

プラトーン走行の高度化を実現する
ための制御システムに関する研究

大 前 学

プラトーン走行の高度化を実現する
ための制御システムに関する研究

1999 年 12 月

大前 学

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的	3
1.3 本研究の流れと本論文の構成	4
1.4 本研究の特徴と産業上の有用性	6
1.5 本論文における表記と記号について	7
第2章 従来の自動運転制御の研究	9
2.1 藤岡研究室における自動運転制御の研究	9
2.2 自動運転システムにおける制御構造	11
2.2.1 階層型制御構造	11
2.2.2 制御構造に関する主な研究文献の紹介	12
2.3 自動運転システムにおける運動制御（縦方向制御）	12
2.3.1 縦方向制御のストラテジ	13
2.3.2 プラトウーン走行と自律走行	13
2.2.3 スtringスタビリティ	13
2.3.4 2階層制御構造	14
2.3.5 一定車間距離制御と一定車間距離制御（上位制御層）	15
2.3.6 エンジンとブレーキの制御（下位制御層）	16
2.3.7 縦方向制御系の構成	17
2.3.8 縦方向制御に関する主な研究論文の紹介	18
(1) プラトウーンの縦方向制御に関するもの	19
(2) ACCの縦方向制御に関するもの	21
(3) ACCと交通容量・交通流の関係に関するもの	22
(4) 制御方式の比較に関するもの	22
(5) プラトウーンの合流や離脱における縦方向制御に関するもの	23
(6) 下位制御（アクチュエータ制御）に関するもの	25
2.4 自動運転システムにおける運動制御（横方向制御）	25
2.4.1 横方向制御のストラテジ	25
2.4.2 地点追従制御	26
2.4.3 車両追従制御	27
2.4.4 横方向制御系の構成	27
2.4.5 特殊な状況における横方向制御	28
2.4.6 横方向制御に関する主な研究文献の紹介	29
(1) 直下参照型の地点追従制御に関するもの	29
(2) 前方注視型の地点追従制御に関するもの	31
(3) 車両追従制御に関するもの	32
(4) ドライバの運転動作を模擬する制御に関するもの	34
(5) 大型車の横方向制御に関するもの	34

(6) 特殊な状況における横方向制御に関するもの	35
(7) モデリングに関するもの	36
2.5 自動運転システムにおけるセンサ技術	37
2.5.1 車両運動センサ	37
2.5.2 車間距離センサ等	37
2.5.3 センサ技術に関する主な研究文献の紹介	38
(1) 磁気ネイルセンサ等による走行レーン検出に関するもの	38
(2) 視覚センサによる走行環境認識に関するもの	39
(3) 測距センサに関するもの	40
(4) GPS に関するもの	41
2.6 自動運転システムにおける通信技術	41
2.6.1 車車間通信	42
2.6.2 路車間通信	42
2.6.3 通信技術に関する主な研究文献の紹介	42
(1) 通信デバイスに関するもの	43
(2) 通信プロトコルに関するもの	43
第3章 提案する制御システム	45
3.1 従来提案されたプラトーン走行制御の問題点	45
3.1.1 プラトーン走行の意義	45
3.1.2 縦方向制御の問題点	46
3.1.3 横方向制御の問題点	47
3.2 提案する制御システム	47
3.3 提案する制御システムの実現に必要な要素技術	49
3.4 第3章のまとめ	51
第4章 制駆動力特性のモデルマッチング制御	53
4.1 車両のモデル化	54
4.2 制御対象のモデル化	59
4.2.1 ブラントの構築および定式化	59
4.2.2 ブラントの伝達関数モデル	61
4.3 制御系の設計	63
4.4 シミュレーションによる制御系の評価	67
4.4.1 シミュレーションの方法	67
4.4.2 シミュレーション結果	67
4.5 実験による評価	69
4.5.1 実験システム	69
4.5.2 実験の方法	70
4.5.3 実験結果	73
4.6 第4章のまとめ	75
4.7 記号	76

第5章	ブラトウーンを一力学系として扱った縦方向制御	77
5.1	ブラトウーンのモデル化	78
5.2	状態フィードバックによる車間距離制御と先頭車速度制御の非干渉化	79
5.3	フィードバック補償器の設計	84
5.4	制御の実現方法	86
5.4.1	目標加速度の算出	87
5.4.2	加速度の制限	89
5.4.3	先頭車の車間距離制御との組み合わせ	90
5.4.4	最小加速度制御による車間距離変更と指定車両の加速度をゼロとした車間距離変更	91
5.4.5	車車間通信遅れの補償	93
5.5	シミュレーションによる評価	94
5.5.1	非干渉化の確認 1	95
5.5.2	非干渉化の確認 2	96
5.5.3	フィードバック補償器の効果の確認	100
5.5.4	モデルマッチング制御の不完全性、車車間通信遅れの影響の確認	102
5.6	第5章のまとめ	105
5.7	記号	106
第6章	DGPSを利用した絶対位置情報の獲得手法	109
6.1	DGPSからの絶対位置情報の問題点	110
6.2	カルマンフィルタによる絶対位置情報の補正	111
6.3	デッドレコニングによる遅れの補償とサンプル周期の補間	115
6.4	推定手法の実現方法	117
6.4.1	絶対位置の推定手順	117
6.4.2	緯度、経度情報から距離情報への変換	118
6.5	シミュレーションによる評価	119
6.5.1	シミュレーションの方法	119
6.5.2	シミュレーションの結果	120
6.6	実験による評価	121
6.6.1	実験システム	121
6.6.2	実験の方法	125
6.6.3	実験結果	126
6.7	第6章のまとめ	127
6.8	記号	128
第7章	車車間通信とDGPSを利用した周囲車両相対位置情報の獲得手法	131
7.1	相対位置計測手法の検討	132
7.2	相対位置計測手法	133
7.3	実験による評価	135
7.3.1	実験システム	135
7.3.2	実験の方法	139

7.3.3	実験結果	140
7.4	第7章のまとめ	142
7.5	記号	143
第8章	DGPSを利用した絶対位置情報に基づく横方向制御	145
8.1	車両の横方向運動のモデル化	146
8.2	目標コースデータの記述	147
8.3	操舵制御アルゴリズム	149
8.3.1	制御アルゴリズムの概要	149
8.3.2	目標操舵角変化量の算出方法	150
8.3.3	この制御アルゴリズムの考察	151
8.4	シミュレーションによる評価	152
8.4.1	シミュレーションの方法	152
8.4.2	シミュレーション結果	153
8.5	実験による評価	156
8.5.1	実験システム	156
8.5.2	実験の方法	159
8.5.3	実験結果	160
8.6	第8章のまとめ	162
8.7	記号	163
第9章	路車間通信とDGPSを利用した車両運動制御(障害物回避制御)	165
9.1	道路インフラからの情報	166
9.2	車両側の制御	167
9.2.1	誤差情報の変更による障害物回避	167
9.2.2	目標コースの変更による障害物回避	169
9.3	実験による評価	171
9.3.1	実験システム	171
9.3.2	実験の方法	174
9.3.3	実験結果	174
9.4	第9章のまとめ	176
9.5	記号	177
第10章	プラトウーンのタスク制御	178
10.1	プラトウーン形態	179
10.1.1	プラトウーンの定義	179
10.1.2	プラトウーンの形態の決定	179
10.2	プラトウーン内通信	181
10.3	合流・離脱時の車車間通信	184
10.3.1	合流時の車車間通信手続き	184
10.3.2	離脱時の車車間通信手続き	187
10.4	道路インフラとの通信	190

10.5 定常走行時のタスク制御	190
10.5.1 目標車間距離の決定	190
10.5.2 制御方法	192
10.6 道路インフラからの情報に基づくタスク制御	193
10.6.1 速度情報に基づく制御	193
10.6.2 プラトウーン構成車両台数情報に基づく制御	194
10.6.3 交通量に基づく制御	195
10.7 合流・離脱時のタスク制御	195
10.7.1 合流の制御	195
10.7.2 離脱の制御	198
10.8 第10章のまとめ	201
10.9 記号	201
 第11章 提案する制御システムの評価	202
11.1 シミュレーションモデル	203
11.1.1 車両モデル	203
11.1.2 道路モデル	204
11.1.3 通信モデル	205
11.2 評価項目	205
11.2.1 最大交通容量	205
11.2.2 交通密度に対する交通容量	206
11.2.3 平均速度	206
11.2.4 燃料消費量	206
11.2.5 加減速量	207
11.2.6 平均合流時間	207
11.3 比較対象	207
11.3.1 従来のプラトウーン走行制御	208
11.3.2 自律走行システム	208
11.4 定常走行における評価	209
11.5 合流・離脱時の評価	210
11.5.1 シミュレーション条件(合流時)	210
11.5.2 シミュレーション結果(合流時)	212
11.5.3 シミュレーション条件(離脱時)	219
11.5.4 シミュレーション結果(離脱時)	221
11.6 渋滞発生時の評価	225
11.6.1 シミュレーション条件	226
11.6.2 シミュレーション結果	227
11.7 第11章のまとめ	234
11.8 記号	235

第12章 結論.....	237
12.1 本論文の結論	237
12.2 今後の課題と提案.....	242
参考文献	245
謝辞	261

第1章 序論

この章では、本論文における序論として、研究の背景、研究の目的、本研究の流れと本論文の構成、本研究の特徴と産業上の有用性について述べる。

1.1 研究の背景

現在の自動車交通には様々な問題が生じている。その主なものとして交通渋滞、環境汚染、交通事故を挙げることができる。

まず交通渋滞の問題について述べる。交通渋滞は、自動車交通の効率を低下する直接原因である。交通渋滞は、ドライバの行動に起因するものと、交通容量の不足に起因するものに分けることができる。ドライバの行動に起因する渋滞の例としては、ドライバが原因の交通事故による渋滞（事故渋滞、見物渋滞）、トンネルの入り口などの心理的影響による減速が後続車に連鎖的に拡大して発生する渋滞（トンネル渋滞）、緩やかな登り坂の入り口（サグ）における気づかない減速が拡大的に後続車に影響して発生する渋滞（サグ渋滞）等を挙げることができる。また、交通容量の不足に起因する渋滞の例としては、都市部における交通集中による渋滞や、首都高速道路における慢性的な渋滞を挙げることができる[1]。現在、自動車交通による国内旅客輸送量は、14.2千億人キロ（1997年度）であり、輸送機関全体の60.1%のシェアを占めている。また自動車交通による国内貨物輸送量は、5.7千億トンキロ（1997年度）であり、輸送機関全体の53.8%のシェアを占めている[2]。自動車交通が、国内輸送の半分以上を担っている現在、渋滞による不効率性は深刻な社会問題である。日本における渋滞による年間経済損失は12兆円とも言われている。交通事故による年間損失が4兆円と言われていることを考えると、この問題の重大さがよく分かる。渋滞はドライバに対してストレスやいらいらなどの精神的悪影響を与え、運転操作を粗暴にしたりもする。

次に環境汚染の問題について述べる。自動車は化石燃料を燃やすことで動力を獲得しているため、化石燃料の消費はもちろん、温室効果ガスであるCO₂の排出、大気汚染の原因であるNO_x、SO_x、HC等の排出を余儀なくされる。特に、温室効果ガスであるCO₂の排出量は、日本において3億4000万トン（1996年）であり、そのうち約20%が自動車からの排出である[3]。首都高速道路などの慢性的に渋滞している道路の上空には、異様な雲がその道路に沿って浮遊しており、自動車が大気汚染の原因となっていることは一目瞭然である。

最後に交通事故の問題について述べる。交通事故による年間死者数は、1970年に最大の16765人に達し、交通安全施設整備などの諸施策により、1979年には8466人と半減した。しかし、その後増勢に転じ、1988年から8年連続して1万人を越えている。

近年では、死亡者数こそ1万人を下回るようになった(1998年では、9211人)が、負傷者数は依然として増加傾向にある。特に1998年における負傷者数は989297人であり、1970年以来的の最悪の数字を記録している。状態別に最も多いのは自動車乗車中の死亡者で、1998年は全体の43.1%を占めている。交通事故原因の90%以上は人間の認知や判断、操作ミスに起因しており、死亡者数を年齢別にみると、一般的に認知、判断の遅れや運転技術の未熟さを指摘される高齢者(65歳以上)や若者(16歳~24歳)が多いことから、そのことが裏付けされる[4, 5]。特に1993年以降では、高齢者の死亡者数が、若年者の死亡者数を上回り、今後の高齢化社会の問題の1つを提示している。

こうした自動車交通の現状を鑑み、情報・通信技術を活用し、車両と道路の知能化によりこれらの問題解決をすることを目的として、ITS(Intelligent Transport Systems)という名称の下、様々な研究開発が行われている[6, 7]。ITSは新しい産業の創出の効果もあり、2015年には約60兆円の市場となることが試算されている。ITSアメリカによる分類法に従い、ITSに含まれるシステムを分類すると、

- ・ATMS(Advanced Traffic Management Systems): 信号制御システム
- ・ATIS(Advanced Traveler Information Systems): ナビゲーションシステム
- ・AVCSS(Advanced Vehicle Control and Safety Systems): 運転支援、自動運転
- ・CVO(Commercial Vehicle Operations): 商業車の運行管理
- ・APTS(Advanced Public Transportation System): 都市内、地方のITS
- ・AHS(Automated Highway System): 自動運転システム

となる。上記システムに関する研究は、今日になって始まったものではなく、ITSという言葉が使われる以前の1950代から関連する様々な研究開発が行われてきた。近年の日本におけるITS関連技術開発プロジェクトとしては、建設省のARTS(Advanced Road Traffic System, 1989-)、通産省のSSVS(Super Smart Vehicle System, 1990-)、運輸省のASV(Advanced Safety Vehicle, 1991-)、警察庁、郵政省、建設省のVICS(Vehicle Information and Communication Systems, 1991-)、警察庁のUTMS(Universal Traffic Management System, 1993-)、建設省のAHS(Advanced cruise-assist Highway Systems)などがある。海外ではアメリカにおけるAHS、IVHS(Automated Highway Systems, Intelligent Vehicle-Highway Systems, 1991-1998)、カリフォルニアPATH発足までさかのぼれば1986-1998)、IVI(Intelligent Vehicle Initiative, 1998-)、ヨーロッパにおけるDRIVE(Dedicated Road Infrastructure for Vehicle safety in Europe, 1989-1991)、DRIVE II(1992-1994)、PROMETHEUS(PROgramme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety, 1987-1994)、T-TAP(the Transport Telematics Applications Programme, 1995-)などがITS推進プロジェクトとして挙げられる[6, 7, 8]。

本論文で対象とする研究は、上記ITS関連研究分野の1つであるAVCSS(Advanced Vehicle Control and Safety Systems)に関するものある。これは、主に高速道路における自動車の自動運転システムを対象としている。自動運転システムの目標は、

- ・道路交通容量の増加: 1レーンあたりの容量を現在の2~3倍(現在は1800[台/

h) ~ 2000[台/h]なので、6000[台/h]程度の交通容量)にする。

- ・モビリティの強化：人と物の移動時間をより短く、かつ予測可能にする。悪天候下においても容易で信頼性の高い移動を可能とする。
- ・環境負荷の軽減：新たな道路建設や道路の拡幅の必要性を少なくする。燃料消費と排出ガスを少なくする。
- ・道路交通安全：システムが誤動作しない限り事故はおこらない。

である。自動運転システムによって上記諸問題を解決できると考えられる理由は以下の通りである。

- ・正確で素早い運転操作が可能ることから、現在よりも車間距離を詰めて走ることや、車線を正確にトレースすることが可能となるために車線幅を小さくすることができる。その結果、莫大な経費を使って新規に道路を敷設したりせずに、現在と同じ道路幅で車線数を増やすことができ、既存の道路を使って交通容量を増大させることができる。
- ・自動運転による交通渋滞の減少、無駄な加減速の減少により、排気ガスによる大気汚染が減少し、さらに低燃費走行も期待できる。
- ・人間の認知、運転操作に比べ、速くて正確なセンサや動作速度の速いアクチュエータを用いることで、交通事故原因の大半であるヒューマンエラーを解消できる。
- ・物流の大半を占めるトラック輸送において問題となっているドライバ不足に対して、省力化や省人化が期待できる。

以上のような理由で、世界中で、1台のみの自律走行から積極的に隊列を構成したプラトーン（隊列）走行まで様々なタイプの自動運転システムが研究されている。自動運転制御に関する従来の研究については、第2章にて概説する。

1.2 本研究の目的

本研究では、自動運転におけるプラトーン（隊列）走行のための制御システムを対象としている。プラトーン走行については第2.3.2項にて説明する。従来の研究成果を踏まえ、プラトーン走行の高度化を実現するための制御システムを提案し、その制御システムの有用性および技術的妥当性を明らかにすることを目的としている。

従来の研究成果を鑑みると、プラトーン走行の制御は、車両レベルの制御によって車間距離の維持を実現するものが中心であった。この背景として、各車両の動特性の差異、車車間通信によって送受信できる情報量の制約、プラトーンのタスクとして車間距離の維持のみに着目されていたこと等を挙げることができる。しかし、プラトーン走行を実現するためには、車間距離の維持以外に合流、分離、交通密度に応じたプラトーン長の変更等のタスクの遂行を視野に入れた制御システムの構築が要求される。例えば、プラトーンに車両が合流する際も、プラトーンの末尾から合流するよりも、プラトーン内外の任意の地点に合流できるほうが、合流に要する時

間を短縮できるばかりでなく、合流に伴う加減速を減少し交通流を安定化や燃料消費の低減が実現できる。また、交通状況に応じて、プラトウンの挙動を適切に制御すれば、交通流の安定化、交通容量の増大、安全性の向上、燃料消費と排気ガスの低減、乗り心地の向上等を両立させるプラトーン走行を実現することを可能である。たとえば、目標車間距離を短くすれば、高交通容量を実現できる。しかし、比較的交通流が少ない道路区間においては、目標車間距離を長くして比較的ゲインの小さい制御を行ったほうが安全性、燃料消費、乗り心地の点で有利である。また、交通流が乱れた場合は、密度(車間距離)を変化させない制御を行ったほうが交通流の回復が早い。

本研究では、上記を実現する制御システムとして、プラトーンレベルの制御と絶対位置情報の利用を大きな柱とした制御システムを提案し、その有効性と技術的妥当性を明らかにする。

1.3 本研究の流れと本論文の構成

図1.3.1に本研究の流れを示す。本研究の流れは、制御システムの全体像の提案、必要な要素技術の検討、そして制御システムの評価という流れになっている。本論文の構成もこの流れに従い以下のような構成としている。まず本論に入る前に、第2章において、従来の自動運転制御の研究を概説する。本研究は、従来の研究成果を様々な部分で参照しているため、従来の研究の詳しい紹介は必須であると考え、そのため、従来の研究の概説を独立した章として扱うことにした。第3章から本論を述べる。第3章において、提案する制御システムの全体像を説明する。従来提案されたプラトーン走行制御の問題点を指摘し、それらの問題を解決するための制御システムの概要を提案する。さらに、提案する制御システムを実現するために必要な要素技術を明確にする。第4章～第10章では、提案する制御システムを実現するために必要な要素技術の技術的妥当性を検討することを目的として、制御手法、計測手法の提案を行い、その有効性を確認する。各要素技術の中で、実験が可能なものについては実験による評価も行う。第4章～第10章は要素技術別に以下のように章立てを行っている。

第4章—制駆動力特性のモデルマッチング制御

第5章—プラトーンを一力学系として扱った縦方向制御

第6章—DGPSを利用した車両絶対位置情報の獲得手法

第7章—車車間通信とDGPSを利用した周囲車両相対位置情報の獲得手法

第8章—DGPSを利用した絶対位置情報に基づく横方向制御

第9章—路車間通信とDGPSを利用した車両運動制御(障害物回避制御)

第10章—プラトーンのタスク制御

第11章では、提案する制御システムの評価を行う。第12章では結論を述べる。

上記の章立てを内容別に分類すると、図1.3.2のようになり、第4章～第5章をプラトーンレベルの制御技術、第6章～第9章を絶対位置情報の応用技術、第10章、

第11章を巨視的な視点に基づく検討として分類することができる。また、上記各章で扱っている制御・計測技術を、縦方向制御、横方向制御、計測（各技術については、第2.3節～第2.5節にて説明する）として分類すると表1.3.1ようになる。表1.3.1をみると、 3×3 のマスのマスに空白部分があることがわかる。以下では空白部分に関して、空白とした理由を述べる。

プラトーンレベル制御技術では、横方向制御と計測を扱っていない。この理由は、プラトーン走行において車両の横方向制御および横方向運動は他の車両に影響を与えないためである。よって、従来提案された車線追従の横方向制御を問題無く適用できると考えている。また計測に関しても車間距離センサ等の既存のセンサ技術の利用を想定している。

絶対位置情報の応用技術では、縦方向制御を扱っていない。この理由は、絶対位置情報に基づく縦方向制御を構築しても、従来提案された車両の速度制御あるいは車間距離制御と等価なものになってしまうためである。

巨視的な視点に基づく検討は、数百台～数千台の車両挙動を解析することにより、車両間、プラトーン間の相互作用を考慮してプラトーンの挙動決定のあり方を検討、評価するものである。これは、プラトーンレベル制御の上位制御層の検討・評価として位置付けられ、横方向制御および計測に関しては、プラトーンレベル制御の場合と同様の理由で扱っていない。

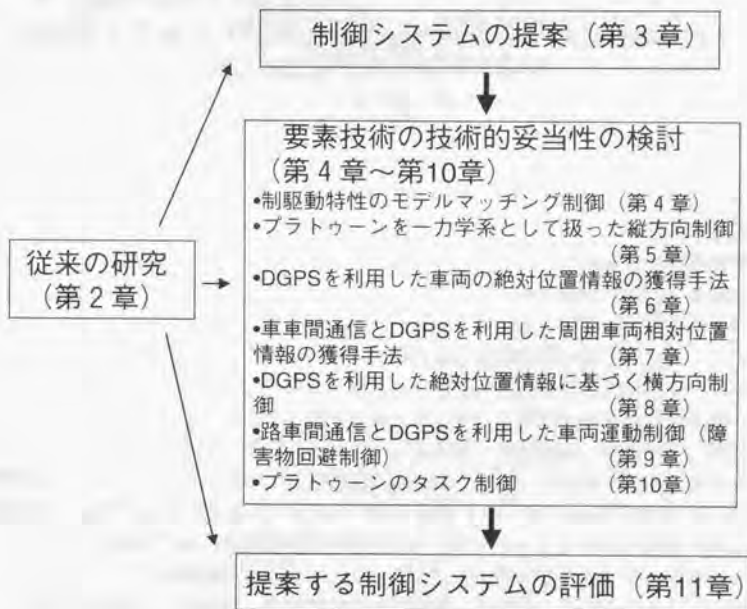


図1.3.1 本研究の流れと本論文の構成

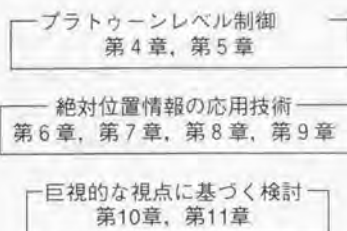


図 1.3.2 内容による各章の分類

表 1.3.1 各章で扱っている制御、計測技術

	縦方向制御	横方向制御	計測
プラトーンレベル制御技術	第4章, 第5章		
絶対位置情報の応用技術		第8章, 第9章	第6章, 第7章
巨視的な視点に基づく検討	第10章, 第11章		

