

車両に潜在する冗長性を活用した  
耐故障制御系設計に関する研究

Fault-Tolerant Control System Design  
Utilizing Latent Redundancies in a Vehicle

博士学位論文



名古屋大学大学院 工学研究科

機械理工学専攻 電子機械工学分野 数理システム制御グループ

伊藤 章

2015 年度



# 目次

<b>第1章 緒言</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	1
1.2 自動車用機能安全規格 ISO26262	4
1.2.1 概要	4
1.2.2 安全設計プロセス	6
1.2.3 規格準拠に向けた取り組み	9
1.3 制御工学分野の安全設計に対するアプローチ	10
1.4 自動車を取り巻く技術の変化	11
1.4.1 車両の電動化	11
1.4.2 高度道路交通システム	12
1.5 研究の目的	14
1.6 本論文の構成	17
<b>第2章 対象車両のモデリングと故障の定義</b>	<b>19</b>
2.1 概要	19
2.2 対象車両の概要	19
2.3 モデリング	20
2.4 故障の定義と車両挙動への影響	23
2.5 まとめ	32
<b>第3章 操舵系故障に対する耐故障制御系</b>	<b>33</b>
3.1 概要	33
3.2 左右輪の制駆動力差を活用した耐故障制御系設計	34
3.2.1 制御器設計用モデル	34
3.2.2 問題設定	36
3.2.3 故障の定式化	37
3.2.4 耐故障制御系設計	38

3.2.5	安定性に対する考察 . . . . .	42
3.3	評価結果 . . . . .	47
3.3.1	耐故障制御系設計 . . . . .	48
3.3.2	シミュレーション結果 . . . . .	51
3.4	まとめ . . . . .	59
<b>第4章</b>	<b>操舵，駆動系両故障に対する耐故障制御系</b>	<b>61</b>
4.1	概要 . . . . .	61
4.2	操舵，駆動系を相互活用した耐故障制御系設計 . . . . .	62
4.2.1	制御器設計用モデル . . . . .	62
4.2.2	問題設定 . . . . .	63
4.2.3	耐故障制御系概要 . . . . .	64
4.2.4	$D^*$ 制御部 . . . . .	65
4.2.5	駆動力分配部 . . . . .	69
4.3	評価結果 . . . . .	74
4.3.1	耐故障制御系設計 . . . . .	74
4.3.2	シミュレーション結果 . . . . .	76
4.4	まとめ . . . . .	84
<b>第5章</b>	<b>センサ故障に対する耐故障制御系</b>	<b>85</b>
5.1	概要 . . . . .	85
5.2	機能毎に分割した制御ループを有する耐故障制御系設計 . . . . .	87
5.2.1	制御器設計用モデル . . . . .	87
5.2.2	問題設定 . . . . .	88
5.2.3	耐故障制御系概要 . . . . .	89
5.2.4	操舵角フィードバック制御器 . . . . .	91
5.2.5	$D^*$ フィードバック制御器 . . . . .	92
5.2.6	出力制限値 . . . . .	95
5.2.7	ロバスト安定性解析 . . . . .	96
5.3	評価結果 . . . . .	98
5.3.1	耐故障制御系設計 . . . . .	98
5.3.2	シミュレーション結果 . . . . .	100

---

5.4	まとめ . . . . .	103
<b>第 6 章</b>	<b>結言</b>	<b>107</b>
6.1	研究のまとめ . . . . .	107
6.2	今後の展望 . . . . .	112
<b>付 録 A</b>	<b><math>D_{ref}^*</math> 算出方法</b>	<b>115</b>
<b>付 録 B</b>	<b>3 レベルコンセプト</b>	<b>117</b>
	<b>謝辞</b>	<b>119</b>
	<b>参考文献</b>	<b>120</b>



# 第1章 緒言

## 1.1 研究の背景

1970年代、アメリカ合衆国で制定されたマスキー法に代表される自動車排出ガス規制の強化に伴い、自動車への電子制御導入の動きが活発化した。エンジン制御を起点に電子制御化が進み、機械式キャブレタが主流であった燃料制御は、クランクセンサから得られるエンジン回転数とエアフロメータから得られる吸入空気量から電子制御ユニット（Electronic Control Unit : ECU）で燃料噴射量を算出し、インジェクタで噴射する方式に、点火制御は、ディストリビュータのガバナ進角とバキューム進角から、ECUより各点火プラグへタイミングを指示するディストリビュータレスイグニッション（Distributor Less Ignition : DLI）方式に、キャブレタのスロットル全閉調整と空燃比調整により機械的に実現していたアイドル制御は、ソレノイドバルブやステッピングモータの開閉制御へと変革した [1,2]。電子制御は、機械式では不可能であったきめ細かい制御を可能にすることから、年々厳しくなる排出ガス規制値を達成するためには欠かせない技術となり、ソフトウェアによる制御開発の利便性も相俟って、電子制御への置き換えが加速した。その結果、電子制御の適用範囲はエンジンのみならず、トランスミッション、操舵、制駆動系から空調などの快適装備にまで至っており、搭載される ECU の総数が 100 個を超える車種も現れ始めた [3]。使用されるマイクロプロセッサ（Micro Processing Unit : MPU）は、8bit から 32bit へと変わり、動作周波数も 2MHz から 400MHz へ増加するなど、MPU に要求される処理能力も増加の一途をたどっている [4]。

従来、電子制御化のアプローチは、アクチュエータを機械式から電気式へ置き換え、ECU で制御するという流れであったが、燃費や性能を極限まで追及するあまりドライバ意図にまで制御が介入する X-by-Wire へと発展した。X-by-Wire とは、航空機の Fly-by-Wire に代表されるように、「ドライバの意思を電気信号に変換し、その電気信号に基づき ECU がアクチュエータを駆動する」技術である [5]。電気信号で意思を伝達するため機械的伝達機構が廃止でき、燃費向上、予防安全技術の実現、衝突安全性向上や搭載位置・デザインの自由度向上といった多くの利点がある。そのため、既に製品化されている Drive-by-Wire

に加え、Steer-by-Wire, Shift-by-Wire, Brake-by-Wire など、あらゆる機構の X-by-Wire 化が検討され、製品化を目指している [6–8]。しかし、多くの利点を有する反面、ドライバ操作とアクチュエータ動作の間に機械的結合が存在しないことに加え、ドライバ意図にも制御が介入することから、制御系を構成するコンポーネントのいずれかに故障が発生すると、暴走、セルフステア、逆走などの危険に至る恐れがあり、安全設計が極めて重要になる。Fly-by-Wire で先行する航空機では、3 重系を構成し多数決をとる、油圧系統の全損時に操縦翼面の代わりに左右の推力を操作し姿勢制御する、舵面故障時に残りの正常な操縦翼面を操作対象とした制御系へ再構築するなど、飛行を継続するための安全設計が考えられている [9–14]。先行する航空機の安全設計手法を自動車に適用すればよいと思われるが、そのまま適用することは困難である。その理由として、自動車は航空機と比べコストや搭載スペースの制約が厳しいこと、故障発生から危険回避するまでの時間的余裕がないこと、厳格な運行管理がされていないことなどが挙げられる。そのため、自動車の安全設計は乗り物の中で最も難しいといわれており、既に十分な性能が確認されている X-by-Wire システムも存在するが、安全性が十分に検証できていないため製品化に至っていない。すなわち、製品化するうえでは「安全性の確保」が最重要課題であり、安全設計が確立しない限り我々は X-by-Wire 技術の恩恵を享受できないといっても過言ではない。

しかしながら、従来安全設計に対する明確な基準やプロセスがなく、車両メーカ、部品サプライヤ毎に独自の手法で安全設計を行うのが一般的であった。そのため、長年慣れ親しんできたハードウェアを中心とした機械式システムの設計プロセスが踏襲されることが多く、正常時の機能を実現するためのハードウェアを作り込んだ後、故障の本解析 (Fault Tree Analysis : FTA) や故障モードと影響解析 (Failure Mode and Effect Analysis : FMEA) などで各故障モードの致命度を分析し、危険と判断された故障モードに対し、故障検出、フェイルセーフ／フェイルソフトや保護装置の追加による影響度の軽減、材質強化や冗長化による発生頻度の低減などを行い安全性を確保するという手順で行われていた。その結果、既に作り込みが完了している正常時の機能や他のシステムに影響を及ぼさないようなコンポーネント単位の安全設計に帰着し、コンポーネント間に重複した冗長性が散在することで車両重量やコストの増加を招いた。安全設計により X-by-Wire の利点が失われるといった問題の顕在化により、従来手法の延長線上では高度化する電子制御システムの安全性確保は困難であることが広く認識されるようになってきた。

一方、電子制御化の動きは、自動車業界に限らず多種多様な業界に及んでおり、安全性確保は共通の問題となりつつあった。安全基準、プロセスを各社が独自に策定し、運用する方法ではもはや限界であるとされ、国際電気標準会議 (International Electrotechnical



Commission : IEC)<sup>1</sup> が、2000 年に電気／電子／ソフトウェアの機能安全に関する国際規格 IEC61508 を発行した。その後、IEC61508 の確率論に偏重した機能安全の問題点を改め、2011 年に国際標準化機構 (International Organization for Standardization : ISO)<sup>2</sup> が自動車向け機能安全規格 ISO26262 を発行した [15]。客観的に安全性評価ができるという利点から、口火を切った欧州の車両メーカーに続き、国内の車両メーカーも 2014 年以降に生産が始まる新規の電子システムから規格対応する方針を提示し、部品サプライヤに対しても規格対応を求める動きが活発化した。そのため部品サプライヤは、コンポーネント単位で安全設計を行い、ボトムアップ式に車両の安全性を主張してきた従来手法を改め、規格が要求するハザード分析とリスクアセスメント結果より決定した安全目標から設計要件を導出し、ソフトウェア、ハードウェア設計を行うトップダウン式手法への変革を求められており、製品設計初期段階から性能のみならず、安全性も考慮した設計手法を模索し始めた。

さらに、近年の自動車を取り巻く技術の変革は著しく、新たな安全設計の可能性を生み出していることも見逃せない。中でも、内燃機関車両から電動車両への移行や、車車間、路車間の通信技術を駆使して運転支援を行う高度道路交通システム (Intelligent Transport Systems : ITS) が興味深い。

電動車両では、エンジンに比べ小型かつ軽量のモータが駆動力となるため、インホイールモータのように各車輪へ搭載することも可能となる。インホイールモータは、車両運動性能の向上に加え、駆動力の冗長性増加や、左右輪の駆動力差による旋回モーメント発生など、従来の駆動系の枠を超えた潜在能力を有している。ゆえに、操舵機能が故障により喪失した際、左右輪の駆動力差により操舵機能を確保するなど、環境や車両運動性能向上のために導入された技術に潜在する冗長性や機能を活用すれば、新たな冗長化を伴うことなく安全性が確保できる可能性がある。

一方、ITS に関しては、従来の「1 台の車両で安全設計を完結する」という考え方そのものを一掃する可能性を有している。すなわち、コスト、スペース、重量などの制約の多い 1 台の車両で確保すべき安全性を緩和し、その分車車間、路車間の制御を介入させることで、交通システム全体として安全性を確保するというアプローチを実現するための基盤になりうるということである。具体的にいうと、巡航中の航空機に故障が発生した場合、最寄りの空港を完全に閉鎖して緊急着陸態勢をとるように、故障が発生した場合、車両自身で最低限の「走る」、「曲がる」、「止まる」の機能を確保したうえ、さらに周辺の車両が衝

<sup>1</sup> 各国の代表的標準化機関から成る国際標準化機関であり、電気および電子技術分野の国際規格の作成を担う。

<sup>2</sup> 各国の代表的標準化機関から成る国際標準化機関であり、電気・通信および電子技術分野を除く全産業分野（鉱工業、農業、医薬品など）に関する国際規格の作成を担う。

突回避動作をし、信号機などにより他の車両の進入を防ぐという一連の動作が行われて安全性が確保される耐故障性を有する交通システムが考えられる。また、1 台の車両で全ての安全要件を担う必要性がなくなることで、車両設計の自由度が格段に向上する。その結果、クラッシュブルゾーン廃止によるボデー形状の劇的な変化など車両設計の革新が期待でき、昨今提唱されている移動手段以外の利用方法も想定した新たなクルマビジネス [16] にも貢献できると予想される。

本論文では、近年の自動車を取り巻く技術変革を性能、環境や快適性の向上といった視点とは別に安全設計の観点から眺め、その潜在能力を生かし、機能安全規格が求める設計初期段階から性能と安全性の両要件を考慮した制御系とその設計法について検討する。

## 1.2 自動車用機能安全規格 ISO26262

本節では、耐故障制御系設計を行ううえで準拠が求められる自動車用機能安全規格 ISO26262 の概要を述べるとともに、規格準拠に向けた取り組みと課題について整理する。

### 1.2.1 概要

ISO/IEC Guide 51 (Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards) は、各分野の国際規格に安全に関する規定を導入するためのガイドラインとして位置付けられ、安全に関する基本的な概念や安全規格の体系を定義したものである。安全に関する国際規格は、ISO/IEC Guide 51 に基づき図 1.1 に示すように体系的に策定されている [17]。基本安全規格（タイプ A 規格）、グループ安全規格（タイプ B 規格）、製品安全規格（タイプ C 規格）の 3 つのクラスで構成されており、各規格がカバーする範囲は、基本安全規格 > グループ安全規格 > 製品安全規格の順になる。なお、安全を主題としていない規格の中に安全の側面を盛り込む場合には、「安全側面を含む製品規格」という別系統として分類される [17, 18]。

基本安全規格は、広範囲の製品を対象とし特定の製品に特化しない規格であり、基本概念、設計のための一般原則を示した ISO12100 やリスクアセスメントの原則を定義した ISO14121 などが該当する。グループ安全規格は、各製品で共通に使用される制御装置、インターロック装置や安全距離に関する横串的な規格であり、制御システムの安全規格 ISO13849-1 や機能安全規格 IEC61508 などが挙げられる。製品安全規格は、各産業において扱う製品に要求される安全レベルを考慮し具体的な手順を示した規格で、DO-178B（航空機）、IEC62278、IEC62279（鉄道）、IEC61513（原子力）や IEC62304（医療）などがあり、自動車用機能安全規格 ISO26262 も製品安全規格に相当する。ただし、ISO 規格については、上記クラ

スにおける規格の位置付けを明記したものが多いが、IEC61508 など IEC 規格については、ISO/IEC Guide51 を参照先の規格として記載しているものの、自身のクラスにおける位置付けは明記されておらず [17]、IEC61508 を基本安全規格と捉える考え方もある [18]。

ISO26262 は、2000 年に発行された電気／電子／ソフトウェアの機能安全に関する国際規格 IEC61508 をベースに、自動車向けに改定した機能安全規格である。運転手を除く乗車定員が 8 名以下で、車両総重量が 3500kg までの量産される乗用車に組み込まれる安全関連システム（1 つまたは複数の電気／電子システムを含む）を適用対象としている。近年の自動車は電子部品の占める割合が増加しており、かつ電子部品同士が相互にネットワークを形成しているため、1 つの部品の異常がどこまで波及するか把握するのが困難になりつつある。よって、機能間をまたがって安全関連システムを定義し、安全コンセプトを確立することが必要とされる。ここで機能安全とは、許容できないリスクを回避するため制御対象や制御装置を監視し、故障発生時に制御対象を停止したり、ユーザに警報を出すといった安全装置によって実現される安全性を指している。一方、危険そのものの設計上の除去や機械構造的なフェイルセーフ機構などによって担保される安全性は本質安全といい、機能安全と対比される用語である。

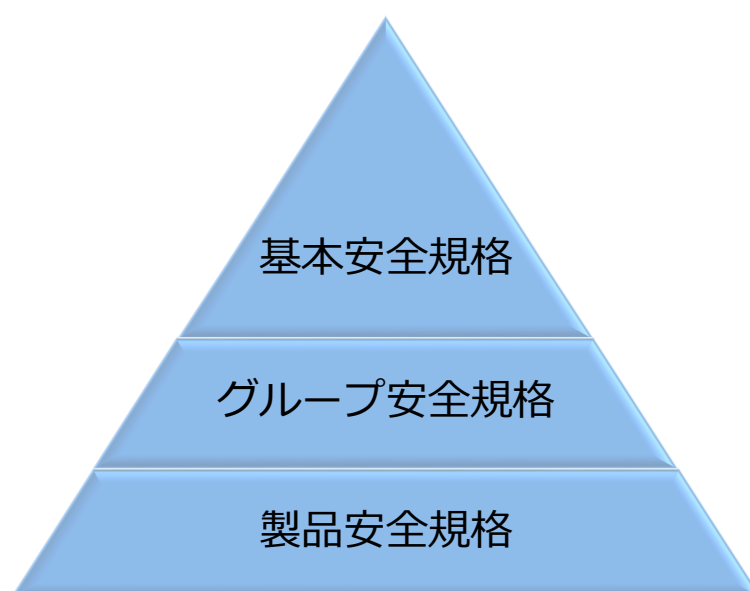


図 1.1 国際安全規格体系

### 1.2.2 安全設計プロセス

ISO26262 が提唱する安全設計プロセスは、「安全は元から備わっているものではなく、目標を立てて達成するものである」という思想に基づいている。従来の安全設計では、FTA や FMEA を行い各故障の影響度、発生度合い、検出度合いを評価し、これら 3 つの度合いから故障対策の必要有無のみを判断していた。これに対し ISO26262 では、ハザード<sup>3</sup>の危険度合いにより、故障対策の必要有無だけではなく設計・評価方法および設計から製造に至るまでのプロセス管理レベルを変えている。すなわち、「ものは壊れる」という観点から製品の故障や誤動作によって安全性を損なわないための機能や対策を設計に織り込むのはもちろん、新たに「人はミスを犯す」という観点を加え、設計から製造に至る各過程で不具合を混入させない、もしくは混入した不具合を見つけ出すための対策を仕組みに織り込む [17] という両面からのアプローチを採用している点が特徴であり、従来手法と大きく異なる点である。

従来の性能目標を起点とした設計プロセスと同様に、ISO26262 では図 1.2 に示すような安全要件継承フローが定められている。安全目標を起点に、システム、ハードウェア、ソフトウェアの各要件を決定するため、システム構想段階での安全要件導出が必須になる。すなわち、ハザード分析とリスクアセスメントを通じ、アイテム<sup>4</sup>の機能不全（故障）が引き起

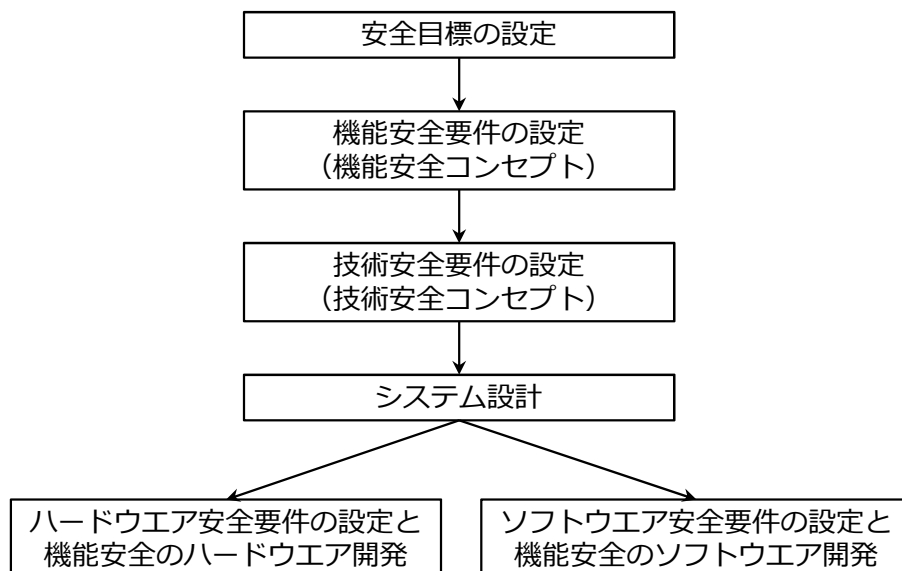


図 1.2 安全要件継承フロー [15]

<sup>3</sup>潜在危険ともいい、危険源から危害に至るプロセス、すなわち危険源と危害の発生を結び付けるメカニズムを表す概念を指す [18].

<sup>4</sup>車両に機能として実装されるシステムや、それに含まれるサブシステムなど、機能安全の規格を適用する開発の対象を指す。アイテムの定義には、機能要件、非機能要件、他のアイテムとの関連性に加え、機能コンセプト、想定する使用条件・環境、法的要件などが求められる [17].

こすハザードを特定および分離し、危害<sup>5</sup>の防止または緩和に関連した安全目標を設定するステップから開発が始まる。ハザード分析では、Hazards and Operability Study (HAZOP)、FMEAなどの手法を用いて、アイテムに潜在する危害に至る可能性のある振る舞いを識別する。リスクアセスメントでは、リスク<sup>6</sup>の指標として Automotive Safety Integrity Level (ASIL)を使用し、以下に示す3つの指標 (S, E, C) から決定する。

### S : 過酷度 (Severity)

アイテムの機能不全によりドライバまたは他の交通関係者が受ける傷害の重さの見積もりである。各ハザードに対し、表 1.1 にしたがって S0, S1, S2, S3 の過酷度のクラスの1つを割り付ける。この指標は、医学的なガイドラインなどをもって見積もられる。

表 1.1 過酷度のクラス

クラス	S0	S1	S2	S3
内容	傷害なし	軽度および中程度の傷害	重度および生命を脅かす傷害 (生存の可能性がある)	生命を脅かす傷害 (生存がはっきりしない)

### E : 曝露可能性 (Probability of exposure)

想定される運転状況の期間、もしくはある状況の発生頻度のどちらかの指標による見積もりである。各ハザードに対し、表 1.2 にしたがって E0, E1, E2, E3, E4 の発生頻度のクラスの1つを割り付ける。この指標は、対象となるハザードのシナリオ (危険源から危害に至るまでの流れ) に基づき、道路環境、天候、車両周辺状況、時間帯、運転操作などから判断される。

表 1.2 曝露可能性のクラス

クラス	E0	E1	E2	E3	E4
内容	可能性なし	可能性が非常に低い	可能性が低い	可能性が中程度	可能性が高い

<sup>5</sup>有害物質、振動源、機械の回転部、鋭利部、放射線源など物質やエネルギーなどとして認識できる危険源によって人体、財産および環境にもたらされる負の結果を指す [18].

<sup>6</sup>「危害の重大度と危害の発生可能性の組み合わせ」で定義される [17].

**C : 回避可能性 (Controllability)**

ドライバまたは他の潜在的リスクのある人が、特定の危害を回避するために、ハザードに対し十分に抑制することができる確率の見積もりである。各ハザードに対し、表 1.3 にしたがって C0, C1, C2, C3 の回避可能性のクラスの 1 つを割り付ける。ドライバあるいは他の被害を被る可能性のある交通参加者が、発生しているハザードを制御でき、被害を回避することができる可能性の見積もりである。

表 1.3 回避可能性のクラス

クラス	C0	C1	C2	C3
内容	一般的に回避可能	容易に回避可能	通常は回避可能	回避困難または回避不能

各ハザードに割り付けた S, E, C のクラスから、表 1.4 にしたがって ASIL を決定する。

表 1.4 ASIL 決定表

過酷度クラス	曝露可能性クラス	回避可能性クラス		
		C1	C2	C3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	ASIL A
	E4	QM	ASIL A	ASIL B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	ASIL A
	E3	QM	ASIL A	ASIL B
	E4	ASIL A	ASIL B	ASIL C
S3	E1	QM	QM	ASIL A
	E2	QM	ASIL A	ASIL B
	E3	ASIL A	ASIL B	ASIL C
	E4	ASIL B	ASIL C	ASIL D

ASIL は、A～D の 4 段階に分類されており、ASIL-A から ASIL-D に進むにしたがって安全要求が高くなり、設計手法やプロセス管理がより高度かつ厳格なものとなる。なお、表 1.4 中の QM (Quality Management) は、機能安全を適用しなくてもよい通常の品質管理を要求している。自動車業界で統一的な定義が存在するわけではないが、X-by-Wire 製品に関するリスクは、ASIL-C、または ASIL-D と定義されることが多く [19]、非常に高い安全性が求められている製品の 1 つである。分析対象によっては、同一システムに複数のハザードが存在するが、各ハザードに対して ASIL 分析を行い、最も厳しい ASIL を対象シ

システムの ASIL として割り当てる [17]. なお, 安全ライフサイクルを実施する組織は, ISO / TS16949 (自動車産業向け品質マネジメント規格), ISO9001 (品質マネジメント規格), または同等の規格に準拠した組織レベルの品質管理が必要であるとされる.

ASIL 決定後は, ASIL とともに設定される安全目標からリスク低減に向けた機能安全コンセプトを作成する. さらに, 機能安全コンセプトを技術安全コンセプトに詳細化し, システム設計に反映する. ハードウェアとソフトウェアに該当する安全要件を仕様化する工程と, 開発成果物を統合して評価 (検証および妥当性確認) を行う工程を策定する. 設計・評価完了後の安全妥当性確認工程において, リスク低減方策の妥当性, 有効性や残存 (残留) リスクが, 現今の社会的価値観から見た許容リスク, 受容リスクの範疇であることが立証できるまで上記プロセスを繰り返すこととなる.

### 1.2.3 規格準拠に向けた取り組み

ISO26262 の発行から 4 年ほど経過し, 車両メーカ, 部品サプライヤなど, 自動車関連企業の規格準拠に向けた取り組みが本格化してきている [19]. IEC61508 発行当初から機能安全に取り組む欧州勢が先行しているが, 調達要件化などの背景もあり, 日本勢も追従する動きを見せている. また, TÜV SÜD などの認証機関も進出してきており, 認証取得に向けたサポートサービスなども提供されはじめている.

現在, 認証取得対象の多くは, ASIL の段階毎に具体的な必須・推奨技法や検証方法が明記されているソフトウェア開発プロセスやソフトウェアツールであり, MISRA<sup>7</sup> が策定している自動車版ガイドライン MISRA 安全性解析 (MISRA Safety Analysis : MISRA-SA), 欧州の主要車両メーカが共同で策定した自動車業界向けのプロセスモデル Automotive SPICE や, 組織のプロセス管理指針を体系化した能力成熟度モデル統合 (Capability Maturity Model Integration : CMMI) など ISO26262 と親和性の高い既存のガイドラインへの準拠が認証取得の後押しになっている事例が多い [20]. 一方, 規格内で大きな比重を占めるハザード分析, リスクアセスメントや安全要件を考慮した制御系設計法など, 従来ガイドラインが存在しない領域に関しては, 本規格内でも具体的な記述がなく, 模範となる手法が確立されていないうえ, 認証取得活動も進んでいないのが実情である.

特に, ASIL 決定後のリスク低減アプローチで重要な役割を担う「安全要件を考慮した制御系設計」は, 各社の悩みの種である. ISO26262 では, ASIL-C または ASIL-D といった高いリスクを有する X-by-Wire のリスク低減において, 制御系設計に対し冗長化設計や

<sup>7</sup>The Motor Industry Software Reliability Association

フェイルソフト（縮退運転）機能を求めている．これに対し，性能要件を達成するための制御系を構築後，性能要件に影響を及ぼさないようにバックアップ用のセンサ，アクチュエータを実装して冗長化し，故障時に制御系を切り替えてフェイルソフトを行う従来手法では，ISO26262 が定める設計初期段階から安全要件を考慮する設計プロセスに準拠しない．また，急激に進む電子制御化の波を受け，車両重量やコストの増加など X-by-Wire の利点を失うという深刻な課題も表面化してきており，設計方針の転換が必須であるためである．

今後，ソフトウェア開発プロセスやツール以外の規格要件に対する準拠，および認証取得を目指すにあたり，設計初期段階から性能と安全性の両要件を考慮し，かつバイワイヤ化の利点を失う車両重量やコストの増加を伴わない冗長化設計手法が必要とされており，実用的な設計法の確立が急務である．

### 1.3 制御工学分野の安全設計に対するアプローチ

安全設計に対しては，システム，制御，情報，構造，材料工学など幅広い工学分野のみならず，人文科学，社会科学分野など異種多様な分野の技術，知見を活用した様々なアプローチが考案されている．本節では，本研究にて主眼を置く制御工学分野での安全設計に対するアプローチについて整理し，研究の位置付けについて述べる．なお各用語については，分野により使われ方，意味する範囲などが異なるため，議論する分野に応じた定義を再確認することが必要である．

表 1.5 に，安全関連技術と適用される制御関連技術との関係を示す．

表 1.5 安全関連技術と適用される制御関連技術との関係

安全関連技術	適用される制御関連技術
エラーリカバリ	制御系構造設計（切り替え型，再構築型など），適応制御
フェイルセーフ	ロバスト制御
故障検出	オブザーバ，フィルタリング
故障診断	時系列データ解析，ベイジアンネットワーク，人工知能

エラーリカバリ，フェイルセーフは，制御系を構成するコンポーネント（センサ，MPU，アクチュエータなど）を冗長（多重）化し多数決選択する，切り替え，再構築機構を有する制御系やロバスト制御系を設計するなどして信頼性を向上させるとともに，故障発生時の危害を軽減する技術である．エラーリカバリは，切り替え，再構築など，故障情報を活用し積極的に制御系の変更を行い，故障発生前と同等の機能，または機能を縮小してでも



動作を継続（縮退運転）するフェイルソフトなどを設計目標とする能動型の安全関連技術である。なお、故障発生時にシステムを安全な状態（たとえば、停止）へ移行させるアクティブフェイルセーフは、エラーリカバリの範疇で議論されることが多い。一方、フェイルセーフは、ロバスト制御の手法を使い制御系を変更することなく、故障発生時も正常時と同一の制御系で安全性を保証するという受動型の安全関連技術である。故障発生後、エラーリカバリ動作に入るまでの一時的な安全性を保証する位置付けで実装されることも多い。なお、前述のアクティブフェイルセーフと区別するため、パッシブフェイルセーフと呼ばれることもある。

故障検出、故障診断は、エラーリカバリの実行判断に必要な故障有無に関する情報を得る（検出、または推定する）技術である。故障検出は、主にシステムの稼働中に迅速な対策が必要な突発故障を対象とし、あらゆる制御状況下において検出漏れや誤検出の無い確実な検出を設計目標とする。一方、故障診断は、主に経年劣化のような対策が不急の故障を対象とし、システムから得られたデータをオフラインで分析し、故障有無に加え、原因の特定や故障の背後に潜む要因の分析までを設計目標に含めている。

ISO26262 の要求に基づき、制御工学の視点から、冗長化による信頼性向上とフェイルソフトによる故障発生時の危害軽減を目指す本研究は、表 1.5 のエラーリカバリ技術に位置付けられる。なお、本論文内で使用する「フェイルセーフ」は、前述したエラーリカバリ技術の範疇に含まれる「アクティブフェイルセーフ」を指していることに注意されたい。

## 1.4 自動車を取り巻く技術の変化

近年、自動車を取り巻く技術は大きく変化している。電動化と大規模システムとの連携が時流であり、これらの技術は安全設計の視点から見ても大変興味深く、従来の延長線上の設計思想から脱却する転機であるといっても過言ではない。本節では、車両の電動化と大規模システムの代表例である高度道路交通システムを取り上げ、その特徴と安全設計面での魅力について述べる。

### 1.4.1 車両の電動化

地球環境問題が年々深刻化する中、持続可能なモビリティ社会を実現していくためには化石燃料依存からの脱却と CO<sub>2</sub> の削減が急務であり、車両メーカーは電気自動車（Electric Vehicle : EV）やプラグインハイブリッド車（Plug-in Hybrid Vehicle : PHV）などの電動車両の開発にしのぎを削っている。環境性能目的が先行した電動車両であるが、駆動力が内

燃機関から電気モータに変わったことで、トルク応答が 2 けた速い、分散配置できる、発生トルクが正確に把握できるという特徴 [21] を有しており、車両運動制御の観点からも魅力的であることから、様々な方式の電動パワートレインが検討されている。

中でも注目すべきは、インホイールモータである。現在、インホイールモータを搭載した電気自動車は広く普及していないが、ドライブシャフト、ディファレンシャルギアが不要であることに起因した以下のような利点 [22, 23] があり、将来の有望な技術として各車両メーカーが実用化を目指して開発に取り組んでいる。

- (1) 駆動系の共振の影響を受けないため、高応答・高精度なトルク制御が可能となる
- (2) 駆動系に起因するレイアウト上の制約がないため、デザイン自由度が向上し、車室空間を広く取ることができる
- (3) エネルギー損失が少なく、走行に要する電力消費量を低減することができるため、1 充電当りの航続距離の延長が可能となる

昨今では、NTN の超小型 EV をはじめ、i-Road（トヨタ自動車）、ブレードグライダー（日産自動車）、SIM-HAL（SimDrive）など様々なカテゴリの車両へインホイールモータの適用が試みられており、国内外の実証実験において公道走行も行われている。特に、搭載スペースの制約が厳しい小型電動車両を中心に、Steer-by-Wire とインホイールモータ方式の Drive-by-Wire の両者を搭載した車両が開発 [24] されており、将来の主流方式になることが期待されている。

上記特徴をもつインホイールモータは、前輪、後輪、あるいは全輪の左右毎に配置されるため、左右輪の駆動力に差をつけることで旋回モーメントを発生することが可能となる。すなわち、系の枠を超え、駆動系のアクチュエータから操舵系と同一の車両運動挙動が実現できるということである。また少なくとも左右に 1 つずつ駆動源があるため、片方故障時に残りの正常な駆動源と Steer-by-Wire で片輪走行に伴うヨーモーメントを打ち消しながら走行を継続することも可能となる。これらは、インホイールモータを用いた電動プラットフォームの潜在能力といえ、安全設計への活用が期待される。

### 1.4.2 高度道路交通システム

従来、自動車の技術開発では車両単体を最上位システムに位置付け、車両要件を筆頭に各コンポーネント要件を抽出する手順が一般的であり、一車両内で完結していた。近年で

は、車両単体の枠を超え、大規模システムを構成する1つのサブシステムとみなす考え方が浸透してきており、車両に求められる要件も様変わりしてきている。

自動車関連の大規模システムとして、高度道路交通システムが代表的である。1990年代後半から事故や渋滞の低減，燃料消費の抑制などをねらいとして，自動車と道路とを密に一体化した交通システムを実現する動きが活発化し，今なお進化し続けている。渋滞や交通規制などの道路交通情報をリアルタイムに送信し、カーナビゲーションなどの車載器に文字や図形で表示する交通情報通信システム（Vehicle Information and Communication System : VICS），自動料金収受システム（Electronic Toll Collection System : ETC）など一部の製品は実証実験による検証を経て普及期に入っている。

中でも注目すべきは，700MHz帯の無線電波を用いた車車間，歩車間，路車間，路路間通信に代表される車両，人，施設間の通信技術である [25–28]。他の車両，周辺環境の情報が

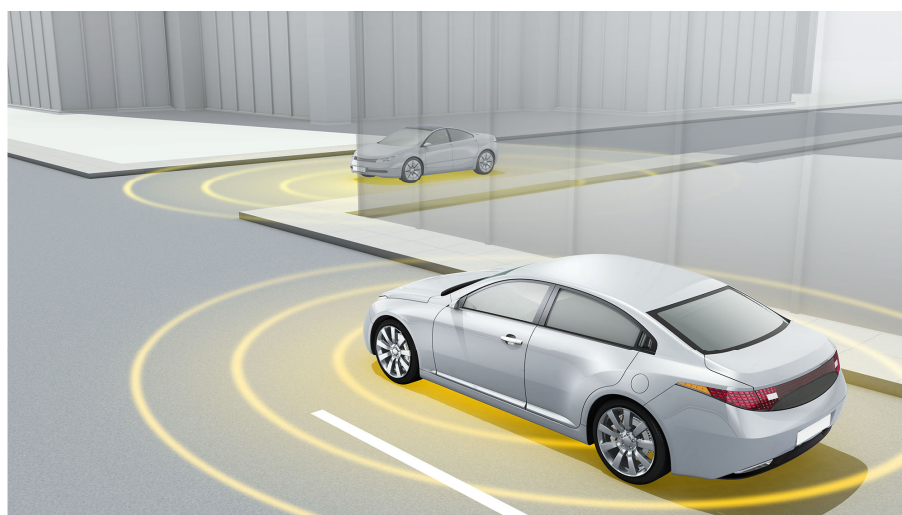


図 1.3 車車間通信

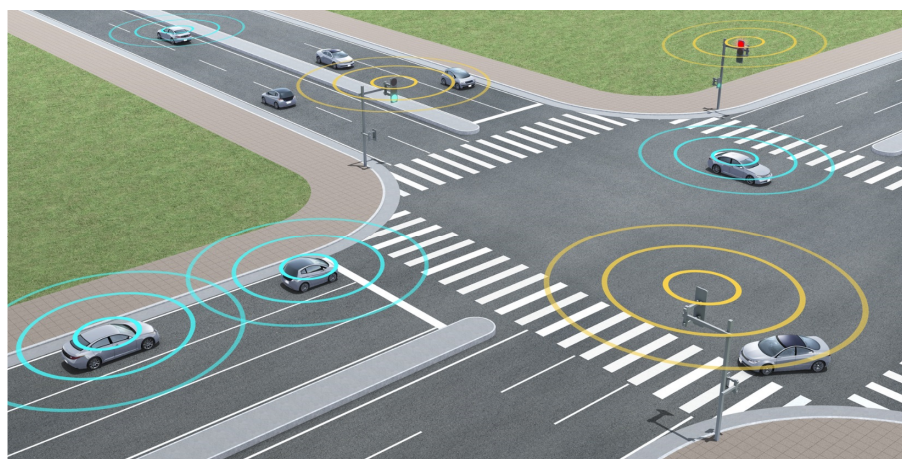


図 1.4 路車間通信

通信を介して取得可能となることで、必要な情報の全てを車両単体で取得するという従来思想は定石ではなくなりつつある。たとえば、ドライバの負荷軽減、サグ部<sup>8</sup>での渋滞解消を目指して開発が進むアダプティブクルーズコントロール（Adaptive Cruise Control : ACC）では、アクセルペダルを踏み続けることなく設定した速度を維持し、車間距離を保つためにミリ波レーダなど自身が保有するセンサを使って他の車両の動作や周辺環境の変化を把握し、制御する方法が一般的であった。近年では、車車間、路車間通信を活用し、周辺車両同士で相互に情報交換することで、互いの挙動を事前に把握したうえで制御を行う協調型アダプティブクルーズコントロール（Cooperative Adaptive Cruise Control : CACC）へと発展し [29]、車両メーカ各社は 2018 年度までの実用化を目指している。CACC は、ACC に比べ必要な車載センサが少ないにもかかわらず、停止、発進時のタイムラグがなくなるなど ACC と比べて優れた機能をもつ。上記 ACC から CACC への発展からわかるとおり、通信技術進歩の恩恵を受け、車両単体で制御に必要な全ての信号を把握することなく、より高度な制御が実現可能な環境が整備されつつある。安全設計視点でも同様に、他の車両や道路側の設備と協調して安全性を確保することで、車両単体に要求される安全設計要件を緩和することが考えられる。

高度道路交通システムは、高齢者ドライバの増加に伴う運転支援や予防安全、渋滞緩和など道路リソースの有効利用を目指し今後より一層発展すると予想され、車車、路車間通信の基盤も強固に整備されていくことが期待できる [30,31]。交通システムを高度化する代わりに車両単体の機能は簡素化するなど、交通システム全体を俯瞰したうえで適切な機能配置をすることが重要になる。この技術変革を転機に、従来の車両単体で閉じた安全設計から脱却し、交通システム全体で安全を担保する手法へ転換していくべきであると考えられる。

## 1.5 研究の目的

1.4 節で述べたとおり、自動車を取り巻く技術の変革は目まぐるしく、従来一車両かつ同一系内で閉じていた安全設計は、系の枠を超え、さらには車車間、路車間の相互作用を含めて考えることができる可能性を有している。その結果、車両単体に要求される安全設計要件が緩和され、車両重量、コスト低減といった利点の創出が期待される。我々の最終的なねらいは、車両、交通・通信基盤が一体となり、交通システム全体で安全性を確保する手法の確立である。

一方、路車間の相互作用を実現するための交通・通信基盤の整備には、膨大な費用と数

---

<sup>8</sup>下り坂から上り坂に変化する凹部を指す。

十年単位の時間が必要であり、普及は程遠い。また、車車間の相互作用に関しても、全ての車両に通信機能を搭載する必要がある、幅広い価格帯、年式の車両が混在する中で完全な普及段階に到達するには、十数年単位の時間が必要になると思われる。ゆえに、交通システム全体での安全設計は、長期的視点では有望であるが、既にプロトタイプ開発が完了している X-by-Wire の恩恵を享受するために安全設計の確立が急務である現状を踏まえると、短中期的に実現可能な新たな手法が必要である。

そこで本研究では、X-by-Wire システムの早期製品化および車両のフルバイワイヤ化を後押しするため、一車両の安全設計に焦点を当て、ISO26262 が要求する「冗長化設計とフェイルソフト機能」をバイワイヤ化の利点を損なうことなく達成する耐故障制御系と、設計初期段階から安全要件を考慮した設計手法の確立を目的とする。具体的には、1.4.1 項で述べた Steer-by-Wire とインホイールモータ方式の Drive-by-Wire を搭載した車両を題材に、操舵、駆動系のアクチュエータとセンサの故障について考える。従来のコンポーネント毎に冗長化設計を行い安全性を確保する手法から脱却するため、車両に潜在する冗長性を活用し、バックアップを目的としたアクチュエータ、センサの追加や制御自由度の増加を伴わないアプローチについて検討する。

ここで、本研究で着目する「車両に潜在する冗長性」について詳しく述べる。

操舵、駆動系のアクチュエータ故障に対しては、1.4.1 項で述べた「左右輪の駆動力差による旋回モーメント発生」や「Steer-by-Wire による片輪走行時のヨーモーメント打ち消し」といった能力を潜在する冗長性と捉え、バックアップ装置を用意する代わりに、故障で喪失した機能を別の系（操舵系故障の場合は駆動系、駆動系故障の場合は操舵系）のアクチュエータを使って相互に補償するというアプローチで耐故障制御系設計を進める。

センサ故障に対しては、人間（ドライバ）と電子制御の間に潜在する冗長性の活用を考える。自動車の運転は、「認知」、「判断」、「操作」のサイクルから成り立っており、どれか1つでも欠けると正常な運転は不可能である。図 1.5 に示すように、認知、判断、操作のサイクルには、人間と電子制御による2つのサイクルが存在している。人間によるサイクルでは、視覚、聴覚、三半規管などを使って車両挙動、周辺状況を認知し、脳で判断し、アクチュエータを介して車両を操作している。一方、電子制御によるサイクルでは、センサで認知し、ECU で判断し、アクチュエータを介して車両を操作する。電子制御が人間のサイクル（＝ドライバ要求）から大きく乖離していないことを把握するため、人間と電子制御の2重系が必然的に存在するが、冗長系であるとみなすには運用方法も考慮しなければならない。

