

Title	インホイールモータを搭載した超小型電気自動車の操縦安定性向上のための制御システム設計
Sub Title	Control system design of an ultra compact electric vehicle with four in-wheel motors for enhancing its handling and stability
Author	森, 崇(Mori, Takashi) 西村, 秀和(Nishimura, Hidekazu)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
Publication year	2013
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2013年度システムエンジニアリング学 第119号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002013-0006

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文

2013 年度

インホイールモータを搭載した
超小型電気自動車の操縦安定性向上の
ための制御システム設計

森 崇

(学籍番号 : 81133601)

指導教員 教授 西村秀和

2013 年 9 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科

システムデザイン・マネジメント専攻

論 文 要 旨

学籍番号	81133601	氏 名	森 崇
論文題目： インホイールモータを搭載した超小型電気自動車の 操縦安定性向上のための制御システム設計			
(内容の要旨)			
<p>本論文では、超小型モビリティとして将来普及が期待される、小型・軽量化された4輪インホイールモータ(IWM)車両に対して、モデルベースシステムズエンジニアリング(Model-Based systems Engineering, MBSE)に基づき、従来車両と同等の操縦安定性を有するという要求に対応する制御システムの設計を行う。</p> <p>モデルベースデザインとしては、制御システムに対するコンセプトと機能アーキテクチャを決める最上位のシステムレベルでの設計を行っている。これにより決定した機能アーキテクチャを実現するために制御系を設計し、シミュレーションにより制御仕様を検証するとともに、「従来車両と同等の操縦安定性を有する」という要求を満たす制御システムの妥当性を確認している。</p> <p>以下に各章ごとの内容を示す。</p> <p>2章では、4輪IWM車両の制御システムをシステムレベルで設計するためのプロセスを示す。MBSEに基づき、要求分析から、機能モデル、論理モデル、物理モデルに至るまでのプロセスを相互にトレースのとれた形で進める。要求分析では、車両の「小型・軽量化」と「走行安定性」の要求から、「低転がり摩擦下での走行安定性」が導出されている。走行安定性が必要とされるシナリオ(ユースケース)として、「急なハンドル操作」と「横風を受ける」を取り上げる。各シナリオにおけるシーケンス図では、コンテキストレベルでの解析のために要素ブロックを定義し、それぞれの相互作用とブロックが持つべき機能を明らかにしている。このシーケンス図から導かれた機能に基づき、要求の詳細化を行う。</p> <p>3章では、2章で明らかにした機能アーキテクチャを実現するために必要な制御システムアーキテクチャの候補の一つとして、直接ヨーモーメント制御を取り上げ、その設計を行う。制御性能の検証を行うため、自動車技術会と計測自動制御学会のベンチマーク問題 No.3 で提供された4輪IWM車両モデルを基に検証用モデルを構築する。モデルのシミュレーション結果を利用して、制御システムの設計と妥当性の確認を行う。</p> <p>4章では、制御システムアーキテクチャの候補の一つとして、前輪操舵角を制御入力とし、制御出力を横変位とヨーレートとしたH_{∞}制御系を取り上げ、その設計を行う。まずシステム同定により4輪IWM車両モデルの低次元化モデルを導出する。その上で低次元化モデルを利用してH_{∞}制御系設計を施し、その制御性能の妥当性を4輪IWM車両モデルに対するシミュレーションにより確認する。</p>			
キーワード (5 語) 超小型電気自動車, インホイールモータ, モデルベースシステムズエンジニアリング, 操縦安定性, H_{∞} 制御			

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	81133601	Name	Takashi Mori
<p>Title</p> <p style="text-align: center;">Control System Design of An Ultra Compact Electric Vehicle with Four In-Wheel Motors for Enhancing Its Handling and Stability</p>			
<p>Abstract</p> <p>In this thesis, design of control system for electric vehicle with four in-wheel motors made smaller and lighter weight, which is expected to grow popular as Ultra Compact Vehicle in the future, is carried out based on Model-Based systems Engineering.</p> <p>The system-level design of the control system is carried out, where the concept design and the functional architecture are decided. In order to realize the functional architecture decided, the control system is designed and its control performance is verified by carrying out simulations. Also, it is validated by simulations that the control system can fulfill the requirement “performance of handling and stability as well as conventional car”.</p> <p>The followings are contents of each chapter in this thesis.</p> <p>In Chapter 2, the process for system-level design of the control system for electric vehicle with four in-wheel motors is shown. Based on MBSE, the control design process by ensuring traceability among requirement analysis, functional model, logical model and physical model is shown. In requirement analysis, the requirement “driving stability on low rolling resistance” is derived by the one “small and light weight” and the one “Driving Stability”. The use cases of “abrupt steering” and “car moving in crosswind” are picked up as the case in which driving stability is needed. In the sequence diagrams of each case, element blocks are defined in order to analyze on context level and interaction between each blocks and function of blocks are clarified. Based on the functions derived from the sequence diagram, the requirement is made detail.</p> <p>In Chapter 3, design of Direct Yaw rate Control is done. Direct Yaw rate Control is selected as one of candidate architecture fulfilling the functional architecture which is clarified in Chapter 2. A model for verification of control performance of the DYC system is developed with using the model of an ultra compact electric vehicle with four in-wheel motors JSAE-SICE Benchmark Problem No.3. The design of control system and validation of it are done with using the simulation results of the model.</p> <p>In Chapter 4, H_∞ controller is designed. On this controller, steer angles of front tires are defined as output and yaw rate and lateral distance are defined as input. By system identification of the model of JSAE-SICE Benchmark Problem No.3, low-dimensional model is derived. A driving stability control system using H_∞ control theory is made using low-dimensional model. Then, simulation with the model of vehicle with four in-wheel motors is carried out in order to validate the performance of control system.</p>			
<p>Key Word(5 words)</p> <p>Ultra Compact Electric Vehicle, In-Wheel Motor, Model-Based Systems Engineering, driving stability, H_∞ Control</p>			

図・表

図

Fig.1.1	Usage of transportation in Japan
Fig.1.2	CO ₂ Emission in Japan
Fig.2.1	Dual Vee Model
Fig.2.2	Entity Vee
Fig.2.3	Requirement diagram of in-wheel-motor vehicle
Fig.2.4	Functional model of in-wheel motor vehicle
Fig. 2.5	Sequence diagram of abrupt steering
Fig. 2.6	Sequence diagram of car moving in crosswind
Fig. 2.7	Requirement diagram of driving stability
Fig. 2.8	Logical model of in-wheel motor vehicle
Fig.2.9	Physical model from JSAE-SICE Benchmark Problem No.3
Fig.2.10	Vehicle model consisting of parts of chassis, power train and brake
Fig.2.11	Structure of Driver model
Fig.2.12	Road condition for double lane change
Fig. 3.1	Control system architectures for Direct Yaw moment Control
Fig. 3.2	Generating Yaw Moment with tire force
Fig.3.3	Vehicle trajectory in crosswind test for G_{γ} effect
Fig.3.4	Vehicle trajectory result of Crosswind test for G_{γ} effect
Fig.3.5	Yaw rate result of Crosswind test for G_{γ} effect
Fig.3.6	Slip angle of Crosswind test for G_{γ} effect
Fig.3.7	Difference between yaw rate and target yaw rate on Crosswind test for $G_{\beta}=1800, G_{\gamma}=50$
Fig.3.8	Control yaw moment M on Crosswind test for $G_{\beta}=1800, G_{\gamma}=50$
Fig.3.9	Vehicle trajectory on Double Lane Change test
Fig.3.10	Yaw rate on Double Lane Change test
Fig.3.11	Slip angle on Double Lane Change test
Fig.3.12	Difference between yaw rate and target yaw rate on Double Lane Change test
Fig.3.13	Control yaw moment M on Double Lane Change test
Fig.4.1	Feedback control system

Fig.4.2	Impulsive front steering angle input
Fig.4.3	Simulation result of Lateral displacement
Fig.4.4	Simulation result of Yaw Rate
Fig.4.5	Gain diagram of identified model
Fig.4.6	y/u_δ Gain diagram of identified 5th order model
Fig.4.7	γ/u_δ Gain diagram of identified 5th order model
Fig 4.8	Generalized plant for H_∞ control design
Fig. 4.9	Frequency weighting functions
Fig.4.10	Bode diagram of H_∞ Controller
Fig.4.11	Vehicle trajectory on Crosswind test
Fig.4.12	Yaw rate on Crosswind test
Fig.4.13	Control input on Crosswind test
Fig.4.14	Slip Angle on Crosswind test
Fig.4.15	Steering input of driver's model on Crosswind test
Fig.4.16	Vehicle trajectory on Double Lane Change test
Fig.4.17	Yaw rate on Double Lane Change test
Fig.4.18	Control input on Double Lane Change test
Fig.4.19	Slip Angle on Double Lane Change test
Fig.4.20	Steering input of driver's model on Double Lane Change test

表

Table 1.1	Vehicle specifications
Table 4.1	Eigenvalue of Identified model

目次

1	序論	2
1.1	研究の背景.....	2
1.1.1	超小型モビリティの開発・普及に向けた動き	2
1.1.2	インホイールモータ	4
1.1.3	JSAE-SICE ベンチマーク問題 No.3	4
1.1.4	先行研究.....	5
1.2	研究の目的と方法	5
1.3	論文の構成.....	6
2	超小型電気自動車の操縦安定化制御システム設計	8
2.1	モデルベースアプローチについて	8
2.1.1	システムズエンジニアリング	8
2.1.2	モデルベースシステムズエンジニアリング	10
2.2	要求分析と機能分析	10
2.2.1	要求分析.....	10
2.2.2	機能分析.....	11
2.2.3	シーケンス図と要求の詳細化.....	12
2.3	論理モデル/物理モデル	15
2.3.1	論理モデル.....	15
2.3.2	物理モデル.....	17
3	4 輪の駆動力を制御入力とする直接ヨーモーメント制御システム の設計・検証	21
3.1	制御システムの構成	21
3.2	横風試験を利用した制御システムの設計	22
3.3	ダブルレーンチェンジにおける制御システムの検証.....	25

3.4	考察.....	29
4	前輪操舵角を制御入力とするH_{∞}制御システムの設計・検証.....	31
4.1	制御系設計のためのシステム同定.....	32
4.2	システム解析に基づく低次元化モデルの導出.....	34
4.3	H_{∞} 制御系設計と考察.....	37
4.3.1	H_{∞} 制御系設計.....	37
4.3.2	Dymola モデルを用いたシミュレーションによる検証.....	39
4.3.2.1	横風試験.....	39
4.3.2.2	ダブルレーンチェンジ.....	43
4.4	考察.....	46
5	結論.....	48
5.1	結論.....	48
5.2	今後の展望.....	48
	参考文献.....	49
	謝辞	51

第 1 章

序論

1 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 超小型モビリティの開発・普及に向けた動き

近年、日本社会は、環境・資源エネルギー問題や都市交通の円滑化といった課題を抱えている^[1]。以下には、それらについて記述する。

図1.1は代表交通手段分担率について示している。都市圏規模が大きければ大きいほど鉄道利用率が高く、逆に都市圏規模が小さいほど自動車利用率が高い傾向となっている^[2]ものの、全体としては平日休日とも自動車はもっとも利用されている交通手段である。

また、一回のあたりの移動距離は70%が10 km以下である^[1]。

乗車人数は全国平均で平日が1.33人、休日が1.72人と2人以下である^[1]。一般的な乗用車の乗員定数が4人以上であることを考えると、1人あたりのCO₂排出量を増加させている一因ともなる。

さらに、自動車の利用は、大きなCO₂の排出源となっている^[1]。図1.2に日本の各部門におけるCO₂排出量と運輸部門におけるCO₂排出量を示す。運輸部門が日本のCO₂排出量の20.1%を占めており、運輸部門の中の87.8%が自動車によって排出されている。

このような現状を踏まえ、環境に優しい自動車やコンパクトな自動車へのニーズが高まっている。

現在、国土交通省では、公共交通を中心とした都市機能の集約や低炭素まちづくりを目指す施策に取り組んでおり、これら施策の実現に向けた重要な要素として、コンパクトで小回りが利き、環境性能に優れ、地域の手軽な足となる移動手段の導入が期待されている。

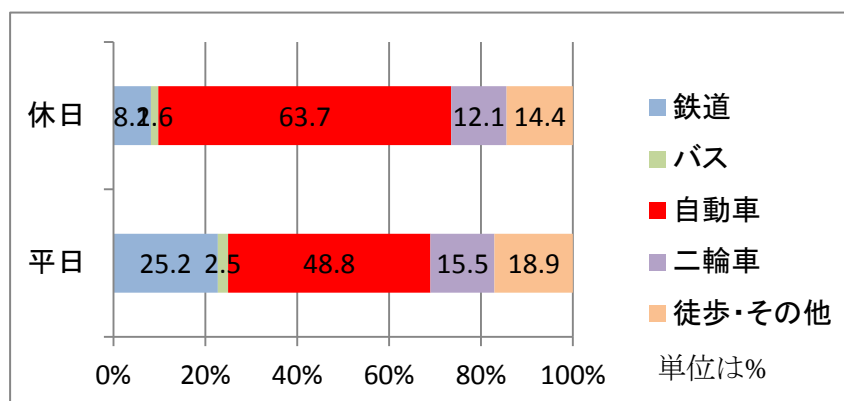


Fig.1.1 Usage of transportation in Japan ([2]より作成)

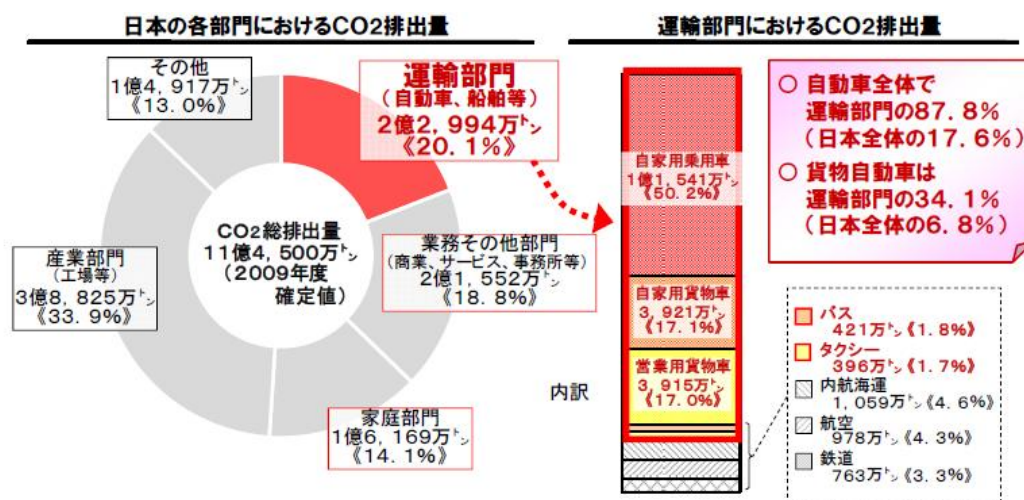


Fig1.2 CO2 Emission in Japan^[1]

これらの問題への対応策として、超小型モビリティと呼ばれる車両の研究開発が進められている。超小型モビリティとは、「自動車よりコンパクトで小回りが利き、環境性能に優れ、地域の手軽な移動の足となる1人～2人乗り程度の車両」と定義されている。国土交通省は平成22年度及び平成23年度に実施した全国各地の実証実験において、超小型モビリティがどのような場面での利活用に適しているかの調査を行った。その結果、超小型モビリティは、身近な移動（日常の交通）や都市部・観光地における短距離の移動において、利活用される意向が高いことが知見として得られた。

上記の実証実験の結果を受けて、2013年1月31日に、超小型モビリティの認定制度が公布・施行された^[3]。認定制度では、

1. 長さ、幅及び高さがそれぞれ軽自動車の規格内(長さ:3400 mm 以内, 幅 1480mm 以内, 高さ 2000mm 以内^[3])のもの
2. 乗車定員2人以下のもの又は運転者席及び2個の年少者用補助乗車装置を装備しているもの
3. 定格出力8キロワット以下（内燃機関の場合は 125cc 以下）のもの
4. 高速道路等(最高速度 60 km/h 超の道路)を運行せず、地方公共団体等によって交通の安全と円滑が図られている場所において運行するもの

以上の要件を全て満たすものを対象としている。安全確保を最優先に考え、高速道路等は走行しないこと、交通の安全等を図るための措置を講じた場所において運行すること、等を条件とした上で、認定を受けた超小型モビリティは公道走行が可能となる。また、国土交通省は、超小型モビリティの普及や関連制度の検討に向け、成功事例の創出、国民理解の醸成を促す観点から、地方公共団体等の主導によるまちづくり等と一体となった先導導入や試行導入の優れた取組みを重点的に支援^[4]を行う、「超小型モビリティの導入促進」事業を実施することとしている。これらの働きかけによって、超小型モビリティは一般に普