1.4 本研究の特徴と産業上の有用性

本研究はプラトーンレベルの制御により、プラトーンの挙動制御を実現し、自動車交通の効率性、安全性、快適性を同時に向上させる制御システムの提案を目指している。従来提案されたプラトーン走行は、車両レベルの制御を中心として、プラトーン走行を実現するものであった。しかし、車両レベルの制御では、車両の合流、離脱、交通状況にあわせたプラトーンの形態変更などの際におけるプラトーン挙動制御が困難である。たとえば、車両レベルの制御を中心とするプラトーン走行では、プラトーンに車両が合流する際に、プラトーンの末尾からの合流が余儀なくされる。この場合、合流車は必然的に、後続のプラトーン先頭車の車間距離制御に影響する。車両が連続的に合流する場合は、この影響が特に顕著となり、合流部分付近の交通流は大幅に乱れ、交通容量が激減する。このような影響が現在まで着目されなかったことの背景には、プラトーン走行制御の評価が単一のプラトーンに限定して行われてきたことや、巨視的な評価についても、大幅に単純化したモデルが使用されてきたことなどを挙げることができる。たしかに、車両レベルの制御を中心したプラトーン走行の実現は不可能ではない。しかし、通信技術、計測技術、高度な制御技術を最大限に活用すれば、従来提案されたプラトーン走行よりも、より大きな効率性、快適性、安全性を実現できるのではなかろうか。これが本研究のモチベーションである。本研究では、車車間通信を利用したプラトーンレベルの制御の導入により、プラトーン挙動制御を実現し、プラトーン走行の高度化につなげていくことを提案している。この結果、自動車交通の効率性、安全性、快適性の向上し、燃料消費や排出ガスの低減といった ITS の目的を大きく達成することが可能となる。

上記では研究全体についての有用性を述べたが、以下では、本研究で検討する個々の要素技術の有用性について述べる。本研究で検討する要素技術は、提案する制御システムを実現するために必要な技術であるばかりでなく、ITS関連の様々な技術の中で利用することができる。すなわち、本研究で検討する要素技術は、単体でITSにおける有用な基礎技術となる。各要素技術におけるITS技術への応用について、ここで簡単にまとめておくと、以下ようになる。

- ・制駆動力特性のモデルマッチング制御技術→オートクルーズシステム加速度応答特性の改善、プラトーン挙動を制御しない従来のプラトーン走行システムにおける加速度応答特性の改善、自動運転システムの巨視的解析の容易化など
- ・プラトーンを一力学系として扱った縦方向制御技術→プラトーン挙動を制御しない従来の車間距離制御、大型車等の加減速が遅い車両の縦方向制御など
- ・DGPSを利用した絶対位置の推定技術→車線逸脱警報、車線からの横変位検出センサ（磁気センサ、画像センサ）との冗長化、高精度なナビゲーションなど
- ・DGPSと車車間通信を利用した周囲車両相対位置計測技術→車間距離センサや側方車間距離センサとの冗長化、同乗制御、合流制御、離脱制御など
- ・DGPSを利用した絶対位置情報に基づく横方向制御→磁気ネイル等のマーカーが敷設されていない道路上での車線追従、進路変更制御、車線変更制御、自律走行制御、農業機械等の運動制御など
- ・DGPSと路車間通信を利用した車両運動制御技術→道路インフラからの車両運動制御への介入、障害物回避、道路インフラからの車両経路誘導など
- ・プラトーンのタスク制御層→プラトーン挙動を制御しない従来のプラトーンの形成および車車間通信の確立、プラトーン挙動を制御しない従来のプラトーンの合流および離脱など

また、各要素技術は、特定の車両や特定の機器にのみ対応したものではなく、様々な種類の車両や機器に適用できることを配慮している。

1.5 本論文における表記と記号について

本論文では使用する記号については以下のような表記を使用している。

変数：イタリック体（例 x, y, z ）

数字：ローマン体（例 $1, x^2, x_3$ ）

行列：太字、ローマン体（例 $\mathbf{A}, \mathbf{S}(s)$ ）

ベクトル：イタリック体の上に矢印（例 \vec{p} ）

小括弧：（ ）

中括弧：[]

大括弧、行列の括弧、離散システムの括弧、参考文献のインデックス：[]

本論文で使用する記号については、各章の文中でその意味を説明する。さらに記号

参照の便宜を図るため、各章の最後の節にその章で使用されている記号一覧を示す。また、シミュレーションや実験で使用した値を該当する記号の左側に示している。

本論文中の図番号、表番号、式番号は節単位で付けている。例えば、第5章の第5.3節中の3番目の図、表、式はそれぞれ、「図5.3.3」、「表5.3.3」、「式(5.3.3)」として番号付けを行っている。

第2章 従来の自動運転制御の研究

この章では、国内外における自動運転制御に関する近年の研究の概観し、本研究の位置付けを明確にする。

自動車の自動運転制御システムは、今日 AVCSS (Advanced Vehicle Control and Safety Systems) という名で知られ、30年以上前から、様々な制御方法、システム構成等が提案されてきた[11]。この章では、近年に発表された文献を基に、自動運転制御技術に関する知見の概説を述べる。以下の各節では、まず第2.1節にて、筆者が所属する藤岡研究室の自動運転システムの研究について説明し、第2.2節以降の各節では自動運転システムにおける制御構造、車両運動制御について概説し、続いてセンサや通信技術の一部について簡単に概説する。各節の最終項以外の部分において近年の主な研究をまとめたかたちで解説し、最終項にて関連する研究文献のいくつかについてその概要を紹介する構成とした。

2.1 藤岡研究室における自動運転制御の研究

この節では、藤岡研究室（東京大学工学系研究科産業機械工学専攻、藤岡健彦助教、以下「本研究室」と呼ぶ）にて行われてきた自動運転システムに関する研究について概説する。

本研究室では、1993年から自動車の自動運転に関する研究に着手し、他大学、研究機関、ITSに関連する企業等と意見交換をしながら、様々なテーマに焦点をあて研究を推進してきた。日本の自動運転システムの研究分野ではデモンストレーション的な開発研究が中心であるに対し、本研究室は自動車の自動運転システムの研究分野の理論的な枠組みを構築することを目的として研究を進めてきた。

本研究室では、自動運転の形態として高速道路上でのプラトーン走行を対象として研究を行ってきた。プラトーン走行とは、複数台の車両が短い車間距離で縦方向に隊列を組んで走行することである。それによって、高密度交通による道路の実効容量の増大が見込まれる。また、プラトーン内の各車両の相対速度を小さくして安全性を増加させることも可能であると考えられている。

1993年度は、車両制御の検討として、横方向（操舵）を制御した複数台（5台）の車両からなるプラトーン走行についてシミュレーションによる理論的研究を行った[12]。

1994年度は2台の実車両を使って、追従車のスロットルのみの制御による縦方向の車両追従の実験的および理論的研究を行い、非線形制御理論を利用した車間距離制御系の有効性を明らかにした[13, 14]。

1995年度は、車両制御の研究に加え、自動運転環境におけるドライバとのインターフェース、交通流の研究を行った[15, 16]。特に車両制御の研究については、前年度の実験システムにブレーキの制御と車々間通信を組み込み、先行車の加減速に対しても精度よく目標車間距離を維持する縦方向制御システムを構築した。このシステムの有効性を実験および理論的に検証することにより、車々間通信の有効性を明らかにした[17]。また車々間通信の誤動作に対するフェイルセーフシステムについての検討を行った[18]。

1996年度は、車両制御の研究として、前方を走行している車両の相対位置を検出し、その車両の走行軌跡に追従するための横方向制御システムについての研究を行った。制御に必要な情報と追従精度の関係を理論的に検討し[19]、その検討結果の妥当性を実験によって明らかにした[20]。

1997年度は、車両制御の研究に加え、車線に対する横変位計測、自動運転環境における車々間通信、交通流に関する研究を行った。車両制御の研究としては、プラトーン走行の高度化を目標とした制御システムの検討を行った。プラトーンを一力学系として扱うことによって、プラトーンの挙動を制御する手法について検討した。計測に関する研究としては、自動車が行走車線を検出するための路上マーカー（磁気ネイル等）検出による車両横変位計測に関する検討を行った。マーカー間隔や、マーカー設置誤差が、計測誤差に与える影響を解析し、誤差の影響を抑制するためのカルマンフィルタを利用した横変位推定アルゴリズムの検討を行った[21]。通信に関する研究としては、ベトリネットを利用した車々間通信システムモデルの有効性を検討した。ベトリネットは並列性や同期性を有するシステムの記述に有効な数学的アルゴリズムである。このベトリネットにより複数の種類の車々間通信手続きをモデル化し、モデル化した手続きを定量的に比較できることを明らかにした[22]。交通流の検討としては、トラックの輸送における自動運転システム（ディアルモードトラック）に焦点をあて、車両の流れの解析や車線の分岐点や、合流点における制御方式の検討を行った[23]。

1998年度は、車両制御の研究に加え、ドライバのインタフェースの研究、先行車検出に関する研究を行った。車両制御の研究としては、DGPSを利用した絶対位置情報をプラトーン走行制御に利用する前段階として、DGPSを利用した絶対位置情報の車両制御への利用可能性を検討した。DGPSを利用した絶対位置情報のリアルタイム推定アルゴリズムと、絶対位置情報に基づく操舵制御アルゴリズムの構築を行い評価することで、DGPSを利用した絶対位置情報が、車両制御を行うために十分な精度とリアルタイム性を有することを明らかにした。ドライバのインタフェースの研究としては、自動運転システムではなく、運転支援システムを対象として、ドライビングシミュレータを使用した解析を行った。操舵支援システムの介入度別に、ドライバの車線追従成績を評価することにより、システム介入度とドライバ挙動の定量的な評価を行った[24]。先行車検出に関する研究としては、赤外線カメラを利用した先行車検出法の検討を行った。赤外線カメラによって撮影された画像から、車両の特徴的な温度分布を抽出することにより先行車を検出する手法を提案しその有効性を確認した。

1999年度は、車両制御の研究として、DGPSを利用した絶対位置情報の応用技術として、車車間通信を利用した車両相対位置計測の検討や、路車間通信を利用した障害物回避制御の検討、プラトゥーンのタスク制御、巨視的な解析に基づくプラトゥーン走行の評価、プラトゥーン挙動の最適化の研究を進めている。また、ドライバとのインターフェースの研究としては、6軸パラレルマニピュレータによる可動ドライビングシミュレータを構築し、ドライバ挙動の評価を行っている。計測系の研究としては、赤外カメラとレーザーレーダのセンサフュージョンによる先行車検出技術の検討を進めている。

本論文の対象は、1997年度から1999年度における車両制御の研究に関する成果である。すなわち、プラトゥーン走行の高度化を実現するための制御システムの研究に関する研究成果をまとめたものである。

2.2 自動運転システムにおける制御構造

2.2.1 階層型制御構造

自動車の自動運転システムの制御は、大きく2つに分けることができる。1つは車両側の制御であり、もう1つはインフラ側の制御である。車両側の制御は、各車両が安全性、安定性、高効率性を維持しながら、目標コースを走行するための運動制御であり、各車両内で実行される。一方インフラ側の制御は、交通状況に応じて各道路セクションにおける走行速度や、交通密度を決定したり、事故あるいは故障車の発生時の処理を決定し、自動運転車両がとるべき最適なストラテジを伝達する役割を担う[25, 26]。インフラ側と自動車側における制御の役割を明確にするものとして、アメリカのPATHでは、階層型制御構造が提案されている[27]。提案された制御構造は、最上層からネットワークレイヤー、リンクレイヤー、コーディネーションレイヤー、レギュレーションレイヤー、フィジカルレイヤーの5層からなるものであり、前者2層が、インフラ側制御層であり、後者3層が車両側制御層である。各制御層の役割を表2.2.1に示す。図2.2.1に階層型制御構造を示す。

表2.2.1 階層型制御構造における各制御層の役割

階層	役割
ネットワークレイヤー	道路全体を監視し交通容量などを決める
リンクレイヤー	道路の各セクションの最適なプラトゥーンサイズや最適な速度などを決める
コーディネーションレイヤー	プラトゥーンの合流、分離、車線変更などを決め、指示を出す
レギュレーションレイヤー	縦方向制御や横方向制御を行う
フィジカルレイヤー	制御対象（自動運転車両のハードウェア）

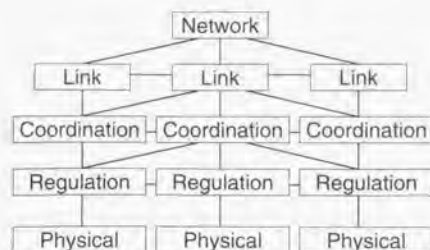


図2.2.1 階層型制御構造

2.2.2 制御構造に関する主な研究文献の紹介

この項では、階層型制御構造の利用に関する研究文献を紹介する。次節以降における概説の対象は主に前述の制御層の下位3階層、すなわち車両側の制御層に相当するものである。言うまでも無く、上位2階層に関する研究文献も数多く存在し、以下に紹介する文献もその一部に相当するものである。

文献[25]では、階層型制御構造による異常発生時の対処法が提案されている。この研究の特徴は、車両に異常が発生しても、それをシステム全体の異常として扱わずに対処することを目的としていることである。車両に異常が検出した場合の対処として、車両の異常が発生した際に、その車両が、正常に動作している部分を利用して実施できる制御動作に関する情報を上位の制御層に伝達する手法、および検出した異常の分類法を提案している。車両に異常が発生した場合の各制御層のタスクを事例別に説明し、異常発生から正常な状態に戻す手法を提案している。

文献[28]では、救急車等の緊急車両走行する際、自動運転車線利用して、円滑に目的地に到達させる手法を提案している。この場合、リンクレイヤーからの制御により自動運転車両を適切に配置して、緊急車両が通行する領域を確保することを提案している。

文献[29]では、リンクレイヤーの制御による、交通流の安定化手法が提案されている。自動運転車線における交通流が非定常状態（部分的に低速度かつ高密度な部分が存在する状態）を、リンクレイヤーから車線変更率と推奨速度情報を車両に送信することにより、定常状態に移行させる手法を提案している。

2.3 自動運転システムにおける運動制御（縦方向制御）

車両側の運動制御出力は、アクセル、ブレーキ、操舵の3つである。この中で、アクセルとブレーキの制御は縦方向（Longitudinal Control）制御と呼ばれ、操舵の制御は横方向制御（Lateral Control）と呼ばれている。縦方向制御と横方向制御は一般に分離して扱われる。この節でもこのような分類にならない。この節にて縦方向制御、第

2.4節にて横方向制御を解説する。

2.3.1 縦方向制御のストラテジ

自動運転システムにおける縦方向制御の大きな目的の1つは前後車両との車間距離を保つことである。車間距離維持のためのストラテジとして、鉄道等で使用されている閉塞制御、(仮想的な)移動参照点に追従する点追従制御、そして先行車に追従する車両追従制御を挙げることができる[11]。この中で、車両追従制御は、前者2つに比べて高交通容量を期待できるものとして、プラトーン走行や自律走行の基本的なストラテジとなっている。以下では、車両追従制御に焦点を絞り解説をすすめる。まず、縦方向制御の概説に先立ち、自動運転の形態や車群安定性の指標について説明する。その後、縦方向制御の概説を行う。

2.3.2 プラトーン走行と自律走行

自動運転システムの大きな目的は、自動車交通の安全性と効率性を向上させることにある。このような目的を同時に満足させる自動運転の形態としてプラトーン走行がある。プラトーン走行とは、数台から十数台の自動車が高密度(短い車間距離)な隊列走行を行うものである(図2.3.1参照)。またこのような隊列はプラトーンと呼ばれている。車間距離を縮めることにより、高交通容量と、先頭車以降の車両の空気抵抗の低減による燃料消費の低減を実現することができる。安全に関しては、プラトーン内での衝突が起こっても車間距離が短いために衝突時の衝撃が小さく抑えられる(十分な相対速度が発生する前に衝突する)利点を持っている[6]。

一方、自律走行とは、車両単体で自動運転を行うものであり、現在実用化されている車間距離制御機能付きのクルーズコントロール(Adaptive Cruise Control)も自律走行制御と考えて良い。自律走行制御では、交通容量の拡大よりも、安全性の向上、ドライバの負担軽減が重視されている。



図2.3.1 プラトーン走行

2.2.3 スtringスタビリティ

プラトーン走行あるいは自律走行のための縦方向制御系を設計する際、設計者は車両単体における制御性能、安定性、ロバスト性を考慮するほかに、その制御によって生じるプラトーンの挙動あるいは交通流の安定性を考慮しなければならない。この節で解説するStringスタビリティは、プラトーンや交通流の安定性の指標となるものである。これは、車間距離誤差が後続車に行くにしたがい増幅伝搬しないことを指すものである。例として、Stringスタビリティが満たされていない場合の

現象を示す、図2.3.2のような車間距離5[m]のプラトーンで先頭車が減速した場合、先頭車と2番目の車両の車間距離誤差が1[m]（この場合車間距離は4[m]）になったとする。この時にもし、誤差が増幅伝播して、4番目と5番目の車両の車間距離誤差が5[m]になったとすると、これらの車両間で衝突が起こることになる。また、先頭車が急停止しなくとも、振動的な車間距離誤差が発生した場合に、その振幅が後続する車間距離に増幅伝播し、後続車両の乗り心地の悪化、無駄な加減速、最悪の場合衝突を招くことになる。

縦方向制御がストリングスタビリティを満たす条件は、 i 番目の車間距離誤差のラプラス変換 $E_i(s)$ 、 $i+1$ 番目の車間距離誤差を $E_{i+1}(s)$ とすると $E_{i+1}(j\omega)/E_i(j\omega)$ が任意の周波数 ω で1以下となる、すなわち以下の式を満たすことである。

$$\frac{E_{i+1}(j\omega)}{E_i(j\omega)} \leq 1 \quad \forall \omega \quad \dots\dots\dots (2.3.1)$$

ストリングスタビリティを保证するように縦方向制御系を設計する場合、一般に制御系の高ゲイン化が余儀なくされる。制御系を高ゲイン化すると、センサノイズやモデル化誤差等に対しても大きな制御入力が発生し、制御系のロバスト安定性が劣化する。すなわち、車両単体における安定性と車群における安定性には、トレードオフの関係がある[30]。

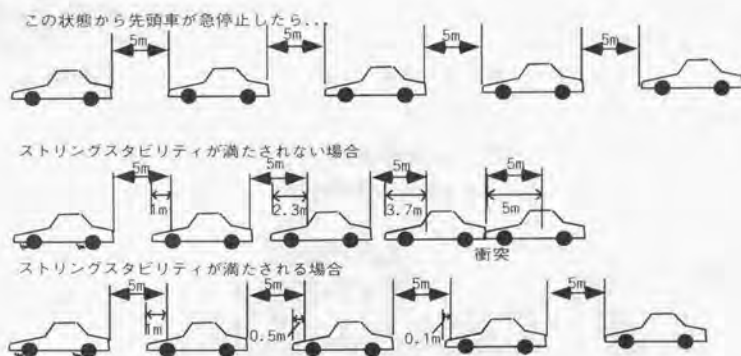


図2.3.2 ストリングスタビリティ

2.3.4 2階層制御構造

車両追従制御は、一般的に2階層の制御構造をとる[31]。これらは共に、第2.2.1項で説明した制御構造の中の、レギュレーションレイヤーに相当する。上位階層は、目標車間距離を維持するために必要な車両加速度あるいは加加速度(Jerk)を決定する制御層である。下位階層は、上位階層によって決定された車両加速度あるいは加加速度を出力するためにエンジンやブレーキを制御するサーボ制御層である。また、目標車間距離が大きい車間距離制御機能付きクルーズコントロール(ACC)では、目標速度

を算出するための上位制御層と、その速度を発生するための下位制御層から構成されているものもある。以下では、プラトーン走行における上位制御層、下位制御層の順番で概説を行う。

2.3.5 一定車間距離制御と一定車間時間制御（上位制御層）

プラトーン走行の縦方向制御として近年最も精力的に研究されてきた上位制御として、一定車間距離制御 (Fixed Distance Policy) と一定車間時間制御 (Time Headway Policy) がある[32]。一定車間距離制御は、目標車間距離を一定値 L [m] として制御するものである。一方、一定車間時間制御は、目標車間距離に速度依存項を導入し、 $L+hV$ [m] として制御するものである (図 2.2.3 参照)。

ストリングスタビリティの観点から両者を比較すると、一定車間時間制御に軍配が上がる。というのは、一定車間距離制御でストリングスタビリティを満たすためには、各車両の制御入力決定の際にプラトーン先頭車と先行車の状態量の情報が必要となる。つまり、一定車間距離制御を実現するためには各車両に車車間通信システムが搭載されていることが前提となる。一方、一定車間時間制御では、ストリングスタビリティを満たすために他車両の状態量の情報を必要としない。すなわち、車間距離センサのみでストリングスタビリティを満たす縦方向制御が実現できる。よって一定車間時間制御は、プラトーン走行のみならず、オートクルーズコントロールを含む自律走行の制御に適している。ストリングスタビリティを満たすための車間時間 h は、制駆動系およびアクチュエータの遅れ時間と制御ゲインによって制限される。たとえば、車間距離誤差に対する PD (比例微分) 制御を行う場合、すなわち、

$$a_{des} = k_d(V_{i-1} - V_i) + k_p(X_{i-1} - X_i - hV_i - L) \quad \dots\dots\dots (2.3.2)$$

として目標加速度 a_{des} を決定する場合、車間時間 h 、比例ゲイン k_p 、微分ゲイン k_d およびアクチュエータ遅れ時定数 T_m は以下の関係を満たさなければならない[28]、

$$\begin{cases} k_d + hk_p \leq \frac{1}{2T_m} \\ 2hk_d + h^2k_p > 2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2.3.3)$$

または、

$$\begin{cases} k_d + hk_p \geq \frac{1}{2T_m} \\ \left(k_d - \frac{1}{2T_m}\right)^2 < \left(\frac{h}{T_m} - 2\right)k_p \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2.3.4)$$

上式から、 h を小さく設定するためには、制御系の高ゲイン化し、同様にアクチュエータの遅れ時間を小さく抑えなければならない。一般に h の最小値は乗用車で 0.25 [s] 程度、大型車で 0.7 [s] 程度と言われている。自律走行制御における h は、おおむね 1 [s] ~ 2 [s] に設定されている。

次に巨視的な観点から両者を比較する。まず実現できる交通容量で両者を比較した

場合、一定車間距離制御に軍配が上がる[32]。一定車間距離制御は、一定車間時間制御の h を0としたものと考えて良く、より短車間距離での走行を実現できる。すなわち、より高い交通容量を実現できる。また、故障車や事故の発生で交通流が乱れた場合も、一定車間距離制御が有利である[33]。故障車の除去や事故の処理の終了後の交通流を比較すると、一定車間距離制御では、短時間でスムーズに交通流が回復する。一方、一定車間時間制御では、低速度になることによって生じた高交通密度部分が消滅することなく後方に伝搬していく(Shock Wave)。このような高密度部分を除去するためには、インフラ側の制御が必要となる。

自律走行の縦方向制御としては、前述の一定車間時間制御のほかに、目標車間距離に V^2 に比例する項を付加したものがある[34]。目標車間距離に V^2 に比例する項を導入することにより制動距離を確保し、先行車急停止時の衝突を回避することができる。制御で利用する情報が多ければ、その分制御性能の向上が期待できる。車車間通信を想定しない自律走行の制御では、車間距離センサを利用して先行車との相対速度を検出したり、状態推定器を利用して先行車加速度の情報を得ることにより、制御で使用する情報量を増加している[34]。