現状の自動車は人間の操作が前提であるため、人間と電子制御によるサイクルが常に共

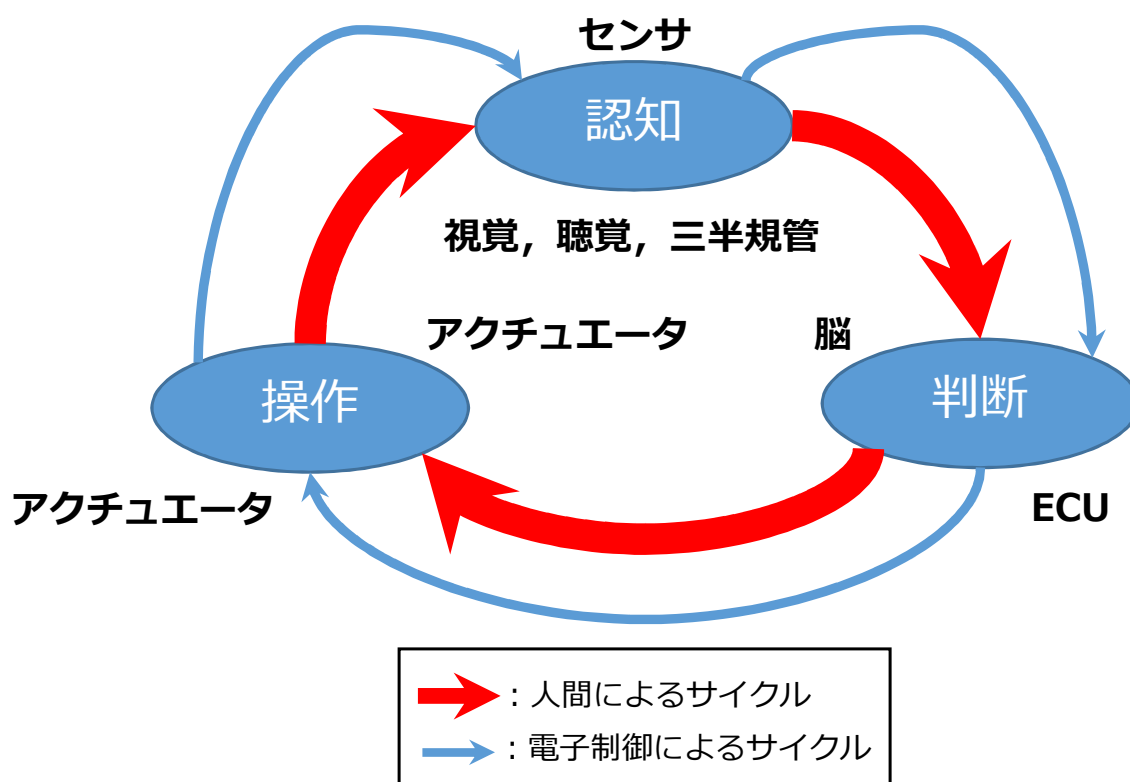


図 1.5 人間（ドライバ）と電子制御による「認知」・「判断」・「操作」サイクル

存しており，認知，判断，操作のサイクルは常時冗長系をなしているといえる．これに対し航空機では，夜間や悪天候環境下では人間による認知が困難であるため，人間は計器を見ることで状況を認知し運行を継続する「計器飛行方式」という飛行方式が存在する [32]．計器の情報はセンサを介して得られる情報であるため，常に冗長系が保たれているとはいえない．さらに，オートフライトコントロールシステム（Automatic Flight Control System : AFCS）を使った自動操縦時では，認知，判断，操作の全てのプロセスが電子制御のみで行われることとなる．このように，人間または電子制御による操縦が混在する運用方法がある場合も，常に冗長系が保たれているとはいえない．

昨今，自動車においてもセンサ（カメラ）を介して車両周辺状況の把握を支援するシステムや自動運転など，航空機と同様な技術が開発されている．ただし，自動車は航空機と違ってドライバが特別な訓練を受けていないことや，台数が多く，走行方法や経路のフレキシビリティが高いことに利点があることを鑑みると，近い将来航空機と同様な運用が適用されるとは想像し難い．本格的な運用は，現行製品のブラインドモニタやサラウンドビューモニタのように，交差点での死角確認や駐車時の自車位置把握など特定状況下での活用や，駐車場などエリアを限定した自動運転 [33] を経て十分な社会的認知を得る必要があり，長い年月を要すると考える．

上記考察を踏まえ、本研究では自動車に対して航空機と同様な運用は想定せず、人間と電子制御の2つのサイクルが常時冗長系をなしていることを活用し、センサ故障時は電子制御によるサイクルを維持せず、人間の認知に基づく判断、操作で運転を継続することを考える。そのため、電子制御によるサイクルで使用するセンサは冗長化せず、人間によるサイクルへ悪影響を与えないことを設計目標とし、車両操作への介入を抑制または遮断する方法を検討する。

## 1.6 本論文の構成

本論文は、全6章で構成される。

第1章では、本研究の背景ならびに本研究の目的を述べた。

第2章では、将来の小型電動車両向けの操舵、駆動方式として期待される、Steer-by-Wireとインホイールモータを搭載し前輪操舵に加え左右後輪の制駆動力が独立制御可能な車両を対象とし、車両の等価3輪モデルとSteer-by-Wireの回転2次系モデルを紹介する。さらに、本研究で考察する操舵、駆動系のアクチュエータとセンサに関連する故障を定義し、故障発生時の車両挙動について分析する。

第3章では、左右後輪に独立配置したインホイールモータの制駆動力差による旋回モーメント発生という潜在能力を活用し、操舵系アクチュエータの故障により喪失した操舵機能を補償する耐故障制御系とその設計法を提案する。具体的には、故障発生から危険に至るまでの時間が数十ミリ秒と非常に短い操舵系故障に対処するため、外乱オブザーバの考え方を活用する。すなわち、故障検出や制御器の切り替えを必要とせず、故障に伴う操舵性能不足を規範モデルと実車両挙動との偏差として捉え、偏差に応じて左右制駆動力差による補償を行う制御系を構築する。さらに、提案した耐故障制御系により故障発生後の回避操作が安全に達成されることをシミュレーションで確認する。

第4章では、第3章の内容に対して新たに駆動系のアクチュエータ故障を考慮し、操舵、駆動系両者の故障に対応可能な耐故障制御系を構築し、より実用的な手法へと発展させる。具体的には、操舵系故障に対しては第3章の手法を踏襲し、駆動系故障に対しては片輪駆動とSteer-by-Wireによる旋回モーメントの打ち消しという操舵・駆動系間の潜在能力に着目し、操舵・駆動系が相互補完しあう耐故障制御系とその設計法を提案する。各制御器の設計には、外乱オブザーバ、ゲインスケジューリング $H_\infty$ 制御手法を適用し、その有効性をシミュレーションで検証する。

第5章では、センサ故障に焦点を当てる。第3、4章で検討するアクチュエータ故障で

は、操舵・駆動系間に潜在する冗長性に着目しているが、センサ故障では、人間（ドライバ）・電子制御間に潜在する冗長性に着目したアプローチを適用する点が異なる。センサ正常時は、ドライバによる操舵操作（＝基本機能）に加え、電子制御によるドライバの操作負担軽減操作（＝付加機能）を付加し快適性を向上させる。一方、センサ故障時は、付加機能は提供せず、基本機能のみを維持することで最低限の操舵機能を確保する耐故障制御系を構築する。具体的には、**Steer-by-Wire** の操舵制御において、基本機能と付加機能を明示的に区別した制御系を構築する。基本機能に関与するセンサには、冗長化、多数決選択といった従来型の安全設計手法を踏襲して耐センサ故障性を確保し、付加機能に関与するセンサには、故障時に基本機能に悪影響を及ぼさないことを要件とした対策、すなわち制御器の出力抑制、制御ループ切断などを施すことで、全てのセンサの冗長化を回避する耐故障制御系とその設計法を提案する。制御系設計には、第 3, 4 章と同じ設計・解析手法を適用し、その有効性をシミュレーションで検証する。

第 6 章では、本研究のまとめを行うとともに、今後の展望について述べる。



## 第2章 対象車両のモデリングと故障の定義

### 2.1 概要

本章では，次章以降で述べる耐故障制御系設計において対象とする車両の概要を述べ，モデリングを行う．また，本論文で考察する操舵，駆動系のアクチュエータとセンサに関連する故障を定義し，故障発生時の車両挙動について分析する．

### 2.2 対象車両の概要

第1章で述べたとおり，昨今，車両・環境性能や快適・利便性向上の観点から，油圧や機械的伝達機構による車両の操作，駆動方式を，センサ，ECU，電動アクチュエータで実現する X-by-Wire へ移行させる動きが活発化している．特に，コラムシャフトが不要であり衝突安全性やレイアウトの自由度が飛躍的に向上する Steer-by-Wire や，ドライブシャフト，ディファレンシャルギアが不要であることに起因した，高応答，高精度なトルク制御，車室空間の拡大や航続距離延長などの利点をもつインホイールモータ方式の Drive-by-Wire は，実用化を目指した開発が加速している [22, 23, 34, 35]．搭載スペースの制約が厳しい小型電動車両を中心に，Steer-by-Wire とインホイールモータ方式の Drive-by-Wire を搭載した車両が開発され [24]，公道での実証試験も世界各地で行われており，将来の主流方式になることが期待される．上記動向を鑑み，本論文では耐故障制御系設計の対象として，Steer-by-Wire とインホイールモータを搭載し，前輪操舵に加え左右後輪の制駆動力が独立制御可能な車両を考える [36–41]．

なお，駆動系についてはインホイールモータ搭載の電動車両に限定することなく，従来の内燃機関車両においても直接ヨーモーメント制御（Direct Yaw-moment Control : DYC）に対応した車両，すなわち左右輪の制動力配分を変え相対的に駆動力差を生み出す機能や，左右独立にトルク配分可能なヨーモーメント・コントロール・ディファレンシャルを装着したトルクベクタリング対応車両 [42] など本論文の対象車両と考えられる．

## 2.3 モデリング

2.2節で述べた対象車両をモデル化するにあたり，図2.1のような等価3輪モデルを考えると，以下の運動方程式が成り立つ [43]. なお，以降モデリングで使用する各変数，パラメータの意味は，表2.1，2.2に示した [44].

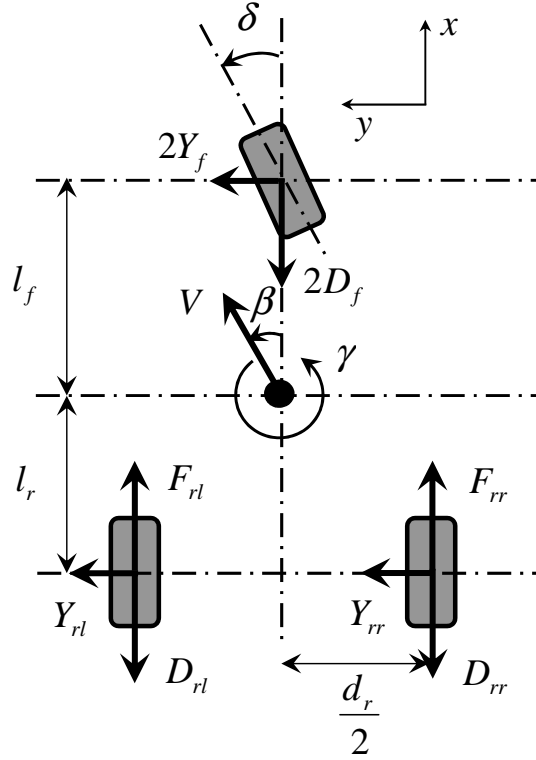


図 2.1 車両モデル（等価3輪モデル）

$$m\dot{V} = F_{rr} + F_{rl} - D \quad (2.1)$$

$$mV(\dot{\beta} + \dot{\gamma}) = 2Y_f + Y_{rr} + Y_{rl} \quad (2.2)$$

$$J\dot{\gamma} = 2Y_f l_f - (Y_{rr} + Y_{rl}) l_r + \frac{d_r}{2} (F_{rr} - F_{rl}) \quad (2.3)$$

一方，操舵系に関しては図2.2のようなモデルを考えると，以下の運動方程式が成り立つ [43].

$$J_s \ddot{\delta} + C_s \dot{\delta} = T - 2\xi Y_f \quad (2.4)$$

ただし，

$$Y_f = -K_f \left( \beta + \frac{l_f}{V} \gamma - \delta \right) \quad (2.5)$$

$$Y_{rr} = Y_{rl} = -K_r \left( \beta - \frac{l_r}{V} \gamma \right) \quad (2.6)$$

$$D = 2D_f + D_{rr} + D_{rl}$$

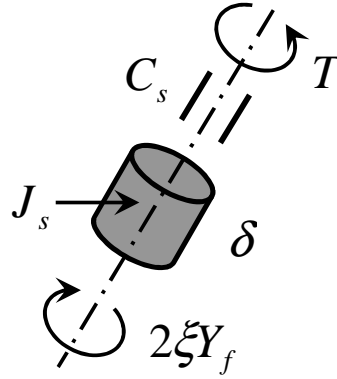


図 2.2 操舵系モデル

である.

なお, コーナリングフォースとタイヤの横すべり角との関係は, (2.7), (2.8) 式に示すように非線形である [45].

$$Y_f = -K_f \frac{\tan^{-1}(k_f \alpha_f)}{k_f} \cos(\beta - \delta) \quad (2.7)$$

$$Y_{rr} = Y_{rl} = -K_r \frac{\tan^{-1}(k_r \alpha_r)}{k_r} \cos \beta \quad (2.8)$$

ここで,  $k_f$ ,  $k_r$  は路面の摩擦係数に対応した係数であり,  $\alpha_f$ ,  $\alpha_r$  は前後輪のスリップ角で,

$$\alpha_f = \tan^{-1}\left(\frac{l_f}{V} \gamma \cos \beta\right) + \beta - \delta \quad (2.9)$$

$$\alpha_r = \tan^{-1}\left(-\frac{l_r}{V} \gamma \cos \beta\right) + \beta \quad (2.10)$$

である.  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  が微小な領域であれば, (2.7)~(2.10) 式が (2.5), (2.6) 式に近似でき, 線形特性とみなすことができる. このため, 制御器設計は (2.5), (2.6) 式の線形モデルに基づいて行い, シミュレーション時に (2.7), (2.8) 式の非線形モデルを用いることとする. また, 転がり抵抗は車輪荷重で決定する [46] ことから,  $D_{rr} = D_{rl}$  としている.

ドライバによる操舵の目的は, 緊急回避のようなとっさの場合は横方向の移動 (横加速度の発生) であり, 余裕がある場合は回頭運動 (ヨーレートの発生) であるといわれている. 横加速度やヨーレート応答の位相遅れを減らすと, 人間-自動車系の性能が向上し, より自動車の運転が快適なものとなることが知られている [9, 47]. ゆえに, 操舵応答を考えると, 横加速度とヨーレートの両方の応答特性を考慮すべきであるが, 両者を制御するためには複数の操作量が必要となる. そこで, 航空機の縦運動の制御で用いられている  $C^*$  モデル追従制御 ( $C^* = c_1 n_z + c_2 q'$ :  $n_z$  は垂直加速度,  $q'$  はピッチレート) の概念を応用し, 1つの操作量で横加速度とヨーレートの両方を良好に制御する方法として, 各々

表 2.1 変数一覧

変数名	記号	単位
車両重心点の横すべり角	$\beta$	rad
ヨーレート	$\gamma$	rad/s
前輪舵角	$\delta$	rad
前輪コーナリングフォース	$Y_f$	N
左後輪コーナリングフォース	$Y_{rl}$	N
右後輪コーナリングフォース	$Y_{rr}$	N
ステアリングモータトルク	$T$	Nm
左後輪制駆動力	$F_{rl}$	N
右後輪制駆動力	$F_{rr}$	N
前輪転がり抵抗	$D_f$	N
左後輪転がり抵抗	$D_{rl}$	N
右後輪転がり抵抗	$D_{rr}$	N
車速	$V$	m/s

表 2.2 パラメータ一覧

パラメータ名	記号	値	単位
車両重量	$m$	1400	kg
車両慣性モーメント	$J$	2457	kgm <sup>2</sup>
前輪車軸・重心間距離	$l_f$	1.02	m
後輪車軸・重心間距離	$l_r$	1.58	m
後輪トレッド	$d_r$	1.48	m
操舵系慣性モーメント	$J_s$	11.98	kgm <sup>2</sup>
操舵系粘性摩擦係数	$C_s$	9	kgm <sup>2</sup> /s
前輪コーナリングパワー	$K_f$	33700	N/rad
後輪コーナリングパワー	$K_r$	56200	N/rad
トレール	$\xi$	0.05	m

を線形結合した (2.11) 式の物理量  $D^*$  を制御量とする制御系が提案されている [9, 47].

$$D^* = dV(\dot{\beta} + \gamma) + (1 - d)V\gamma \quad (0 \leq d \leq 1) \quad (2.11)$$

ここで、 $V(\dot{\beta} + \gamma)$  は横加速度、 $d$  は横加速度とヨーレート  $\gamma$  の比率を決める定数である。横加速度またはヨーレートのどちらか一方を制御量として制御系を構築した場合、他方の値が緩慢になったり、オーバーシュートする傾向が見られるが、 $D^*$  を制御量とした場合は、両運動を高いレベルで両立できることが報告 [47] されており、Steer-by-Wire 制御への適用事例 [48–50] も多い。本論文においても、 $D^*$  を制御量として扱うこととする。

なお、上述したモデリングにおいて、ステアリングモータとインホイールモータの応答速度は車両応答速度に比べ十分速いため「制御器からの指令値＝モータ出力」とし、モー

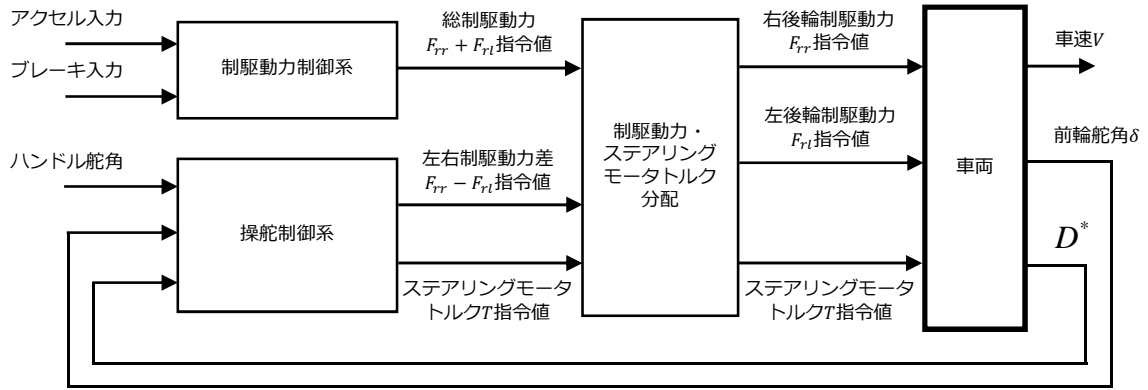


図 2.3 車両制御系構成概要

タのダイナミクスを無視している点と、左右制駆動力差  $F_{rr} - F_{rl}$  は、アクセル、ブレーキ操作から決定する総制駆動力  $F_{rr} + F_{rl}$  とは独立して決定できる点に注意する。また、前輪舵角  $\delta$ 、ヨーレート  $\gamma$ 、横加速度  $V(\dot{\beta} + \gamma)$  は、センサより観測可能とし、 $D^*$  は観測したヨーレートと横加速度から ECU で (2.11) 式に基づいて演算を行い取得する。

上記車両に対応する制御系構成を、図 2.3 に示す。図 2.3 において、制駆動力制御系は、ドライバのアクセル、ブレーキ操作から総制駆動力  $F_{rr} + F_{rl}$  指令値を一意的に決定する。操舵制御系は、ドライバのハンドル操作から左右制駆動力差  $F_{rr} - F_{rl}$  とステアリングモータトルク  $T$  の指令値を決定する。制駆動力・ステアリングモータトルク分配部は、総制駆動力、左右制駆動力差とステアリングモータトルクの各指令値から、最終的な左右輪の制駆動力  $F_{rr}$ 、 $F_{rl}$  とステアリングモータトルク  $T$  の指令値を決定する。第 3, 4 章で議論する耐故障制御系設計では、操舵制御系が持つ冗長な操作量（左右制駆動力差、ステアリングモータトルク）を活用し、操舵系のアクチュエータ故障に、制駆動力・ステアリングモータトルク分配部の分配自由度を活用し、駆動系のアクチュエータ故障に対応する。また第 5 章では、操舵制御系の機能を重要度に応じて分割し、機能毎に独立した制御ループをもつ構造へと拡張し、 $D^*$  算出に必要なヨーレート、横加速度センサの故障に対応する。

## 2.4 故障の定義と車両挙動への影響

故障の分類方法は多数存在するが、故障に至るまでの時間で分類する方法、すなわち「突発故障」と「劣化故障」が一般的である [51]。突発故障は、全く予兆がなく稼働中に突然発生する故障であり、ワイヤハーネスの断線、短絡などが主な原因である。ECU による故障検出、フェイルセーフ／フェイルソフトなどの早急なリカバリ動作が要求される。一方劣化故障は、経年劣化が原因であり長期的な特性の変化を調べる必要があるため、ECU に

よる故障検出，フェイルセーフ／フェイルソフトなどは一般的に困難である．そのため，日常点検や車検などの定期・法定点検，すなわち運用面での対処が求められており，部品の耐久性に基づいた点検項目や推奨交換時期の策定などが必要である．設計面においても，航空機の疲労設計にて疲労き裂が全体に伝播しないような工夫が施されるように，部分的な故障がすぐに破局的な故障につながらず徐々に機能が低下するフェイルソフトリな設計を徹底することも重要である [32,52]．本論文では，アクチュエータ，センサ各々の突発故障を対象とし，運転中の故障発生を想定した耐故障制御系設計問題を考える．

アクチュエータ故障に関しては，モータ過電流，過熱発生時，駆動 IC による電流遮断で強制的にモータトルクが  $0 \text{ Nm}$  となることを想定し，操舵系故障は  $T = 0 \text{ Nm}$ ，駆動系故障は  $F_{rr} = 0 \text{ N}$  または  $F_{rl} = 0 \text{ N}$  となる場合を考える．すなわち，モータ暴走，固着などの恒久的な故障による「セルフステア」，「ステアロック」や「オーバーラン」，「タイヤロック」などの危険事象に至る前にモータの保護機能が働くことを前提とし，保護機能が働いた際に操舵および走行機能を確保する問題を考える．なお，ギア割れ，異物噛み込みなどの別要因による故障も考えられるが，こちらは材質強化や製造工程改善など，従来と同等の故障発生率低減対策が施されているものとする．また，操舵系と駆動系の両者が同時に故障する 2 重故障は考えない．

ここで，耐故障制御系を実装する前，すなわちハンドル操作から算出された  $D_{ref}^*$  を目標値とする Steer-by-Wire の  $D^*$  フィードバック制御（詳細は第3章に記載）により  $T$  を制御し，左右制駆動力差は制御入力として使用しない図 2.4 の制御系（ $F_{rr}$ ， $F_{rl}$  入力はドライバの認知，判断に基づくアクセル，ブレーキ操作から決定するため，制御器は図示せず）において，上記アクチュエータ故障が発生した場合の車両挙動をシミュレーションで分析する．なお本シミュレーションでは，故障時の車両挙動分析が目的であるため，ドライバによる車両挙動補正はなしとし，表 2.2 のパラメータを使用して実施した．

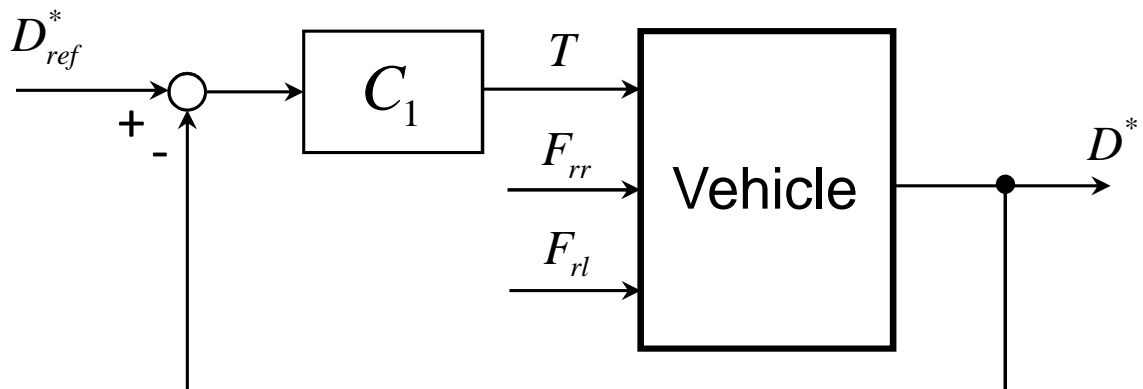


図 2.4 Steer-by-Wire 制御系（耐故障制御系実装前）

はじめに，操舵系故障時の車両挙動について分析する．半径 100 m の円軌道を  $V = 10$  m/s で定常円旋回中 ( $D_{ref}^* = 1$  に相当) に操舵系故障が発生した場合のシミュレーション結果を，図 2.5～2.7 に示す．なお，シミュレーションは 100 s 間実施しているが，図 2.5, 2.7 は変化が顕著な故障発生前後 5 s 間の挙動を示している．図 2.5 に示すように，シミュレーション（円旋回）開始から 20 s 後に  $T = 0$  Nm となる故障を発生させている．図 2.6 において×印は故障発生地点を表しているが，アクチュエータ故障時は円軌道の維持が不可能となり，直進しているようすがわかる．(2.4) 式で  $T = 0$  Nm とすると，操舵系に働く力はセルフアライニングトルク  $2\xi Y_f$  のみとなり，タイヤの横すべり角を減少させる方向に働くため図 2.7 に示すように  $\delta = 0$  rad へと収束し，直進走行になると解釈できる．換言すると，故障発生後はタイヤの横すべり角を増加させる手段がなく，自動車の基本機能である「曲がる」の機能が完全に失われることを意味している．

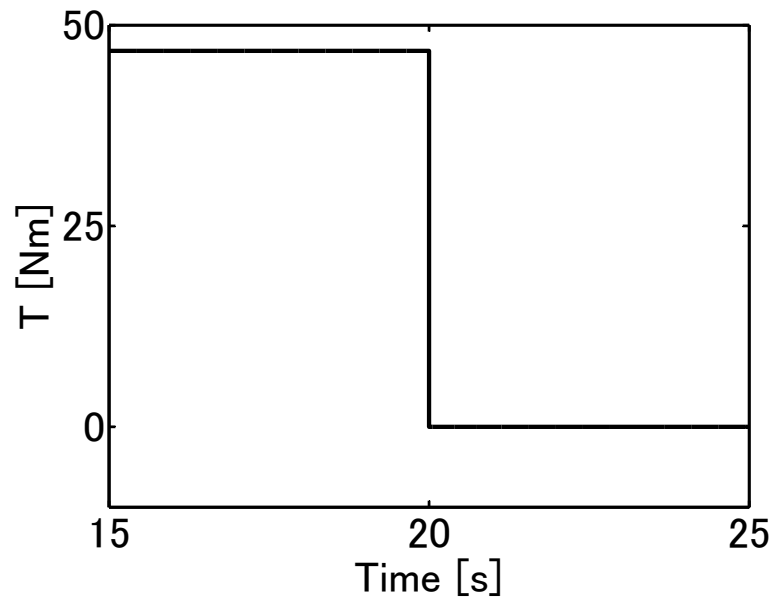


図 2.5 ステアリングモータトルク  $T$

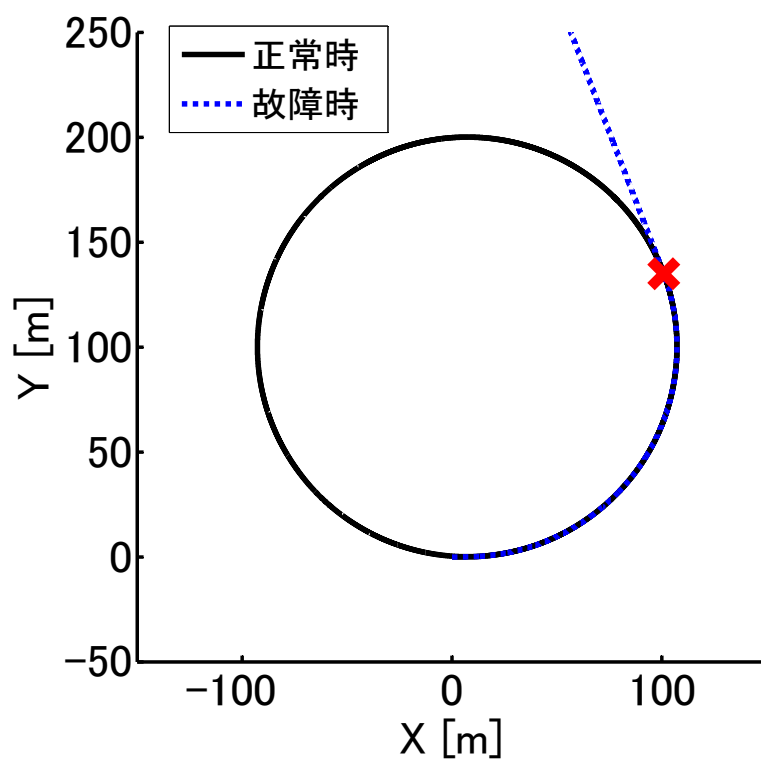


図 2.6 X-Y 平面上の車両挙動（操舵系正常時，故障（ $T = 0 \text{ Nm}$ ）時の比較．“×”印は故障発生地点を表す．）

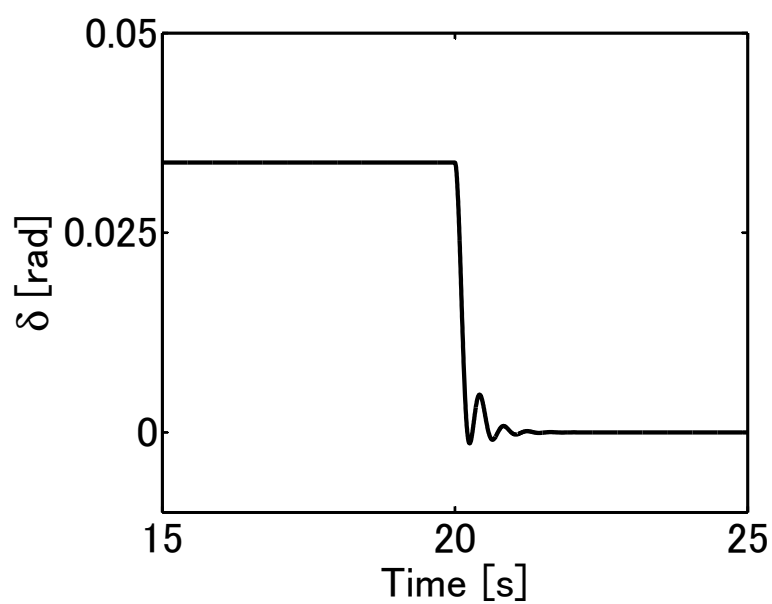


図 2.7 前輪舵角  $\delta$



つぎに、駆動系故障時の車両挙動について分析する． $V = 10 \text{ m/s}$  で直進走行中 ( $D_{ref}^* = 0$  に相当) に駆動系故障が発生した場合のシミュレーション結果を，図 2.8～2.11 に示す．図 2.8 に示すように，シミュレーション開始から 20 s 後に  $F_{rr} = 0 \text{ N}$  となる故障を発生させている．故障発生後は，総駆動力が転がり抵抗未満 ( $F_{rr} + F_{rl} < D$ ) となるため，図 2.9 に示すとおり 20 s 以降は車速が減少する．図 2.10 において×印は故障発生地点を表しているが，故障発生地点を起点に，正常時の軌道から逸れた方向へ直進しているようすがわかる．故障発生直後， $F_{rl}$  のみの片輪駆動により発生する右旋回モーメントの影響で正常時の軌道から逸脱する．逸脱後，右旋回が継続することなく直進走行に移行するのは，Steer-by-Wire の  $D^*$  フィードバック制御により  $D_{ref}^*(=0)$  へ再度追従するようにステアリングモータトルクが制御されるためである．上記 Steer-by-Wire の挙動は，図 2.11 の前輪舵角挙動から理解できる．前輪舵角は，駆動系故障に伴い発生する右旋回モーメントを受け，いったん右方向へ振れた後，Steer-by-Wire の  $D^*$  フィードバック制御により右旋回モーメントを打ち消す，すなわち相応の左旋回モーメントを発生する舵角へと収束している．片輪駆動による旋回モーメントは， $D^*$  フィードバック制御により打ち消されて軽減されるが，加減速するたびに発生するため，車両挙動が安定せず車速調整が困難になることが予想される．

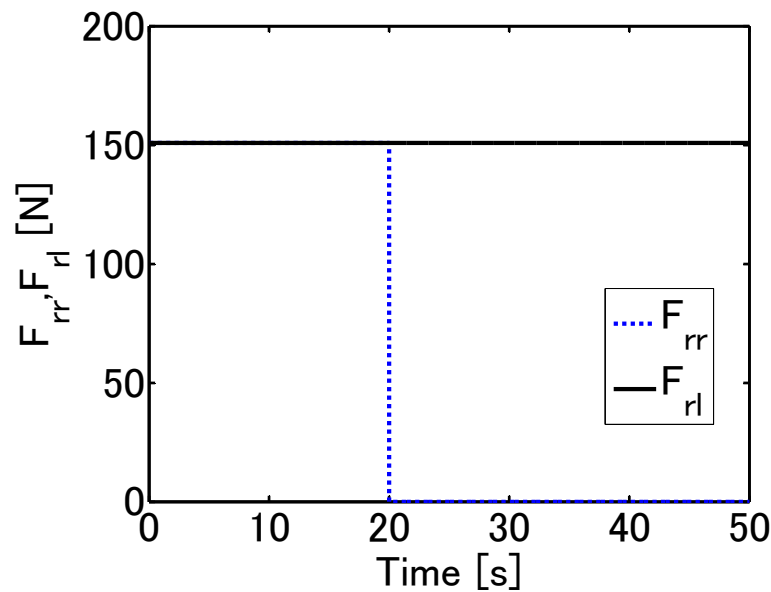
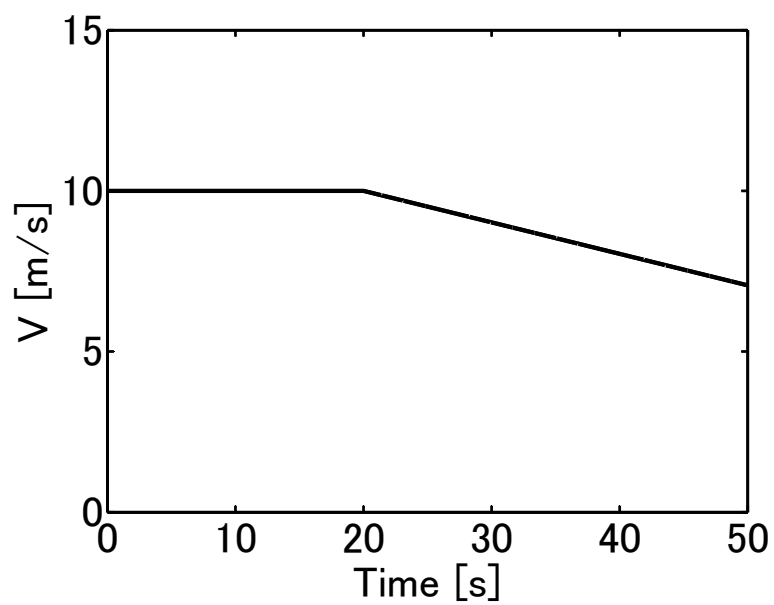
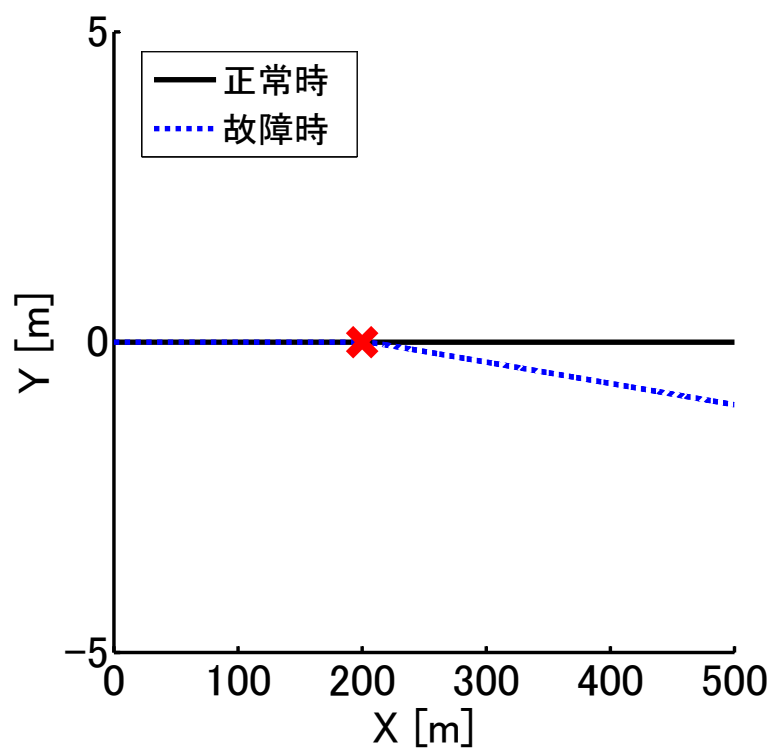
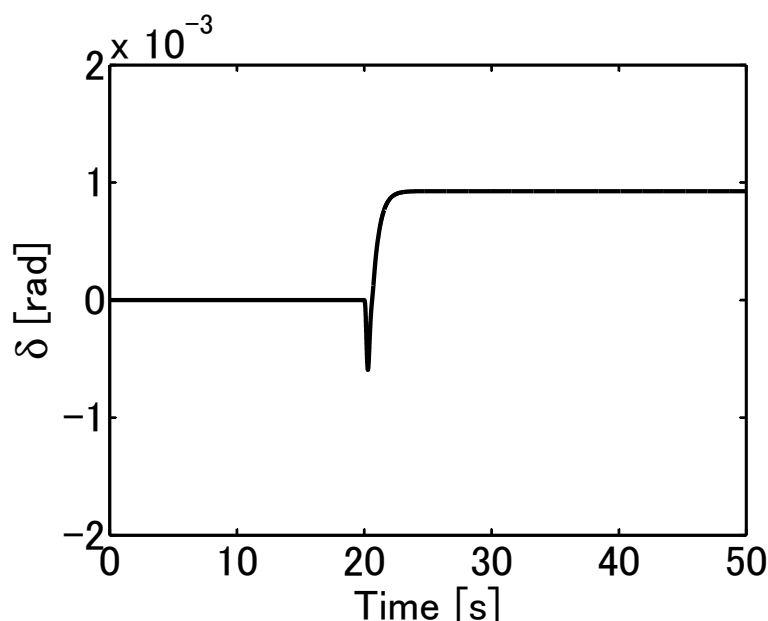


図 2.8 左右後輪制駆動力  $F_{rr}$ ,  $F_{rl}$

図 2.9 車速  $V$ 図 2.10 X-Y 平面上の車両挙動（駆動系正常時，故障（ $F_{rr} = 0$  N）時の比較．“×”印は故障発生地点を表す．）

図 2.11 前輪舵角  $\delta$ 

一方，センサ故障に関しては，ワイヤハーネスの断線または短絡により，強制的にセンサ値が固定値となり，正しい値が取得できなくなる場合を想定する．ここで固定値とは，ECU 基盤上のプルアップ，プルダウンなどのハードウェア処理により決まる値であり，各センサ値が制御に及ぼす影響を考慮してオーバーラン（Over Run : OR）などの危険事象を防止する側のデフォルト値に設定される．たとえば電子スロットル制御系では，一連の制御に関与するセンサの故障時にスロットルが閉側へ動作するよう，アクセルセンサは全閉側の値に，スロットルセンサは全開側の値にデフォルト値が設定されている．これに対し，操舵系の制御に使用する舵角センサ，ヨーレートセンサ，横加速度センサなどは，道路状況に応じて適切なハンドル舵角，ヨーレート，横加速度が随時変化するため，デフォルト値を一意に決定することが困難であり，上述したアクセルセンサ，スロットルセンサとは別のアプローチが必要となる．

ここで，図 2.4 に示した耐故障制御系実装前の制御系において，上記センサ故障が発生した場合の車両挙動をシミュレーションで分析する．センサ故障を想定している点以外は，アクチュエータ故障時のシミュレーションと同条件で行っている．

半径 100 m の円軌道を  $V = 10$  m/s で定常円旋回中（ $D_{ref}^* = 1$  に相当）にヨーレートセンサ故障が発生した場合のシミュレーション結果を，図 2.12～2.14 に示す．なお，シミュレーションは 100 s 間実施しているが，図 2.12，2.14 は変化が顕著な故障発生前後 5 s 間の挙動を示している．図 2.12 に示すように，シミュレーション（円旋回）開始から 20 s 後に  $\gamma = 0$  rad/s となる故障を発生させている．そのため 20 s 以降の  $D^*$  センサ値は，横加速度

センサの挙動のみが反映されている．図 2.13 において×印は故障発生地点を表しているが，故障発生後は目標円軌道から外れ，急旋回しているようすがわかる．ヨーレートセンサ故障に伴い  $\gamma = 0 \text{ rad/s}$  となることで， $D^*$  センサ値が実  $D^*$  値を下回り，目標値  $D_{ref}^*$  と乖離する．そのため突発的な偏差が生じ，Steer-by-Wire の  $D^*$  フィードバック制御器がステアリングモータトルクを増加させるため，図 2.14 に示すように前輪舵角が増加し，急旋回に至ると解釈できる．なお，図 2.12 において故障発生後再び  $D^*$  センサ値が目標値  $D_{ref}^* (= 1)$  へ収束するのは，急旋回により横加速度が増加するためである．シミュレーションからわかるとおり，実際の車両挙動はドライバの意図通りであるにも関わらず，制御系はセンサ値を通じて車両挙動を認識するため，センサ故障後は車両挙動を誤認識して不適切な制御入力を加え，ドライバを混乱させてしまう危険性がある．

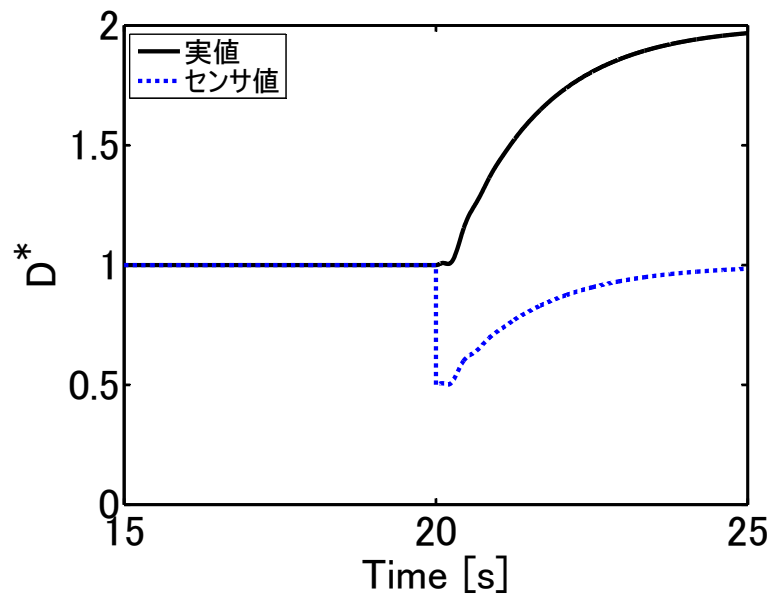


図 2.12  $D^*$  出力

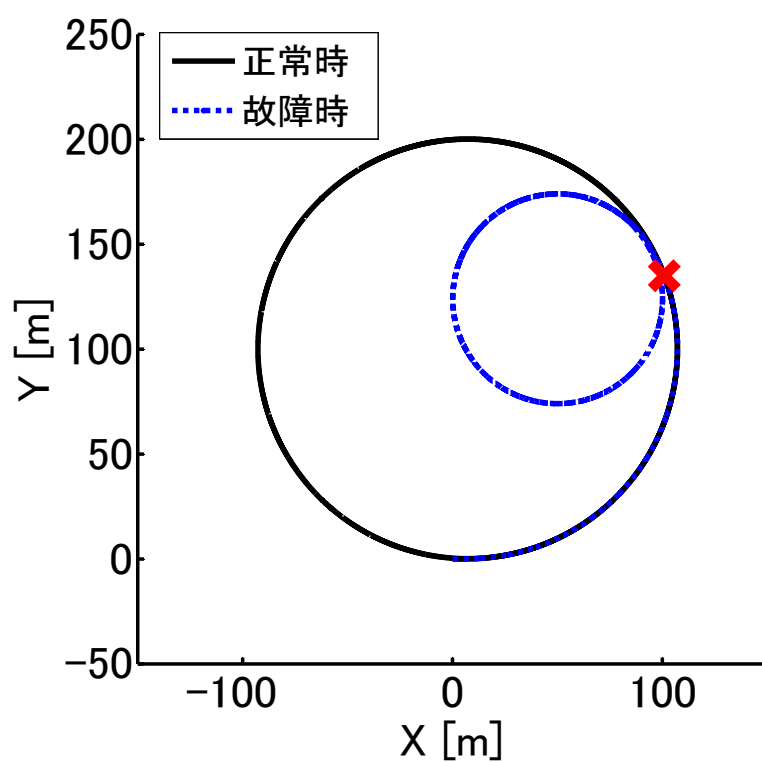


図 2.13 X-Y 平面上の車両挙動（ヨーレートセンサ正常時，故障 ( $\gamma = 0 \text{ rad/s}$ ) 時の比較. “×”印は故障発生地点を表す.)