及していくことが期待されている。

1.1.2 インホイールモータ

超小型モビリティへの要求として、従来車両に比べて小型かつ軽量であることが挙げられる。しかし、このことはホイールベースの縮小や摩擦力の低下や操縦安定性を低下させる要因となる。小型軽量化と操縦安定性を両立させる手段の一つとして、インホイールモータが挙げられる。

インホイールモータ（以下、IWM）とは、車輪のホイールに内蔵されるモータのことである。IWMを利用する利点としては、

1. トルク特性が平坦なため変速機を必要としない
2. トルクの応答性が速く、制御が容易である
3. 効率がよく、構造も簡素で小型化できる
4. 回生制動を利用できる独立で駆動力を制御できるためトラクション制御や車両姿勢制御などに応用できる

という電動機の特徴に加えて、

5. 独立で駆動力を制御できるためトラクション制御や車両姿勢制御などに応用できる
6. モータ故障時に他のモータで運転を継続できるため、駆動システムの冗長化が可能である
7. いわゆるエンジンルームにモータがないため、デザインの自由度が高く、衝突の安全性も考慮しやすい

という利点が得られる^[5]。インホイールモータの課題としては、バネ下重量の増加やサスペンションとの干渉が残されていた。しかしながら、こうした課題も、モータの小型化、高性能化、機構の見直しなどによって解決されつつある^[6]。また、ドライブシャフト等の伝達機構をなくすることができるため、ボデー（車体）の骨格構造の自由度が増す^[7]。これにより、自動車の小型軽量化、それに伴う省エネルギー化や航続距離の延長が見込める。このことは、超小型モビリティの要求に合致するものである。

1.1.3 JSAE-SICE ベンチマーク問題 No.3

平野（トヨタ自動車）^[8]は、自動車技術会(JSAE)と計測自動制御学会(SICE)のベンチマーク問題No.3として、「エネルギー消費と動的性能の両立を目指した新モビリティ用車両制御」を設定している。この問題では、動力系として4輪IWMを搭載した、2名程度の乗車定員の小型モビリティにおいて、エネルギー消費という環境性能に加え、操縦安定性といった動的性能との両立を目指した統合制御系設計を設定している。

Table 1.1 Vehicle specifications

	IWM vehicle	Conventional car
Weight	510kg	1300kg
Wheel Base	2000mm	2600mm
Width	1190mm	1760mm
Height	1460mm	1515mm

ベンチマーク問題では、4輪IWM車両の各輪の制動・駆動力、操舵角、キャンバー角を独立に制御することで、従来の通常車両と同等以上の旋回加速性能、旋回制動性能、横風安定性、緊急回避性能を実現可能とする制御系設計を目指す。

表1.1には、ベンチマーク問題において設定されている車両の諸元を示す。IWM車両は、従来車両に比べて軽量かつホイールベースが短くなっている。そのことにより、IWM車両は従来車両に比べて路面外乱や横風などの外力に対して車両の運動が影響を受けやすくなることが想定される。

1.1.4 先行研究

坂井, 佐渡, 堀 (2000)^[9]は、各タイヤの駆動力の計算を駆動力の最大値を最小化するための最適化問題とし、その近似的な解法を提案した。各タイヤの駆動力が必要な総制駆動力とヨーモーメント力をなす制駆動力を線形に分解でき、両前輪、両後輪で発生する横力はそれぞれ等しい、という仮定のもとに、動的な駆動力配分を行う計算手法を提案した。

また、安藤, 藤本 (2009)^[10]は、四輪全輪のモータの制駆動力差モーメントを用いたヨーレート制御の手法を提案した。制駆動力の摩擦円使用率の二乗和を最小化するような制駆動力配分法を考え、それによって各車輪負荷率が大幅に小さくできることをシミュレーションで確認した。また、車輪を4輪独立制御できるインホイールモータ車に実装し、減速旋回試験の実験において各車輪制駆動力が提案手法によって各輪推定荷重に応じ配分されることを確認した。

これらの研究は、提案する制御方式によって車両の操縦安定性を確保できているか、に重点が置かれている。システムエンジニアリングの手法に則り、要求分析から制御の検証を行い、従来車両との比較を行うことが本論文の新規性である。

1.2 研究の目的と方法

本研究では、以上に述べた背景のもと、超小型モビリティの要求を満たす候補として小

型・軽量化された4輪IWM車両を選定し、JSAE-SICEベンチマーク問題No.3 で提供されているモデルに基づいて、操縦安定性向上のための制御システムを設計・検証する。

具体的には、操縦安定性向上のための制御システムの設計に際して、モデルベースシステムズエンジニアリングのアプローチを適用し、要求の明確化、機能の抽出を行う。そして、制御アーキテクチャの候補を検討するための論理モデルを作成する。制御アーキテクチャの候補として、まずは直接ヨーモーメント制御での設計と検証を行った後に、前輪操舵角入力、横変位とヨーレート出力の制御システムを選択した上で、システム同定を行い、システムの特性を明らかにする。その特性に基づいて、制御システムの設計と検証を行う。

1.3 論文の構成

本論文は1章から5章、謝辞、参考文献から構成される。

1章：序論

研究背景や本研究の目的について述べる。

2章：超小型電気自動車の操縦安定化制御システム設計

設計する操縦安定性向上に向けた制御系システムについて、モデルベースシステムズエンジニアリングの手法に則り、要求分析から、機能モデル、論理モデル、物理モデルに至るプロセスを示す。

3章：4輪の駆動力を制御入力とする直接ヨーモーメント制御システムの設計・検証

ベンチマーク問題No3のモデルを用いて、直接ヨーモーメント制御系の設計・検証を行う。「ダブルレーンチェンジ」と「横風走行」の2つをテストケースとして検証を行う。

4章：前輪操舵角を制御入力とする H_{∞} 制御システムの設計・検証

ベンチマーク問題No3のモデルを用いて、 H_{∞} 制御系の設計を行う。モデルの低次元化のためにシステム同定を行う。システム同定によって導出された低次元化モデルを使用し、 H_{∞} 制御系の設計を行う。設計した制御系を「ダブルレーンチェンジ」と「横風走行」の2つのテストケースにて検証を行う。

5章：結論

本研究で得られた結論について述べる。また、今後の展望についても言及する。

第 2 章

超小型電気自動車の 操縦安定化制御システム設計

2 超小型電気自動車の操縦安定化制御システム設計

2.1 モデルベースアプローチについて

2.1.1 システムズエンジニアリング

システムズエンジニアリングとは、システムの実現を成功させることができる複数の専門分野にまたがるアプローチおよび手段である^[11]。

システムズエンジニアリングのプロセスを表すものとして、図2.1に示される二元V字モデル(Dual Vee Model)^{[12][13]}がある。二元V字モデルはアーキテクチャVとエンティティVからなる。縦方向のV字がアーキテクチャVで、下に向かうにしたがい、システムレベルからハードウェアやソフトウェアなどの複数のサブシステム、コンポーネントへと分解されることを表している。システム、サブシステム、コンポーネントの開発のためにはそれぞれにエンティティVにしたがうプロセスがあり、図2.1ではこれをアーキテクチャVの面に垂直な方向に描いている。図2.2はエンティティVプロセスを示しており、システム、サブシステム、コンポーネントのそれぞれのレベルにおける開発が、図に示されているプロセスにしたがってなされることを意味する。

最上位のシステムレベルにおいて、要求の明確化がなされ、システム全体のアーキテクチャがいくつかの候補の中から選定されると、サブシステムやコンポーネントの選定がなされ、それぞれに対する仕様が明確になる。これらの仕様はサブシステムレベルやコンポーネントレベルへの要求となり、それぞれのエンティティVにしたがい、開発プロセスが進められることになる。

開発に携わるエンジニアは、担当している開発や設計が全体の中でどこにあつて、どんな役割を果たそうとしているのか、現在どのような開発段階にあるのかななどを、この図から把握することができる。サブシステムやコンポーネントの開発担当者は、そもそもの要求はどこから来ていて何が求められているのか、どこと繋がりを持っているのかといった情報を、システム開発の全体像の中で理解することにより、開発がより効率的になる^[10]。

当然ながら、システム開発初期の段階では、システムのアーキテクチャが定まっていなため、図2.1の二元V字モデルを描くことはできない。システムアーキテクチャが決定された段階で、サブシステム、コンポーネントが定まる^[14]。

システムズエンジニアリングのプロセスでは、①Operational View、②Functional View、③Physical Viewの順に、利害関係者の要求分析からシステム要求を導き、概念設計やアーキテクチャの選定まで進める。すなわち、①開発すべきシステムの運用シナリオ(ユースケース)を検討しこれを明らかにした上で、②システム要求の機能への分配を行うことで、システムに必要な機能を明確にし、そして、③その機能を実現するためにハードウェア、コンポーネントやソフトウェアとして何が必要かを定める^[13]、という手順を踏む。

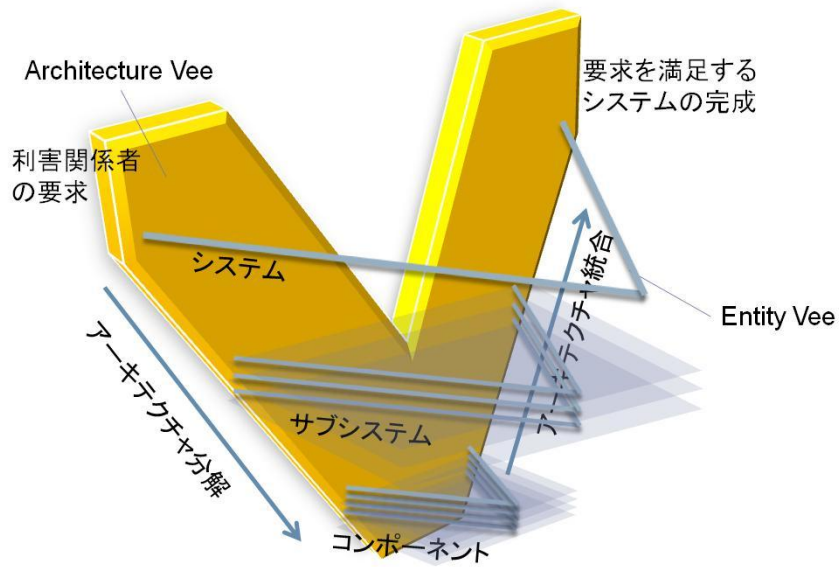


Fig.2.1 Dual Vee Model

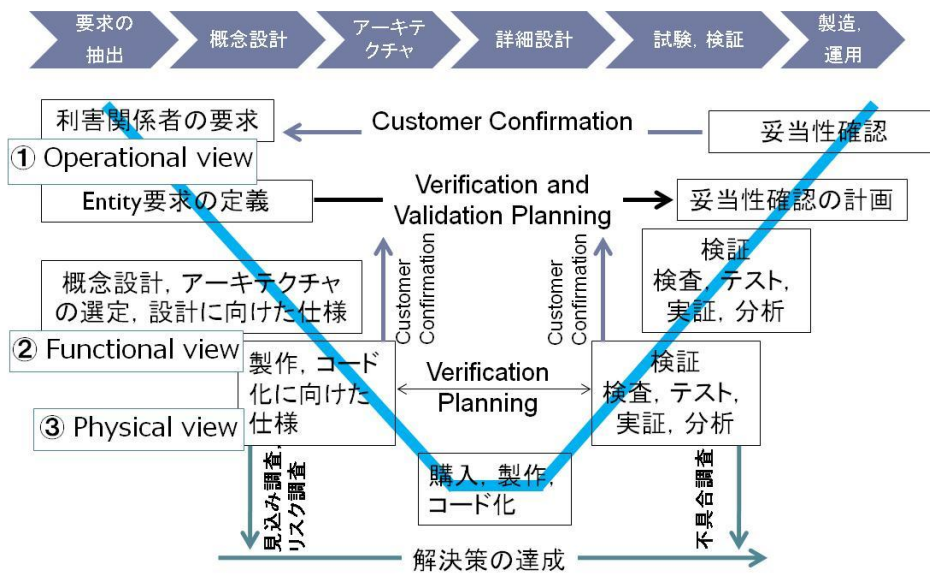


Fig.2.2 Entity Vee

2.1.2 モデルベースシステムズエンジニアリング

モデルベースシステムズエンジニアリング(Model-Based systems Engineering, MBSE)とは、システムのアーキテクチャを表現するモデルを使用しながら、システムズエンジニアリングを行うことを指す。

システムズエンジニアリングにおいて、要求仕様書やアーキテクチャ設計書などの文書が使われることがあるが、その場合、表現が不完全になることがあり、情報が誤解して伝わる可能性がある。MBSEのアプローチでは、統一された表記法にもとづくモデルを共有することで、複数の専門分野チームがさまざまな検討を行うことが容易となる。これにより、コンカレントデザインの促進が期待される。

また、システムアーキテクチャの選定には、さまざまな専門分野にまたがって、システムの解析(Analysis)と総合(synthesis)を行い、トレードオフ検討や評価を行う必要がある^[15]。このフェーズにて、抽象度を上げて複数の物理領域でのモデリングを行うことで、サブシステムやコンポーネントの相互関係を考慮しながらシステム全体の性能や品質の評価や解析を行うことができる^[16]。MBSEを用い、評価や解析の根拠となる要求やアーキテクチャがモデルで記述されることによって、トレーサビリティが確保され、変更管理への対応に有効となる。

2.2 要求分析と機能分析

2.2.1 要求分析

4輪インホイールモータ車両について、要求分析を行った。図 2.3 は、得られたモデルである。このモデルは、MBSE の表記法の一つである SysML (Systems Modeling Language) の要求図として記述されている。

ここで、○の中に+が書いてある記号が先にある線は、要求が細分化されたことを示している。例えば、「乗員の安全」という要求を細分化した要求が「衝突安全性」である。《derive》は、矢印の元の要求が矢印の先から導出されたものであることを示している。

要求分析の結果、「燃費」や「乗り心地」、「乗員の安全」の他、「定常円旋回性能」や「制動性能」、「緊急回避性能」の確保などが「走行性能」として要求されている。また従来車両よりも小型・軽量化されているにも関わらず、従来車両と同等の走行性能が要求されていることに基づき、車両の「小型・軽量化」と「走行安定性」の要求から、「低転がり摩擦下での走行安定性」が導出されている。

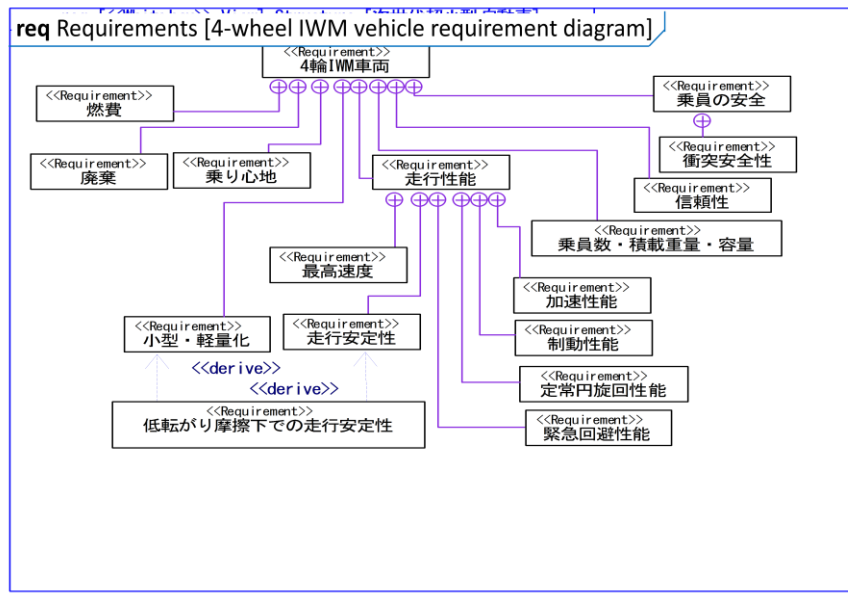


Fig. 2.3 Requirement diagram of in-wheel-motor vehicle

2.2.2 機能分析

次に、4輪IWM車両のコンテキストレベルでの機能アーキテクチャを構成した。その機能モデルを図2.4に示す。この図は、CATIA V6を用いて作成している。

この図では、車両の走行に関わる要素ブロックとして、シーケンス図で定義したコントローラ、車両、運転者、路面を定義した。図では、ブロック間に伝達されるフローを記述している。ブロックの境界に矢尻が表示されており、矢尻が外を向いている場合は、フローがブロックから出力され、矢尻が内を向いている場合はフローがブロックに入力していることを示している。また、線の色が白の場合はフローがデータであることを示し、オレンジ色の場合はフローが制御信号であることを示している。例えば、車両は、運転者に車両状態、コントローラに車両状態信号を提供し、路面から路面摩擦、運転者から操作、コントローラから制御入力信号を与えられている。

