

平成 29 年度 修士学位論文

ハイブリッドシステム表現に基づいた
ドライバ旋回行動モデルの
交差点形状対応の検討

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

416M144 水谷謙太

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	6

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	7
2.2	運転行動モデルと車両運動制御システム	9

第3章 実験装置と実験環境

3.1	三面型ドライビングシミュレータの概要	10
3.2	実験環境	14
3.2.1	市街地コース1	14
3.2.2	市街地コース2	18
3.2.3	市街地コース3	22

第4章 ドライバ旋回行動モデルの構築

4.1	運転情報収集実験	26
4.1.1	実験方法	26
4.1.2	運転情報収集実験結果	29
4.2	ドライバ旋回行動モデルのモード数	37

4.2.1	ドライバ旋回行動モデルのモード数決定	37
4.2.2	ドライバ旋回行動モデルのモード分割	40
4.3	旋回行動区間の抽出	41
4.3.1	旋回開始点の決定	41
4.3.2	旋回目標点の決定	44
4.4	ステアリング操作切替判断モデルの同定	51
4.4.1	ステアリング操作区間割合と交差点形状の相関	51
4.4.2	ドライバ旋回行動モデルの判断モデル	53
4.5	ドライバ旋回行動モデルの動作モデル同定について	56
第5章 結論		
5.1	本研究のまとめ	57
5.2	今後の課題	58
参考文献		59
謝辞		62

第 1 章

序論

1.1 研究背景

近年，日本の交通事故発生件数・死亡者数は 2000 年を境に減少傾向にある．道路交通法の改正や，自動車メーカーによる車両の安全性の向上など様々な方面から交通事故への取り組みがなされており，交通事故死亡者数はピークの 1970 年から約 4 分の 1 程度にまで減少している(Fig.1.1)．しかし，平成 29 年の事故発生件数は 47 万 2069 件，死亡者数 3694 件と依然として高い水準を示しており，大きな社会問題であるといえる^[1] [3]．

このような交通事故の原因の大半は，ヒューマンエラーにより引き起こされるものが多くを占めている^[4][6]．そのため，人間の注意力の欠如を補完し，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ており，その運転支援システムの一部ではすでに実用化に至り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][16]．

アウディ社は 2017 年 7 月に世界で初めて自動運転レベル 3 に対応する自動運転機能「Audi AI トラフィックジャムパイロット」を市販車「A8」(Fig.1.2)に搭載すると発表した．渋滞中の高速道路を時速 60km 以下で走行中という限られた環境下ではあるが，レベル 3 の条件付き自動運転を実現する世界初の量産車となる．また，レベル 4 の自動運転機能を持つコンセプトカー「Audi Elaine」を東京モーターショー2017 で披露し，話題を呼んでいる．「Audi AI トラフィックジャムパイロット」の機能を拡張した「Audi AI

ハイウェイパイロット」を用いることにより、高速道路を時速 130km までの範囲で自律走行し、さらに駐車場では空いたスペースを自ら見つけて自動で駐車するなど、「A8」よりも自動運転の作動領域を広げている^[17]。

また、トヨタ自動車では 2017 年夏に最新の運転支援システムを搭載した新型カムリを発表した(Fig.1.3)。ミリ波レーダーと単眼カメラを併用した検知センサーにより、歩行者を検知できる自動ブレーキやステアリングアシスト付きレーン逸脱警告システムなど最新の運転支援技術を惜しげもなく使用している^[18]。

近年、自動車メーカーによる運転支援システムの研究開発は上記の 2 社だけに限らず、世界各国で盛んに行われている。上記のような自律走行や自動車自身が考えて支援を行う先進運転支援システム、ADAS (Advanced Driver Assistance System) が注目されている^{[19][21]}。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、事故などの可能性を事前に回避する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。この ADAS の開発にはコンピュータ上でシミュレーションを行い、システムの有効性検証を行っている。その後、実際に実験車に実装して製品化に向けた試験を行うようになっている。しかし、このシミュレーションはコンピュータ上でドライバ操作を数値モデルとして実装し、走行シミュレーションにより検証を行うのみであり、人間がドライバとして介入する余地はない。より高度な運転支援を目指す ADAS には、高精度なシミュレーション結果が必要不可欠であるため、実車実装前のシミュレーションで用いられるドライバモデルはより精度の高いものである必要がある。そのため、より人間の運転行動の再現精度が高いドライバ運転行動モデルを必要としているのが現状である。ADAS の制御システム構成は、ローカライザー、マップパー、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。

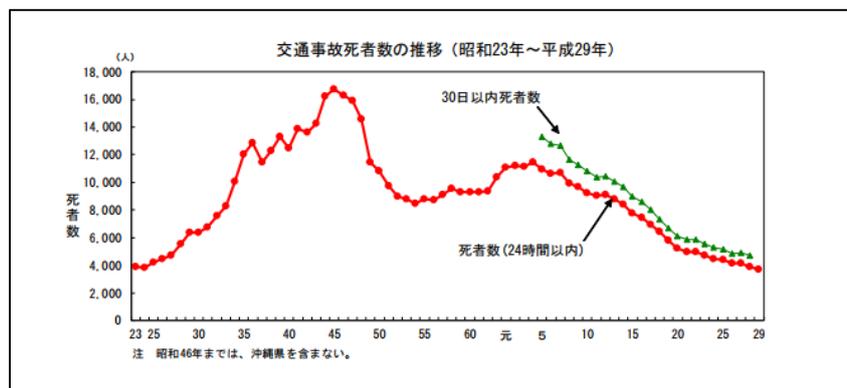


Fig.1.1 交通事故死亡者数の推移(2017)



Fig.1.2 Audi 社 新型「A8」(2017)



Fig.1.3 トヨタ自動車 新型カムリ(2017)

1.2 本研究の目的

前節で述べたように、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行動の再現性が低く、有効なものが存在しないのが現状であり、自動運転や高度な運転支援を行うには、より人間の運転行動の再現精度が高いドライバ運転行動モデルが必要である。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^[22]。これらのドライバ運転行動モデルはドライバの再現精度が高いため、無論 ADAS の開発シミュレーションにも使用できる。これまで本研究室では、停止線への停止行動を対象としたドライバ運転行動モデル構築を行った。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モデルを同定した。そして同定した減速行動モデルを実験の実験車の車両運動制御システムに実装し、操作性、乗り心地の両方の観点からドライバと類似した運転行動の再現を示した。

また、本研究室では減速行動モデルのみならず、直線道路における加速行動、定速行動、高速道路における前方車追従行動など、様々な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ドライバ運転行動モデルが構築できていないのが現状である^{[24]-[28]}。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、フィードフォワード制御であった従来の動作モデルをフィードバック構造を導入することによって、軌道追従性、操作再現性がともに優れたドライバ旋回操作モデルを構築した。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実装し、有効性の検証を行った結果、旋回軌跡、ステアリング操作、車両挙動についてドライバの運転行動との高い再現性が確認された^[27]。しかし、汎用性の検証としてモデル同定を行った

コースと異なるコースを用いて自律走行実験を行った結果, モデル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の運転行動との類似性が低くなるという結果が得られた. 動作モデルに関しては目標が変化しても旋回行動ができていたため, 他の交差点でも旋回可能であるという可能性を示すことができたが, 判断モデルに関しては, モード分割が交差点毎に異なることが考慮されていなかったため改善の余地があった. そこで本研究では, ステアリング操作区間割合と交差点形状の相関を考慮しドライバ旋回行動モデルの判断モデルに組み込むことで, 様々な形状の交差点で対応可能なドライバ旋回行動モデルの構築を目指す.

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大型3面型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、複数の交差点の旋回行動を対象とし、収集した運転情報から旋回行動モデルの判断モデル同定を行う。第5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について説明する。

2.1 ハイブリッドシステムに基づく人間行動モデル

人間が何らかのタスクを行う際、視覚や聴覚といった五感を通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を離散的な判断により切り替えることで、複雑なタスクを達成している。そこで、本研究室では人間の複雑な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^[23]であるハイブリッドシステム表現を用いている。ハイブリッドシステムに基づいた人間行動モデルを Fig.2.1 に示す。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)、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)、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。

本研究では以下の手順によりハイブリッドシステム表現に基づく人間の旋回行動モデルを構築する。

1. 収集した運転情報から異なる交差点形状に適応できるドライバの旋回動作モード数を決定する。
2. 各動作モデル間の遷移条件を SVM(Support Vector Machine)を用いて同定する (判断モデル)
3. 分割された各動作モードを選定した外部環境情報をパラメータとした旋回動作モデルとして同定する (動作モデル)

1で動作モード数を求め、2と3のモデル構造手法を用いてモデル同定を行う。本稿は1, 2の手順までを説明しており、この手順を踏まえた3の方針を決定している。

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でも交差点右折時における旋回行動に着目している。本研究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ているため、モデルを単純化する必要がある。

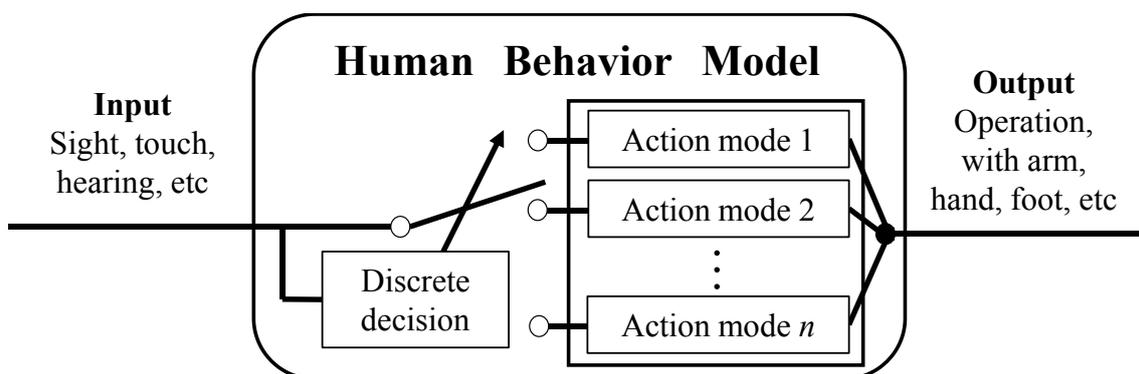


Fig.2.1 ハイブリッドシステム表現に基づく人間の運転行動モデル

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を Fig.2.2 に示す。プランナーからの運転行動指示に従い、いくつかの運転制御器と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、自律走行車やドライバ運転行動モデルに関する研究が数多く行われているが、人間のステアリング操作などの運転特性を考慮した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動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、前節で述べた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。そのため同定した人間の運転行動モデルをそのまま車両運動制御システムに実装することが可能である。

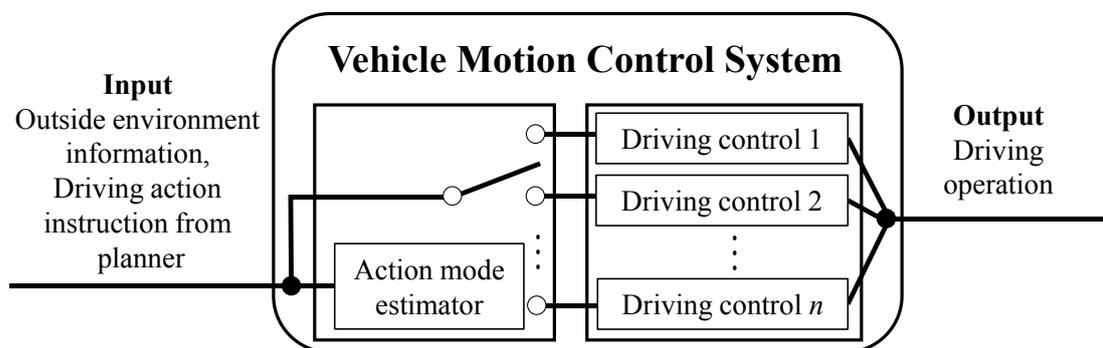


Fig.2.2 本研究室採用の車両運動制御システム

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、本研究で使用した実験環境について説明する。

3.1 三面型ドライビングシミュレーターの概要

本研究で使用する DS の構成図を Fig.3.1 に、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 は、従来研究と同様に 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、エンジン音出力用スピーカー、サイドミラー用、ルームミラー用、スピードメータ表示用の計 4 台の小型液晶モニターで構成されている。ここで PC の情報および詳細を Table3.1 に示す。DS 上部に設置された 3 台のプロジェクタから 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ドライバから見た車両の横方向の景色も再現可能であり、自動車を実際に運転しているかのような DS への没入感を増大させている。DS にはインパネやシートベルトなど、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雰囲気を実車に近づけている。また、小型液晶モニターによりサイドミラーやルームミラーが再現しており、ドライバは運転時に実際に見ている間接視界を見ることが可能である。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を再現

し、普段自動車を運転できるように設計されている。また、スピーカーは運転に支障をきたすことがないように運転席後方に設置しエンジン音を流す。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に考慮され設計されているため、より正確な運転情報を収集することが可能である。