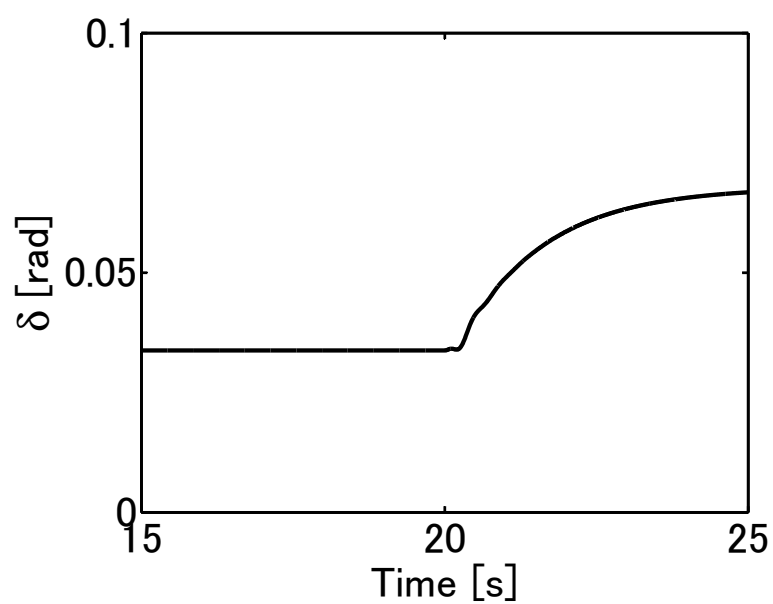


図 2.14 前輪舵角  $\delta$

## 2.5 まとめ

本章では，本論文で扱う車両の等価 3 輪モデルと **Steer-by-Wire** の回転 2 次系モデルを導出した．さらに，本論文で考察する操舵，駆動系のアクチュエータとセンサに関連する故障を定義し，故障発生時の車両挙動について分析した．アクチュエータ故障に対しては，第 3 章で操舵系故障を，第 4 章で操舵，駆動系両故障を対象とした耐故障制御系設計問題について検討する．センサ故障に対しては，第 5 章で  $D^*$  値を算出するために必要なヨーレートセンサ，横加速度センサの故障を対象とした耐故障制御系設計問題について検討する．

なお，本論文で考える耐故障制御系の目的は，アクチュエータ，センサの故障発生前後で車両挙動変化を最小限とし，退避走行速度を上限とする速度抑制制御の下で最寄りの安全な場所への退避を可能にすることである．すなわち，現行の内燃機関車両の退避走行性能と同様，故障後は減速し，30 km/h（約 8.3 m/s）程度を上限とする．限界走行を伴うような全領域での走行は想定していないことに注意する．

## 第3章 操舵系故障に対する耐故障制御系

### 3.1 概要

プロトタイプ車両への適用に留まっていた **Steer-by-Wire** は着実な進化を遂げており、2014 年には日産自動車の世界で初めて量産車両（インフィニティ Q50）への搭載に成功した [8]。しかし依然として安全設計には課題が多く、製品化されているシステムでは複数のセンサ、MPU、アクチュエータを使い冗長系を構成することで安全性を確保しており [19]、コストが高く、一部の車種への搭載に留まっているのが現状である。

従来 **Steer-by-Wire** の故障対策として、故障時にステアリングモータの電流を遮断し、ステアリングホイールとラック軸を機械的に結合する、バックアップモータに切り替える、前輪操舵に加え後輪操舵を併用するなどして操舵機能を確保する方法が検討されている [19,53,54]。いずれも操舵系で閉じた機能補償のアプローチであり、コンポーネント毎の冗長化が助長され車両重量やコストの増加を伴うとともに、迅速な故障検出とバックアップ装置への切り替えが必要など、安全設計によりバイワイヤ化の利点が損なわれるという問題がある。

車両重量やコスト増加の問題に対処するため、先行研究ではコンポーネント毎に冗長化された ECU に着目し、各コンポーネントに分散配置された ECU を 1 つの ECU へ統合化するとともに、アクチュエータ、センサに情報処理能力をもたせて高機能化し、情報をネットワーク化して共有することで、統合 ECU が故障後もセンサ、アクチュエータの自律動作でシステム全体の停止を防ぐ自律分散アーキテクチャなどが提案されている [55,56]。しかし上記手法は、MPU の分散配置に他ならず、ハードウェアであるアクチュエータ、センサに対しては、MPU 上のソフトウェアのように機能の分割、統廃合が容易でないことや、サイズ、搭載位置の制約から同様の手法を適用することは困難である。また故障検出に対しては、故障検出の高速・高精度化を目指した研究 [51] が行われている。しかし、操舵系に起因する故障は、故障発生から危険に至るまで（**fault**→**error**→**failure** 遷移）の時間が数十ミリ秒と非常に短く、あらゆる走行シーンで誤検出なく正確に故障を検出し、フェイルセーフ／フェイルソフトを実施することは困難であり、実用化には課題が多い。

一方、1.4.1 項で述べたとおり、自動車を取り巻く技術の変化に伴い、インホイールモー

タを用いた電動プラットフォームがもつ「左右輪の駆動力差による旋回モーメント発生」など、従来存在しなかった冗長機能が車両に潜在している。系の枠に固執せず、車両全体を俯瞰して潜在する冗長性を発掘し、故障時のバックアップ機能として活用するというアプローチは、同一系で閉じた冗長化設計思想を打破する方法として有望である。さらに故障検出に関しても、従来思想の延長線上ではなく、新たなアプローチが考えられる。故障発生から危険に至るまでの時間が長い（分オーダー程度以上の）システムであれば、従来研究のような故障検出後バックアップの制御系に切り替えて制御を継続する能動的冗長化 [57] のアプローチで問題ない。しかし、Steer-by-Wire の「数十ミリ秒」に代表されるような危険に至るまでの時間が短い（秒オーダー程度未満の）システムでは、誤検出なく正確に故障を検出し、バックアップの制御系に切り替えることは一般的に困難であり、故障検出を伴わずにフェイルセーフ／フェイルソフトを実行する受動的冗長化 [57] のアプローチの方がより現実的である。

本章では、Steer-by-Wire の安全設計において、バックアップ目的の新たなアクチュエータを追加せず、車両に潜在する「左右輪の制駆動力差による旋回モーメント発生」という冗長性を活用し、かつ故障検出、制御系切り替えを必要としない耐故障制御系とその設計法について検討する [36, 39]。

## 3.2 左右輪の制駆動力差を活用した耐故障制御系設計

### 3.2.1 制御器設計用モデル

本項では、第 2 章でモデル化した車両を制御対象とした耐故障制御系を設計するにあたり、制御器設計用モデルを構築する。モデル構築に際し、操舵系故障は故障発生前後で車速変化を伴わないことから、車速は一定として扱う。すなわち、(2.1) 式において  $\dot{V} = 0$  であり、 $x$  軸方向には転がり抵抗と釣り合う駆動力が加えられて等速運動を実現しているとする。よって (2.1) 式は実質意味をもたないため、以降 (2.2)～(2.6)，(2.11) 式で車両の運動を考える。

$T$ ， $F_{rr} - F_{rl}$  を制御入力とし、 $D^*$  を出力とする制御対象は、以下の状態方程式で表現できる。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.1)$$

$$y = Cx$$



ただし,

$$x = \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ \dot{\delta} \\ \delta \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} T \\ F_{rr} - F_{rl} \end{bmatrix}, y = D^*$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{2(K_f + K_r)}{mV} & -\left\{1 + \frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{mV^2}\right\} & 0 & \frac{2K_f}{mV} \\ -\frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{2\xi K_f} & -\frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)}{2\xi K_f l_f} & 0 & \frac{2l_f K_f}{2\xi K_f} \\ \frac{J}{J_s} & \frac{JV}{J_s V} & -\frac{C_s}{J_s} & -\frac{J}{J_s} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{d_r}{2J} \\ \frac{1}{J_s} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} -\frac{2d(K_f + K_r)}{m} & -\frac{2d(l_f K_f - l_r K_r)}{mV} + (1-d)V & 0 & \frac{2dK_f}{m} \end{bmatrix}$$

である.

また, 伝達関数で表現すると,

$$Y(s) = \begin{bmatrix} G_1(s) & G_2(s) \end{bmatrix} U(s) \quad (3.2)$$

ただし,

$$G_1(s) = C(sI - A)^{-1} B_1$$

$$G_2(s) = C(sI - A)^{-1} B_2$$

である.

ここで, 駆動力, 左右制駆動力差, ステアリングモータトルクの指令値をそれぞれ  $X_+$ ,  $X_-$ ,  $T_c$  とすると, 出力値  $T$ ,  $F_{rr}$ ,  $F_{rl}$  との関係は以下となる.

$$T = T_c \quad (3.3)$$

$$F_{rr} = \frac{X_+ + X_-}{2} \quad (3.4)$$

$$F_{rl} = \frac{X_+ - X_-}{2} \quad (3.5)$$

以降で設計する制御器は、上記指令値を生成する役割を担うため、制御器設計プロセスでは指令値を用いて議論を進めるが、ステアリングモータ、左右後輪のインホイールモータには(3.3)～(3.5)式にしたがって各指令値が分配され、動作するものとする。なお第2章で述べたとおり、各モータのダイナミクスは無視しているため「制御器からの指令値＝モータ出力」とし、ステアリングモータトルクや各車輪の駆動力指令値を実現するためのモータ電流制御やオブザーバなどは省略している。

### 3.2.2 問題設定

3.2.1 項でモデル化した制御対象に対し、出力  $y$  を目標値  $D_{ref}^*$  に一致させる図 3.1 の制御系を考える。

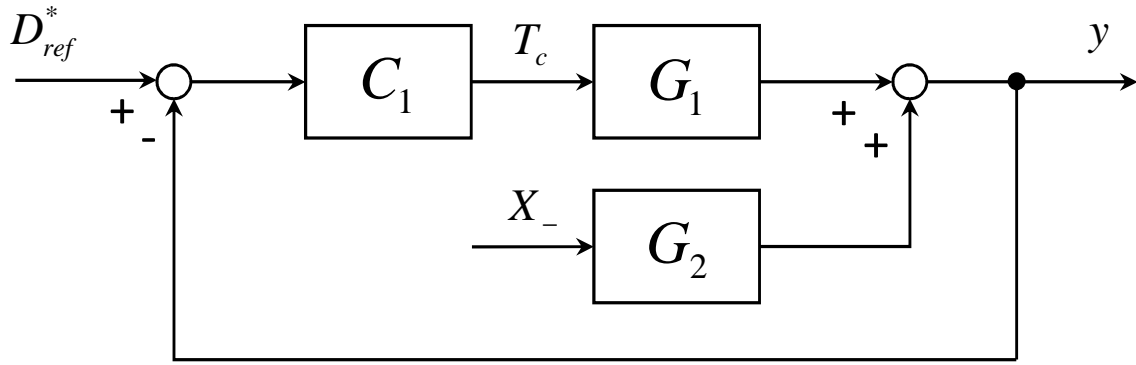


図 3.1 Steer-by-Wire 制御系

図 3.1 において出力  $Y(s)$  は、

$$\begin{aligned} Y(s) &= G_1(s)T_c(s) + G_2(s)X_-(s) \\ &= G_{D_{ref}^*}(s)D_{ref}^* + G_{X_-}(s)X_-(s) \end{aligned} \quad (3.6)$$

となる。ただし、

$$G_{D_{ref}^*}(s) = \frac{G_1(s)C_1(s)}{1 + G_1(s)C_1(s)} \quad (3.7)$$

$$G_{X_-}(s) = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)C_1(s)} \quad (3.8)$$

である。

ゆえに出力  $y$  は、 $T_c$ 、 $X_-$  のどちらでも制御可能であり、通常は  $T_c$  を使用して制御器  $C_1(s)$  により制御されているとする。また目標値  $D_{ref}^*$  は、ハンドル舵角のゲイン倍やハンドル操舵トルクの 1 次遅れなどで算出される [58]。

本章では，上記制御系において故障が発生し，指令値  $T_c$  に反して強制的に  $T = 0 \text{ Nm}$  となった場合，残された正常入力  $X_-$  で  $y$  を制御する耐故障制御系設計問題について検討する．ここで「 $T = 0 \text{ Nm}$  となる故障」とは，2.4 節で述べたとおり，ステアリングモータの過電流，過熱発生時の駆動 IC による電流遮断を想定している．すなわち，モータ暴走，固着などの恒久的な故障により「セルフステア」，「ステアロック」などの危険事象に至る前にモータの保護機能が働くことを前提とし，保護機能が働いた際に退避走行が可能な操舵性能を確保する問題を考える．

耐故障制御系において制御器に求められる要件は，故障発生後の制御系において，

- (1) 迅速に制御を回復させること
- (2) 所望の目標値追従性能を達成すること
- (3) 内部安定であること

を満足することである．なお，本章で考える耐故障制御系の目的は，上記故障発生時に車両挙動を極力維持しつつ，路肩に寄せて停止可能とすることであり，限界走行を伴うような全走行領域での走行を継続させることは想定していないことに注意する．

次項以降で，要件 (1) を達成するため  $T = 0 \text{ Nm}$  となったことを検出することなく制御を回復させる制御器の設計法を提案し，さらに要件 (2)，(3) も満足することを示す．

### 3.2.3 故障の定式化

3.2.2 項で述べた  $T = 0 \text{ Nm}$  となる故障を，図 3.2 に示すように  $d_1$  なる外乱が加わったと考えることで，耐故障制御系設計問題を外乱抑圧問題に帰着させる．

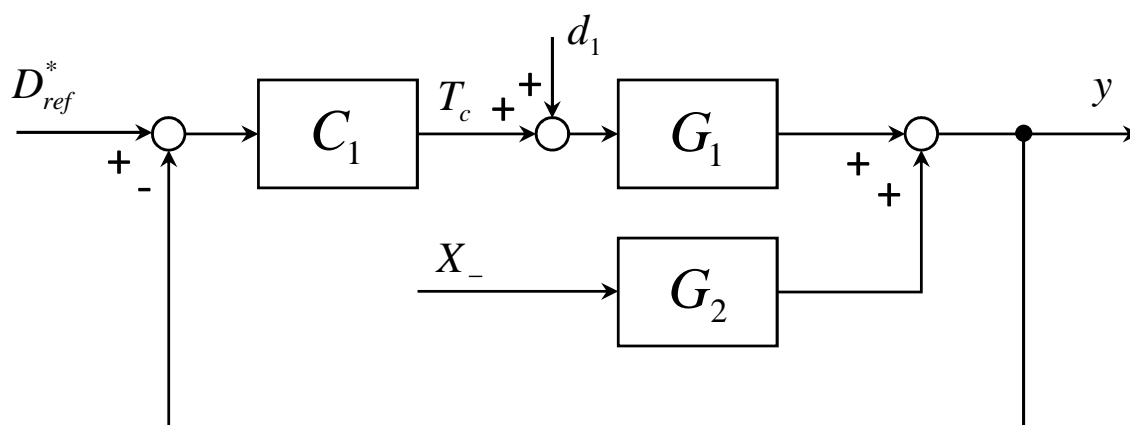


図 3.2 故障を外乱で表現した制御系

図 3.2 において出力  $Y(s)$  は,

$$Y(s) = G_1(s) \{T_c(s) + D_1(s)\} + G_2(s)X_-(s) \quad (3.9)$$

である. ゆえに,  $T = 0 \text{ Nm}$  を表す外乱  $d_1$  は  $D_1(s) = -T_c(s)$  となり, 故障時の出力  $Y(s)$  は,

$$Y(s) = G_2(s)X_-(s) \quad (3.10)$$

となる.

さらに (3.6) 式より, 図 3.2 は図 3.3 のように書くことができる. ここで  $d'_1$  は, 図 3.2 の  $d_1$  の入力する箇所を変更した外乱であり,  $d'_1 = -D_{ref}^*$  である. 一方  $d_2$  は, (3.10) 式より故障時は  $X_-$  から  $y$  間の伝達関数  $G_{X_-}(s)$  が  $G_2(s)$  になることを表現する外乱であり,  $D_2(s) = C_1(s)G_1(s)X_-(s)$  である.

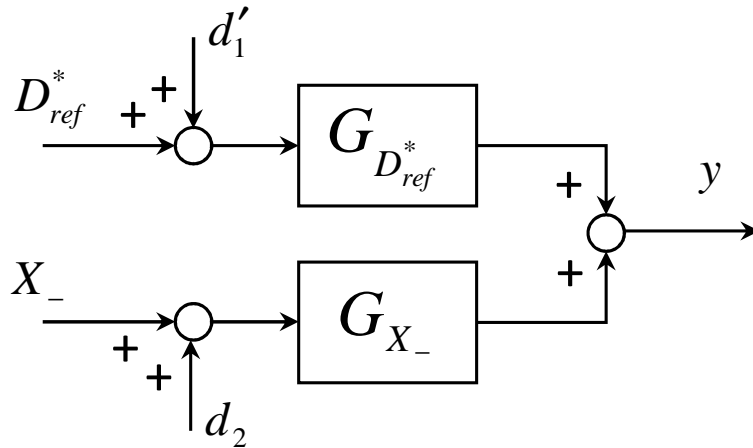


図 3.3 図 3.2 と等価なブロック線図

### 3.2.4 耐故障制御系設計

図 3.4 に示すように, 図 3.3 の入力  $X_-$  に新たな入力  $\hat{d}$  を加え, 外乱  $d'_1$ ,  $d_2$  を打ち消す外乱抑圧問題を考える.

図 3.4 において, 出力  $Y(s)$  は外乱の影響を受けるため,

$$Y(s) = G_{D_{ref}^*}(s)D_{ref}^* + G_{X_-}(s)X_-(s) + \underline{G_{D_{ref}^*}(s)D'_1(s) + G_{X_-}(s)D_2(s)} \quad (3.11)$$

となる. つぎに,  $\hat{D}(s)$  入力で (3.11) 式の下線部の外乱項を打ち消すことを考えると,  $X_-(s) = -\hat{D}(s)$  の関係から,

$$\hat{D}(s) = \hat{G}_{X_-}^{-1}(s) \{G_{D_{ref}^*}(s)D'_1(s) + G_{X_-}(s)D_2(s)\} \quad (3.12)$$

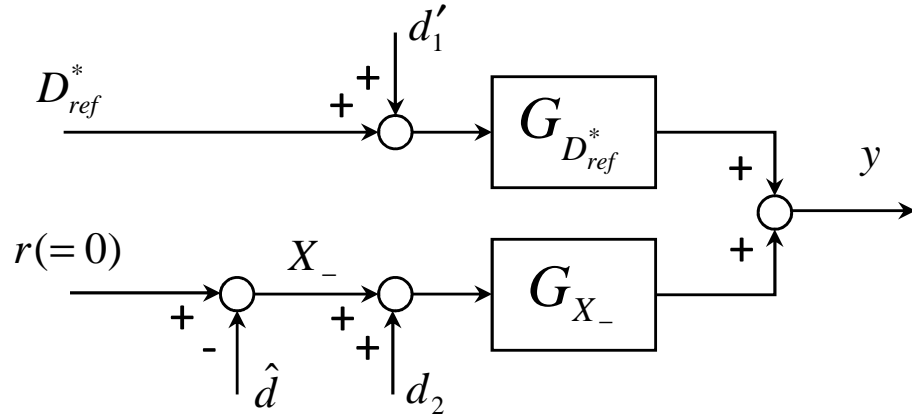


図 3.4 外乱抑圧問題

となるような  $\hat{D}(s)$  を出力する制御器を設計すればよいことがわかる. (3.11), (3.12) 式から,

$$\hat{D}(s) = \hat{G}_{X_-}^{-1}(s) \left\{ Y(s) - \hat{G}_{D_{ref}^*}(s) D_{ref}^* \right\} - X_-(s) \quad (3.13)$$

となる. さらに,  $\hat{G}_{X_-}^{-1}(s)$  は一般的に分子の次数が分母の次数以上になるため, プロパにするための伝達関数 (Low pass filter など)  $L_{p2}(s)$  を用いて,

$$\hat{D}(s) = L_{p2}(s) \left[ \hat{G}_{X_-}^{-1}(s) \left\{ Y(s) - \hat{G}_{D_{ref}^*}(s) D_{ref}^* \right\} - X_-(s) \right] \quad (3.14)$$

となり, 耐故障制御系は図 3.5 のようになる. ただし, 実制御対象の伝達関数と区別するため, モデルには  $\hat{\cdot}$  を付加していることに注意する.

図 3.5 において出力  $Y(s)$  は,

$$\begin{aligned} Y(s) = & \{1 - L_{p2}(s)\} \frac{\{G_{D_{ref}^*}(s) D_{ref}^* + G_{D_{ref}^*}(s) D_1'(s) + G_{X_-}(s) D_2(s)\}}{1 - L_{p2}(s) + L_{p2}(s) G_{X_-}(s) \hat{G}_{X_-}^{-1}(s)} \\ & + \frac{L_{p2}(s) G_{X_-}(s) \hat{G}_{X_-}^{-1}(s) \hat{G}_{D_{ref}^*}(s) D_{ref}^*}{1 - L_{p2}(s) + L_{p2}(s) G_{X_-}(s) \hat{G}_{X_-}^{-1}(s)} \end{aligned} \quad (3.15)$$

となる. ここで, 低周波領域で  $L_{p2}(s) \rightarrow 1$  となった場合を考えると, (3.15) 式の第 1 項は 0, 第 2 項は  $\hat{G}_{D_{ref}^*}(s) D_{ref}^*$  となり, モデル化誤差の有無や外乱信号の形態にかかわらず, 完全に外乱項, すなわち故障の影響が除去できることがわかる.

また, 3.2.3 項で述べたとおり「 $T = 0 \text{ Nm}$  となる故障」は, 図 3.5 の耐故障制御系で外乱  $D_1'(s) = -D_{ref}^*$ ,  $D_2(s) = C_1(s) G_1(s) X_-(s)$  が加わった場合に相当するので, この関係を (3.15) 式に代入し, 故障発生時の目標値  $D_{ref}^*$  と出力  $Y(s)$  との関係を求めると, 以下のようになる.

$$Y(s) = \tilde{L}_{p2}'(s) \hat{G}_{D_{ref}^*}(s) D_{ref}^* \quad (3.16)$$

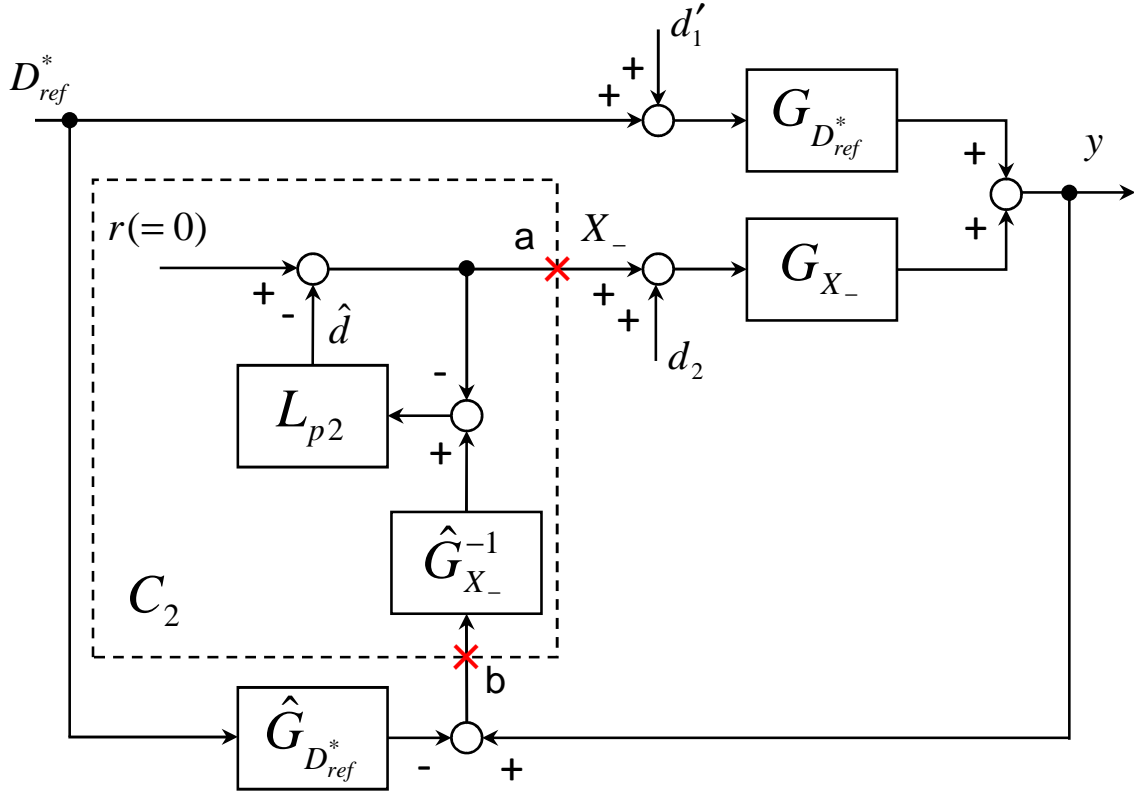


図 3.5 耐故障制御系

ただし,  $\tilde{L}'_{p2}(s)$  は,

$$L'_{p2}(s) = \frac{1 + C_1(s)G_1(s)}{1 + C_1(s)G_1(s)L_{p2}(s)} L_{p2}(s) \quad (3.17)$$

を用いて,

$$\tilde{L}'_{p2}(s) = \frac{G_{X_-}(s)\hat{G}_{X_-}^{-1}(s)L'_{p2}(s)}{1 - \{1 - G_{X_-}(s)\hat{G}_{X_-}^{-1}(s)\}L'_{p2}(s)} \quad (3.18)$$

と与えられる. なお (3.16) 式の導出に際しては, 図 3.5 から導かれる,

$$X_-(s) = -L_{p2}(s) \left[ \hat{G}_{X_-}^{-1}(s) \left\{ Y(s) - \hat{G}_{D_{ref}^*}(s)D_{ref}^* \right\} - X_-(s) \right] \quad (3.19)$$

から得られる  $X_-(s)$  を用いた.

(3.16) 式において, モデルと制御対象が一致, すなわち  $\hat{G}_{X_-}(s) = G_{X_-}(s)$  の場合は,

$$Y(s) = L'_{p2}(s)\hat{G}_{D_{ref}^*}(s)D_{ref}^* \quad (3.20)$$

となる. (3.17) 式は, 「 $L_{p2}(s)$  が Low pass filter の特性をもてば,  $L'_{p2}(s)$  も Low pass filter の特性をもつ」ことを意味するので, (3.20) 式より, 出力  $Y(s)$  は低周波領域で理想の目標値追従特性をもつことがわかる.

さらに, (3.18) 式から,

$$\tilde{L}'_{p2}(s) - L'_{p2}(s) = \frac{\{1 - G_{X-}(s)\hat{G}_{X-}^{-1}(s)\}\{L'_{p2}(s) - 1\}}{1 - \{1 - G_{X-}(s)\hat{G}_{X-}^{-1}(s)\}L'_{p2}(s)}L'_{p2}(s) \quad (3.21)$$

であり,  $L'_{p2}(s) \rightarrow 1$  となる低周波領域では  $\tilde{L}'_{p2}(s) - L'_{p2}(s) = 0$  の関係があるので, モデルと制御対象が一致しない, すなわち  $\hat{G}_{X-}(s) \neq G_{X-}(s)$  の場合でも, (3.16) 式の出力  $Y(s)$  は低周波領域で理想の目標値追従特性をもつことがわかる.

以上の解析結果を踏まえ, 制御器の設計方法について説明する. はじめに, 故障発生時の目標値追従特性を示す (3.17) 式の  $L'_{p2}(s)$  として, 所望の性能をもつ 1 次遅れ系の Low pass filter を選択する (3.2.2 項の要件 (2) に相当). この  $L'_{p2}(s)$  を用いて,  $L_{p2}(s)$  を以下の式で決定する.

$$L_{p2}(s) = \frac{L'_{p2}(s)}{1 + \{1 - L'_{p2}(s)\}C_1(s)\hat{G}_1(s)} \quad (3.22)$$

ここで, 制御器設計時には実制御対象  $G_1(s)$  は不明であるため, モデル  $\hat{G}_1(s)$  を用いている点に注意する. また,  $L'_{p2}(s)$  として 1 次遅れ系の Low pass filter を選択したが, その理由は, (3.22) 式より  $L_{p2}(s)$  の相対次数 =  $L'_{p2}(s)$  の相対次数であり,  $\hat{G}_{X-}(s)$  の相対次数は 1 であることから,  $L'_{p2}(s)$  として 1 次遅れ系を選択しておけば, 常に  $L_{p2}(s)\hat{G}_{X-}^{-1}(s)$  をプロバにすることが可能なためである. なお  $L'_{p2}(s)$  は, 全域通過に近い特性から徐々に周波数帯域を絞っていき, 所望の目標値追従性能が得られ, かつ (3.22) 式の  $L_{p2}(s)$  が Low pass filter となる時定数を選択して決定する.

以上の手順で設計した (3.22) 式の  $L_{p2}(s)$  を (3.16) 式へ代入すると,

$$Y(s) = \hat{\tilde{L}}'_{p2}(s)\hat{G}_{D_{ref}^*}(s)D_{ref}^* \quad (3.23)$$

を得る. ここで,

$$\hat{\tilde{L}}'_{p2}(s) = \frac{G_{X-}(s)\hat{G}_{X-}^{-1}(s)L'_{p2}(s)}{\frac{1 + C_1(s)\hat{G}_1(s)}{1 + C_1(s)G_1(s)} - \left\{ \frac{1 + C_1(s)\hat{G}_1(s)}{1 + C_1(s)G_1(s)} - G_{X-}(s)\hat{G}_{X-}^{-1}(s) \right\}L'_{p2}(s)} \quad (3.24)$$

である.  $\hat{G}_1(s) = G_1(s)$  の場合には  $\hat{\tilde{L}}'_{p2}(s) = \tilde{L}'_{p2}(s)$  となるので, (3.23) 式は (3.16) 式と一致する. また,  $\hat{G}_1(s) = G_1(s)$  および  $\hat{G}_{X-}(s) = G_{X-}(s)$  の場合には,  $\hat{\tilde{L}}'_{p2}(s) = \tilde{L}'_{p2}(s) = L'_{p2}(s)$  となるので, (3.23) 式は (3.20) 式と一致することになる. もちろん, モデルと制御対象が一致しない場合でも,  $L'_{p2}(s) \rightarrow 1$  となる低周波領域では  $\hat{\tilde{L}}'_{p2}(s) \rightarrow 1$  となるので, (3.23) 式の出力  $Y(s)$  は低周波領域で理想の目標値追従特性をもち, 定常特性にはモデル化誤差が影響しない.

上記議論では、 $X_-$  の制御可能領域は  $T_c$  と等価であることを前提にしてきたが、実際は  $T_c$  よりも劣る。よって、本手法を用いても  $T_c$  が正常時に実現していた操舵性能は維持できなくなる。ゆえに、故障時に要求される制御性能を見極め、その性能が  $X_-$  で実現可能かどうかを事前に検討する必要がある。

### 3.2.5 安定性に対する考察

つぎに、図 3.5 に示した耐故障制御系の安定性について考察する。安定性に対する要件は、3.2.2 項要件 (3) より「故障発生前後の制御系を同時に内部安定化すること」であるといえる。本要件を達成するために制御器に求められる条件を導出する。

#### (1) ノミナル安定性

はじめに、故障発生前の制御系を内部安定化する制御器を考える。図 3.5 の  $D_{ref}^*$  および  $a$  点から  $b$  点の伝達関数を求めると、

$$b = -\left\{\hat{G}_{D_{ref}^*}(s) - G_{D_{ref}^*}(s)\right\}D_{ref}^* + G_{X_-}(s)a \quad (3.25)$$

となるため、図 3.5 は図 3.6 と等価である。ここで  $C_2(s)$  は、図 3.5 の点線で囲まれた部分であり、

$$C_2(s) = -\frac{L_{p2}(s)}{1 - L_{p2}(s)}\hat{G}_{X_-}^{-1}(s) = -\frac{L'_{p2}(s)}{1 - L'_{p2}(s)}\hat{G}_2^{-1}(s) \quad (3.26)$$

である。また、上記制御系を内部安定化する  $C_2(s)$  は、 $G_{X_-}(s)$  が安定であるため、

$$C_2(s) = \frac{-Q_{nml}(s)}{1 - G_{X_-}(s)Q_{nml}(s)} \quad (3.27)$$

と書くことができる。ただし、 $Q_{nml}(s)$  は任意の安定な伝達関数である。

つぎに、故障発生後の制御系を内部安定化する制御器を考える。故障発生後、図 3.5 で  $G_{D_{ref}^*}(s) = 0$  となると考えると、図 3.7 となる。故障発生前と同様に、上記制御系を内部安

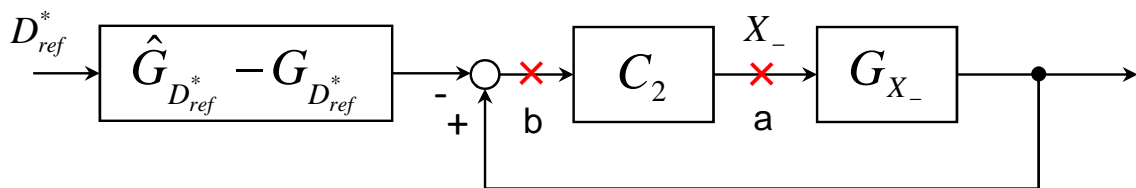


図 3.6 故障発生前の耐故障制御系



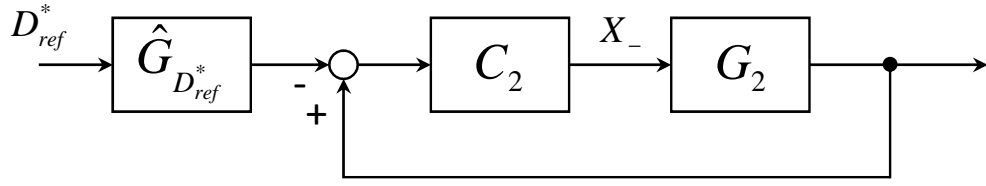


図 3.7 故障発生後の耐故障制御系

定化する  $C_2(s)$  は  $G_2(s)$  が安定であるため、

$$C_2(s) = \frac{-Q_{tbl}(s)}{1 - G_2(s)Q_{tbl}(s)} \quad (3.28)$$

と書くことができる．ただし、 $Q_{tbl}(s)$  は任意の安定な伝達関数である．

以上より、(3.27)、(3.28) 式が等しくなる安定な伝達関数  $Q_{nml}(s)$ 、 $Q_{tbl}(s)$  が存在すれば、 $C_2(s)$  は故障発生前後の制御系を同時に内部安定化することができる．(3.26) 式からわかるように、 $C_2(s)$  の要素  $\hat{G}_{X_-}(s)$  は制御系から決まるため、適切な Low pass filter  $L_{p2}(s)$  を選ぶことで内部安定化を達成することとなる．(3.26)、(3.27) 式より  $L_{p2}(s)$  と  $Q_{nml}(s)$  の関係は以下のようなになる．

$$L_{p2}(s) = \hat{G}_{X_-}(s)Q_{nml}(s) \quad (3.29)$$

(3.29) 式において、

$$\hat{G}_{X_-}(s) = \frac{\hat{G}_2(s)}{1 + \hat{G}_1(s)C_1(s)}$$

であり、分母にある Steer-by-Wire の制御器  $C_1(s)$  は、ステップ入力へ偏差なく追従するために積分器を有することから、 $\hat{G}_{X_-}(s)$  は  $s = 0$  に零点をもつ． $Q_{nml}(s)$  は安定な伝達関数であることが条件であるため  $\hat{G}_{X_-}(s)$  の零点  $s = 0$  を相殺することができない．ゆえに、 $L_{p2}(s)$  が  $s = 0$  に零点をもつこととなり Low pass filter とすることができないため、 $C_1(s)$  に含まれる積分器を以下の形にする必要がある．

$$\frac{1}{s + \varepsilon} \quad (0 < \varepsilon \ll 1) \quad (3.30)$$

(3.30) 式の形にすれば、 $\hat{G}_{X_-}(s)$  の零点は  $s = -\varepsilon$  となり、 $Q_{nml}(s)$  の極で相殺することが可能なため、 $L_{p2}(s)$  を Low pass filter とすることができる．

## (2) 入力飽和発生時のノミナル安定性

前述したノミナル安定性は、 $X_-$  が飽和しないことが前提である．しかし 3.2.4 項で述べたとおり、 $T_c$  と  $X_-$  の制御可能領域の相違から  $X_-$  が飽和する場合が考えられるため、安定性について考察する．

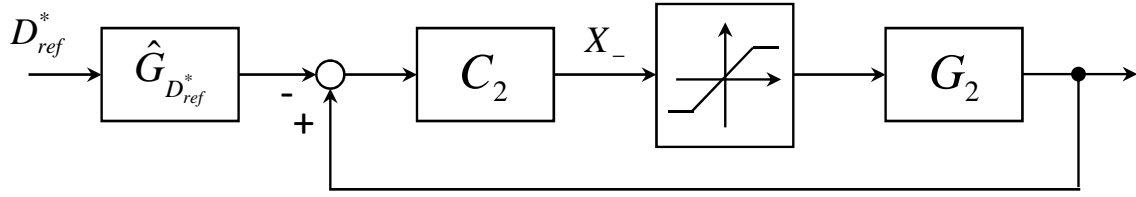
図 3.8  $X_-$  の飽和を考慮した耐故障制御系

図 3.7 において,  $X_-$  が飽和すると考えると図 3.8 のようになる. ここで, 飽和要素は,

$$f(X_-) = \begin{cases} X_- & (|X_-| \leq S) \\ S \operatorname{sgn}(X_-) & (|X_-| > S) \end{cases} \quad (3.31)$$

であり,  $S(> 0)$  は飽和時の上限値である.

図 3.8 の「飽和要素」のような非線形要素を含む制御系の安定判別法の 1 つである円板定理 [59] の適用を考える. 飽和要素以外の線形部は  $C_2(s)G_2(s)$  であり, (3.26) 式の  $L'_{p2}(s)$  を

$$L'_{p2}(s) = \frac{1}{T_{L'_{p2}}s + 1} \quad (T_{L'_{p2}} > 0) \quad (3.32)$$

とすると,

$$C_2(s)G_2(s) = -\frac{1}{T_{L'_{p2}}s} \quad (3.33)$$

となる. (3.33) 式からわかるように, 線形部は原点に極をもち「線形部が漸近安定である」という円板定理の前提条件を満たさない. 一方, ゲインフィードバックによる安定化後に適用した場合も, 線形部のナイキスト線図の一部が円に接するために安定判別できない. よって, リアプノフの安定判別法の適用を考える.