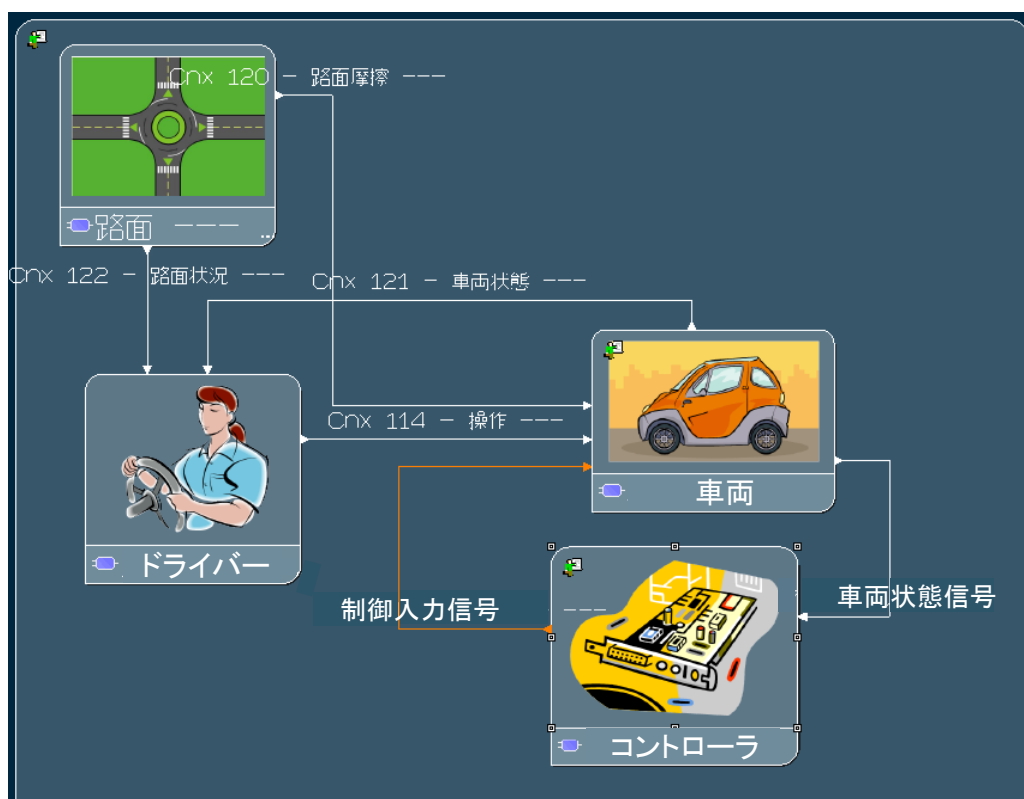


Fig.2.4 Functional model of in-wheel motor vehicle

2.2.3 シーケンス図と要求の詳細化

2.2.1 節で導出された要求「低転がり摩擦下での走行安定性」が必要とされるシナリオ(ユースケース)の例として、「急なハンドル操作」と「横風を受ける」の二つを取り上げ、そのシーケンス図を図 2.5 と図 2.6 に示している。この図は SysML で記述を行っている。

この図では、コンテキストレベルでの解析のため、2.2.2 節で定義されたコントローラ、車両、ドライバー、路面といったブロックと、「横風を受ける」シナリオでは横風ブロックを定義し、それぞれの相互作用とブロックが持つべき機能を明らかにしている。図 2.5 と 2.6 に事例として示した「急なハンドル操作」と「横風を受ける」の二つのユースケースからは、「横滑りを受ける」からのシーケンスが共通していることがわかる。これらのシーケンス図から導かれた機能に基づき、要求の詳細化を行った結果を図 2.7 に示す。要求「低転がり摩擦下での走行安定性」は、「車両の安定化制御」によって実現され、「車両の安定化制御」には、「横滑り軽減制御」、「ヨーレートの検出」、「目標ヨーレートの算出」、「路面摩擦係数の確定」といった機能要求が含まれている。最下段には、要求を満足するための物理的な機器の例が書かれており、例えば、図 2.7 では、要求「ヨーレートの検出」は、「ヨーレートセンサー」によって満足されると記述している。しかし、何を使用して満足する

か、については、検討を行う必要があり、そのためには必要となる物理的なインタフェースを明確にしなければならない^[14]。

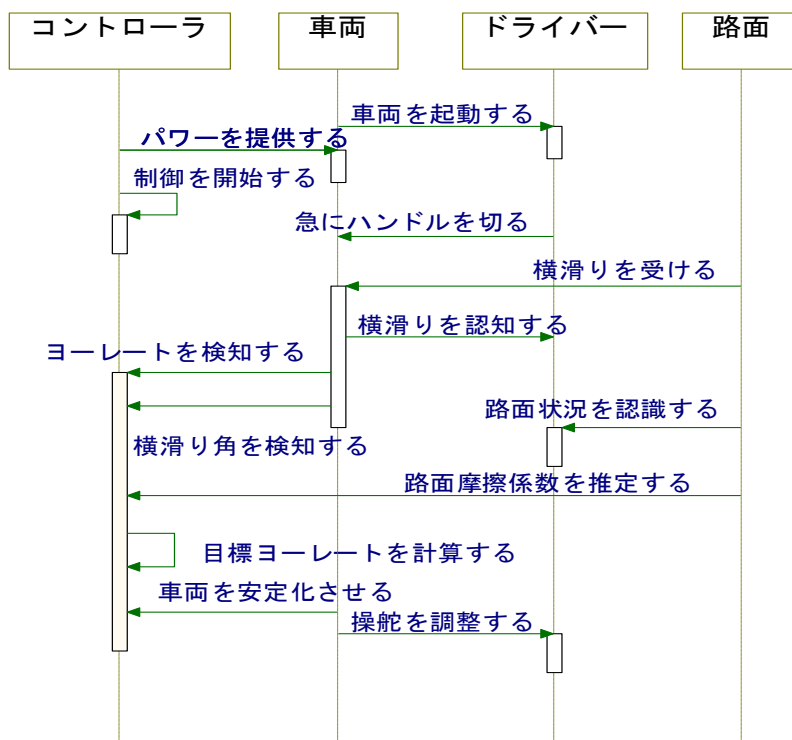


Fig. 2.5 Sequence diagram of abrupt steering

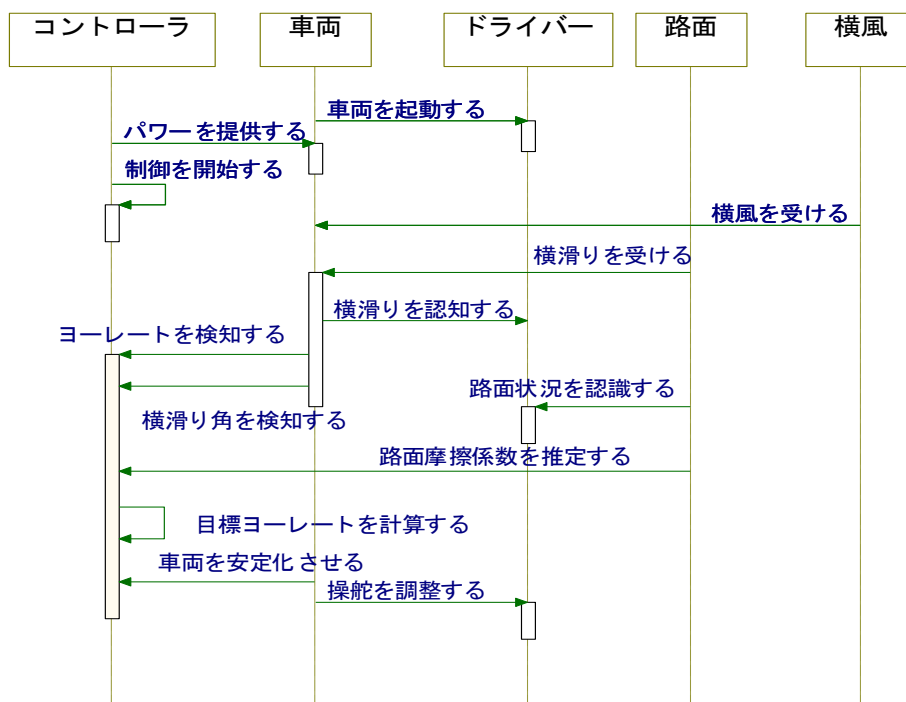


Fig. 2.6 Sequence diagram of car moving in crosswind

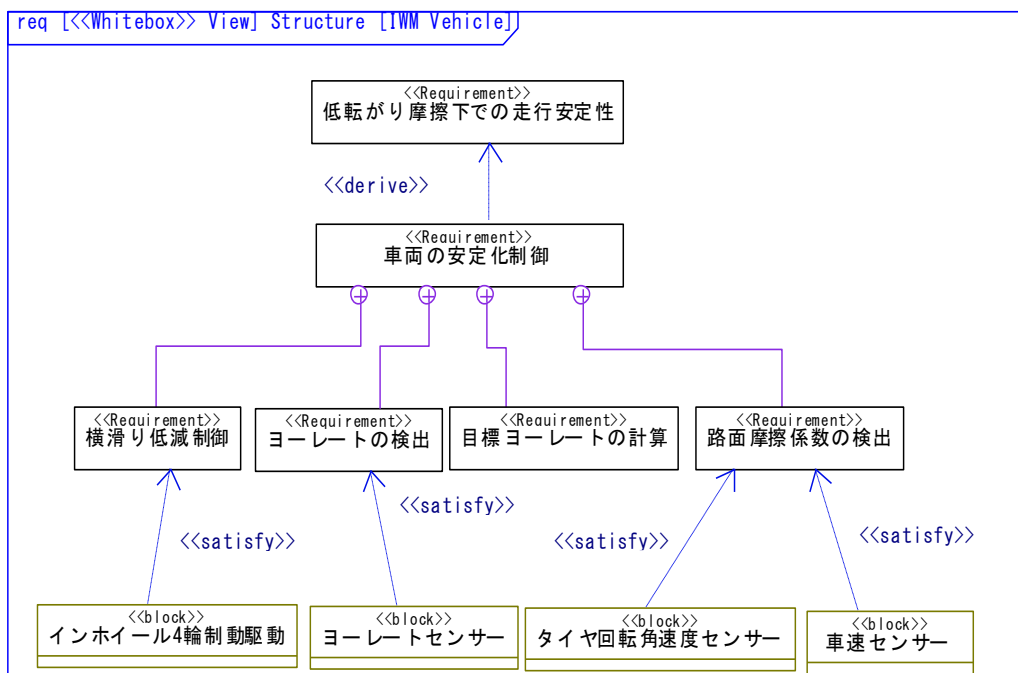


Fig. 2.7 Requirement diagram of driving stability

2.3 論理モデル/物理モデル

2.3.1 論理モデル

機能モデルと同様に CATIA V6 で記述した、インホイールモータ車両の論理モデルを図 2.8 に示す。論理モデルでは、機能モデルで作成した要素ブロックとフローに対して、それぞれ具体的な構成要素と制御信号を分配し、システムの構成を論理的に記述している。ブロックの境界に矢尻が表示されている場合は、矢尻が外を向いている場合は、フローがブロックから出力され、矢尻が内を向いている場合はフローがブロックに入力していることを示している。ブロックの境界に四角が表示されている場合は、フローをやり取りしていることを意味している。例えば、機能モデルにおいて、運転者から車両に提供されるとした「操作」は、論理モデルではハンドル角、アクセル踏みこみ量、シフト情報、ブレーキ踏みこみ量と記述され、車両内部の構成要素である操舵システム、パワートレインシステム、ブレーキシステムにそれぞれ入力されている。

また、車両の安定化制御方策としては、コントローラから車両への制御入力信号に、ステア角入力、キャンバー角入力、トルク入力を与えている。後に行う制御系設計では、システム解析やシミュレーションにより、トレードオフ検討を行う。例えば、車両の横滑り防止のような車両姿勢安定化のためにどのように制御を行うと良いかを検討し、最終的にどの制御入力と制御出力を用いるかを定めることになる。

図 2.4, 2.8 に示した機能モデルおよび論理モデルは、そのままではシミュレーションを実行できないが、こうしたモデル図をもとに、トレードオフ検討を行うために何を用意する必要があるかを検討できる。例えば、図 2.2 に示したシーケンス図は、例として「急なハンドル操作」と「横風を受ける」のユースケースをもとにしているが、このシミュレーションを実施するには、コントローラの他に、車両、ドライバー、路面を表すモデルが必要となる。図 2.4, 2.8 の機能モデル、論理モデルをもとにして、テストケースで必要な精度のレベルに応じて適切な詳細度のモデルを検討できる。すなわち、シミュレーションに必要とされるモデルは詳細であれば詳細なほど良いということではなく、要求される解析にとって必要十分な抽象度のモデルによってシステムの本質を表すことが重要である。

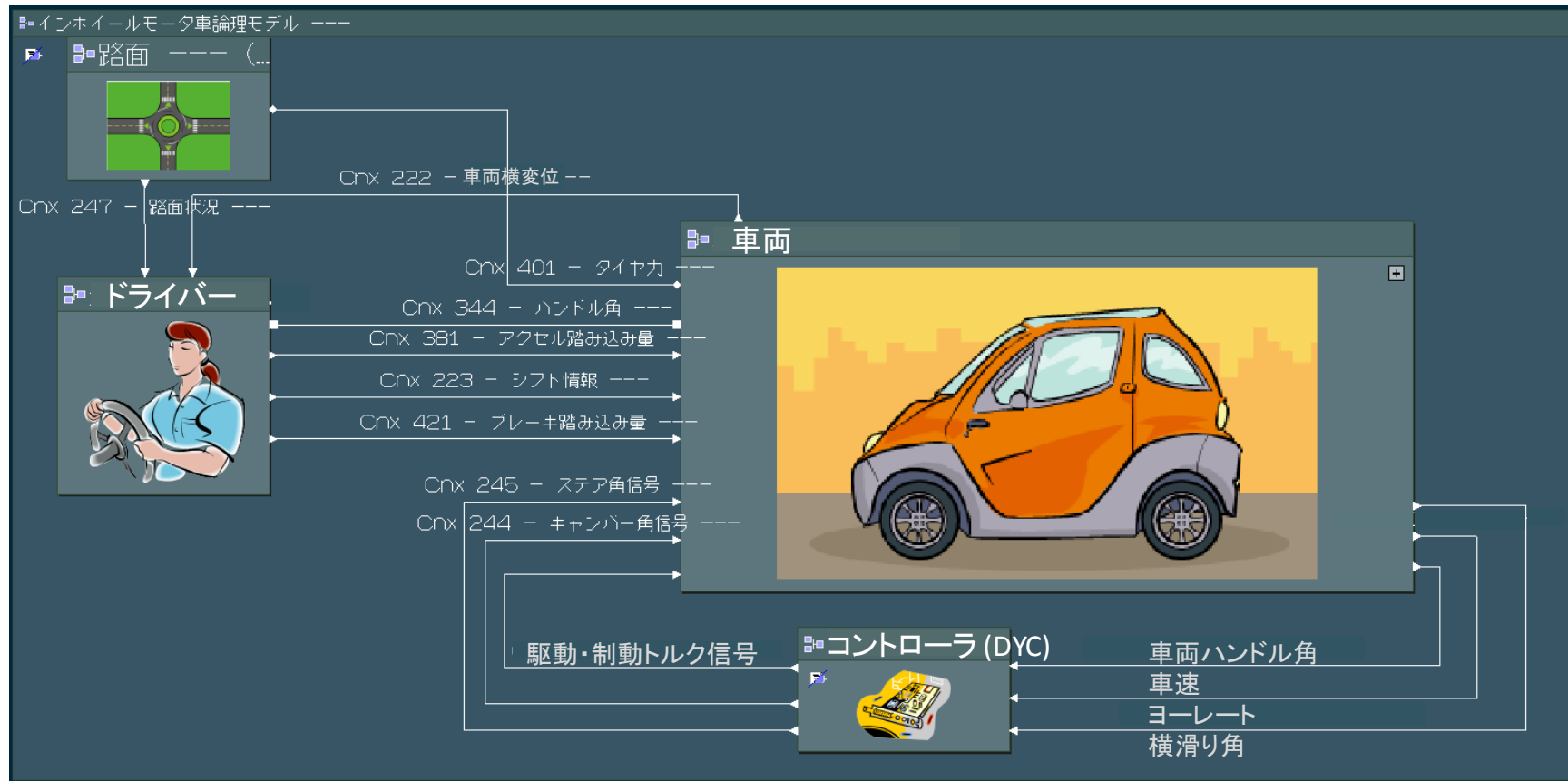


Fig. 2.8 Logical model of in-wheel motor vehicle

2.3.2 物理モデル

物理モデルとしては、1.1.3 項で紹介した自動車技術会と計測自動制御学会のベンチマーク問題 No.3^[8]で提供されているモデルを使用する。このモデルは Dymola というソフトウェアで作成されている。Dymola は、Modelica 言語という、Modelica 協会が開発を行っている物理モデリング用のオブジェクト指向言語をベースとした物理系複合モデリング・シミュレーションソフトウェアである。ベンチマーク問題で提供されているモデルを図 2.9 に示す。モデルは、車両モデルとドライバーモデル、路面モデル、天候モデルから構成されている。(a)は Dymola により記述されたモデル、(b)はモデルを Simulink にインポートした際にできるモデルのブロックである。