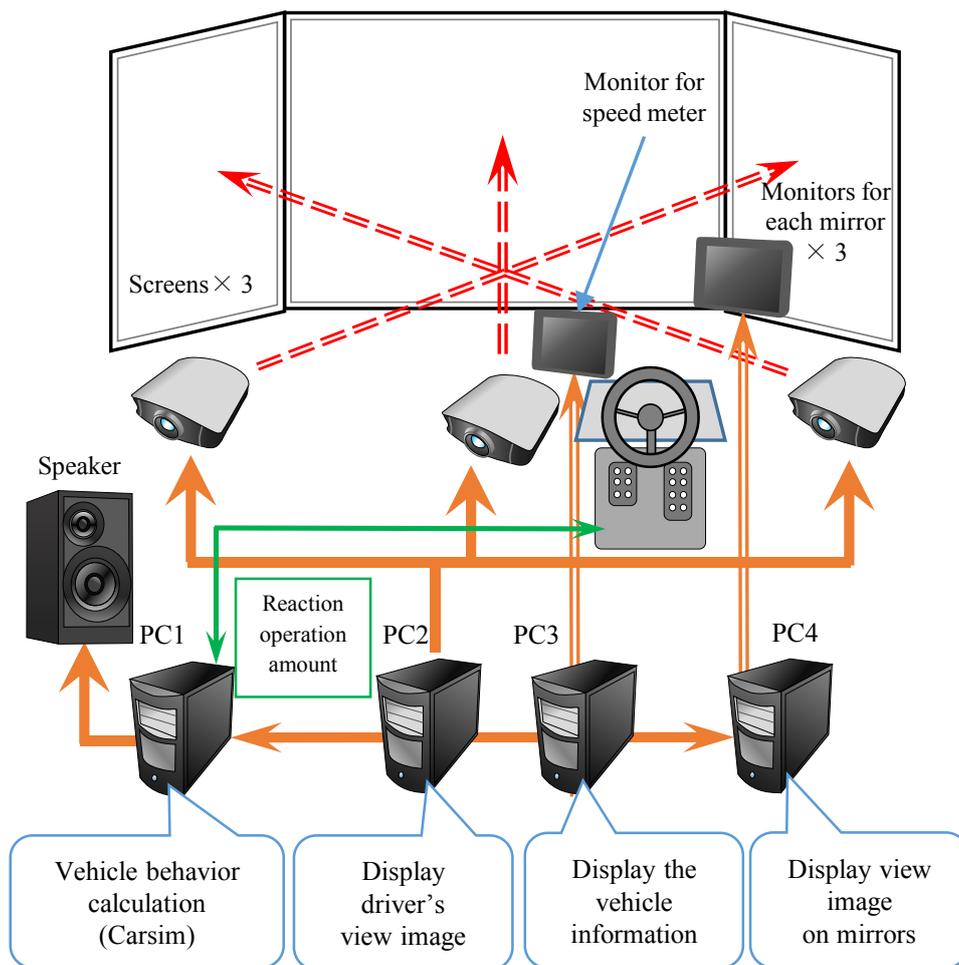


Fig.3.1 DS 構成図

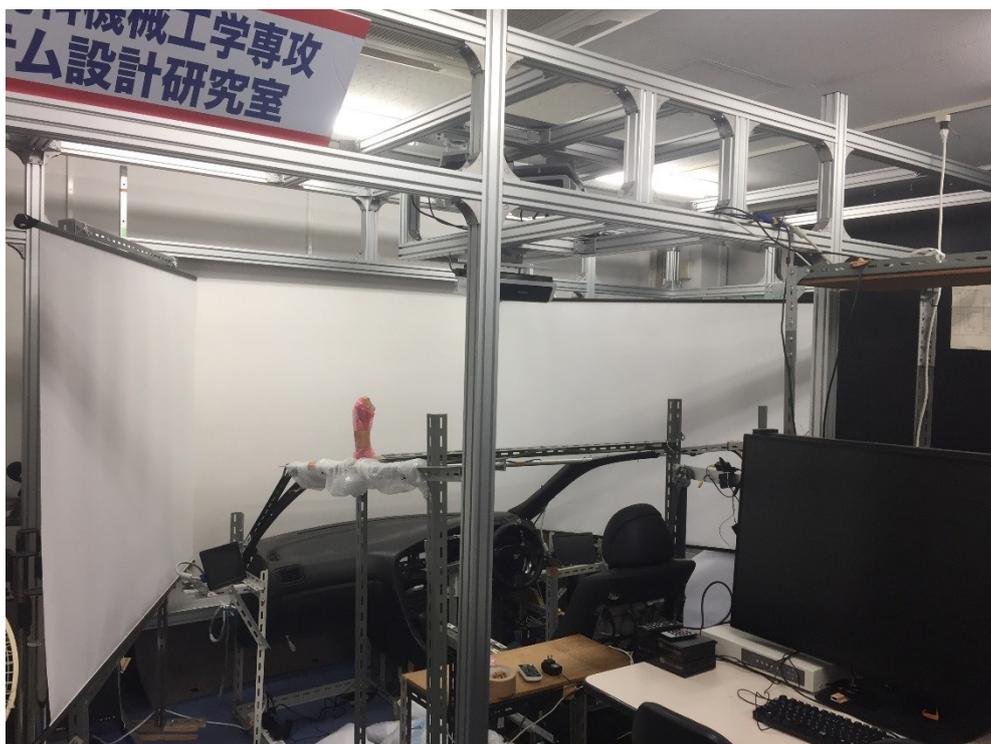


Fig.3.2 DS の外観



Fig.3.3 実験の様子

Table 3.1 搭載 PC の詳細

	For control (PC1)	For projection (PC2)	For speedmeter (PC3)	For mirror (PC4)
OS	Windows XP Home Edition	Windows XP Professional	Windows XP Professional	Windows XP Professional
CPU	Core 2 Duo 3.16GHz	Core 2 Quad 2.40GHz	Core 2 Duo 2.80GHz	Pentium D 3.40GHz
Memory	3.30GB RAM	2.98GB RAM	2.00GB RAM	3.20GB RAM
Graphic board	NVIDIA GeForce 9500GT	NVIDIA Quadro FX5500	NVIDIA GeForce 8400GS	NVIDIA GeForce 9800GT
Configuration software	CarSim (ver. 5.15) C++ Builder DirectX library	Visual C++ DirectX library	Visual C++ Visual C## DirectX library	Visual C++ DirectX library
Display device	Standard monitor	X4240×3	Small liquid crystal monitor	8.0 inches LCD monitor×2 10.2 inches LCD mintor
Connected device	T500RS GT RACING WHEEL Speaker	—	—	—

3.2 実験環境

本研究では、DS を用いて運転情報収集実験を行い、旋回行動モデルの交差点形状対応のための情報を取得する。その際、DS 上の市街地を模擬したコースを 3 種類用意し実験を行った。それぞれ市街地コース 1、市街地コース 2、市街地コース 3 と呼称し、本節では、その実験環境についてそれぞれ説明していく。

3.2.1 市街地コース 1

前節で述べた市街地コース 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 Fig.3.9 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、進入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、交差点に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。

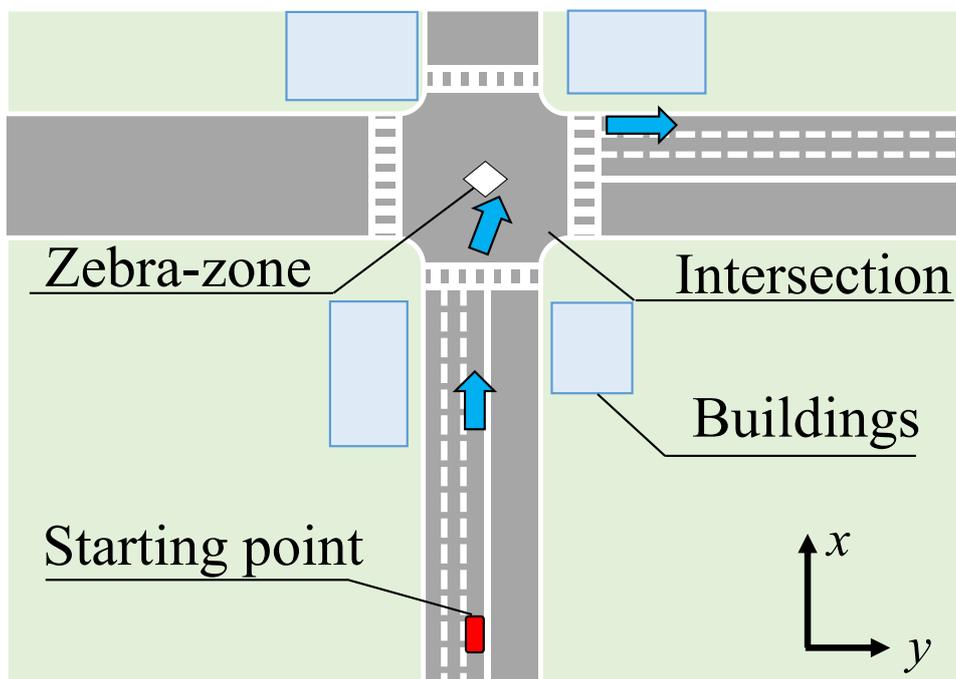


Fig.3.4 市街地コース1 模式図

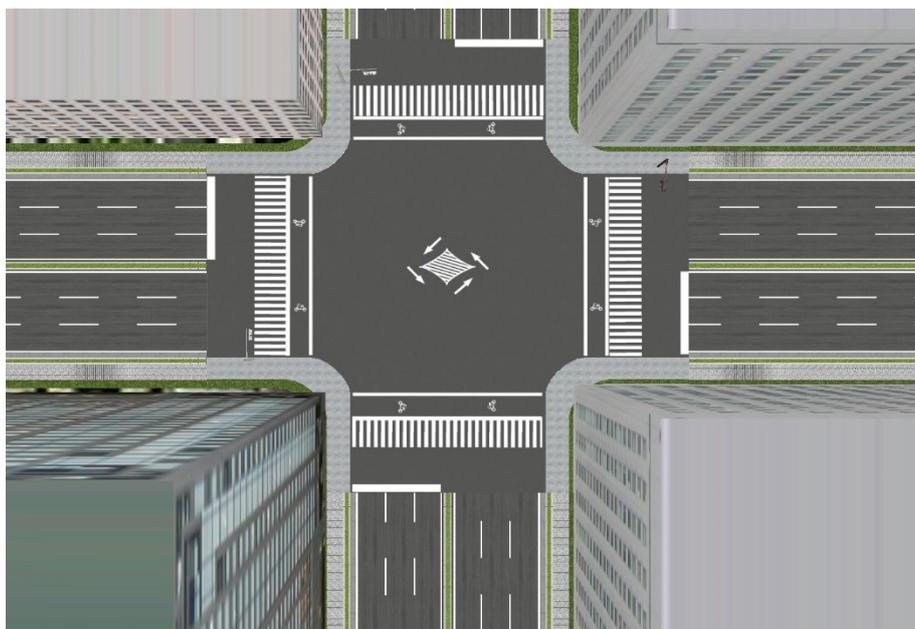


Fig.3.5 市街地コース1 の上空からの映像例



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(旋回中)



Fig.3.9 市街地コース1の映像例(旋回終了時)

3.2.2 市街地コース 2

次に市街地コース 2 の模式図を Fig.3.10 に、上空からの映像例を 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 Fig.3.15 に示す。市街地コース 2 は Fig.3.10 に示すように 2 本の片側 2 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、進入側の道路の全長は約 200m である。ドライバは市街地コース 1 と同様の条件の下、実験を行う。また、天候や路面摩擦係数、対向車や歩行者などの自転車周囲の環境も市街地コース 1 と同様である。

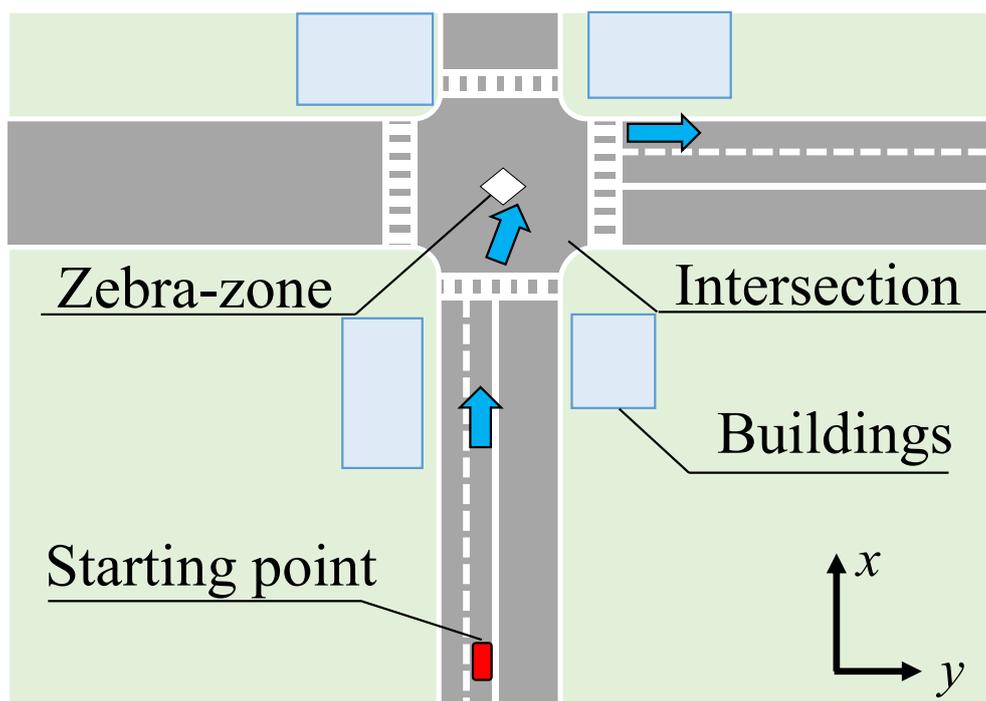


Fig.3.10 市街地コース 2 模式図



Fig.3.11 市街地コース 2 の上空からの映像例



Fig.3.12 市街地コース 2 の映像例(スタート時)