(3.31), (3.33) 式より,

$$\dot{X}_- = -\frac{f(X_-)}{T_{L'_{p2}}} \quad (3.34)$$

となり, リアプノフ関数を  $V_L = X_-^2$  とすると, (3.34) 式の解軌道に沿った時間微分は,

$$\dot{V}_L = 2X_- \dot{X}_- = -2X_- \frac{f(X_-)}{T_{L'_{p2}}} \quad (3.35)$$

となる. (3.31) 式より (3.35) 式の符号を考えると,

(i)  $|X_-| \leq S$  の場合

$$X_- = 0 \text{ 以外では, } \dot{V}_L = -2 \frac{X_-^2}{T_{L'_{p2}}} < 0$$

(ii)  $|X_-| > S$  の場合

$$\dot{V}_L = -2X_- \frac{S \operatorname{sgn}(X_-)}{T_{L'_{p2}}} < 0$$

となり、 $X_- = 0$  以外では常に  $\dot{V}_L < 0$  であるため、図 3.8 の制御系は漸近安定であるといえる。よって、故障発生後の耐故障制御系において入力飽和が発生した場合も漸近安定性が保証される。

### (3) ロバスト安定性

3.2.1 項で導出した制御対象に対して、(3.36) 式に示す乗法的な不確かさを付加し、ロバスト安定性について考察する。

$$\begin{bmatrix} G_1(s) & G_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{G}_1(s) & \hat{G}_2(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} + W(s)\Delta(s) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

ここで、

$$\Delta(s) = \begin{bmatrix} \delta_1(s) & 0 \\ 0 & \delta_2(s) \end{bmatrix}, \|\delta_1(s)\|_\infty \leq 1, \|\delta_2(s)\|_\infty \leq 1$$

$$W(s) = \begin{bmatrix} w_1(s) & 0 \\ 0 & w_2(s) \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

である。

はじめに、故障発生前の制御系において不確かさを考慮すると、図 3.5 の耐故障制御系は図 3.9 のように書くことができる。図 3.9 において、 $a$  点から  $b$  点までの伝達関数を求めると、

$$G_{ab}(s) = \frac{1}{1 + C_1(s)\hat{G}_1(s) - C_2(s)\hat{G}_2(s)} \begin{bmatrix} -C_1(s)\hat{G}_1(s)w_1(s) & -C_1(s)\hat{G}_2(s)w_2(s) \\ C_2(s)\hat{G}_1(s)w_1(s) & C_2(s)\hat{G}_2(s)w_2(s) \end{bmatrix}$$

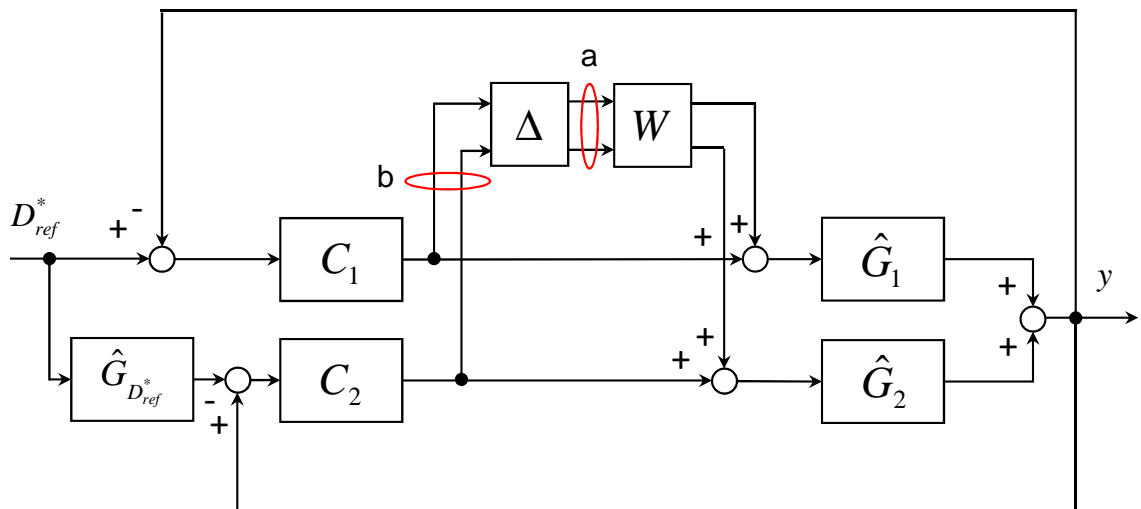


図 3.9 乗法的な不確かさを考慮した故障発生前の耐故障制御系

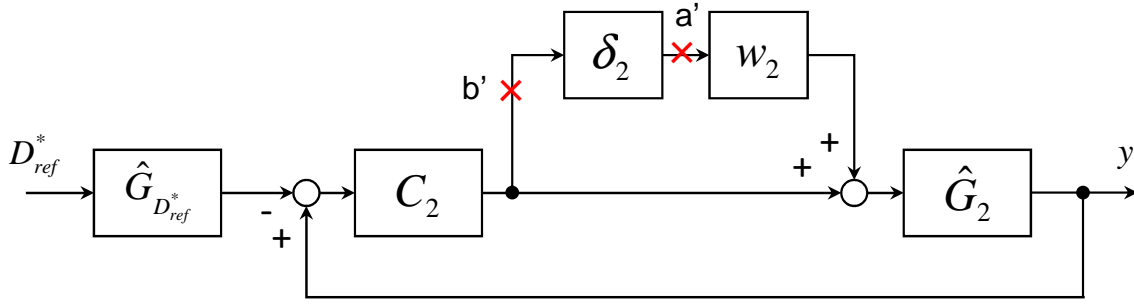


図 3.10 乗法的な不確かさを考慮した故障発生後の耐故障制御系

となる．ゆえに小ゲイン定理より， $\mu(G_{ab}) < 1$  であればロバスト安定であるといえる．ここで， $\mu$  は構造化特異値を表す．

つぎに，故障発生後の制御系において不確かさを考慮すると，図 3.5 の耐故障制御系は図 3.10 のように書くことができる．図 3.10 において， $a'$  点から  $b'$  点までの伝達関数を求めると，

$$G_{a'b'}(s) = \frac{C_2(s)\hat{G}_2(s)}{1 - C_2(s)\hat{G}_2(s)} w_2(s) \quad (3.38)$$

である．ゆえに小ゲイン定理より， $\|G_{a'b'}\|_\infty < 1$  であればロバスト安定であるといえる．

#### (4) 入力飽和発生時のロバスト安定性

つぎに，入力飽和発生時のロバスト安定性について考察する．(3.31) 式の飽和要素に対し，図 3.11 に示すような  $\kappa_{\max}$  と  $\kappa_{\min}$  (ただし， $\kappa_{\max} > \kappa_{\min}$ ) の傾きをもつ 2 つの直線で囲まれたセクタ領域を考え，セクタ領域に対する安定性判別問題に帰着させて考える．ここで  $X_{\max}$ ， $X_{\min}$  は，摩擦円から決定される  $X_-$  の最大，最小値であり， $\kappa_{\max}$ ， $\kappa_{\min}$  は， $X_{\min} \leq X_- \leq X_{\max}$  に対するすべての  $f$  を包含するように決定する必要がある．なお， $\kappa_{\min} = 0$  とした場合は，上記領域とは関係なくすべての  $X_-$  に対する安定性判別を意味する．

図 3.11 のセクタ領域は，以下の  $\kappa_{\text{nom}}$ ， $w_s$ ， $\delta_s$  を用いて，

$$\kappa_{\text{nom}} = \frac{\kappa_{\max} + \kappa_{\min}}{2}, w_s = \frac{\kappa_{\max} - \kappa_{\min}}{2}, |\delta_s| \leq 1$$

$$f = (\kappa_{\text{nom}} + w_s \delta_s) X_- \quad (3.39)$$

と定義できるため，図 3.12 の点線部に示すように不確かさとして表現し，ロバスト安定性判別を行う．なお， $\delta_s$  は実数変動であることに注意する．

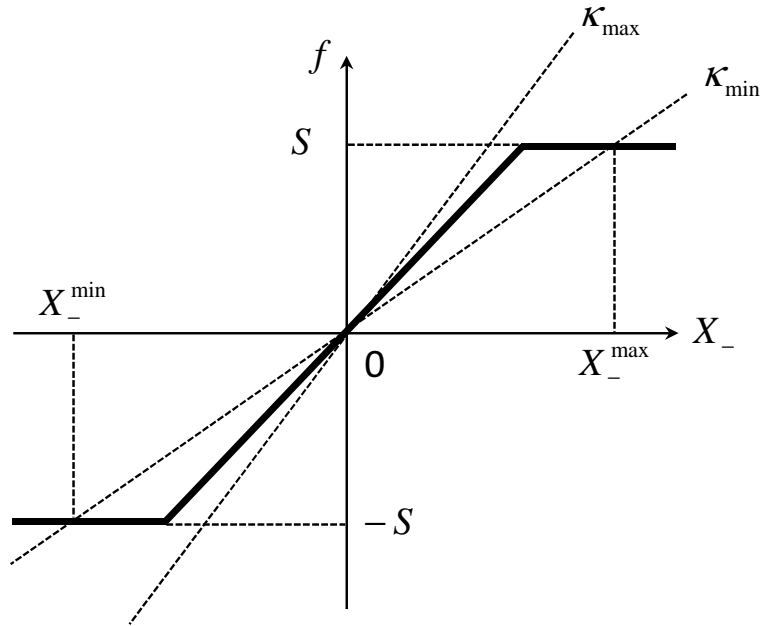
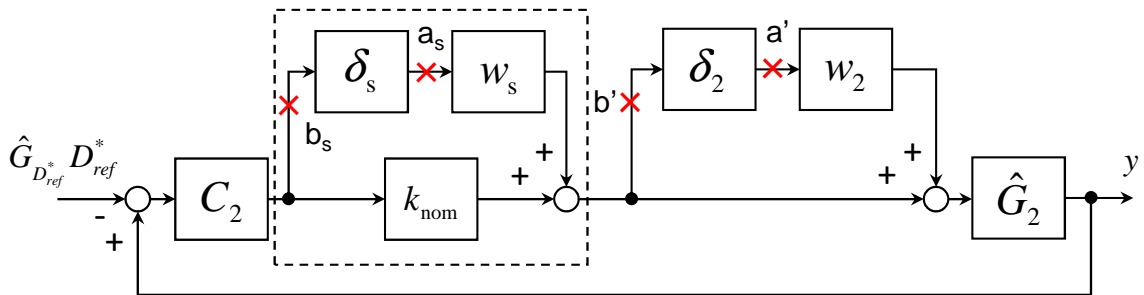


図 3.11 セクタ領域

図 3.12 乗法的不確かさを含む  $X_-$  の飽和を考慮した耐故障制御系

ここで、 $a'$ 、 $a_s$  点から  $b'$ 、 $b_s$  点までの伝達関数を求めると、

$$G_{a_s b_s}(s) = \frac{1}{1 - \kappa_{\text{nom}} C_2(s) \hat{G}_2(s)} \begin{bmatrix} \kappa_{\text{nom}} C_2(s) \hat{G}_2(s) w_2(s) & w_s \\ C_2(s) \hat{G}_2(s) w_2(s) & C_2(s) \hat{G}_2(s) w_s \end{bmatrix}$$

となるため、小ゲイン定理より、 $\mu(G_{a_s b_s}) < 1$  であればロバスト安定であるといえる。

### 3.3 評価結果

表 2.2 に示すパラメータをもつ車両に対し、3.2 節に示した設計法を適用して制御効果を検証する。なお、シミュレーションでは、プラントとして (2.5), (2.6) 式に代わり非線形タイヤモデル (2.7), (2.8) 式を用いた。(2.7), (2.8) 式中のパラメータ  $k_f$ ,  $k_r$  は、走行する路面の摩擦係数に対応した係数であり、シミュレーションでは、乾燥路は  $k_f = 9$ ,  $k_r = 15$ , 凍結路は  $k_f = 25$ ,  $k_r = 60$  とした [45]。

### 3.3.1 耐故障制御系設計

はじめに，故障発生前の制御対象に対する制御器を設計するにあたり，(3.1) 式の状態方程式に積分器を加えた以下の拡大系を考える．

$$\begin{aligned}\dot{x}_e &= A_e x_e + B_e u \\ z &= C_e x_e \\ x_e &= \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}, u = T_c, \dot{z} = e = D_{ref}^* - y \\ A_e &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix}, C_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{3.40}$$

(3.40) 式の拡大系に対し， $A_e$ ， $B_e$  より状態フィードバックゲイン  $F_e$  を求め， $A_e$ ， $C_e$  よりオブザーバゲイン  $G_e$  を求めると，制御器  $C_1(s)$  の状態空間表現は，

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_e &= (A_e - G_e C_e - B_e F_e) \hat{x}_e + G_e z \\ u &= -F_e \hat{x}_e\end{aligned}\tag{3.41}$$

となる．ここで  $F_e$  は，状態と入力の重み行列をそれぞれ  $Q_{F_e} = 10^4 I_{5 \times 5}$ ， $R_{F_e} = 1$  とし，最適レギュレータ問題を解くことで算出した．また  $G_e$  は，システム雑音と観測雑音の共分散行列をそれぞれ  $V_{G_e} = 10^6 I_{5 \times 5}$ ， $W_{G_e} = 1$  とし，カルマンフィルタ問題を解くことで算出した．

(3.41) 式に含まれる積分器を，

$$\frac{1}{s + 0.0001}$$

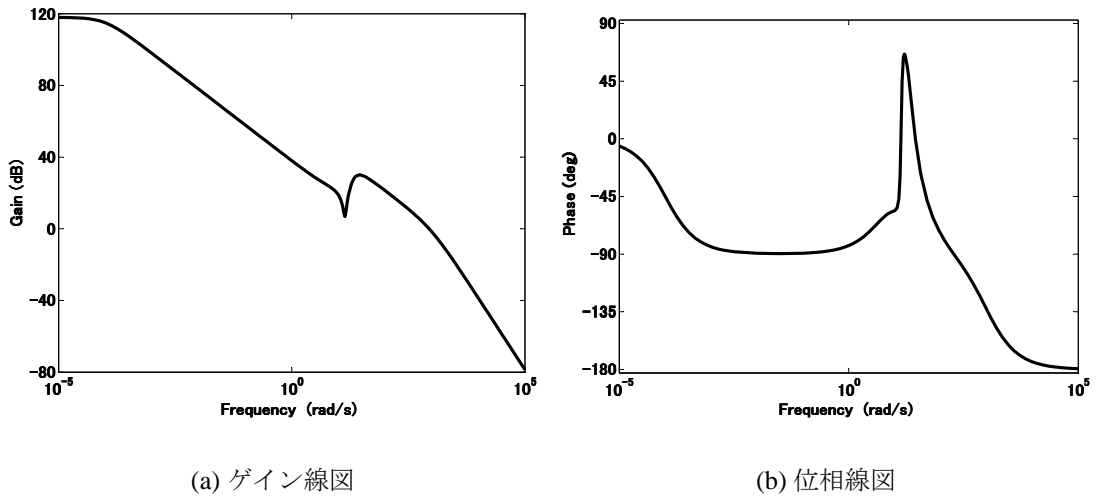
とすると，制御器  $C_1(s)$  は，

$$C_1(s) = \frac{1181767.7149(s + 13.25)(s + 6.78)(s + 0.7855 \pm 13.8269i)}{(s + 999.9)(s + 0.0001)(s + 20.455 \pm 11.4496i)(s + 8.95 \pm 19.7103i)}\tag{3.42}$$

となり，図 3.13 に示す周波数特性をもつ．

つぎに，Low pass filter  $L'_{p2}(s)$  を，

$$L'_{p2}(s) = \frac{1}{0.1s + 1}\tag{3.43}$$

図 3.13  $C_1(s)$  のボード線図

と定義すると,  $L_{p2}(s)$  は,

$$\begin{aligned}
 L_{p2}(s) = & 10(s + 0.0001)(s + 5.853)(s + 13.76) \\
 & (s + 20.455 \pm 11.4496i)(s + 4.1265 \pm 15.3418i) \\
 & (s + 8.95 \pm 19.7103i) / \\
 & (s + 6.227)(s + 11.92)(s + 14.38)(s + 8.432 \times 10^{-5}) \\
 & (s + 20.66 \pm 13.5891i)(s + 4.967 \pm 14.2278i) \\
 & (s + 6.45 \pm 19.4216i)
 \end{aligned} \tag{3.44}$$

となり, 図 3.14 のボード線図から  $L_{p2}(s)$  が **Low pass filter** であることがわかる.

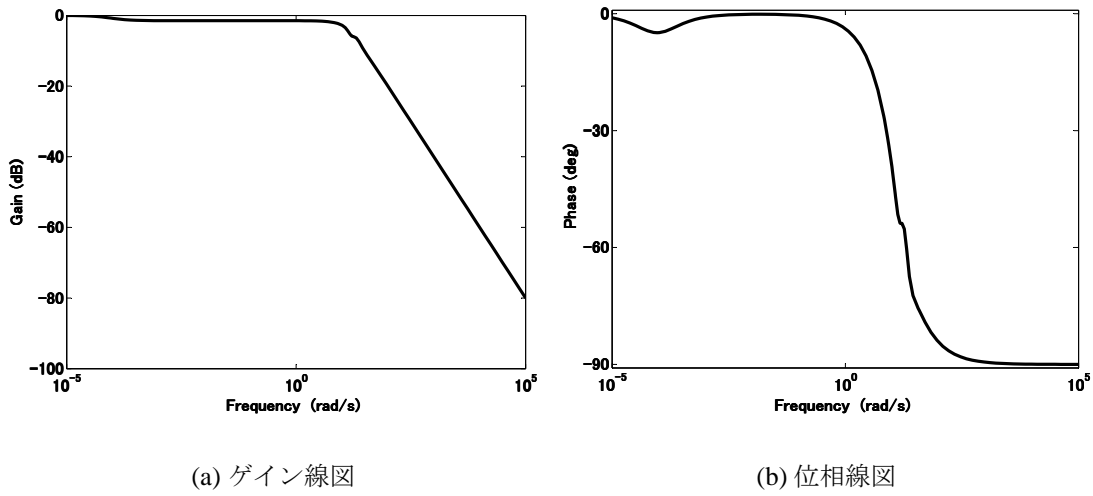
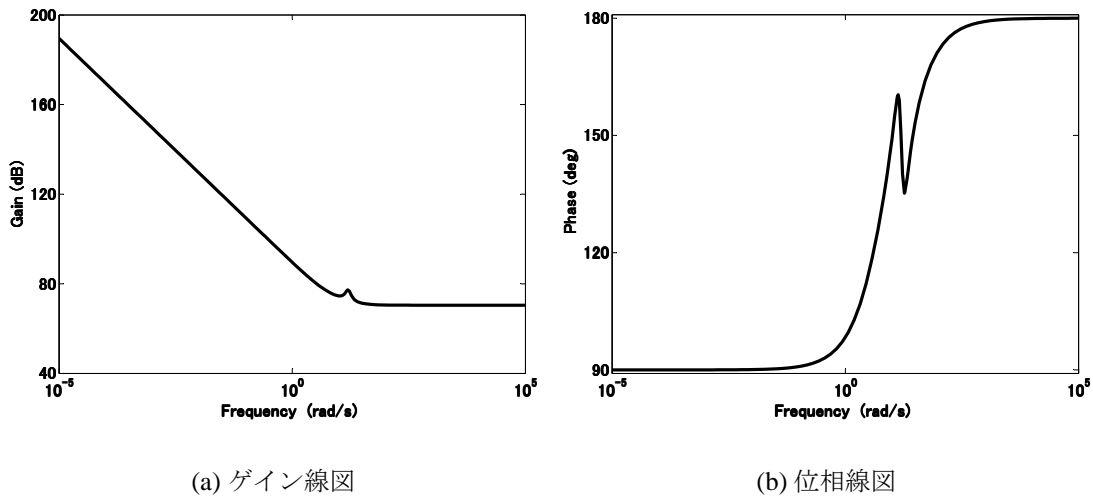
一方, 制御器  $C_2(s)$  は (3.43) 式の  $L'_{p2}(s)$  より,

$$C_2(s) = -3327.6758 \frac{(s + 13.76)(s + 5.853)(s + 4.1265 \pm 15.3418i)}{s(s + 9.023)(s + 2.3 \pm 15.6719i)} \tag{3.45}$$

となり, 図 3.15 に示す周波数特性をもつ.

また (3.27), (3.28) 式中の  $Q_{nml}(s)$ ,  $Q_{tbl}(s)$  の極を求めるとすべて負であるため, とともに漸近安定であることがいえる. よって, (3.45) 式の  $C_2(s)$  は故障発生前後の制御系を同時に内部安定化することがわかる.

つぎに, 直接計測が困難, または変動する可能性があるパラメータ  $m$ ,  $J$ ,  $J_s$ ,  $C_s$ ,  $K_f$ ,  $K_r$  に, 表 2.2 の値に対して  $\pm 20\%$  以内の不確かさが含まれているとした場合のロバスト安定性について考える. 不確かさを「非構造的な不確かさ」と捉えれば, すべての変動の組み

図 3.14  $L_{p2}(s)$  のボード線図図 3.15  $C_2(s)$  のボード線図

合わせに対し, (3.37) 式の  $w_1(s)$ ,  $w_2(s)$  は以下のように定義できる.

$$w_1(s) = \frac{1.6(s + 1.667)}{(s + 3.333)}, w_2(s) = \frac{1.2(s + 1.667)}{(s + 5.556)}$$

ここで,  $\mu(G_{ab})$  と  $\|G_{a'b'}\|_\infty$  を算出すると, ともに 1 未満であり故障前後でロバスト安定であることがわかる.

一方, 飽和発生時の場合は, 図 3.11 において  $\kappa_{\max} = 1$ ,  $\kappa_{\min} = 0$  とすると  $\mu(G_{a_sb_s}) < 1$  となる. よって  $X_-$  の領域に制限なく, 飽和発生時もロバスト安定性が保証されることがわかる.



### 3.3.2 シミュレーション結果

「定常円旋回中の故障発生」, 「故障発生後の路肩退避」の2つの例を挙げ, 制御効果の検証を行うとともに, パラメータ  $m$ ,  $J$ ,  $J_s$ ,  $C_s$ ,  $K_f$ ,  $K_r$  に表 2.2 の値に対して+10%の不確かさを与え, ロバスト安定性を有することも確認する. なお, 例に挙げた走行パターンで使用するタイヤスリップ角の範囲では,  $K_f$ ,  $K_r$  に+10%の不確かさを与えた非線形タイヤモデルのコーナリングフォース特性が, 制御器設計時に使用した線形モデルにおける  $K_f$ ,  $K_r$  の $\pm 20\%$ 変動領域に含まれるため, 3.3.1 項のロバスト安定性判別結果が適用可能であることに注意する.

#### (1) 定常円旋回中の故障発生

図 3.16 に示すように, シミュレーション開始後 20 s の時点で  $T = 0 \text{ Nm}$  となる故障を発生させ, 「耐故障制御系なし」, 「耐故障制御系あり」, 「凍結路による  $X_-$  の飽和発生時」の3つの挙動を比較する. なお, シミュレーションは 150 s 間実施しているが, 図 3.16~3.20 は, 変化がある故障発生前後 5 s 間の挙動を示しており, 点線は「耐故障制御系なし」, 実線は「耐故障制御系あり」, 破線は「凍結路による  $X_-$  の飽和発生時」を表している.

定常円旋回では横すべり角の時間変化がない ( $\dot{\beta} = 0$ ) ため, (2.11) 式の  $D^*$  は, (3.46) 式となり, 車速  $V$  と旋回半径  $R$  で決まる. よって,  $V = 10 \text{ m/s}$ ,  $R = 100 \text{ m}$  の定常円旋回時の目標値は,  $D_{ref}^* = 1$  となる.

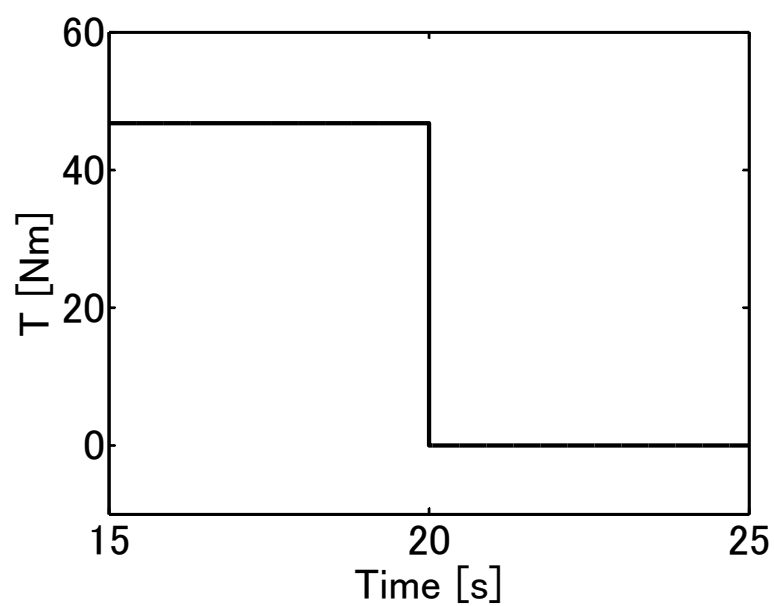
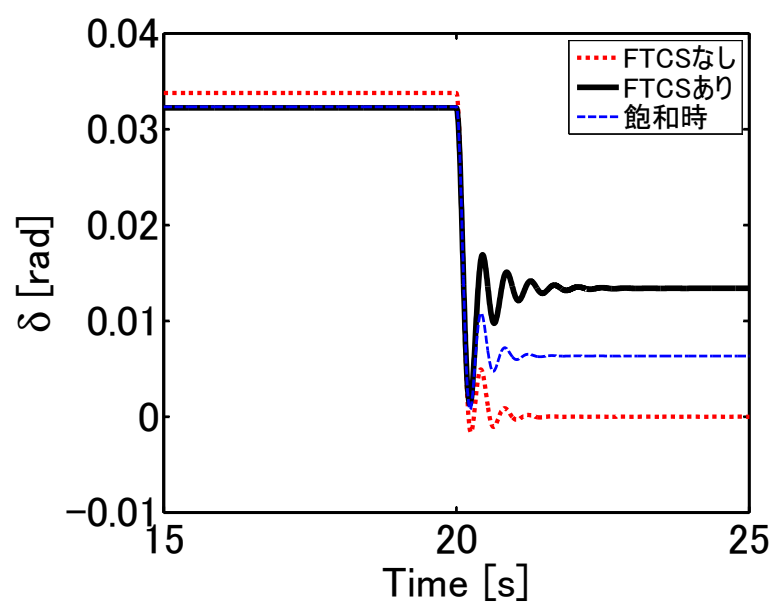
$$D_{ref}^* = V\gamma = \frac{V^2}{R} \quad (3.46)$$

前輪舵角  $\delta$  の挙動を図 3.17 に示す. 故障発生直後は舵が左右に振られるものの, 図 3.18 に示すように, セルフアライニングトルクが  $0 \text{ Nm}$  となる舵角で安定するようすがわかる.

$X_-$  の挙動を図 3.19 に示す. 故障発生後, 耐故障制御系ありの場合は, 車両挙動を維持するために必要な  $X_-$  が演算されていることがわかる. しかし, 凍結路の場合は, 最大摩擦力を超えるため飽和が発生する. ただし, タイヤ路面摩擦係数は, 乾燥路 0.9 に対し凍結路は 0.3 とした. なお, 故障発生前に  $X_- \neq 0$  となるのは, プラントにモデル化誤差を考慮したためである.

$D^*$  出力を図 3.20 に, X-Y 平面上の車両挙動を図 3.21 に示す. 図 3.21 において, ●印はスタート, ×印は故障発生地点を表す. 耐故障制御系ありの場合, 故障発生後も即  $D^* = 1$  に再度追従し, 定常円旋回が維持されていることがわかる. 凍結路の場合は, 飽和により  $D^* = 1$  を実現するための  $X_-$  が確保できないため定常偏差が生じてしまうが, 不安定に

なることはない．なお，本シミュレーション条件では横加速度が  $0.1G$  程度であるが，さらに横加速度を増した条件  $V = 30 \text{ m/s}$ ，巡回半径  $500 \text{ m}$  ( $0.18G$  相当) では，乾燥路においても駆動力飽和が発生する．ただし，凍結路と同様，定常偏差は生じるが不安定になることはない．駆動力飽和を回避するには，摩擦円という物理制約を軽減する必要があるため，前後輪で制駆動力差を発生させる，路面摩擦係数の高いタイヤに変更するなど車両側での対策も必要になる．

図 3.16 ステアリングモータトルク  $T$ 図 3.17 前輪舵角  $\delta$  (耐故障制御系 (Fault Tolerant Control System : FTCS) 有無, 飽和時の比較)

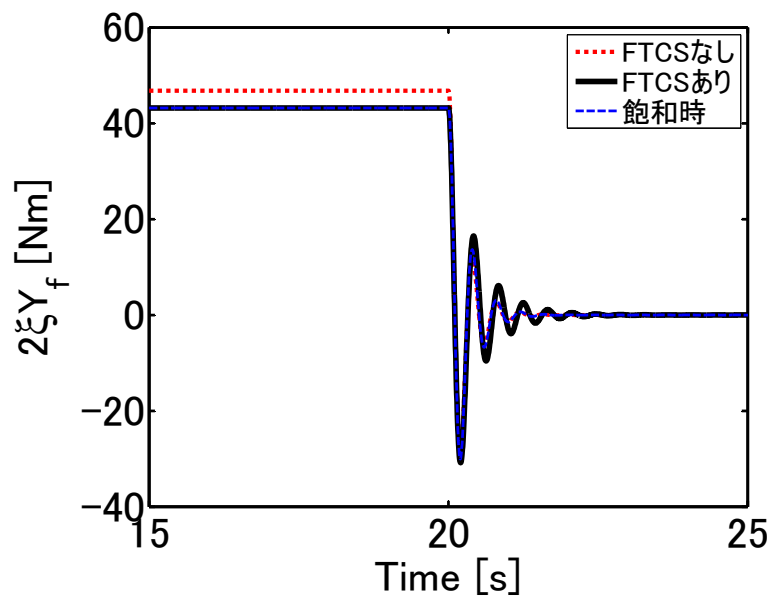


図 3.18 セルフアライニングトルク (FTCS 有無, 飽和時の比較)

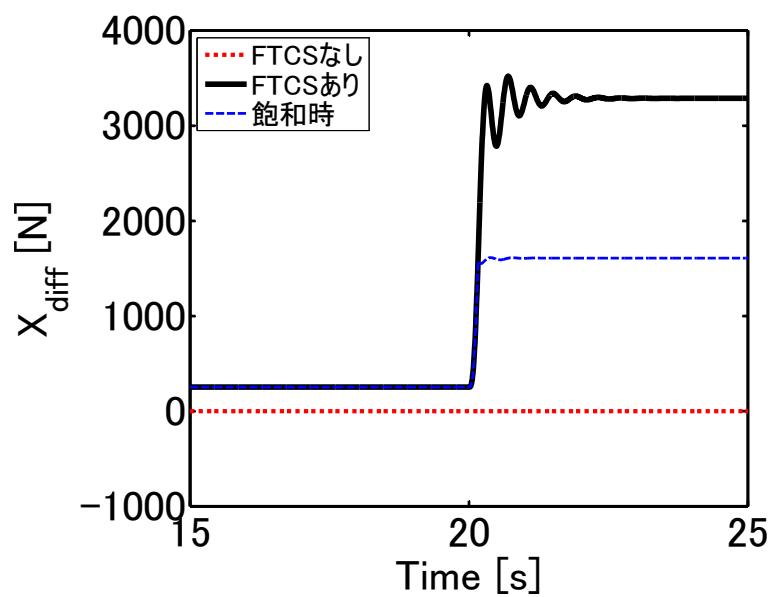


図 3.19 左右制駆動力差  $X_{diff}$  (FTCS 有無, 飽和時の比較)

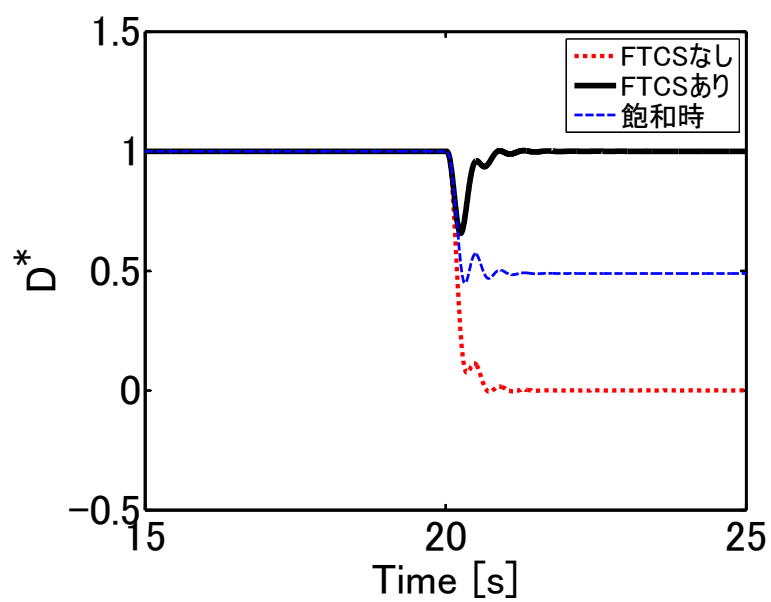
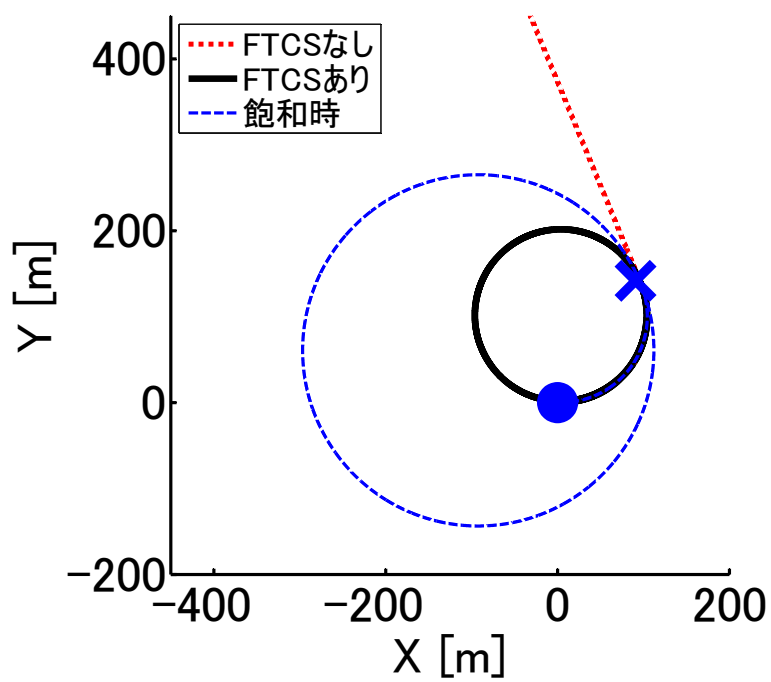
図 3.20  $D^*$  出力 (FTCS 有無, 飽和時の比較)

図 3.21 X-Y 平面上の車両挙動 (FTCS 有無, 飽和時の比較. “●”印はスタート地点, “×”印は故障発生地点を表す.)

## (2) 故障発生後の路肩退避

図 3.22 に示すように,  $a$  点で故障発生後, 50 m 直進を継続. その後,  $b$  点から退避を開始し  $c$  点で 2 m 路肩へ寄せる走行パターンを考える. 上記走行パターンを実現する  $D_{ref}^*$  は, 以下の式で与えられる<sup>1</sup>.

$$D_{ref}^* = \begin{cases} 0 & (-5 \leq t < 0) \\ 0.96t - 0.576t^2 + 0.0768t^3 & (0 \leq t < 5) \\ 0 & (5 \leq t) \end{cases} \quad (3.47)$$

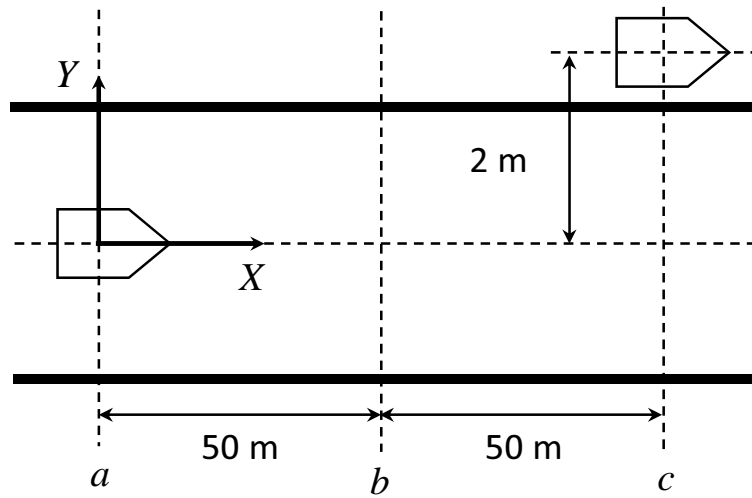
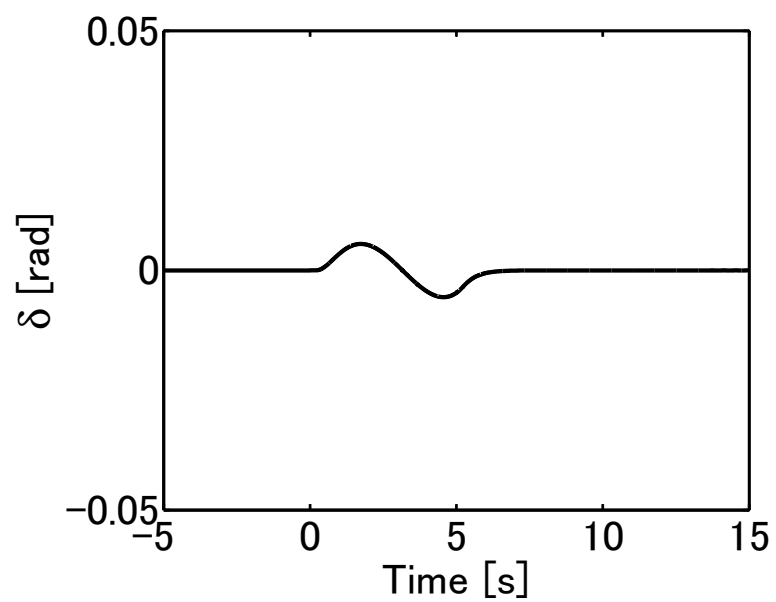
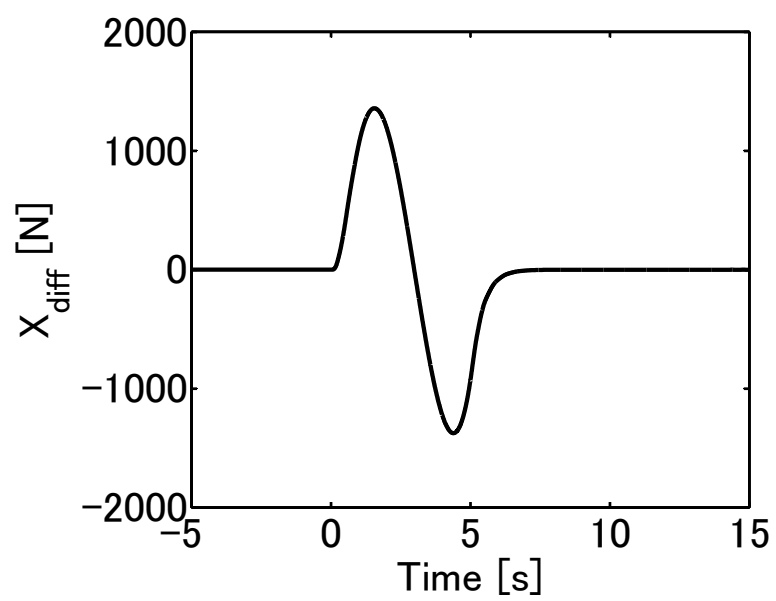


図 3.22 路肩退避シナリオ

図 3.23～3.26 に, シミュレーション結果を示す.  $X_-$  入力により, 図 3.22 に示した挙動を実現しているようすがわかる. また, 凍結路においても  $X_-$  の飽和が発生しないため, 乾燥路, 凍結路ともに図 3.26 の軌道を描く. さらに,  $b$  点から  $c$  点への退避動作中に減速 (たとえば,  $-0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ ) を伴う場合でも制御可能であることを確認した. なお, 図 3.22 の  $a$  点を  $(X, Y) = (0, 0)$ ,  $b$  点を  $t = 0$  としている.

<sup>1</sup>付録 A 参照

図 3.23 前輪舵角  $\delta$ 図 3.24 左右制駆動力差  $X_{\text{diff}}$

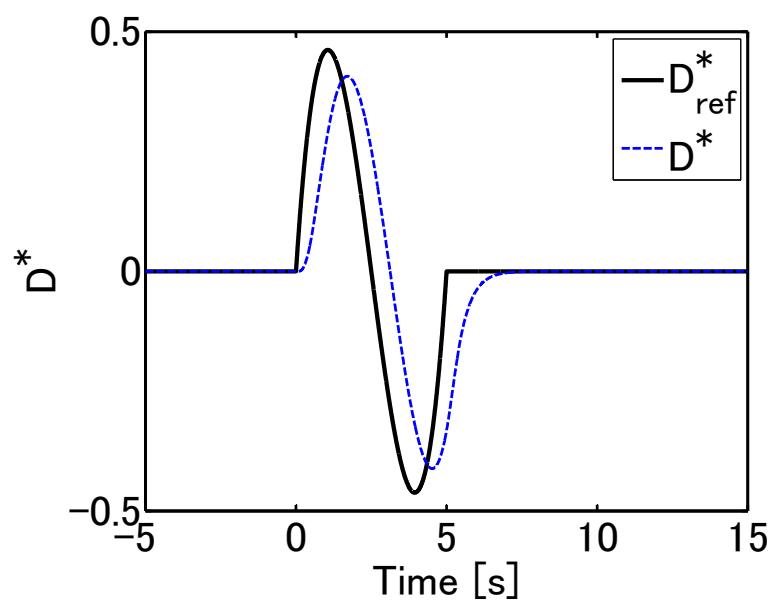
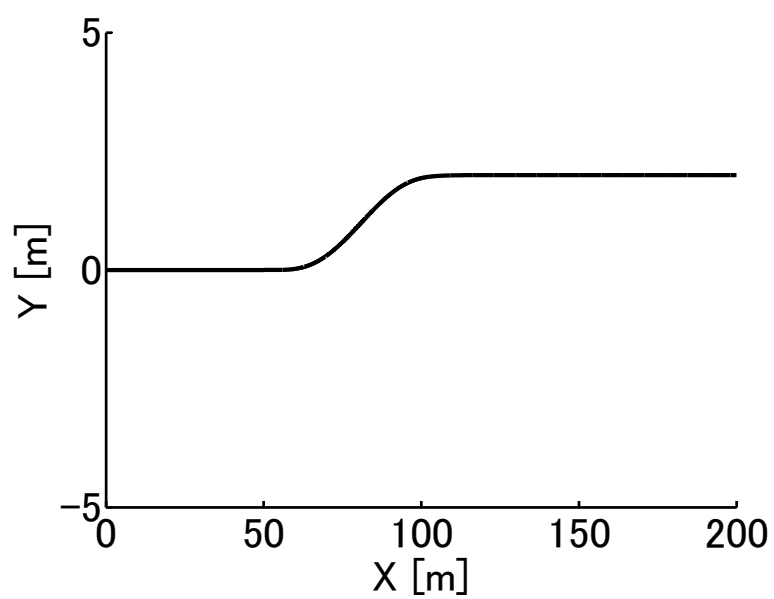
図 3.25  $D^*$  出力

図 3.26 X-Y 平面上の車両挙動



## 3.4 まとめ

本章では、Steer-by-Wire の安全設計においてバックアップ目的の新たなアクチュエータを追加せず、駆動系に潜在する冗長性を活用した耐故障制御系とその設計法を提案した。故障検出や制御器の切り替えを必要とせず、目標値と出力の偏差に応じて駆動系による補償が行われるため、迅速に制御を回復させることが可能である。ただし、駆動系で実現できる操舵性能は操舵系より劣るため、故障時の操舵性能を明確化し、その性能が制駆動力差で実現可能かどうかを事前に見極めることが重要である。

なお、本章で示した耐故障制御系は操舵系故障のみを想定しており、駆動系は常に正常であることを前提としている。そのため、 $D^*$  出力が参照モデルの出力と異なる要因は、モデル化誤差か操舵系の故障と捉え、駆動系で補償する構造となっている。たとえば片方の駆動輪に故障が発生し、左右輪間の駆動力差による意図せぬヨーモーメントが生じた場合、操舵系故障に起因するものと誤認識し、故障している駆動系に対してモーメントを打ち消すための左右制駆動力差を出力するよう指示する。その結果、正常駆動輪の駆動力が減少し、退避走行速度が維持できないという問題がある。何らかの対策が施されていない限り駆動系が常に正常である保証はなく、実用化を目指すには操舵系に加え、駆動系の故障も考慮した耐故障制御系が求められる。次章にて、両者の故障を考慮した耐故障制御系とその設計法について検討する。



## 第4章 操舵，駆動系両故障に対する耐故障制御系

### 4.1 概要

自動車の安全設計では，2箇所以上の同時故障は想定しないものの，すべての部位の単独故障に対する処置が必須であり，故障時においても「走る・曲がる・止まる」の基本機能を維持することが求められる．ゆえに，「曲がる」を担う操舵系と，「走る・止まる」を担う制駆動系に対する安全設計が必須であり，適切なコストかつ，互いに悪影響を及ぼすことなく共存させなければならない．

従来，X-by-Wireの安全設計では，バックアップアクチュエータの搭載や，車両の制御自由度を増やして安全性を確保する方法が検討されてきた．第3章で述べたとおり，操舵系を担うSteer-by-Wireの故障に対しては，故障時にステアリングモータの電流を遮断し，ステアリングホイールとラック軸を機械的に結合する，バックアップモータに切り替える，前輪操舵に加え後輪操舵を併用するなどして操舵機能を確保する方法が提案されている．一方，駆動系を担うDrive-by-Wireの故障に対しては，インホイールモータなど駆動手段を限定することなく，前後または4輪独立駆動などの独立駆動系構造に着目した方法が提案されている．たとえば，前後輪独立駆動構造をもつ駆動系を構成し，片方の故障による駆動力喪失分を他方の正常な駆動系で補償する方法[60,61]や，4輪独立制御可能な駆動系を構成し，故障により喪失した駆動力を，車両や路面の状況に応じて残りの車輪に再配分することで車両挙動を安定化させる方法[62,63]などが挙げられる．上記従来手法は，いずれも操舵，駆動系各々で閉じた機能補償であり，互いに悪影響を及ぼさないものの，操舵，駆動系毎に冗長構成を必要とするため，重量の増加による車両，燃費性能の悪化やコスト増加など課題が多い．

上記課題に対し，第3章ではバックアップ目的のアクチュエータ追加や制御自由度の増加を伴わないアプローチとして，左右輪の制駆動力差による旋回モーメント発生という潜在能力に着目し，系の枠を超え，操舵系故障を駆動系で補償する耐故障制御系を提案した．ただし，そこでは常に駆動系は正常に動作することが前提となっていた．

本章では、操舵系故障のみに焦点をあてた第3章の結果を拡張し、操舵系故障時は左右輪の制駆動力差で操舵機能を確保し、駆動系故障時は正常駆動輪と前輪操舵を活用して走行を継続する耐故障制御系とその設計法について検討する [37, 38, 40, 41].