図 2.10 に車両モデルの詳細を示す。シャーシ部、パワートレイン部、ブレーキ部で構成されている。4 輪 IWM 車両のパワートレインは、4 輪に IWM が配置されており、4 輪をそれぞれ独立に駆動することができる。また、ステア角への入力とキャンバー角への入力を備えている。また、それぞれのブロックは、機構系や油圧系など複数の物理領域のコンポーネントで構成されている。具体的な形状を表す 3D モデルは含まないが、コンポーネント間の相互関係や各コンポーネントの性能を決定するパラメータが定められており、車両全体の挙動を計算し、解析することができる。

また、図 2.12 にドライバーモデル^[16]の詳細を示す。Perception ブロックは、設定された走路形状と現在の車両位置の関係を把握し、Planning ブロックにおいて、所望の走路と車速プロファイルから走路上でトレースすべき目標地点の点列を設定する。そして、Tracking ブロックにて、目標地点の座標、通過速度と現在地点の座標、通過速度の差か

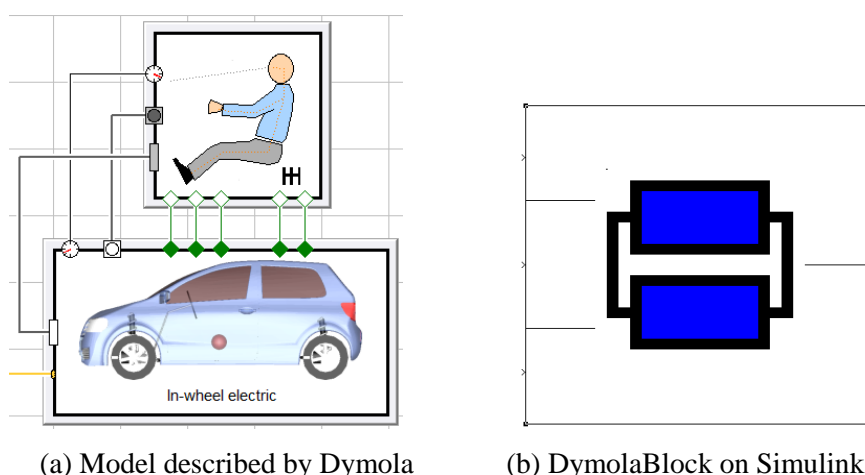


Fig.2.9 Physical model from JSAE-SICE Benchmark Problem No.3

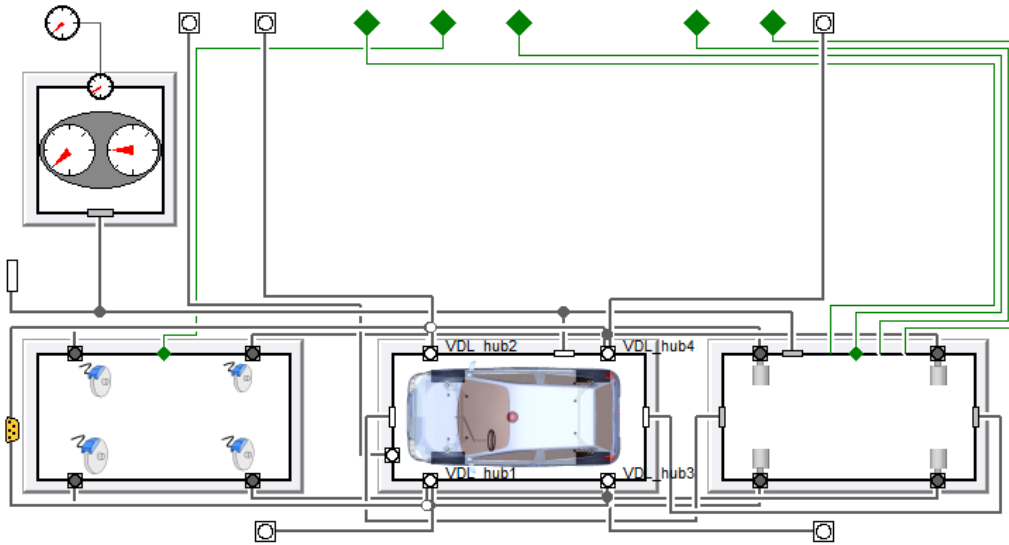


Fig.2.10 Vehicle model consisting of parts of chassis, power train and brake

ら、ステアリング、アクセルペダル、ブレーキペダルの操作量を決定する^[14]。ベンチマーク問題では、ドライバーモデルを変更することは行わない。

路面モデルでは、車両の走る走路の幅や摩擦係数を設定することができる。ベンチマーク問題では、摩擦係数を把握することも車両の機能の一つとなるため、路面モデルを変更することは行わない。

天候モデルでは、天候や温度、気圧、風など自然の条件を入力することができる。

テストケース

要求を明確化する過程で想定したユースケースの例では、図 2.5,2.6 のシーケンス図として、「急なハンドル操作」と「横風を受ける」を示した。このユースケースを制御性能検証用のテストケースとしてそのまま利用することもできるが、本論文では、ダブルレーンチェンジ^[8]と横風試験^[8]のシミュレーションを行うことで制御性能の検証を行う。

ISO 3888-1^[18]ではダブルレーンチェンジ試験条件のコースを設定しており、シミュレーションで用いるコースを図 2.12 に示す。車両は図 2.12 の原点からスタートし、丸印で囲まれた長方形の部分で 60 km/h で通過する必要がある。図中の数値は丸印の座標を示している。また、横風試験では、速度 60 km/h で走行中にスタートしてから 3 秒目から 3 秒間、走行軸に垂直な方向から 20 m/s の風を受ける試験である。この際、ドライバーモデルはもとの直進走行路に戻ろうと操舵を行う。横風を受けた際にも車両の横変位を最小にすることを目的としている。

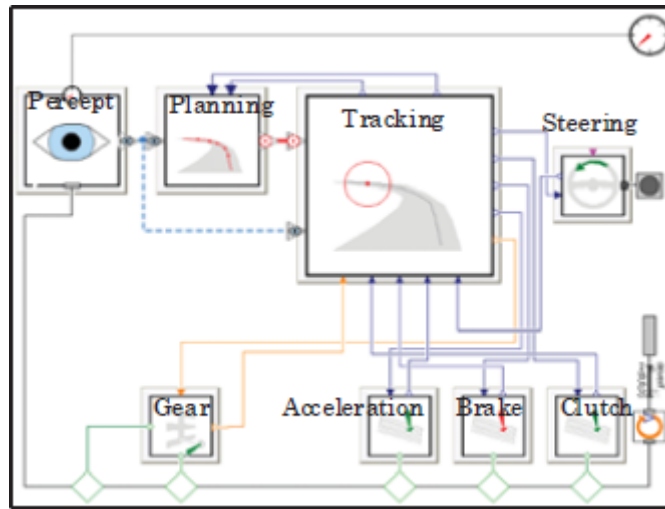


Fig.2.11 Structure of Driver model

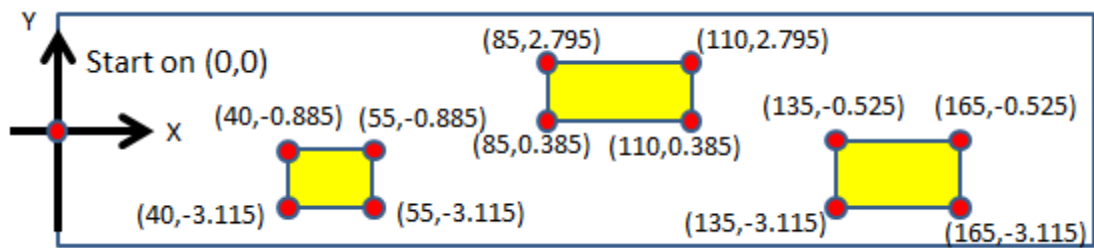


Fig.2.12 Road condition for double lane change

第3章

4 輪の駆動力を制御入力とする 直接ヨーモーメント制御システムの 設計・検証

3 4 輪の駆動力を制御入力とする直接ヨーモーメント制御システムの設計・検証

車両の走行安定化制御手法としては、さまざまな方法が提案されている。例えば、車両横方向の加速度，加加速度に応じて，車両前後方向の加速度を制御している G-Vectoring 制御^[19]と呼ばれる方法や，目標ヨーレートを算出し，車両のヨーモーメントとの差から後輪の操舵角を決定する後輪操舵制御^[20]，直接ヨーモーメント制御^[18](Direct Yaw moment Control, 以下, **DYC** と記す)などがある。DYC とは，横滑り角が大きくなり車体が危険な状態に陥るのを防ぐため，左右輪の制駆動力差を用いてヨーモーメントを発生させ，車体の挙動を安定させる^[21]制御である。DYC は，前述した G-Vectoring 制御や後輪操舵制御と併用することでさらなる安定性が得られることが示されている^{[19][22]}。本章では，直接ヨーモーメント制御を取り上げ，その設計を行う。

3.1 制御システムの構成

DYC システムの構成を図 3.1 に示す。ベンチマーク問題で提供されたモデルは，コンパイルを行うことで，図中の”Dymola Block”の部分に格納されている。また，目標ヨーレートを算出するためにブロックを追加した。計算式は(3.1)から(3.4)の通りである。

$$\gamma_i = \frac{K_s}{1 + T_s s} \delta \quad (3.1)$$

$$K_s = \frac{(a_f + a_r)c_f c_r V}{a_r c_r M V^2 + a_f (a_f + a_r)c_f c_r} \quad (3.2)$$

$$T_s = \frac{M a_f V}{(a_f + a_r)c_f} \quad (3.3)$$

$$C_f = C_r = \arctan(B_y C_y D_y) \quad (3.4)$$

ここで， δ はステアリングの操舵角， V は車体の速度， M は車重， a_f は重心から前輪軸との距離， a_r は重心から後輪軸との距離， $B_y C_y D_y$ は横力 Magic Formula タイヤモデル係数である。車両の横滑り角 β ，ヨーレート γ を検出し，それぞれ算出された目標横滑り角 β_i ，目標ヨーレート γ_i との差分をフィードバック信号とし，式(3.5)より車両に与える制御ヨーモーメント M を求める

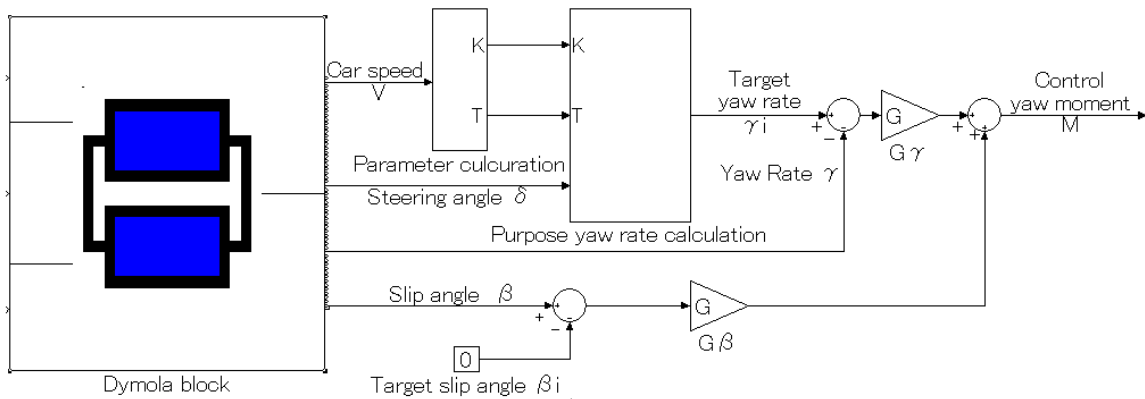


Fig. 3.1 Control system architectures for Direct Yaw moment Control

$$M = G_{\beta}(\beta - \beta_i) + G_{\gamma}(\gamma_i - \gamma) \quad (3.5)$$

ここで、 G_{β} 、 G_{γ} はそれぞれ横滑り角とヨーレートに関するフィードバックゲインである。式(3.5)で与えられた制御ヨーモーメント M を4輪に分配するため、制御ヨーモーメント M をトレッドで除して左・右前後輪合計の駆動力および制動力を求める。そして、左右それぞれの前・後輪からは、図3.2のように均等に駆動力および制動力を発生させるものとする。また、これらの駆動力および制動力から、車輪半径を乗じて4輪それぞれのIWM出力トルクを求めている。たとえば、制御ヨーモーメント M が正の値をとる場合には、Z軸を地面鉛直方向にとっているため、右側の前後輪IWMには制動トルクがかかり、左側の前後輪IWMには駆動トルクがかかることとなる。

3.2 横風試験を利用した制御システムの設計

横風を受けて横滑りが発生する横風試験で、まずDYCのフィードバックゲイン G_{β} 、 G_{γ} を定めた。このシミュレーションでは、ドライバーのハンドル操舵角は 6° 程度と

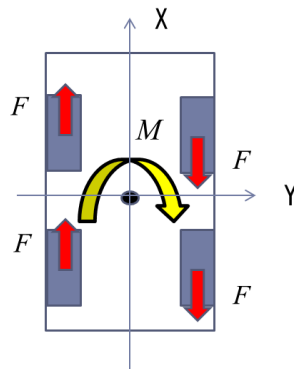
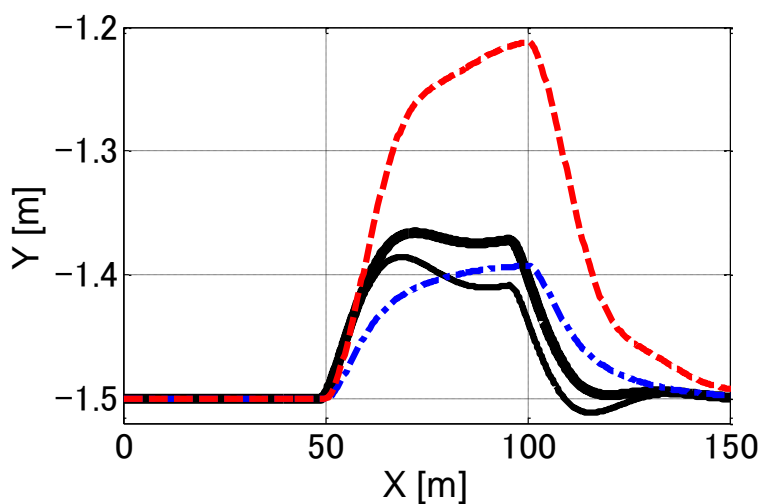


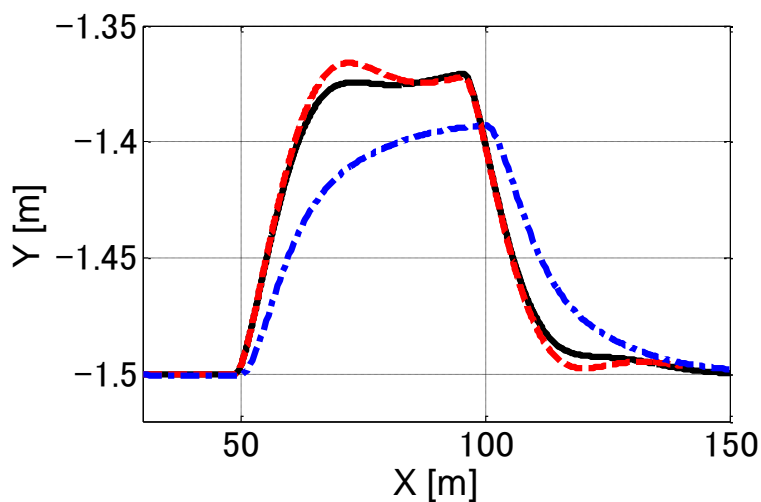
Fig. 3.2 Generating Yaw Moment with tire force