図2.2.3 一定車間距離制御と一定車間時間制御

2.3.6 エンジンとブレーキの制御（下位制御層）

上位制御層（一定車間距離制御あるいは一定車間時間制御）で決定される値は、一般に目標車両加速度あるいは、目標車両加加速度である。車両が目標加速度または加加速度を出力させるためには、エンジンあるいはブレーキのサーボ制御が必要となる。制御系の設計は、制御対象の構成によって大きく異なったものとなる。例として、ブレーキの制御にブレーキペダルを押す直動式のアクチュエータを使用する場合と、フットブレーキの油圧系と並列に制御用の油圧系を構成し、バルブの開閉でブレーキ圧を発生する機構を使用する場合を比較する。前者の機構においては、ペダルの踏力と発生するブレーキ力のヒステリシス等の影響がある。この影響を克服して所望のブレーキ力を発生させるために、バキュームブースターなどのダイナミクスを考慮した非線形制御系が提案されている[36]。一方後者の機構においては、ブレーキ圧とブレーキ力はほぼ線形の関係になるため、簡単な油圧制御系で十分である[18]。また、可変流量バルブを使用すれば、滑らかにブレーキ圧を制御できる。

エンジンの制御においては、目標加速度から、必要なエンジントルクを決定し、エンジントルクと現在のエンジン回転数によりスロットル開度を制御する方式などが提

案されている。スロットル開度を計算するためには、駆動系、エンジン系の非線形特性を考慮する必要がある。考慮すべき非線形特性として、エンジントルク特性、トルクコンバータのトルク比特性、トルクコンバータのトルク容量特性、ギア比等がある[12]。大型車の場合では、これらの特性に加えターボチャージャー特性も考慮する必要がある[37]。

一般に下位制御層では、定常値において指令値に追従することを目標としているが、近年の研究では指令値に至る応答特性も制御する手法も提案されている。応答特性を制御し、車両の運動特性を規範特性に統一することでプラトーンを一力学系として扱うことや、ストリングスタビリティを保証（ストリングスタビリティは一般に車両の応答特性を仮定した上で評価されるので、車両の応答特性が仮定した特性と大幅にずれる場合は、ストリングスタビリティが保証されない。）すること[30]が可能となる。

2.3.7 縦方向制御系の構成

下位制御層によって発生した加速度およびその積分値である速度、車間距離は上位制御層にフィードバックされる。このフィードバック値に基づいて上位制御層は、新たな目標加速度あるいは目標加加速度を決定する。故に上位制御と下位制御層を明確に区分せずに、統合した形で制御系を構成する場合が多い。提案されている制御系としては、PID制御や状態フィードバック制御、適応制御、非線形ロバスト制御の1つであるスライディングモード制御[38]、ニューラルネットワークを利用した制御等がある。制御に利用する情報は、速度、加速度、車間距離、先行車との相対速度、先行車加加速度、プラトーン先頭車加加速度、指定走行速度等である。

縦方向制御の一例として、プラトーンの一定車間距離制御に適用された滑り面法(Sliding Surface Method)による制御系[31]を紹介する。この制御は、米国のPATHで提案されたものであり、1997年にサンディエゴで行なわれたAHS実験デモにおいて使用された。図2.3.4に示される*i*番目の車両における滑り面 S_i を以下のように定義する。

$$S_i = \dot{e}_i + \frac{\omega_n}{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}} \cdot \frac{1}{1 - C_1} e_i + \frac{C_1}{1 - C_1} (v_i - v_f) \quad \dots\dots\dots (2.3.5)$$

ここで、 e_i は車間距離誤差、 v_f はプラトーン先頭車速度であり、 ω_n および C_1 は調整する制御パラメータである。ここで、

$$\dot{S}_i = -\lambda S_i \quad \lambda = \omega_n (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) \quad \dots\dots\dots (2.3.6)$$

となるような制御入力を行えば、 S_i を0に漸近することができる。上式を満たすための目標加加速度は、

$$\ddot{x}_{i,des} = (1 - C_1) \ddot{x}_{i-1} + C_1 \ddot{x}_i - \left\{ 2\xi + C_1 (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) \right\} \omega_n \dot{e}_i - (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) \omega_n C_1 (v_i - v_f) - \omega_n^2 e_i \quad \dots\dots\dots (2.3.7)$$

として与えられる。ここで、 a_i は、プラトーン先頭車の加速度である。上式で与えられた目標加速度に基づき、エンジンあるいはブレーキのサーボ制御を行う。実験により、この制御で8台の乗用車が目標車間距離6.5[m]にて、20[cm]以下の追従精度でプラトーン走行を行ったことが確認されている。

制御系の構成において特に重視されるものが制御系のロバスト性である。車両の制駆動システムに含まれる非線形特性や不確かさを制御系でカバーすることが要求されることは言うまでもなく、勾配や風などの外乱や、車重変動や車両の経年変化によるパラメータ変動などが存在する状況で所望の制御効果を発揮することが要求される。また、急制動などの特殊な状況においても確実に制御効果を発揮することも重要である。



図 2.3.4 縦方向制御系の一例

2.3.8 縦方向制御に関する主な研究論文の紹介

この項では、縦方向制御に関する主な文献を紹介する。車間距離制御技術には、明確にプラトーン走行を想定したものや自律走行の一種である車間距離制御機能付きクルーズコントロール (ACC) を想定したものもあれば、明確に区分されていないものもある。また、1つの文献で様々な事柄について検討している文献もある。上記の理由のために文献を分類することは困難であるが、便宜のためにあえて以下のように分類して紹介する。

- ・プラトーンの縦方向制御に関するもの (プラトーンとACCとの区別を明確にしていないものも含む)
- ・ACCの縦方向制御に関するもの
- ・ACCと交通容量・交通流の関係に関するもの
- ・制御方式の比較に関するもの
- ・プラトーンの合流・離脱における縦方向制御に関するもの
- ・下位制御 (アクチュエータ制御) に関するもの

ここでは紹介しないが、ASVにおける衝突回避技術などもプラトーン走行やACCに利用することができる (たとえば、[39, 40, 41] など)。縦方向制御に関しては、横方向制御の場合と異なり、無人搬送車や移動ロボットなどを制御対象とした文献 (たとえば [42]) は少ない。この理由として、無人搬送車や移動ロボットに要求される縦方向制御は正確に目標位置に停止することであり、比較的簡単なモータ制御で実現できることが考えられる。

(1) プラトゥーンの縦方向制御に関するもの

ここでは、プラトゥーンを対象とした（プラトゥーンとACCの区別を明確にしているものも含む）縦方向制御に関する文献を紹介する。

文献[13, 14]は、すべり面に基づく縦方向制御に関する論文である。その中で縦方向制御は車間距離誤差とその微分値と積分値をすべり面としたスライディング制御となっている。駆動系の特性をマップ関数を利用することにより簡略化して、シミュレーションや、スロットル弁開度の計算に利用している。PID制御と比較することにより、スライディング制御はPID制御よりも目標値に早く安定に収束することをシミュレーションと実験で確認している。

文献[18]は、すべり面に基づく縦方向制御に関する論文である。制御手法は文献[13, 14]と同様である。車車間通信を利用することにより、先行車が加減速をする場合でも、1[m]以下の誤差で車間距離を維持できることを実験で確認している。また、車車間通信の異常を検出する手法や、車車間通信異常時の対処手法を提案し、実験により有効性を確認している。

文献[31]は、1997年にサンディエゴで行なわれたPATHのAHS実験に使用されたプラトゥーンの縦方向制御と実験結果に関する論文である。制御系は、滑り面に基づく一定車間距離制御（第2.3.7節参照）を利用している。実験におけるプラトゥーンへの車両の合流と、プラトゥーンからの車両離脱における制御、およびギアシフトへの対応について説明している。ギアシフトに関しては、ギアシフトのタイミングを既知とし、ギアシフト時の制御ゲインを下げることにより、ギアシフト時の車間距離制御を安定なものにしている。実験結果の8台の乗用車が目標車間距離6.5[m]にて、20[cm]以下の追従精度でプラトゥーン走行を行ったことが確認している。

文献[37]は、大型車の縦方向制御に関する論文である。まずターボチャージャー付きエンジンをもつ大型車の駆動システムをモデル化し、スロットル弁開度と速度関係を一次遅れ式で近似している。この関係に基づき制御系を構成している。速度制御として、速度誤差に対するPIQDコントローラ（Qは速度誤差と速度誤差の絶対値の積）と適応PIQコントローラを提案し、PIDコントローラや適応PIコントローラと比較し、有効性を確認している。次に適応PIQコントローラを一定車間時間制御に応用して、縦方向制御系を構成している。シミュレーションにより先行車の情報がなければ、ストリングスタビリティを満たすためには0.7秒以上の車間時間が必要であるが、先行車の情報がある場合は車間時間0秒の車間距離制御でもストリングスタビリティを満たせることを確認している。

文献[43]は、PATHの初期における自動運転システムに関する論文である。その中で縦方向制御は車間距離誤差とその微分値と積分値をすべり面としたスライディング制御となっている。エンジンモデルからエンジン特性のルックアップテーブルを作成し、アクセル開度を決定している。実験で±1m以下の精度で追従できることを確認している。

文献[44]は、スライディングモード制御による縦方向制御と横方向制御に関する論文である。その中で縦方向制御については、すべり面に車間距離誤差とその微分値と

積分値をとり、走行抵抗、相対速度誤差、車間距離誤差、すべり面の符号、前輪横力の縦方向成分によって制駆動トルクを決定する。さらにこのすべり面の符号は操舵角の決定の中にも用いられている。駆動力発生遅れによるチャタリング防止のために、すべり面の符号関数には飽和関数を用いている。シミュレーションで縦横独立に作成されたPID制御と比較することにより、この制御はPID制御より高い追従精度を維持できることを確認している。

文献[45]は、日産の自動運転システムに関する論文である。この中で縦方向制御は一定車間時間制御(1秒)となっている。フィードバック制御入力として車間距離に対するPID制御、フィードフォワード入力として先行車の目標加速度に1次遅れフィルタ(時定数は車間時間)をかけたものに空気抵抗、走行抵抗を足し合わせて、制御車両の目標加速度を決定している。実験で $\pm 1\text{m}$ 以下の精度で追従できることを確認している。

文献[46,47]は、トヨタの自動運転システムに関する論文である。その中で縦方向制御は一定車間時間制御(0.8秒)であり、目標車間距離に対するPD制御に先行車の加速度を加えることで、制駆動力を決定している。実験では $-0.2\text{G} \sim 0.15\text{G}$ の加減速で $\pm 0.5\text{m}$ 以下の精度で追従できることを確認している。誤差の原因として車間測距誤差と車車間通信の遅れを指摘している。なお車間距離センサのみで追従を行う場合は数倍の誤差が発生することを確認している。

文献[48]は、フランスの電気自動車による自動運転システムに関する論文である。その中で縦方向制御は、一定車間時間制御となっており、車間距離誤差と相対速度誤差によって加速度を決定する。すなわちPD制御となっている。衝突しないための配慮より、車間距離誤差に対するフィードバックゲインは速度に反比例したものとなっている。このシステムでは制御車両は電気自動車なのでモータの指令電圧を速度と必要な駆動力から算出している。

文献[49]は、ヨーロッパのコンボイシステムに関する論文である。その中で縦方向制御は最適レギュレータを使用している。アルゴリズムの詳細には触れられていない。文献に示された図により、状態フィードバックと車間距離誤差、速度誤差、加速度誤差を利用して目標加速度を決定しているようである。目標車間距離は、速度、天候、ドライバの性格によりファジー理論で決定している。

文献[50]は、車両の前後運動特性を考慮した車間距離制御に関する論文である。 T 秒後の予測位置偏差と予測相対速度に係数をかけて足し合わせることににより、制御車両の加速度の変化量を決定する積分制御系を提案している。係数の決定には制御車両の加速度が予測位置偏差と予測相対速度におよぼす感度を利用している。さらに伝達関数により制御系の安定性を調べ、 T を1.5秒付近に定めている。実験で $\pm 0.5\text{m}$ 以下の精度で追従できることを確認している。

文献[51]は、プラトーン内の制御車両を先行車ではなく、割り当てられたセルに追従するように制御する方式に関する論文である。この方式では制御車両は先行車の追従誤差の影響を受けないので、ストリングスタビリティが容易に満たされる。各車両のセルの大きさは各車両固有の値をとる。制御はセル先端に対する位置誤差のPD

制御をなっている。この制御は通常の車間距離制御に先行車のその前の車両に対する追従誤差をフィードバックしたものであると言ってもよい。この方式と車両追従方式をシミュレーションで比較することにより、この制御では精度良く、車間距離を維持できることを確認している。またセルの大きさを変化させることにより、合流、分離が容易に行えたり、走行環境に容易に適応できると説明している。

文献[52]は、LQG制御による縦方向制御に関する論文である。先行車との車間距離および先行車速度の情報と自車状態量を利用して車間距離制御を行う。LQG制御系により、相対加速度、相対速度を推定して、最適な制御入力を決定している。車両の非線形性や不確かさを外乱として扱っている。シミュレーションにより制御系の有効性を評価している。

(2) ACCの縦方向制御に関するもの

ここでは、自律走行システムの1つであるACC（アダプティブクルーズコントロール）に関する文献を紹介する。ACCは、ATCCやICCなどと呼ばれている場合もあるが、ここでは全てACCという名称に統一して紹介する。

文献[53]は、ACCのための縦方向制御に関する論文である。制御入力の決定手法として他の車両に与えるネガティブな影響の最小化を考慮している。各車両の目標加速度の算出法として、離散時間系のLQ制御を適用し、その評価関数として、周囲全ての車両の車間距離誤差、速度誤差、加速度を使用している。巨視的なシミュレーションによって、車両割り込み時の車両の挙動を評価している。

文献[54]は、ニューラルネットワークを利用したACCの縦方向制御に関する論文である。入力には車間距離誤差、相対速度誤差、エンジン回転数である。車間距離誤差、相対速度誤差、相対加速度誤差に関する評価関数を小さくするように学習をおこなう。学習においては乗り心地を良くすることに重点が置かれている。コンピュータシミュレーションで学習を行うために自動車の駆動システムのモデル化について説明している。実験の結果、この制御システムでは車間距離に定常偏差が発生することを確認し、積分制御器を導入することで定常偏差をなくすることができることを確認している。

文献[55]は、ファジー制御によるACCに関する論文である。シミュレーションシステムの概要と制御の概要が述べられている。

文献[56]は、バスのACCに関する説明。システム構成、安全距離、実験結果が示されている。目標車間距離は、制動距離を考慮に入れた安全距離に基づいて決定されている。

文献[57]は、障害物前での停止を考慮したACCの縦方向の制御に関する論文である。障害物の前で停止するアルゴリズムを2つのフェーズより構成。また通常走行の制御アルゴリズムを5つの状態別に構成。シミュレーションで先行車停止時や障害物発生時等における制御の有効性を確認している。

文献[58]は、制御はPID制御によるACCに関する論文である。制御に遅れをいれる

ことにより、ドライバが違和感を抑制している。また、高速道路上での状況による車間時間の違いを説明している。

文献[59, 60]は、日産のACCに関する論文である。文献[57]ではシステム構成、文献[58]では制御アルゴリズムが中心に説明されている。制御系は目標速度を決定する上位制御と目標速度を発生する下位制御から構成されている。上位制御は、車間距離の応答特性がドライバの運転挙動を模擬する(2次振動系の伝達関数特性となる)ための2自由度制御系を構成している。ドライバの運転特性を模擬することにより、ACC動作中のドライバの違和感を軽減できる。また下位制御は、目標速度に対する応答を1次遅れ特性に追従させるモデルマッチング制御となっている。

文献[61]は、ホンダのACCに関する論文である。システム構成、市場適合性、評価結果が紹介されている。制御アルゴリズムについては述べられていない。

(3) ACCと交通容量・交通流の関係に関するもの

ここでは、ACCを搭載した車両が道路に混在する場合の、交通容量や交通流挙動を解析している研究に関する文献を紹介する。

文献[34]は、ACCにおける一定車間時間制御と交通容量の関係に関する論文である。縦方向制御入力は加速度で、車間距離誤差に対する比例制御となっている。ゲインおよび車間時間の決定条件として、ストリングスタビリティが考察されている。目標車間時間一定モデルと、制動距離を考えた目標時間可変モデルを紹介し、交通容量を比較している。また、手動運転車との混在交通における交通容量を調べている。両者の制御とも、自動運転車の割合の増加とともに交通容量が増加する傾向があるが、5～10%程度の場合、手動運転車の場合よりも交通容量が低下することを確認している。

文献[62]は、ACCと手動運転車の混在交通における解析に関する論文である。手動運転車と縦方向制御を行う自動運転車が同じ車線に混在する場合の交通流挙動を解析している。手動運転車の縦方向ダイナミクスの伝達関数と自動運転車の縦方向ダイナミクスの伝達関数を仮定した上で解析を行っている。手動運転車の場合、追従誤差が増幅して後方に伝播するが、自動運転車が混ざることによって、増幅効果を抑制できることを確認している。また、自動運転車が混在することにより、交通流が安定化し、その結果、燃料消費の低減、CO、CO₂、NO_x排出抑制の効果が得られることを確認している。

文献[63]はACCの交通流への影響に関する論文である。ACCを搭載した場合にドライバ運転時よりも交通量が増大することを説明し、車間時間の決め方などを説明している。減速度に制限を付けた場合の混在交通における追従走行シミュレーションを行っている。

(4) 制御方式の比較に関するもの

ここでは、一定車間距離制御と一定車間時間制御の比較に関する文献を紹介する。

文献[32]は、PATHの2つ縦方向制御に関する論文である。一定車間距離制御と一定車間時間制御が説明・比較されている。まず車両の駆動システムのモデル化について説明している。実験によりモデルの妥当性を確認している。つぎに一定車間距離制御について説明している。一定車間距離制御では車間距離誤差、相対速度誤差、先頭車加速度、目標速度偏差、先頭車に対する車間距離誤差、先頭車に対する速度誤差の中から利用できる情報に係数をかけて足し合わせることで制御車両の加速度を決定している。その中で利用できる情報を仮定し、その場合の安定性やストリングスタビリティを考察している。一定車間距離制御では、先行車と先頭車の情報なしではストリングスタビリティが保証されないと述べている。すなわち一定車間距離制御では車間通信が不可欠となる。次に一定車間時間制御について説明し、この制御では先行車（相対速度の情報はセンサで得られるとしている）や先頭車の情報がなくてもストリングスタビリティが満たされることを示している。すなわち、一定車間時間制御では必ずしも車間通信は必要ではない。この制御として目標車間距離誤差とその積分値と相対速度誤差を滑り面としたスライディング制御を説明している。また初期誤差がある場合のコントローラの修正法も説明している。最後に一定車間距離制御と一定車間時間制御を比較するために、交通容量を比較している。シミュレーションの結果、一定車間距離制御(1m)は一定車間時間制御(0.1秒または0.2秒)よりも25%以上大きな交通容量を実現できることを確認している。故に高い交通容量を実現するためには車間通信という代価を払っても一定車間距離制御が必要であると結んでいる。

文献[33]は、一定車間距離制御と一定車間時間制御の比較に関する論文である。2つの制御について巨視的な観点からの比較を行っている。車間時間制御では、外乱が生じた場合、定常状態に外部制御なしで回復できず、交通密度に衝撃波(Shock Wave、高密度部分)が消滅することなく伝播するが、車間距離制御ではそのような現象が起こらないことを、理論式とシミュレーションで示している。

文献[64]では、PATHの車間距離制御について、先頭車の情報が得られない場合の制御に関する論文である。制御則を3つ提案し比較している。先頭車の情報は得られないが、 r 台先までの車両の情報を得ることができるとしている。1つめとして、一定車間距離制御を提案している。 r 台先までのすべての車両に対する車間距離誤差、相対速度誤差、加速度誤差より制御車両の加速度を決定している。2つめとして一定車間時間制御を提案している。3つめとしてプラトーンを r 台毎に分割して一定車間距離制御を行うミニプラトーン制御を提案している。これらを $r=5$ 台として20台の車両のプラトーン走行をシミュレーションで比較している。3種の制御則の中で、ミニプラトーン制御が、追従誤差の減衰を保証し、かつ高い交通容量が維持できるため最も有効であると述べている。

(5) プラトーンの合流や離脱における縦方向制御に関するもの

ここでは、プラトーンに車両が合流する際やプラトーンから車両が離脱する際の縦方向制御に関する文献を紹介する。

文献[65]は、プラトゥーンの合流・離脱時の縦方向制御に関する論文である。車間距離制御として、先行車の情報に加え、後続車の情報も利用した制御系を提案している。制御入力には先行車と後続車に対する位置誤差、相対速度誤差、加速度誤差および先頭車に対する速度誤差、加速度誤差より決定される。シミュレーションにより、プラトゥーンから1台車両が離脱した場合の挙動をこの制御と文献[32]の車間距離制御について比較している。この制御では、文献[32]の車間距離制御に比べて離脱車両の後続車両の最大加速度が低く抑えられ、乗り心地が良くなることを確認している。またプラトゥーンの後端に別の車両が合流する場合、この制御では全ての車両が合流車両の影響を受けて加減速を行うことになる。しかし、この結果、合流時の合流車両と後端車両の最小車間距離が、文献[32]の車間距離制御よりも大きくなることを確認している。すなわちプラトゥーン内での衝突を防ぐことができる。この制御方式は、特別にセンサを付加することなく後続車の情報を先行車に送信する事で実現できると述べている。

文献[66]は、別々の車線を走行しているプラトゥーン同士の合流またはプラトゥーンに車両が合流する場合の制御に関する論文である。合流点のある車線上を走行しているプラトゥーンに車両または別のプラトゥーンが合流する手法を説明している。ある範囲での車車間通信、自車の絶対位置計測が可能等を仮定して、合流時の衝突判定、速度制御法が説明されている。縦方向制御は一定車間時間制御で、車間距離誤差に対するPD制御にて加速度の変化量を決定する。2台からなるプラトゥーンに1台が合流するシミュレーションにより、制御法の有効性を確認している。

文献[67]は、同一車線上を走行しているプラトゥーンと車両の合流時の速度制御に関する論文である。プラトゥーン後方より車両が合流する場合について、車間距離と相対速度の関係を求めている。この関係は先行車が急制動をかけたときに、衝突するときの相対速度をある値以下 (3.3m/s 以下であれば致命的でないといわれている) にあることを保証し、加加速度、加速度を許容値以下に抑えることにより決められている。この相対速度と車間距離の関係を満たしながら合流するための制御を説明し (加加速度を制御入力とした目標速度誤差、加速度誤差に対する比例制御)、その有効性をシミュレーションで確認している。また、離脱時の制御手法も説明している。

文献[68, 69]は、同一車線上のプラトゥーン間衝突を防止するためのパラメータ決定と速度制御に関する論文である。文献[68]では、まず2台のプラトゥーンが衝突しないことを保証する車間距離と相対速度に関係を求め、2台以上のプラトゥーンに拡張している。また合流、離脱時に衝突しないための条件を求めている。文献[69]では、プラトゥーン間衝突が起らないことを保証するための速度制御の方法、先行するプラトゥーンの加速度の推定方法を提案し、制御系の安定性を確認している。シミュレーションによって、合流、離脱、先行するプラトゥーンが最大減速度で制動した場合の車間距離と相対速度を評価し、いずれの場合も先行するプラトゥーンに衝突しないことを確認している。提案されている制御系はレギュレーションレイヤー (第2.2節参照) に位置付けられるものである。この制御層で安全を保証することにより、レギュレーションレイヤーとコーディネーションレイヤーを独立して設計することが可能と

なり、制御システム全体の設計を容易化できると述べている。

(6) 下位制御（アクチュエータ制御）に関するもの

ここでは、ブレーキやスロットルの制御やスリップ率の制御に関する文献を紹介する。

文献[36]は、PATHのブレーキシステムに関する論文である。パワートレインやバキュームブースタをモデル化することによりブレーキのダイナミクスをモデル化している。アクチュエータの制御として複数のすべり面をもつスライディングモード制御を提案し、その有効性をシミュレーションと実験で確認している。