## 4.2 操舵，駆動系を相互活用した耐故障制御系設計

### 4.2.1 制御器設計用モデル

本項では、第2章でモデル化した車両を制御対象とした耐故障制御系を設計するにあたり、制御器設計用モデルを構築する．なお第3章では、故障発生前後で車速変動を伴わない操舵系故障のみを対象としたため、車速を固定した状態空間モデル (3.1) 式に基づき制御器を設計したが、本章では新たに車速変動を伴う駆動系故障を対象とし、かつ速度抑制機能を導入することから、車速変動を陽に考える．

はじめに、車速をゲインスケジューリングパラメータとして考慮するため、(3.1) 式の状態空間モデルを  $\mathbf{v} = (V, 1/V)$  をパラメータとするアフィンモデルで表現する．

$$\begin{cases} E(\mathbf{v})\dot{x} &= A(\mathbf{v})x + Bu \\ y &= C(\mathbf{v})x \end{cases} \quad (4.1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ \dot{\delta} \\ \delta \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} T \\ F_{rr} - F_{rl} \end{bmatrix}, y = D^* \\ E(\mathbf{v}) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + V \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ A(\mathbf{v}) &= \begin{bmatrix} -\frac{2(K_f + K_r)}{m} & 0 & 0 & \frac{2K_f}{m} \\ -\frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{J_s} & 0 & 0 & \frac{2l_f K_f}{J_s} \\ \frac{2\xi K_f}{J_s} & 0 & -\frac{C_s}{J_s} & -\frac{2\xi K_f}{J_s} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ &+ V \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{V} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{m} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)}{J_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2\xi K_f l_f}{J_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{d_r}{2J} \\ \frac{1}{J_s} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} -\frac{2d(K_f+K_r)}{m} & 0 & 0 & \frac{2dK_f}{m} \end{bmatrix} \\ + V \begin{bmatrix} 0 & 1-d & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{V} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{2d(l_f K_f - l_r K_r)}{m} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

である．

また，制御周期に対し車速  $V$  の変化率が十分小さいとし，伝達関数で表現すると，

$$Y(s, V) = \begin{bmatrix} G_1(s, V) & G_2(s, V) \end{bmatrix} U(s) \quad (4.2)$$

ただし，

$$G_1(s, V) = C(\mathbf{v})\{sE(\mathbf{v}) - A(\mathbf{v})\}^{-1}B_1$$

$$G_2(s, V) = C(\mathbf{v})\{sE(\mathbf{v}) - A(\mathbf{v})\}^{-1}B_2$$

である．

一方，車速  $V$  は，(2.1) 式より以下の式で表現できる．

$$V(s) = G_0(s)\{F_{rr}(s) + F_{rl}(s) - D\} \quad (4.3)$$

ただし， $G_0(s) = 1/ms$  である．

つぎに，直接計測が困難，または変動する可能性のあるパラメータ  $m$ ， $J$ ， $J_s$ ， $C_s$ ， $K_f$ ， $K_r$  の変動を非構造的な不確かさとして考慮するため，(4.2) 式の伝達関数モデルに対する加法的な不確かさとして表現すると，

$$G_1(s, V) = \hat{G}_1(s, V) + W_1(s)\delta(s) \quad (4.4)$$

$$G_2(s, V) = \hat{G}_2(s, V) + W_2(s)\delta(s) \quad (4.5)$$

となる．ここで， $\hat{G}_1(s, V)$ ， $\hat{G}_2(s, V)$  はノミナルモデル， $W_1(s)$ ， $W_2(s)$  は重み関数， $\delta(s)$  は複素数変動を表し， $\|\delta(s)\|_\infty \leq 1$  を満たす．

#### 4.2.2 問題設定

2.4 節で述べたとおり，ステアリングモータおよびインホイールモータの過電流，過熱発生時，駆動 IC による電流遮断で強制的にモータトルクが  $0 \text{ Nm}$  となることを想定し，操舵

系故障は指令値  $T_c$  に反して  $T = 0 \text{ Nm}$  に、駆動系故障は指令値  $X_+$ ,  $X_-$  に反して  $F_{rr} = 0 \text{ N}$  または  $F_{rl} = 0 \text{ N}$  となる場合を考える。すなわち、モータ暴走、固着などの恒久的な故障による「セルフステア」、「ステアロック」や「オーバーラン」、「タイヤロック」などの危険事象に至る前にモータの保護機能が働くことを前提とし、保護機能が働いた際に操舵および走行機能を確保する問題を考える。ただし、操舵系と駆動系の両者が同時に故障する2重故障は考えない。

本章では、上記故障に対し、操舵系故障時は左右輪の制駆動力差により操舵機能を確保、駆動系故障時は正常駆動輪へ故障駆動輪分の駆動力を加算し、左右輪間の駆動力不均衡により発生するヨーモーメントを操舵系で打ち消すことで、目標値  $D_{ref}^*$  への追従と退避走行を可能とする耐故障制御系設計問題について検討する。なお、本章で考える耐故障制御系の目的は、操舵および駆動系の故障発生前後で車両挙動変化を最小限とし、退避走行速度を上限とする速度抑制制御の下で最寄りの安全な場所への退避を可能にすることである。すなわち、現行の内燃機関車両の退避走行性能と同様、故障後は減速し、30 km/h (約 8.3 m/s) 程度を上限とする。限界走行を伴うような全領域での走行は想定していないことに注意する。

### 4.2.3 耐故障制御系概要

4.2.1 項でモデル化した車両に対し、操舵、駆動系各々の故障に対応可能な耐故障制御系の全体構成を図4.1に示す。「駆動力要求部」、「 $D^*$  制御部」、「故障検出部」、「駆動力分配部」の4つの機能で構成され、各機能の概要を以下に述べる。

駆動力要求部は、あらかじめ試験で求めたアクセル開度と必要駆動力の関係を格納したテーブル、マップなどを参照し、アクセル開度  $A_{cc}$  から駆動力指令値  $X_+$  を算出する。なおアクセル開度は、要求する車速に応じてドライバが調整することを前提としているため、車速  $V$  のフィードバックループは記載していない。

$D^*$  制御部は、ハンドル舵角のゲイン倍やハンドル操舵トルクの1次遅れなどで算出される [58] 目標値  $D_{ref}^*$  を実現するため、必要な左右制駆動力差とステアリングモータトルクの指令値  $X_-$ ,  $T_c$  を算出する。本制御部は、操舵系故障時に左右制駆動力差で操舵機能を補償する機能を有しており、操舵系の故障処置を担う。

故障検出部は、操舵および走行用モータの駆動 IC が出力する故障診断情報などから、過電流、過熱発生に伴う電流遮断を検出し、故障判定を行う。故障確定後、駆動力分配部へ故障情報を通知する処置を担う。なお、操舵系の故障判定結果は、速度抑制機能の適用判

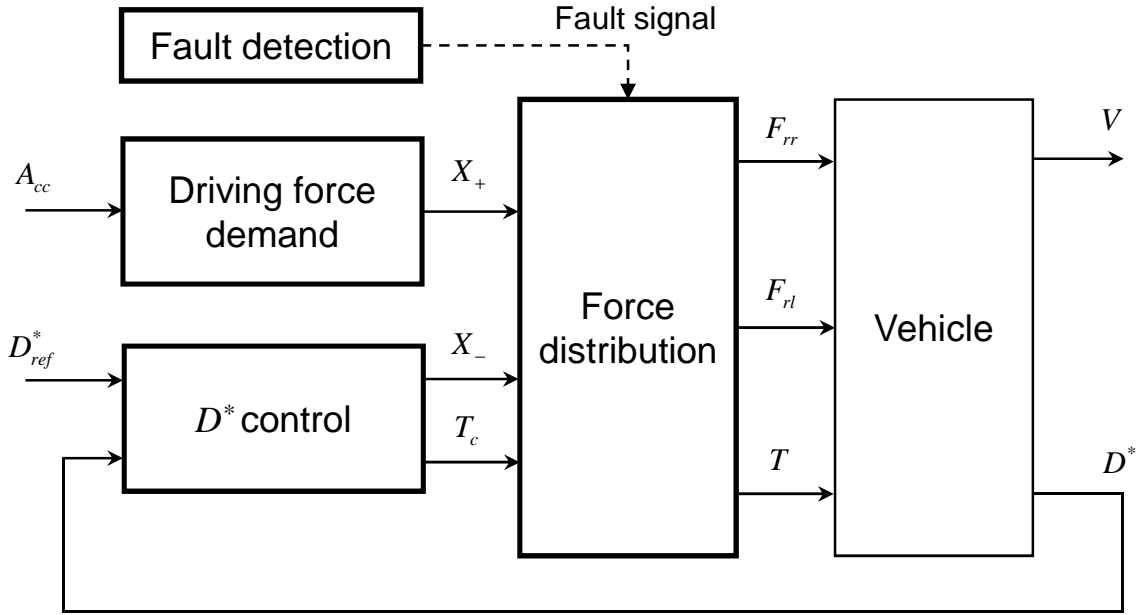


図 4.1 耐故障制御系全体構成

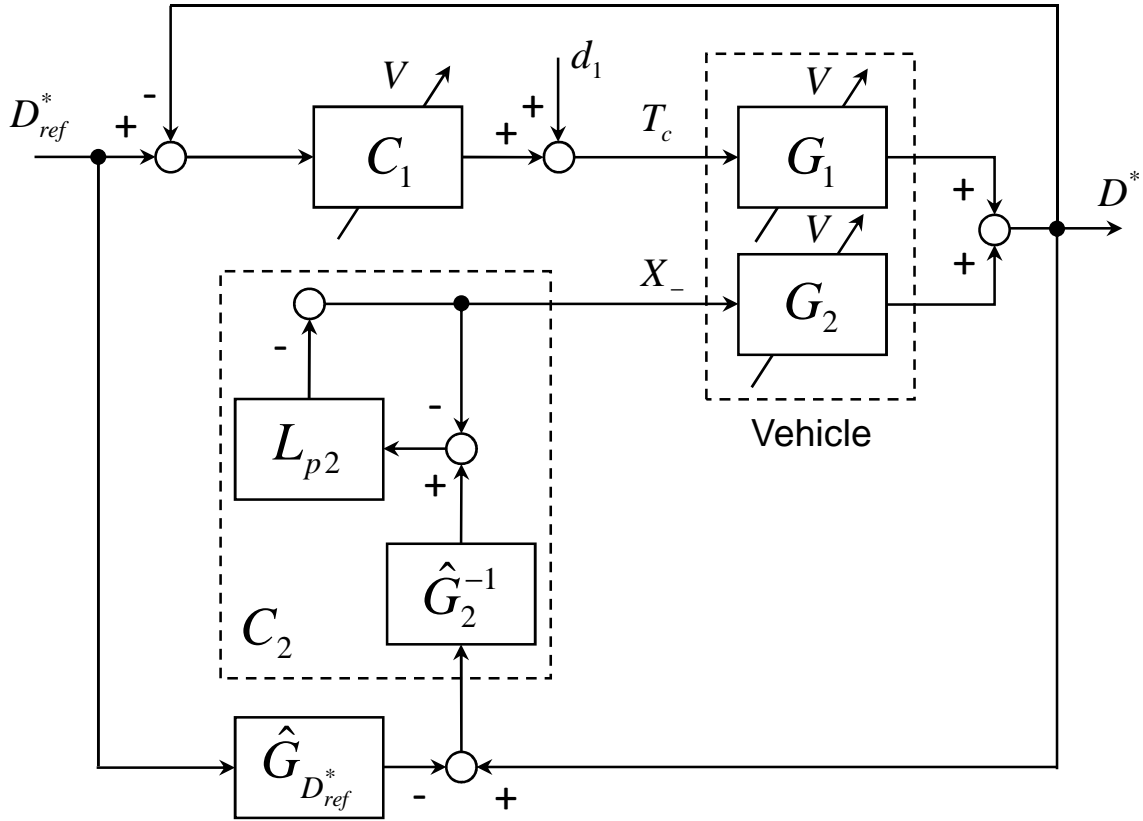
断に使用する．一方，駆動系の故障判定結果は，速度抑制機能の適用に加え，制御系切り替え判断に使用する．

駆動力分配部は，故障検出部からの情報に基づき，駆動力要求部からの指令値  $X_+$ ，および  $D^*$  制御部からの指令値  $X_-$ ， $T_c$  を各車輪，ステアリングへ分配する．故障検出後の退避走行速度を上限とする速度抑制機能や駆動系故障発生前後で指令値  $X_+$ ， $X_-$ ， $T_c$  と  $D^*$ ， $V$  の関係を不変とする分配則を有しており，駆動系の故障処置を担う．なお第3章では，指令値とモータ出力との関係が常に (3.3)～(3.5) 式の関係を満たしていたため駆動力分配部を陽に考慮しなかったが，本章では操舵，駆動系故障に応じて関係が変化するため明示的に扱っている．一方，第3章と同様に，各モータのダイナミクスを無視しているため「制御器からの指令値＝モータ出力」とし，ステアリングモータトルクや各車輪の駆動力指令値を実現するためのモータ電流制御やオブザーバなどは省略した．

#### 4.2.4 $D^*$ 制御部

図 4.2 に示すように， $D^*$  制御部は，ステアリングモータトルク指令値  $T_c$  を算出するゲインスケジューリング制御器  $C_1(s, V)$ ，左右制駆動力差指令値  $X_-$  を算出する外乱オブザーバ  $C_2(s)$  と参照モデル  $\hat{G}_{D_{ref}^*}(s)$  で構成される [36]．本項では，各制御器の設計法について述べる．

4.2.1 項で構築したモデルに基づき，外乱オブザーバ  $C_2(s)$ ，ゲインスケジューリング制

図 4.2  $D^*$  制御部

御器  $C_1(s, V)$  の順に設計する．なお，ロバスト安定性に対し，第3章では制御器設計後解析的に評価したが，本章では制御器設計時に考慮するため，外乱オブザーバ  $C_2(s)$  を含む制御系に対し，ゲインスケジューリング制御器  $C_1(s, V)$  を設計する．

#### (1) 外乱オブザーバ設計

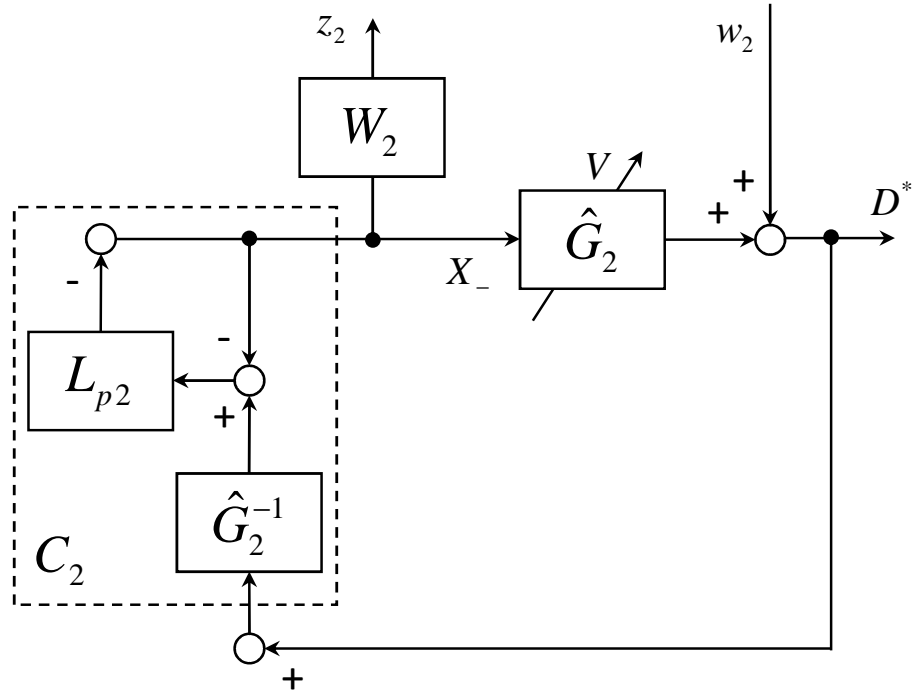
外乱オブザーバ  $C_2(s)$  は，以下の式で与えられる．

$$C_2(s) = -\frac{L_{p2}(s)}{1 - L_{p2}(s)} \hat{G}_2^{-1}(s, V_d) \quad (4.6)$$

ここで， $L_{p2}(s)$  は Low pass filter， $V_d$  は外乱オブザーバ設計時のノミナル車速であり，想定する車速変動の下限を  $V_{\min}$ ，上限を  $V_{\max}$  とすると， $V_{\min} \leq V_d \leq V_{\max}$  を満たす範囲で選択する．

操舵系故障 ( $T = 0 \text{ Nm}$ ) 時に相当する制御系に対し，(4.5) 式の  $W_2(s)$  を考慮した図 4.3 の一般化プラントを考える．点線部分が外乱オブザーバ  $C_2(s)$  に相当し， $\hat{G}_2(s, V_d)$  は， $\hat{G}_2(s, V)$  で  $V = V_d$  とすることで決まるノミナルモデルである． $\hat{G}_2(s, V_d)$  の相対次数は 1



図 4.3  $C_2(s)$  設計のための一般化プラント

であることから，

$$L_{p2}(s) = \frac{1}{T_{Lp2}s + 1} \quad (4.7)$$

を選択することで，(4.6) 式をプロパにすることが可能である．なお，(4.7) 式の時定数  $T_{Lp2}$  は，全域通過に近い特性から徐々に周波数帯域を絞っていき，図 4.3 で閉ループ系が 2 次安定かつ  $w_2$  から  $z_2$  までの伝達関数の  $H_\infty$  ノルムが 1 未満であること，および所望の目標値追従特性の両者を満たす値とする．

一方，図 4.2 の参照モデル  $\hat{G}_{D_{ref}^*}(s)$  は，つぎに設計するゲインスケジューリング制御器  $C_1(s, V)$  を含む (4.8) 式で与えられ，図 4.2 の  $G_1(s, V)$  と  $C_1(s, V)$  で構成される閉ループ系の  $D_{ref}^*$  から  $D^*$  までの伝達関数に相当する．

$$\hat{G}_{D_{ref}^*}(s) = \frac{\hat{G}_1(s, V_d)C_1(s, V_d)}{1 + \hat{G}_1(s, V_d)C_1(s, V_d)} \quad (4.8)$$

なお，外乱オブザーバ  $C_2(s)$  設計時には，参照モデル  $\hat{G}_{D_{ref}^*}(s)$  を必要としないことに注意する．

## (2) ゲインスケジューリング制御器設計

正常時に相当する制御系に対し，(4.4)，(4.5) 式の  $W_1(s)$ ， $W_2(s)$  と，目標値への追従特性を調整するための重み関数  $W_s(s)$  を考慮した図 4.4 の一般化プラントを考える．(4.1) 式の



となる．ただし， $D_1(s)$  は操舵系故障を表す外乱（図 4.2 参照），

$$N_{ND_{ref}^*}(s, V) = \{1 - L_{p2}(s)\}G_1(s, V)C_1(s, V) + L_{p2}(s)G_2(s, V)\hat{G}_2^{-1}(s, V_d)\hat{G}_{D_{ref}^*}(s) \quad (4.10)$$

$$N_{ND_1}(s, V) = \{1 - L_{p2}(s)\}G_1(s, V) \quad (4.11)$$

$$D_N(s, V) = \{1 - L_{p2}(s)\}\{1 + G_1(s, V)C_1(s, V)\} + L_{p2}(s)G_2(s, V)\hat{G}_2^{-1}(s, V_d) \quad (4.12)$$

である．

(4.10)～(4.12)式より，モデルと制御対象の一致( $\hat{G}_2(s, V_d) = G_2(s, V)$ )，不一致( $\hat{G}_2(s, V_d) \neq G_2(s, V)$ )にかかわらず， $L_{p2}(s) \rightarrow 1$ となる低周波域で(4.9)式の第1項は $\hat{G}_{D_{ref}^*}(s)D_{ref}^*$ ，第2項は0となり，モデル化誤差が存在していても外乱，すなわち操舵系故障の影響を打ち消し，目標値 $D_{ref}^*$ に追従することがわかる．

#### 4.2.5 駆動力分配部

駆動力分配部は，正常時および操舵，駆動系の故障時において，(4.13)～(4.16)式の分配則に基づき指令値 $X_+$ ， $X_-$ ， $T_c$ を $F_{rr}$ ， $F_{rl}$ ， $T$ へ分配し，故障発生前後で $D_{ref}^*$ への追従とドライバ要求速度の維持（故障発生後は退避走行速度を上限とする）を実現する．

【正常時】

$$\begin{cases} F_{rr}(s) &= \frac{X_+(s) + X_-(s)}{2} \\ F_{rl}(s) &= \frac{X_+(s) - X_-(s)}{2} \\ T(s) &= T_c(s) \end{cases} \quad (4.13)$$

【操舵系故障時】

ステアリングモータトルクは，駆動ICによる電流遮断により指令値とは無関係に $T(s) = 0$ に固定される．

$$\begin{cases} F_{rr}(s) &= \frac{\tilde{X}_+(s) + X_-(s)}{2} \\ F_{rl}(s) &= \frac{\tilde{X}_+(s) - X_-(s)}{2} \end{cases} \quad (4.14)$$

【右後輪駆動系故障時】

右後輪の駆動力は，駆動ICによる電流遮断により指令値とは無関係に $F_{rr}(s) = 0$ に固定される．

$$\begin{cases} F_{rl}(s) &= \tilde{X}_+(s) \\ T(s) &= T_c(s) + C_3(s)X_-(s) + C_4(s)\tilde{X}_+(s) \end{cases} \quad (4.15)$$

## 【左後輪駆動系故障時】

左後輪の駆動力は，駆動ICによる電流遮断により指令値とは無関係に  $F_{rl}(s) = 0$  に固定される．

$$\begin{cases} F_{rr}(s) &= \tilde{X}_+(s) \\ T(s) &= T_c(s) + C_3(s)X_-(s) - C_4(s)\tilde{X}_+(s) \end{cases} \quad (4.16)$$

ここで，

$$C_3(s) = L_{p3}(s)\hat{G}_1^{-1}(s, V_d)\hat{G}_2(s, V_d) \quad (4.17)$$

$$C_4(s) = C_{X_+}(s)\hat{G}_1^{-1}(s, V_d)\hat{G}_2(s, V_d) \quad (4.18)$$

であり， $L_{p3}(s)$ はLow pass filter， $C_{X_+}(s)$ は応答性改善のための補償器である．また， $\tilde{X}_+(s)$ は故障時の速度抑制機能を表しており，退避走行速度  $V_{\text{Limphone}}$  に対し，

$$\tilde{X}_+(s) = \begin{cases} 0 & (V > V_{\text{Limphone}}) \\ X_+(s) & (V \leq V_{\text{Limphone}}) \end{cases} \quad (4.19)$$

となる．

以下で，駆動系故障時の分配則(4.15)式の導出方法について説明する．導出にあたり，指令値  $X_+$ ， $X_-$ ， $T_c$  と  $F_{rl}$ ， $T$  との関係を(4.20)式のように定義する．

$$\begin{bmatrix} F_{rl} \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_+ \\ X_- \\ T_c \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

駆動系正常時，指令値  $X_+$ ， $X_-$ ， $T_c$  と  $D^*$ ， $V$  との間には，(4.13)式の  $F_{rr}$ ， $F_{rl}$ ， $T$  を(4.2)，(4.3)式へ代入して得られる以下の関係が成立している．

$$D^*(s, V) = G_1(s, V)T_c(s) + G_2(s, V)X_-(s) \quad (4.21)$$

$$V(s) = G_0(s)\{X_+(s) - D\} \quad (4.22)$$

一方，駆動系故障時の指令値  $X_+$ ， $X_-$ ， $T_c$  と  $D^*$ ， $V$  との関係は，(4.20)式の  $F_{rl}$ ， $T$  を(4.2)，(4.3)式へ代入すると，以下のように記述できる．

$$\begin{aligned} D^*(s, V) &= \{G_1(s, V)\alpha_{23} - G_2(s, V)\alpha_{13}\}T_c(s) \\ &\quad + \{G_1(s, V)\alpha_{21} - G_2(s, V)\alpha_{11}\}X_+(s) \\ &\quad + \{G_1(s, V)\alpha_{22} - G_2(s, V)\alpha_{12}\}X_-(s) \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$V(s) = G_0(s)\{\alpha_{11}X_+(s) + \alpha_{12}X_-(s) + \alpha_{13}T_c(s) - D\} \quad (4.24)$$

ここで，故障発生前後で  $D_{ref}^*$  への追従とドライバの要求速度を維持するためには，(4.21)，(4.23) 式，かつ (4.22)，(4.24) 式が一致すればよい．よって，

$$\alpha_{11} = 1, \alpha_{12} = \alpha_{13} = 0$$

$$\alpha_{21} = \alpha_{22} = G_1^{-1}(s, V)G_2(s, V), \alpha_{23} = 1$$

となる．ただし， $G_1^{-1}(s, V)G_2(s, V)$  はプロパでないため， $L_{p3}(s)$  または  $C_{X+}(s)$  を追加して実装する必要がある．また，制御器設計時には実制御対象  $G_1(s, V)$ ， $G_2(s, V)$  の代わりに，ノミナルモデル  $\hat{G}_1(s, V_d)$ ， $\hat{G}_2(s, V_d)$  を用いている点に注意する．

はじめに，(4.17) 式の  $L_{p3}(s)$  の設計法について述べる．分配則 (4.15) 式を適用した制御系に対し，(4.4) 式の  $W_1(s)$  を考慮した図 4.5 の一般化プラントを考える． $\hat{G}_1^{-1}(s, V_d)\hat{G}_2(s, V_d)$  の相対次数は 1 であることから，

$$L_{p3}(s) = \frac{1}{T_{Lp3}s + 1} \quad (4.25)$$

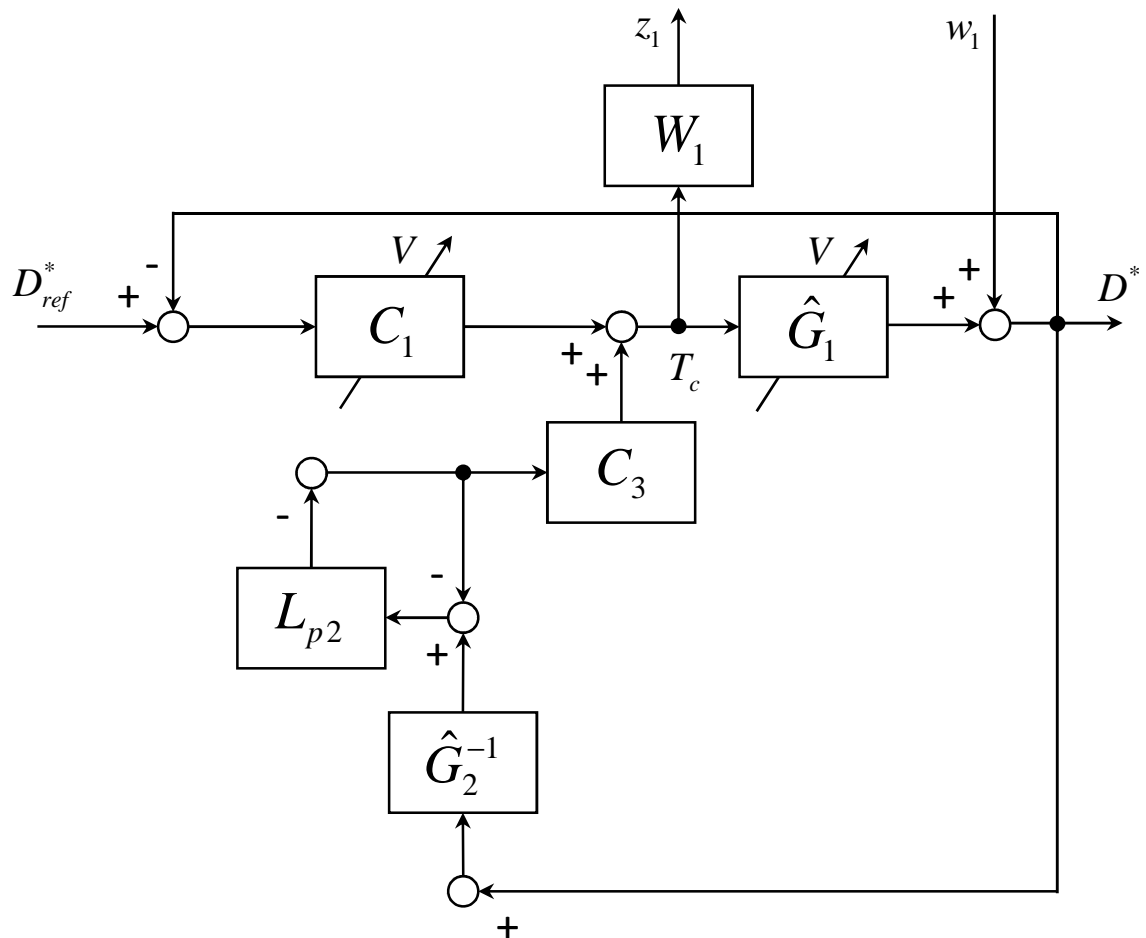


図 4.5  $C_3(s)$  設計のための一般化プラント

を選択することで, (4.17) 式をプロパにすることが可能である. なお, (4.25) 式の時定数  $T_{L_{p3}}$  は, 全域通過に近い特性から徐々に周波数帯域を絞っていき, 図 4.5 で閉ループ系が 2 次安定かつ  $w_1$  から  $z_1$  までの伝達関数の  $H_\infty$  ノルムが 1 未満であること, および所望の目標値追従特性の両者を満たす値とする.

つぎに, (4.18) 式の  $C_{X_+}(s)$  の設計法について述べる. (4.15) 式の  $C_4(s)\tilde{X}_+(s)$  項は, フィードフォワード入力に相当し, フィードバック特性には影響を与えない. よって  $C_{X_+}(s)$  は, 相対次数が 1 以上かつ所望の応答性能を実現する補償器を選択すればよい.

以上では,  $F_{rr} = 0 \text{ N}$  の場合に注目したが,  $F_{rl} = 0 \text{ N}$  の場合も同様の手順で (4.16) 式が導出される.

図 4.6 に駆動力分配部の詳細構成を示す. 操舵系故障は発生から数十ミリ秒で危険に至り, 故障検出後に分配則を切り替えて対処することが困難である [36] ことから, 故障に備えて常時有効にしておく必要がある. これに対し駆動系故障は, 退避走行速度の維持が不

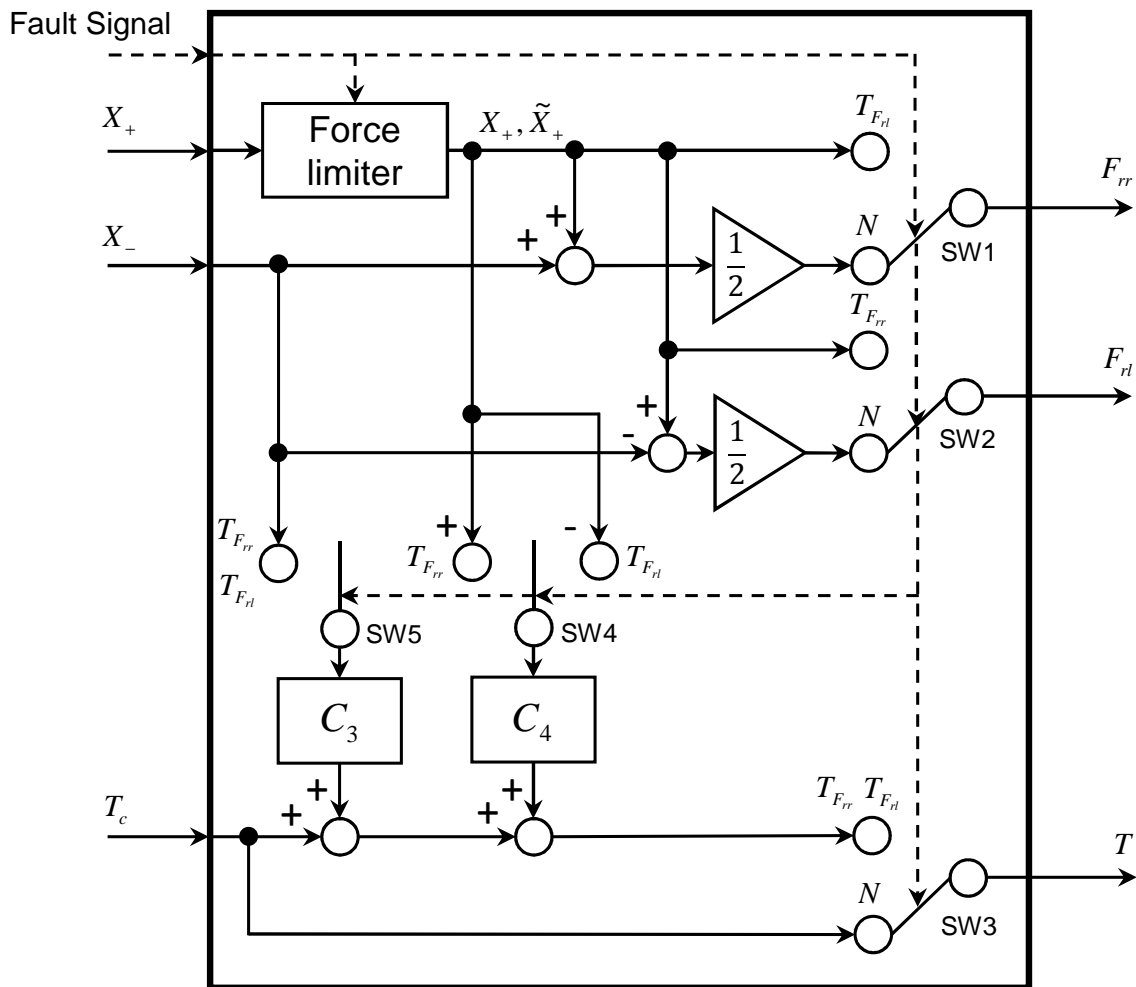


図 4.6 駆動力分配部

可能である点を除けば  $D^*$  制御部で対処可能であり，故障確定後に分配則を切り替えても安全性は確保できる．以上より，(4.13)，(4.14) 式をデフォルト設定とし，駆動系故障検出時に (4.15) または (4.16) 式へ切り替える．すなわち分配則の切り替えは，駆動系故障時のみとする．

上記内容を，SW1～SW5 の動作で説明する． $N$  点に接続した状態をデフォルト設定とし，正常時は (4.13) 式，操舵系故障時は (4.14) 式の分配則を実現する．一方， $F_{rr} = 0$  N となる故障確定時は， $T_{F_{rr}}$  点に接続することで (4.15) 式， $F_{rl} = 0$  N となる故障確定時は， $T_{F_{rl}}$  点に接続することで (4.16) 式の分配則を実現する．なお，Force limiter は，(4.19) 式の速度抑制機能を表している．

ここで，駆動力分配部を加えた後の耐故障制御系に対し，車速一定の下での低周波域特性について考察する．分配則 (4.13)，(4.14) 式を適用した制御系は，4.2.4 節で考察済みである．したがって，分配則 (4.15) 式を適用した図 4.7 の制御系を対象とする．なお，フィードバックループを構成していない車速  $V$  は，本項の議論の対象ではないため図示していない．

図 4.7 において出力  $D^*(s, V)$  は，

$$D^*(s, V) = \frac{N_{RD_{ref}}(s, V)}{D_R(s, V)} D_{ref}^* + \frac{N_{RX}(s, V)}{D_R(s, V)} X_+(s) \quad (4.26)$$

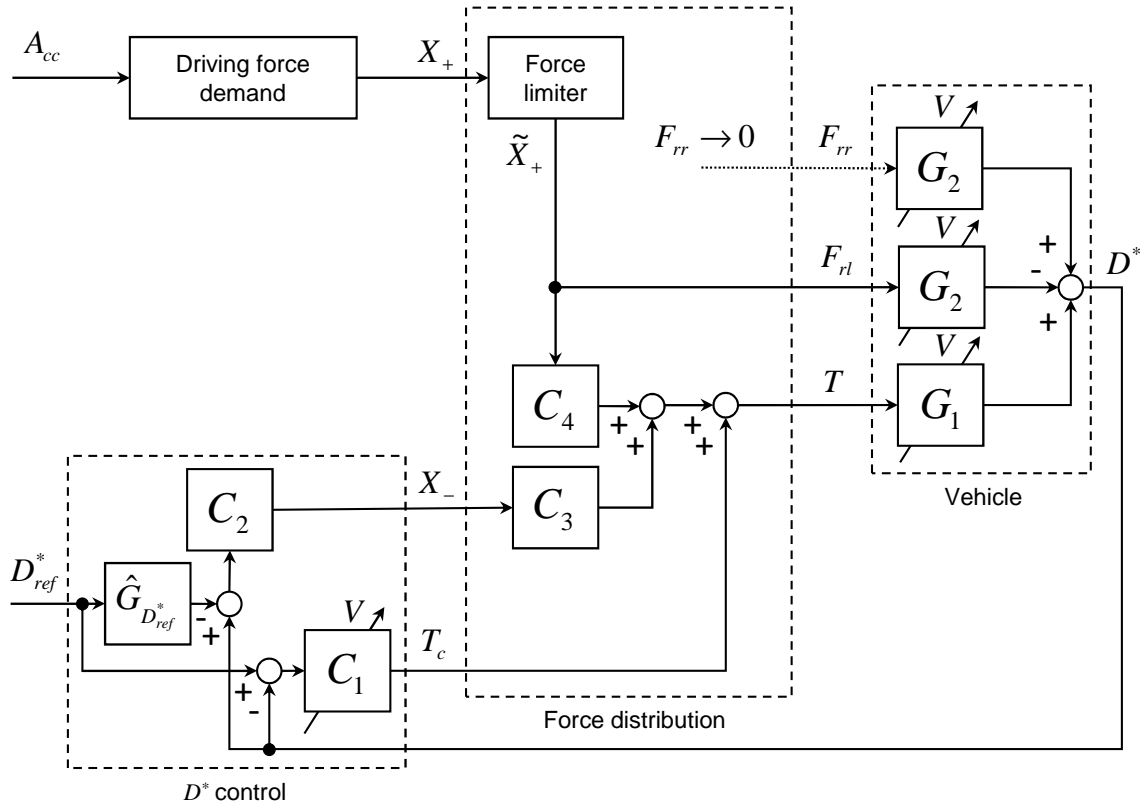


図 4.7  $F_{rr} = 0$  N となる故障発生時の耐故障制御系

となる。ただし,

$$\begin{aligned} N_{RD_{ref}^*}(s, V) = & \{1 - L_{p2}(s)\}G_1(s, V)C_1(s, V) \\ & + L_{p2}(s)L_{p3}(s)G_1(s, V)\hat{G}_1^{-1}(s, V_d)\hat{G}_{D_{ref}^*}(s) \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$N_{RX}(s, V) = \{1 - L_{p2}(s)\}\{L_{p3}(s)G_1(s, V)\hat{G}_1^{-1}(s, V_d)\hat{G}_2(s, V_d) - G_2(s, V)\} \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned} D_R(s, V) = & \{1 - L_{p2}(s)\}\{1 + G_1(s, V)C_1(s, V)\} \\ & + L_{p2}(s)L_{p3}(s)G_1(s, V)\hat{G}_1^{-1}(s, V_d) \end{aligned} \quad (4.29)$$

である。

(4.27)~(4.29)式より, モデルと制御対象の一致( $\hat{G}_1(s, V_d) = G_1(s, V)$ ,  $\hat{G}_2(s, V_d) = G_2(s, V)$ ), 不一致( $\hat{G}_1(s, V_d) \neq G_1(s, V)$ ,  $\hat{G}_2(s, V_d) \neq G_2(s, V)$ )にかかわらず,  $L_{p2}(s) \rightarrow 1$ ,  $L_{p3}(s) \rightarrow 1$  となる低周波域で(4.26)式の第1項は $\hat{G}_{D_{ref}^*}(s)D_{ref}^*$ , 第2項は0となり, モデル化誤差が存在していても目標値 $D_{ref}^*$ に追従することがわかる。なお, 分配則(4.16)式を適用した場合も同様の議論が可能である。

## 4.3 評価結果

表2.2に示すパラメータをもつ車両に対し, 4.2節に示した設計法を適用して制御効果を検証する。なお, シミュレーションでは, プラントとして(2.5), (2.6)式に代わり非線形タイヤモデル(2.7), (2.8)式を用いた。(2.7), (2.8)式中のパラメータ $k_f$ ,  $k_r$ は, 走行する路面の摩擦係数に対応した係数であり, シミュレーションでは, 乾燥路相当の値 $k_f = 9$ ,  $k_r = 15$ とした[45]。

### 4.3.1 耐故障制御系設計

制御系設計時に考慮するパラメータ変動範囲を定義する。車速変動範囲は,  $V_{\min} = 10$  m/s,  $V_{\max} = 30$  m/s とし, 変化率を,  $-4 \text{ m/s}^2 \leq dV/dt \leq 4 \text{ m/s}^2$  とする。車速以外のパラメータ $m$ ,  $J$ ,  $J_s$ ,  $C_s$ ,  $K_f$ ,  $K_r$ の変動範囲は, 表2.2の値に対し,  $m$ ,  $J$ ,  $J_s$ ,  $C_s$ は $\pm 10\%$ 以内,  $K_f$ ,  $K_r$ はタイヤの非線形特性を考慮して $\pm 20\%$ 以内とする。すべての変動の組み合わせに対する $G_1(s, V)$ ,  $G_2(s, V)$ の不確かさ $\Delta_1(s, V) = G_1(s, V) - \hat{G}_1(s, V)$ ,  $\Delta_2(s, V) = G_2(s, V) - \hat{G}_2(s, V)$ を覆う(4.4), (4.5)式の重み関数を, 以下のように定義する。



$$W_1(s) = \frac{0.1434s^2 + 0.2996s + 0.6142}{s^2 + 10.9771s + 105.5328} \quad (4.30)$$

$$W_2(s) = \frac{0.001s^2 + 0.002s + 0.0042}{s^2 + 6.6489s + 41.1862} \quad (4.31)$$

図 4.8, 4.9 に  $W_1(s)$ ,  $W_2(s)$  と  $\Delta_1(s, V)$ ,  $\Delta_2(s, V)$  の関係を示した.

上記モデルを基に,  $\varepsilon = 0.0001$ ,  $T_{Lp2} = 1.4$ ,  $T_{Lp3} = 4.5$ ,  $W_s(s) = 0.25$ ,  $V_d = 30$  m/s,

$$C_{X+}(s) = \frac{1}{0.01s^2 + 0.2s + 1}$$

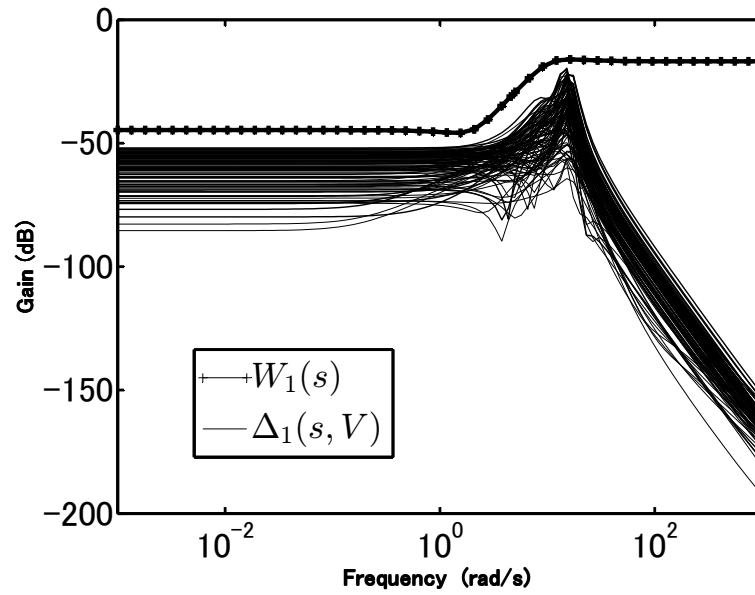


図 4.8  $W_1(s)$  と  $\Delta_1(s, V)$  の関係

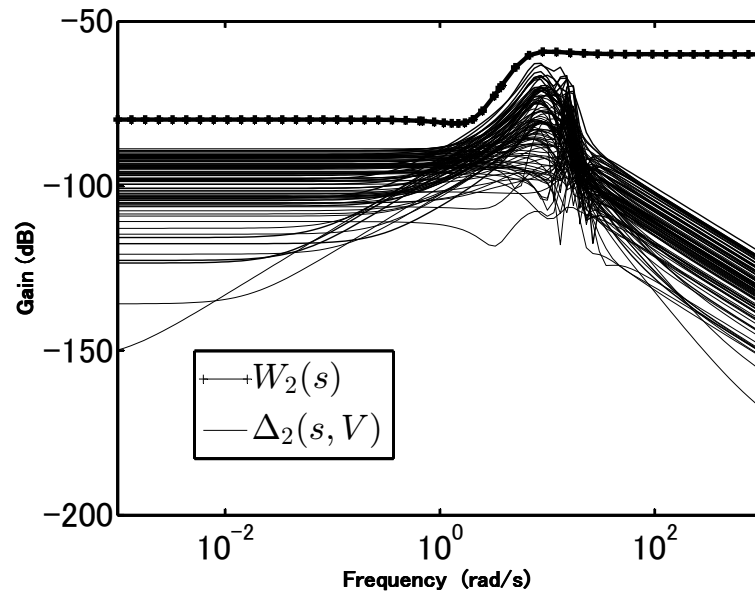


図 4.9  $W_2(s)$  と  $\Delta_2(s, V)$  の関係



点を起点に  $T$  が増加,  $F_{rl}$  が減少しているようすがわかる. 一方, 本来増加すべき  $F_{rr}$  は, 故障のため指令に追従できず  $0\text{ N}$  のままであることから, 転がり抵抗以上の駆動力が確保できず, 図 4.13 に示すように故障発生地点の  $b$  点から減速する.  $c$  点で故障確定後, (4.15) 式にしたがって指令値が分配され, 速度抑制機能により  $F_{rl} = 0\text{ N}$  とし, 減速を開始する. 退避走行速度へ到達した  $d$  点以降は, 正常な左後輪へ再度駆動力  $F_{rl}$  が印加され, 車速が維持されていることがわかる.