少なく、ヨーレートの発生は小さいため、 G_y を 0 とし G_β のみを調整した。図 3.3 に横風試験結果の XY 平面上の軌跡を示す。従来車両の応答を破線で、制御が施されていない 4 輪 IWM 車両の応答を一点鎖線で示している。従来車両の応答より 15 %程度大きいものの、太い実線で示す $G_\beta=1800$ の場合に比べて、細い実線の $G_\beta=2000$ の場合は、風の影響による Y 方向の変位が抑えられることがわかる。しかしながら、 $G_\beta=2000$ の場合、オーバーシュート量は若干大きく、横風が止んだ後に Y 軸の負の方向への変位が生じるため、 $G_\beta=1800$ と決定した。次に、 $G_\beta=1800$ に固定し、 $G_y=0, 50$ の場合で横風試験応答を比較した。図 3.4 XY 平面上の軌跡、図 3.5 ヨーレートに示すように、破線の $G_y=0$ の場合に比べ、実線の $G_y=50$ の場合にはヨーレートが抑制されることがわかる。



— : $G_\beta=1800$, — : $G_\beta=2000$, - - - : Without control, - . - : Conventional car

Fig.3.3 Vehicle trajectory in crosswind test for G_β effect



— : $G_\gamma=50$, - - - : $G_\gamma=0$, - . - : Conventional car

Fig.3.4 Vehicle trajectory result of Crosswind test for G_γ effect

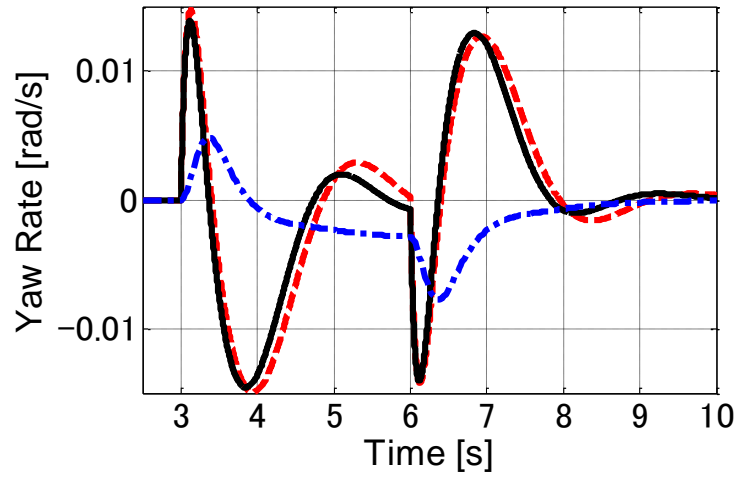


Fig.3.5 Yaw rate result of Crosswind test for $G\gamma$ effect

図 3.6 には $G_\beta = 1800$, $G_\gamma = 50$ とした場合に算出された車両の横滑り角、図 3.7 は車両の目標ヨーレートを一点鎖線で示している．実線は車両のヨーレートである．図 3.8 は制御ヨーモーメント M を表している．

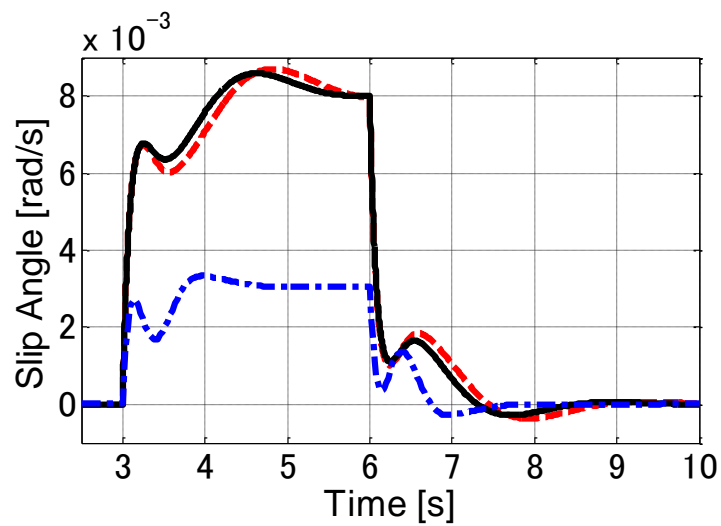


Fig.3.6 Slip angle of Crosswind test for $G\gamma$ effect

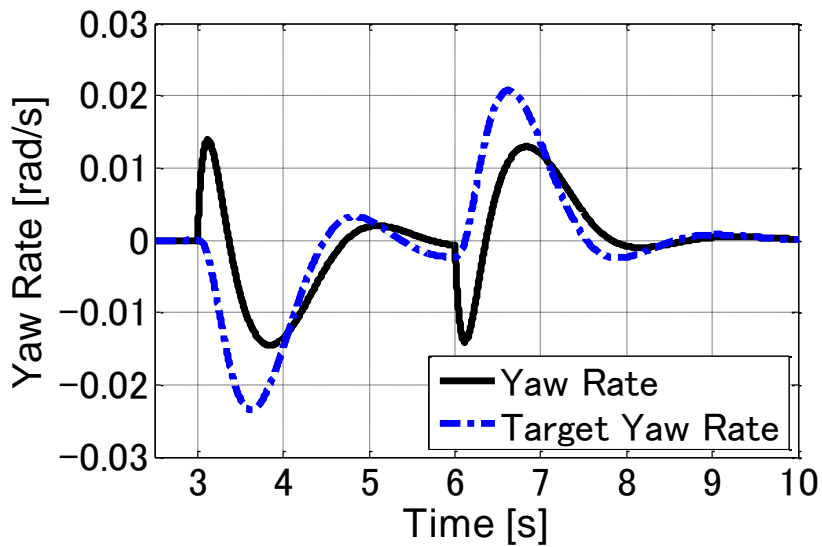


Fig.3.7 Difference between yaw rate and target yaw rate on Crosswind test for $G_{\beta}=1800$, $G_{\gamma}=50$

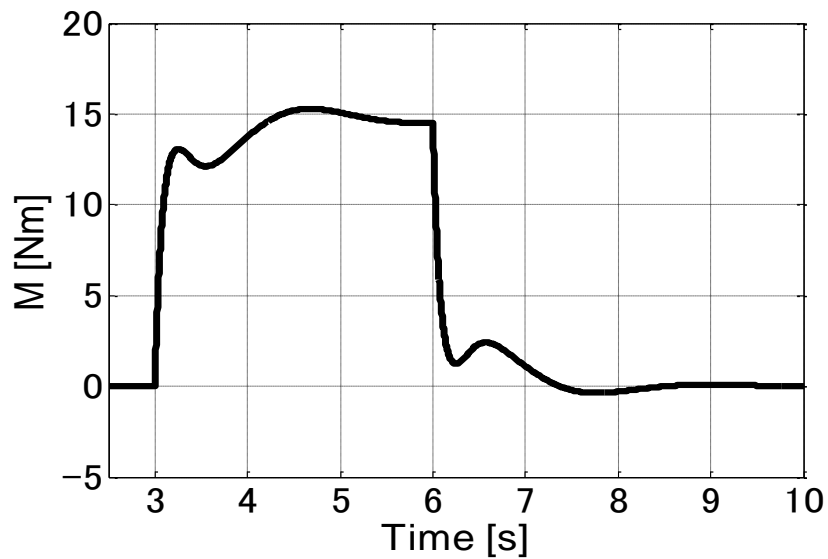


Fig.3.8 Control yaw moment M on Crosswind test for $G_{\beta}=1800$, $G_{\gamma}=50$

3.3 ダブルレーンチェンジにおける制御システムの検証

$G_{\beta} = 1800$, $G_{\gamma} = 50$ とした場合のダブルレーンチェンジの検証結果を図 3.9~3.13 に示す。実線は制御が施された 4 輪 IWM 車両，破線は従来車両，一点鎖線は制御が施され

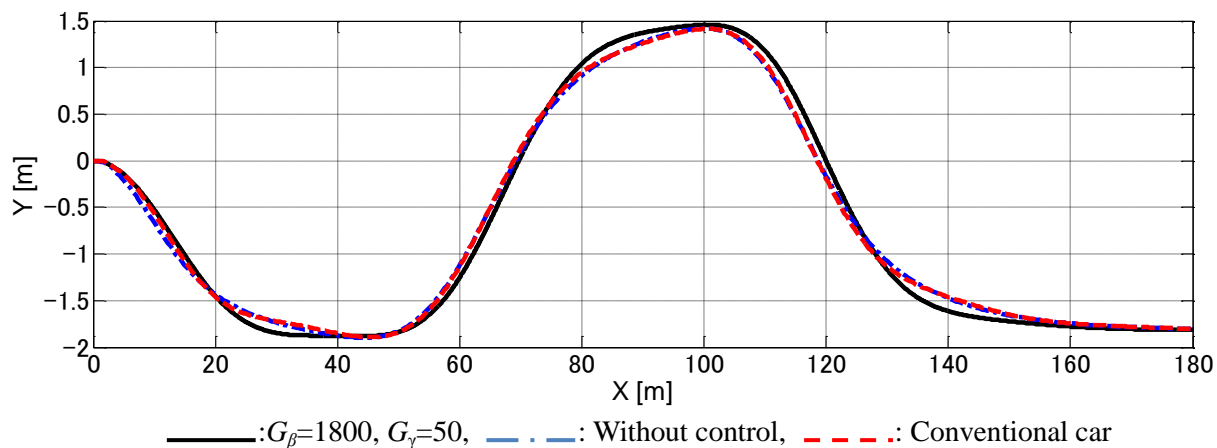


Fig.3.9 Vehicle trajectory on Double Lane Change test

ていない4輪IWM車両である。図3.9のXY平面上の車両軌跡から、従来車両や制御されていない4輪IWM車両が徐々に姿勢を変えて走行レーンに水平な姿勢をとるのに対して、制御が施された4輪IWM車両は急峻に水平な方向に姿勢を変えることがわかる。図3.10はヨーレート、図3.11は横滑り角を示しており、制御によってヨーレートの変化が抑えられているのに対して、横滑り角は大きくなってしまっている。図3.12には算出した目標ヨーレートを一点鎖線で、ヨーレートを実線で示している。図3.13は制御ヨーモーメント M を表している。

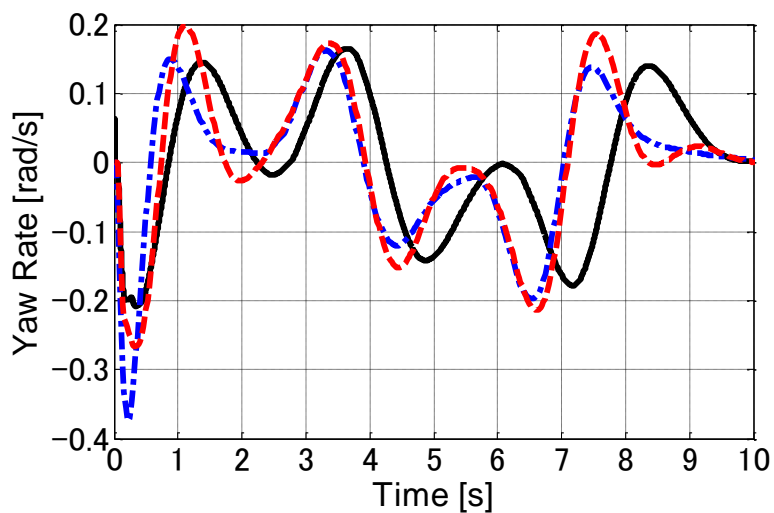


Fig.3.10 Yaw rate on Double Lane Change test

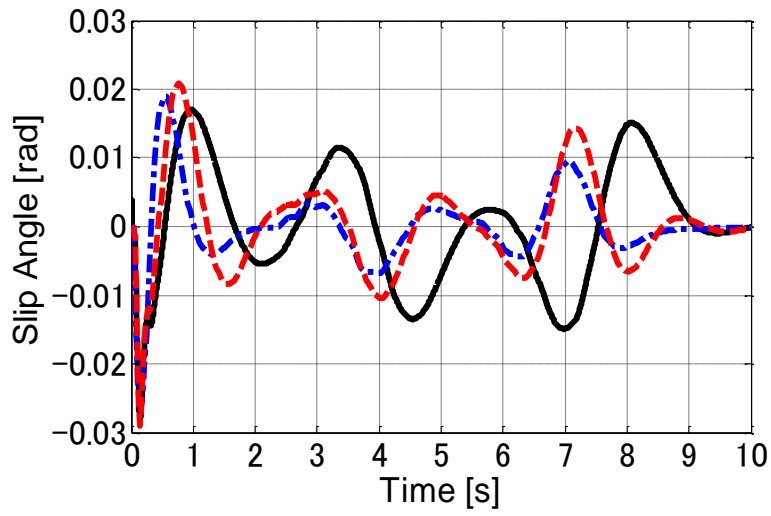


Fig.3.11 Slip angle on Double Lane Change test

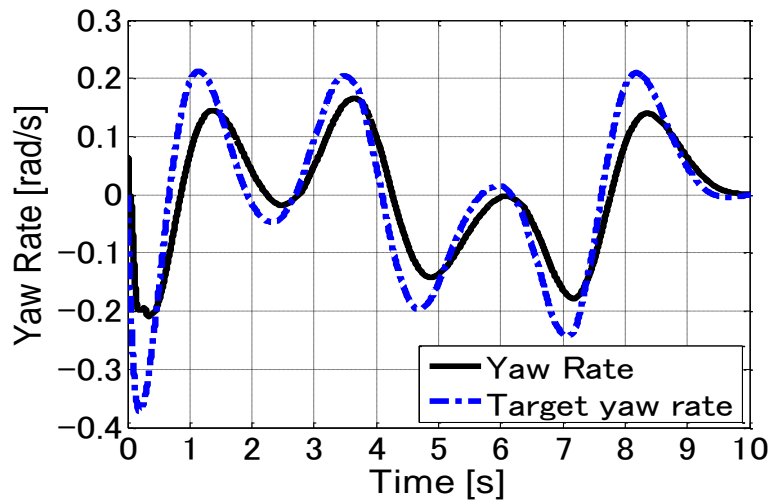


Fig.3.12 Difference between yaw rate and target yaw rate on Double Lane Change test

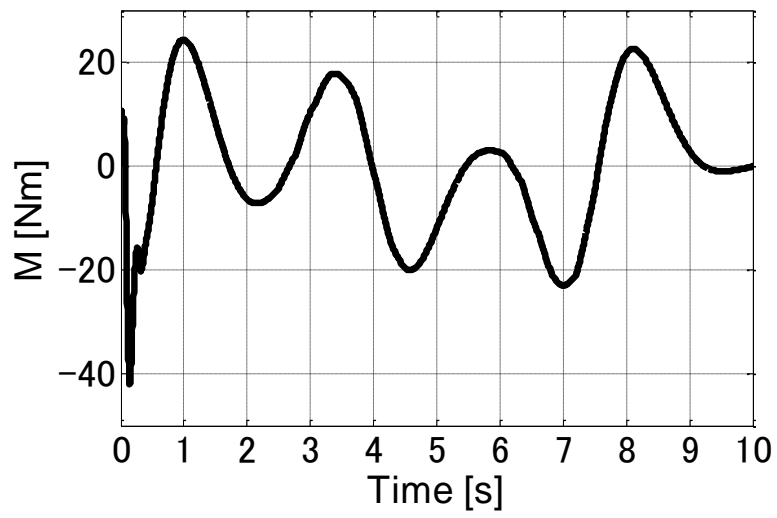


Fig.3.13 Control yaw moment M on Double Lane Change test

3.4 考察

横風試験においては、横滑り角の応答から、横風の吹いている3~6秒までは従来車両と比べて大きく横滑り角が生じているが、風が収まる6秒目以降は速やかに0に向かって収束していることがわかる。いずれにしても、従来車両の横風応答性能には達していないため、さらなる検討が必要である。

ダブルレーンチェンジでは、図3.8のXY平面上の車両軌跡から、従来車両や制御されていない4輪IWM車両が徐々に姿勢を変えて走行レーンに水平な姿勢をとるのに対して、制御が施された4輪IWM車両は急峻に水平な方向に姿勢を変えることがわかる。制御によってヨーレートの変化が抑えられているのに対して、横滑り角は大きくなってしまっている。

以上の結果から、DYCにもとづく制御により、横風対しては直進コースへ復帰を従来車両程度に早めることができ、また、ダブルレーンチェンジでは走行レーンに対し俊敏に水平な姿勢を取ることがわかる。ただし、ヨーレートの抑制に比べて横滑り角の抑制は十分とは言えず、制御方法を検討する必要がある。

第 4 章

前輪操舵角を制御入力とする
 H_{∞} 制御システムの設計・検証

4 前輪操舵角を制御入力とする H_∞ 制御システムの設計・検証

本章では、 H_∞ 制御系設計を行う。 H_∞ 制御^[9]とは、図 4.1 に示すフィードバック制御系を用い、外乱から制御量までの伝達関数の大きさをある値以下にする制御である。図 4.1 の G は一般化プラント、 K は制御器である。 w は外部入力（参照信号や外乱，センサノイズなど）を， z は制御量（制御偏差や制御入力，制御出力など）をそれぞれ表す。また u および y は，制御入力と観測出力で，それぞれ，制御器からの出力および入力となる量である。