文献[70]は、ブレーキ圧制御に関する論文である。ブレーキの油圧系のダイナミクスを精密にモデル化し、ブレーキ圧制御系を提案している。ブレーキの油圧系のモデル化にはボンドグラフを利用している。また制御系はPD制御であるが、幅広い圧力範囲で高速かつ良好な応答を得るためにゲインを目標圧力値に応じてスケジューリングしている。実験によって制御効果を確認している。

文献[71]は、ブレーキアクチュエータとスロットルアクチュエータの切り替え時の制御手法に関する論文である。複数のすべり面を利用した制御手法を提案している。アクチュエータのヒステリシス特性を利用すると、制御効果を落とさずにチャタリングが防止できることを示し、それをスロットルアクチュエータとブレーキアクチュエータを切り替える時の制御で利用している。実験により、 $0.1[m/s]$ 以下の誤差で目標速度軌跡に追従できることを確認している。

文献[72]は、縦方向運動において、タイヤのスリップを一定値に保つ制御に関する論文である。路面状態、不確かさに対してロバストな制御を提案している。この制御により、雪道上のプラトーン走行において追従車が先行車の加減速に対して、スリップ・ロックすることなく安定に追従できることを確認している。

2.4 自動運転システムにおける運動制御（横方向制御）

2.4.1 横方向制御のストラテジ

自動運転システムにおける横方向制御の目的は、目標レーン上を走行するように操舵角、操舵角速度または操舵トルクを制御することである。道路上のマーカを検出して制御する場合、車両の横方向ダイナミクスは他の車両に影響を与えない。そのため、縦方向制御の場合と異なり、制御系設計の際にプラトーン挙動や交通流の安定化等の巨視的な考察が不要である。また、横方向制御においては、プラトーン走行用あるいは自律走行用として明確に区別されない場合が多い。

横方向制御においては、安定かつ高精度に目標コースに追従することが要求される。例えば、横方向制御が $20[cm]$ 以下の精度で追従できることを保証できれば、自動運転車線の道路幅を車幅 $+40[cm]$ とすることができる。すなわち、専用車線での自動運転

システムを想定する場合、横方向制御の精度が車線の道路幅を規定することになる。横方向制御も縦方向制御同様、操舵角、操舵角速度または操舵トルクを決定する上位制御層と操舵アクチュエータを制御する下位制御層の2階層制御構造をとる。横方向制御の場合、一般に下位制御層は、モータのサーボ制御であるため、下位制御層の説明は省略する。

上位制御層をストラテジ別に分類すると地点追従制御と車両追従制御に分類できる(図2.4.1参照)。この節では、この分類に従い、第2.4.2項にて地点追従制御を説明し、第2.4.3項にて車両追従制御を説明する。



図2.4.1 地点追従制御と車両追従制御

2.4.2 地点追従制御

地点追従制御では、車両が道路上に敷設されたマーカを検出して、道路に追従するように制御を行う[73]。道路上のマーカとしては、磁気ネイルや誘導ケーブル、道路白線、再帰反射帯[74]などが使用されている。1996年に上信越自動車道で行なわれたAHS実験デモや、1997年にサンディエゴで行なわれたAHS実験デモでは磁気ネイルが使用された。以下では、磁気ネイルシステムを利用した横方向制御を中心に解説を行う。

磁気ネイルシステムは、道路上に一定間隔(1[m]または2[m])で敷設された磁気ネイル(強力な磁石)を車両に搭載された磁気センサで検出することにより、道路中心に対する横偏差やヨー角偏差を計測するシステムである。磁気ネイルシステムの特徴は、天候の影響を受けにくい、設置コストが低い、高精度な横偏差計測(3[cm]以下の精度)が可能等である。

磁気ネイルシステムで計測した車両真下における偏差は、横方向制御におけるフィードバック情報となる。しかし、フィードバック情報のみに依存した横方向制御は、操舵出力が振動的になる傾向がある。これを克服する手段は、フィードフォワード情報を導入することである(図2.4.2参照)。フィードフォワード情報は、一定時間後の推定横偏差や道路曲率の情報である。磁気ネイルシステムにおける獲得手段として、磁気ネイルの極性(N or S)を利用する方法がある。磁気センサは磁気ネイルの極性も検出できるため、道路曲率の情報をバイナリコード化(二値符号化)し磁気ネイルの極性に反映させる。この場合、車両は磁気ネイルの極性を検出しながら一定区間を走行することにより、道路の曲率の情報を得ることができる。磁気ネイルの極性を利用する以外に、検出した磁気ネイル数をカウントすることにより推定した道路上の車両位置と道路形状データを照らし合わせる方法や、前方の道路をCCDカメラで撮影し画像処理によって道路白線を検出する方法等がある。



図 2.4.2 地点追従制御

2.4.3 車両追従制御

車両追従制御では、車両がレーザーレーダ等で先行車の相対位置を検出して、先行車に追従するように制御を行う[19, 20]. この方式を採用している自動運転システムでは、先頭車の制御は人間が行うものと想定している場合が多い[75]. この方式では、磁気ネイル等の地上インフラなしで自動運転が実現できる利点を持っているが、誤差の蓄積という欠点も持っている. たとえば、図 2.4.3 のように複数台の車両にこの制御を適用する場合を考える. 2 番目の車両が先頭車に対して $10[\text{cm}]$ (ϵ_1) の誤差で追従し、3 番目の車両も 2 番目の車両に対して $10[\text{cm}]$ (ϵ_2) の誤差で追従したとき、3 番目の車両は先頭車に対して $20[\text{cm}]$ ($\epsilon_1 + \epsilon_2$) の誤差で追従することになる. このように後続車に行くにしたがい先頭車に対する誤差が大きくなれば、車線から逸脱する車両が発生する可能性が生じる. この問題を克服するために、車車間通信を利用して、後続車に追従誤差を送信し、後続車は先行車の追従誤差分だけ補正する制御を行う手法が提案されている[12]. 車両追従方式では、検出した先行車の相対位置がフィードフォワード情報になるので、制御系の安定性は容易に確保できる. 先行車の走行軌跡に高精度に追従するためには、先行車走行軌跡に対する追従誤差をフィードバックする必要がある. 追従誤差の情報を得るためには、検出した先行車相対位置を自車の運動に合わせて座標変換することにより、自車座標系上に先行車の走行軌跡を描く必要がある[20].

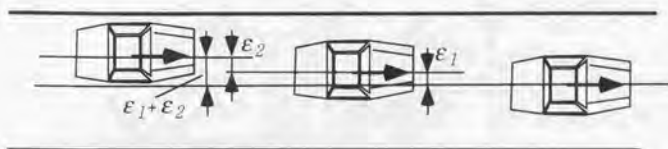


図 2.4.2 車両追従制御

2.4.4 横方向制御系の構成

横方向制御の設計問題は、車両横変位とヨー角のサーボ制御系の設計問題である. また自動運転環境における乗用車の横方向のダイナミクスは操舵角を入力とした線形方程式で近似できる. このため、横方向制御には様々な制御理論が適用可能であり、

PID制御などの古典制御, LQ制御, H_∞ 制御[76, 77], スライディングモード制御[38], ニューラルネットワーク, 幾何学的関係に基づく制御, ドライバの運転動作を模擬する制御等の様々な適用例が報告されている。一方大型車の横方向制御は, 乗用車の横方向制御よりも複雑である。牽引車と貨車のリンク機構の考慮のみならず, ロール運動の影響を考慮しなければならない[78]。

横方向制御の一例として, 乗用車の地点追従制御に適用されたFSLQ (Frequency Shaped Liner Quadric) 制御[43]を紹介する。これは米国のPATHで提案されたものである。この制御はLQ制御同様, 二次形式評価関数 J を最小化するフィードバック行列がコントローラになる。フィードバックされる状態変数は, 横方向誤差 y_r , その時間微分値, 道路接線に対するヨー角の誤差 $\Delta\epsilon$ とその微分値である(図2.4.3参照)。一般のLQ制御と異なる点は, J が ω (周波数)の関数として記述されている点である。 J に ω を導入することにより, 目標コースに対する高い追従精度と乗り心地および高周波外乱に対する安定性を両立している。この制御で J を最小化する制御入力(操舵角)は下式のように表される。

$$\delta(t) = -\mathbf{K}\mathbf{X}(t) + \int_0^{t_0} \mathbf{K}_{w1}(l)\mathbf{w}(t+l)dl + \mathbf{K}_{w2}\mathbf{w}(t+t_0) \quad \dots\dots\dots (2.4.1)$$

ここで, $\mathbf{X}(t)$ は状態変数行列, \mathbf{K} は最適フィードバック行列, $\mathbf{w}(t)$ は道路曲率の逆数, t_0 は道路曲率の予見時間である。実験により, 速度50[km/h], 直線+R75[m]のカーブ路を追従誤差10[cm]以下を維持できることが確認されている。また氷を撒いた滑りやすい道路走行時や速度変化時でも, 安定かつ高精度にコース追従できることが確認されている。

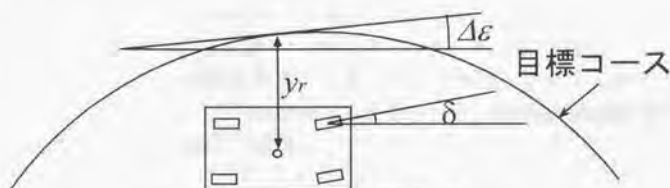


図2.4.3 横方向制御系の一例

2.4.5 特殊な状況における横方向制御

車両の横方向のダイナミクスは操舵角を入力とした線形方程式で近似できない場合の制御について解説する。タイヤのスリップ角(タイヤの回転方向と速度のなす角)が小さい場合, タイヤが発生する横力はスリップ角に比例するものとして線形近似できる。しかし, 駆動力が大きい場合やスリップ角が大きい場合は, タイヤの横力は飽和してしまうため線形近似できなくなる。このような状況は, 急激な操舵時や路面摩擦係数が小さい道路を走行する場合に起こりうる。タイヤ力の非線形性が大きな領域で,

線形近似に基づいた横方向制御を行った場合、スピン等の危険な状況を招く可能性がある。そこで、タイヤの非線形特性を考慮した横方向制御系も提案されている[79]。タイヤの非線形特性を考慮した横方向制御により、ブレーキ動作では回避できないような危険を操舵によってスピンすることなく回避できることが確認されている。また、回避動作以外にタイヤがバーストした場合の操舵制御も提案されている[80]。この制御により、タイヤがバーストしても目標コースを外れることなく追従できることが確認されている。

自動運転システム以外に4WS(前後輪操舵システム)や駆動力配分システム等で提案および一部実用化されている運動制御技術なども特殊な状況における横方向制御に適用できるであろう。

2.4.6 横方向制御に関する主な研究文献の紹介

この項では、目標コースまたは先行車追従のための横方向制御(操舵制御)に関する文献を紹介する。文献の紹介に際しては、以下のように分類している。

- ・直下参照型地点追従制御に関するもの
- ・前方注視型地点追従制御に関するもの
- ・車両追従制御に関するもの
- ・ドライバの運転動作を模擬する制御に関するもの
- ・大型車の横方向制御に関するもの
- ・特殊な状況における横方向制御に関するもの
- ・モデリングに関するもの

第2.4.5節でも述べたように、4WSや駆動力配分システム等で提案および一部実用化されている運動制御技術(たとえば,[81,82,83,84,85,86,87,88,89,90]など)も横方向制御の下位制御として有用であると考えている。また、自動車以外にも無人搬送車や移動ロボットの誘導制御に関する研究も多い。無人搬送車の移動ロボット制御には、速度一定として、幾何的な関係から操舵角や車輪速を制御する研究(例えば[91,92,93,94,95])が多い。それに類似するものとして、自動車の自動駐車制御に関する研究(例えば[96,97,98])もある。

(1)直下参照型の地点追従制御に関するもの

ここでは、磁気ネイル等のマークを利用して、車線に対する追従制御を行う横方向制御に関する研究文献を紹介する。なお、磁気ネイルと画像処理を併用しているものについてもここで紹介している。

文献[43]は、PATHの縦方向制御、横方向制御に関する論文である。その中で横方向制御としてFSLQ制御(第2.2.4項参照)が紹介されている。この制御は最適レギュレータと同様、二次形式評価関数 J を最小化するフィードバック行列がコントローラとなる。最適レギュレータと異なる点は二次形式評価関数 J が ω (周波数)の関数として記述されている点である。 J に ω を導入することにより、乗り心地と高周波外乱に対す

る安定性を実現している。また、 J の最小化を実現するためには曲率の予見情報が必要となる。なお、この制御におけるフィードバック状態変数は、横方向誤差、その時間微分値、道路接線と車両ヨー角の誤差、その時間微分値の4つである。また、実験により、50[km/h]、直線+R75[m]のカーブ路で追従誤差10cm以下を維持できることを確認している。また文献[73]では、文献[43]の制御により、低 μ 路や速度変化時においても安定にコース追従ができることを実験により確認している。

文献[44]は、スライディングモード制御の縦方向制御、横方向制御への応用に関する論文である。この論文で提案されている横方向制御の特徴は、縦方向の追従誤差の影響を操舵に反映させている点である。先行車に対する縦方向の追従誤差と目標コースに対する追従誤差に対してそれぞれ滑り面を設定し、滑り面の符号により操舵角を算出している。この場合縦方向誤差の影響も操舵角に反映される形となっている。なお縦方向制御には横方向誤差は反映されない。さらに、誤差推定のためのオブザーバやチャタリング防止のために飽和関数を用いた符号関数の修正などについて説明されている。最後にシミュレーションにより縦横独立のPID制御と比較し、有効性を示している。

文献[45]は、日産の自動運転システムに関する論文である。その中で横方向制御則は、磁気Neilセンサからえられた横方向誤差についてのPID制御となっている。制御パラメータの決定には極配置を利用している。このシステムではPID制御にフィードフォワード入力を道路曲率と速度より決定し加えることで制御入力としている。フィードフォワード入力の有無による制御性能を比較し、フィードフォワード入力の必要性を確認している。また冗長系として画像処理によるPI制御系を用意し、磁気Neilセンサのフェイル時に切り替えている。実験により、カーブにおいても追従誤差20cm以下を維持できることを確認している。

文献[99]はトヨタの自動運転システムに関する論文である。磁気Neil間隔を大きくした場合の横方向誤差の推定とそれに基づく横方向制御について説明している。横方向制御は、横方向誤差のPID制御に道路曲率と速度により得られたフィードフォワード入力を加えることで制御系を構成している。実験により、追従誤差20cm以下を維持できることを確認している。

文献[100, 101]は、日産の自動運転システムにおける横方向制御に関する論文である。文献[100]は、直線路追従を目的としたLQ制御を説明している。LQ制御として状態変数をヨーレート、ヨー角、横方向誤差、その時間微分値の4つとした状態フィードバック制御系を構成している。評価関数の重みの物理的意味を詳しく説明し、状態フィードバックによりヨー運動からの横運動への干渉をなくせることを示している。また持続的外乱に対応するため、プラントの前段に積分器を導入したLQI制御（状態変数はヨーレート、ヨー角、横方向誤差、その時間微分値、操舵角速度の5つ）を構成している。シミュレーション、実車実験により横方向誤差のPD制御と比較することによりLQ制御、LQI制御の有効性を示している。文献[101]は、文献[100]の続報であり、LQI制御を曲線路の走行に適用する手法を説明している。曲線走行時には平衡点を移動させ、その平衡点に状態を収束させる設定値制御レギュレータという手法を説明してい

る。また道路曲率の推定法として、曲率を状態変数としたカルマンフィルタについて説明している。そして、上記手法の有効性を理論および実験的に確認している。

文献[102]は、車両の縦方向運動と横方向運動の干渉を考慮した縦横方向制御に関する論文である。縦方向運動と横方向運動の干渉について動力学的な干渉、タイヤ力の干渉、荷重移動による干渉に分類して説明している。これらの干渉の影響を表現する車両運動モデルを使用することにより、干渉を考慮した操舵角およびエンジントルクの決定法を説明している。操舵角は、必要なタイヤ横力を実現する操舵角を逆算して求めている。エンジントルクは必要なスリップ比を実現するためのエンジントルクを求めている。横方向制御のみについて実験で有効性を確認している。スリップ比の計測あるいは推定が困難であるため、縦方向制御の評価は行っていない。実験によりゲインスケジューリングPD制御に比べ20%横方向誤差が減少することを確認している。

文献[103]は、路肩を検出して横方向制御を行うシステムに関する論文である。路肩に再帰反射塗料をぬり、レーザセンサによる3点測量で目標コースを検出し、横方向制御を行うシステムを説明している。コース情報の検出法、横方向制御法が説明されている。制御系は道路曲率によるフィードフォワード入力と、横方向誤差のフィードバック補償器により構成している。

文献[104]は、直下参照型の横方向制御の周波数特性に関する論文である。車両の速度、路面 μ における車両の横方向運動の周波数特性を調べている。また、横方向誤差の検出センサ位置と位相補償の関係を調べている。車両の周波数特性により、低速では車両の運動はヨー運動に支配され、路面 μ の影響は受けにくいことを示している。よって制御系はPID制御で十分であるとしている。しかし高速では車両運動の減衰が小さく、運動は横滑り角に支配され、操舵角に対する横Gのゲインは路面 μ に線形に依存することを示している。この場合、制御系としてはPID²の構成と車両運動の補償器が必要であるとしている。

文献[105]は、 μ シンセシスによる横方向制御に関する論文である。まず、LQGサーボ制御系を構築し、モデル化誤差、パラメータ変動に対するロバスト制御性能を評価している。評価においては、構造化特異値 μ を解析している。解析の結果、LQGサーボ制御系では、ロバスト制御性能が保証されない周波数帯が存在することを確認している。この問題の対処として、 μ シンセシスによる制御系を提案している。シミュレーションにより、 μ シンセシスによる制御系ではモデル化誤差やパラメータ変動時でもノミナル時（制御対象のパラメータが設計値と等しい時）に近いパフォーマンスが得られることを確認している。

(2) 前方注視型の地点追従制御に関するもの

ここでは、画像処理などを利用して、前方の車線を検出して車線追従を行う横方向制御に関する研究文献を紹介する。

文献[106]は、トヨタの自動運転システムに関する論文である。画像処理により前方の白線を認識し、前方注視点における横方向誤差に対するPD制御を行っている。パラメータは注視距離と速度の関数になっており、シミュレーションで検討している。注

視距離は20[m]としている。

文献[107]は、横偏差を検出および制御する位置を車両重心よりも、ある距離分前方にずらして制御を行う手法に関する論文である。横変位を検出および制御する位置を動的に変化させることにより、横変位検出点の横加速度と操舵角の関係が速度に依存しない定数になることを導き、実験により確認している。しかし、検出位置は速度に依存する。検出位置を動的に変化させることにより、制御系の単純化が実現できると述べている。またこれは、ヨーレートフィードバックによる横運動とヨー運動の非干渉化と同様の効果を実現していると述べている。

文献[108]は、横偏差を検出および制御する位置を車両重心よりも、ある距離分前方にずらして制御を行う手法に関する論文である。この手法による制御系の特性を解析し、ヨー運動と横運動に理想的な減衰特性を持たせることができることを確認している。さらに、重心点の横偏差を制御する場合よりも、ロバスト安定性や耐外乱性が高いことを確認している。

文献[109]は、道路に対する横偏差の計測・推定法と横方向制御に関する論文である。ARMAモデルを用いて推定した車両の横偏差推定値によってデータを再構成することで、白線非検出時や誤検出時の信頼性を向上させている。また道路曲率も推定している。操舵制御アルゴリズムは、2自由度制御系となっている。実験による検証を行っている。

文献[110]は、ニューラルネットワークによる横方向制御に関する論文である。速度とCCDカメラで検出された道路白線の左右3点ずつ計6点の位置情報を入力として、操舵角を出力している。実際に高速道路を自動走行する事により、制御システムの妥当性を示している。

文献[111]は、ニューラルネットワークによる横方向制御に関する論文である。操舵角の決定に3つのニューラルネットワークを使用している。1つは直線と緩いカーブ用、1つはきついカーブ用、残りは切り替え用となっている。入力情報は、追従誤差、予見情報、ヨーレート、横滑り角である。ただし、直線と緩いカーブ用のニューラルネットワークでは、状態量は使用しない。ニューラルネットワークの学習はシミュレーション上で遺伝的アルゴリズムを利用して行っている。シミュレーションで有効性を確認している。

文献[112]では、前方画像より得られた目標コースを三次曲線で近似し、幾何学的な関係から、操舵角を決定する横方向制御が説明されている。操舵角は三次曲線の係数とホイールベースから与えられる。幾何学的な関係を用いるため、車両モデルとしては誤差を含むものとなる。しかし、参照線検出によって閉ループ系を構成しているため、モデル化誤差の影響は少ないと説明している。このシステムでは障害物を検出した場合は、障害物を回避するための経路生成を行い、障害物回避を行う。実験により、制御アルゴリズムの有効性を確認している。

(3) 車両追従制御に関するもの

ここでは、先行車の相対位置を検出して、先行車への追従を行う横方向制御に関する

研究文献を紹介する。

文献[12]は、スライディングモード制御による先行車追従のための横方向制御に関する論文である。先行車に対する方位角誤差についての滑り面を設定し、操舵角の決定を行う。制御車両は常に先行車の方向を向くように制御される。前輪の目標コーナリングフォースを求め、操舵角が平面2輪モデルの運動方程式より導出されている点が特徴である。複数台の車群走行に应用する場合は、先行車に対する追従誤差を後続車に送信することで、追従誤差の蓄積を防ぐ。シミュレーションによりこの手法の有効性を確認している。

文献[19, 20]は、先行車の走行軌跡に追従するための横方向制御に関する論文である。5種類の制御アルゴリズムがシミュレーションで比較されている。幾何学的な関係に基づく制御やスライディングモード制御、前方注視二次予測モデルをベースとした制御アルゴリズムなどが比較されている。スライディングモード制御では、必要な横加速度を求め、それを発生させる操舵角を平面二輪モデルの運動方程式の数値積分により導出している点が特徴である。スライディングモード制御、前方注視二次予測モデルをベースとした制御アルゴリズムでは走行速度変化や車間距離変化があっても高い追従精度を維持できることを確認している。文献[20]では、実験により前方注視二次予測モデルをベースとした制御アルゴリズムを使用することで走行速度5[m/s]~20[m/s]において、定速・定車間距離状態で追従誤差5cm以下を維持できることを確認している。

文献[48]は、フランスの電気自動車による自動運転システムに関する論文である。このシステムでは路上に停車している電気自動車を先頭車運転者がプラトーン走行により車庫まで誘導する。よって横方向制御は先行車に追従するものとなっている。幾何学的な制御手法を提案しているが、この手法は低速時のみしか有効でないと述べている。そこで、運動力学に基づく、PATHと同様な制御系[43]を構成している。制御入力には状態変数(横方向誤差、姿勢角誤差、横滑り角、ヨーレート、操舵角)と先行車の軌跡の予見情報である。PATHの手法と異なる点は評価関数に周波数特性が無いことと、走行距離で離散化している(0.1m)点である。また、横加速度の増幅に配慮し、先行車軌跡の予見情報があれば横加速度が後続車で増幅されないことを確認している。

文献[49]は、ヨーロッパのコンボイシステムに関する論文である。この中で横方向制御については、横偏差に対するPD制御とヨーレート偏差に対するPD制御を組み合わせたものとなっている。車両モデルについて説明し、横変位の操舵角に対する伝達関数を示している。伝達関数特性は速度に依存するため、横偏差に対するPD制御に伝達関数特性を考慮した補償器をつけている。