Fig.3.13 市街地コース 2 の映像例(旋回直前)



Fig.3.14 市街地コース 2 の映像例(旋回中)



Fig.3.15 市街地コース 2 の映像例(巡回終了時)

3.2.3 市街地コース 3

次に市街地コース 3 の模式図を Fig.3.16 に、上空からの映像例を Fig.3.17 に、運転席から見える交差点の映像例を Fig.3.18 から Fig.3.21 に示す（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）。市街地コース 3 は Fig.3.16 に示すように片側 1 車線の直線道路と片側 2 車線の直線道路が交わる交差点で、スタート側の道路が片側 1 車線で全長は約 200m、進入側の道路が片側 2 車線で全長は約 200m である。ドライバは市街地コース 1 と同様の条件の下、実験を行う。また、天候や路面摩擦係数、対向車や歩行者などの自車周囲の環境も市街地コース 1 と同様である。

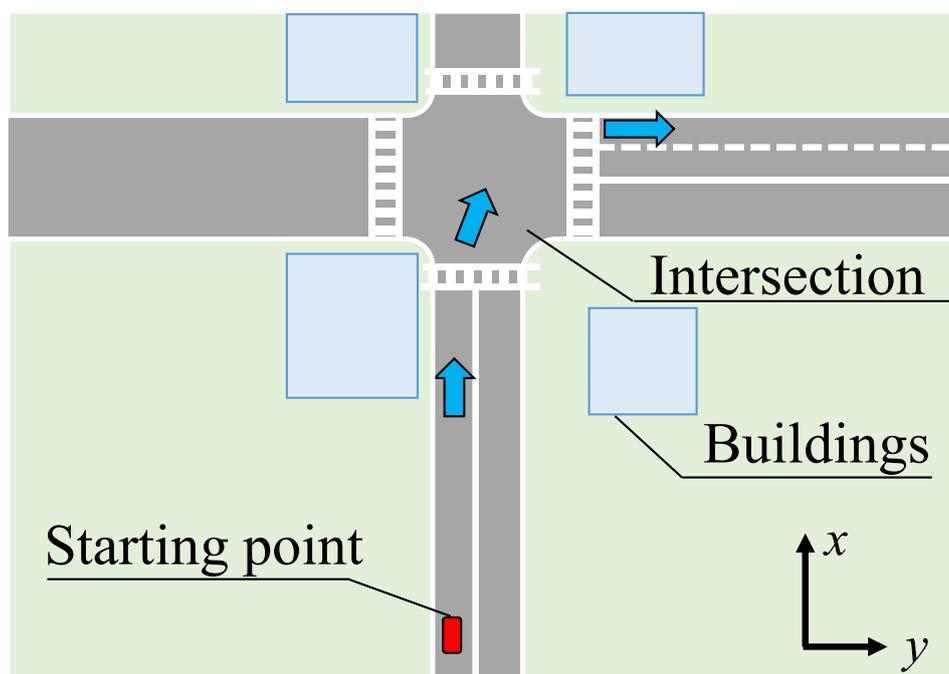


Fig.3.16 市街地コース 3 模式図



Fig.3.17 市街地コース 3 の上空からの映像例



Fig.3.18 市街地コース 3 の映像例(スタート時)



Fig.3.19 市街地コース3の映像例(旋回直前)



Fig.3.20 市街地コース3の映像例(旋回中)



Fig.3.21 市街地コース3の映像例(旋回終了時)

第4章

ドライバ旋回行動モデルの構築

本章では、第2章で示したハイブリッドシステム表現に基づい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行動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を基にドライバ旋回行動モデルの動作モード数決定について述べる。4.3節ではドライバ旋回行動モデルの構築にあたり、4.4節では4.2節で決定した旋回行動モデルの動作モード数に基づき、判断モデル式の構築を行う。

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行動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節で実験環境を用いてコンピュータ上のみで実験を行った。運転情報収集実験は、市街地コース1, 2, 3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。本研究で使用する実験コースには、実験車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。ドライバー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、交差点右折時のドライバー旋回行動モデル同定のため、市街地コース1で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。さらに市街地コース2, 3では2パターンの旋回方法を用意した。それぞれの市街地コースの旋回パターンをFig.4.2, Fig.4.3に示す。市街地コース1と同様に、交差点に進入したのちそれぞれの車線に進入するパターンである。尚、走行回数は各パターン10本ずつ走行し、被験者は1名で実験を行った。

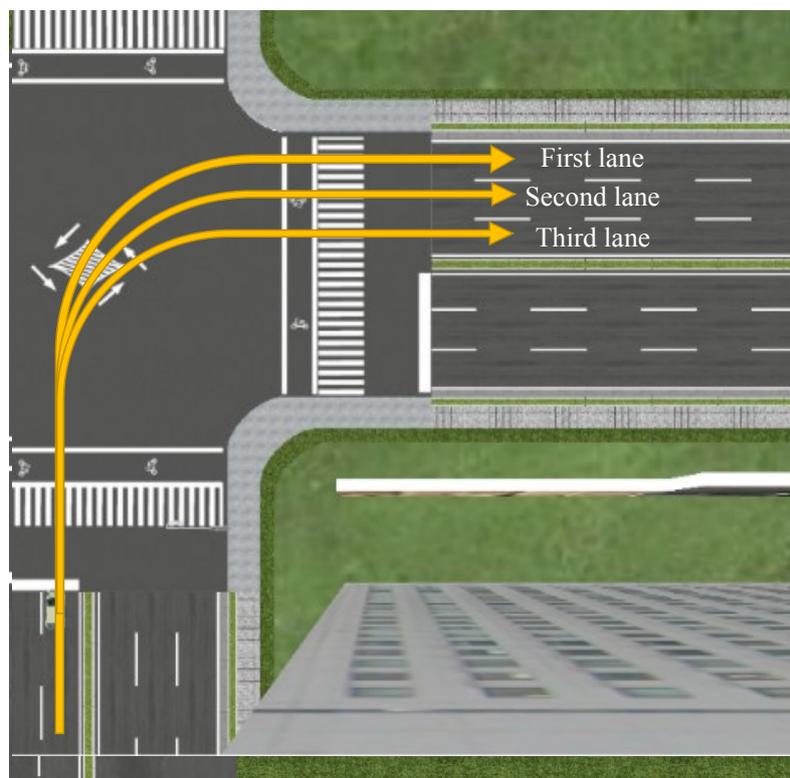


Fig.4.1 運転情報収集実験旋回パターン(市街地コース1)

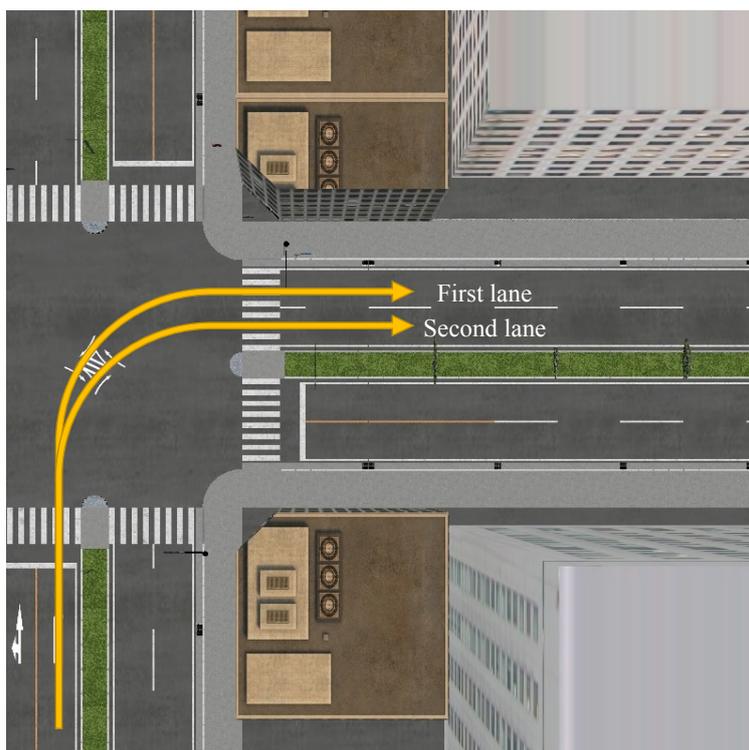


Fig.4.2 運転情報収集実験巡回パターン(市街地コース 2)

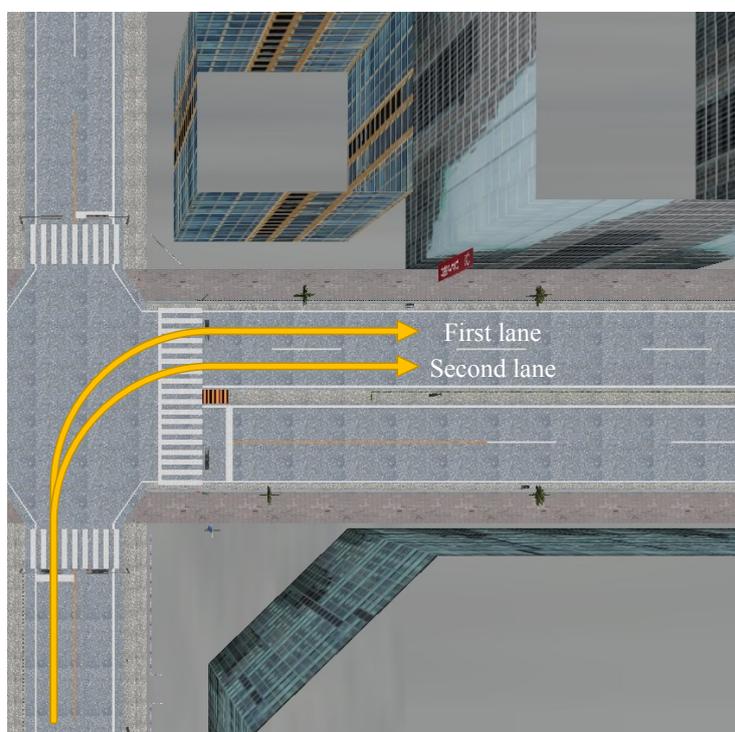


Fig.4.3 運転情報収集実験巡回パターン(市街地コース 3)

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.4.4 から Fig.4.17 に示す. Fig.4.4, Fig.4.6, Fig.4.8, Fig.4.10, Fig.4.12, Fig.4.14, Fig.4.16 の横軸は時間[s]を表し, 縦軸は左上から順に, 車両速度[km/h], アクセル, ブレーキペダル操作量[-], ステアリング角度[deg], 車体角度[deg], 車体角速度[deg/s], 車体角加速度[deg/s²]を表している. 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.4.5, Fig.4.7, Fig.4.9, Fig.4.11, Fig.4.13, Fig.4.15, Fig.4.17 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]であり, 上空から見たドライバの旋回軌跡を示している.

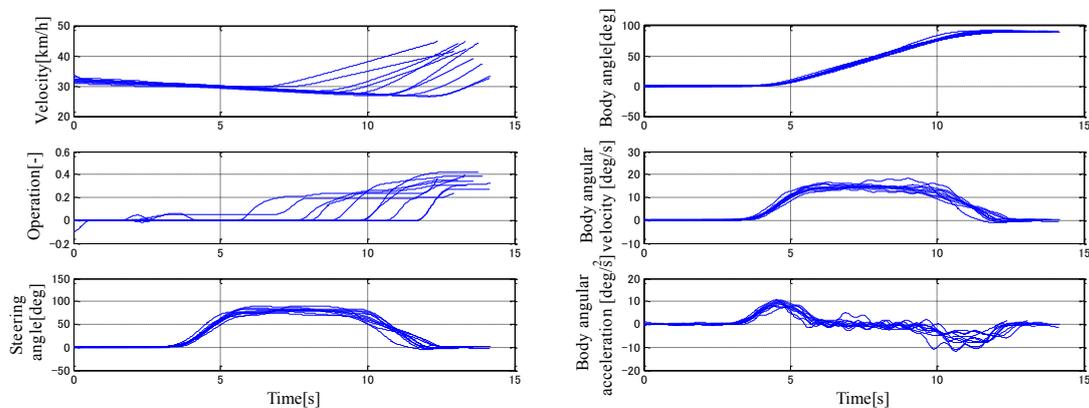


Fig.4.4 市街地コース1の第1車線の運転情報収集実験結果
(速度, ペダル操作, ステアリング操作, 車体角度, 車体角速度, 車体角加速度)