図 4.1 の入出力を持つ伝達関数は式で定義する

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

一般化プラント G に対して，制御器

$$u = Ky \quad (4.2)$$

を用いてフィードバック制御を施すと， w から z までの伝達関数は，代入することにより，

$$\begin{aligned} z &= G_{zw}w \\ G_{zw} &= G_{11} + G_{12}K(I - G_{22}K)^{-1}G_{21} \end{aligned} \quad (4.3)$$

G_{zw} の大きさの尺度として H_∞ ノルムを用いる。安定な伝達関数 G_{zw} の H_∞ ノルムは $\|G_{zw}\|_\infty$ と書き，次式で定義する。

$$\|G_{zw}\|_\infty := \sup_{0 \leq \omega < \infty} \bar{\sigma}(G_{zw}(j\omega)) \quad (4.4)$$

制御目的は外部入力 w に対して，制御量 z をなるべく小さく抑えることなので，伝達関数 G_{zw} の大きさを何らかの意味で小さくする制御器 K を設計すればよいことになる。そして，一般化プラント G に対して閉ループ系を安定にし， $\|G_{zw}\|_\infty < \gamma$ を満たす制御器 K を求める。

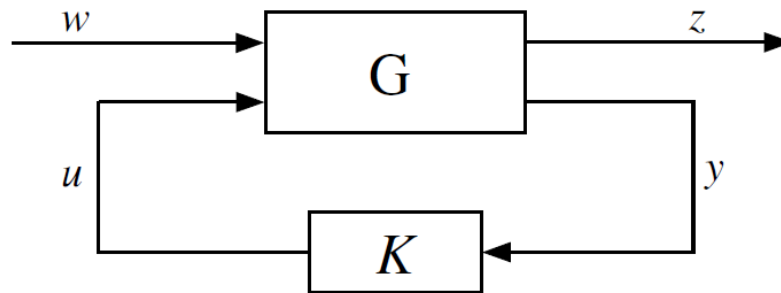


Fig.4.1 Feedback control system

H_∞ 制御の特徴としては、外乱に強い制御手法であること、ロバスト性、周波数領域での設計ができるようになったことが挙げられる。

今回は制御出力を前輪操舵角 u_δ , 制御入力を横変位 y とヨーレート γ とするコントローラ的设计を行う。

4.1 制御系設計のためのシステム同定

操縦安定化のための制御系設計に用いる低次元化モデルを獲得するため、ドライバーが操舵を行わない状態での直進定常走行中のシステム同定を行う。まず、4 輪駆動により直進定常走行している 4 輪 IWM 車両モデルに対して、図 4.2 のような幅 0.4 s, 振幅 1 rad の三角波形インパルス操舵角を前輪に印加するシミュレーションを Dymola 上で行った。同定入力とした前輪操舵角と横変位 y とヨーレート γ の応答をサンプリング周期 10 ms のデータとして収集した。図 4.3 と 4.4 に走行速度 60 km/h (11.11 m/s) で直進走行中、3 s 時に、前輪へ 1 rad の三角波形インパルス形の操舵角を 0.4 s 加えたときの横変位 y とヨーレート γ 応答を示す。

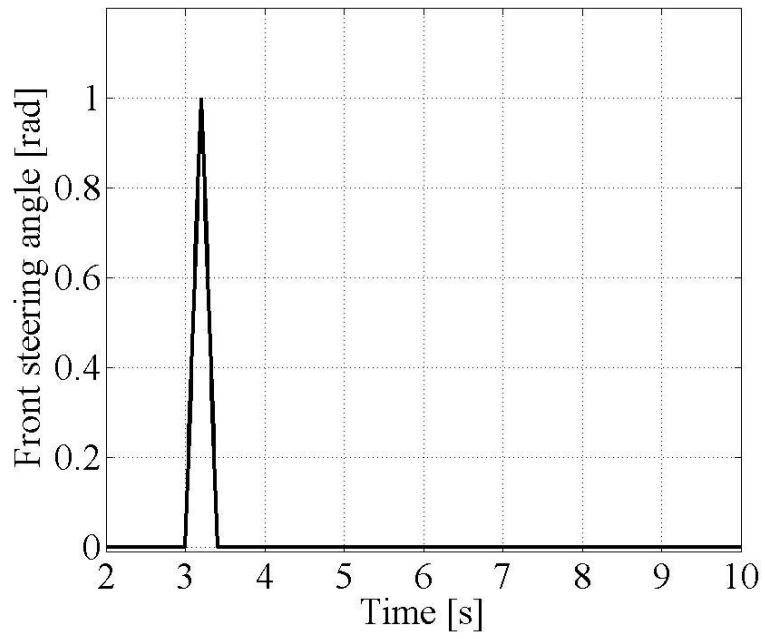


Fig.4.2 Impulsive front steering angle input

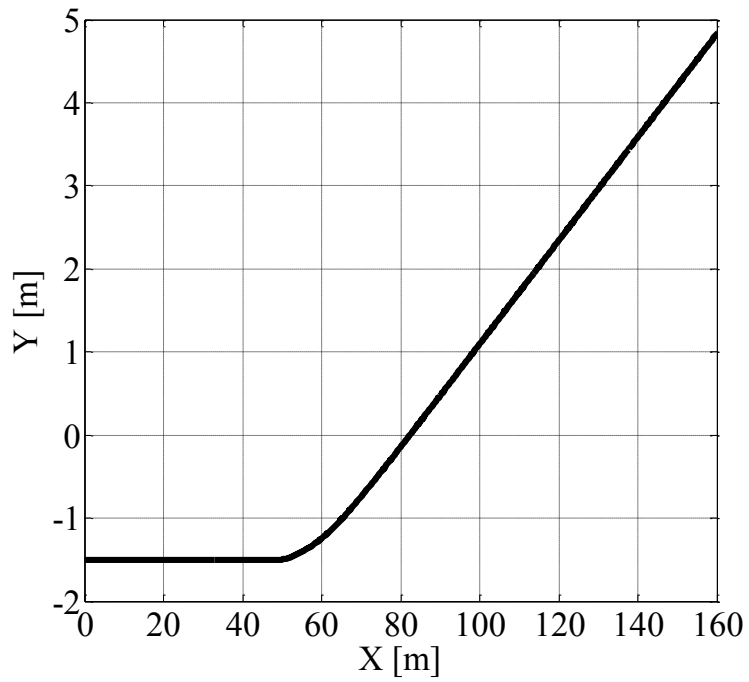


Fig.4.3 Simulation result of Lateral displacement

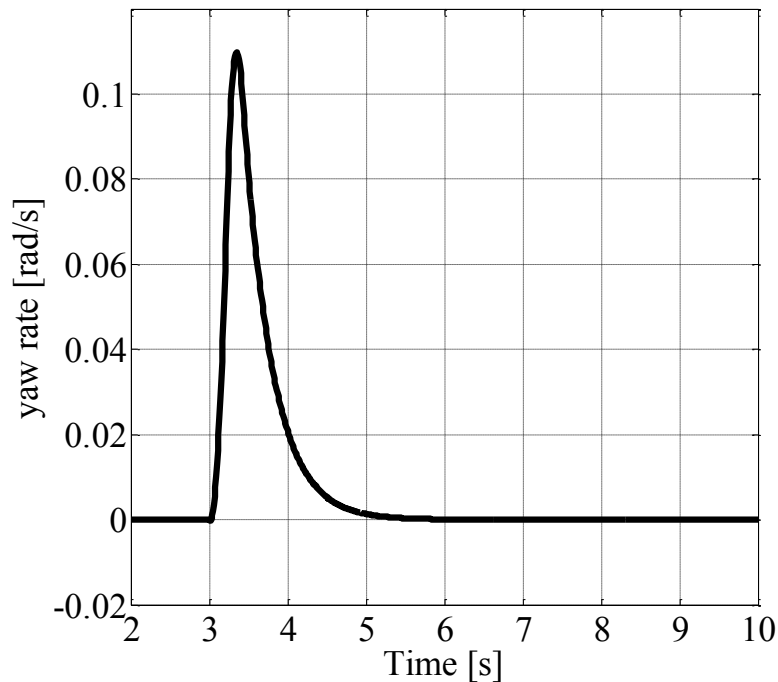


Fig.4.4 Simulation result of Yaw Rate

4.2 システム解析に基づく低次元化モデルの導出

前輪操舵角入力データとシミュレーションで収集した横変位 y とヨーレート γ の出力データにもとづき、Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification 法^{[23],[24]} (N4SID 法) を用いてシステム同定を行った。従来の一般的な車両では操舵角入力からヨーレート応答までの伝達関数は 2 次遅れ系^[20]であるが、システム同定の結果、5 次の離散時間系モデルが得られた。そのモデルを連続時間系のモデルに変換し、図 4.4 に 5 次の連続時間系モデルの前輪操舵角入力 u_δ から横変位 y とヨーレート γ までの周波数応答を示す。周波数応答 y/u_δ では、0.02 ~ 0.025 Hz という低い周波数帯域にピークがあり、逆に γ/u_δ の場合は、1 Hz 程度までの広い帯域を有することがわかる

固有値解析

4 輪 IWM 車両モデルのモード特性を把握するために行ったシステム同定の結果、得られた 5 次同定モデルの状態空間表現を式(4.5), (4.6)に表す。ここで、 x_r は状態ベクトルであり、出力 y_r は横変位 y とヨーレート γ からなる。また、前輪操舵角入力を u_δ としている。

$$\dot{\mathbf{x}}_r = \mathbf{A}\mathbf{x}_r + \mathbf{B}u_\delta \quad (4.5)$$

$$\mathbf{y}_r = \begin{bmatrix} y \\ \gamma \end{bmatrix} = \mathbf{C}\mathbf{x}_r + \mathbf{D}u_\delta \quad (4.6)$$

5 次同定モデルに対して、モード分離を行い、式 (4.7) のとおりシステム行列 \mathbf{A} を対角正準形に変換した。

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \omega_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_1 & \sigma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_2 & \omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_2 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

システム行列の固有値解析を行った結果得られた固有値 $\sigma_i \pm j\omega_i$ ($i = 1, 2$), α を表 4.1 に示す。表 4.1 の複素共役固有値 $\sigma_i \pm j\omega_i$ は、図 4.5 の周波数応答 y/u_δ に示した 0.02 ~ 0.025 Hz の共振ピークに対応していることがわかる。また、1 次遅れ系の固有値 α は、0.43 Hz 程度であり、これは図 4.5 の周波数応答 γ/u_δ の帯域に対応していることがわかる。

周波数応答解析

前輪操舵角 u_δ 入力から横変位 y およびヨーレート γ への周波数応答に関する各モードの寄与度を明確にするため、図 4.6, 4.7 に A_1 ブロック行列 (以下、モード 1 と略す), A_2 ブロック行列 (以下、モード 2 と略す), α 要素、それぞれのゲイン線図を示す。図 4.6 より、モード 1 の周波数応答は 5 次の同定モデルの周波数応答とほぼ等しいこと、他の要素は低い周波数帯域でゲインが大きく異なることがわかる。このことから、モード 1 は横変位 y の特性を主として有するモードであることがわかる。また、図 4.7 より、 α 要素がもつとも 5 次の同定モデルの周波数応答に近いことがわかる。こ

Table 4.1 Eigenvalue of Identified model

5th order model	
σ_1	-30.056
ω_1	38.649
σ_2	0.070125
ω_2	0.15854
α	-2.7092

のことから、 α 要素のモードがヨーレート γ の特性を主として有していることがわかる。以上より、次節ではモード 1 と α 要素の固有値を含む 5 次同定モデルを用いて制御系設計を行う。

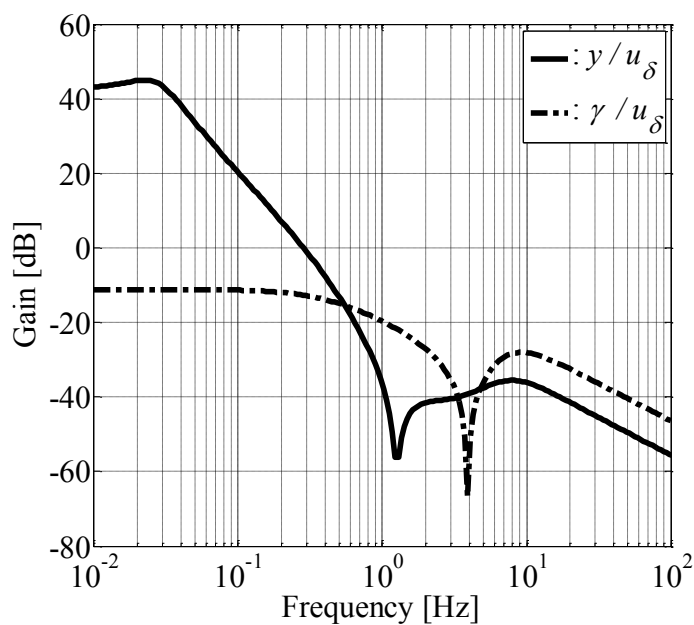


Fig.4.5 Gain diagram of identified model

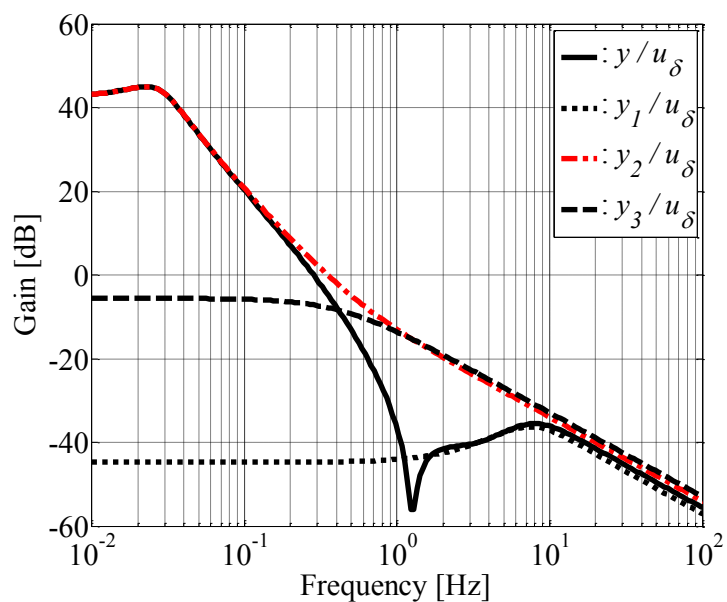


Fig.4.6 y/u_δ Gain diagram of identified 5th order model

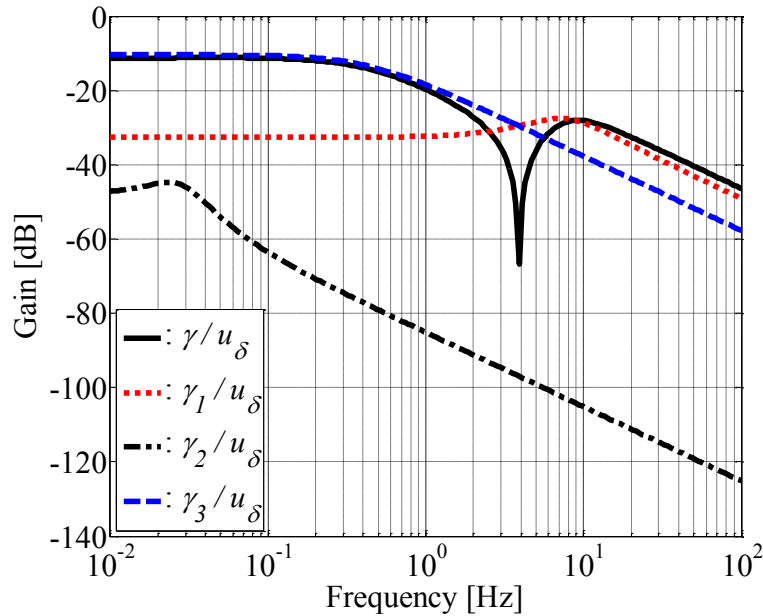


Fig.4.7 γ/u_δ Gain diagram of identified 5th order model

4.3 H_∞ 制御系設計と考察

4.3.1 H_∞ 制御系設計^[25]

急なハンドル操作や横力による外乱の作用に対して、従来車両と同程度の操縦安定性を確保するため、前輪操舵角を制御入力 u_δ とすることで、操縦安定化を図る。前節で得られた 5 次同定モデルに対して、図 4.8 に示すように一般化プラントを構成し、横変位 y とヨーレート γ をフィードバック信号とし、前輪操舵角 u_δ を制御出力とする H_∞ 制御系の設計を行う。

w_1 は操舵角外乱, w_{n1}, w_{n2} は仮想的なノイズである。評価量 z_1, z_2, z_3 は横変位 y とヨーレート γ と前輪操舵角 u_δ にそれぞれ周波数重み W_{S1}, W_{S2}, W_T をかけたものである。 w_1 から z_1 までのパスで操舵角外乱に対する横変位 y の抑制を、 w_1 から z_2 までのパスで操舵角外乱に対するヨーレート γ の抑制を、 w_1 から z_3 までのパスで操縦安定性をそれぞれ評価している。

60 km の直進定常走行中の 5 次同定モデルを用いて H_∞ 制御系を設計する。図 4.9 に設定した重み関数のゲイン線図を表す。重み関数は、制御対象の周波数帯域の 1 Hz 程度まで積極的に制御を行うように W_{S1}, W_{S2} を設計した。具体的には、図 4.5 により、0.02 Hz 以下の周波数領域で周波数応答 y/u_δ のゲインが γ/u_δ のゲインより 40 dB 以上大きくなっているため、 W_{S1} を W_{S2} より約 28 dB 小さくした。また、0.1 ~ 2 Hz までの領域で高いゲインを持たせ、5 次同定モデルに含まれない高周波数領域で低いゲイン

となるよう調整した. 一方, 高周波数領域で制御入力が過大にならないように W_T を設定し, W_{N1} , W_{N2} を 0.1 に設定した. 図 4.11 はこれらの重み関数の設定に基づき設計された H_∞ 制御系のボード線図である. 外乱 w_I から $z=[z_1 z_2 z_3]$ までの H_∞ ノルムは 0.2053 となった.