文献[113]は、先行車に追従するための横方向制御に関する論文である。先行車と制御車両を棒で連結したシステムを一力学系として扱い、安定性を考察している。制御では3種類の制御アルゴリズムを提案しており、1つ目は先行車連結点に方位角に対する比例制御、2つ目は方位角に対するPD制御、3つ目は先行車連結点の速度の向きと方位角の差に対するPD制御となっている。シミュレーションと低速度における実験で各アルゴリズムを比較し、低速な円旋回では各アルゴリズムとも先行車の内側を通る

ことを確認し、シビアなダブルレーンチェンジでは1番目のものがもっとも良いパフォーマンスを持つが、1番目のものは低速時の安定性に問題があることを確認している。

(4) ドライバの運転動作を模擬する制御に関するもの

ここではドライバの運転動作を積極的に模擬するような横方向制御に関連する研究文献を紹介する。ドライバモデルに関しては数多くの研究が報告されている。たとえば、文献[114]では、ドライバモデルの総説が述べられている。また、文献[115, 116]ではドライバのセンシングについて、ヨーレート[115]、注視点、予測時間[116]に関する研究が報告されている。また、文献[117, 118]ではドライバの運転動作[117]や、不確かさの度合い[118]のモデル化に関して報告されている。

文献[119]は、目標コース決定にドライバの認知、判断の要素を導入した横方向制御に関する論文である。前方注視した環境に対して、危険感ポテンシャルを割り付け、危険感ポテンシャルが最小の点を目標コースとして、操舵制御を行う。決定された目標コースに対しては、前方注視二次予測モデルに基づいて操舵角を決定している。ドライバ操舵時とこの手法による操舵時の周波数特性を比較することにより、この手法がドライバの運転動作を反映していることを確認している。

文献[120]は、ドライバの情報処理プロセスを模擬した横方向制御に関する論文である。すなわち速度以外の車両の状態量を用いずに、前方注視した白線の時間移動量（オプティカルフロー）と画像から推定した横方向誤差に基づいて操舵角を決定する。また先行車が存在する場合は先行車画像の時間移動量も操舵角決定に用いている。シミュレーションにより、先行車の有無に関わらず、コース追従ができることを確認している。

文献[121]では、PVSの制御システムが説明されている。その中で横方向制御にはベテランドライバの運転モデルを導入している。目標ラインとしては、直線部では道路中心を曲線部では曲率が小さくなるように設定し、注視距離は速度に応じて変化させる。操舵角は将来誤差と、その将来位置における左右は白線に対する姿勢角誤差より算出している。実験によりベテランドライバに遜色無く走行できることを確認している。車線中心を走行する制御に比べて操舵角振幅が小さく、搭乗者にとってフィードバックのよい走行ができることを確認している。

(5) 大型車の横方向制御に関するもの

ここでは貨車付きセミトレーラやバスなどの大型車の横方向制御に関する研究文献を紹介する。

文献[75]は、ヨーロッパののCHAUFFEURシステムに関する論文である。これは、トラックの車両追従システムで、先行車はドライバが運転する。横方向制御は幾何学に基づく制御となっている。システム構造やセンサ情報遅れへのアプローチ等が説明されている。

文献[122]は、バスの地点追従制御に関する論文である。横方向制御としては、質量と路面 μ と速度についてモデル化誤差を想定した H_{∞} 制御系を構成している。シミュレーションにより H_{∞} 制御のみだと、極低速時以外は安定性が得られないことを確認している。その解決として、予見情報に基づく操舵入力と組み合わせることにより、20[m/s]でも高精度な目標コース追従ができることを確認している。

文献[123]は、貨車付きセミトレーラーの地点追従制御に関する論文である。横変位検出点よりも一定距離先の横変位を推定して制御を行う。制御には H_{∞} 制御を適用することにより、速度変動、路面摩擦係数変動、貨車質量変動に対してロバスト安定な制御系を構成している。実験により直線路で0.15[m]以下、カーブ路で0.35[m]以下の誤差で車線追従ができることを確認している。

文献[124]は、貨車付きセミトレーラーの地点追従制御に関する論文である。貨車付きセミトレーラーのモデルを説明し、速度毎および路面摩擦係数毎における、ステップ応答、周波数応答、ゼロ点と極の様子を解析している。また予見距離と安定性の関係を解析している。横方向制御系を二次伝達関数で設計し、シミュレーションによりその妥当性を評価している。

文献[125]は、貨車付きセミトレーラーの地点追従制御に関する論文である。車線追従およびレーンチェンジを行う、2自由度制御系を使用している。フィードバック補償器の設計の際に H_{∞} 制御を適用している。シミュレーションにより、速度変化、質量特性変化があっても、安定に規範応答に追従できることを確認している。

(6) 特殊な状況における横方向制御に関するもの

ここでは、タイヤのバースト時、レーンチェンジ時、緊急回避時における横方向制御に関する研究文献を紹介する。

文献[79]は、タイヤの非線形性を考慮した横方向制御に関する論文である。2自由度、タイヤの非線形無し、横力の発生の時間遅れ無しのモデルで作成されたLQ制御系(状態変数は横方向誤差、方位角誤差、横方向速度、ヨーレート、操舵角の5つ)を多自由度、タイヤの非線形の有り、横力の発生時間遅れの有りなどのモデルに適用し、シミュレーションで検討している。シミュレーションにより、モデルの自由度は大きく影響しないことを確認している。そして、タイヤの非線形性や横力の発生時間遅れが有るモデルに適用した場合、緊急レーンチェンジなどで、制御性能の劣化やスピン現象を確認している。そこでタイヤの非線形性を考慮した制御として、状態変数として横方向誤差、方位角誤差、横方向速度、前輪の横力、後輪の横力、ヨーレート、操舵角を利用したLQ制御系を構成し、シミュレーションにより妥当性を確認している。

文献[80]は、タイヤバースト時の横方向制御に関する論文である。リー微分を利用した逆動力学解析によりフィードフォワード制御入力を算出している。フィードバック制御入力FSLQ制御である。シミュレーションによりこの制御系の有効性を確認している。またフィードフォワード項の近似法を説明し、近似法を利用し、簡略された制御の有効性をシミュレーションで確認している。

文献[126]では、レーンチェンジのための仮想目標コースとそれに追従するように横方向制御の手法が提案されている。仮想目標コースとして3種類の目標コース生成法を提案し、比較している。1つめは、横加速度のプロファイルから目標コースを生成、2つめは円弧と直線により目標コースを生成、3つめは5次関数により目標コースを生成している。レーンチェンジ時間、ジャークの考察により、1つめのものを採用している。このコースに追従する制御としてFSLQ制御とスライディングモード制御を提案し、比較している。シミュレーションにより、両者とも、システムの不確かさやノイズがあっても十分な制御効果を発揮することを確認している。

文献[127]は、緊急レーンチェンジに関する論文である。最短時間でレーンチェンジを行うための速度のプロファイルと目標コースを決定するための手法が説明されている。車両のダイナミクスを走行距離の関数として表すことにより、逆動力学解析を行い、安定な状態を維持できる範囲で目標コース生成と速度プロファイルの生成を行っている。

(7) モデリングに関するもの

ここでは自動車や大型車の横方向運動のモデリングに関する研究文献を紹介する。

文献[78]は、貨車付きセミトレーラーのモデリングに関する論文である。大型トレーラーでは連結点の影響のためロール運動とヨー運動が連成することを説明し、そのダイナミクスを忠実に再現するための数学的モデルを構築している。さらに自動運転用のコントローラ設計のための低次元化したモデルを構築し、その妥当性をシミュレーションで評価している。

文献[128]は、車両の横方向運動のモデリングに関する論文である。2自由度、5自由度、8自由度モデルにタイヤの非線形性の有無、横力の発生時間遅れの有無の要素を込めることにより複数種のモデルを作成している。なお8自由度でタイヤの非線形性の有り、横力の発生時間遅れの有りのモデルについては実験結果と比較することによりモデルの妥当性を確認している。複数のモデルをシミュレーションで比較することにより、低自由度モデルでは、左右の荷重やスリップの違いを表現できないため大きな横加速度発生時の挙動を表現できず、タイヤの非線形性を無視したモデルは大スリップ角時の挙動を表現できず、タイヤ力の発生遅れを無視したモデルは回避動作の表現できないこと確認している。

文献[129]は、制御パラメータのオンライン決定のために車両の将来挙動をオンライン推定する手法に関する論文である。この中では、横方向運動のモデルが比較されている。4自由度モデルを2種と3自由度モデルを2種の計4種類のモデルをシミュレーションで比較している。この比較により、状況別にモデルを使い分ける際の指標としている。

文献[130]は、自動車の運動のモデリングと横方向制御に関する論文である。モデル化においては車両を3質点に分解して、ロール、ピッチを含めて精密にモデル化している。制御系は、低次元化したモデルを使用して、プログラム制御的におけるレーン

チェンジの制御入力を決定している。また低次元化したモデルに挙動を追従させるためのモデル追従制御系をリアプノフの直接法に基づき導出している。

文献[131]は、車両のタイヤバースト時のダイナミクスのモデリングに関する論文である。サスペンションの力、タイヤ径、ロール抵抗、キングピン回りの慣性力、コーナリングパワーの変化をモデル化している。実験との比較を行いモデルの妥当性を確認している。また、制御に関しては、タイヤバースト時の制御系設計のアプローチについて説明している。

2.5 自動運転システムにおけるセンサ技術

2.5.1 車両運動センサ

自動運転システムに必要な車両運動の状態量は、制御系の構成によって大きく異なる。主に制御で使用する状態量を挙げると縦方向制御では、速度、縦方向加速度、スロットル開度、エンジン回転数、ブレーキ圧、勾配等があり、横方向制御では、縦方向速度、横方向加速度、横方向速度、ヨーレート、ヨー角、横滑り角、操舵角等がある。これらの状態量のすべてをセンサで計測する必要はなく、状態推定器を使用して推定することも可能である。たとえば、横滑り角の情報を得る場合、センサで計測するならば、車両に第5輪を付加するか、2軸（縦方向・横方向）の光学式非接触速度センサを利用しなければならない。しかし、横滑り角はヨーレート、操舵角および速度と密接に関係しているため、ヨーレート、操舵角および速度の状態量を利用した状態推定器を構成することにより推定することができる[132, 133, 134, 135]。縦方向制御で利用する勾配の情報についても、2軸の加速度計を利用して計測しなくても、道路位置と勾配のルックアップテーブルを使用して抽出したり、別のセンサを利用して推定することが可能である[136]。また、路面摩擦係数に関しても、車両の鉛直荷重と駆動力の推定値を利用して推定する手法なども提案されている[137]。

2.5.2 車間距離センサ等

車両運動の状態量のほかに、縦方向制御では車間距離情報や先行車の運動の状態量が必要である。また横方向制御では、磁気センサ、前方道路白線や先行車の相対位置を検出するセンサが必要である。さらに自動運転システムの信頼性の向上と高度化のためには、側方車両や外壁の検出、路面摩擦係数の検出等の走行環境の認識を行うセンサが必要である。

センサの信頼性の向上は、自動運転システムの実現に不可欠な要素である。以下に車間距離センサを例にして、センサの信頼性の問題を解説する。車間距離センサは縦方向制御で中心的役割を果たす。車間距離センサにおいて克服しなければならない重要な課題は、情報の信頼性である。先行車との距離計測に使用される代表的なセンサとしてレーザーレーダ[138]やミリ波レーダ[139]がある。レーザーレーダやミリ波レー

ダによって計測された距離は、あくまでもレーザやミリ波を反射した物体との距離であり、この物体が先行車あるいは自車の走行を妨げる障害物である保証はない。たとえば、カーブ路などで、前方の側壁との距離を先行車との距離と誤認識する可能性がある。車間距離制御機能付きのオートクルーズコントロールで、緊急ブレーキの制御が実用化が困難なことも、車間距離センサの信頼性によるところが大きい。実際に緊急ブレーキを作動させる必要がない状況で、システムが誤認識して緊急ブレーキを作動した場合、追突事故を招く危険がある。車間距離センサの信頼性を向上するためアプローチとして、他のセンサ情報との連携（センサーフュージョン）を挙げることができる。例えば、CCDカメラから得られた前方画像を処理することにより自車が走行している車線上の先行車の方向を特定したり、あるいは操舵角やヨーレートの情報を利用して走行レーンの曲率を推定し先行車が存在する方向を特定することにより、その方向に検出された物体との距離を車間距離とする手法などが提案され、一部実用化されている[140, 141, 142]。

2.5.3 センサ技術に関する主な研究文献の紹介

この項では、センサに関する文献や、システムの一要素としてセンサについて触れている文献を紹介する。文献の紹介に際しては、以下のように分類している。

- ・磁気ネイルセンサ等による走行レーン検出に関するもの
- ・視覚センサによる走行環境認識に関するもの
- ・測距センサに関するもの
- ・GPSに関するもの

(1) 磁気ネイルセンサ等による走行レーン検出に関するもの

磁気ネイルセンサは走行レーンに対する横方向誤差の検出に日米のAHSなどに広く利用されている。その原理や精度などについて、文献[46, 47, 99]にて説明されている。磁気ネイルによる車線検出の利点は、2cm以下の精度で磁気ネイル検出ができることと環境の影響を受けにくく、メンテナンス性が良いことである。磁気ネイルの極性により、道路曲率などの情報をバイナリデータとして埋め込むことが可能である。また、磁気ネイル検出間隔時間を計測することにより速度計測が可能となる。磁気ネイルの検出個数をカウントすることにより、車両の道路上の縦方向の絶対位置を計測することができる。磁気ネイル以外に、周波数選択性再帰反射帯や電波マーカを道路に敷設する手法も提案されている。周波数選択性再帰反射帯については、それを検出することで制御を行う手法が、文献[74, 143]にて説明されている。この手法は、車両の真下ではなく、前方の走行レーン情報を得ることができる利点を持っている。

文献[21]は、磁気ネイル等のマーカの検出の際の観測ノイズを考慮し、カルマンフィルタを構成することで車両の位置検出を行う手法を説明している。シミュレーションにより、その手法の有効性を確認している。

文献[99]は、インフラ建設コスト削減のため、磁気ネイル間隔を5[m]とし、磁気ネイルを検出しないときに、横方向誤差を推定する手法を説明している。実験により磁

気ネイル間隔を5[m]でも追従誤差20cm以下の精度で横方向制御が可能であることを確認している。

文献[144]は、バスの自動運転システムにおける横偏差および状態量推定に関する論文である。横偏差および状態量推定のために、2つのカルマンフィルタを利用している。1つは、磁気ネイル検出時に推定を行うカルマンフィルタであり、磁気ネイル間隔で離散化されている。もう一つは、車両の運動センサのみを利用したカルマンフィルタであり一定時間周期で離散化されている。車両の運動センサを利用したカルマンフィルタを利用することにより、磁気ネイルを検出に失敗した場合や、低速時に磁気ネイルの検出周期が長い場合においても、横偏差および状態量を高精度に推定できる。実験により提案する推定手法の有効性を確認している。

(2) 視覚センサによる走行環境認識に関するもの

視覚センサは画像処理により前方の走行レーンを検出したり、先行車、障害物等の検出に用いられている。視覚センサはパッシブなので、電波の干渉などを引き起こさない利点があるが、天候、昼夜、発光物、逆光の影響を受けやすい欠点がある。この欠点のためにPATHでは視覚センサの利用には消極的である。一方、日本や欧州の研究では、積極的に視覚センサを利用しているようである。走行レーン検出に関する論文は多いが、ここでは紹介しない。一般に走行レーン検出には道路の輝度の微分値を検出することにより、白線のエッジの位置を求める。さらに検出された白線位置を曲線あるいは直線近似したり、パターンマッチングすることにより走行レーンを認識する手法が数多く提案されている[145, 146]。

文献[109]では、白線非検出時や誤検出時の補償法として、ARMAモデルを用いて推定した車両の横偏差推定値によりデータを再構成する手法が提案されている。

文献[147]では、赤外線を利用した車両認識システムが説明されている。このシステムでは車両に赤外線ビーコンをカメラで認識して、先行車の位置を認識する。先行車が多数ある場合は、車車間通信で各車両のビーコンの発光タイミングを割り振り、車両を識別している。

文献[148, 149, 150, 151, 152, 153]では、2つ以上カメラを用いるステレオ画像処理により、検出画像を距離画像に変換する手法や、距離画像から走行環境認識を行う手法などが報告されている。ステレオ画像処理では、2つの画像の相関を求めるため計算量が膨大になる。文献[149, 150, 151]では、専用ハードウェアを用いることで演算の高速化を実現している。文献[148]では3台以上のカメラを用いて、対応直線探索という手法で演算量の低減を実現している。

文献[154]は、移動ロボットの障害物検出に関するものである。複数のスリット光を照射し、視覚センサで検出することにより障害物を認識する手法を説明している。

文献[155, 156, 157]は、視覚センサによる移動ロボットの位置計測に関する論文である。文献[155]では、ランドマークを検出することにより、自車の位置や方位を計測する手法を説明している。文献[156, 157]では、固定点や移動ロボットに付けられた

色付きの標識を画像処理で検出して、移動ロボットの絶対位置や相対位置を計測する手法を説明している。

文献[158]は、自動車のナンバープレートを追尾する手法を説明している。

文献[159]は、赤外線検出による歩行者の検出システムを説明している。

文献[160]は、CCDカメラのダイナミックレンジの拡張に関する論文である。従来のCCDカメラでは輝度がある値で飽和してしまうため、逆光時などにおいて環境認識が十分にできない。そこで露光時間を変えて得た2つの画像を情報(露光時間1/87秒と1/2620秒)を組み合わせることで、広いダイナミックレンジを実現する手法を提案している。

(3) 測距センサに関するもの

測距センサとしては現在レーザーレーダ、電波レーダ、超音波センサ、視覚センサなどがある。主に用いられているのはレーザーレーダのようである。この理由として、精度が良いこと、指向性が高いこと、リフレクタを検出するため検出対象を特定化しやすいことなどが考えられる。電波レーダは悪天候に強く、直接相対速度検出ができる利点を持っているが、価格の問題や検出対象の特定化の困難さなどの問題がある。電波レーダとしてはFMCW方式のミリ波レーダが主であるようだが、最近ではSS(スペクトル拡散)方式のものが開発されているようである。視覚センサによる測距としては1つのカメラで、距離を計測する手法や、前節で紹介したステレオ式の手法が提案されている。

先行車や障害物間の測距を行うためには場合、先行車を特定するために自車の進路を推定する必要がある。自車の進路に限定して先行車や障害物を検出する手法なども報告されている。

横方向の測距としては道路外壁との距離計測に光SS方式による測距システムについて報告されている。SS方式は、反射の際に符号を入れ替えることにより、測距と同時にデータ通信を行うことができる利点を持っている。

文献[46, 47]は画像処理を利用した測距システムを紹介している。先行車の2点の発光器を赤外CCDカメラで検出することにより、先行車との相対位置計測をおこなっている。発光器は車車通信にも利用されている。

文献[91, 161, 162]は、三角測量式のレーザーレーダによる先行車の相対位置計測について紹介している。

文献[138]は、パルス式レーザーレーダの仕様について紹介している。

文献[139]は、FMCW方式のミリ波レーダによる車間距離計測について説明している。

文献[140, 142]は、進路上の先行車や障害物を認識・測距するための、自車の走行曲率や進路推定法について説明している。

文献[141]は、自車の走行レーンとその隣のレーンのみに検出対象範囲を限ることで、レーン以外の物体の影響を除去する手法を説明している。

文献[163]は、FMCW方式のミリ波レーダによる路肩-車両間距離計測について説明している。

文献[164]は、視覚センサによる測距について、ステレオ測距法と1台のカメラによるモーションステレオ測距法を説明している。

文献[165]は、超音波センサを用いた後側方の車両検出について説明している。

文献[166]は、車間距離計測の際に、GPS、レーダー、トランスデューサーとのセンサーフュージョンによって車間距離検出精度と信頼性の向上を実現する手法を説明している。

(4)GPSに関するもの

GPSはナビゲーションの分野で広く利用されているが、自動運転システムにもその利用が期待できる。今日ではGPSを差動化することにより、高精度な位置計測を可能とするDGPSや信号搬送波の位相情報を利用することにより、センチメートルオーダーの精度でリアルタイム位置計測を可能とするリアルタイムキネマティック方式が実用化されている。今日市販されているDGPSは、精度が2cm以下の高精度なものがあり、車両制御に直接利用できる可能性を持っている。

文献[167]は、DGPSの自動運転システムへの利用について考察している。道路の幾何学的情報のデータベースの作成法や、横方向制御として制御時の横方向誤差の計算法などを説明している。縦方向制御としては車車間通信で位置情報を送信することにより、車間距離誤差を求める手法を説明している。またインフラのあり方についても説明している。

文献[168]は、車線逸脱防止システムのDGPS利用の可能性を検討するため、DGPSの精度を実車実験で調べている。DGPSを大型車に搭載し、停止時の絶対位置計測精度や走行時の絶対位置計測精度を調べている。走行時の絶対位置計測についてはDGPSの計測データは遅れを含んでいるため補正が必要となる。補正を行った場合の結果と行わない場合の結果を比較している。また同じコースを複数回走行した場合の走行軌跡のずれを調べている。

文献[169]は、DGPSと複素カルマンフィルタを組み合わせた絶対位置計測について説明している。DGPSが電波を受信できない場合は車速計とジャイロの計測値を利用した複素カルマンフィルタで絶対位置推定を行っている。

文献[170]は、市街路等での使用に対応したGPSについて説明している。捕捉衛星数が3に満たない場合でも、クロックのモデル化、進行方向を仮定することにより、位置計測が継続する手法について説明している。また、衛星捕捉時間の大幅な短縮(100 ms)を実現し、短時間で多数の衛星情報を利用する手法について説明している。

2.6 自動運転システムにおける通信技術

この節では、自動運転システムにおける車車間通信や路車間通信について概説する。通信技術は様々な分野で利用されているため、通信技術に関する知見の数は計り知れ

ない。この節では、文献[171]を参照し、自動運転システムにおける通信技術について簡単に解説する。

2.6.1 車車間通信

車車間通信は、自動車と自動車の間の情報通信手段である。各車両が相互に情報を交換することにより秩序あるプラトーン走行を実現することが期待されている。特定の車両でプラトーン走行を行う場合などは、通信相手が定まっているため、技術的な難しさは少ない。しかし、不特定な車両との間で通信を行う場合は、ネットワークのトポロジーは固定的なものではなく、プラトーンへの合流・離脱がダイナミックに生じるため、それに対応した通信方式が必要となる。こうした通信プロトコル開発は赤外線などを通信媒体として進められており、走行実験なども行われている[172]。一方SS（スペクトル拡散）方式を採用して通信機能と測距機能を統合した新しい車車間通信方式も提案されている。

通信媒体としては、プラトーン間の干渉の問題などから、指向性を有する短距離の伝播特性を有するものが望まれるため、赤外光やミリ波などの利用が考えられている。

2.6.2 路車間通信

路車間通信とは、インフラと車両間の情報通信技術であり、今日VICSにおける道路交通情報の伝達手段として実用化されている。VICSでは、広域通信としてFM多重放送を利用しており、局所通信として電波ビーコンと光ビーコンを利用している。高速道路の自動料金収受システムにおいても、双方向の通信ビーコンが利用されている。以上が今日実用化されている路車間通信システムである。自動運転システムのための路車間通信手段として求められる特性は、連続通信が可能で通信処理の時間遅れが車両の制御周期に比べて十分小さいこと、走行場所に応じた局所通信が可能であることなどである。近年では、道路に沿った連続通信機能を比較的容易に実現できる手段として準マイクロ波帯のLCX(Leaky Coaxial, 漏洩同軸ケーブル)による路車間通信実験が行われ、良好な伝播特性が得られることが確認されている。