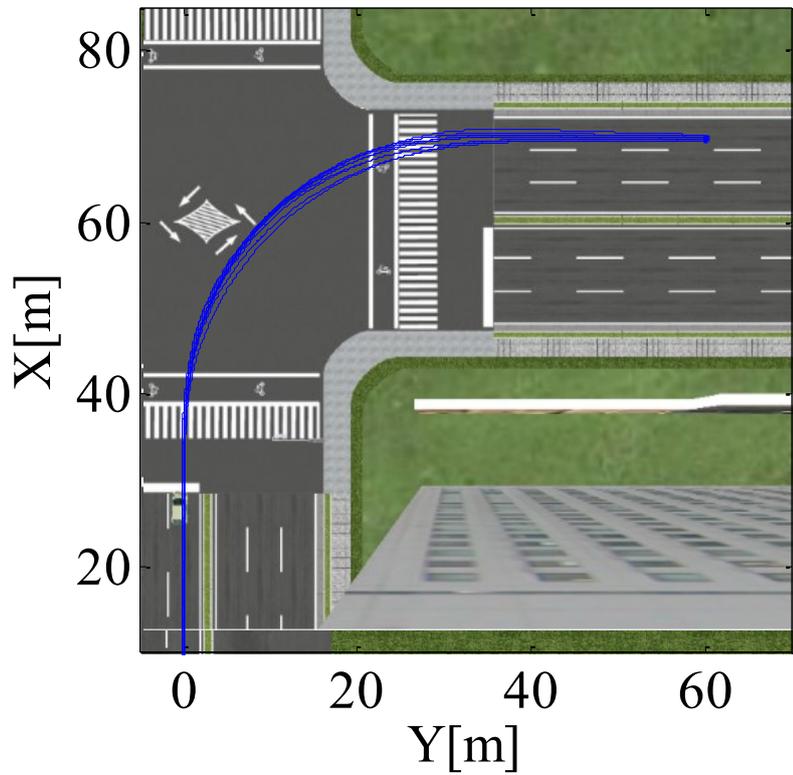


Fig.4.5 市街地コース1の第1車線の運転情報収集実験結果(巡回走行軌跡)

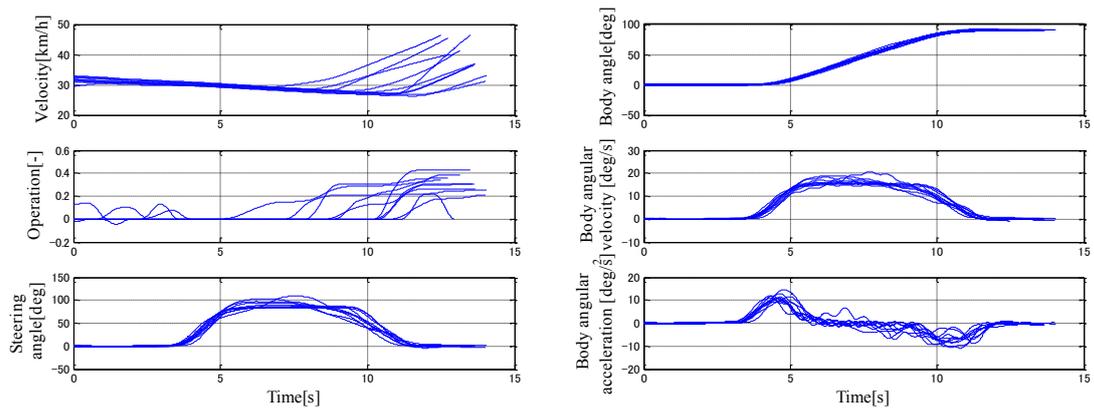


Fig.4.6 市街地コース1の第2車線の運転情報収集実験結果

(速度, ペダル操作, ステアリング操作, 車体角度, 車体角速度, 車体角加速度)

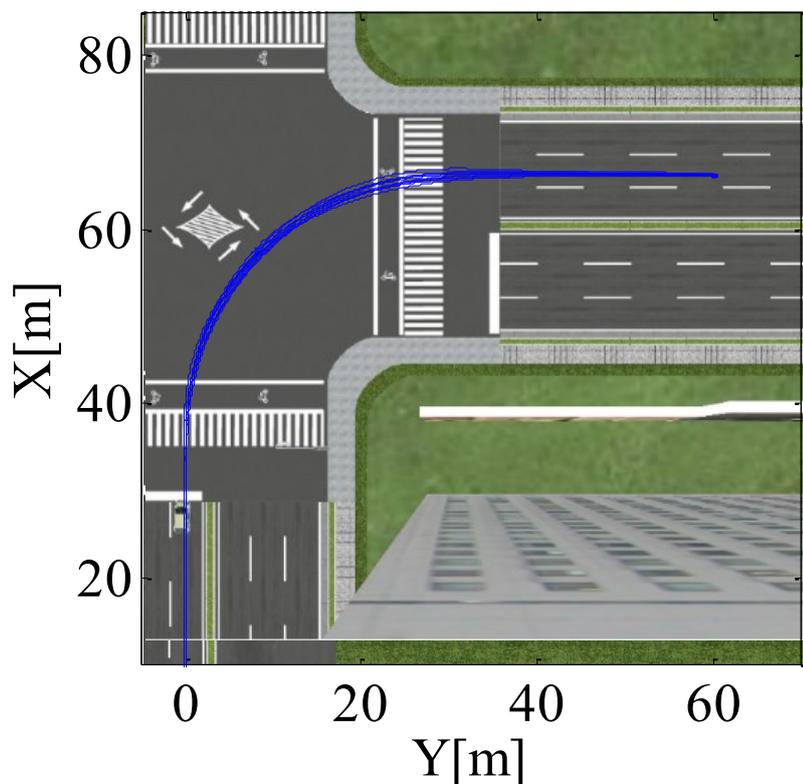


Fig.4.7 市街地コース1の第2車線の運転情報収集実験結果(旋回走行軌跡)

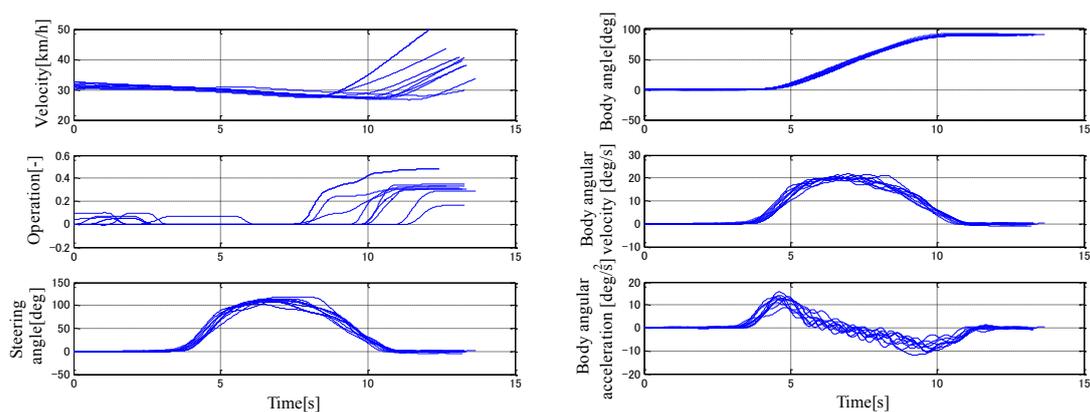


Fig.4.8 市街地コース1の第3車線の運転情報収集実験結果

(速度, ペダル操作, ステアリング操作, 車体角度, 車体角速度, 車体角加速度)

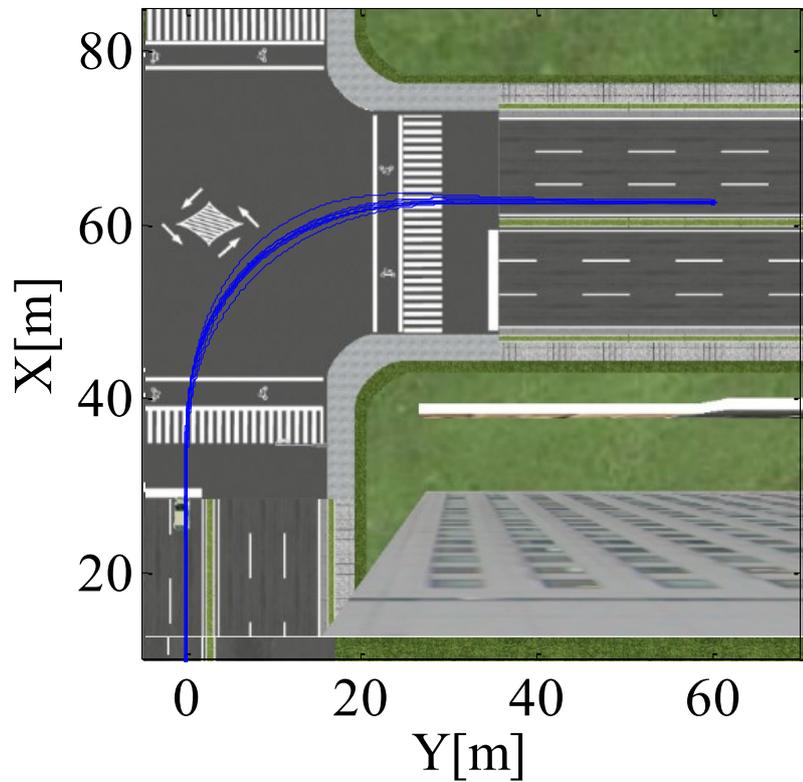


Fig.4.9 市街地コース1の第3車線の運転情報収集実験結果(旋回走行軌跡)

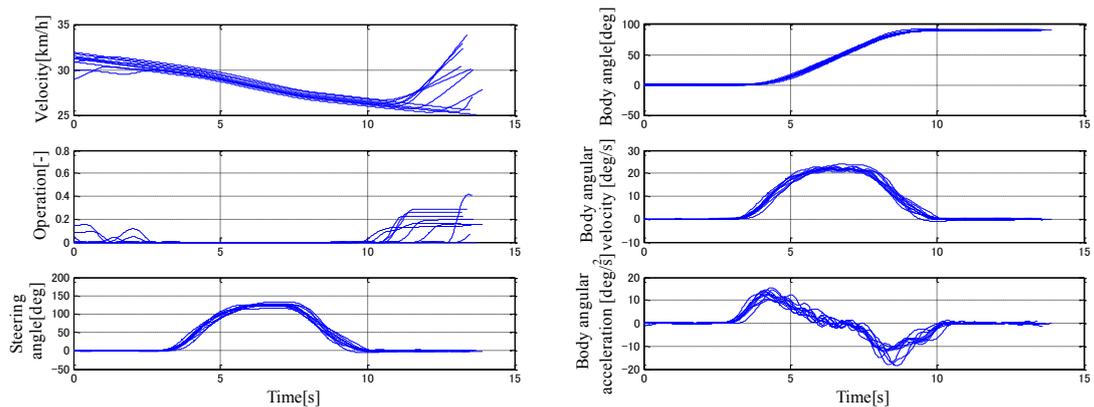


Fig.4.10 市街地コース2の第1車線の運転情報収集実験結果

(速度, ペダル操作, ステアリング操作, 車体角度, 車体角速度, 車体角加速度)

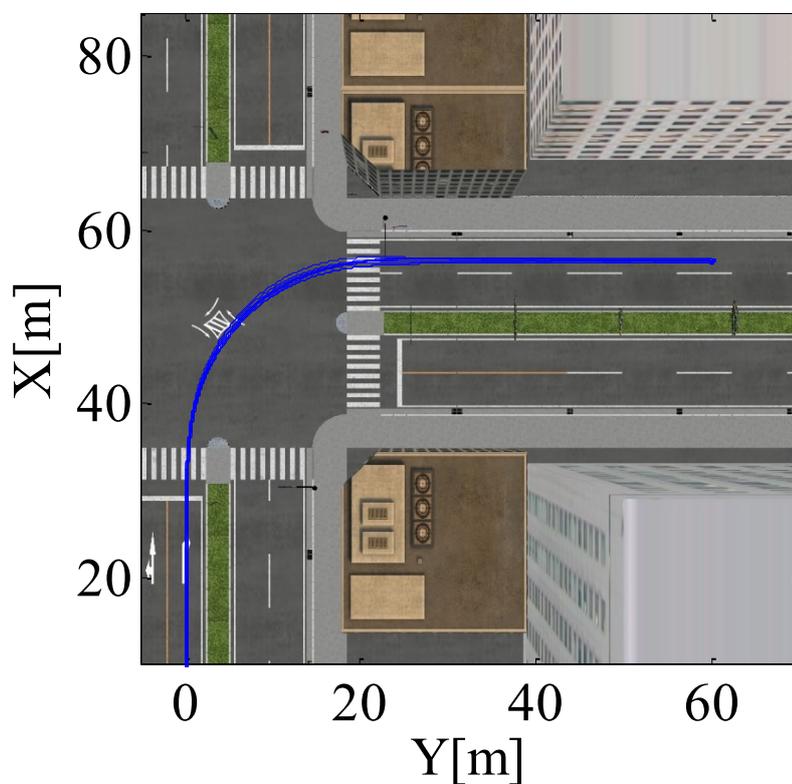


Fig.4.11 市街地コース 2 の第 1 車線の運転情報収集実験結果(旋回走行軌跡)