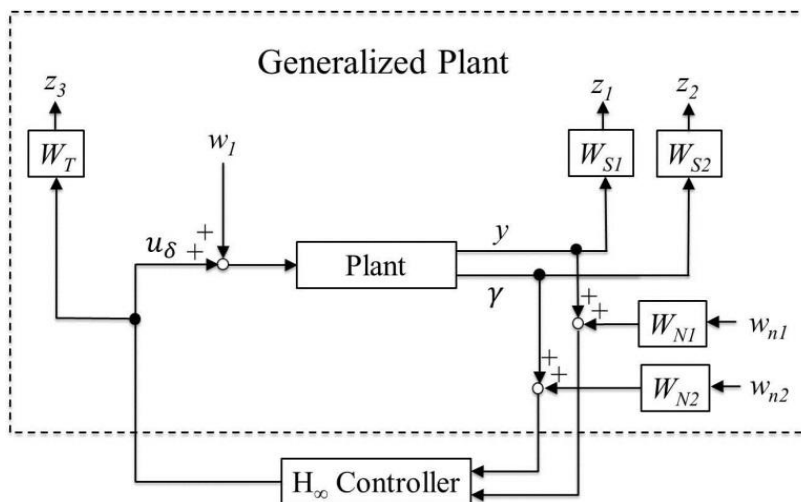


Fig 4.8 Generalized plant for H_∞ control design

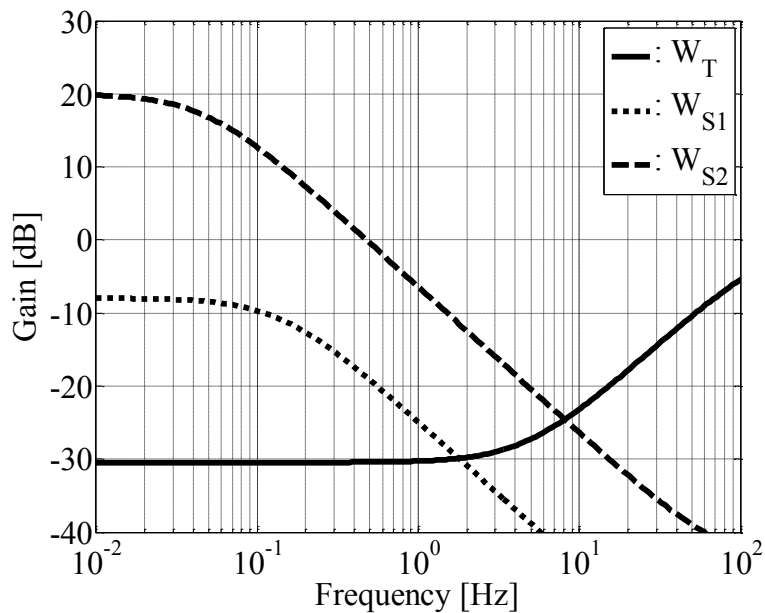


Fig. 4.9 Frequency weighting functions

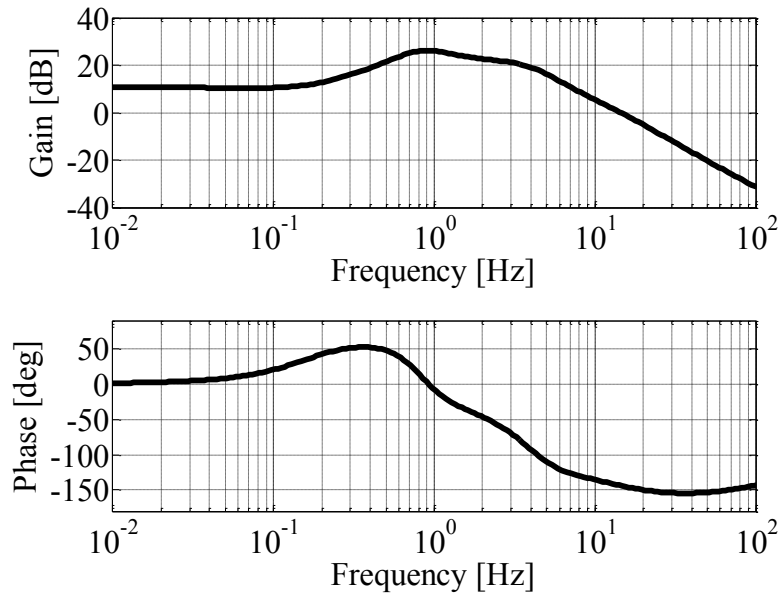


Fig. 4.10 Bode diagram of H_{∞} Controller

4.3.2 Dymola モデルを用いたシミュレーションによる検証

4.3.2.1 横風試験

2.3.2 項で述べた横風試験のシミュレーションを行った。

横風に対する制御時の横変位 y , ヨーレート γ , および前輪操舵角制御入力 u_{δ} をそれぞれ, 図 4.11~4.13 に示す. 青線が制御なしの 4 輪 IWM 車両, 赤線が H_{∞} 制御系を装備した 4 輪 IWM 車両, 黒点線が従来車両のシミュレーション結果を表している. 4 輪 IWM 車両が図 4.11 より, 制御を施すことにより, 横風の影響による横変位 y は, 従来車両の場合とほぼ同等の大きさに抑えられていることがわかる. また, 図 4.12 よりヨーレート γ に関しては, 制御を施すことにより, 振幅としては, 従来車両と同程度に抑えられていることがわかる. ただし, 整定時間としては約 2 s となっており, ともに, 従来車両よりも長くなっている. 減衰が不足していることがその理由で, 車速変化に応じた制御系設計が必要であると考えられる. 図 4.13 より, 前輪操舵角制御入力 u_{δ} は 0.35 rad ほどに抑えられており, 比較的小さな制御入力で高い制御性能を有することが確認できた.

また, 横滑り角を図 4.14 に, ドライバーモデルの操作したハンドル角を図 4.15 に示している.

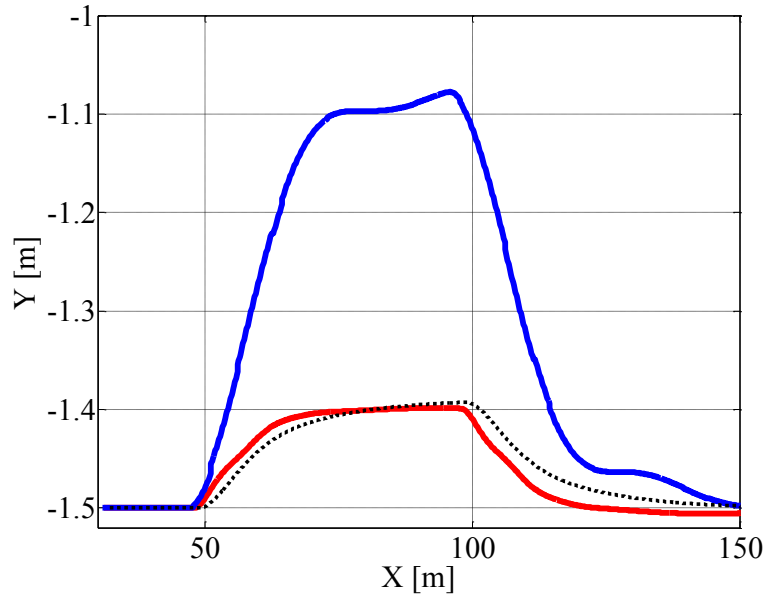


Fig.4.11 Vehicle trajectory on Crosswind test

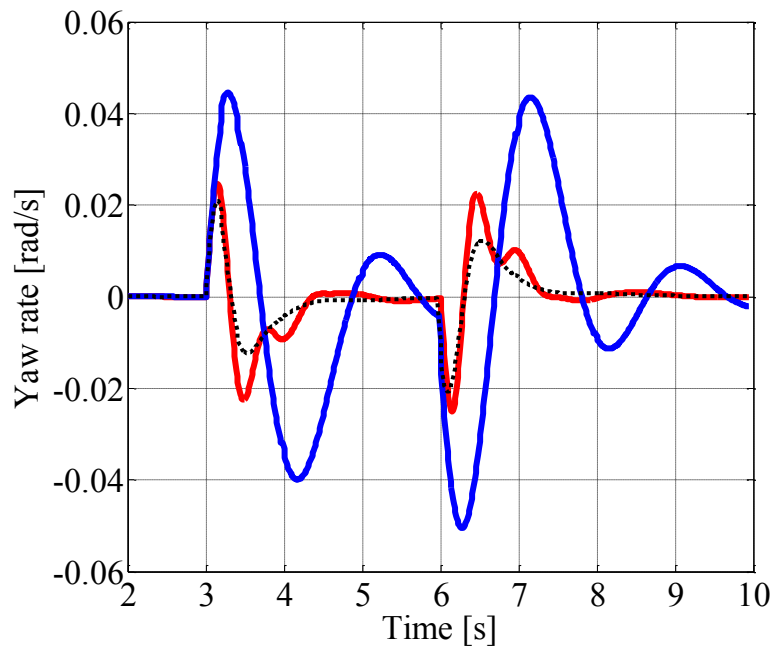


Fig.4.12 Yaw rate on Crosswind test

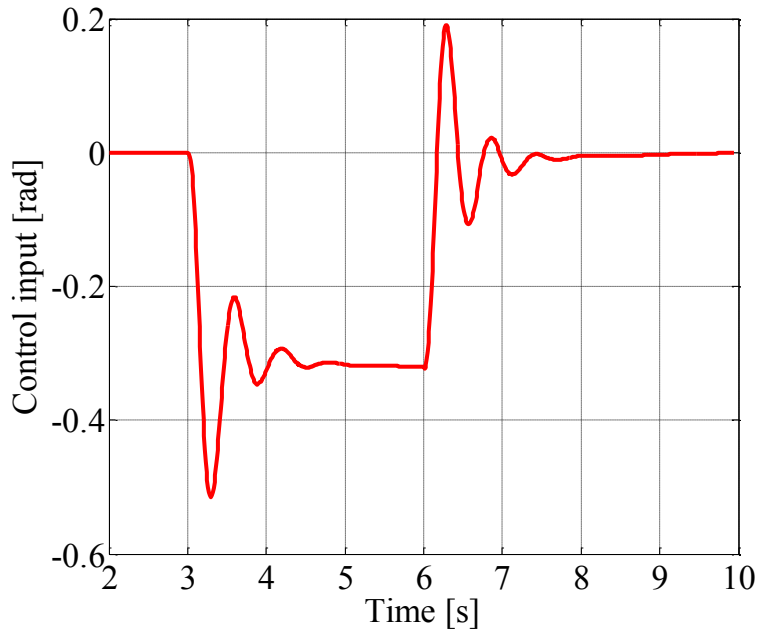


Fig.4.13 Control input on Crosswind test

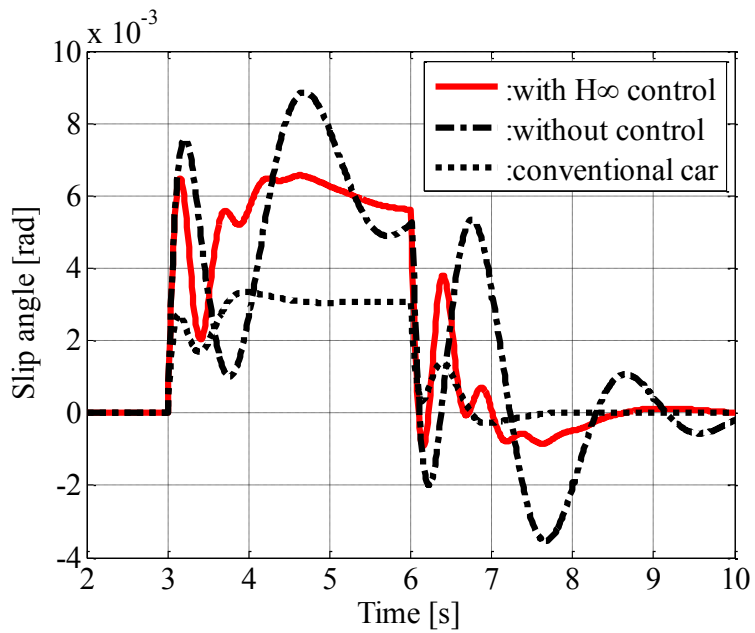


Fig.4.14 Slip Angle on Crosswind test

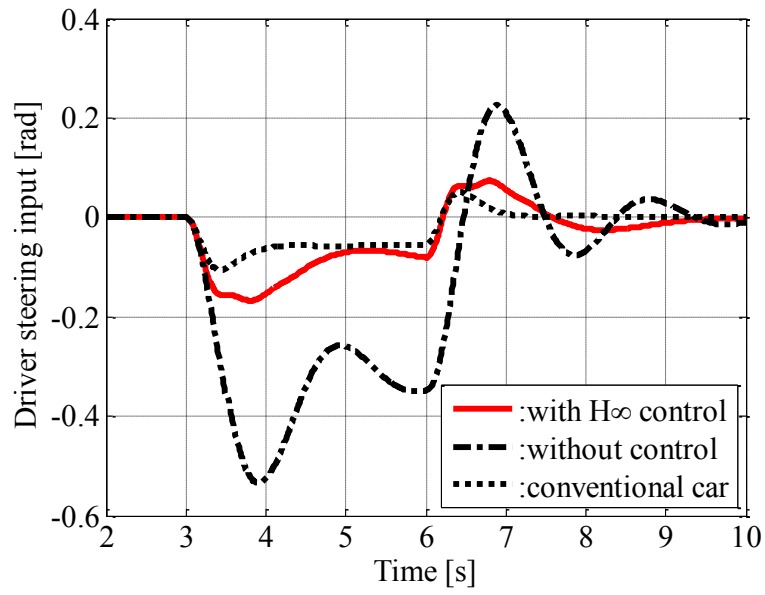


Fig.4.15 Steering input of driver's model on Crosswind test

4.3.2.2 ダブルレーンチェンジ

2.3.2 項で述べたダブルレーンチェンジのシミュレーションを行った。

横風に対する制御時の横変位 y , ヨーレート γ , および前輪操舵角制御入力 u_δ をそれぞれ, 図 4.16~4.18 に示す. 図 4.16 では青線が制御なしの 4 輪 IWM 車両, 赤線が H_∞ 制御系を装備した 4 輪 IWM 車両, 黒点線が従来車両を表している. 制御系を装備した 4 輪 IWM 車両がコーナーを曲がり切れていないことがわかる. コントローラへの制御入力を横変位 y の大きさに抑える制御を行ったことが大きな原因であると考えられる. また, 図 4.17 よりヨーレート γ に関しては, 制御を施すことにより, 振幅としては, 従来車両よりも小さく抑えられていることがわかる.

また, 横滑り角を図 4.19 に, ドライバーモデルの操作したハンドル角を図 4.20 に示している.