2.6.3 通信技術に関する主な研究文献の紹介

ここでは車車間通信や路車間通信に関連する文献を紹介する。通信技術は広大な分野で利用されているため、通信技術関連の研究文献の数は計り知れない。ここで紹介するものは、通信技術の自動車や移動ロボットへの適用に関する文献のごく一部である。文献の紹介に際しては以下のように分類している。

- ・通信デバイスに関するもの
- ・通信プロトコルに関するもの

(1) 通信デバイスに関するもの

文献[46, 47]では、赤外線による車車間通信が紹介されている。100 バイトのフレームの中の10バイトの中に自車のデータを入れて後続車に送信している。発光タイミングを調節することにより、縦方向に隣接している車両が同時に発光しないようにすることで、信頼性を向上させている。この通信用の発光器は視覚センサによる測距にも利用されている。発光器のON時とOFF時の画像を比較することにより、発光器検出の信頼性を向上させている。

文献[173]は、複数の無人搬送車と指令ステーション間での無線通信に関する論文である。通信方式としてSS方式を採用し、同期時間の短縮法やシステム構成について説明している。実験により通信距離を調べている。

文献[174]は、SS方式による車車間通信システムに関する論文である。後続車が先行車にPN符号データを光で送信し、先行車がPN符号データを反転させることにより送り返す、プーメラン方式を説明している。この方式により先行車の情報を得るのみならず、先行車からの受信データの遅延時間より車間距離の計測も行うことができる。実験で車間距離計測精度や干渉時のデータ誤り率などを調べている。

文献[175]は、レーザーを利用した双方向車車間通信デバイスのに関する論文である。後続車が先行車の受光器にレーザーを照射することで、後続車のデータを送信する。先行車は一定周期で後続車から送信される空白信号を加工して再帰反射することにより、後続車にデータを送信する。実験でレーザーを目標受光器に照射することが可能であることを確認している。

文献[176]は、SS方式の車車間プーメラン通信による双方向通信に関する論文である。先行車、後続車が独自のPN符号を送信し合い、CDMA(符号分割多重アクセス方式)により双方向通信を実現する手法を提案している。シミュレーションで、干渉時におけるS/N比とデータエラー率を調べている。

文献[177]は、路車間通信デバイスに関する実験結果に関する論文である。LCXによる路車間通信実験を行い、ケーブル設置高さ、障害物、防音壁、ケーブルのつなぎ目、カーブ路、トンネルの影響を調べている。

(2) 通信プロトコルに関するもの

文献[178]は、無線通信を想定した車車間パケット通信に関する論文である。多重アクセス法としてTDMA(時分割多重アクセス方式)を採用している。タイムスロットの割り当て方法やパケットのルーティング方法を提案している。車両情報のほかに路上ビーコンとの送信内容を含めることにより、交通流の円滑化を図っている。シミュレーションにより、車車間通信なし、車車間通信あり、パケット通信ありの場合の旅行時間を比較している。

文献[179]は、SS方式の車車間プーメラン通信を利用したネットワークのプロトコルに関する論文である。タイムスロットの中に送信パケット(車両のPN符号をのせる)と受信パケット(先行車のデータにより反転したPN符号をのせる)をのせるプロトコルを提案している。シミュレーションにより、車間距離別にタイムスロットの数と信

頼性の関係を調べている。

文献[180]は、車車間の無線通信に関する論文である。TDMA（時分割多重アクセス方式）におけるタイムスロットの予約やチャンネル合わせの問題点を指摘し、それを解決する手法として Cooperative Optimized Channel Access による方式を提案している。

文献[181]は、SS方式による車車間通信に関する論文である。タイムスロットの割り当てをランダムに行わず、車間距離に関して割り当てることにより、スロット予約の衝突を現象させる手法を提案している。シミュレーションによりネットワーク内の車両数と通信成功率の関係を調べている。

第3章 提案する制御システム

この章では、本研究で提案する制御システムの全体像を説明し、提案する制御システムを実現するために必要な要素技術を明確にする。図3.0.1にこの章の流れを示す。以下の各節では、この流れに従い、従来提案されたプラトーン走行システムの問題点、提案する制御システム、提案する制御システムの実現に必要な要素技術について説明する。

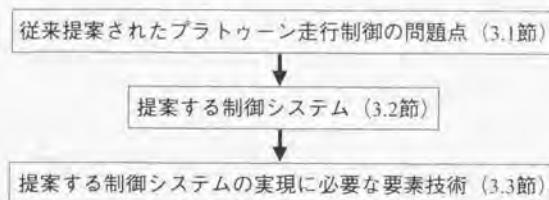


図3.0.1 第3章の流れ

3.1 従来提案されたプラトーン走行制御の問題点

この節では、従来の第2章で概説した自動運転システムの研究成果を鑑み、従来提案されたプラトーン走行システムの問題点を指摘する。

3.1.1 プラトーン走行の意義

この項では、従来のプラトーン走行システムの問題点を指摘する前に、プラトーン走行の意義を明確にする。自動運転システムは、自律走行とプラトーン走行があり、本研究ではプラトーン走行を対象としている。現在、ACC（車間距離制御機能付きクルーズコントロール）が実用化されており、一定車間時間制御を利用した自律走行の方が自動運転システムとして現実的なアプローチであると考えられる。しかし、自律走行システムの決定的な問題点は、そのシステムで実現できる交通容量がきわめて小さいことである。例えば、全ての車両が自律走行を行っている場合を考える。各車両が車間時間1秒で走行している場合、100[km/h]を最大速度として実現できる最大交通容量は1車線あたり3000[台/h]程度である。これは、ドライバによる運転で実現できる交通容量の1.5倍程度の値でしかない。もちろん縦方向制御における車間時間を小さくすれば、その分大きな交通容量が期待できるが、車両の合流などを考えると、1秒未満の車間時間は現実的ではない。また自律走行では、車速によって車間距離が変化するので、交通流のちょっとした乱れにより、交通密度（道路の単位長さあたりの車両台数）の不均一が発生する。一定車間時間制御では、交通流の乱れに

より発生した高密度部分が消滅することなく後方に伝播する性質があるため、一度乱れた交通流はなかなか回復しない。一方、プラトーン走行は、密な車車間通信を利用することにより形成した高密度なプラトーン(車群)の自律走行と考えてよい。プラトーンとプラトーンの間の関係は、自律走行における単体車両と単体車両の関係に等しい。しかし、部分的にプラトーンを形成することにより、実現できる最大交通容量はドライバによる運転で実現できる交通容量の3倍以上の大きさを期待することができる。プラトーン内の車間距離制御を一定車間距離制御とすれば、速度変化による交通密度の変動を小さく抑えることができる(プラトーン間で一定車間時間制御を利用すると、速度によって若干交通密度が変動する)ため、外乱に対して交通流が乱れにくいものとなる。また、車車間通信を利用しているプラトーン内の車間距離制御は、車間距離の変更や、制御則の変更などを行う自由度を有しており、交通状況による最適化を行うポテンシャルを持つ。これらの特徴に加え、プラトーン走行は、高密度走行による空気抵抗の低減(すなわち、燃料消費、排出ガスの低減)やプラトーン内衝突の安全性(車間距離が短いため、衝突の際の相対速度が小さく抑えられる。)などの特徴を有しており、将来の自動車交通の需要に合致したものである。

3.1.2 縦方向制御の問題点

従来のプラトーン走行のための縦方向制御の研究において、問題視するべき傾向を以下に挙げる

- ・車両レベルの制御が中心である
- ・車間距離維持のみに主眼を置いて制御系が設計されてきた
- ・縦方向制御における車車間通信の負荷が小さい
- ・縦方向制御の評価は、単一のプラトーンにおいてのみ行われてきた
- ・縦方向制御の巨視的な評価は、大幅に単純化したモデルを利用して行われてきた

上記第1～3項目の背景には、各車両の動特性の差異、車車間通信によって送受信できる情報量の制約、プラトーンのタスクとして車間距離の維持のみに着目されていたこと等がある。特に車車間通信の制約は、制御システムと通信システムの研究分野が異なるために、十分なコンセンサスが取れていないことに起因しているのではないかと考えている。実際、現在研究開発が進んでいる車車間通信の仕様を見ると、制御で想定されている仕様よりも遥かに多くの情報を伝達することができる。

プラトーン走行を実現するためには、車間距離の維持以外に合流、離脱の遂行を視野に入れた制御システムの構築が要求される。また、車車間通信を利用する以上、プラトーン走行制御は、交通状況に応じて車間距離の変更や、制御則の変更などを行う自由度を有しており、それを最大限に活用できる制御システムが望ましい。従来の縦方向制御は、このような制御システムを実現するための十分なポテンシャルを有しているとは考えにくい。

上記第4項目の背景には、上記第2項目があると考えている。上記第5項目は、評価項目として、交通容量や交通密度等の評価に主眼がおかれ、単純化したモデルでそ

れなりに評価することが可能なためであると考えている。

プラトーン内の車間距離維持性能を評価するためには、単一にプラトーンのみを評価すれば十分である。しかし、プラトーンに車両が合流する際のことを考えると、合流した車両が、後続のプラトーンに与える影響を考慮する必要がある。また、前方に割り込んできた合流車の影響を受けたプラトーンがさらに後続のプラトーンに与える影響を考慮する必要もある。すなわちプラトーン間、プラトーン-車両間の相互作用を検討する必要がある。実際にシミュレーションを行うと、定常的には10000[台/h]の交通容量を実現できるプラトーン走行において、3600[台/h]のプラトーン走行車線に3600[台/h]で車両が合流する場合、プラトーン間、プラトーン-車両間の相互作用により、合流が不可能になることを確認している(第11章参照)。この場合、合流時におけるプラトーン間、プラトーン-合流車両間の相互作用により、プラトーン走行車線の速度が大幅に落ちて、その合流部分の交通容量が、 $3600+3600$ [台/h]よりも小さくなる。このことは、プラトーン走行制御を考える際に、定常的な特性を考慮するだけでなく、合流、離脱などにおける非定常特性を考慮して設計する必要があることを意味している。

3.1.3 横方向制御の問題点

プラトーン走行における各車両の横方向制御および横方向運動は、他の車両に影響を及ぼさないため、プラトーン走行を実現する上での大きな問題にならない。従来の横方向制御の研究において、あえて問題視すべき傾向を指摘するならば、道路白線や磁気ネイル、先行車等の何らかのリファレンスが存在することを前提に横方向制御系が設計されてきたことである。これは、リファレンスがない場所における信頼性の高い横方向制御が困難となることを意味しており、任意の場所で車線変更や進路変更をする際の横方向制御の見通しを悪くしている。すなわち、自動運転システムは、線路上を走行する鉄道と大差なく、融通が利きにくい。また、磁気ネイルによる車線検出に基づくシステムでは、車両の磁気センサの検出レンジ内に磁気ネイルが存在する必要がある。一時的な事故や道路保守などで磁気ネイル敷設箇所を走行できない場合、横方向制御の継続が不可能になる。すなわちインシデントに対する信頼性が低い。よって、プラトーン走行に限らず、自動運転システムにおいて、融通性の高い横方向制御を実現するための横方向制御システムの導入が望ましい。

3.2 提案する制御システム

第3.1節で考察した、従来のプラトーン走行制御の問題点を克服するために必要なプラトーン走行制御に対する要求事項は以下の通りである。

- ・合流・離脱等のタスクが見通しよく行える
- ・交通状況に応じて、車間距離の変更や制御則の変更を行う自由度を有する

- ・プラトウーン間の相互作用や車両-プラトウーン間の相互作用が交通流を乱さない
- ・任意の場所での進路変更や、車線変更を見通し良く実現できる

本研究では、上記実現のためのアプローチとして、プラトウーンレベルの制御と絶対位置情報の利用を新たな柱とした制御システムを提案する。図3.2.1の左側に提案する制御システムの制御構造を示す。これは、PATHで提案された階層型制御構造(図3.3.1の右側)に倣ったものであり、プラトウーンレベルの制御層を導入する一方、車両レベルの制御を縮小している。なお横方向制御に関しては、車両単体の制御を中心とする従来の構造を踏襲している。プラトウーンレベルの制御は、プラトウーン内の1台のリーダー車両によって行われることを想定している。プラトウーン内のリーダー以外の車両はリーダーの指令に従って加減速を行うのみである。このように1台の車両にプラトウーン挙動を制御するリーダーシップをあたえることで、合流車両や離脱車両は、リーダー車両とコンセンサスをとるだけで、見通し良く合流や離脱の制御を行うことができる。一方、道路インフラがリーダー車両に交通状況やプラトウーン制御ストラテジを伝達すれば、交通状況に応じたプラトウーン挙動を容易に実現することができる。プラトウーンレベルの制御を提案する背景には、車車間通信技術の発展がある。近年の車車間通信技術および移動体通信技術の発展は、通信情報量および通信サイクルの増大化を可能とし、プラトウーンを1つの制御対象として扱うために十分な量の情報を送受信することを可能とした。また、不特定との車両との通信ネットワークを形成するプロトコルなども提案されている。本研究では、これらの技術の活用によってプラトウーン走行の高度化を実現するための最良の選択肢は、プラトウーンレベルの制御の導入であると考えている。

次に絶対位置情報の利用について述べる。従来、絶対位置情報は、ナビゲーションの分野等においてその有効性が明らかにされてきた。一方、自動運転制御においては、制御車両と道路中心または先行車との相対位置関係により制御入力を決定してきた。この理由として制御に利用するために十分高精度でリアルタイムな絶対位置計測が困難であったことを挙げることができる。しかし今日、GPSを差動(Differential GPS)化することにより、計測誤差の大きな要因であるSA(Selective Availability)等の影響を排除することが可能になった。さらに信号搬送波の位相情報を利用することによりセンチメートルオーダーの精度でのリアルタイム計測が可能になった。このようなDGPSによる絶対位置計測技術の発展は、自動運転制御への絶対位置情報の適用の展望を与えるものであると考える。絶対位置情報を利用すれば、目標コースを数値情報として記述することができるため、磁気ネイル等の固定リファレンスに依存しない融通性の高い横方向制御が実現できる。また、絶対位置情報を車車間通信で送受信すれば、プラトウーンを1つの制御対象として扱ったり、合流・離脱制御を行う見通しが良くなる。

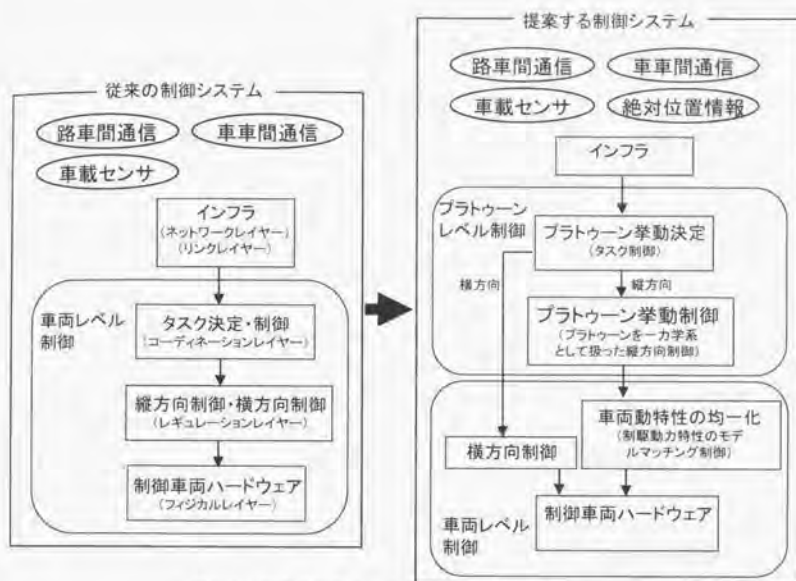


図3.2.1 従来の制御システムと提案する制御システム

3.3 提案する制御システムの実現に必要な要素技術

この節では、第3.2節で提案した制御システムを実現するために必要な要素技術について説明する。本研究では、図3.2.2の中で制駆動特性のモデルマッチング制御、プラトーンを一力学系として扱った縦方向制御、タスク制御、絶対位置情報を、技術的妥当性を検討する必要がある要素技術として位置付けている。一方車車間通信、路車間通信、車載センサ（車間距離センサ、磁気センサ、車両運動センサなど）については、現行の技術水準の範囲で利用できるものとしている。

まず、車両レベルの制御に関する要素技術について述べる。プラトーンレベルの制御を行う場合、各車両の動特性の差異や、不確かさが問題となる。これは、プラトーンを1つの制御対象として扱うことを困難する。よって各車両の動特性の差異や不確かさを排除し、プラトーンを1つの制御対象として扱いやすくするための技術が必要となる。これを実現する要素技術として、「制駆動力特性のモデルマッチング制御」を第4章で提案し、その有効性を検討する。この制御は、ロバスト制御の理論に基づき、非線形特性や不確かさを有する制駆動特性を規範の特性に一致させるものである。第4章では、上記目的のためのモデルマッチング制御系の設計を行う。この制御により、加速度目標値に対する応答特性を規範の一次遅れ伝達関数特性に追従で

きることをシミュレーション及び実験で確認する。

次にプラトーンレベルの制御に関する要素技術について述べる。プラトーンレベルの制御によってプラトーン挙動を制御するためには、挙動制御のための制御系が必要である。この場合、プラトーンを1つの制御対象として扱えば見通しよく制御系を構築することができる。プラトーン挙動制御を実現する要素技術として、「プラトーンを一力学系として扱った縦方向制御」を第5章で提案し、その有効性を検討する。本研究では、プラトーンを一力学系のシステムとしてモデル化し、非干渉制御理論を応用した制御系の設計を行う。この制御により、プラトーン先頭車の速度と、プラトーン内の各車間距離を独立に制御することが可能となり、見通しよくプラトーンの挙動制御を実現できることをシミュレーションで確認する。

プラトーンレベルの制御の上位制御として、プラトーン挙動を決定するタスク制御が必要である。プラトーン挙動の決定ロジックとして、「プラトーンタスク制御」を第10章で検討する。この検討により、プラトーンの形成、合流、離脱、道路インフラとの協調などのタスクを遂行するためのプラトーン挙動決定方法や車車間通信手続きを明確にする。

最後に、絶対位置情報の利用について述べる。本研究では絶対位置情報をDGPSにより獲得することを想定している。しかし、DGPSにより計測された絶対位置情報には、計測誤差、情報遅れ、情報のサンプル周期の問題があり、そのまま車両運動制御に利用することは困難である。よって車両運動制御に利用するために十分な精度とリアルタイム性を有する絶対位置の獲得手法と絶対位置情報に基づく制御アルゴリズムが必要となる。これを実現するための要素技術として第6章で絶対位置情報の推定手法を提案する。この推定手法は、車両運動情報を利用することにより、絶対位置情報の精度の向上、遅れの補償、サンプル周期の補間を実現するものある。シミュレーション及び実験により、この手法で推定する絶対位置情報が車両運動制御に利用するために十分な精度とリアルタイム性を有することを確認する。第7章では、絶対位置情報の車車間通信で送受信することにより得られた周囲車両の相対位置情報を獲得する手法を提案し、獲得した相対位置情報が車両運動制御に利用するために十分な精度とリアルタイム性を有することを、実験により確認する。さらに、第8章、第9章では絶対位置情報に基づく、横方向制御系を提案し、目標コースへの追従や、道路インフラからの情報に基づく障害物回避が実現できることをシミュレーションと実験により確認する。

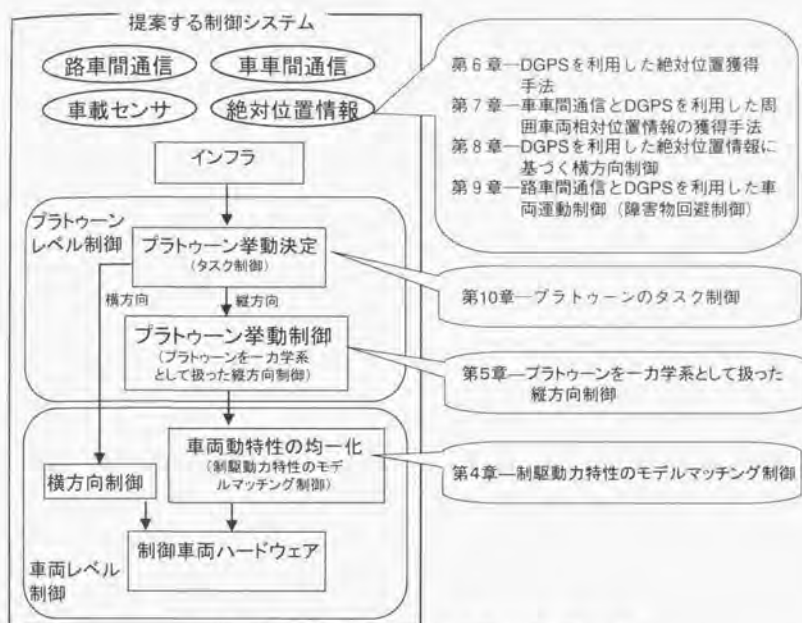


図3.3.1 提案する制御システムの実現に必要な要素技術

3.4 第3章のまとめ

この章では、本研究における問題提議として、従来のプラトーン走行システムの問題点を指摘し、それらの問題を克服するための制御システムの提案を行った。また、提案する制御システムを実現するために必要な要素技術を明確にした。この章をまとめると以下ようになる。

- ・プラトーン走行の自律走行に対する優位性を指摘し、プラトーン走行実現の意義を示した
- ・従来のプラトーン走行における縦方向制御の問題点として、以下を指摘した。
 - (1) 車間距離の維持以外に合流、離脱の遂行を視野に入れた制御システムの構築がされていないので、これらのタスクを遂行する見通しが悪い
 - (2) プラトーンは交通状況に応じて車間距離の変更や、制御則の変更などを行う自由度を有しているのにも関わらず、それを最大限に活用できる見通しが悪い
 - (3) プラトーン間の相互作用やプラトーン-単体車両間の相互作用が考慮されていない

- ・従来のプラトーン走行における横方向制御の問題点として、以下を指摘した
 - (4)道路白線や磁気ネイル、先行車等の何らかリファレンスが存在することを前提に横方向制御系が設計されているので、進路変更、車線変更、インシデントへの対応する際の融通性が低い
- ・上記(1)～(4)の問題点を克服するものとして、車車間通信を利用したプラトーンレベルの制御とDGPSを利用した絶対位置情報の利用を柱とした制御システムを提案した。
- ・提案する制御システムを実現するために必要な要素技術を明確にした。

第4章 制駆動力特性のモデルマッチング制御

この章では、自動車の縦方向の動特性を規範の特性に追従させるための、モデルマッチング制御について検討する。自動運転制御における縦方向制御は、一般に加速度目標値を決定する制御層とスロットルやブレーキを制御して実際の車両加速度を発生させるサーボ制御層から構成される。この章で説明するモデルマッチング制御は、後者のサーボ制御層に相当するものである。従来提案されてきたサーボ制御層は、加速度目標値に対して車両加速度の定常値を一致させるものであり、定常値に至る応答特性を制御するものではなかった。これは車両毎および走行条件毎に応答特性が異なることを意味する。各車両の動特性の差異および不確かさは、プラトーン走行制御際に、プラトーンを制御対象とすることを阻害するものであり、車両レベルの制御によるプラトーン走行の実現手法が数多く提案されてきたことの大きな原因である。この章で提案するモデルマッチング制御は、加速度目標値に対する車両加速度の応答特性を規範の一次遅れ特性に追従させることにより、各車両を既知の力学要素として扱えるようにすることを目的としている。さらに、制御系のロバスト性および外乱抑制特性により、走行速度や車両質量特性の変動、勾配等の外乱があっても制御効果を発揮するものとしている。プラトーンを構成する各車両にこの制御を行うことにより、プラトーンを一力学系と扱うことが可能になる。また、自動運転車両全体にこの制御を行えば、各車両の動特性が既知かつ同一となるため、巨視的な解析やストリングスタビリティの評価を容易にすることが可能となる。