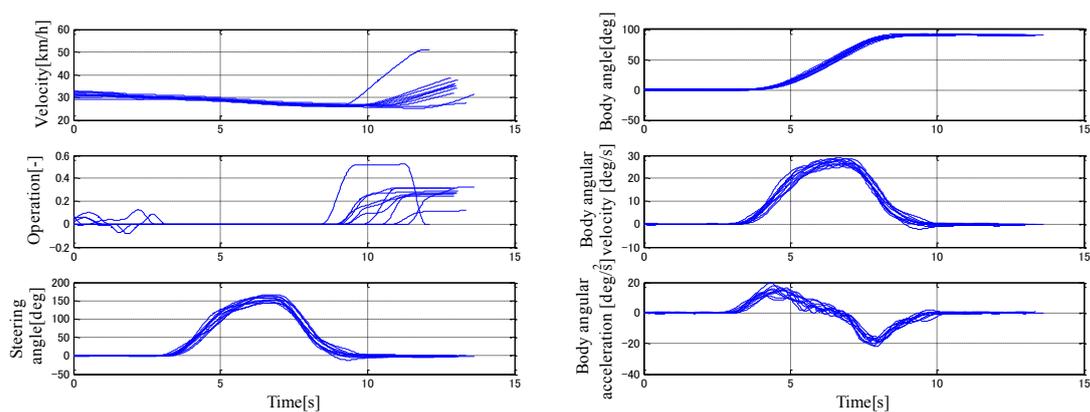


Fig.4.12 市街地コース 2 の第 2 車線の運転情報収集実験結果

(速度, ペダル操作, ステアリング操作, 車体角度, 車体角速度, 車体角加速度)

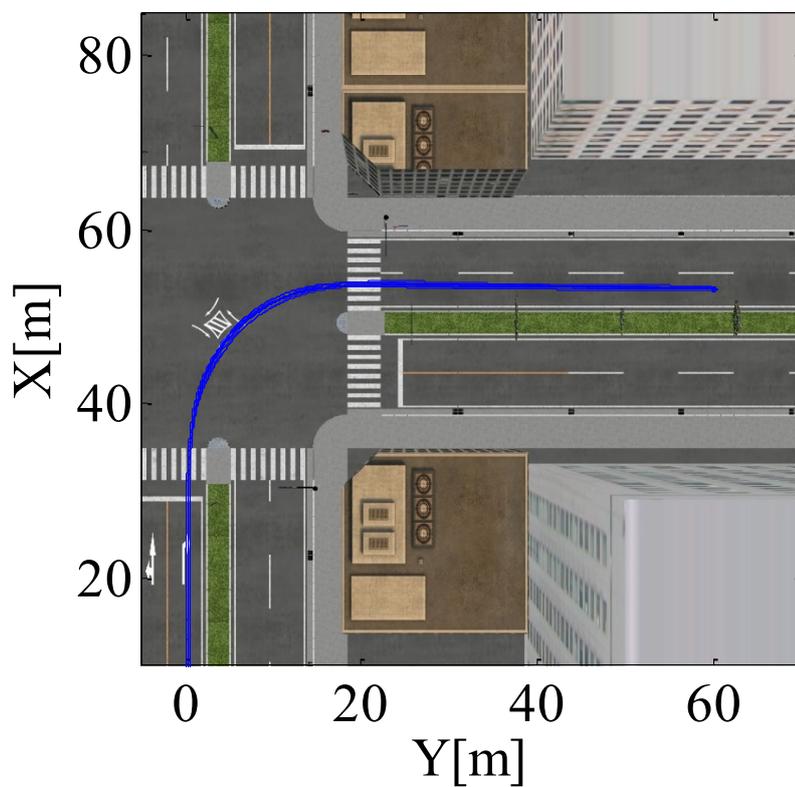


Fig.4.13 市街地コース 2 の第 2 車線の運転情報収集実験結果(旋回走行軌跡)

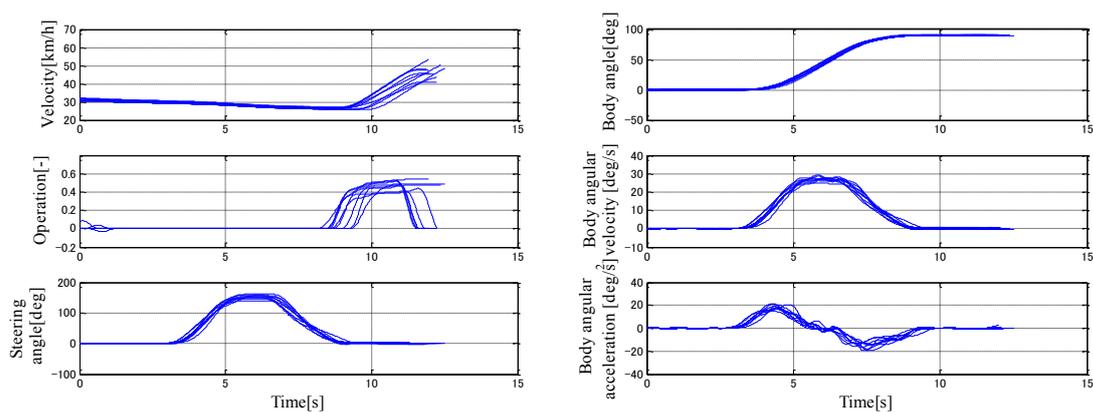


Fig.4.14 市街地コース 3 の第 1 車線の運転情報収集実験結果

(速度, ペダル操作, ステアリング操作, 車体角度, 車体角速度, 車体角加速度)

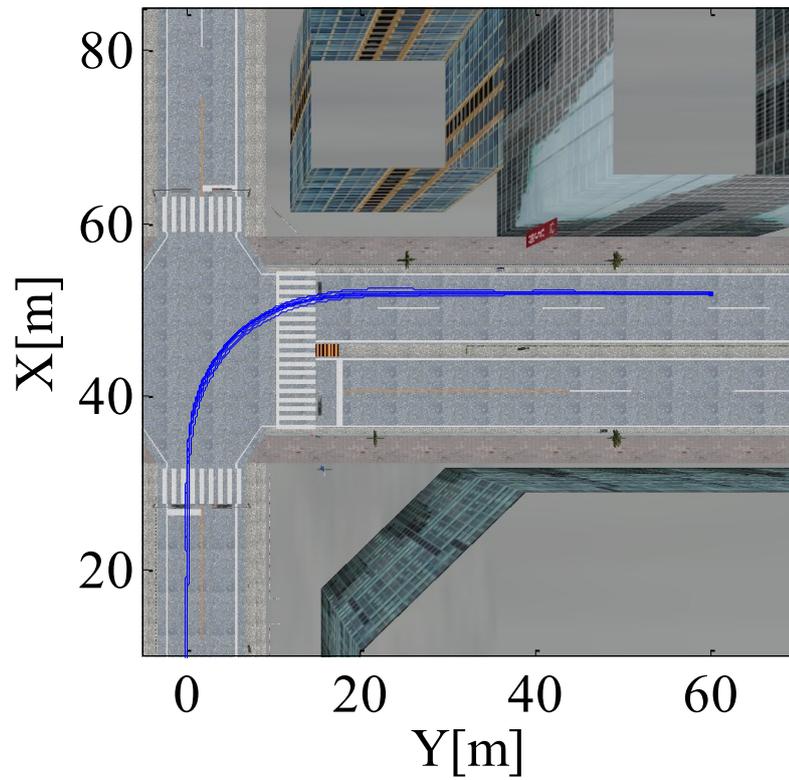


Fig.4.15 市街地コース 3 の第 1 車線の運転情報収集実験結果(旋回走行軌跡)

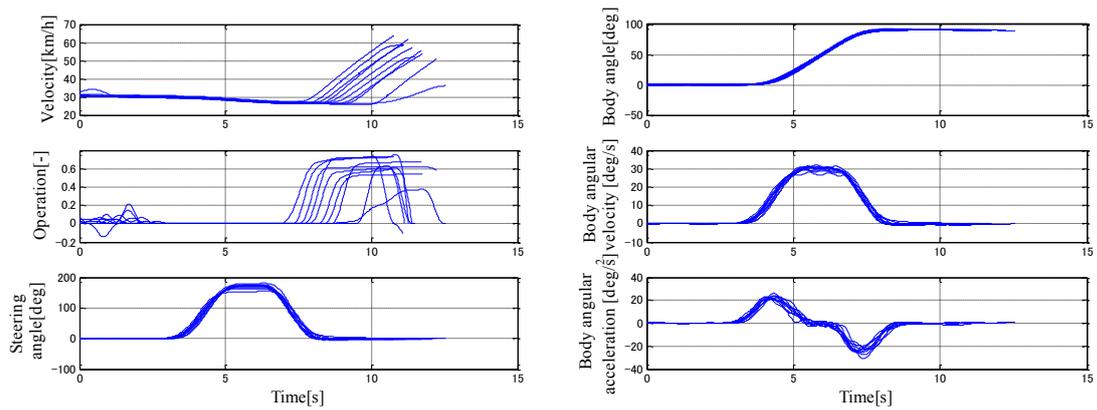


Fig.4.16 市街地コース 3 の第 2 車線の運転情報収集実験結果

(速度, ペダル操作, ステアリング操作, 車体角度, 車体角速度, 車体角加速度)

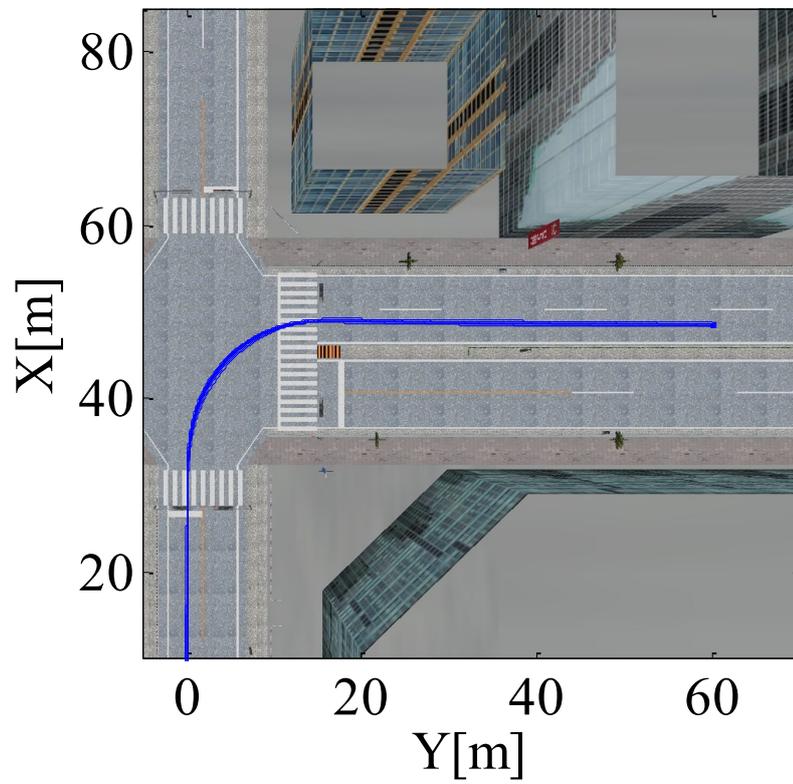


Fig.4.17 市街地コース3：第2車線の運転情報収集実験結果(巡回走行軌跡)

4.2 ドライバ旋回行動モデルのモード数

4.2.1 ドライバ旋回行動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において、モデル構築を行う際に必要となるドライバ旋回行動モデルのモード数についての考察を行う。まず、本研究室における従来研究では、ドライバの旋回行動は3つのモードに分けることができると考えてきた^[25]。その際の人間の旋回行動を Fig.4.18 に示す。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、旋回行動を開始する。その際、自動車の走行軌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、定常円を描いて旋回していく。この区間をステアリング一定角区間と定義した。そして、最後にドライバはステアリングを一定の角速度で真っ直ぐな状態に戻していき、旋回行動を終了し白線に沿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定義した。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を Fig.4.12 に示す。尚、Fig.4.11 において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を示している。

しかし、文献[26]、[27]の研究ではドライバの視線変化のタイミングでステアリング操作に変化があると考えた。文献[26]では視線計測装置を用い旋回時のドライバの視線変化を計測した。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（交差点中心に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関係を考慮し, 文献[25]提案の3モードと組み合わせ5モードのモデル構造とした. さらに, 文献[27]ではモード数は5のまま動作モデルにフィードバック制御構造を取り入れ, 軌道追従性, 操作再現性を示した.

しかしながら, 文献[26]の視線計測結果は特定の交差点でのみ行われたものであり, 汎用性に欠けることが問題であった. さらに, 文献[27]では汎用性検証としてスケールの小さい交差点で自律走行実験を行ったが, 有効な結果が得られなかった. そこで本研究では, 多様な交差点形状に対応するために文献[24]提案のモード数3を用いて旋回行動モデルの構築を目指す.