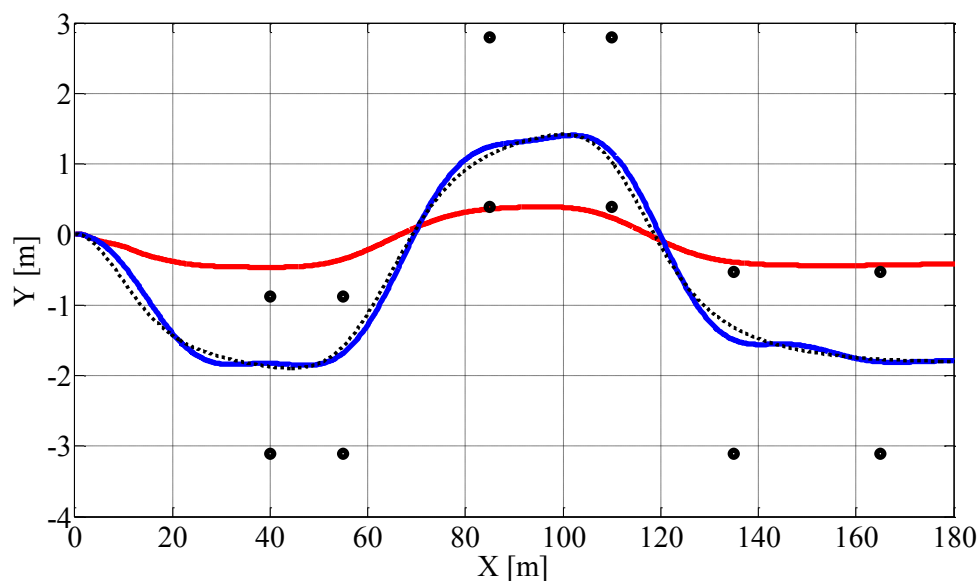


Fig.4.16 Vehicle trajectory on Double Lane Change test

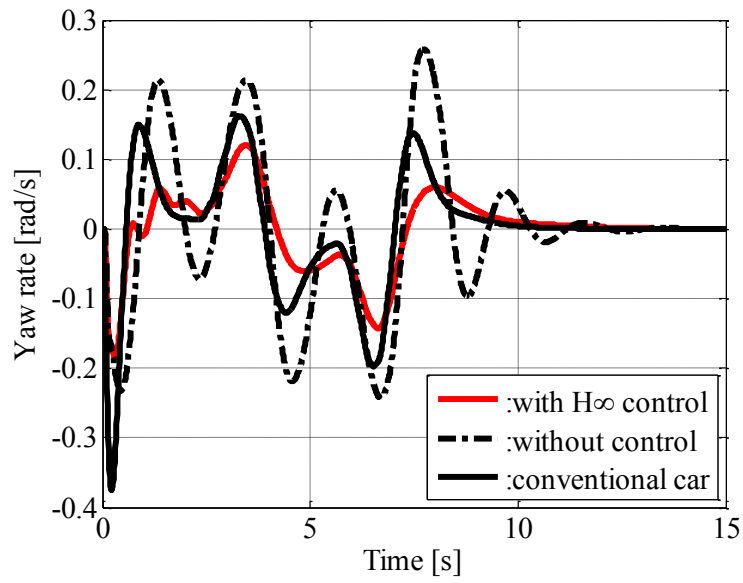


Fig.4.17 Yaw rate on Double Lane Change test

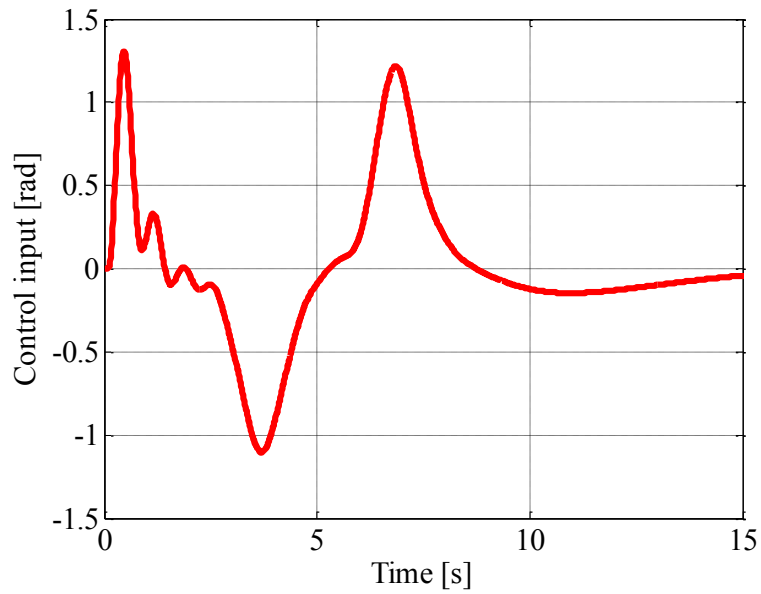


Fig.4.18 Control input on Double Lane Change test

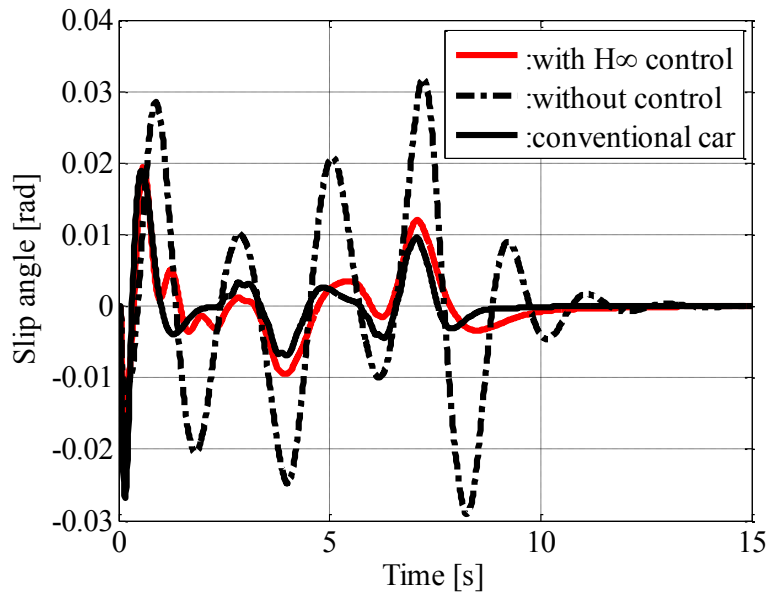


Fig.4.19 Slip Angle on Double Lane Change test

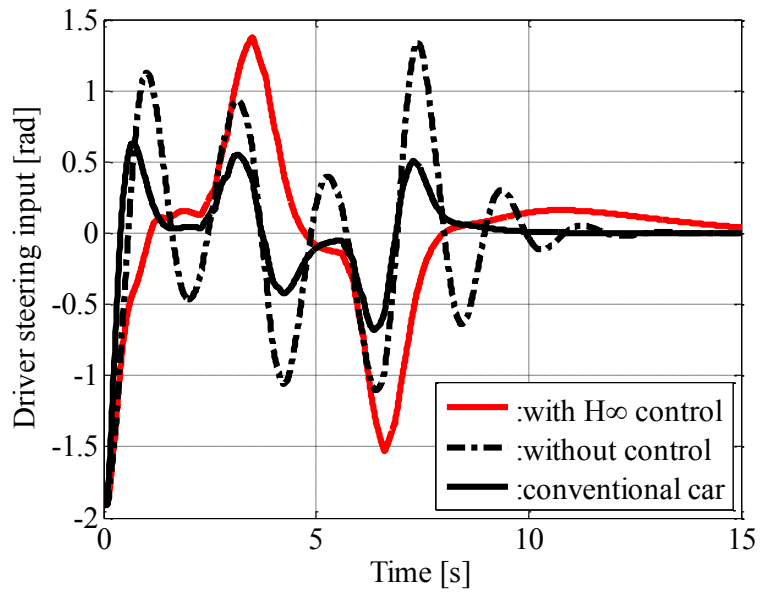


Fig.4.20 Steering input of driver's model on Double Lane Change test

4.4 考察

横風試験においては、制御を施すことにより、横風の影響による横変位は、従来車両の場合とほぼ同等の大きさに抑えられた。ヨーレートに関しても、振幅としては、従来車両と同程度に抑えられた。前輪操舵角制御入力は 0.35 rad ほどに抑えられており、比較的小さな制御入力で高い制御性能を有することが確認できた。

ダブルレーンチェンジでは、制御系を装備した4輪 IWM 車両がコーナーを曲がり切れていない。制御系がドライバーモデルの操作を阻害する形になっている。

以上の結果から、制御出力を前輪操舵角、制御入力を横変位とヨーレートとする H_{∞} 制御系により、ダブルレーンチェンジで測られる緊急回避性能としては十分得られるとは言えないが、横風に対しては従来車両と同程度の操縦安定性を得ることができる。

第 5 章

結論

5 結論

5.1 結論

本論文では、超小型モビリティとして将来普及が期待される、小型・軽量化された4輪 IWM 車両について、ベンチマーク問題で提供されているモデルを利用して、操縦安定性向上のための制御システムを設計し、検証した。

まず、制御システムの設計に際して、MBSE の流れに基づいて、要求の明確化、機能の抽出を行った。

次に、制御アーキテクチャの候補を検討するために、論理モデルの作成を行った。

低転がり摩擦抵抗下での操縦安定性を確保するための制御アーキテクチャ候補の中で、まず **DYC** 制御を取り上げた。そして、ベンチマーク問題 No.3 で提供されているモデルをもとに、制御性能の検証用モデルを構築し、要求分析で検討したユースケースシナリオから、横風試験とダブルレーンチェンジによる検証シミュレーションを行った。横風試験では、従来車両の横風応答性能には達していないため、さらなる検討が必要であることが分かった。

そして、制御アーキテクチャの候補として、前輪操舵角入力、横変位とヨーレート出力の制御システムを選択し、システム同定を行って、システムの特性を導出した。その特性に基づき、制御システムの設計と検証を行い、横風試験に関しては従来車両と同等の操縦安定性を得ることができた。

5.2 今後の展望

まず、 H_{∞} 制御系において、制御入力を横変位から変更した場合の検証が必要である。そのことで、横風試験のみではなく、ダブルレーンチェンジにも対応できる H_{∞} 制御系が設計できるかの検証を行う必要がある。

また、他のユースケースでの検証があげられる。ベンチマーク問題 No.3 では旋回しながらの加減速も問題として設定している。他のユースケースにおいても必要となる性能が発揮できるようなコントローラ的设计が必要、と考えている。

また、4 輪 IWM 車両モデルの各車輪における独立制御によって柔軟な操縦性を実現するための制御系を設計する。本論文で設計を行った2つの制御系は、4 輪が独立に制御できる利点を生かした制御ではなかった。今後は、その特性を活かした制御系設計を考慮する必要がある。

参考文献

- [1] 国土交通省都市局・自動車局, “超小型モビリティ導入に向けたガイドライン ～新しいモビリティの開発・活用を通じた新たな社会生活の実現に向けて～”, 平成24年6月, <http://www.mlit.go.jp/common/000212867.pdf> (2013年7月現在)
- [2] 国土交通省都市局都市計画課都市計画調査室, “都市における人の動き—平成22年全国都市交通特性調査集計結果から—”, (2012)
- [3] 国土交通省, “超小型モビリティの認定制度について”, 平成25年1月, www.mlit.go.jp/common/000230555.pdf (2013年7月現在)
- [4] 国土交通省, “超小型モビリティの導入促進”, 平成25年5月, <http://www.mlit.go.jp/common/000986511.pdf>(2013年7月現在)
- [5] 菅井晴彦, 村田智史, “インホイールモータが車両構造とサスペンションに与える影響”, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.28-10, (2010), pp.5-9.
- [6] 河上 清源, 田辺 秀敏, 神蔵 貴久, 永廣 健太郎, 清水 浩, 吉田 博一, “インホイールモータを用いた全輪駆動車におけるモータ失陥時の操縦安定性に関する評価”, 日本機械学会論文集. C編, No.05-0804, (2006), pp.2123-2129
- [7] 村田智史, “インホイールモータ駆動ユニットの開発”, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.28-10, (2010), pp.1-4.
- [8] 平野豊, “エネルギー消費と動的性能の両立を目指した新モビリティ用車両制御—自動車制御とモデリング: ベンチマーク問題3—”, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.146-11, (2011)
- [9] 坂井信一郎, 佐渡秀夫, 堀洋一, “4輪独立駆動電気自動車における動的な制駆動力配分法”, 電気学会論文誌 D, 120.6, (2000), pp.761-768.
- [10] 安藤直樹, 藤本博志, “インホイールモータの制駆動力配分を用いた四輪独立駆動電気自動車のヨーレート制御の基礎検討”, 電気学会産業計測制御研究会資料, IIC-09, (2009), pp13-18
- [11] Systems Engineering Handbook, “A Guide for System Life Cycle Process And Activities”, Ver.3.2, International Council on Systems Engineering, (2010).
- [12] Kevin Forsberg, Hal Mooz, Howard Cotterman, “Visualizing Project Management, Third Edition”, John Wiley & Sons, Inc., (2005)
- [13] 西村秀和, “モデルベースシステムズエンジニアリングとSysMLへの期待”, 設計工学, Vol.46, No.5, (2011), pp.241-246 .
- [14] 西村秀和, “次世代超小型電気自動車の車両運動制御システムデザイン—モデルベースシステムズエンジニアリング(MBSE)に基づくプロセス—”, 機械の研究Vol.65, No.3, (2013), pp.183-188 .
- [15] IEEE Std 1220TM-2005, “IEEE Standard for Application and Management of the Systems

Engineering Process” , IEEE Computer Society, (2005).

[16] 森崇, “設計・研究教育における1D-CAEの可能性”, Dynamics & Design Conference 2010, No.516, (2010).

[17] 平野豊, “エネルギー消費と動的性能の両立を目指した新モビリティ用車両制御”, 日本機械学会 ことんわかる自動車のモデリングと制御2012, (2012), pp1-10

[18] American National Standards Institute, “ISO 3888-1:1999, Passenger cars - Test track for a severe lane-change maneuver - Part 1: Double lane-change”, (2007)

[19] 齋藤信二郎, 山門誠, 横山篤, 高橋絢也, 安部正人, “G-Vectoring制御を用いた横すべり防止装置の運動性能評価”, 交通・物流部門大会講演論文集, Vol.41, No. 2, (2010), pp.195-200.

[20] 安部正人, “自動車の運動と制御”, 東京電機大学出版局, (2012)

[21] 寺島義道, 林隆三, ポンサトーンラクシンチャランサク, 永井正夫, “危険場面ドライビングシミュレータを用いた横滑り防止装置の評価”, 自動車技術会論文集Vol.17, No. 3204, (2008), pp.321-324.

[22] 安藤直樹, 藤本博志, “電気自動車の後輪独立制駆動力配分とアクティブ前後輪操舵を用いたヨーレート制御”, 電気学会論文誌. D, 産業応用部門誌, Vol. 131, No. 4, (2011), pp. 616-623.

[23] P. V. Overschee, B. D. Moor, “N4SID : Subspace Algorithms for the Identification of Combined Deterministic-Stochastic Systems”, Autometica, Vol.30, No.1, (1994), pp.75-93.

[24] 足立修一, “Matlab による制御のためのシステム同定”, 東京電気大学出版, (1996), pp.138-151.

[25] PG, Da-W, Petkov, P. Hr., Konstantinov, M.M. “Robust Control Design with Matlab” , Springer ,(2005), pp.115-390.

謝辞

本研究を行うにあたり、本論文の主査であり、指導教員としてご指導いただきました西村秀和教授に心より深く感謝致します。未熟者の私に対して熱心に勉強面や生活面などあらゆる面で指導して頂きました。本研究をここまで進めることができたのは西村先生のご指導のおかげです。深く御礼申し上げます。本当にありがとうございました。

副査を担当して頂いた、ヒジノ ケン・ビクター・レオナード准教授、当麻哲哉准教授には、本論文をまとめるにあたって貴重なご助言を頂きました。ご指導いただき誠にありがとうございました。

ユンソングルさんには、制御系設計において多大な助言とサポートを賜りました。私の不得手な制御系の部分について、サポートしてくれたことはいくら礼をしてもしきれません。本当にありがとうございました。

柳沼幸浩様をはじめとしたダッソーシステムズ株式会社の皆さま、小西健彦様、加藤慎様をはじめとした株式会社ファソテックの皆さまには、Dymola, CATIA V6 の貸し出しやトレーニングなどのサポートを行っていただきました。本研究の2章につきましては、皆様の協力によってまとめることができました。誠にありがとうございました。

トヨタ自動車の平野豊様、九州大学の川邊武俊教授以下ベンチマーク問題に関わられた皆様には、JSAE-SICE のベンチマーク問題 No.3 を提供いただきました。前職で使用していた Modelica 言語でのモデルが作成されていることで、比較的楽にシミュレーションを始めることができました。誠にありがとうございました。

そして、大学院で出会った西村研究室の皆様、他研究室の皆様との交流のおかげで、楽しく有意義な学生生活を送ることができたと考えています。学校のみならずプライベートでも仲良くしてくれた皆様、素敵な思い出をありがとうございました。

最後に、私の学生生活をしながらの勤務を認めていただいた株式会社ディレクタスの皆様に感謝します。早く戦力になれるよう精進します。本当にありがとうございました。