この章における研究の流れは、図4.0.1のようになっている。以下の各節では、この流れに従い、車両モデル、制御対象のモデル化、制御系の構成、制御系の評価結果についてそれぞれ説明する。

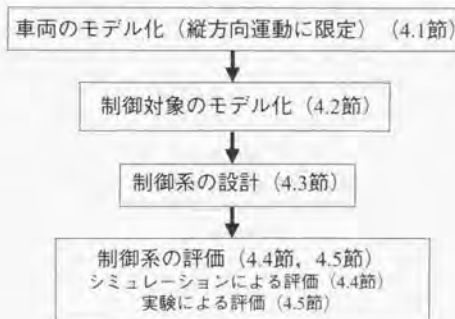


図4.0.1 第4章の流れ

4.1 車両のモデル化

この節では、モデルマッチング制御系の構築および、シミュレーションによる評価に使用するための車両の制駆動システムモデルについて説明する。この章および第5章では車両の縦方向運動のみを扱うため、ここで説明する車両モデルも車両の縦方向運動に関する部分に限定している。本研究では、実験で使用している日産インフィニティ Q45（排気量 4500cc）をモデル化している。車両モデルの構築の際、以下のことを仮定している。

- ・エンジンにおける動的な特性（例えば、吸気管の流れ）については無視できるものとする。
- ・タイヤは路面に対してスリップしないものとする。
- ・自動運転環境では急激な加減速、急激な旋回動作、急激な回避動作を行わないものとし、車体のピッチや上下運動については考慮しない。

上記仮定に基づく車両の縦方向運動の運動方程式は以下のように記述される。

$$m\dot{V} = F_R + F_{\alpha} - \text{drag}(V) \quad \dots\dots\dots (4.1.1)$$

m および V はそれぞれ、車両質量および縦方向速度である。 F_R 、 F_{α} は車両の駆動システムあるいは制動システムによって発生する前輪および後輪における力であり、 drag は速度の関数で表される走行抵抗である。

まず駆動システムから説明する。駆動システムの概図を図 4.1.1 に示す。駆動システムは、エンジン、トルクコンバータ、オートマティクトランスミッションから構成されるものとしている。エンジントルク T_1 は、エンジン回転数 n_1 とスロットル弁開度 α （全閉を 0、全開を 1 としている）の非線形関数として以下のように与えられる。

$$T_1 = E_{ng}(n_1, \alpha) \quad \dots\dots\dots (4.1.2)$$

ここで、 E_{ng} はエンジントルク特性であり、図 4.1.2 のように表される。トルクコンバータ特性は、トルク比特性とトルク容量特性からなり、それぞれトルクコンバータのコンプレッサ側回転数 n_1 とタービン側回転数 n_2 の比の関数として表される。トルク比特性 τ は、エンジントルクとトルクコンバータタービン側トルク T_2 の比を決定するものであり、以下のように与えられる。

$$\frac{T_2}{T_1} = \tau\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad \dots\dots\dots (4.1.3)$$

図 4.1.3 は、上式の右辺、すなわちトルク比特性を表したものである。また、トルク容量特性はエンジントルクとエンジン回転数の関係を決定するものであり、以下のように与えられる。

$$\frac{T_1}{n_1^3} = K_R\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad \dots\dots\dots (4.1.4)$$

図 4.1.4 は、上式の右辺、すなわちトルク比特性を表したものである。この車両モデル

は後輪駆動車のモデルであるため、 F_{rx} に以下の式で表される駆動力が発生する。

$$F_{rx} = \frac{\eta \cdot T_2 \cdot \text{gear}(\alpha, V)}{r_r} \quad \dots\dots\dots (4.1.5)$$

ここで gear は、オートマチックトランスミッションのギア比を表しており、スロットル弁開度と速度に応じて非線形的に変化する。図4.1.5にギア比の特性を示す。 η 、 r_r はそれぞれ、動力伝達係数およびタイヤの有効半径である。また、駆動力によって発生した速度により、トルクコンバータ側タービン回転数が以下のように求められる。

$$n_2 = \frac{V \cdot \text{gear}(\alpha, V)}{2\pi \cdot r_r} \quad \dots\dots\dots (4.1.6)$$

スロットル弁の開閉については、実験車両のスロットルアクチュエータに基づきモデル化している。実験車両ではDCモータによるスロットル弁の開閉を行っており、動作実験結果に基づき以下のようにDCモーターの等速回転動作をモデル化している。

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= k_{th} & (\alpha \leq \alpha_{des} - 0.001 \text{ の時}) \\ \dot{\alpha} &= 0 & (\alpha_{des} - 0.001 < \alpha < \alpha_{des} + 0.001 \text{ の時}) \\ \dot{\alpha} &= -k_{th} & (\alpha \geq \alpha_{des} + 0.001 \text{ の時}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4.1.7)$$

ここで、 α_{des} はスロットル弁開度の目標値である。図4.1.6にモデル化したスロットルアクチュエータのステップ応答を示す。以上により、駆動システムの定式化が完了する。しかし、コンピュータにより駆動システムのシミュレーションを実行する場合、式(4.1.2) および (4.1.4) を解いて、エンジントルクやエンジン回転数を算出するには、大がかりな演算が必要となる。そこで本研究では、式(4.1.2) および (4.1.4) を利用して、次のようなマップ関数を作成し、計算の際に利用している。

$$T_1 = f_1(\alpha, n_2) \quad \dots\dots\dots (4.1.8)$$

$$n_1 = f_2(\alpha, n_2) \quad \dots\dots\dots (4.1.9)$$

図4.1.7、図4.1.8にそれぞれ式(4.1.8)、式(4.1.9)のマップ関数を示す。

次に制動システムについて説明する。実験車両では、ブレーキアクチュエータにより前輪のブレーキ圧を直接的に加減圧している。制動力は前輪のブレーキ圧 b_p に比例するものとし、以下の式で表される。

$$F_{\beta} = -k_{\beta} \cdot b_p \quad \dots\dots\dots (4.1.10)$$

図4.1.9にブレーキ圧と制動力の関係を示す。実線がモデル化したブレーキ圧と制動力の関係であり、点は実験結果である。本研究で使用しているブレーキアクチュエータは油圧ポンプとソレノイドバルブにより前輪のブレーキ圧を制御する。動作実験により、ブレーキアクチュエータの動作を以下のようにモデル化している。

$$\begin{aligned} \dot{b}_p &= k_b & (b_p \leq b_{pdes} - 2 \text{ の時}) \\ \dot{b}_p &= -1 & (b_{pdes} - 2 < b_p < b_{pdes} + 2 \text{ の時}) \end{aligned}$$

$$\dot{b}_p = -k_b \quad (b_p \geq b_{pdes} + 2 \text{ の時}) \quad \dots\dots\dots (4.1.11)$$

ここで、 b_{pdes} はブレーキ圧の目標値である。圧力の変化速度は、ブレーキ圧に応じて以下のように変化するものとしている。

$$k_b = 100 \quad (0 \leq b_p < 5 \text{ の時})$$

$$k_b = 900 \quad (5 \leq b_p < 50 \text{ の時})$$

$$k_b = 400 \quad (50 \leq b_p \text{ の時}) \quad \dots\dots\dots (4.1.12)$$

図4.1.10にモデル化したブレーキアクチュエータのステップ応答を示す。



図4.1.1 駆動システム

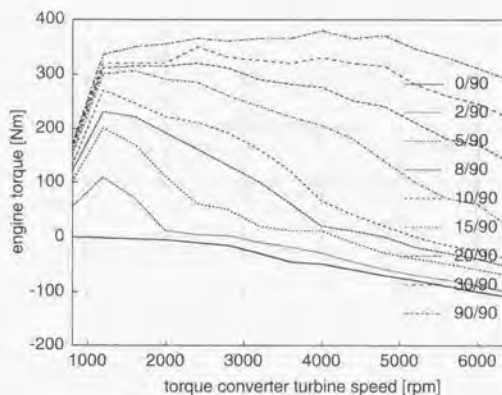


図4.1.2 エンジントルク特性

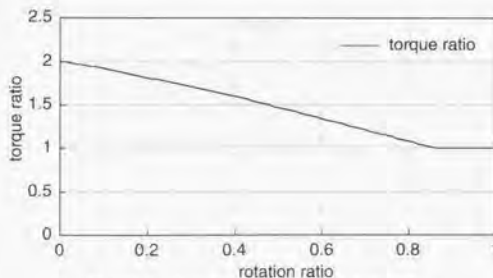


図4.1.3 トルクコンバータトルク比特性

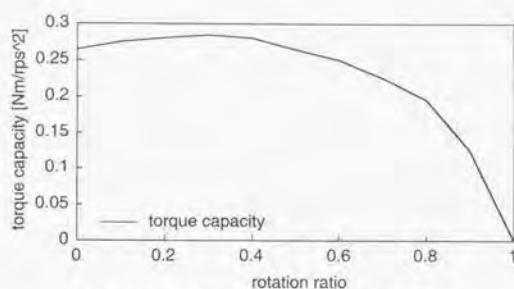


図 4.1.4 トルクコンバータトルク容量特性

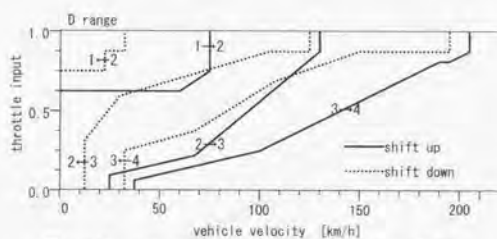


図 4.1.5 オートマチックトランスミッション特性

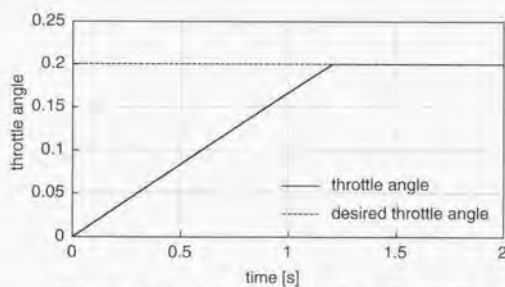


図 4.1.6 スロットルアクチュエータのステップ応答

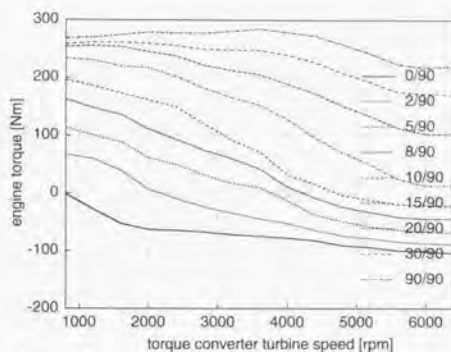


図 4.1.7 トルクコンバータタービン側回転数に関するエンジン特性

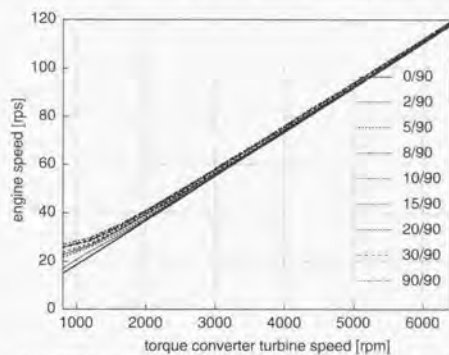


図 4.1.8 トルクコンバータタービン側回転数に関するエンジン回転数特性

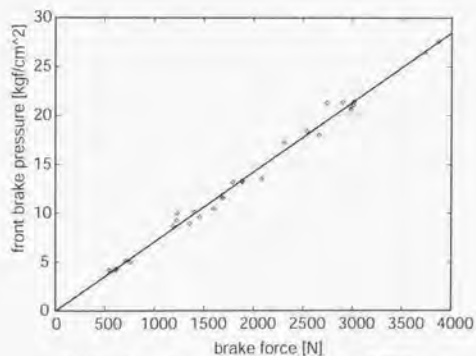


図 4.1.9 前輪ブレーキ圧と制動力の関係

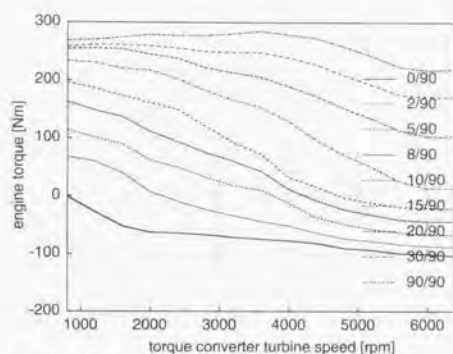


図 4.1.7 トルクコンバータタービン側回転数に関するエンジン特性

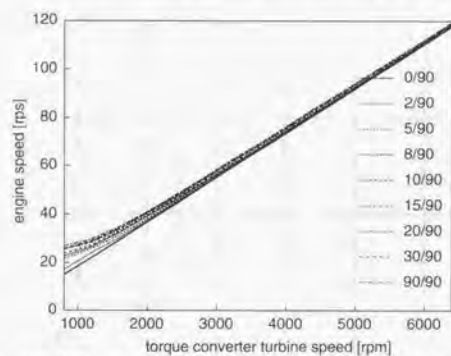


図 4.1.8 トルクコンバータタービン側回転数に関するエンジン回転数特性

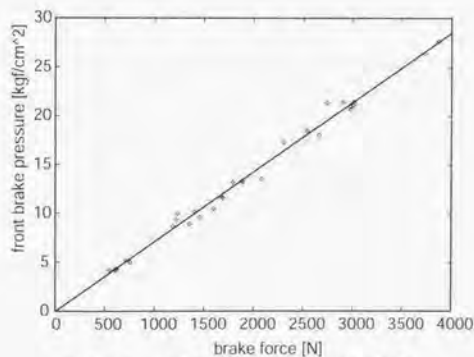


図 4.1.9 前輪ブレーキ圧と制動力の関係

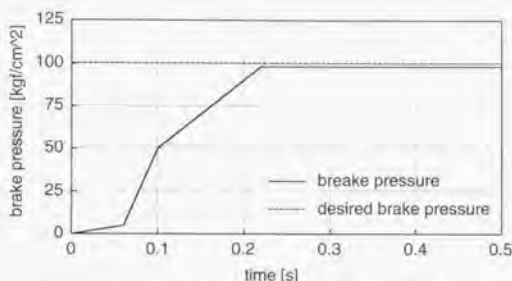


図 4.1.10 ブレーキアクチュエータのステップ応答

4.2 制御対象のモデル化

この節では、制駆動力のモデルマッチング制御における制御対象（以後プラントと呼ぶ）の定式化および、伝達関数モデルについて説明する。本研究では、プラントを入力＝指令加速度、出力＝車両加速度とするシステムとしている。すなわち、指令加速度が与えられれば、加速度を出すために必要なスロットル弁開度、またはブレーキ圧を計算し、スロットルまたはブレーキアクチュエータが作動することにより生じる車両加速度を出力としている。図 4.2.1 にプラントの概図を示す。以下の各項では、プラントの定式化および伝達関数へのモデル化について説明する。

4.2.1 プラントの構築および定式化

図 4.2.1 中での目標スロットル弁開度およびブレーキ圧の決定以降の部分については、第 4.1 節において、定式化が完了している。以下では、目標加速度が与えられてから、目標スロットル弁開度および目標ブレーキ圧を決定するプロセスについて定式化を行う。

まず、目標スロットル弁開度を決定するプロセスの定式化について説明する。式 (4.1.1) を制駆動力について解くと

$$F_R + F_a = m\dot{V} + \text{drag}(V) \quad \dots\dots\dots (4.2.1)$$

ここで、ブレーキ圧の発生はないものし、 F_R を 0 とすれば、

$$F_{rr} = m\dot{V} + \text{drag}(V) \quad \dots\dots\dots (4.2.2)$$

となる。この駆動力を発生するために必要な、トルクコンバータタービン側トルクは、式 (4.1.5) より、

$$T_2 = \frac{F_{rr} \cdot r_r}{\eta \cdot \text{gear}(\alpha, V)} \quad \dots\dots\dots (4.2.3)$$

となり、これを式 (1.3.3) に代入すれば、

$$T_1 = \frac{F_{rx} \cdot r_r}{\eta \cdot \text{gear}(\alpha, V) \cdot \tau \left(\frac{n_2}{n_1} \right)} \quad \dots\dots\dots (4.2.4)$$

として、エンジントルクを算出できる。このエンジントルクを発生するために必要なスロットル弁開度は、式 (4.1.8) を α について解くことにより求めることができる。すなわち、

$$\alpha_{des} = f_1^{-1}(T_1, n_2) \quad \dots\dots\dots (4.2.5)$$

この計算を行う際は、あらかじめ作成した α_{des} の T_1 と n_2 に関するマップ関数を使用している。なお、 n_2 は式 (4.1.6) により算出する。

次に、目標ブレーキ圧を決定するプロセスについて説明する。上述の手法で求めた目標スロットル弁開度が 0 より大きな値を持つ時、目標ブレーキ圧は 0 とする。目標スロットル弁開度が 0 である場合、以下のように目標ブレーキ圧を決定する。必要な制動力は F_b は以下の式で与えられる。

$$F_b = m\dot{V} + \text{drag}(V) - F_{rx} \quad \dots\dots\dots (4.2.6)$$

ここで、 F_{rx} の値が負であれば、それはエンジンブレーキに相当するものがある。式 (4.2.6) の F_{rx} に、式 (4.2.4) および式 (4.1.8) を代入することにより、

$$F_b = m\dot{V} + \text{drag}(V) - \frac{\eta \cdot \text{gear}(\alpha, V) \cdot \tau \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \cdot f_1(\alpha, n_2)}{r_r} \quad \dots\dots\dots (4.2.7)$$

として、制動力を求めることができる。この制動力を発生させるためのブレーキ圧は、式 (4.1.10) より以下のように求めることができる。

$$b_{des} = -\frac{F_b}{k_{br}} \quad \dots\dots\dots (4.2.8)$$

以上により目標加速度が与えられてから、目標スロットル弁開度および目標ブレーキ圧を決定するプロセスについて定式化ができたことになる。

プラントの応答特性を図 4.2.2 に示す。±1[m/s²] の目標加速度に対するステップ応答である。この図からわかるように、速度によって、応答特性が異なり、かつ加速、減速によっても応答特性が異なっている。速度による応答の違いは、必要なスロットル開度、走行抵抗、エンジン回転数、トルクコンバータタービン回転数などの違いによって生じる。本研究では速度における特性の違いや加速時、減速時の特性の違いを全て制御系のロバスト性でカバーすることを想定している。

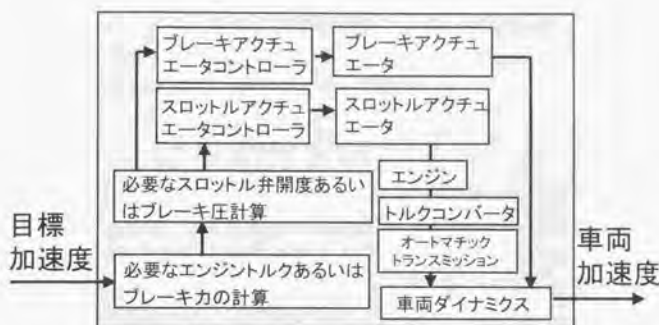


図 4.2.1 プラント

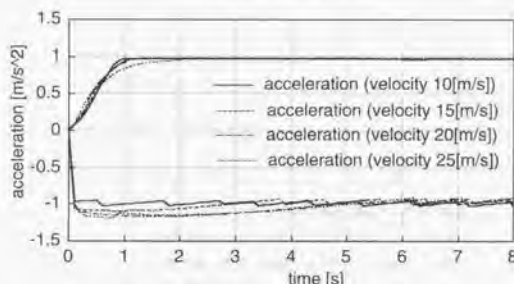


図 4.2.2 プラントのステップ応答

4.2.2 プラントの伝達関数モデル

制御系の補償器を決定するためには、プラントの公称モデルの伝達関数を求める必要がある。本研究では、プラントの周波数特性から、それに近い応答特性をもつ伝達関数を公称モデルとする。入出力の周波数特性から伝達関数モデルを作成することは、モデル化の汎用性を高めるものと考えている。すなわち、本研究で車両モデル以外の車両における伝達関数モデルを作成する場合、第4.1節や第4.2.1項のような定式化やシステム構成に従う必要はない。目標加速度を入力として車両加速度を出力とする様々なシステム構成に対して以下のプロセスが適用できる。以下では、本研究で使用しているプラントの伝達関数モデルの求め方について説明する。

プラントに正弦波状入力を与えた場合、プラントに非線形性が含まれているため、応答は正弦波状にはならない。そこで位相遅れの計算法としては、入力 $r(t)$ とある時間ずらした出力 $y(t+T)$ の相関係数 r_{xy} を求め、 r_{xy} を最も 1 に近づける T より、位相遅れを算出する。またゲインは、入力 $r(t)$ と出力 $y(t+T)$ を最小二乗法で線形化することにより求める。

図 4.2.3、図 4.2.4 にプラントの周波数応答特性を示す。初期速度、入力振幅により応答特性が異なることがわかる。ゲイン特性は大きく異ならないが、位相特性が大きく

く異なることがわかる。ゲイン特性が高周波領域でも高い値を維持しているのは、ブレーキ圧の発生が高周波入力に追従しているためである。本研究ではゲイン特性と、低周波数入力時の位相特性より公称モデルの伝達関数を、

$$P_M(s) = \frac{3s+21}{7s+21} \quad \dots\dots\dots (4.2.9)$$

とした。公称モデルの分子と分母の次数を等しくした理由は、制御系の中に公称モデルの逆関数を導入する際に、公称モデルの逆関数がプロパーであるほうが扱いやすいためである。公称モデルの周波数応答を図4.2.3、図4.2.4に併記する。図4.2.3、図4.2.4をみるとゲイン特性は良く一致しているが、位相特性が高周波領域でずれていることがわかる。この特性はプラントモデルに遅れ時間要素を乗ずることにより近似することができる。しかし、本研究ではモデルの次数を増やさない配慮と、このずれが高周波領域であることの考慮に基づき公称モデルを式(4.2.9)として決定した。また制御系の構成においては、この遅れ時間要素をプラントモデルの乗法的不確かさとみなし、ロバスト安定化を配慮する。