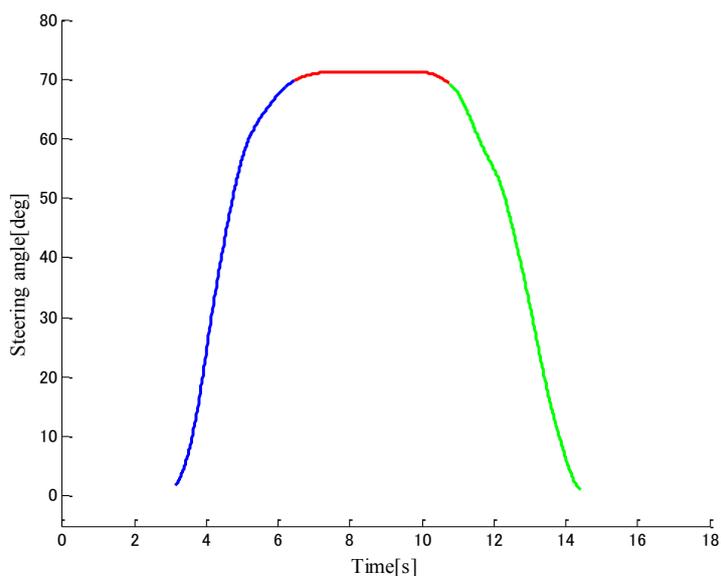


Fig 4.18 旋回時のドライバーのステアリング操作

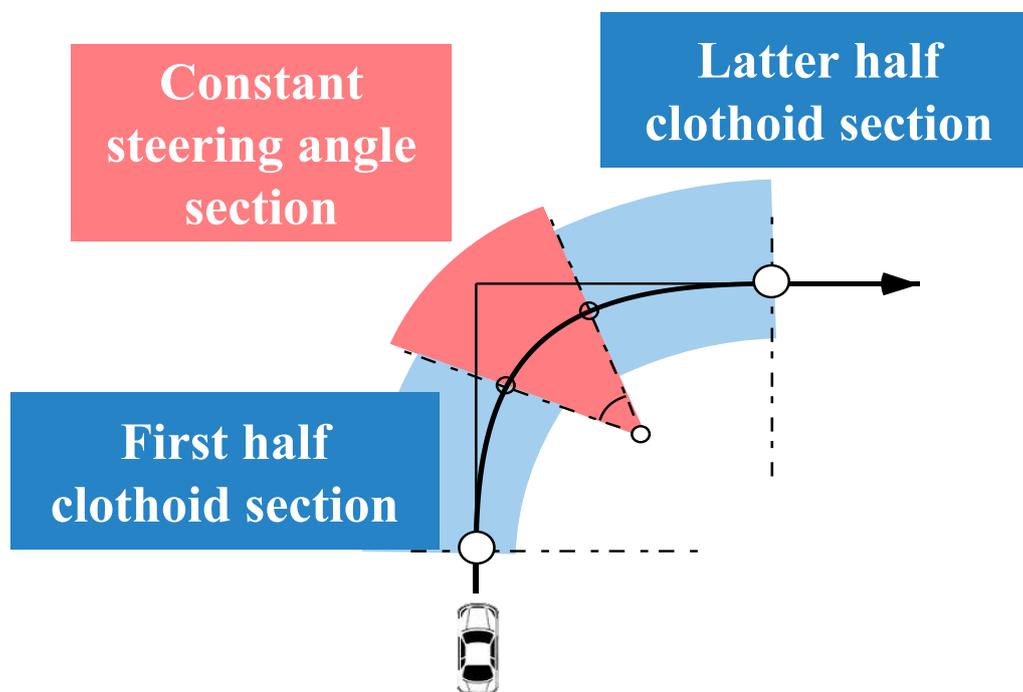


Fig 4.19 ドライバのステアリング操作と旋回走行軌跡の関係

4.2.2 ドライバ旋回行動モデルのモード分割

前節で本提案モデルのモード数は3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、旋回行動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行動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。

4.3 旋回行動区間の抽出

本節ではドライバ旋回行動モデルの構築にあたり，運転情報収集実験から得られた運転情報から対象となる旋回行動区間の抽出について述べる．旋回行動区間抽出には旋回開始点と旋回目標点を定義する必要がある．

4.3.1 旋回開始点の決定

まず，直線から旋回行動に切り替わる旋回開始点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られてきたが，文献[27]では旋回開始位置は進入車線ごとの旋回パターンや速度によって顕著な特徴は確認できず，旋回開始条件は位置のみによって判断していると考えた．そこで文献[27]では運転情報収集実験結果から旋回開始点が停止線付近に集中していることから，停止線を旋回開始点として設定した．しかしながら，旋回開始点は特定の交差点でしか検証していないため，形状の異なる交差点で有効かどうか不明であった．そこで本研究では第3章で示した形状の異なる3つの交差点を用意し，運転情報収集実験を行い旋回開始点について考察を行った．それぞれの交差点での旋回開始点を示す旋回軌跡を Fig.4.20 から Fig.4.22 に示す．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]である．図中の赤い「*」に示した旋回開始点は全ての交差点で停止線付近で旋回を開始していることがわかる．よって本研究では停止線を旋回開始点として設定する．

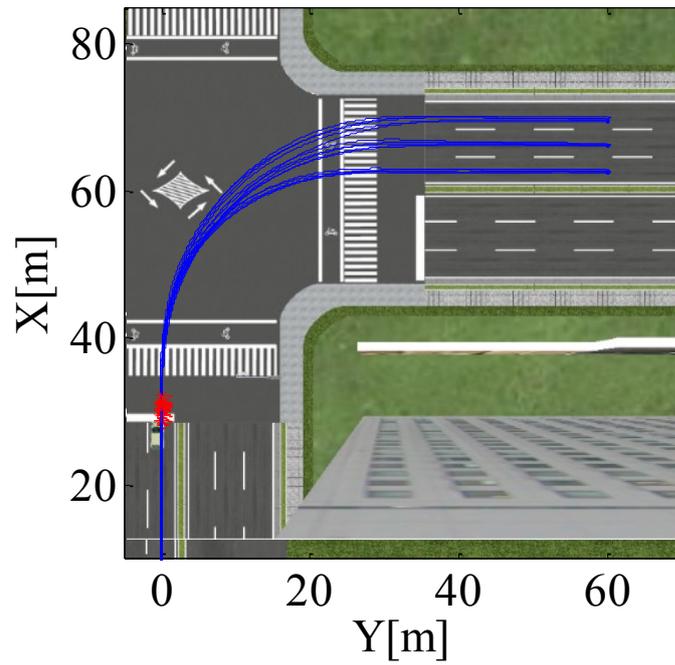


Fig.4.20 市街地コース 1 における旋回開始点

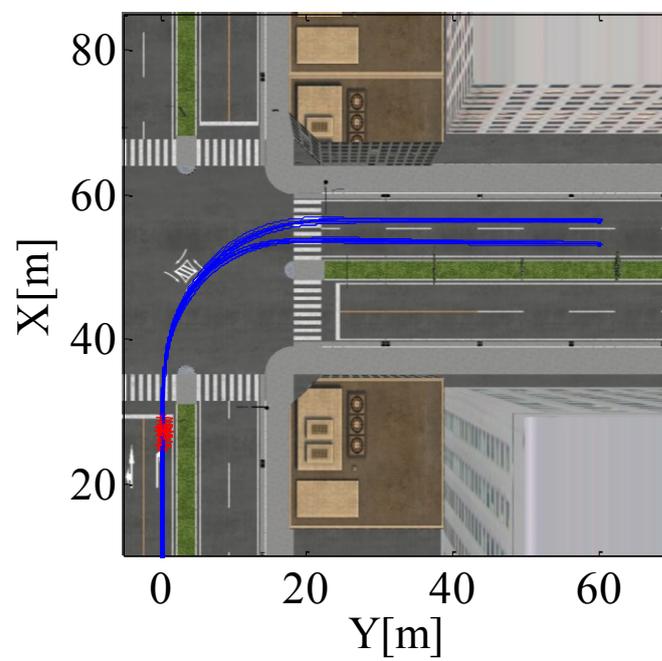


Fig.4.21 市街地コース 2 における旋回開始点

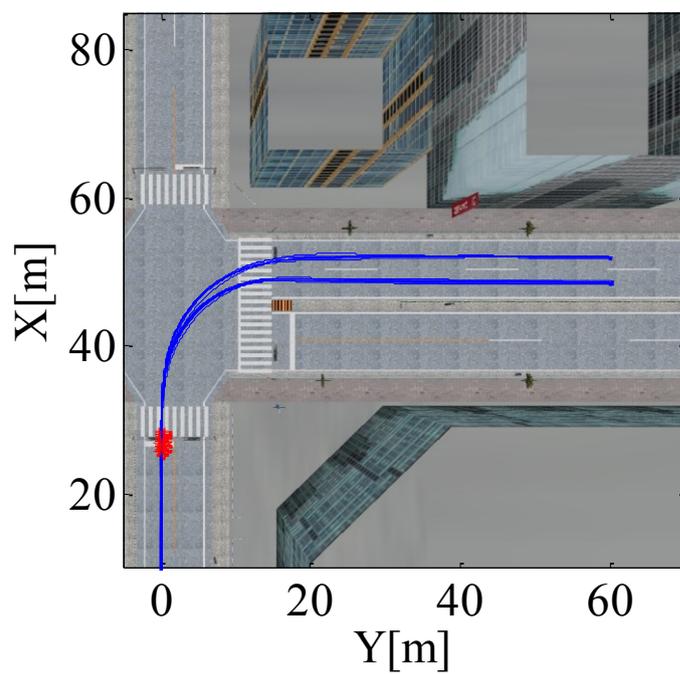


Fig.4.22 市街地コース 3 における旋回開始点

4.3.2 旋回目標点の決定

先行研究における旋回目標点は Fig.4.23 に示すように、汎用性を持たすため旋回開始点から相対座標における Y 方向変位[m]と相対座標における X 方向変位[m]が等しくなるように定義されていた。しかし、本研究では旋回目標点は、先行研究で定義した点よりも手前の、進入車線に差し掛かりある程度車体角度が進入車線に向いた点であり、そこで旋回が終了しその後レーンキープによるステアリング操作によって車体角度を進入車線と平行になるように調整しているのではないかと考えた。そこで旋回目標点を、ステアリングを切り戻す際のステアリング角速度が絶対値で最大になる点を旋回目標点とした。モード分割を行ったステアリング角速度のグラフを Fig.4.24, Fig.4.26, Fig.4.28 に示す。横軸は時間[s]、縦軸はステアリング角速度[deg/s]を表している。また、それぞれの交差点での旋回目標点を示す旋回軌跡を Fig.4.25, Fig.4.27, Fig.4.29 に示す。Fig.4.24 から Fig.4.29 のモード分割の色分けは共通して、青色は旋回行動直前の直線区間、緑色はステアリング切り始め区間、赤色はステアリング一定区間、水色はステアリング切り戻し区間、紫色は旋回行動が終了しレーンキープを行う区間となっている。なお、モード分割は 4.2 節で行った遷移条件を用いている。また、各交差点の各車線の旋回軌跡を同一座標上に置いた図を Fig.4.30 に示す。旋回開始点を原点、横軸を Y 方向距離、縦軸を X 軸方向距離とし、各旋回パターンの旋回目標点を青い「*」で表している。、各旋回パターンの旋回目標点は線形近似で表せることができると考え、最小二乗近似法を用いて各旋回目標点の近似直線と進入する車線の中央線との交点を旋回目標点と設定した。導出した近似直線の式を式(4.1)に示す。

$$x = 0.7768y + 10.7402 \quad (4.1)$$

ここで x は X 方向距離, y は Y 方向距離を表している. 汎用性を持たせるためモデル構築用の各交差点の各車線 5 本, 合計 15 本の運転データから導出した. 同定した各交差点の旋回目標点は Table 4.1 のように得られた. 導出した近似式, 旋回軌跡, 旋回目標点を Fig.4.31 に示す. 旋回開始点を原点, 横軸を Y 方向距離[m], 縦軸を X 軸方向距離[m]とし, 各旋回パターンの旋回目標点を青い「*」で表し, 旋回目標点の近似直線を青色の線で表している.

Table 4.1 各交差点における旋回目標点

Course	Lane	X[m]	Y[m]
3→3	1st	40.89	38.81
	2nd	37.32	34.22
	3rd	33.54	29.35
2→2	1st	27.34	21.37
	2nd	24.68	17.94
1→2	1st	24.78	18.07
	2nd	22.05	14.56