また, 図 4.11 に示すとおり,  $d$  点で駆動力  $F_{rl}$  が印加されるのと同時にヨーモーメント打消分のトルクがステアリングモータトルクに加算され, 速度を維持しつつ直進走行を可能としている. さらに, 図 4.14 において,  $b$  点の故障発生時に比べ  $d$  点の駆動力再印加時の  $D^*$  変動が抑制されていることから効果を確認できる. 上述した耐故障制御系の一連の挙動により, 故障発生後もドライバの特別な操作を伴うことなく, 図 4.15 の挙動を実現している.

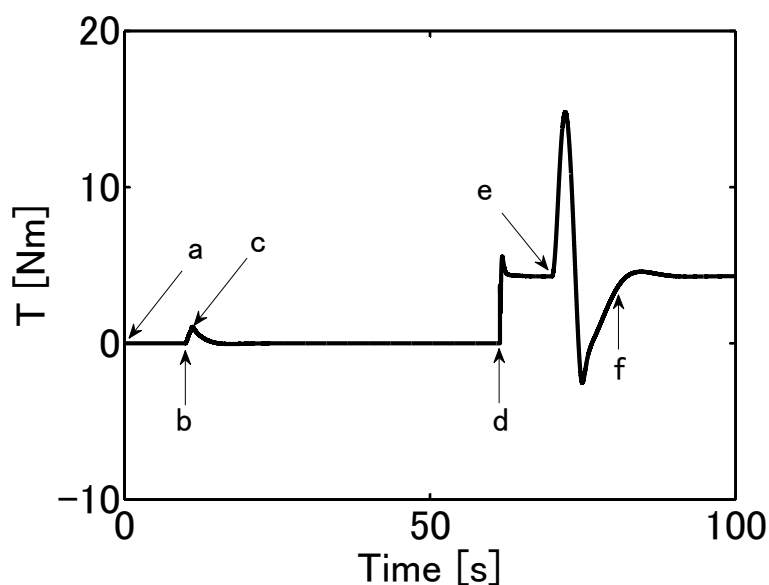


図 4.11 ステアリングモータトルク  $T$

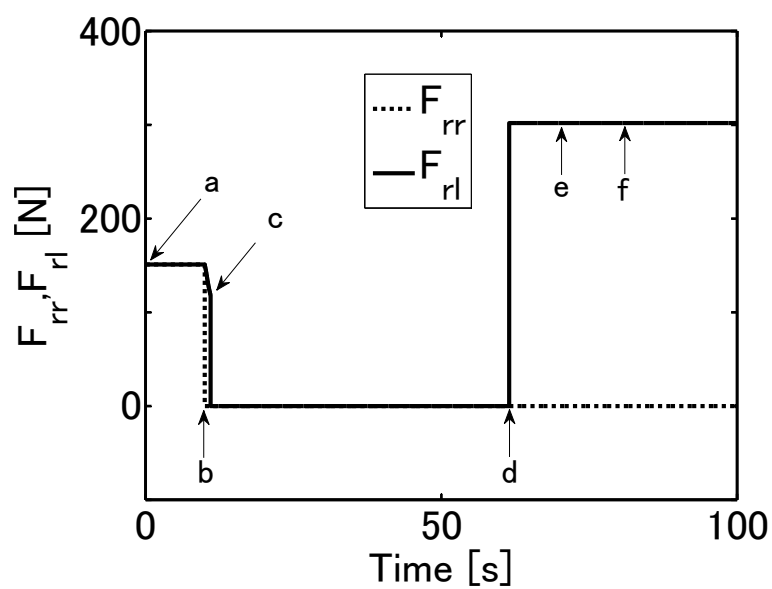


図 4.12 左右後輪制駆動力  $F_{rr}$ ,  $F_{rl}$

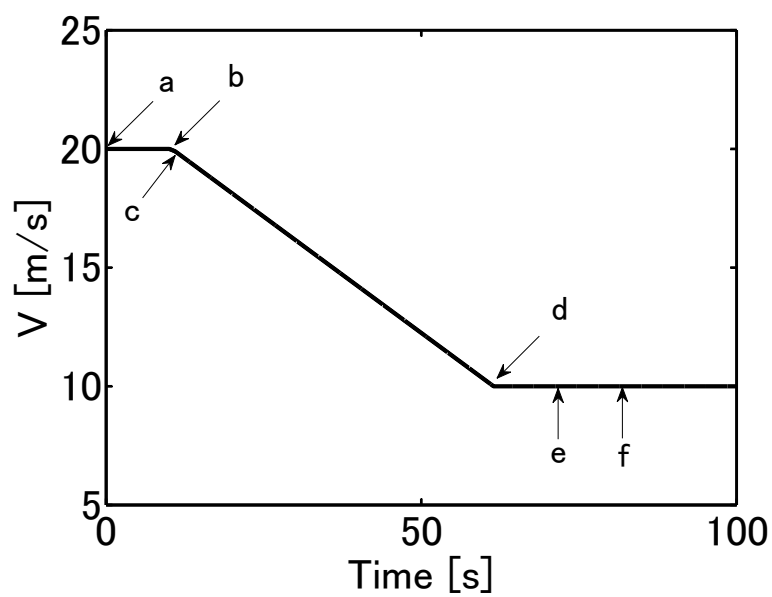


図 4.13 車速  $V$

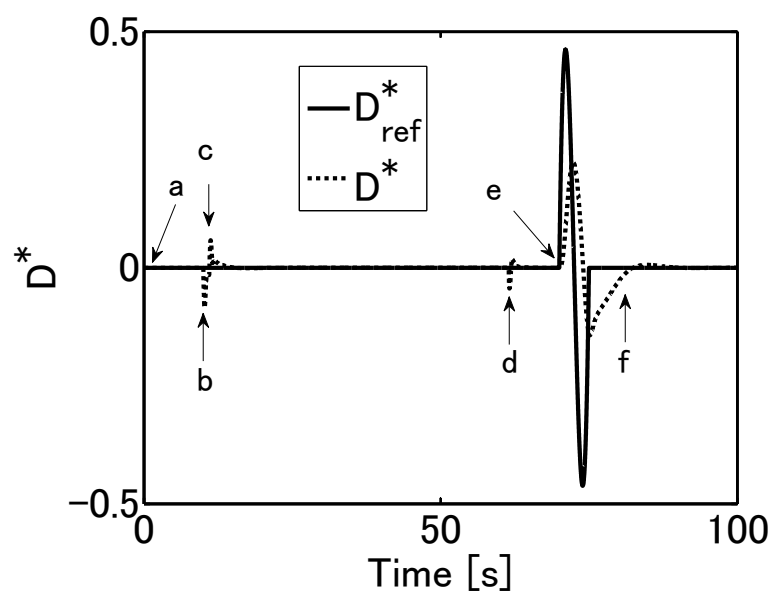
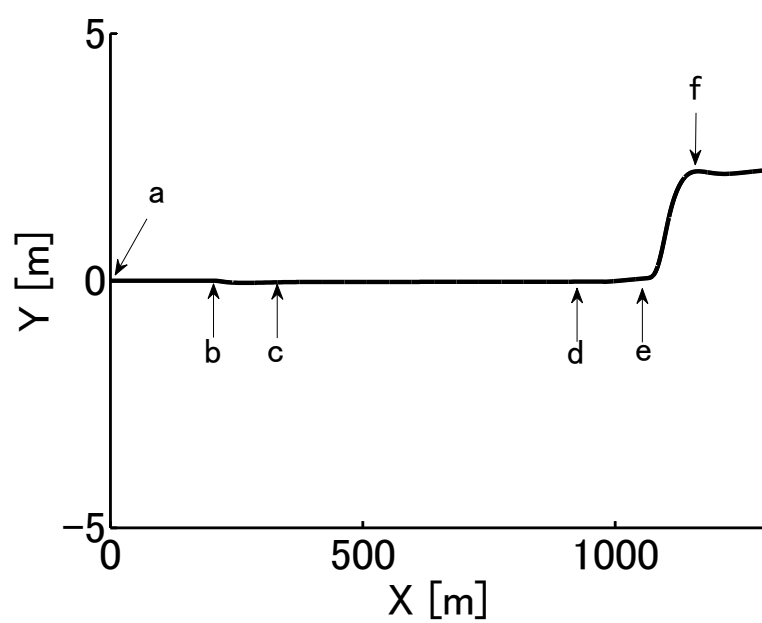
図 4.14  $D^*$  出力

図 4.15 X-Y 平面上の車両挙動

つぎに、操舵系故障に対し、本章で提案した耐故障制御系が第3章の耐故障制御系と同じ仕様を有していることを確認する．図4.10の走行パターンは、ステアリングモータトルク  $T = 0 \text{ Nm}$  である直進時の故障発生を想定しており、 $T = 0 \text{ Nm}$  となる故障が発生したとしても、故障発生前後で  $T$  に変化がなく、耐故障制御系の効果が顕著に現れない．そこで、 $T \neq 0 \text{ Nm}$  である円旋回中の操舵系故障を例に挙げ、故障発生後も円旋回が継続可能なことを確認し、制御効果を検証する．なお、タイヤ、路面関連パラメータ、プラントモデルの不確かさなど走行パターン以外の条件は、すべて駆動系故障時の場合と同等とする．

図4.16に示すように、一定速度  $V = 15 \text{ m/s}$  で走行している車両が  $a$  点より半径  $300 \text{ m}$  の円軌道に沿った走行を開始する．その後、 $b$  点で  $T = 0 \text{ Nm}$  となる故障が発生し、 $1 \text{ s}$  後の  $c$  点で故障確定する．故障確定後、速度抑制機能により  $d$  点で退避走行速度へ到達し、その後も旋回を継続する走行パターンを考える．なお、 $D_{ref}^*$  は車速  $V$  と旋回半径  $R$  を用いて (4.33) 式から算出し、 $A_{cc}$  は一定とする．

$$D_{ref}^* = V\gamma = \frac{V^2}{R} \quad (4.33)$$

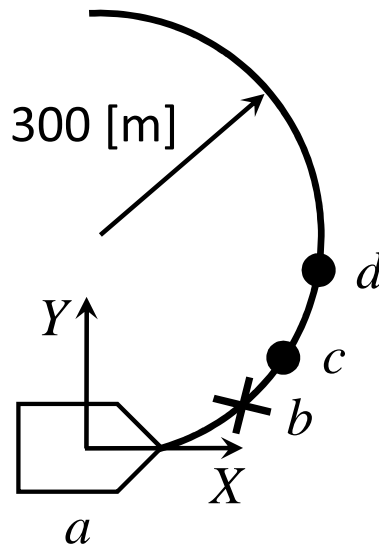


図 4.16 円旋回時の操舵系故障シナリオ

シミュレーション結果を図4.17～4.22に示す．図4.17、4.18に示すとおり、 $b$  点で故障発生後、ステアリングモータトルク  $T$  が失われると同時に左右制駆動力差  $F_{rr} - F_{rl}$  が増大し、旋回モーメントが生成され、操舵機能が補償される．この補償により、 $b$  点で目標値を外れた  $D^*$  が、再度目標値へ追従するようすが図4.19で確認できる．また、図4.20に示すとおり、前輪舵角はセルフアライニングトルクにより定常値へ収束する．

$c$  点で故障確定した後は、(4.14) 式にしたがって駆動力分配し、(4.19) 式 of 速度抑制機能により  $\tilde{X}_+ = 0 \text{ N}$ ，すなわち左右総制駆動力  $F_{rr} + F_{rl}$  を  $0 \text{ N}$  として減速を開始する．退避

走行速度へ到達した  $d$  点以降は，再度左右総制駆動力を印加し，車速が維持されるようすが図 4.18, 4.21 より確認できる．上述した耐故障制御系の一連の挙動により，故障発生後もドライバの特別な操作を伴うことなく図 4.22 の車両挙動を実現しており，本章で提案した耐故障制御系は，操舵系故障に対し，第 3 章に示した制御系と同等の耐故障性を有していることがわかる．

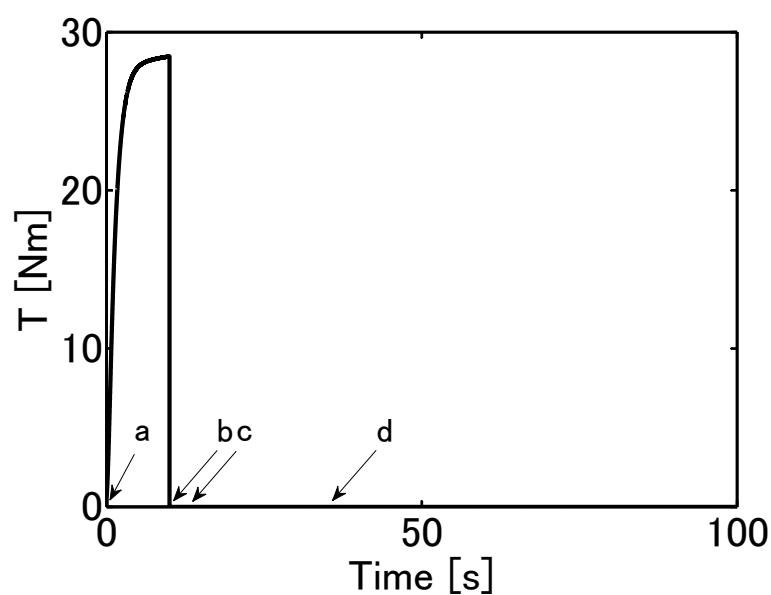


図 4.17 ステアリングモータトルク  $T$

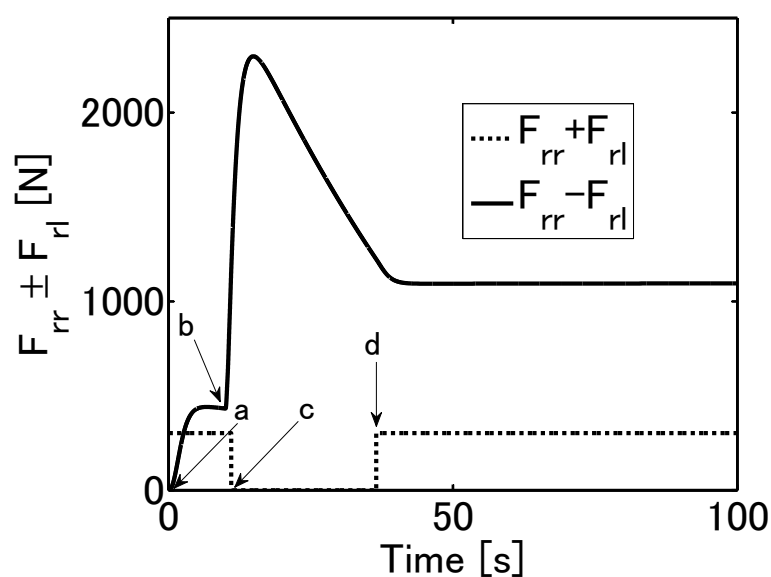
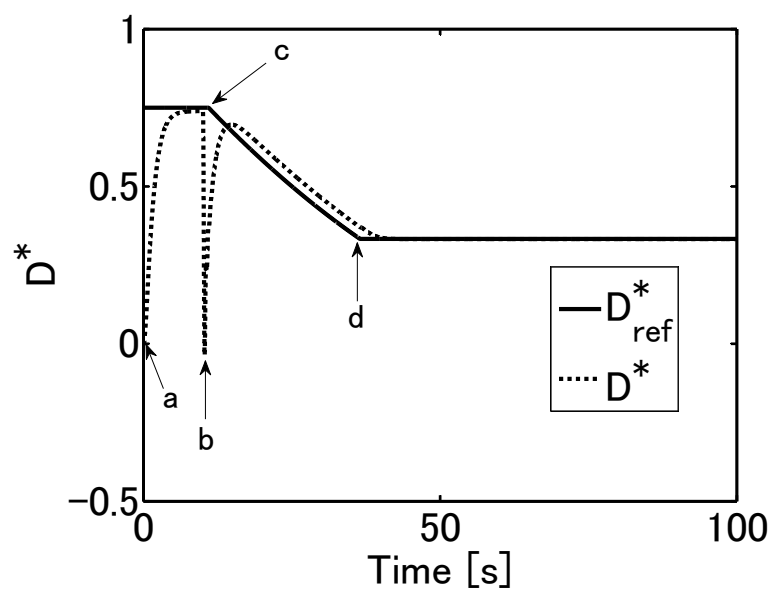
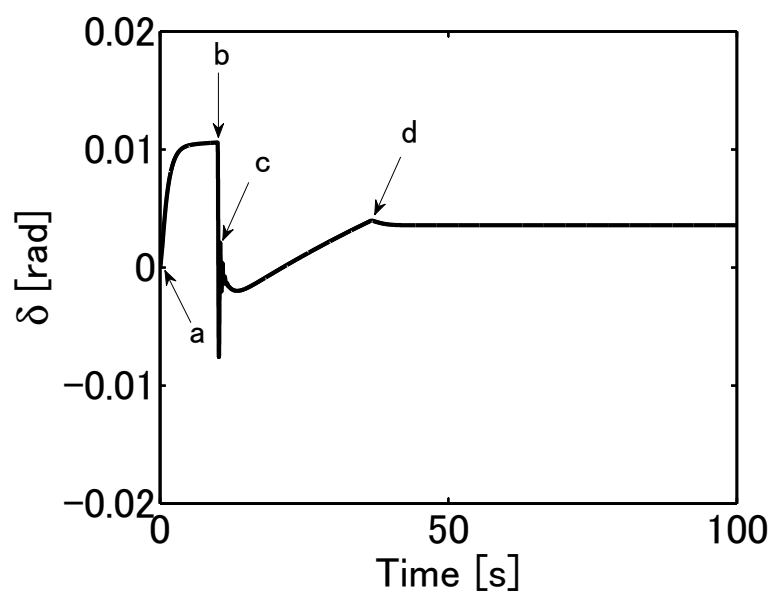


図 4.18 左右総制駆動力  $F_{rr} + F_{rl}$ ，左右制駆動力差  $F_{rr} - F_{rl}$

図 4.19  $D^*$  出力図 4.20 前輪舵角  $\delta$



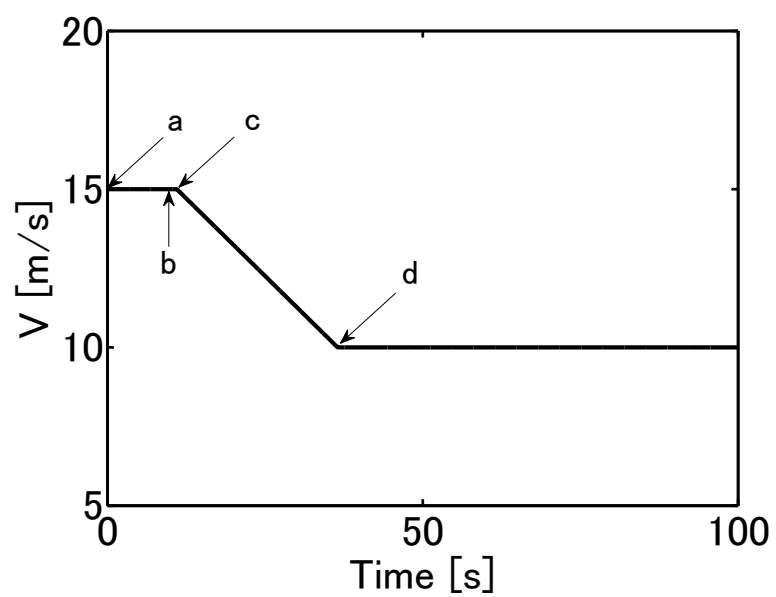
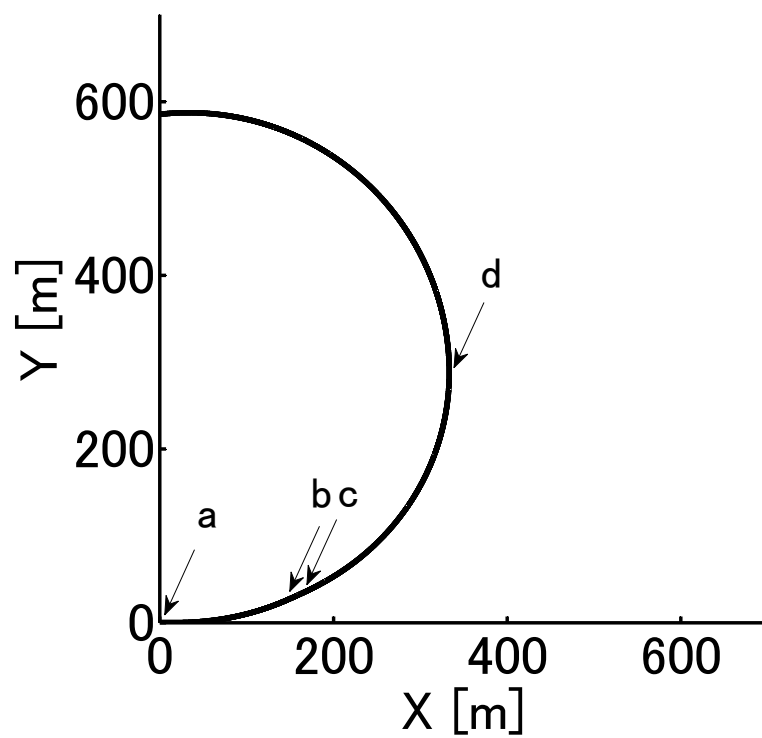
図 4.21 車速  $V$ 

図 4.22 X-Y 平面上の車両挙動

## 4.4 まとめ

本章では, Steer-by-Wire による前輪操舵とインホイールモータによる左右後輪独立駆動の特徴を活用し, 操舵, 駆動系各々の故障に対応可能な耐故障制御系とその設計法を提案することで, 車両性能や快適性向上目的だけではなく, 安全設計面でも活用できる可能性を示した. 安全性は, 価格やサイズにかかわらずすべての車両に対して必須な要件であり, 特に 1 人乗りの小型車から高性能スポーツカーといった様々な形態の車両が提案されている電気自動車では, 多様な安全設計手法が求められている. これに対し, 本章の結果は 1 つの選択肢を与えた点に有用性があるといえる.

なお提案した耐故障制御系では, 車速に応じた操舵特性変化や左右制駆動力差による操舵アシスト制御などの性能要件は, 目標値  $D_{ref}^*$ , または参照モデル  $\hat{G}_{D_{ref}^*}(s)$  の設計で実現することを想定している. 本章では, 左右制駆動力差により操舵系故障を補償することを目的としたため, 参照モデル  $\hat{G}_{D_{ref}^*}(s)$  は, 操舵系制御を担う図 4.2 の  $G_1(s, V)$ ,  $C_1(s, V)$  で構成される閉ループ系の  $D_{ref}^*$  から  $D^*$  までの伝達関数 (4.8) 式とした. たとえば, 車両状況に応じて旋回特性を変化させるモデルに置き換えることで, 操舵系では不足する旋回特性を左右制駆動力差によりアシストする制御と耐故障制御を共存させることも可能である. 目標値  $D_{ref}^*$ , または参照モデル  $\hat{G}_{D_{ref}^*}(s)$  の設計に帰着不可能な性能要件との共存については, 今後の課題である.

## 第5章 センサ故障に対する耐故障制御系

### 5.1 概要

車載システムの電子制御依存度が高まるにつれ、電動アクチュエータと同様に使用されるセンサも増加の一途をたどっている [65]. 特に X-by-Wire システムでは、アクチュエータ挙動に加え、ドライバ意図や車両の走行状況などを複数のセンサで検出し、制御で使用している. ドライバ意図の伝達から車両操作を担うアクチュエータ制御に至るまでセンサが関与しており、その役割は極めて重要である. それゆえ、センサ故障は車両操作、挙動に重大な影響を与え、事故に直結する可能性を含んでいる. センサ故障に対する安全性確保は、第3, 4章で扱ったアクチュエータ故障と同様に、X-by-Wire システムを製品化する際の最重要課題に位置付けられている.

一方、車両に限らずセンサ故障対策の重要性は広く認識されており、多くの研究者がセンサ故障に対する耐故障制御系設計問題に取り組んでいる. 研究、実用の両面において最も一般的なアプローチは、冗長なセンサを実装し、多数決により最も確からしい値を選択する手法 [53,66] である. しかし、センサの冗長化が必要なため、X-by-Wire のような多数のセンサを有するシステムへ適用する場合、車両重量やコストの増加といった問題が表面化し、バイワイヤ化の利点が失われてしまうという課題がある. 上記課題を解決するため、センサの代替としてオブザーバ [67,68] やプラントモデル [69,70] を用いて冗長系を構成する手法が提案されている. しかし、オブザーバやプラントモデルの出力は実値に対して誤差を含んでおり、誤差を含んだ出力を使って制御を行うと、車両挙動がドライバ意図と乖離してしまう可能性を有している. さらに、これらの従来手法はセンサ故障がシステムに与える影響度に関係なく、故障発生後も極力故障発生前の機能や性能を維持することを目指している. 一方、車両に搭載されているセンサの役割は様々であり、したがって故障時の影響度も様々である. よって、全てのセンサに同一の耐故障制御を適用する場合、処置に過不足が生じることが容易に推測できる.

「走る」、「曲がる」、「止まる」といった自動車の基本機能は、アクセル、ブレーキの踏み込み量やハンドル舵角といったドライバ操作の検出と、ドライバ操作を車両へ伝達する

モータのトルク（電流）や回転角度といった動作状態を検出するセンサ、すなわちコンポーネント動作レベルの情報で実現可能である。これに対し、「安全」、「利便」、「環境」などの性能やサービス性向上を目的とした付加機能になればなるほど、基本機能の実現に必要なセンサに加え、車両挙動や周辺状況に関する多種多様な情報が必要であり、複数のセンサからの情報に基づいて実現されている [71–73]。たとえば、先進運転支援システム（Advanced Driving Assistant System : ADAS）では、衝突防止のための自動ブレーキ、車線逸脱防止のためのステアリング補正、運転者の負担軽減のためのクルーズコントロールなどの機能を提供するために、レーザレーダ、ミリ波レーダや単眼カメラ、ステレオカメラなどの外界認識センサを [74]、カーエアコンでは、車両周辺環境に応じた自動空調機能を提供するために、日射センサ、湿度センサ、排気ガスセンサといった多数のセンサ情報を駆使している [75]。一概にセンサといっても目的は様々であり、自動車の基本機能を担うセンサと付加機能を担うセンサとでは、価格や数量の相違のみならず、安全性への影響度合いも異なるため、センサ毎に用途に応じた故障対策を施す方が自然である。

一方、1.5 節で述べたとおり、自動車の運転に必要な「認知」、「判断」、「操作」のサイクルには、人間（ドライバ）と電子制御による 2 つのサイクルが存在している。基本機能が確保されていれば、人間によるサイクルのみで自動車の運転は可能であるが、電子制御によるサイクルが加わることで、ドライバの操作負担軽減やドライバでは不可能な緻密な制御で予防安全、環境性能などの付加機能を達成している。ここでセンサは「認知」の役割を担うが、同時に人間も視覚、聴覚、三半規管などを使って車両挙動、周辺状況を「認知」している。この人間と電子制御の間に潜在する冗長性を考慮すると、センサ故障発生後も人間による「認知」は可能であるため、センサ故障により電子制御によるサイクルが人間によるサイクルに悪影響を与えない限り、換言すると基本機能が正常である限り、人間主体の運転は継続可能であるといえる。

本章では Steer-by-Wire の操舵制御において、基本機能と付加機能を明示的に区別した制御系を構築し、基本機能に関与するセンサには、冗長化、多数決選択といった従来型の安全設計手法を踏襲して耐センサ故障性を確保し、付加機能に関与するセンサには、故障時に基本機能に悪影響を及ぼさないことを要件とした対策、すなわち制御器の出力抑制、制御ループ切断などを施すことで全てのセンサの冗長化を回避する耐故障制御系とその設計法について検討する [76]。

## 5.2 機能毎に分割した制御ループを有する耐故障制御系設計

### 5.2.1 制御器設計用モデル

制御器設計に際し、第2章で示した車両、操舵モデルから、入力をステアリングモータトルク  $T_c$ 、出力を前輪舵角  $\delta$ 、 $D^*$  とする状態空間および伝達関数モデルを構築する。なお第2章で述べたとおり、モータのダイナミクスは無視しているため「制御器からの指令値＝モータ出力」とした。また第4章と同様に、車速をゲインスケジューリングパラメータとし、車速以外のパラメータ変動は非構造的な不確かさとして考慮する。

はじめに、車速をゲインスケジューリングパラメータとして考慮するため、 $\mathbf{v} = (V, 1/V)$  をパラメータとするアフィン形式の状態空間モデルで表現する。

$$\begin{cases} E(\mathbf{v})\dot{x} = A(\mathbf{v})x + B_1u \\ y = C_s(\mathbf{v})x \end{cases} \quad (5.1)$$

ただし、

$$x = \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ \dot{\delta} \\ \delta \end{bmatrix}, u = T_c, y = \begin{bmatrix} \delta \\ D^* \end{bmatrix}$$

$$E(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + V \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} -\frac{2(K_f+K_r)}{2(l_f K_f - l_r K_r)} & 0 & 0 & \frac{2K_f}{m} \\ -\frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)} & 0 & 0 & \frac{2l_f K_f}{J_s} \\ \frac{2\xi K_f}{J_s} & 0 & -\frac{C_s}{J_s} & -\frac{2\xi K_f}{J_s} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} + V \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$+ \frac{1}{V} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)}{2\xi K_f l_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2\xi K_f l_f}{J_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_s} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
C_s(\mathbf{v}) &= \begin{bmatrix} C_{s1} \\ C_{s2}(\mathbf{v}) \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{2d(K_f+K_r)}{m} & 0 & 0 & \frac{2dK_f}{m} \end{bmatrix} + V \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-d & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
&\quad + \frac{1}{V} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2d(l_f K_f - l_r K_r)}{m} & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

である.

また, 制御周期に対し車速  $V$  の変化率が十分小さいとし, 伝達関数で表現すると,

$$Y(s, V) = \begin{bmatrix} G_{s1}(s, V) \\ G_{s2}(s, V) \end{bmatrix} U(s) \quad (5.2)$$

ただし,

$$G_{s1}(s, V) = C_{s1} \{sE(\mathbf{v}) - A(\mathbf{v})\}^{-1} B_1$$

$$G_{s2}(s, V) = C_{s2}(\mathbf{v}) \{sE(\mathbf{v}) - A(\mathbf{v})\}^{-1} B_1$$

である.

つぎに, 直接計測が困難, または変動する可能性のあるパラメータ  $m, J, J_s, C_s, K_f, K_r$  の変動を非構造的な不確かさとして考慮するため, (5.2) 式の伝達関数モデルに対する加法的な不確かさとして表現すると,

$$G_{s1}(s, V) = \hat{G}_{s1}(s, V) + W_{G_{s1}}(s) \delta(s) \quad (5.3)$$

$$G_{s2}(s, V) = \hat{G}_{s2}(s, V) + W_{G_{s2}}(s) \delta(s) \quad (5.4)$$

となる. ここで,  $\hat{G}_{s1}(s, V), \hat{G}_{s2}(s, V)$  はノミナルモデル,  $W_{G_{s1}}(s), W_{G_{s2}}(s)$  は重み関数,  $\delta(s)$  は複素数変動を表し,  $\|\delta(s)\|_\infty \leq 1$  を満たす.

### 5.2.2 問題設定

2.4 節で述べたとおり, センサ故障として, ワイヤハーネスの断線または短絡により強制的にセンサ値が固定値となり, 正しい値が取得できなくなる突発故障を想定する. 具体的には, **Steer-by-Wire** の  $D^*$  制御系において,  $D^*$  を算出するためのヨーレートセンサまたは横加速度センサのいずれかが故障し, 正しい  $D^*$  値が得られない状況下において, 「セルフステア」, 「ステアロック」などの危険事象に至ることなく, 操舵機能を確保する問題を考える. なお劣化故障に関しては, 車両への影響も軽微であり, 定期点検時の交換が主な

対策となるため、ECUに実装された制御系での故障対策に主眼をおく本論文の対象外とする。またアクチュエータ故障の際と同様、2つ以上のセンサが同時に故障する2重故障は考えない。

本章では、上記センサ故障に対し、安全性への影響度合いに応じた対策を施すため、Steer-by-Wireの $D^*$ 制御を「基本機能」と「付加機能」の2つの機能に分け、各々別の制御系として構築し、組み合わせて実現することを考える。ここで基本機能とは、ドライバのハンドル操作に比例して前輪舵角を操作する機能、すなわち操舵系に求められる最低限の機能を意味しており、従来の機械式ステアリング装置で実現されている機能に相当する。本機能は、センサの故障有無に関わらず必ず維持されなければならない。これに対し付加機能とは、ドライバの操作負荷軽減や車両の走行・環境面などの性能向上を担う機能であり、本章で扱う制御要件の中では、車速や車両重量、路面状況に伴う車両特性変化に応じて舵角を補正する機能、すなわち参照モデルに基づく $D^*$ 制御に相当する。本機能は、Steer-by-Wireの機械的結合がない利点を生かした付加価値を高めるための機能であり、たとえセンサ故障により機能不全に陥ったとしても、「曲がる」の機能喪失に直結するわけではない。ゆえに、センサ故障後の維持は必須ではないが、基本機能へ悪影響を及ぼすことがないようにしなければならない。次項以降では、基本機能と付加機能を組み合わせて $D^*$ 制御を実現する方法と各機能の設計法について検討する。

### 5.2.3 耐故障制御系概要

(5.2)式で定義された制御対象に対し、出力 $D^*$ を目標値 $D_{ref}^*$ に追従させる制御系を設計する場合、図5.1に示すような目標値と制御量の偏差を入力とする制御器 $C_{D^*}(s, V)$ を有するサーボ系を構成するのが一般的である。図5.1の制御系に対し、センサ故障対策として従来の冗長化、多数決選択の手法を適用する場合、 $D^*$ を算出するために必要なヨーレートセンサ、横加速度センサの各々に対し、3重系を構成しなければならない。

これに対し、本章で提案するセンサ故障に対する耐故障制御系の全体構成を図5.2に示

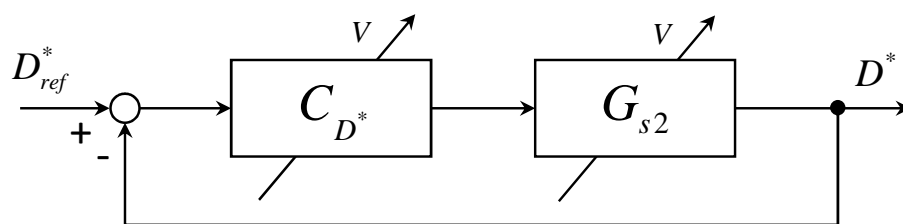


図 5.1  $D^*$  追従制御系





ある．センサ故障により機能維持が不可能となった場合，操舵性能は劣化するが，自動車の基本機能である「曲がる」が失われることはない．それゆえ， $D^*$  を算出するためのヨーレートセンサまたは横加速度センサは冗長化せず，センサ故障時に操舵角フィードバックへ悪影響を与えないよう，リミッタによる制御器  $C_o(s, V)$  の出力制限と故障検出後の  $D^*$  フィードバックループ切り離しにより，操舵角フィードバックによる操舵機能を確保する．付加機能が喪失した後は，ドライバが自身の「認知」機能に基づき，ハンドル操作に補正を加えることとなる．

なお，図 5.2 において  $M_{\delta_{D_{ref}^*}}$  は，ハンドル舵角を前輪舵角へ変換するモデルであり，機械式ステアリング装置のギア比に相当する．また  $M_{D_{ref}^*}(s, V)$  は， $D^*$  追従制御のための参照モデルを表しており，本章では (5.5) 式で定義した．ここで， $\hat{G}_a(s, V)$  は，図 5.2 の点線で囲まれた部分であり，(5.7) 式で定義された  $G_a(s, V)$  のノミナルモデルである．

$$M_{D_{ref}^*}(s, V) = \hat{G}_a(s, V) = \frac{C_i(s, V)\hat{G}_{s2}(s, V)}{1 + C_i(s, V)\hat{G}_{s1}(s, V)} \quad (5.5)$$

#### 5.2.4 操舵角フィードバック制御器

本項では，操舵角フィードバック制御器  $C_i(s, V)$  の設計方法について述べる． $C_i(s, V)$  設計に際し，車速をゲインスケジューリングパラメータとし，車速以外のパラメータ変動を非構造的な不確かさとして考慮する．不確かさを表す (5.3) 式の重み関数  $W_{G_{s1}}(s)$  と，目標

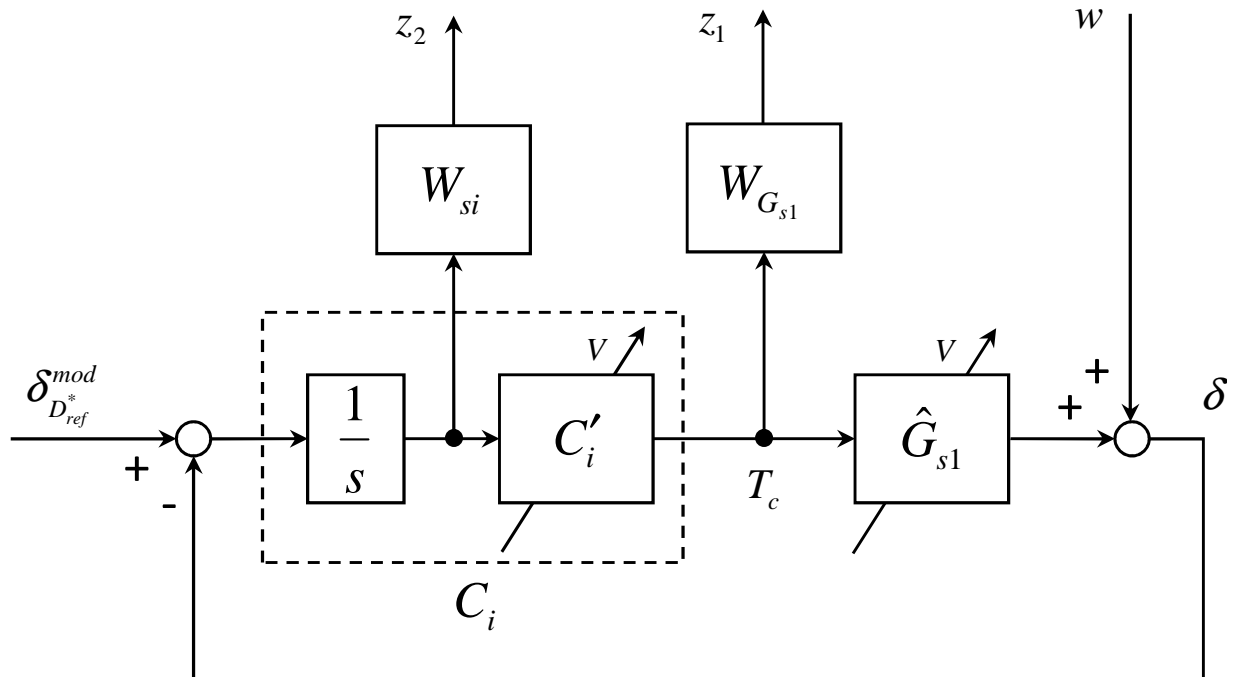


図 5.3  $C_i(s, V)$  設計のための一般化プラント

値への追従特性を調整するための重み関数  $W_{si}(s)$  を考慮した図 5.3 の一般化プラントを考える．閉ループ系が 2 次安定かつ  $w$  から  $(z_1, z_2)^T$  までの伝達関数の  $H_\infty$  ノルムが 1 未満となるようなゲインスケジューリング  $H_\infty$  制御器  $C'_i(s, V)$  を設計する． $C'_i(s, V)$  と積分器を結合し，

$$C_i(s, V) = \frac{1}{s} C'_i(s, V) \quad (5.6)$$

を得る．

### 5.2.5 $D^*$ フィードバック制御器

本項では， $D^*$  フィードバック制御器  $C_o(s, V)$  の設計方法について述べる． $C_o(s, V)$  設計に際し， $C_i(s, V)$  設計時と同様に，車速をゲインスケジューリングパラメータとし，車速以外のパラメータ変動を非構造的な不確かさとして考慮する．制御対象は，図 5.2 の点線で囲まれた部分  $G_a(s, V)$  であり，(5.7) 式で表すことができる．

$$G_a(s, V) = \frac{C_i(s, V)G_{s2}(s, V)}{1 + C_i(s, V)G_{s1}(s, V)} \quad (5.7)$$

車速を 10 m/s から 30 m/s へ変化させた際の  $G_a(s, V)$  のボード線図を図 5.4 に示す．図 5.4 より，低周波領域のゲインすなわち DC ゲインが車速により変化しているようすがわかる．図 5.5 で車速と DC ゲインの関係を詳しく見てみると，車速とともに DC ゲインが増加する傾向にあり，車速の影響度合いが大きいことがわかる．ゲインスケジューリング  $H_\infty$

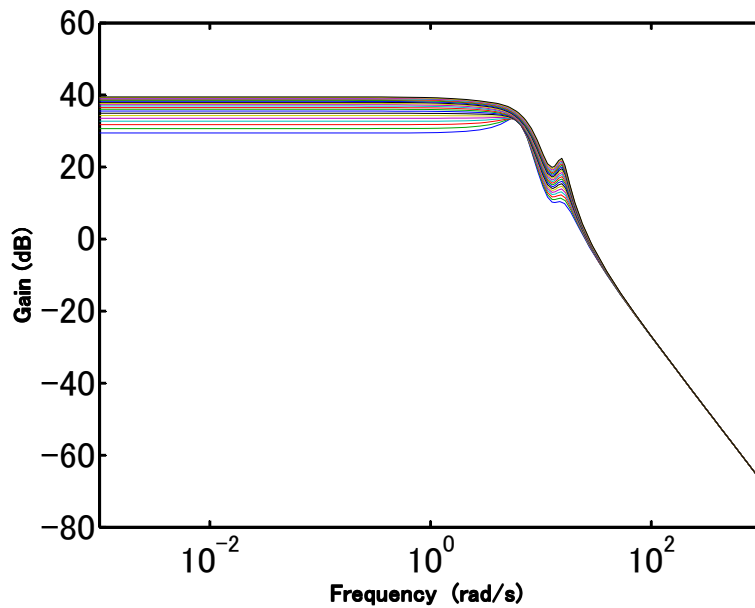
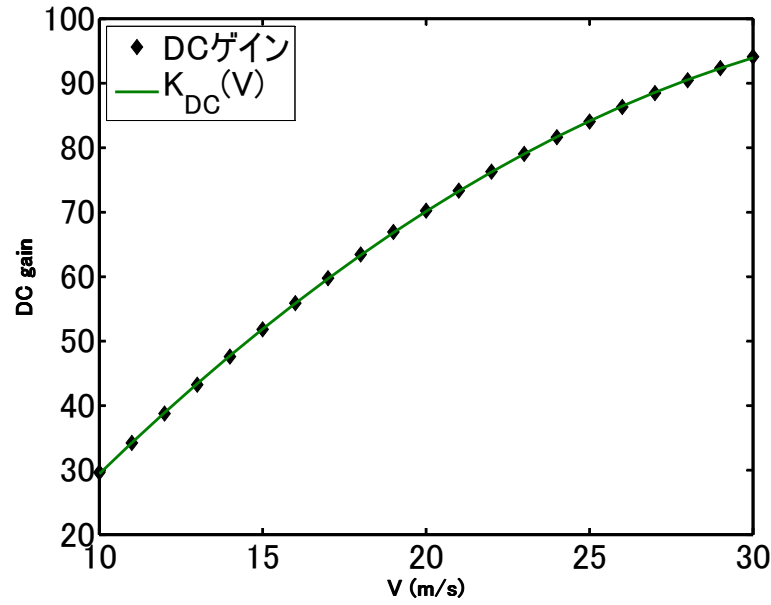


図 5.4  $G_a(s, V)$  のボード線図

図 5.5 車速  $V$  と  $G_a(s, V)$  の DC ゲインとの関係

制御器設計に際し、車速の影響度軽減による求解可能性の向上をねらいとして DC ゲイン補償器  $C_{DC}(V)$  を導入し、 $G_a(s, V)$  に DC ゲイン補償器  $C_{DC}(V)$  を加えた制御対象に対して制御器設計を行う。

はじめに、図 5.5 の車速  $V$  と  $G_a(s, V)$  の DC ゲインとの関係を多項式近似して得た近似式  $K_{DC}(V)$  と  $V = V_{\text{nom}}$  時のゲイン  $K_{DC}(V_{\text{nom}})$  を用いて、DC ゲイン補償器を

$$C_{DC}(V) = \frac{K_{DC}(V_{\text{nom}})}{K_{DC}(V)} \quad (5.8)$$

と定義する。

ここで、 $G_a(s, V)$  に DC ゲイン補償器  $C_{DC}(V)$  を含めた伝達関数

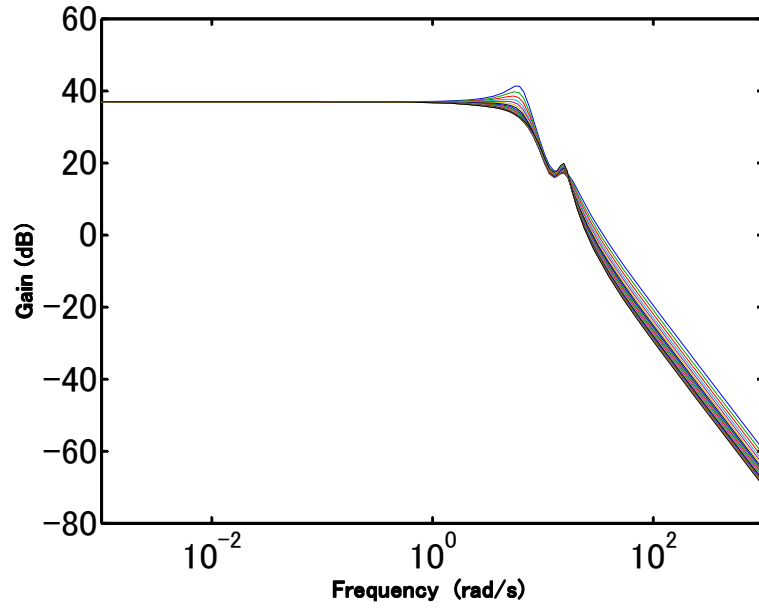
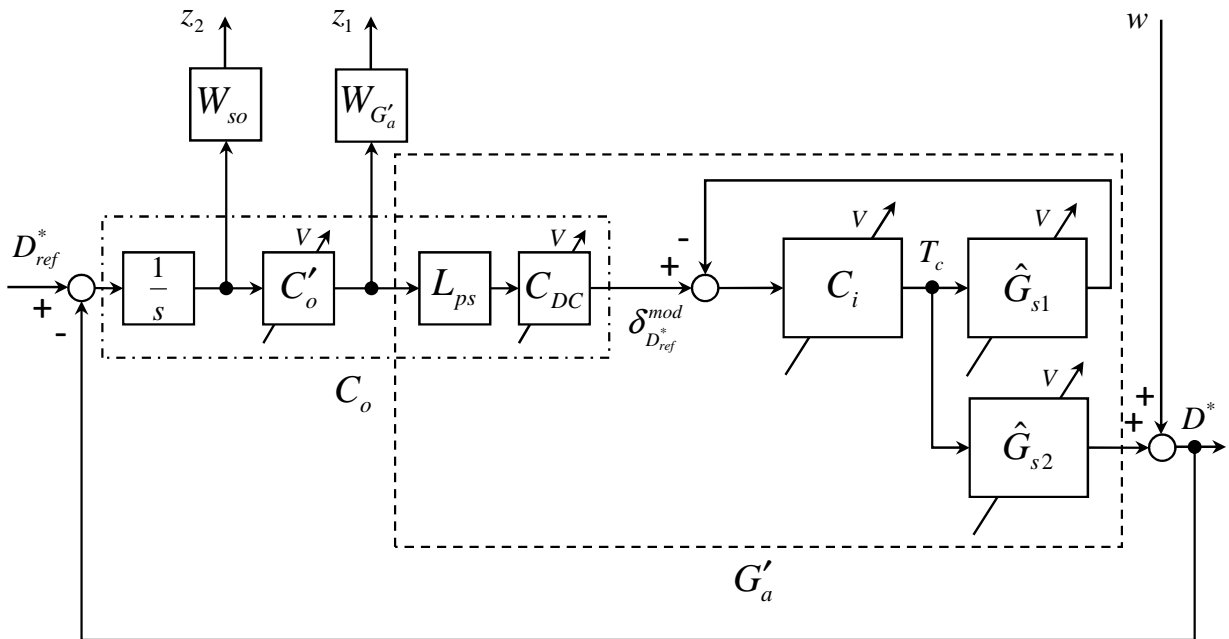
$$G'_a(s, V) = G_a(s, V)C_{DC}(V)L_{ps}(s) \quad (5.9)$$

を定義し、車速を 10 m/s から 30 m/s へ変化させた際のボード線図を図 5.6 に示す。図 5.4 と比べ、車速変化に対する DC ゲインの変動が抑制されており、DC ゲイン補償器の効果が確認できる。以降、 $G'_a(s, V)$  を新たな制御対象として制御器設計を行う。なお、(5.9) 式の  $L_{ps}(s)$  は、「入力行列にゲインスケジューリングパラメータを含まない」というゲインスケジューリング  $H_\infty$  制御器導出の前提条件を満たすために挿入している。

つぎに、 $G'_a(s, V)$  の不確かさを加法的な不確かさとして定義する。

$$G'_a(s, V) = \hat{G}'_a(s, V) + W_{G'_a}(s)\delta(s) \quad (5.10)$$

ここで、 $\hat{G}'_a(s, V)$  はノミナルモデル、 $W_{G'_a}(s)$  は重み関数を表している。さらに、目標値への追従特性を調整するための重み関数  $W_{so}(s)$  を考慮した図 5.7 の一般化プラントを考える。

図 5.6  $G'_a(s, V)$  のボード線図図 5.7  $C_o(s, V)$  設計のための一般化プラント

閉ループ系が 2 次安定かつ  $w$  から  $(z_1, z_2)^T$  までの伝達関数の  $H_\infty$  ノルムが 1 未満となるようなゲインスケジューリング  $H_\infty$  制御器  $C'_o(s, V)$  を設計後,  $C'_o(s, V)$  と積分器,  $C_{DC}(V)$ ,  $L_{ps}(s)$  を結合し,

$$C_o(s, V) = \frac{1}{s} C_{DC}(V) L_{ps}(s) C'_o(s, V) \quad (5.11)$$

を得る.

