瀬洋，“高齢者に高度運転支援のための運転知能の実現”，交通・物流部門大会講演論文集 2014(23)，pp.297-298(2014)
- [8] 山本真晴，Anh-TuanHoang，小出哲士，“運転支援者のためのリアルタイム道路標識検出処理の FPGA 実装”，研究報告システムと LSI の設計技術(SLDM)2014-SLDM-168(18)，pp.1-6(2014)
- [9] 山口拓真，稲垣伸吉，鈴木達也，“プロセスの順序性に着目した事象駆動型システムの確率的故障診断”，計測自動制御学会論文集 50(2)，pp.147-154(2014)
- [10] 津川定之，“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)
- [11] 富沢哲雄，平井雅尊，村松聡，岩井純一，佐藤昌則，御堂丸圭介，工藤俊亮，末廣尚士，“公共空間で自律走行可能な電動カートの開発”，つくばチャレンジ 2010 開催記念シンポジウム参加レポート (2011)
- [12] 早川聡一郎，池浦良淳，堀木亮祐，“ハイブリッドシステムに基づくドライバ運転行動モデルを用いた自律走行車の制御システム設計”，平成25年電気学会産業応用部門大会講演会講演概要集2-S8-5，“II -37”-“II -40”(2012)
- [13] 山田晋，鈴木達也，稲垣伸吉，早川聡一郎，土田縫夫，津田太司，“ハイブリッドシステムモデルに基づく運転行動解析データクラスタリング手法からのアプローチ”，人間工学会論文集，Vol.42，No.3，pp.181-189(2009)

- [14] 佐々木勇介, 山口拓真, 川島明彦, 稲垣伸吉, 鈴木達也, “走行/駐車的时间経過マルコフモデルと動的計画法に基づく車の使用予測”, 計測自動制御学会論文集 52(11), pp.605-613(2016)
- [15] 菅沼直樹, “自動車の自動運転技術の動向と開発実例”, 電子情報通信学会誌 Vol.98, No.1, pp.48-53(2015)
- [16] ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, “リスクポテンシャル予測による自動車の障害物回避運動制御”, 計測と制御 Vol. 54, No. 11 pp. 820-823(2015)
- [17] 菅沼直樹, 林悠太郎, 永田大記, “自動運転自動車の交差点走行のためのパスプランニングと検証”, 日本機械学会交通・物流部門大会講演論文, 2014(23), pp.293-296
- [18] 北原圭, 玉川迅, 吉田秀久, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 毛利宏, “低速走行時の操舵負担解消を目指した新しい操舵系の開発とその有効性”, 日本機械学会論文集 Vol.82, No.840 pp.15-00687(2016)
- [19] トヨタ自動車、伊勢志摩サミットに、一般道での自動運転をめざす新型自動運転実験車（Urban Teammate）を提供, TOYOTA Grobal Newsroom
[online] <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/12143482> (2016)
- [20] Manana S. Netto, Salim Chaib, and Said Mammam. “Lateral adaptive control for vehicle lane keeping”, IEEE Proceedings of American Control Conference, Vol. 3, pp.2693-2698(2004)
- [21] Ardalan Vahidi, and Azim Eskandarian, “Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems Vol.4, No.3 pp.143-153(2003)
- [22] 山口拓真, 奥田裕之, 鈴木達也, 早川聡一郎, 池浦良淳, 武藤健二, 伊藤隆文, “先読み運転を可能にするスーパーバイザー型運転支援の提案”, 自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集, pp.76-80(2016)
- [23] 内田龍貴: “ハイブリッドシステムに基づくドライバ旋回操作モデル同定と有効性検証”, 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻平成 24 年度修士学位論文
- [24] 鈴木崇恭: “外部環境情報に基づくドライバ旋回行動モデルの構築と有効性検証”, 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻平成 27 年度修士学位論文
- [25] 柴山森太郎: “クロソイド曲線に基づくドライバ旋回操作モデル同定”, 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻平成 26 年度修士学位論文
- [26] 奥田裕之, 早川聡一郎, 鈴木達也, 土田縫夫, “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)
- [27] 赤松幹之, 他, “自動車技術ハンドブック～人間工学編～第 7 章ドライバ行動, ドライバモデル”, pp.572-578(2016)
- [28] 奥田裕之, “OH-Pack : Okuda Hybrid-system Package Ver. 0.5”,
[online] http://www.suzlab.nuem.nagoya-u.ac.jp/~okuda/ohpack_get.html(2013)

謝辞

本研究を進めるにあたり，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 池浦良淳 教授，早川聡一郎 准教授，澤井秀樹 研究員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ともに，多数のご教示，ご助言を賜りましたメカトロニクス研究室の加藤典彦准教授に厚く御礼申し上げます．

さらに，今回判断モデルの同定にしたハイブリッドダイナミカルシステム同定用のツールボックス，OH-Pack の開発者である名古屋大学大学院工学研究科機械工学専攻 奥田裕之 助教の開発にかけられたご尽力に敬意を表します．

また，同じ自動車関係の研究に従事した有住卓郎氏，山田純氏，石川拓磨氏，今井啓人氏，小村到，谷寛貴氏，田中捷氏，戸田雄也氏には本研究を行う上で意見交流をし，共に良い刺激となって研究を行うことができました．厚く御礼申し上げます．

同じ研究チームだった竹中慶二氏，そして学校に来るのが遅く一緒にいる時間が少なかった水谷謙太氏には実験を行う上で様々な支援や協力をしていただき感謝申し上げます．水谷氏は引き続き本研究の発展のため日々精進してください．

そして，先輩方，同期各氏，後輩各氏のおかげで，充実した研究室生活を送ることができました．これら各位のご指導，ご協力に対し心より御礼申し上げます．

最後に，学部・修士の間，惜しみない援助を送ってくださった家族のお陰で充実した素晴らしい勉強・研究室生活を送ることができました．感謝の気持ちを述べることで謝辞の最後とさせていただきます．