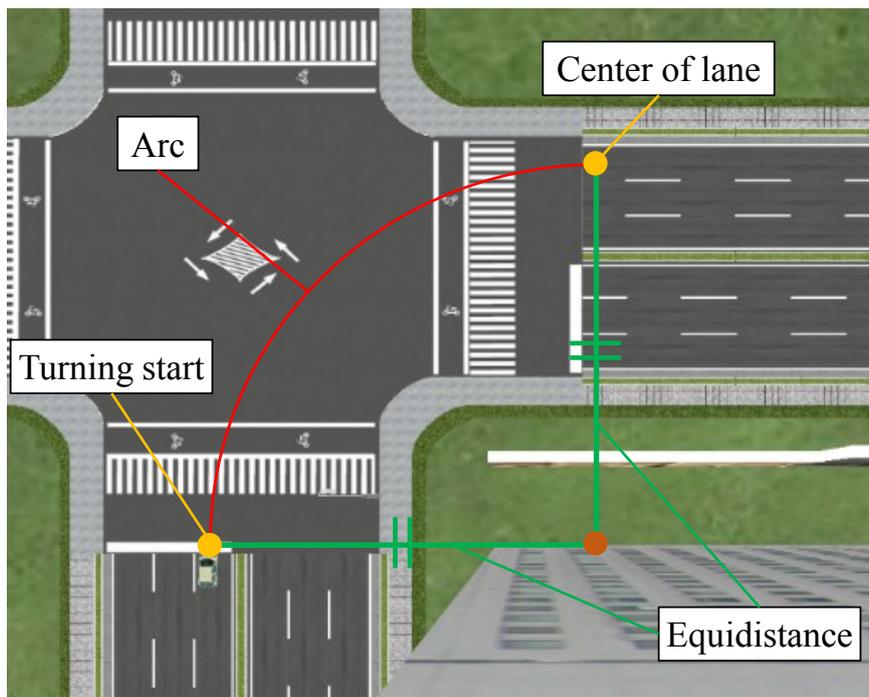


Fig 4.23 先行研究における旋回目標点の定義

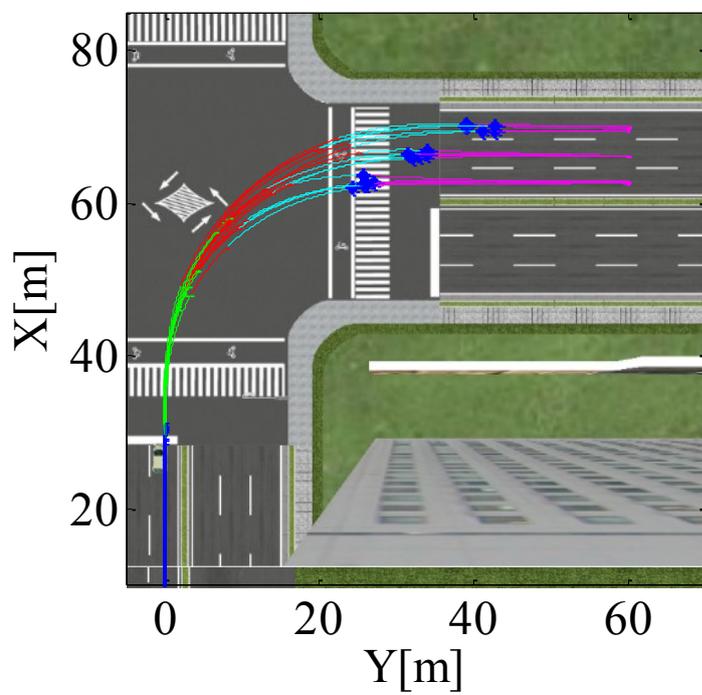


Fig 4.24 市街地コース 1 における旋回目標点

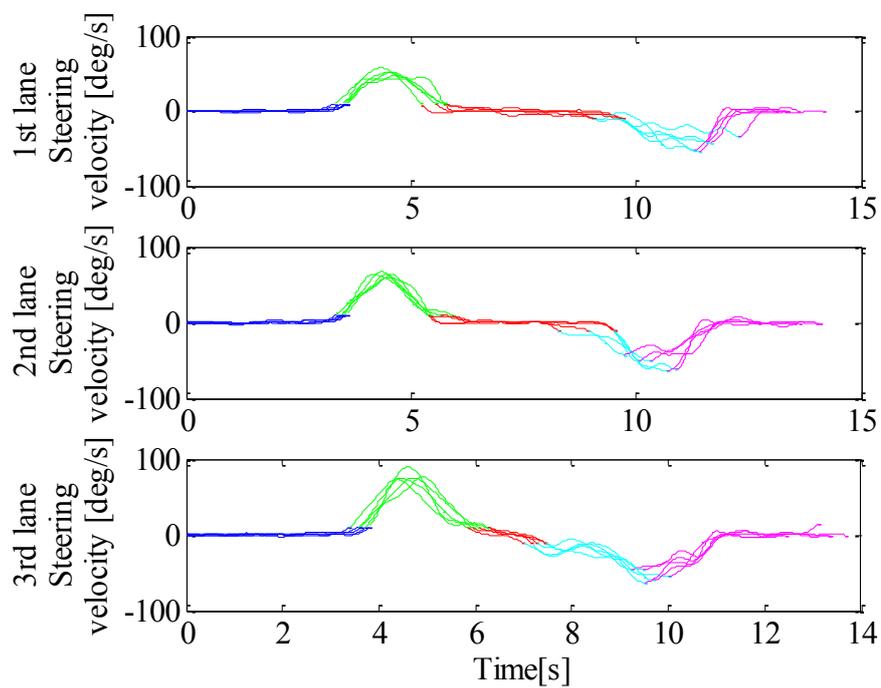


Fig 4.25 市街地コース 1 におけるステアリング角速度

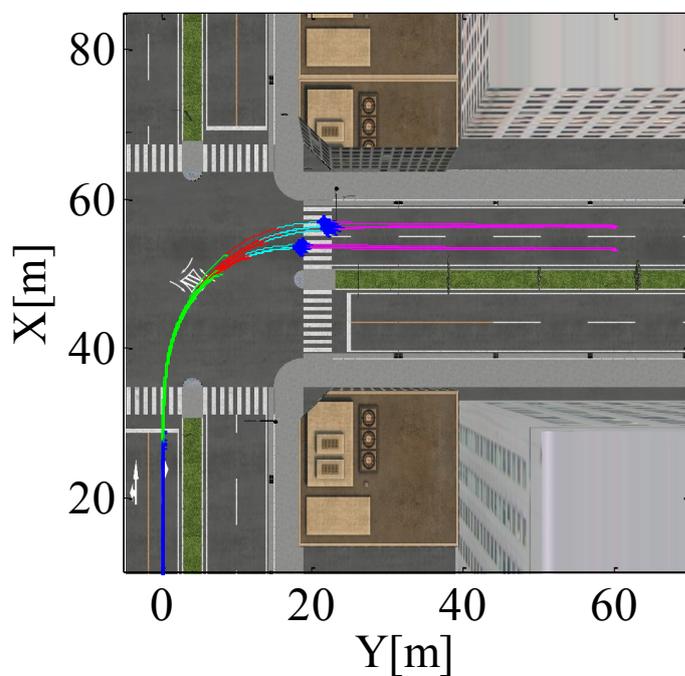


Fig 4.26 市街地コース 2 における旋回標点

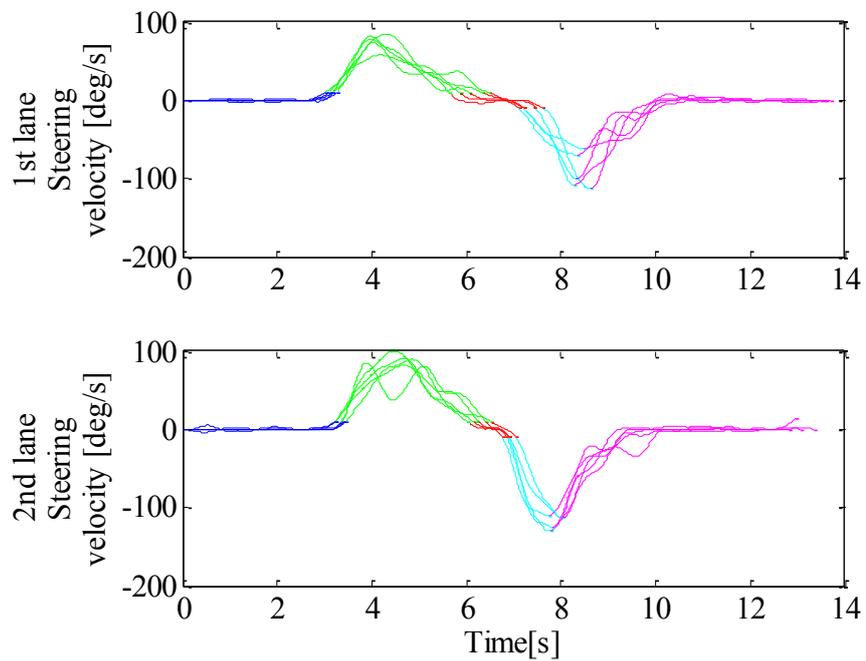


Fig 4.27 市街地コース 2 におけるステアリング角速度

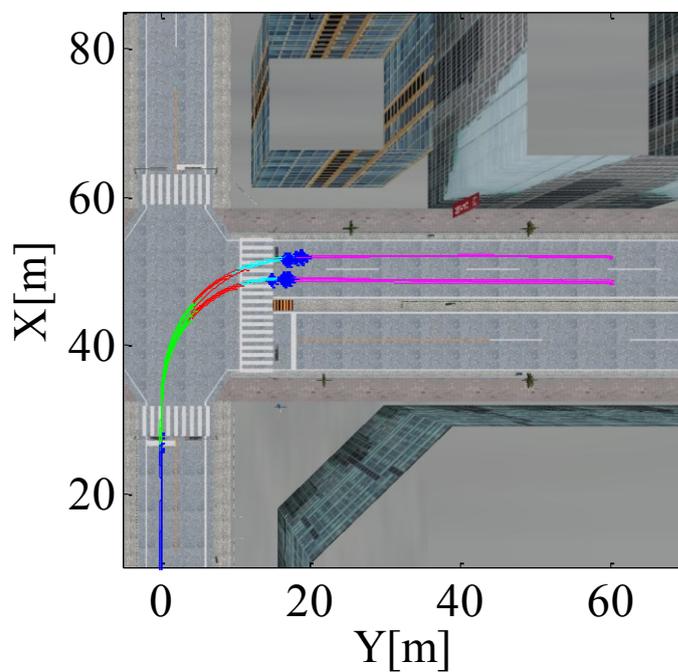


Fig 4.28 市街地コース 3 における旋回目標点

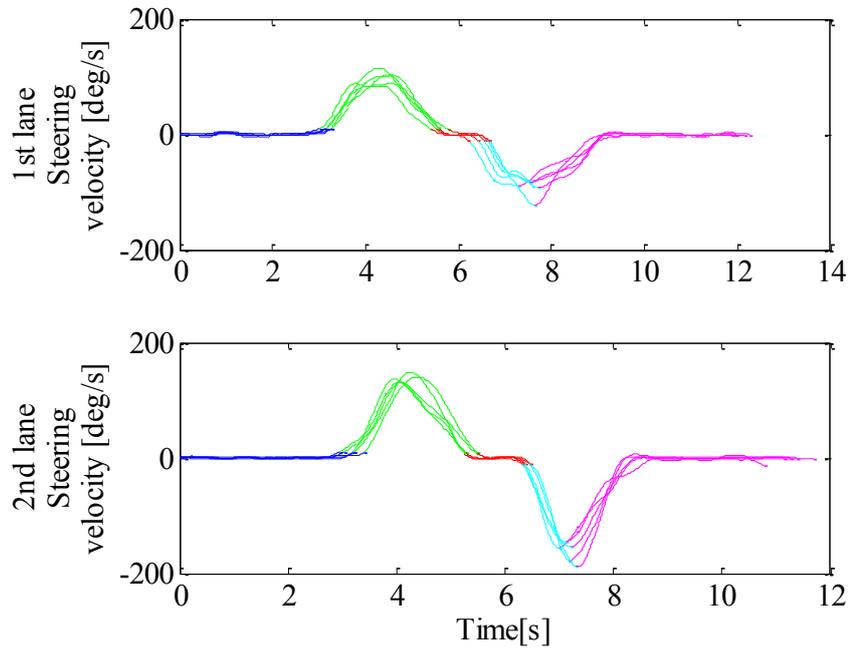


Fig 4.29 市街地コース 3 におけるステアリング角速度

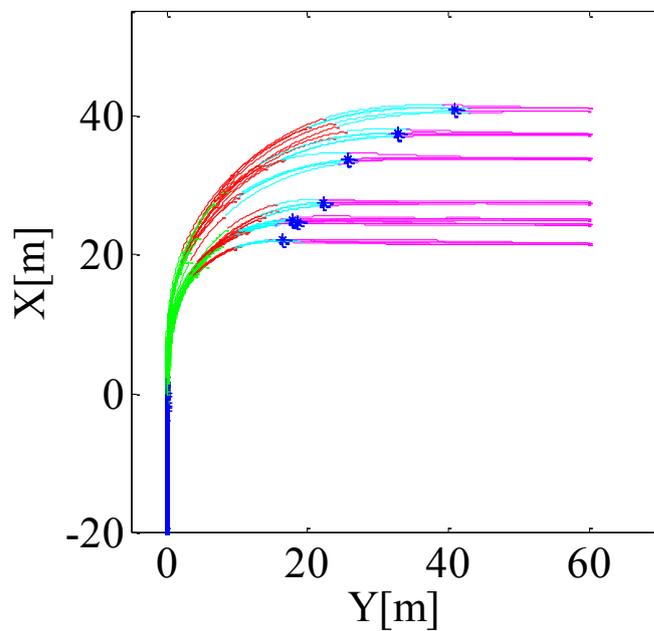


Fig 4.30 各旋回パターンを同一座標上に置いた旋回軌跡

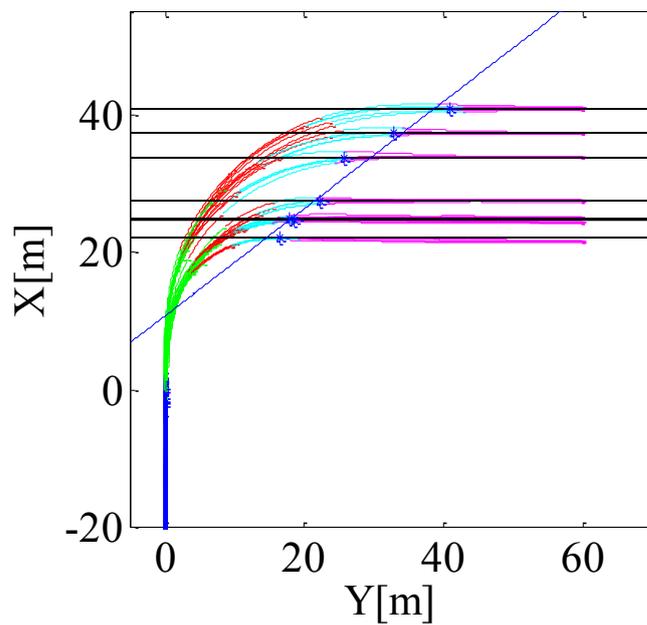


Fig 4.31 各旋回パターンの旋回目標点と近似直線

4.4 ステアリング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。また SVM(Support Vector Machine)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^[29]。