### 5.2.6 出力制限値

本項では、 $D^*$  フィードバック制御器  $C_o(s, V)$  の出力制限を行うリミッタの上下限値の設計方法について述べる。

先に述べたとおり、図 5.2 の  $M_{\delta_{D^*_{ref}}}$  は、ハンドル舵角から前輪舵角目標値を算出する役割をもち、従来の機械式ステアリング装置のギア比に相当している。しかしながら、乗車人数、積載重量や路面状況によって車両の運動特性が変化するため、操舵角フィードバックのみの場合、ドライバが状況に応じてハンドル舵角を適宜補正し、車両挙動を制御しなければならない。これに対し、 $D^*$  フィードバック制御を併用し、参照モデル  $M_{D^*_{ref}}(s, V)$  の出力に基づき前輪舵角目標値を適宜補正することで、ドライバが体感する車両運動特性の変化を低減し、運転負荷軽減を図っている。しかし、ドライバ操作から大きく乖離した過度な補正は逆にドライバを混乱させる可能性があるため、補正量はある範囲、すなわちドライバに違和感を感じさせない範囲に制限することが必要である。

一方、周知のとおりフィードバック制御は、目標値とセンサで検出した実値の比較に基づいて行われる制御であり、センサ故障時は目標値と実値が一致せず制御入力が増大または過小となり、ドライバ操作から大きく乖離した動作を招く恐れがある。センサ故障検出後、フィードバックループを切り離せば上記懸念はないように思われるが、誤検出を防ぐために設けられた数ミリ秒から数秒の故障確定時間内に補正量が急増または急減し、切り離しまでの間に危害に至る可能性がある。よって、予測不能な突発故障の発生に備え、常時補正量を監視し、ある範囲、すなわちドライバが修正可能な範囲に制限することが必要である。

以上より、センサ故障の有無に関わらず、ドライバ操作と補正量の乖離を防ぐ仕組みは常時必要であるため、 $D^*$  フィードバック制御器  $C_o(s, V)$  の出力制限を目的としたリミッタを常設する。リミッタの上下限値は、ドライバが受容可能な補正量の上下限値に相当している。なお、操舵系に影響を及ぼす故障は、発生からミリ秒オーダー以内での処置が必要であるため、常時リミッタを有効にしておくことは、突発故障の発生に備える上で本質的に重要である。

リミッタの上下限値  $S_{\max}$ ,  $S_{\min}$  は、以下の式を満たすように決定する。

$$S_{\max} \geq \max_{V_{\min} \leq V_d \leq V_{\max}} \left\{ G_{D^*\delta}^{\infty}(\mathbf{v}_d) - \hat{G}_{D^*\delta}^{\infty}(\mathbf{v}_d) \right\} D_{\max}^*(V_d) \quad (5.12)$$

$$S_{\min} \leq \min_{V_{\min} \leq V_d \leq V_{\max}} \left\{ G_{D^*\delta}^{\infty}(\mathbf{v}_d) - \hat{G}_{D^*\delta}^{\infty}(\mathbf{v}_d) \right\} D_{\max}^*(V_d) \quad (5.13)$$

ここで、 $\mathbf{v}_d = (V_d, 1/V_d)$  であり、 $G_{D^*\delta}^{\infty}(\mathbf{v}_d)$  は (5.14) 式で与えられ、 $D^*$  から  $\delta_{D^*_{ref}}^{mod}$  間の DC

表 5.1 設計速度と最小曲率半径の関係（出典：道路構造令第十五条より）

設計速度 (km/h)	最小曲率半径 (m)
120	710
100	460
80	280
60	150
50	100
40	60
30	30
20	15

ゲイン,  $\hat{\cdot}$  はノミナル値を意味している. また,  $V_{\max}$ ,  $V_{\min}$  は, ゲインスケジュール  $H_{\infty}$  制御器  $C_i(s, V)$ ,  $C_o(s, V)$  設計時に考慮した車速変動領域の上下限值,  $D_{\max}^*(V_d)$  は,  $D^*$  の最大値であり, たとえば道路法に基づき制定された道路構造令の第十五条で定められている表 5.1 の設計速度と最小曲率半径の関係などから算出することができる.

$$G_{D^*\delta}^{\infty}(\mathbf{v}_d) = \frac{C_{s1}A^{-1}(\mathbf{v}_d)B_1}{C_{s2}(\mathbf{v}_d)A^{-1}(\mathbf{v}_d)B_1} \quad (5.14)$$

以上より, (5.12), (5.13) 式の右辺は, あらかじめ想定した走行条件下における, 目標舵角  $\delta_{D_{ref}^*}$  と補正後目標舵角  $\delta_{D_{ref}^*}^{mod}$  の定常偏差の最大, 最小値を表しており, 過渡時の挙動は考慮されていないことに注意する. そのため,  $S_{\max}$ ,  $S_{\min}$  とともに, 過渡時の一時的な操作量の増加を見込んで設定する必要がある. また,  $S_{\max}$  をより大きく,  $S_{\min}$  をより小さくするほど Steer-by-Wire の操作自由度は高まるが, その反面センサ故障時の危険性が高くなるということを忘れてはならない. 性能と安全性との間に存在するトレードオフを把握した上, あらゆる走行環境下で実車テストを行い, 適切な値を見極める作業が必須となる.

### 5.2.7 ロバスト安定性解析

本項では, 前項で設計したリミッタを含む耐故障制御系のロバスト安定性解析を行う. リミッタは, 図 5.8 に示すようなセクタ条件で表すことができるため, 以下の加法的不確かさに帰着する.

$$f_s = \kappa_{s\_nom} + w_{ss}\delta_{ss} \quad (5.15)$$

ここで,

$$\kappa_{s\_nom} = \frac{\kappa_{s\_max} + \kappa_{s\_min}}{2}, w_{ss} = \frac{\kappa_{s\_max} - \kappa_{s\_min}}{2}$$

であり,  $\delta_{ss}$  は実数変動を表し,  $|\delta_{ss}| \leq 1$  を満たす.



### 5.3 評価結果

表 2.2 に示すパラメータをもつ車両に対し，5.2 節に示した設計法を適用して制御効果を検証する．なお，シミュレーションでは，プラントとして (2.5)，(2.6) 式に代わり非線形タイヤモデル (2.7)，(2.8) 式を用いた．(2.7)，(2.8) 式中のパラメータ  $k_f$ ， $k_r$  は，走行する路面の摩擦係数に対応した係数であり，シミュレーションでは，乾燥路相当の値  $k_f = 9$ ， $k_r = 15$  とした [45]．

#### 5.3.1 耐故障制御系設計

制御系設計時に考慮するパラメータ変動範囲を定義する．車速変動範囲は， $V_{\min} = 10$  m/s， $V_{\max} = 30$  m/s とし，変化率を， $-4 \text{ m/s}^2 \leq dV/dt \leq 4 \text{ m/s}^2$  とする．車速以外のパラメータ  $m$ ， $J$ ， $J_s$ ， $C_s$ ， $K_f$ ， $K_r$  の変動範囲は，表 2.2 の値に対し， $m$ ， $J$ ， $J_s$ ， $C_s$  は  $\pm 10\%$  以内， $K_f$ ， $K_r$  はタイヤの非線形特性を考慮して  $\pm 20\%$  以内とする．

はじめに，操舵角フィードバック制御器を設計するにあたり，全ての変動の組み合わせに対する  $G_{s1}(s, V)$  の不確かさ  $\Delta_{G_{s1}}(s, V) = G_{s1}(s, V) - \hat{G}_{s1}(s, V)$  を覆う (5.3) 式の重み関数  $W_{G_{s1}}(s)$  を以下のように定義する．

$$W_{G_{s1}}(s) = \frac{0.0025s^3 + 0.0196s^2 + 0.1381s + 0.4379}{s^3 + 22.4s^2 + 238s + 2494.9} \quad (5.16)$$

$W_{G_{s1}}(s)$  と  $\Delta_{G_{s1}}(s, V)$  の関係は，図 5.10 に示すとおりである．(5.16) 式と目標値追従特性を調整する重み  $W_{si}(s) = 1$  を用いて図 5.3 の一般化プラントを構築し，ゲインスケジュー

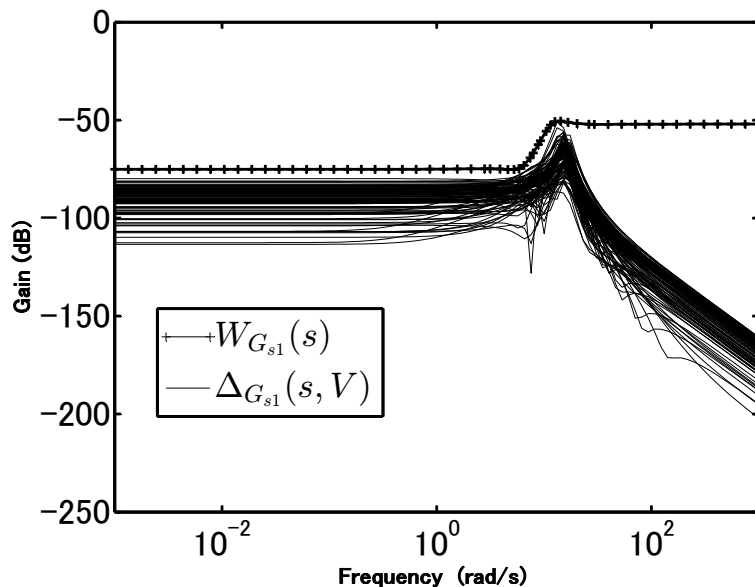


図 5.10  $W_{G_{s1}}(s)$  と  $\Delta_{G_{s1}}(s, V)$  の関係



リング  $H_\infty$  制御器  $C'_i(s, V)$  を設計後, (5.6) 式より操舵角フィードバック制御器  $C_i(s, V)$  を得た.

つぎに,  $D^*$  フィードバック制御器を設計するにあたり, DC ゲイン補償器の設計を行う. 図 5.5 に示した車速  $V$  と  $G_a(s, V)$  の DC ゲインとの関係を多項式近似した結果, 近似式

$$K_{DC}(V) = -0.0845V^2 + 6.605V - 28.1835 \quad (5.17)$$

を得た.  $V_{\text{nom}} = 20 \text{ m/s}$  とすると  $K_{DC}(V_{\text{nom}}) = 70.1328$  となり, DC ゲイン補償器は以下となる.

$$C_{DC}(V) = \frac{K_{DC}(V_{\text{nom}})}{K_{DC}(V)} = \frac{70.1328}{-0.0845V^2 + 6.605V - 28.1835} \quad (5.18)$$

全ての変動の組み合わせに対する  $G'_a(s, V)$  の不確かさ  $\Delta_{G'_a}(s, V) = G'_a(s, V) - \hat{G}'_a(s, V)$  を覆う (5.10) 式の重み関数  $W_{G'_a}(s)$  を以下のように定義する.

$$W_{G'_a}(s) = \frac{98.9445s^2 + 348.693s + 172.1591}{s^2 + 10.1973s + 6.0858} \quad (5.19)$$

$W_{G'_a}(s)$  と  $\Delta_{G'_a}(s, V)$  の関係は, 図 5.11 に示すとおりである. (5.18), (5.19) 式と前提条件を満たすために必要な (5.20) 式の Low pass filter  $L_{ps}(s)$ , および目標値追従特性を調整する重み  $W_{so}(s) = 1$  を用いて図 5.7 の一般化プラントを構築し, ゲインスケジューリング  $H_\infty$  制御器  $C'_o(s, V)$  を設計後, (5.11) 式より  $D^*$  フィードバック制御器  $C_o(s, V)$  を得た.

$$L_{ps}(s) = \frac{1}{0.01s + 1} \quad (5.20)$$

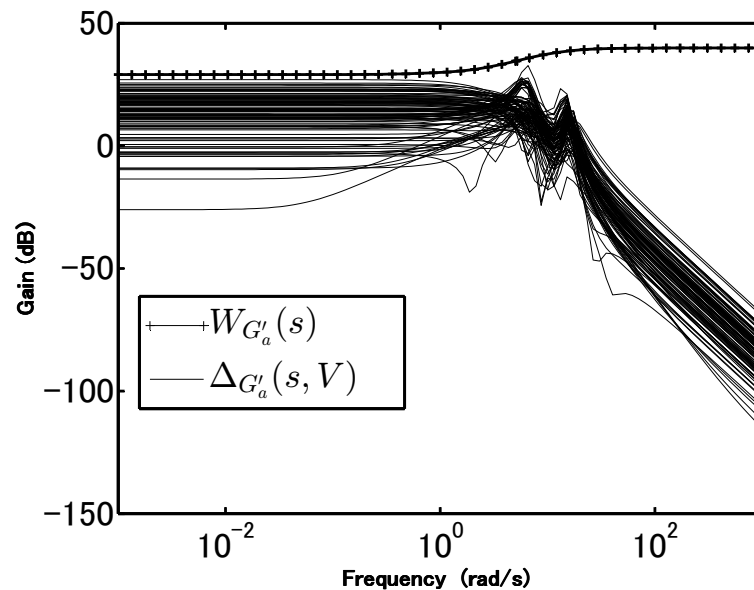


図 5.11  $W_{G'_a}(s)$  と  $\Delta_{G'_a}(s, V)$  の関係

最後に、リミッタの上下限値の設計について述べる．表 5.1 の設計速度と最小曲率半径との関係より、各速度と  $D^*$  最大値との関係はほぼ線形であり、速度が低下するほど  $D^*$  の最大値が増加する傾向にあることがわかる．この関係を使って各車速に対する  $D^*$  最大値を算出し、(5.12)、(5.13) 式により判定しきい値を計算した結果、 $S_{\max} = 0.012$ 、 $S_{\min} = -0.012$  とした．

ここで、以上で設計した耐故障制御系のロバスト安定性解析を行う．過渡挙動を考慮した場合、補正量  $\Delta\delta_{D_{ref}^*}^{in}$  が  $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$  に対し最大 40% 程度超過すると想定し、図 5.8 において  $\kappa_{s_{\max}} = 1$ 、 $\kappa_{s_{\min}} = 0.7$  とした．さらに、(5.21) 式の  $W_{G_a}(s)$  を用いて図 5.9 の  $(w_1, w_2)^T$  から  $(z_1, z_2)^T$  までの伝達関数の構造化特異値 ( $\mu$  値) を計算すると 1 未満であることが確認でき、耐故障制御系はロバスト安定であるといえる．

$$W_{G_a}(s) = \frac{3358.2s + 51770}{s^3 + 15.6129s^2 + 180.4435s + 845.7755} \quad (5.21)$$

### 5.3.2 シミュレーション結果

半径 250 m の円軌道を  $V = 20$  m/s で定常円旋回中にヨーレートセンサ故障 ( $\gamma = 0$ ) が発生し、正しい  $D^*$  値が得られなくなった場合を例に挙げて制御効果を検証する．ただし、横加速度センサは正常とする．具体的には、シミュレーション（円旋回）開始から 10 s 後に  $\gamma = 0$  となる故障が発生し、2 s 後に故障を検出した後、 $D^*$  フィードバック制御ループを切り離し、操舵角フィードバックのみで円旋回を継続する走行パターンを考える．なお、定常円旋回では横すべり角の時間変化がない ( $\dot{\beta} = 0$ ) ため、(2.11) 式の  $D^*$  は、(5.22) 式となり、車速  $V$  と旋回半径  $R$  で決まる．よって、 $V = 20$  m/s、 $R = 250$  m の定常円旋回時の目標値は、 $D_{ref}^* = 1.6$  となる．

$$D_{ref}^* = V\gamma = \frac{V^2}{R} \quad (5.22)$$

シミュレーション結果を図 5.12～5.15 に示す．図 5.12 に示すとおり、 $t = 10$  s 時に  $\gamma = 0$  となるセンサの突発故障が発生し、 $D^*$  値が急激に減少しているようすがわかる． $t = 10$  s 以降は、正常である横加速度センサの変化にともない  $D^*$  値に変化が見られるが、ヨーレート成分が反映されておらず、正しい  $D^*$  値が得られていないことに注意する．

図 5.13 にハンドル舵角から算出した前輪舵角目標値  $\delta_{D_{ref}^*}$ 、 $D^*$  フィードバック制御により補正された前輪舵角目標値  $\delta_{D_{ref}^*}^{mod}$  と実前輪舵角  $\delta$  との関係を示す．シミュレーションでは、車両モデルの前輪のコナリングフォースを+10%、後輪のコナリングフォースを-10%とし、制御器設計時に使用したモデルに比べオーバステア傾向に設定したため、補正後の目

標値は、ハンドル舵角から算出された目標値よりも少ない舵角，すなわち  $\delta_{D_{ref}^*}^{mod} < \delta_{D_{ref}^*}$  となるよう補正され，目標値  $D_{ref}^*$  に追従しているようすがわかる．

図 5.14 にリミッタの入出力の挙動を示す． $D^*$  フィードバック制御器  $C_o(s, V)$  の出力と前輪舵角目標値  $\delta_{D_{ref}^*}$  との差分，すなわち舵角補正量に相当するリミッタへの入力  $\Delta\delta_{D_{ref}^*}^{in}$  は， $t = 10$  s でセンサ故障が発生した後，急激に増加している．センサ故障により  $D^*$  が目標値  $D_{ref}^*$  に一致しないため，制御器  $C_o(s, V)$  が操作量を増大させていることを意味している．一方，リミッタの出力  $\Delta\delta_{D_{ref}^*}^{out}$  は，リミッタの上限値  $S_{max}$  でガードされるため，図 5.13 に示すとおりの最終的な前輪舵角  $\delta$  の増加は抑制される． $t = 12$  s で故障を検出した後， $D^*$  フィードバック制御ループを切り離すため，前輪舵角  $\delta$  は， $\delta_{D_{ref}^*}$  を目標値とした追従制御を行う．よって，ハンドル舵角から前輪舵角が決定する機械式ステアリング装置と同等の動きとなり，補正は加えられないものの，ドライバの意図にしたがい円旋回を継続していることが図 5.15 からわかる．一方，耐故障制御系が実装されていない場合は，第 2 章で述べたとおり目標円軌道から外れ，急旋回してしまう．

なお，本シミュレーションでは耐故障制御系の挙動を検証することが目的であるため，故障発生前後でドライバの操作は不変としている．そのため， $D^*$  フィードバック制御ループを切り離した後は，前輪舵角目標値が補正されず，図 5.15 において 250 m よりも若干小さい曲率半径での円旋回となっているが，ドライバの操作を考慮すれば容易に修正可能な範囲である．

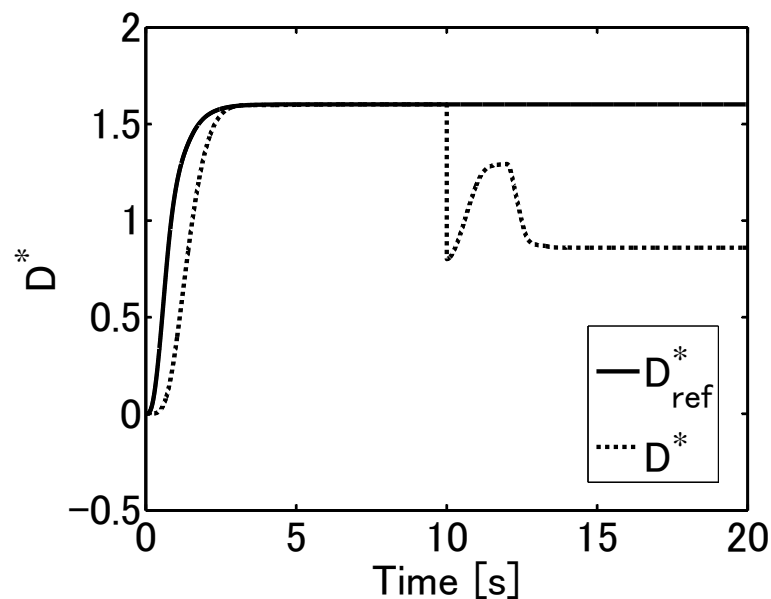


図 5.12  $D^*$  出力

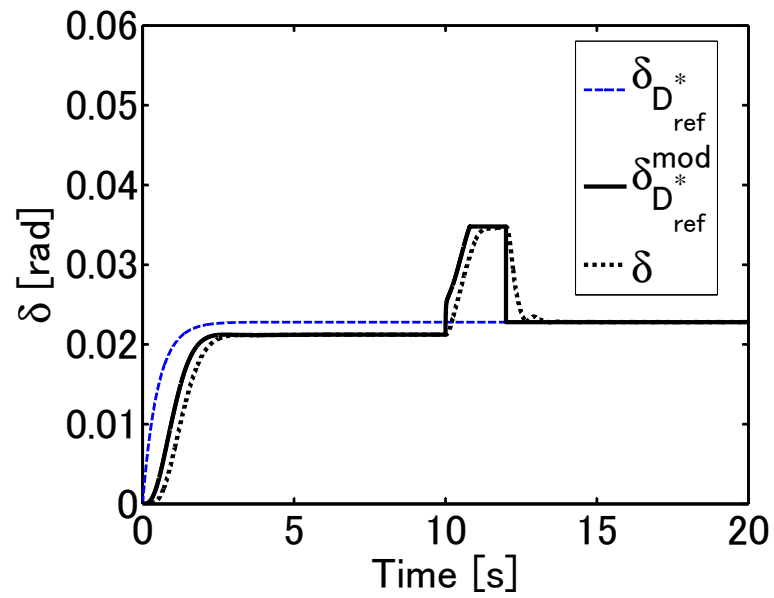
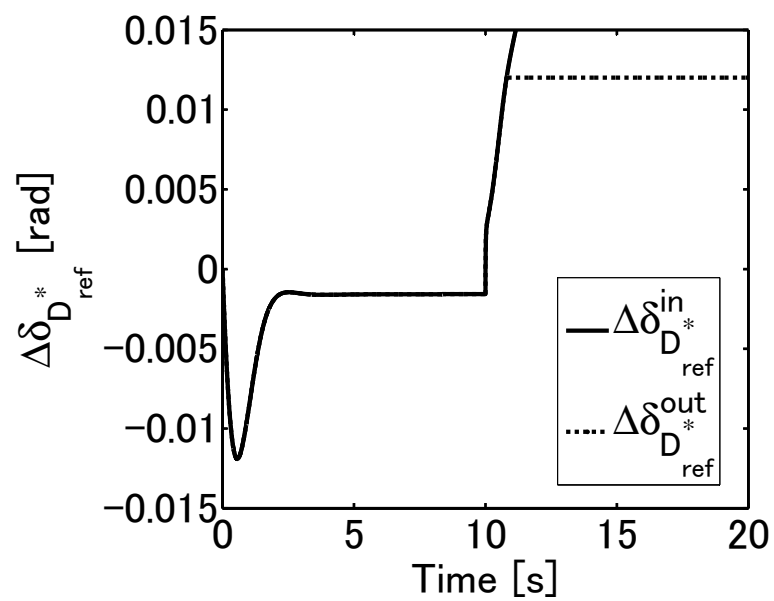
図 5.13 前輪舵角  $\delta$ 

図 5.14 リミッタ入出力

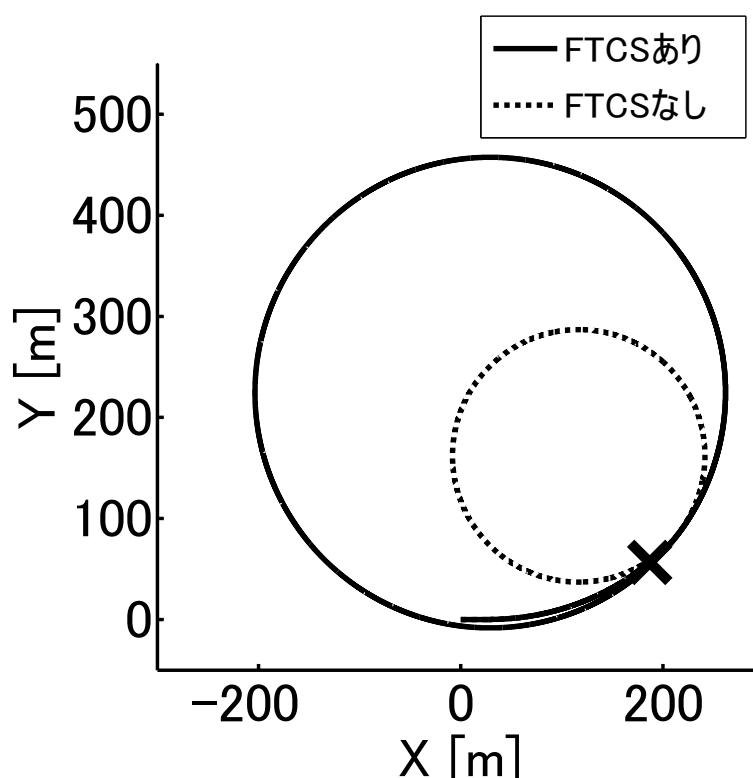


図 5.15 X-Y 平面上の車両挙動（耐故障制御系（Fault Tolerant Control System : FTCS）有無の比較．“×”印は故障発生地点を表す．）

## 5.4 まとめ

本章では，センサの突発故障に対する耐故障制御系とその設計法を提案した．全てのセンサの冗長化を回避するため，センサ故障が及ぼす安全性への影響度合いを考慮し，**Steer-by-Wire**の制御機能を，センサ故障後も維持すべき基本機能と維持する必要のない付加機能に分割した．前者に対しては従来どおりの冗長化，多数決選択手法を，後者に対してはリミッタによる制御器の出力抑制と故障検出後の制御ループ切断により，基本機能を担う制御系へ与える影響の軽減を図った．シミュレーション結果より，センサ故障発生前後で車両挙動が急変することなく走行が継続できており，上記処理が効果的に働きセンサ故障に対処できていることがわかる．

第3，4章で検討した耐故障制御系では，故障の影響に加え，車両重量，路面状況などによる車両特性変化も含めて補償し，アクチュエータ故障後もドライバの操作負荷軽減を維持することを目指した．そのため，アクチュエータ毎に目標値に対する制御量の過不足を補償するというミクロな視点ではなく，ドライバ要求と車両挙動を一致させるというマクロな視点で問題を捉え，モータトルクなどのアクチュエータ挙動を直接監視するのではなく，アクチュエータ動作から決まる最終的な車両挙動（ $D^*$ ）を監視し，必要な補償を行っ

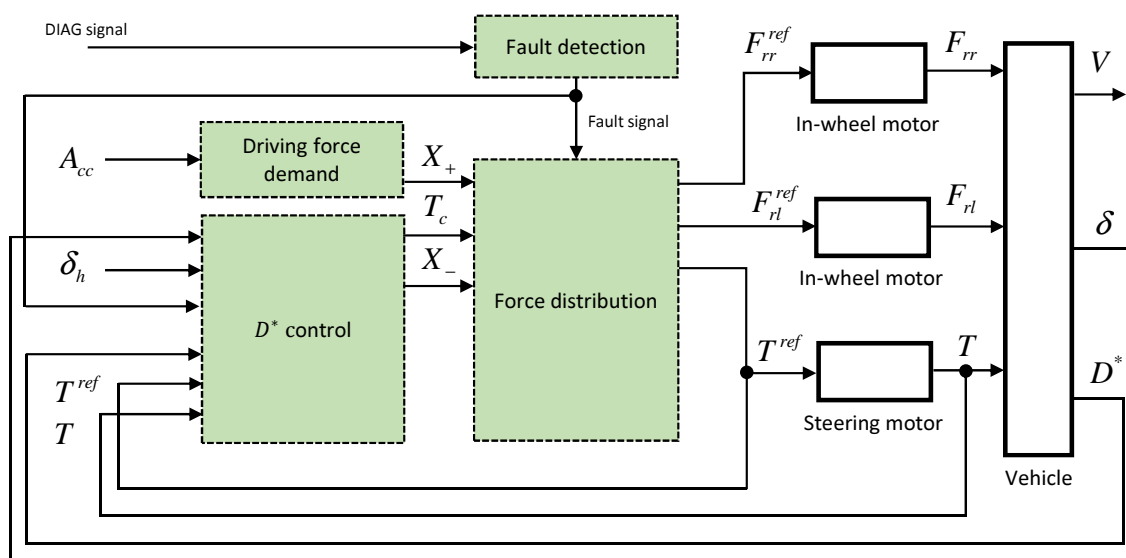
た．一方，5.1節で述べたとおり，車両挙動レベルの信号は多数のセンサ情報を組み合わせて算出されることが多く，信号の確からしさを保証するためには算出に必要な全てのセンサの冗長化が必須となる．よってセンサ故障対策の視点では，基本機能の実現に必要なアクチュエータ動作を直接監視して補償する方が，冗長化するセンサを限定できるため利点があるといえる．

上記考察より，アクチュエータ，センサの両故障に対応した耐故障制御系の一例として図5.16に示す制御系が考えられる．図5.16において，図示していないがインホイールモータ，ステアリングモータのトルク（電流）と前輪舵角 $\delta$ を検出するためのセンサは冗長化され，従来どおりの耐センサ故障対策が施されているものとする．また，アクチュエータ動作を直接監視することを明示するため，各アクチュエータの目標値 $F_{rr}^{ref}$ ， $F_{rl}^{ref}$ ， $T^{ref}$ と出力 $F_{rr}$ ， $F_{rl}$ ， $T$ を区別して表記した．図5.16(b)の $C_{TX-}(s, V)$ は，(4.2)式の $G_1(s, V)$ ， $G_2(s, V)$ のノミナルモデルを用いた(5.23)式の補償器であり， $D^*$ を実現するためのステアリングモータトルクを左右制駆動力差に換算する役割を担う．

$$C_{TX-}(s, V) = \frac{\hat{G}_1(s, V)}{\hat{G}_2(s, V)} \quad (5.23)$$

第3，4章では，ステアリングモータの故障を補償する左右制駆動力差の操作量を，車両挙動の目標値 $D_{ref}^*$ と実測した $D^*$ の偏差により決定したが，図5.16では，冗長化するセンサを限定するため，ステアリングモータトルクの目標値 $T^{ref}$ と実測したトルク $T$ （電流より算出）から決定している．アクチュエータ挙動を直接監視するため， $D^*$ の算出に必要なヨーレートセンサ，横加速度センサの冗長化は不要となるが，ステアリングモータ故障後は，不足したステアリングモータトルク分に対応した左右制駆動力差が補償器により車両へ印加されるものの，目標値 $D_{ref}^* \rightarrow D^*$ を一致させる操作はドライバが行わなければならない．すなわち「曲がる」の基本機能は確保されるが，車両特性変化に応じた舵角補正など，ドライバ操作負荷軽減を担う付加機能は確保されないことを意味している．

搭載スペース，重量やコストなど制約の多い自動車に対しては，アクチュエータ，センサ故障時に付加機能まで維持，継続するのは現実的に困難な場合が多い．本章で提案した耐故障制御系は，特に小型車，低価格帯車に適していると考える．アクチュエータ，センサ両故障に対応した制御系の設計法の確立，安定性解析やケーススタディは今後の課題である．



(a) 全体構成

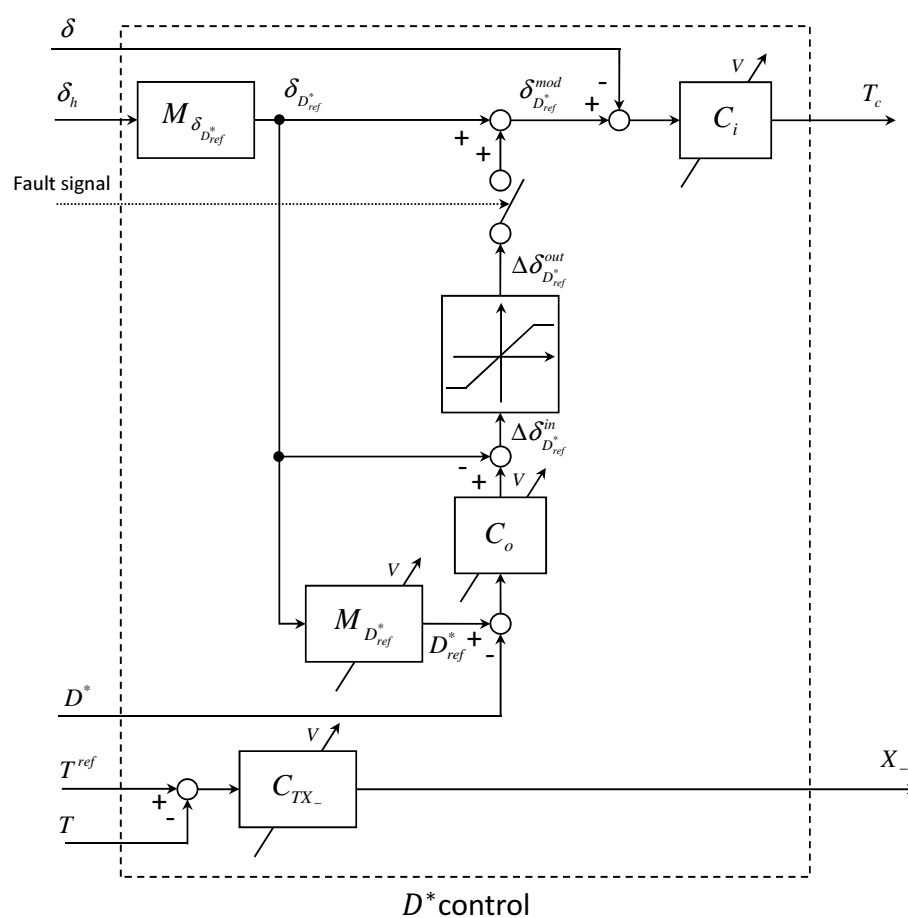
(b)  $D^*$  制御部詳細

図 5.16 アクチュエータ・センサの両故障に対応した耐故障制御系例





## 第6章 結言

### 6.1 研究のまとめ

本研究では、Steer-by-Wire と左右後輪にインホイールモータを搭載した電動車両を題材とし、アクチュエータおよびセンサ故障に対して、車両に潜在する冗長性を活用した耐故障制御系とその設計法を提案した。故障時のバックアップのためにコンポーネント単位で構成部品を冗長化し、安全性を確保する従来手法から脱却するため、車両全体を俯瞰し、性能や利便性の向上を目的に導入されたシステムや人間と電子制御の間に潜在する冗長性を活用するというアプローチで耐故障制御系設計問題に取り組んだ。その結果、ISO26262 が ASIL-C または ASIL-D といった高いリスクを有する X-by-Wire システムに対して要求する「冗長化設計とフェイルソフト機能」を、バイワイヤ化の利点を損なうことなく達成する耐故障制御系を得た。さらに設計プロセスの面でも、従来の後付け的な安全設計手法を見直し、ISO26262 が提唱する制御系設計初期段階から性能と安全性の両要件を考慮した手法を与えた。

アクチュエータ故障に対しては、自動車の基本機能「曲がる」、「走る」を担う操舵、駆動系の故障に対応可能な耐故障制御系を構築した。操舵系故障に対しては、左右輪に独立配置したインホイールモータの旋回モーメント発生という潜在能力を、駆動系故障に対しては、片輪駆動と Steer-by-Wire による旋回モーメントの打ち消しという潜在能力を活用して設計を行った。さらに、駆動系故障に比べ故障発生から危険に至るまでの時間が極めて短い操舵系故障に対しては、従来の故障検出後にフェイルセーフ／フェイルソフトを行う手順ではなく、外乱オブザーバの思想を応用し、故障発生直後からフェイルソフトを行い安全性を確保した後、故障検出するよう設計した。

センサ故障に対しては、制御系を構成する全てのセンサに同一の故障対策を施すのではなく、故障が車両の制御や操作に与える影響度に応じた対策を行い、過度な冗長化を防ぐというアプローチで取り組んだ。具体的には、電子制御の役割を自動車の運転に最低限必要な基本機能と、ドライバの操作負荷軽減や走行・環境面などの車両性能向上を担う付加機能に分け、各々別の制御系として構築し、制御系毎に異なるセンサ故障対策を講じた。基

本機能に關与するセンサに対しては、故障後も基本機能が維持できるよう、従来どおりの冗長化、多数決選択手法を適用した。一方、付加機能に關与するセンサに対しては、故障後の付加機能の維持は行わないとし、制御器の出力抑制や制御ループの切断により、基本機能へ及ぼす悪影響を抑制および遮断する対策とした。すなわち、センサを冗長化する代わりに、自動車の運転に必要な「認知」行為に潜在する人間（ドライバ）と電子制御間の冗長性を活用し、センサ故障後は、ドライバによる「認知」、「判断」と基本機能により実現される「操作」で走行を継続するという考え方である。上記対策により、センサ故障後は、路面や車両状態に応じてドライバによるハンドル補正操作が必要になるものの、従来の機械式ステアリング装置と同等な「ハンドル操作に比例して、車輪舵角が変化する」という最低限の機能が提供されるため、「曲がる」の機能が確保される。

以上、本研究では、アクチュエータ、センサ故障に焦点を当て議論してきたが、制御系を実装し、「判断」の役割を担う MPU の故障については触れなかった。MPU の故障対策は、ドイツの自動車部品メーカーであるロバート・ボッシュが提案する 3 レベルコンセプト<sup>1</sup>がデファクトスタンダードになっている。3 レベルコンセプトでは、制御系実装用とは別に故障診断用の MPU を用意し、両者の間で相互監視することを基本動作としている。具体的には、故障診断する対象を、MPU に実装された制御機能全般を包括的に診断する機能に限定し、この機能が実装された記憶エリア（Read Only Memory : ROM/Random Access Memory : RAM）の読み出し・書き込みや処理フローのチェックと、2 つの MPU 間で質問、回答といった手順を繰り返すことでインストラクションチェックを行い、MPU の故障検出を行う。MPU 故障でフェイルセーフ機能も同時に失われる可能性を考慮し、故障診断用の MPU 側にもフェイルセーフ機能を有している。電子スロットルのように、MPU 故障時にモータの電流遮断のみで安全性確保が可能なシステムでは、故障診断用の MPU はアクチュエータ停止のためのデジタル出力を有していれば十分であるため、ロジック IC など安価なデバイスで構成することも多い。一方、本研究で題材とした Steer-by-Wire などモータの電流遮断のみでは安全性確保が困難なシステムでは、MPU 故障発生後も高度なフェイルソフト機能を維持する必要があるため、制御系実装用 MPU の冗長化や他システムの MPU に機能を分散配置するなどの処置をした上、3 レベルコンセプトの適用箇所を決定しなければならない。

本研究で提案した耐故障制御系において MPU 故障を考慮した場合、図 6.1、6.2 に示すような ECU 構成と機能配置が考えられる。

図 6.1 は集中型の制御方式であり、車両制御を統括する集中制御コントローラ（Vehicle

<sup>1</sup>付録 B 参照

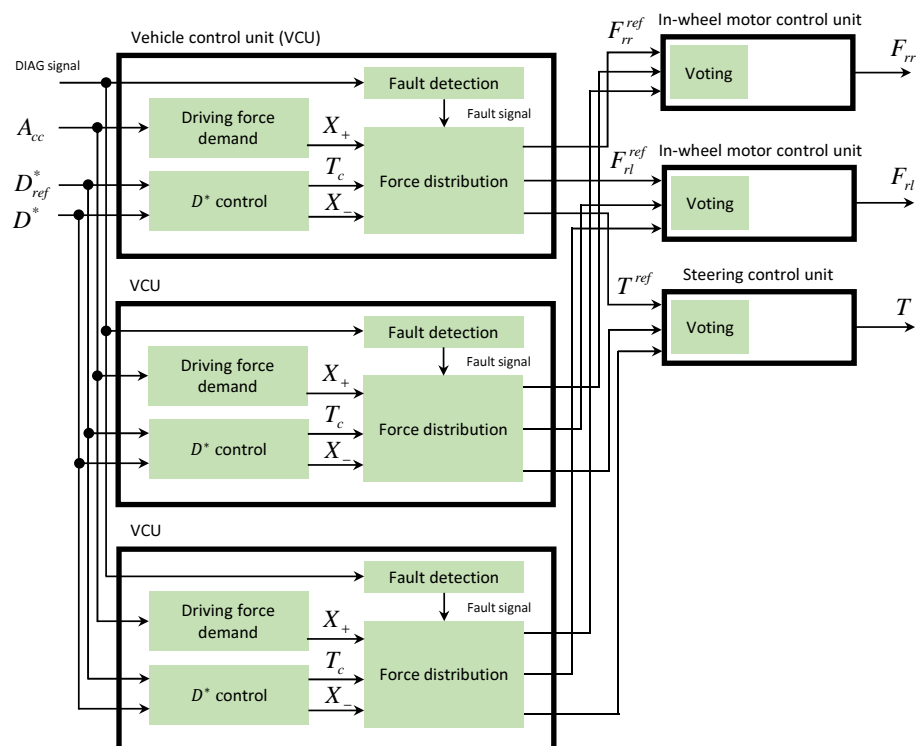


図 6.1 集中型制御方式

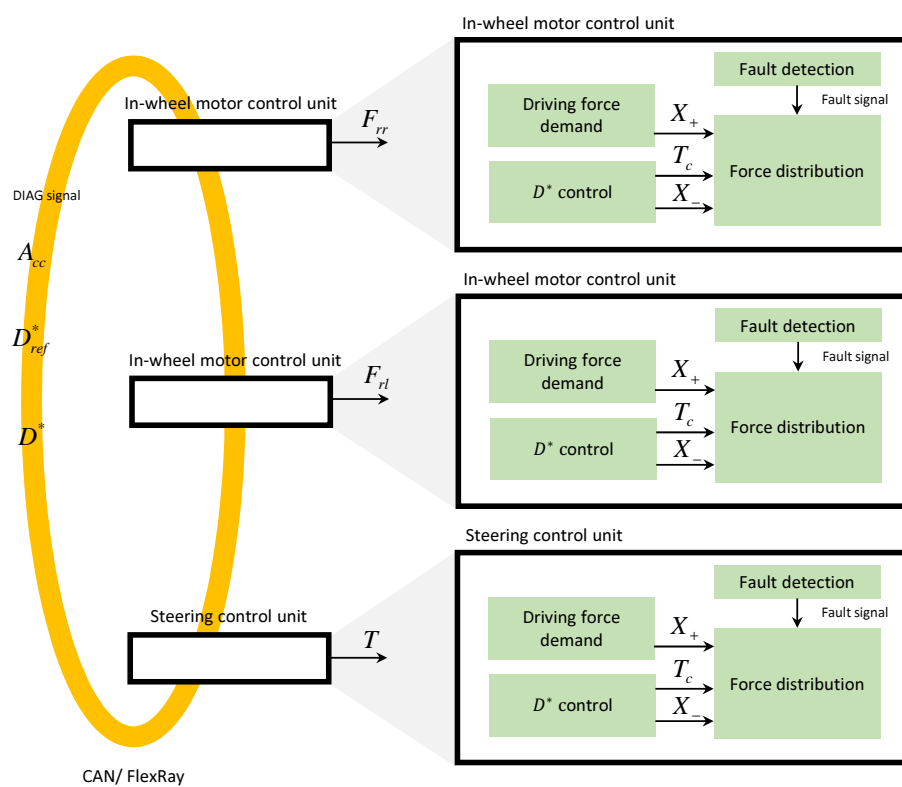


図 6.2 分散型制御方式

Control Unit : VCU) を設け、VCU 内に駆動力要求部、 $D^*$  制御部、故障検出部、駆動力分配部を配置し、3 重系構成とする。インホイールモータ、ステアリングモータは各々 ECU を有し、各 VCU からの指示を受け、多数決 (図 6.1 の Voting 部) によって確からしい指令値を選択した後、動作する。航空機向けでは一般的な手法 [13] であるが、コスト、搭載スペースの制約が厳しい自動車では全ての箇所への適用は難しく、車両制御の根幹部のみとするなど限定的にせざるを得ない。なお本方式では、多数決部が実装された各アクチュエータ ECU の MPU 故障検出に 3 レベルコンセプトを適用し、MPU 故障検出時は対応するアクチュエータを停止する。VCU は 3 重系が必要となるが、各アクチュエータ ECU 内の故障診断用 MPU は安価なデバイスで実現できる。一方、図 6.2 は分散型の制御方式であり、VCU のような集中制御コントローラは設けず、インホイールモータ、ステアリングモータ ECU の各々に駆動力要求部、 $D^*$  制御部、故障検出部、駆動力分配部を分散配置し、CAN (Controller Area Network) や FlexRay などの車載通信ネットワークを介して情報を共有する。新たな ECU を追加する必要性はないが、各アクチュエータ ECU 側で耐故障制御系実装用のリソースを確保しなければならない。さらに、シリアル通信を介した情報共有や分散配置に伴う機能重複のため、各 ECU 間の同期処理も課題である。なお本方式も、インホイールモータ、ステアリングモータの各 ECU の MPU 故障検出に 3 レベルコンセプトを適用し、MPU 故障検出時は対応するアクチュエータを停止する。よって集中制御系と同様に、故障診断用 MPU は安価なデバイスで実現できる。

いずれの方式も一長一短があるため、コスト、搭載スペースや車両メーカー、部品サプライヤ間、または部品サプライヤ同士での開発分担などを総合的に鑑みたうえ、最善の手法が選択されることになる。なお、MPU 故障対策については、MPU メーカー自身に対応を求める動きが活発化してきており、ISO26262 の推奨技法を適用し、認証取得した MPU も開発されている [4,77]。今後車両メーカーや部品サプライヤは、MPU の動作補償よりも各 ECU への機能配置へ注力する必要性が増すと考えられる。

なお本研究では、ドライバは車両の運動を積極的に制御するような操舵や加減速は一切行わないという仮定のもと、耐故障制御系の動作のみに着目して故障発生時の車両挙動を検証してきた。実際は、ドライバにより適切な操舵や加減速が行われることによって、車両は目的にしたがった意味のある運動を行うのであるから、ドライバによる積極的な操作も考慮した車両挙動の検証が必要であり、今後の課題である。

さらに次のステップとしては、1.5 節で述べたとおり、一車両の枠を越え、車車間、路車間の協調を含めた交通システム全体で安全性を確保する方向へ発展させていくべきである。すなわち、一車両で安全性を確保するという従来の考え方から脱却し、コスト、搭載

スペース、重量など制約の多い車両単体で確保すべき安全性を緩和し、その分車車間、路車間の制御を介入させることで、交通システム全体として安全設計の使命である「人命の確保」を実現するという考え方である。

本研究を交通システム全体を考慮した安全設計へと発展させるにあたり、車両、交通システム間での機能分担を決めることが重要である。たとえば、故障発生後の処置の緊急度に応じて機能分担すると、車両の安全機能が最初に作用しドライバの安全を確保した後、他の車両の衝突など外部からの危険を回避するため、車車間の安全機能、路車間の安全機能の順に作用させるのが自然である。具体的には、走行中の車両に故障が発生した場合、車両自身で最低限の「曲がる」、「止まる」の機能を確保したうえで、停止車両との衝突、路上に降りたドライバの人身事故といった2次的被害を防ぐために、周辺の車両が衝突回避動作をし（図6.3）、信号機などにより他の車両の進入を防ぐ（図6.4）という一連の動作を時系列的に行い、安全性を確保するアプローチが考えられる。

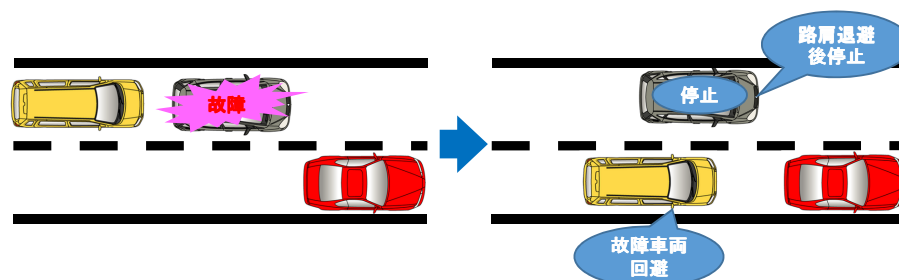


図 6.3 周辺車両の衝突回避動作（車車間の安全機能例）

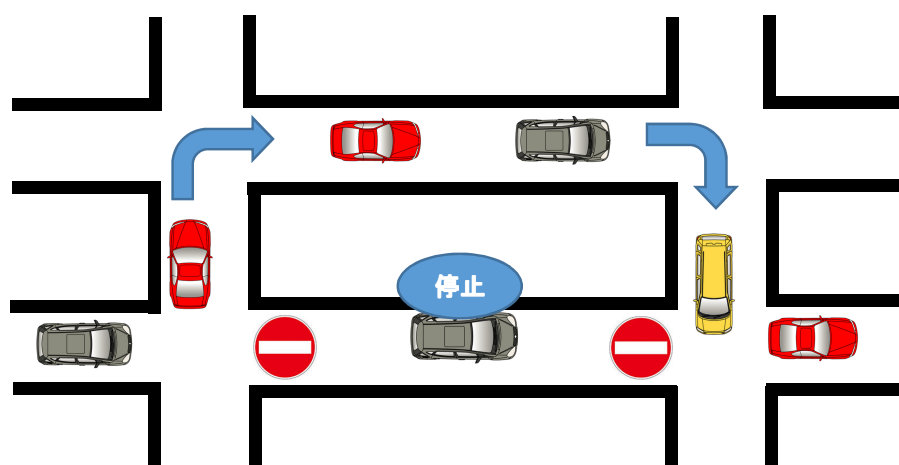


図 6.4 信号機による周辺車両の誘導（路車間の安全機能例）

本研究で提案した耐故障制御系は、上記機能分担のうち、車両の安全機能に相当するが、一車両の安全設計に焦点を当てたため、2次的被害を考慮し、故障後も退避走行ができる

ことを安全要件とした。上述したコンセプトをもつ交通システム全体での安全設計へ適用する場合は、故障発生後安全に停止できれば良く、一車両に対する安全要件は緩和される。よって、インホイールモータの片輪に故障が発生して駆動力が喪失した場合、正常駆動輪の駆動力も強制的にゼロとし、片輪駆動による意図せぬ旋回モーメントの発生を抑制するといった簡易な処置とすることも可能となる。

本研究で提案した耐故障制御系の安全要件緩和と車車間、路車間の安全機能との連携については、今後の課題である。

## 6.2 今後の展望

本論文では、安全設計視点から車両に潜在する冗長性に着目し、耐故障制御系設計に活用したが、車両を別の視点から眺めると新たな冗長性が見えてくる [78].

1 つは、駐車時の活用である。車両の平均稼働率はおおよそ 2.3% といわれており [79]、大半は駐車しているのが現状である。主目的の「移動手段」として使用される時間はわずであり、主目的以外の「駐車」が車両のライフサイクルの大半を占めていることになる。それゆえ駐車時の有効活用は、車両の付加価値向上の一躍を担うことが期待される。従来の内燃機関車両では、我々が日常生活で使用する電気、ガスなどとは別のガソリン、軽油をエネルギー源としていたが、電動車両の普及に伴い、エネルギー源は化石燃料から電気へと変わり、日常生活で使用するエネルギーとの親和性が高くなった。そのため、電動車両に搭載された蓄電池を移動可能な電源とみなすと、走行用に限らず、災害時のバックアップ電源、太陽光、風力などの自然エネルギー導入に伴う需給不均衡の調整を担うエネルギーストレージとしてのポテンシャルをもっており、新たな冗長性と考えることができる。昨今、車載蓄電池の充放電を可能にする要素技術として **Vehicle to X<sup>2</sup> (V2X)** の開発が行われている [80,81]。我々はこの技術を使い、車両をエネルギーマネジメントシステムにおけるストレージデバイスとして扱い、家庭に設置された太陽光パネルの発電電力、家庭内の電力需要と車両の使用予測に基づいて 1 日の電気料金を最小化する車載蓄電池の充放電計画立案手法を提案している [78,82–97]。

さらに、複数台の車載蓄電池を活用したサービスへと発展させるため、複数の電動車両をアグリゲータが束ね、送電会社と契約を結び、系統電力の電圧、周波数の安定化に寄与する、すなわちアンシラリーサービスへ参画するための車載蓄電池充放電計画立案手法 [98,99]

---

<sup>2</sup>X は系統電力 (Grid) であれば G, 家 (Home) であれば H, 工場 (Factory) であれば F など電力を授受する相手によって命名されている。



図 6.5 V2X を活用したエネルギーマネージメント

や、カーシェアリングを想定し、ユーザの移動要求と各ステーションに供給される太陽光などの自然エネルギーの有効活用の両立を目指した配車アルゴリズムなど、交通システムとエネルギーマネージメントシステムの融合方法について様々な角度から検討していく予定である。

また、車載蓄電池を充電する際に、蓄電池を充電する電力に加え、コンプレッサやヒートポンプを動かすための電力を上乗せして充電器から供給し、出発前に車室内の冷暖房や商用車の冷凍、冷蔵室の保冷を行うプレ空調 [82, 84] や、走行モータ駆動用の AC/DC コンバータを車載蓄電池充電時の AC/DC 変換にも使用するなど、車両と地上施設がつながることで新たな冗長性が生まれ、お互いのリソースを相互活用する取り組みも行われている。

上述した駐車時に限らず、主目的の「移動手段」として使用する際も視点を変えることで新たな冗長性を見出すことができる。第 5 章で述べたとおり、安全性や利便性の向上を目指し、現在の自動車には車両周辺環境を計測するためのセンサが多数搭載されている。交通システムをはじめ、セキュリティや気象システムなどでこれらの車載センサを移動センサとして活用する「プローブカー」なる概念が提唱されている [100]。セキュリティシステムでは、ドライブレコーダの画像と全地球測位システム（Global Positioning System : GPS）の情報を組み合わせて移動防犯カメラとして活用したり、気象システムでは、オートワイパ用のレインセンサやオートライト用の日射センサと GPS 情報を組み合わせて、各地点の降雨量や天候を把握するなどの方法が考えられる。莫大なコストを掛けることなく、従来の定点式観測より高い網羅性を実現する可能性を秘めている。

このように様々なシステムの立場に立ち、車両のもつ機能を複眼的な視点で捉えることで、車両に潜在する冗長性を見出すことができ、新たな魅力創出につながる。特に電動車両は、従来の内燃機関車両と航続距離の面で比較されることが多いが、上述したように駐車時の活用などを考えれば、内燃機関車両にはない魅力を有している。

自動車の大衆化の象徴となった T 型フォードの登場からわずか 100 年程の現代，既に自動車単体の機能はほぼ完成の域に達しており，新たな魅力を創出するのは困難な時代に突入している．新たな魅力創出のためには，交通システムのみならずエネルギーマネジメントシステムなど，様々なシステムにおける異種多様な視点で車両を捉え，キーデバイスとしての立ち位置を見出すことが重要であると考え．換言すると，システムの中で自動車の魅力，価値を創出していく方向に進んでいくべきである．よって，安全，性能要件のいずれにせよ，システム視点の実現手法を考えなければならない．そのためには，コンポーネントベースの製品設計から脱却し，設計初期段階からシステム全体を俯瞰し，適切な機能配置を行うことで要件を達成するアプローチの重要性がより高まると考える．



## 付 録 A $D_{ref}^*$ 算出方法

本付録では，3.3.2 項 (2) 路肩退避シミュレーションで使用した (3.47) 式の導出方法について説明する [36]． $X$  軸方向に一定速度  $V$  で走行しているとし， $Y$  軸方向の目標軌跡から路肩退避を実現する  $D_{ref}^*$  を算出する． $X$  軸の目標軌跡  $X_{ref}$  は (A.1) 式， $Y$  軸方向の目標軌跡  $Y_{ref}$  は (A.2) 式とし，操舵開始，終了時点の位置，速度，加速度の条件から，各係数を決定する．

$$X_{ref}(t) = Vt \quad (\text{A.1})$$

$$Y_{ref}(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (\text{A.2})$$

図 3.22 の操舵開始点  $b(t = 0)$  における条件を，

$$Y_{ref}(0) = \dot{Y}_{ref}(0) = \ddot{Y}_{ref}(0) = 0$$

図 3.22 の操舵終了点  $c(t = 5)$  における条件を，

$$Y_{ref}(5) = 2, \dot{Y}_{ref}(5) = \ddot{Y}_{ref}(5) = 0$$

とすると，(A.2) 式の各係数は， $a_0 = a_1 = a_2 = 0$ ， $a_3 = 0.16$ ， $a_4 = -0.048$ ， $a_5 = 0.0038$  となる．一方，車両の進行方向と  $X$  軸のなす角を  $\phi$  とすると， $\phi$  は微小であることから，

$$\phi = \tan^{-1} \frac{dY_{ref}}{dX_{ref}} \approx \frac{dY_{ref}}{dX_{ref}}$$

であり，ヨーレート  $\gamma$  は，

$$\gamma = \dot{\phi} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dY_{ref}}{dX_{ref}} \right)$$

となる．ここで，緩やかなハンドル操作を想定し  $\dot{\beta} = 0$  とすると，

$$D_{ref}^* = V\gamma = V \frac{d}{dt} \left( \frac{dY_{ref}}{dX_{ref}} \right)$$

となり，(3.47) 式を得る．



## 付 録 B     3 レベルコンセプト

本付録では，ドイツの自動車部品メーカーロバート・ボッシュが提唱する 3 レベルコンセプトについて説明する [101]. 3 レベルコンセプトは，ECU における MPU 監視方法のデファクトスタンダードとして広く認識されている．車載ソフトウェアの共通化を目指して欧州の車両メーカ，部品サプライヤで策定している AUTOSAR (Automotive Open System Architecture) でも取り上げられている手法である．

図 B.1 に示すように，MPU へ実装する機能を役割に応じて 3 レベルに分割し，レベル 1 の機能をレベル 2 が監視し，レベル 2 の機能をレベル 3 が監視する．算術論理演算装置 (Arithmetic and Logic Unit : ALU) の故障など，単一故障で全ての機能が喪失する場合を想定し，レベル 3 は別々のハードウェアへ実装し，各ハードウェアのレベル 3 の間で相互監視を行い，互いの健全性を確認する．レベル 1，2，3 の各機能の詳細は，以下の通り．

### レベル 1

センサ信号処理，目標値，操作量演算，アクチュエータ駆動やダイアグノーシスなど，ECU で行う制御全般を指す．

### レベル 2

ECU で行う制御，すなわちレベル 1 の包括的な監視機能を指す．包括的な監視機能は，ECU の入出力信号の相関性をチェックし，故障検出した場合はアクチュエータを停止する役割を担う．たとえば，電子スロットルシステムにおいて，アクセル開度とエンジン（または車軸）トルクの相関性をチェックし，「意図せぬ加減速」を検出するトルクモニタが代表的である．なお，レベル 2 は危険事象を限定した監視機能とすることで，使用する ROM/RAM などの MPU リソースをレベル 1 に比べ大幅に削減している．これは，レベル 3 によるチェック領域を極力減らし，危険事象発生に至る前に故障検出，フェイルセーフを実行するためである．

### レベル 3

レベル 2 のソフトウェアの動作確認機能を指す．ソフトウェアの動作チェックは，ROM，RAM，フロー，インストラクションの 4 項目が必要とされており，ROM，RAM，フ

ローのチェックに関しては、同一 MPU 内のチェックモジュールにて、読み出し・書き込みチェック、各関数のフローカウンタチェックなどの手法により行う。一方、インストラクションに関しては、同一の MPU リソースを使用してのチェックは信頼性が低いため、別 MPU または特定用途向け集積回路（Application Specific Integrated Circuit : ASIC）に実装されたモニタリングモジュールの間で質問、回答形式の相互監視を行う。質問と回答の送受信は定期的に行われるが、意図的に質問や回答の送信周期を変える、誤った回答を送信することで相手が故障を認識するかどうか確認し、相互監視を実現している。

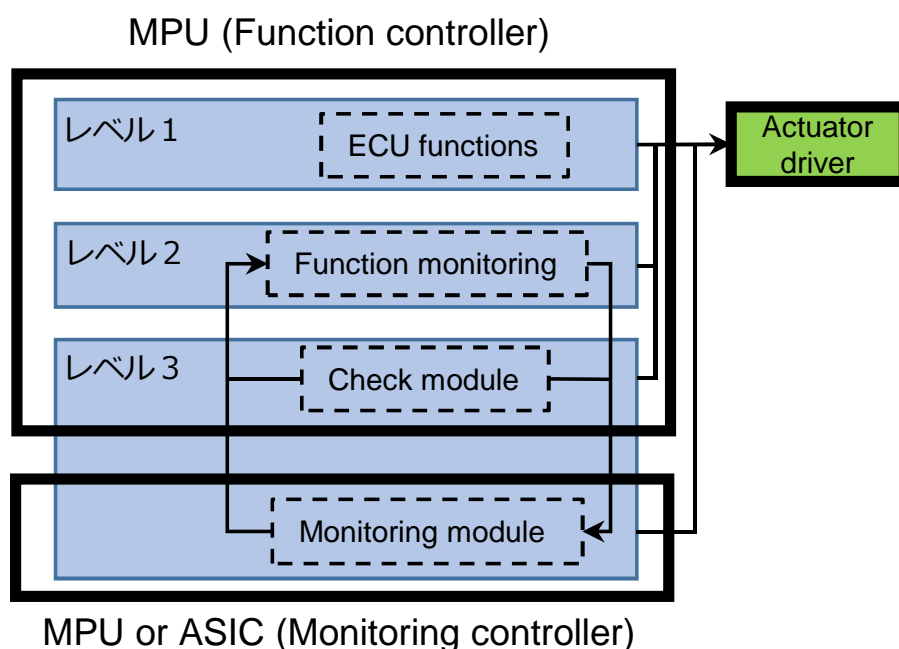


図 B.1 3 レベルコンセプト機能配置

## 謝辞

本研究を遂行し、学位論文をまとめるにあたり、多大なご支援とご指導を賜りました指導教官である早川義一教授に深く感謝いたします。特に、社会人である私に多大なるご配慮をいただき、平日、休日を問わずご指導いただいたことに、深くお礼申し上げます。ご指導を通じて身に着けた、物事を複眼的に捉え、一つ一つ積み上げて課題を解決していくアプローチを貫いて今後も研究活動に邁進し、さらなる成果を挙げられるよう努力していく所存です。

また、本論文をまとめるにあたり、数々の有益なご助言を賜りました名古屋大学大学院工学研究科鈴木達也教授、古橋武教授、浅井徹准教授、大阪府立大学大学院工学研究科小西啓治教授に深く感謝いたします。

折に触れて、航空機の耐故障制御やフェイルセーフに関する貴重な情報を提供していただくとともに、学位取得を終始支援してくださった防衛大学校名誉教授金井喜美雄先生に深くお礼申し上げます。

株式会社デンソー技術開発センター本田理事、金森担当部長、藤田室長には、在職で博士課程へ進学するにあたり、私の意志を尊重し、会社支援の取り付け、業務へのご配慮など多大な支援をいただき、大変恵まれた環境で研究活動に取り組むことができたことに深く感謝いたします。

株式会社デンソー手操担当部長、松本室長、株式会社デンソー技研センター鈴木担当課長、大阪産業大学田代勉教授には、社内研修を通じた学術界との人脈作りや学位取得挑戦に踏み切る第一歩を強力に後押ししていただいたことにお礼申し上げます。今後は、社内教育の第一線で技術指導に注力し、後進の育成という形で貢献させていただきます。

数々の貴重なご意見、ご協力をいただいた南山大学理工学部中島明准教授、名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻電子機械工学分野早川研究室の方々に深く感謝いたします。

最後に、自分の志を貫くにあたり、社会人でありながら博士課程への入学を快諾し、長年世間並みの休日を過ごすことができない環境の中で辛抱し、支え続けてくれた家族に感謝の意を表し、謝辞といたします。



## 参考文献

- [1] GP 企画センター. 自動車のメカはどうなっているか エンジン系. グランプリ出版, 1999.
- [2] 瀬名智和. クルマの新技术用語 エンジン・動力編. グランプリ出版, 1998.
- [3] 野海, 西橋, 石川, 高橋. 車載 LAN 開発への取り組み. 富士通テン技報, Vol. 49, pp. 18–23, 2007.
- [4] ルネサスエレクトロニクス株式会社. ルネサスオートモーティブダイジェスト 2013 秋版. 2013.
- [5] 金井喜美雄. 自動車のアクティブ制御とバイワイヤ技術 —航空機の先進制御技術と自動車応用—. 日本テクノセンター, 2015.
- [6] R. Isermann, R. Schwarz, and S. Stolz. Fault-Tolerant Drive-by-Wire Systems. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 22, No. 5, pp. 64–81, 2002.
- [7] 小川計介. ステアリング, ブレーキで進む X-by-Wire への道. 日経 Automotive Technology, pp. 74–93, 2007.
- [8] 沢村, 牧野. X-by-Wire Technology. *Motor Fan illustrated*, Vol. 91, pp. 32–85, 2014.
- [9] 金井, 越智, 川邊. ビークル制御 —航空機と自動車—. 槇書店, 2004.
- [10] N. Nguyen, K. Krishnakumar, J. Kaneshige, and P. Nespeca. Flight Dynamics and Hybrid Adaptive Control of Damaged Aircraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 31, No. 3, pp. 751–764, 2008.
- [11] J. Cieslak, D. Henry, A. Zolghadri, and P. Goupil. Development of an Active Fault-Tolerant Flight Control Strategy. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 31, No. 1, pp. 135–147, 2008.

- [12] T.J.J. Lombaerts, H.O. Huisman, Q.P. Chu, J.A. Mulder, and D.A. Joosten. Nonlinear Reconfiguring Flight Control Based on Online Physical Model Identification. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 32, No. 3, pp. 727–748, 2009.
- [13] Y.C. Yeh. Triple-Triple Redundant 777 Primary Flight Computer. in *Proc. IEEE Aerospace Applications Conference 1996*, Vol. 1, pp. 293–307, 1996.
- [14] M.A. Kassab, H.S. Taha, S.A. Shedied, and A. Maher. A Novel Voting Algorithm for Redundant Aircraft Sensors. in *Proc. 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 3741–3746, 2014.
- [15] 茂野一彦. 自動車用機能安全規格 ISO26262 の紹介. 三菱スペース・ソフトウェア技報, Vol. 23, pp. 28–38, 2013.
- [16] 浅田, 藤田, 金森. 近未来の EV 社会とその生活シーン予測 – クルマビジネス変貌のヒント –. デンソーテクニカルレビュー, Vol. 16, pp. 96–104, 2011.
- [17] ビジネスキューブ・アンド・パートナーズ. ISO26262 実践ガイドブック [入門編]. 日経 BP 社, 2013.
- [18] 佐藤吉信. 機能安全／機械安全規格の基礎とリスクアセスメント SIL, PL, 自動車用 SIL の評価法. 日刊工業新聞社, 2011.
- [19] N. Kubokawa. *Development of a Steering System Which Controls Tire Angles and Steering Force Independently*. 日本テクノセンター, 2015.
- [20] 山内, 青峰, 余宮. 自動車向け機能安全国際規格 ISO26262 に対応した東芝の取組み. 東芝レビュー, Vol. 67, No. 12, pp. 47–50, 2012.
- [21] 堀洋一. 制御技術で描く電気自動車の将来像 – 自動車技術会・計測自動制御学会共同企画 – 共同企画にあたって. 計測と制御, Vol. 50, No. 3, pp. 163–164, 2011.
- [22] 蒲池, K. Walters, 吉田. インホイールモーターによる車両運動性能の向上. 三菱自動車テクニカルレビュー, Vol. 18, pp. 107–113, 2006.
- [23] 伊藤, 堺, 牧野. インホイールモータシステム. *NTN TECHNICAL REVIEW*, Vol. 79, pp. 22–28, 2011.



- 
- [24] 牧野, 石川, 伊桐, 堺. 自動車用インホイールモータの技術動向. *NTN TECHNICAL REVIEW*, Vol. 81, pp. 22–29, 2013.
- [25] 岸本, 山田, 神野. 700MHz 帯無線による車車・路車・路路間通信システム. *SEI テクニカルレビュー*, No. 184, pp. 15–18, 2014.
- [26] 中林, 浜口. ITS 無線通信高度化への取り組み. *OKI テクニカルレビュー*, Vol. 81, No. 2, pp. 24–27, 2014.
- [27] 青山, 南田, 坪谷, 平林. 歩車間通信技術の開発. *Journal of the ITU Association of Japan*, Vol. 45, No. 7, pp. 17–19, 2015.
- [28] 金子, 浜口. 歩車間通信システムの開発. *OKI テクニカルレビュー*, Vol. 78, No. 1, pp. 72–77, 2011.
- [29] 大前学. ACC（車間距離制御装置）と CACC（通信利用協調型車間制御装置）のアルゴリズム. *電気学会誌*, Vol. 135, No. 7, pp. 433–436, 2015.
- [30] 柵木充彦. 自動車における安全技術の現状と将来. *デンソーテクニカルレビュー*, Vol. 12, No. 1, pp. 12–22, 2007.
- [31] 加藤, 鈴木. デンソーの先進安全技術動向. *デンソーテクニカルレビュー*, Vol. 18, pp. 12–22, 2013.
- [32] 日本航空広報部. 航空実用事典 航空技術／営業用語辞典兼用 第2版. 朝日ソノラマ, 1990.
- [33] 株式会社フォーイン企画調査部. 世界自動車技術調査月報 2015 年 7 月（第 16 号）. 2015.
- [34] Y. Yao. Vehicle Steer-by-Wire System Control. *SAE World Congress*, No. 2006-01-1175, 2006.
- [35] 茂木, 水貝, 桜井, 鈴木. 新機構ステアバイワイヤ操舵システム. *NTN TECHNICAL REVIEW*, Vol. 79, pp. 42–50, 2011.
- [36] 伊藤, 早川. 駆動系を活用した Steer-by-Wire の耐故障制御系設計. 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No. 12, pp. 872–881, 2012.

- [37] 伊藤, 早川. Steer-by-Wire とインホイールモータを搭載した車両に対する操舵系と駆動系を相互活用した耐故障ロバスト制御系設計. 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 11, pp. 801–810, 2014.
- [38] A. Ito and Y. Hayakawa. Design of Fault Tolerant Control System for Electric Vehicles with Steer-by-Wire and In-Wheel Motors. in *Proc. 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*, pp. 552–557, 2013.
- [39] 伊藤, 早川. 駆動系を活用した Steer-by-Wire の耐故障制御系設計. 第 53 回自動制御連合講演会論文集, pp. 192–197, 2010.
- [40] 伊藤, 早川. 左右独立駆動可能な電気自動車の耐故障制御系設計. 日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集, J181032, 2011.
- [41] 伊藤, 早川. 操舵系と駆動系を相互に活用した車両制御系の耐故障設計. *ADVANTY 2013 Symposium*, 5–4, 2013.
- [42] 三浦, 後田, 澤瀬, 高橋, 林川. 車両運動統合制御システム「S-AWC」の開発. 三菱自動車テクニカルレビュー, Vol. 20, pp. 23–26, 2008.
- [43] 安部正人. 自動車の運動と制御 第二版. 山海堂, 2004.
- [44] 田代, 細江. 車両運動特性を考慮した電動パワーステアリング制御の設計手法. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 72, No. 719, pp. 52–60, 2006.
- [45] 小野, 細江. 自動車操舵系のロバスト制御—非線形  $H_\infty$  状態フィードバックによるロバスト安定化—. 計測自動制御学会論文集, Vol. 30, No. 4, pp. 443–451, 1994.
- [46] 酒井秀男. タイヤ工学. グランプリ出版, 2001.
- [47] 伊藤, 藤代, 川辺, 金井, 越智. 四輪操舵車の新しい制御法—モデル追従制御による方法—. 計測自動制御学会論文集, Vol. 23, No. 8, pp. 828–834, 1987.
- [48] 西原, 伊藤, 中野, 熊本. ステアバイワイヤ車両のモデル追従  $D^*$  制御. 機械力学・計測制御講演論文集, 542, 2000.
- [49] 森, 宮坂, 深尾, 足立, 大須賀. モデル規範型  $D^*$  制御による軌道追従自動操舵システム. 機械力学・計測制御講演論文集, 710, 2001.

- [50] 森山正和. 次世代ステアリングシステムの開発動向. *Koyo Engineering Journal*, No. 165, pp. 8–13, 2004.
- [51] C.D. Gadda, P. Yih, and J.C. Gerdes. Incorporation a Model of Vehicle Dynamics in a Diagnostic System for Steer-by-Wire Vehicles. in *Proc. AVEC International Workshop*, pp. 779–784, 2004.
- [52] 室津, 大場, 米沢, 藤井. システム工学. 森北出版, 1993.
- [53] D. Cesiel, M.C. Gaunt, and B. Daugherty. Development of a Steer-by-Wire System for the GM Sequel. *SAE World Congress*, No. 2006-01-1173, 2006.
- [54] R.M.A.F Verschuren and H.M. Duringhof. Design of a Steer-by-Wire Prototype. *SAE World Congress*, No. 2006-01-1497, 2006.
- [55] K. Yoshimura, K. Sakurai, Y. Morita, T. Minowa, Y. Nakatsuka, Y. Takahashi, K. Kurosawa, S. Sameshima, and A. Shimura. Cost-Effective and Fault Tolerant Vehicle Control Architecture for X-by-Wire Systems (Part1: Architecture Design Based on the Concept of Autonomous Decentralized Systems). *SAE World Congress*, No. 2005-01-1527, 2005.
- [56] K. Sakurai, Y. Morita, K. Yoshimura, N. Kanekawa, K. Shimamura, K. Kurosawa, and Y. Takahashi. Cost-Effective and Fault Tolerant Vehicle Control Architecture for X-by-Wire Systems (Part2: Implementation Design). *SAE World Congress*, No. 2005-01-1543, 2005.
- [57] 陶山貢市. *Reliable Control*. 計測と制御, Vol. 35, No. 2, pp. 151–159, 1996.
- [58] 高松, 中野. ステアバイワイヤの操舵制御. *Koyo Engineering Journal*, No. 158, pp. 21–26, 2000.
- [59] 嘉納, 江原, 小林, 小野. 動的システムの解析と制御. コロナ社, 1994.
- [60] 高橋, 富田, 武藤. フェイルセーフ構造を有する前後輪独立駆動型電気自動車における駆動系故障時の車両動特性. 電気学会全国大会講演論文集, No. 4, pp. 371–372, 2007.
- [61] 龍岡, 武藤. フェイルセーフ駆動構造を有する前後輪独立駆動型電気自動車 (FRID EVs) における実用的 な速度域で発生した駆動系故障時の挙動解析. 電気学会産業応用部門大会講演論文集, No. 2, pp. 443–444, 2008.

- [62] 山口, 出口, 井上. 駆動力再構成による電動車両の挙動安定化に関する一考察. 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 104-06, pp. 11–14, 2006.
- [63] J. Wang and R.G. Longoria. Coordinated and Reconfigurable Vehicle Dynamics Control. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Vol. 17, No. 3, pp. 723–732, 2009.
- [64] P. Gahinet, A. Nemirovski, A.J. Laub, and M. Chilali. *LMI Control Toolbox User's Guide Version 1*. The MathWorks, 1995.
- [65] 深谷友次. 自動車用センサの技術動向. デンソーテクニカルレビュー, Vol. 11, No. 1, pp. 92–99, 2006.
- [66] K. Suyama. Functional Safety Analysis of Reliable Control Systems Using Decision by Majority. in *Proc. American Control Conference*, pp. 618–621, 1999.
- [67] C. Berbra, S. Lesecq, and J.J. Martinez. A Multi-Observer Switching Strategy for Fault-Tolerant Control of a Quadrotor Helicopter. *16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pp. 1094–1099, 2008.
- [68] B. Tabbache, M.E.H. Benbouzid, A. Kheloui, and J. Bourgeot. Virtual-Sensor-Based Maximum-Likelihood Voting Approach for Fault-Tolerant Control of Electric Vehicle Powertrains. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 62, No. 3, pp. 1075–1083, 2013.
- [69] S.S. Yang, E.C. Mid, H.A.F. Mohamed, and M. Moghavvemi. Practical Sensor Fault Tolerant Control System. in *Proc. SICE Annual Conference 2008*, pp. 2911–2916, 2008.
- [70] J. Suh, G. Bajpai, and B.C. Chang. A Virtual Closed Loop Remedy for Temporary Sensor Failures. in *Proc. International Conference on Control Applications*, pp. 1515–1518, 1999.
- [71] 豊田稲男. パワトレインシステムの競争力強化に貢献するセンサ技術の動向. デンソーテクニカルレビュー, Vol. 17, pp. 12–16, 2012.
- [72] 野村, 酒井, 横山. 安全システムの競争力強化に貢献するセンサ技術の動向. デンソーテクニカルレビュー, Vol. 17, pp. 48–56, 2012.
- [73] 吉田貴彦. 快適・利便システムの競争力強化に貢献するセンサ技術の動向. デンソーテクニカルレビュー, Vol. 17, pp. 131–139, 2012.

- 
- [74] 黒田, 横山, 谷道, 大塚. 予防安全統合制御システム. 日立評論, No. 11, pp. 58–62, 2013.
- [75] 本田, 道山, 小野田. エアコン制御システムのセンサ新技術. デンソーテクニカルレビュー, Vol. 9, No. 2, pp. 24–29, 2004.
- [76] A. Ito and Y. Hayakawa. Practical Fault-Tolerant Control to Protect Steer-by-Wire Systems against Sensor Faults. in *Proc. IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, pp. 1895–1900, 2015.
- [77] TEXAS INSTRUMENTS. *Safety Manual for RM42x Hercules ARM-Based Safety Critical Microcontrollers User's Guide*. 2015.
- [78] 伊藤章. 【招待講演】スマートコミュニティに貢献するエネルギーマネジメント技術. 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 33–36, 2015.
- [79] 株式会社三井住友フィナンシャルグループ企画部. シェアリングの時代が始まる ～「所有」から「共有」へのシフト～. *SAFE*, Vol. 92, pp. 5–9, 2011.
- [80] 赤須, 笹本. EV 関連技術 (V2G, V2H) . 三菱電機技報, Vol. 86, No. 2, pp. 126–129, 2012.
- [81] 泉, 廣田, 畑中, 磯山, 佐野, 高山. “V2X” に対応した双方向充電ユニット. *SEI テクニカルレビュー*, No. 185, pp. 34–37, 2014.
- [82] A. Ito and T. Shiraki. Optimal Energy Storage Management in DC Power Networks. in *Proc. IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 630–635, 2013.
- [83] A. Ito. Development of Energy Management Method for DC Power Networks. in *Proc. SICE Annual Conference 2013*, pp. 1746–1751, 2013.
- [84] 伊藤章. BEMS エネルギー管理手法の開発. 日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集, J056012, 2012.
- [85] 伊藤, 白木. 直流電力網におけるエネルギーストレージシステムの最適制御. 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2013 論文集, pp. 525–529, 2013.
- [86] 伊藤, 周. 車載蓄電池を活用したモデル予測型 HEMS の実機検証. 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2014 論文集, pp. 459–464, 2014.

- [87] T. Yamaguchi, A. Kawashima, A. Ito, S. Inagaki, and T. Suzuki. Real-Time Prediction for Future Profile of Car Travel Based on Statistical Data and Greedy Algorithm. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 8, No. 1, pp. 7–14, 2015.
- [88] A. Kawashima, T. Yamaguchi, R. Sasaki, S. Inagaki, T. Suzuki, and A. Ito. Apartment Building Energy Management System in Group Optimization with Electricity Interchange Using In-Vehicle Batteries. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 8, No. 1, pp. 52–60, 2015.
- [89] T. Yamaguchi, M. Sumiya, S. Inagaki, T. Suzuki, A. Ito, M. Fujita, and J. Kanamori. Model Predictive Control of Car Storage Battery in HEMS Considered Car Traveling. in *Proc. SICE Annual Conference 2013*, pp. 1352–1358, 2013.
- [90] T. Yamaguchi, S. Inagaki, T. Suzuki, A. Ito, M. Fujita, and J. Kanamori. Maximum Likelihood Estimation of Departure and Travel Time of Individual Vehicle Using Statistics and Dynamic Programming. in *Proc. 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1674–1679, 2013.
- [91] 角谷, 山口, 稲垣, 鈴木, 伊藤, 藤田, 金森. 車載蓄電池を活用した家庭内エネルギー管理システムの開発. 自動車技術会 2011 年秋季大会学術講演会前刷集, No. 108–11, pp. 13–16, 2011.
- [92] 角谷, 山口, 稲垣, 鈴木, 伊藤, 藤田, 金森. 使用履歴に基づく車の使用パターンのリアルタイム最尤推定. 自動車技術会 2012 年秋季大会学術講演会前刷集, No. 99–12, pp. 1–4, 2012.
- [93] 山口, 角谷, 稲垣, 鈴木, 伊藤, 藤田, 金森. 使用履歴に基づく車の使用パターン予測の組み合わせ最適化. 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演論文集, 3D 1b-2, 2012.
- [94] 山口, 角谷, 稲垣, 鈴木, 伊藤, 藤田, 金森. 使用履歴と動的計画法による車利用行動の最尤推定と HEMS への応用. 計測自動制御学会 第 13 回制御部門大会論文集, 8C 1-4, 2013.
- [95] 山口, 角谷, 稲垣, 鈴木, 伊藤, 藤田, 金森. 車の使用予測を組み込んだモデル予測型 HEMS の設計. 自動車技術会 2013 年春季大会学術講演会前刷集, No. 40–13, pp. 1–4, 2013.

- 
- [96] 山口, 川島, 稲垣, 鈴木, 伊藤, 藤田, 金森. 最尤推定法に基づく車の出発と運転時間予測手法. 第53回離散事象システム研究会論文集, 2013.
- [97] 稲垣, 川島, 伊藤, 鈴木. 車載蓄電池を利用したモデル予測型 EMS の成果と展望～CREST「EMS」を通して～. 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2014 論文集, pp. 538–539, 2014.
- [98] S. Kamboj, W. Kempton, and K.S. Decker. Deploying Power-Grid Integrated Electric Vehicles as a Multi-Agent System. *in Proc. The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, Vol. 1, pp. 13–20, 2011.
- [99] S. Vandael, T. Holvoet, G. Deconinck, S. Kamboj, and W. Kempton. A Comparison of Two GIV Mechanisms for Providing Ancillary Services at the University of Delaware. *in Proc. IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 211–216, 2013.
- [100] 姚, 佐藤. プローブ情報活用システム「PROROUTE」の開発. NEC 技報, Vol. 61, No. 1, pp. 35–39, 2008.
- [101] E. W. Group. Standardized E-Gas Monitoring Concept for Gasoline and Diesel Engine Control Units Ver. 5.5. 2013.