4.4.1 ステアリング操作区間割合と交差点形状の相関

先行研究では、本研究における市街地コース1において3つの車線を自律走行可能、かつ、人間の運転行動を再現可能な旋回操作モデルの構築に成功している。しかし、このモデルは市街地コース1においてのみの結果であり、汎用性検証としてスケールの小さい交差点を用意し自律走行実験を行った結果、自律走行は可能であったが車両の挙動など人間の運転行動を再現したとは言い難いものであった。これは交差点の形状によって、4.2節で述べた前半クロソイド区間、ステアリング一定区間、後半クロソイド区間の3つの区間の割合の変化が考慮されていないからであり、この考えを判断モデルに反映することができれば交差点形状に対応したドライバ旋回行動モデルを構築できると考えた。そこで本節ではステアリング操作区間割合と交差点形状の相関を明確にするため、運転情報収集実験結果からステアリング操作区間割合と交差点形状の特徴を示す様々なパラメータで相関を確かめた。例として各交差点の X 方向距離とステアリング操作区間割合の相関を Table 4.2, Fig.4.32 に示す。Fig.4.32 のそれぞれの mode についてグラフの形がちぐはぐであり、これは他の交差点形状の特徴を示すパラメータで試しても同様であったため、ステアリング操作区間割合と交差点形状の相関を明確にするには至らなかった。そこで、次節にて全旋回パターンを含めた操作切替判断モデルを SVM

を用いることによって、ステアリング操作区間割合と交差点形状の相関を考慮した判断モデルを構築する。

Table 4.2 ステアリング操作区間割合と交差点形状の相関

Course	Lane	X 方向距離[m]	mode1[%]	mode2[%]	mode3[%]
3→3	1st	40.89	28.56	47.53	23.90
	2nd	37.32	33.56	39.89	26.54
	3rd	33.54	42.87	22.10	35.01
2→2	1st	27.34	54.67	26.78	18.53
	2nd	24.68	66.09	13.15	20.75
1→2	1st	24.78	53.78	22.74	23.47
	2nd	22.05	54.13	24.28	21.57

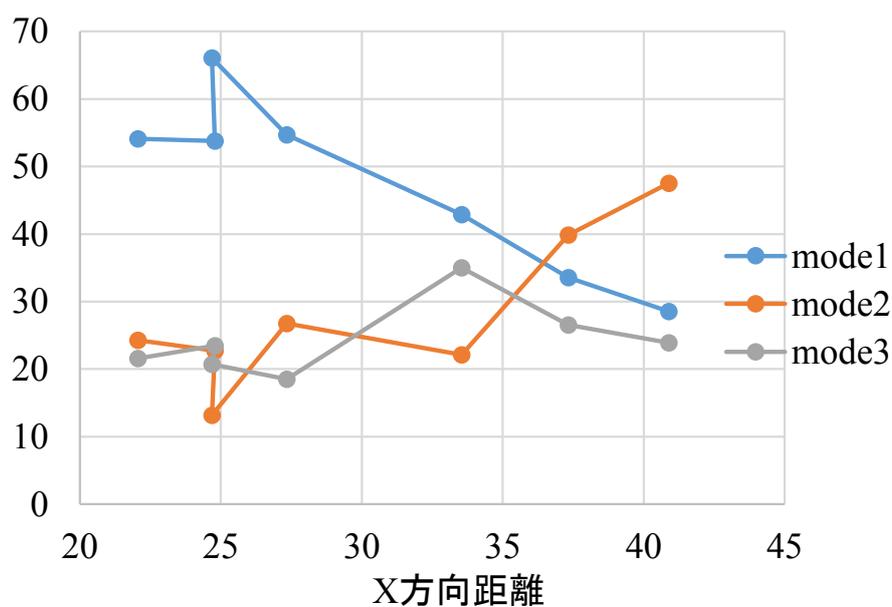


Fig.4.32 ステアリング操作区間割合と交差点形状の相関

4.4.2 ドライバ旋回行動モデルの判断モデル

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。そこで、これらの情報に基づいてモード 1, モード 2 間の切替判断条件式を同定する。今回は SVM(Support Vector Machine)を用いて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 3 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. それぞれの交差点における旋回データ(モード 1 からモード 3 間)35 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 35 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 35 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切替判断の条件式は以下のような式の形式とした。

$$mx + nv + o\theta + p < 0 \quad (4.2)$$

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。切替判断条件は異なる交差点形状に対応させるため、モデル構築用の各交差点の各車線5本、合計35本の運転データから導出した。切替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.4.33、Fig.4.34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のデータは緑色、モード2は赤色、モード3は水色、を表している。また、モード1とモード2間の境界平面をFig.4.30に、モード2とモード3間の境界平面をFig.4.31に示す。

Table 4.3 切替判断モデルのパラメータ

Action mode	m	n	o	p
1→2	1.2107	5.421	2.157	-0.7831
2→3	1.5485	3.6137	3.384	-2.2667

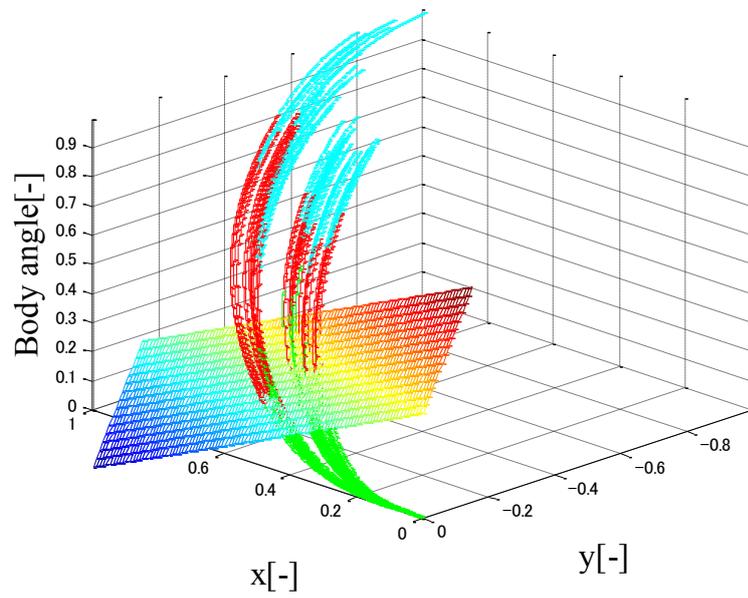


Fig.4.33 モード1とモード2間の境界平面

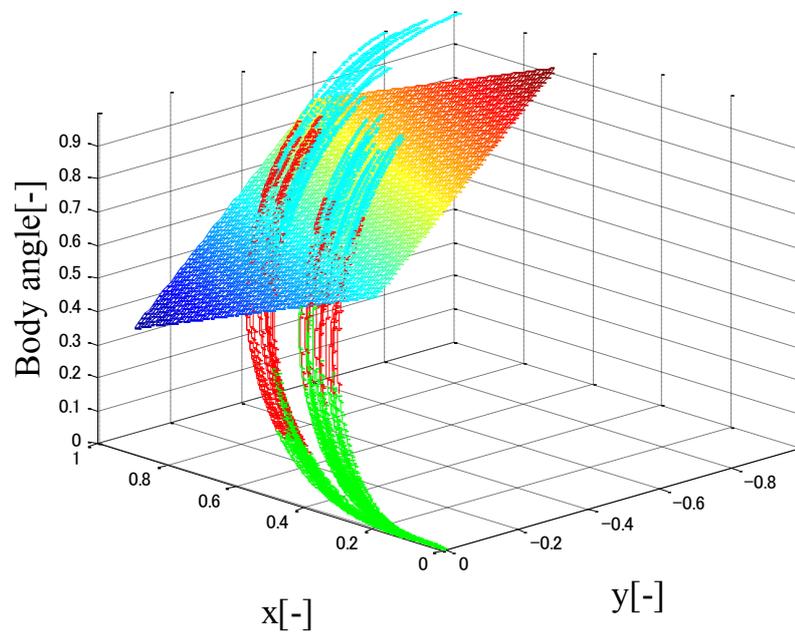


Fig.4.34 モード2とモード3間の境界平面

4.5 ドライバ旋回行動モデルの動作モデル同定について

本研究では、本来モード数を決定し、判断モデルを同定、そして動作モデルを同定したところでドライバ旋回行動モデルを構築したといえるが、本稿では動作モデルの同定には至らず、判断モデルを同定したところで結果は出ていない。そこで、動作モデルについて今後の方針を本節で述べる。

文献[27]の動作モデルはスケールの小さい交差点において、人間の運転行動の再現には至らなかったが交差点の旋回には成功している。このことから動作モデルに関しては交差点形状に対応していた可能性があり、本稿で同定した新たな判断モデルと組み合わせることで、交差点形状に対応したドライバ旋回行動モデルを構築できると考える。

そして構築したドライバ旋回行動モデルを自律旋回走行実験を行い、有効性の検証を行うと同時にステアリング操作区間と交差点形状の相関を調べ、本稿の判断モデルの有効性を検証する。その後新たに形状の違う交差点を用意し、汎用性検証を行う。

第5章

結論

5.1 本研究のまとめ

本稿では、ステアリング操作区間割合と交差点形状の相関を考慮しドライバ旋回行動モデルの判断モデルに組み込むことで、様々な形状の交差点で有効なドライバ旋回行動モデルの構築を目的とした。まずドライバ旋回行動モデルの構築にあたり、それぞれ形状の異なる交差点を3つ用意し運転情報収集実験を行った。運転情報収集実験の結果、先行研究では定義が曖昧であった旋回開始点、旋回目標点を定義した。旋回開始点はどの交差点にも共通して停止線付近に集中していることが判明した。旋回目標点は従来とは異なり、進入車線に差し掛かるときに旋回を終了し、その後はレーンキープの行動に移っているのではないかと考え、後半クロソイド区間のステアリング角速度が絶対値で最大になる点を旋回目標点とした。その結果、3つの交差点の旋回目標点が同一座標上で近似直線上に集中しており、その近似直線と進入する車線の中央線との交点を旋回目標点と設定した。その旋回開始点、旋回目標点を用いて旋回行動時のステアリング操作区間を抽出し、SVM(Support Vector Machine)を用いて判断モデル式を同定した。本研究は以上をもって、様々な交差点形状に対応可能な旋回行動モデルの構築への指針を示した。

5.2 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。本稿では、ドライバ旋回行動モデルの判断モデル同定までしか行っておらず、動作モデルの同定が必要である。そこで文献[27]の動作モデルをベースに動作モデルを同定し、本稿で同定した新たな判断モデルと組み合わせることで、交差点形状に対応したドライバ旋回行動モデルを構築する。そして、旋回行動後のレーンキープ行動のモデル化を行い一連のドライバ旋回行動モデルを自律旋回走行実験を行い、有効性の検証を行うと同時にステアリング操作区間と交差点形状の相関を調べ、本稿の判断モデルの有効性を検証する。その後新たに形状の違う交差点を用意し、汎用性検証を行う。

また、文献[27]の動作モデルは試行錯誤的にパラメータをチューニングしていたが、今後は動作モデルのパラメータ同定手法を確立させる必要がある。

参考文献

- [1] “平成 28 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(2017)
[online] https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=dataset&toukei=00130002&stat_infid=000031518193
- [2] “平成 28 年中の交通死亡事故について”，総務省統計局「政府統計の総合窓口」(2018)
[online] https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=dataset&toukei=00130002&stat_infid=000031546251
- [3] “平成 28 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」
(2017)
[online] https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=dataset&toukei=00130002&stat_infid=000031559551
- [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] 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)
- [10] 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)
- [11] 佐々木勇介，山口拓真，川島明彦，稲垣伸吉，鈴木達也，“走行/駐車の間時間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)
- [12] 菅沼直樹，“自動車の自動運転技術の動向と開発事例”，電子情報通信学会誌 Vol.98，No.1，pp.48-53(2015)

- [13] 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)
- [14] 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
- [15] 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)
- [16] 景山一郎, 栗谷川幸代, 山内ゆかり, 石橋基範, 鳥居塚崇, 山田多恵子, 青木和夫, 時田学, “高度運転支援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 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, pp.921-924(2016)
- [17] 自動運転レベル 3 のアウディ「A8」、日本発売は 2018 年
[online] <http://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1710/31/news036.html> (2017)
- [18] トヨタ カムリ 新型、最新の運転支援システムを搭載
[online] <https://response.jp/article/2017/06/27/296691.html> (2017)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] 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)
- [22] 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)
- [23] 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)
- [24] 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
- [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] 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
- [27] 小嶋友輔: “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”, 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻平成 28 年度修士学位論文
- [28] 川勝俊輝, 風間恵介, 毛利宏, “交差点での右左折における目標操舵角生成手法” 自

- 動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集, pp.2039-2043(2017)
- [29] 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、堤成可 助教授、伊藤清人 協力研究員には本年度からという短い期間ではありましたが、日々多大なる御指導、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矢野賢一 教授に厚く御礼申し上げます。

また、同じ自動車関係の研究に従事した石川拓磨氏、今井啓人氏、小村到氏、谷寛貴氏、田中捷氏、戸田雄也氏、浅野克啓氏、金児正通氏、萩原伸育氏、平田拓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。

そして同じ研究チームだった西川貴大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。私がふがいないばかりに、今後の研究生活が大変になると思います。今のうちに深くお詫びいたします。

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、惜しめ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。