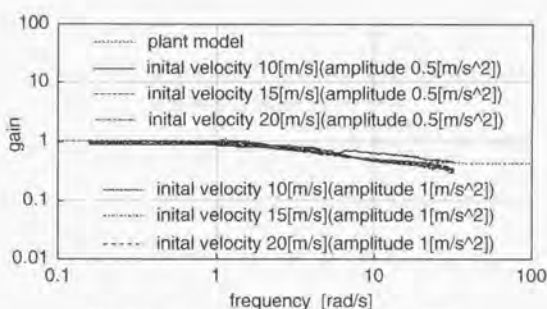


図4.2.3 プラントの周波数特性（ゲイン特性）

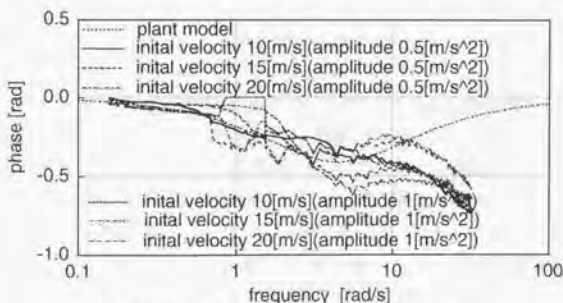


図4.2.4 プラントの周波数特性（位相特性）

4.3 制御系の設計

この節では、制駆動力特性のモデルマッチング制御系の設計について説明する。本研究で設計するモデルマッチング制御の目的は、図4.3.1に示すように加速度目標値に対する車両加速度の応答特性を規範の一次遅れ特性に追従させることである。さらに、車両の制駆動力特性は、第4.1節で説明した非線形特性を含んでいるだけでなく、質量変動、勾配、風などの外乱の影響を受ける。そのため制御系は、モデルマッチング特性だけでなく、ロバストサーボ特性[182]、ロバスト安定性を両立する必要がある。本研究では、上記の特性を満足する制御系として、図4.3.2に示す二自由度制御系を構成した。二自由度制御系とは、目標値信号と制御対象出力信号の情報を独立に用いて、制御入力を算出する制御系であり、簡単に言えば、フィードフォワードとフィードバックの両方を含む制御系のことである。この制御系の特徴は、閉ループの目標値応答特性とフィードバック特性を独立に設定できることである。この場合フィードフォワード補償器において目標値応答特性（本研究ではモデルマッチング特性）を設定し、フィードバック補償器においてフィードバック特性（本研究では、ロバストサーボ特性、ロバスト安定性）を設定する。以下にモデルマッチング制御系の設計手順について説明する。

まずフィードフォワード補償器を設計手順について説明する。本研究では、規範モデルとして以下のような、一次遅れ伝達関数としている。

$$G_M(s) = \frac{1}{T_m s + 1} \quad \dots\dots\dots (4.3.1)$$

本研究では $T_m=1$ としている。様々な車種の車両において規範モデル応答を実現できること配慮して、プラントの応答特性に比べて大きな時定数(T_m)を設定している。規範モデル応答を実現するためのフィードフォワード補償器は、図4.3.2の $G_M(s)P_M(s)^{-1}$ となる。プラントが $P_M(s)$ と完全に一致する場合、

$$P \cdot P_M^{-1}(s) \cdot G_M(s) = G_M(s) \quad \dots\dots\dots (4.3.2)$$

となるので、フィードフォワード入力による開ループは規範モデル応答を実現する。もちろん実際のプラントは $P_M(s)$ と一致しているわけではないので、フィードバック補償が必要である。

次にフィードバック補償器の設計手順を説明する。二自由度制御系においては、目標値の応答特性とフィードバック特性を独立に設定できる。そのためフィードバック補償器の設計は、フィードフォワード補償器に依存しない。すなわち、一自由度制御系（フィードバック入力のみからなる制御系）における、閉ループのフィードバック特性を考慮した補償器の設計と等しい。図4.3.2中 $C(s)$ は、フィードバック補償器であり、以下の手順で決定する。まず、外乱抑制特性を考慮する。外乱抑制特性は閉ループの外乱に対する感度によって決定される。外乱に対する感度を $S(s)$ とし、以下のよう

$$S(s) = \frac{s_N(s)}{s_D(s)} \quad \dots\dots\dots (4.3.3)$$

ここで、 $S(s)$ の設定の際に以下の仕様を考慮する。

- ・ 閉ループは低周波外乱に対して低感度となる
- ・ 閉ループはロバストサージ特性を有する
- ・ フィードバック補償器が、閉ループのロバスト安定性を調整するための自由度を有する

上記第1項目は、フィードバック補償器の基本的な設計仕様である。上記第2項目は、本研究で、フィードバック特性に求められるものである。ここで、ロバストサージ特性とは、系の内部安定を乱さない P (プラント) の任意の変動に対して、制御出力が目標値に定常偏差なく追従する特性を意味する。上記第3項目は、閉ループのロバスト安定化のために必要な条件である。 $S(s)$ は以下の式で与えられるので、

$$S(s) = \{1 + P_M(s) \cdot C(s)\}^{-1} \quad \dots\dots\dots (4.3.4)$$

これを $C(s)$ について解くと、

$$C(s) = S(s)^{-1} \cdot P_M(s)^{-1} - P_M(s)^{-1} \quad \dots\dots\dots (4.3.5)$$

ここで、設計仕様の第2項目は、 $C(s)$ が積分器を持つことと等価であるので、 $S(s)^{-1}$ が積分器を持つ必要がある。すなわち

$$\begin{aligned} s_N(s) &= s \cdot s'_N(s) \\ s'_N(0) &\neq 0 \\ s_D(0) &\neq 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4.3.6)$$

設計仕様の第3項目は、高周波領域における $C(s)$ の低ゲイン化が前提となるので、

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} S(j\omega) = 1 \quad \dots\dots\dots (4.3.7)$$

本研究では、簡単のため、

$$s'_N(s) = 1 \quad \dots\dots\dots (4.3.8)$$

とする。これにより、 $s_D(s)$ は一次式となり、

式 (4.3.6) を考慮すると、

$$S(s) = \frac{s}{s+w} \quad \dots\dots\dots (4.3.9)$$

として決定できる。ここで、 w は閉ループのロバスト安定性を調整するためのパラメータとなる。また $S(s)$ は、設計仕様の第1項目も満たしたものとなっている。式 (4.3.9) の感度 $S(s)$ を実現するフィードバック補償器は式 (4.3.5) より、以下ようになる。

$$C(s) = \frac{7ws + 21w}{3s^2 + 21s} \quad \dots\dots\dots (4.3.10)$$

次に閉ループのロバスト安定性を考慮する。第4.2.2項の制御対象のモデル化の際に無視した遅れ時間特性は、制御対象の乗法的な不確かさと考えて良い。これは $\Delta(s)$ とし

で以下のように表すことができる。

$$\Delta(s) = e^{-Ls} - 1 \quad \dots\dots\dots (4.3.11)$$

ここで L は遅れ時間である。 $\Delta(s)$ は、非線形関数であるため、ロバスト安定性の考察に適さない。そこで、線形な重み関数を利用して、ロバスト安定性の考察を行う。 $\Delta(j\omega)$ に関して、

$$|e^{-Lj\omega} - 1| \leq \frac{2.1Lj\omega}{Lj\omega + 1} \quad \forall \omega \quad \dots\dots\dots (4.3.12)$$

という関係が成立するので、

$$W(s) = \frac{2.1Ls}{Ls + 1} \quad \dots\dots\dots (4.3.13)$$

として、 $W(s)$ を $\Delta(s)$ に対する重み関数として扱うことができる。図4.3.3に $L=0.2$ における $W(s)$ と $\Delta(s)$ の周波数特性（ゲイン特性）を示す。 $C(s)$ が $\Delta(s)$ に対して、ロバスト安定化器となるための必要十分条件は、

$$\left\| \left[1 + P_u(s) \cdot C(s) \right]^{-1} P_u(s) \cdot C(s) \cdot W(s) \right\|_{\infty} < 1 \quad \dots\dots\dots (4.3.14)$$

である[183]。上式は" $\|\cdot\|$ "内の関数の H_{∞} ノルムが1未満になることを意味している。この関係式により、 L に対する w 上限値が図4.3.4のように決まる。本研究では、補償器 $C(s)$ が $0 \leq L \leq 0.2$ の範囲の遅れ時間に対するロバスト安定化器なるように $w=4.5$ とした。以上により制御系の設計が完了する。

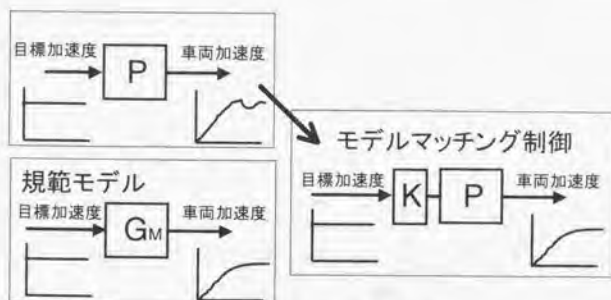


図4.3.1 モデルマッチング制御

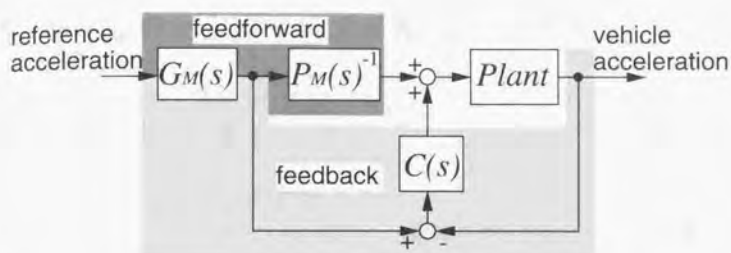


図 4.3.2 モデルマッチング制御系

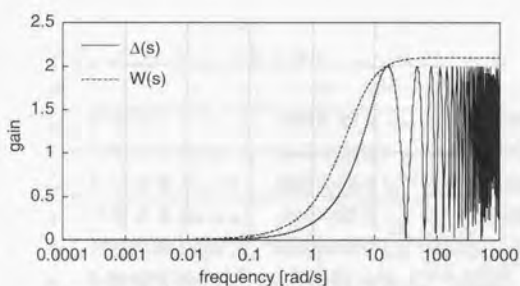


図 4.3.3 プラントの乗法的不確かさに対する重み関数

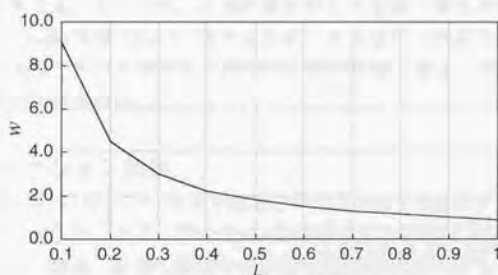


図 4.3.4 \$w\$ と \$L\$ の関係

4.4 シミュレーションによる制御系の評価

この節では、第4.3節で設計した制駆動力特性のモデルマッチング制御のシミュレーションによる評価とその結果について説明する。

4.4.1 シミュレーションの方法

シミュレーションでは、第4.1節で説明した車両モデルを使用している。車両運動の計算周期は1[ms]としている。制御系はサンプリングタイム10[ms]で、0次ホールドを仮定して離散時間系に変換し、車両モデルに組み込んでいる。よって制御周期は10[ms]となっている。計測可能な状態量として、車輪速、エンジン回転数、スロットル弁開度、ブレーキ圧、ギアポジション、縦方向加速度を仮定している。

シミュレーションでは、 $\pm 1[\text{m/s}^2]$ の目標加速度に対するステップ応答を評価する。以下の条件のもとで評価を行った。以下の全ての条件においてギア比は固定している。

シミュレーション1：初期速度10[m/s]、道路勾配なし、車両質量変動なし

シミュレーション2：初期速度15[m/s]、道路勾配なし、車両質量変動なし

シミュレーション3：初期速度20[m/s]、道路勾配なし、車両質量変動なし

シミュレーション4：初期速度25[m/s]、道路勾配なし、車両質量変動なし

シミュレーション5：初期速度15[m/s]、道路勾配なし、車両質量50%増加

シミュレーション6：初期速度15[m/s]、道路勾配-5%（下り勾配）、車両質量変動なし

シミュレーション6のように、道路勾配が存在する場合、車載の加速度計は、重力加速度成分の影響を受ける。そのため、加速度計が出力する値の補正が必要である。補正の方法としては、勾配情報の利用、車両の鉛直方向加速度の利用等がある。このシミュレーションで使用している加速度の情報は勾配の影響を補正した情報、すなわち地面に対する車両の加速度の情報である。

4.4.2 シミュレーション結果

図4.4.1～図4.4.3にシミュレーション結果を示す。図4.4.1はシミュレーション1～4におけるステップ応答である。図中の G_M は規範モデル応答である。この図より、各初期速度において、加速、減速に関わらず応答が規範モデルによく一致していることがわかる。制御を行わない場合は、図4.2.2に示されるような応答になる。図4.4.2は、質量変動時、または外乱存在時におけるステップ応答である。すなわち、シミュレーション5、6における結果である。この図より、質量変動、勾配に関わらずモデルマッチング制御により、応答特性が規範モデルに一致していることがわかる。比較のため図4.4.3に同条件で制御を行わなかった場合の応答結果を示す。制御を行わない場合は、応答特性が制御できないだけでなく、目標値に対して定常偏差が発生することがわかる。

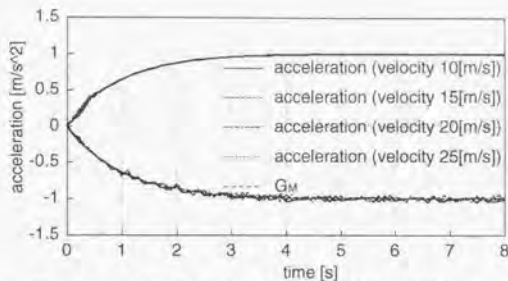


図 4.4.1 各初期速度におけるステップ応答 (制御あり)

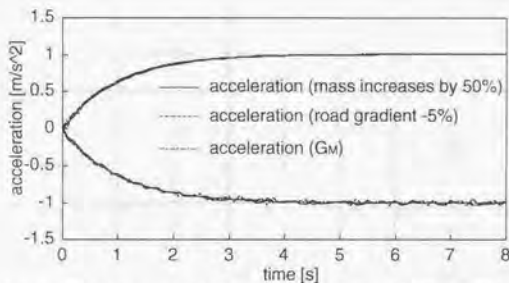


図 4.4.2 質量変動時、勾配存在時におけるステップ応答 (制御あり)

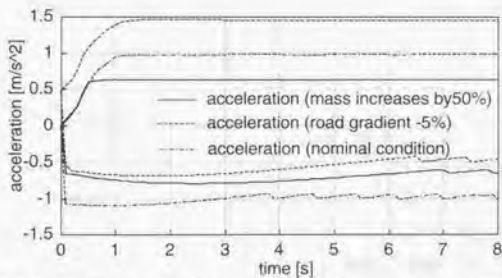


図 4.4.3 質量変動時、勾配存在時におけるステップ応答 (制御なし)

4.5 実験による評価

この節では、第4.3節で設計した制駆動力特性のモデルマッチング制御の実験による評価とその結果について説明する。以下の各項では、実験システム、実験の方法、実験結果について説明する。

4.5.1 実験システム

実験車両として、日産インフィニティQ45(排気量4500cc)を使用している。図4.5.1に実験車両の写真を示す。図4.5.2、図4.5.3に実験車両内の計測・制御システムの概図および詳細図を示す。

状態量として、縦方向加速度、後輪車輪速、エンジン回転数、スロットル開度、ブレーキ圧を計測している。縦方向加速度は、車両重心付近に水平に取りつけられた加速度計(アナログ出力)により計測している。後輪車輪速は、後輪の回転と共に発生するパルスの周波数を計測することにより算出している。エンジン回転数も同様である。スロットル開度は、エンジンのスロットル弁に取りつけられたポテンショメータ(アナログ出力)により計測している。ブレーキ圧は、ブレーキ配管中に取りつけられた圧力計(アナログ出力)により計測している。

スロットルアクチュエータは、エンジンルームに取り付けられており、DCモータをにより、スロットル弁を開閉する。図4.5.4にスロットルアクチュエータの写真を示す。電流を流す方向により、回転方向を制御できる。また、電磁クラッチがスロットル弁のワイヤーを動かすブリーとモーターの間に組み込まれている。よってスロットルアクチュエータはコンピュータからの指令により、正転、逆転、停止の動作および、電磁クラッチのON/OFFの動作が可能である。モータの回転速度は制御できない。正転、逆転の動作はコンピュータからの指令電流を増幅してリレー回路を駆動し、12V電源からモーターに電流を供給することにより行う。クラッチのON/OFFは、コンピュータからの指令電流を増幅することにより行う。

ブレーキアクチュエータはフットブレーキと並列に構成された油圧システムであり、直接ブレーキ圧を制御する。図4.5.5にブレーキアクチュエータの写真を示す。ブレーキアクチュエータは、油圧ポンプ、アキュムレータ、ソレノイドバルブから構成されており、助手席部分に取り付けられている。ソレノイドバルブにより、ブレーキ圧の加圧、減圧、ホールドを行う。ブレーキ圧の変化速度は制御できない。ソレノイドバルブの制御は、コンピュータからの指令電圧を直流アンプにより電流に変換することにより行う(加圧→4.5[A], 減圧→0[A], ホールド→2.1[A])。

制御用コンピュータとしては、AT互換機(CPU:Pentium 200[Mz])を使用している。このコンピュータに取り付けられた、A/D、D/A変換ボード(12bit,A/D:16チャンネル、D/A:8チャンネル)、パルスカウンタボード(2チャンネル)により信号の入出力を行っている。図4.5.6に実験車両に取り付けられたコンピュータと入出力ボックスを示す。また図4.5.7に制御プログラムのフローチャートを示す。

4.5.2 実験の方法



図 4.5.1 実験車両

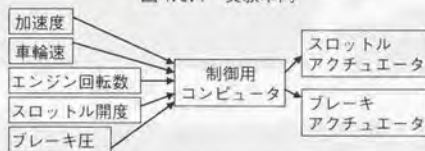


図 4.5.2 実験システムの概図

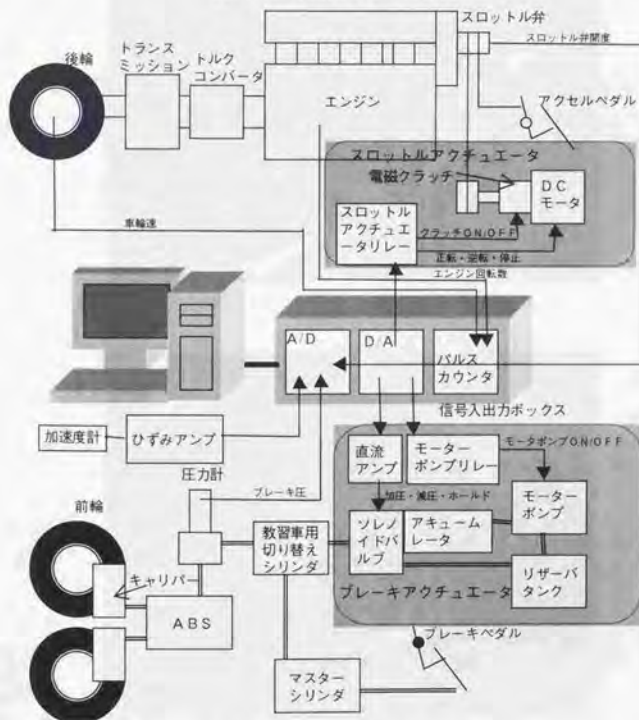


図 4.5.3 実験システム



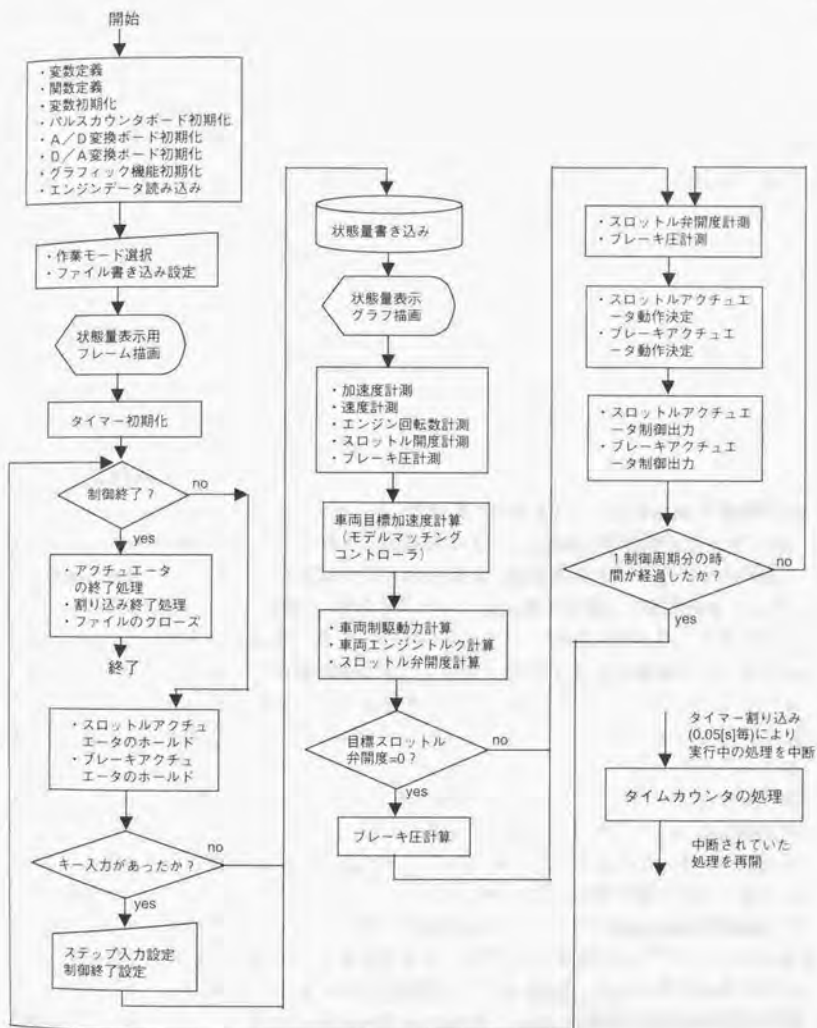
図 4.5.4 スロットルアクチュエータ



図 4.5.5 ブレーキアクチュエータ



図 4.5.6 制御用コンピュータ



実験では、第4.4節同様 $1[m/s^2]$ の目標加速度に対するステップ応答を評価する。第4.3節で説明した制御系をサンプリングタイム $50[ms]$ 、0次ホールドを仮定して離散時間系に変換して制御プログラムに組み込んで行った。ここで、サンプリングタイムを $50[ms]$ とした理由は、計算機およびA/D、D/A変換ボードの処理が $10[ms]$ (シミュレーションで使った値)では追いつかないためである。フィードバックゲイン(第4.3節で説明した w)は、設計値を使用するが、良好な応答が得られない場合は調整するものとしている。実験は以下の条件で行う。

- ・初期速度 $5[m/s]$ 、道路勾配なし、加速のみ
- ・初期速度 $10[m/s]$ 、道路勾配なし、加速のみ
- ・初期速度 $15[m/s]$ 、道路勾配なし、加速、減速
- ・初期速度 $20[m/s]$ 、道路勾配なし、減速のみ
- ・初期速度 $25[m/s]$ 、道路勾配なし、減速のみ

4.5.3 実験結果

図4.5.8にフィードバックゲインを4.5(制御系の設計値)とした場合の初期速度 $10[m/s]$ における実験結果を示す。この図から分かるように、応答は振動的になっている。この振動は制御系の不適切さに起因するものである。制御系のフィードバックゲインは $0.2[s]$ までのプラント内の遅れに対するロバスト安定化を考慮して設計されている。しかし、この実験結果は、設計したフィードバックゲインが過大であることを示している。モデル化誤差やセンサの誤差等に対する閉ループの安定性を確保するためにはフィードバックゲインを下げるのが効果的である。よって、フィードバックゲインを 2.0 に変更して実験を行った。 2.0 のフィードバックゲインは、約 $0.4[s]$ までの遅れに対するロバスト安定を保証するものである。フィードバックゲインを 2.0 とした場合の応答は図4.5.9のようになり、安定な応答を実現できていることがわかる。図4.5.10にフィードバックゲインを 2.0 とした第4.5.2項の実験条件における実験結果を示す。加減速応答初期において加減速共 $0.2[s]$ 程度の遅れがあるが、それ以降においては規範モデルに追従した応答になっている。この $0.2[s]$ 程度の遅れは、リリースイッチの切り替えの遅れ、エンジントルクの発生遅れ、トルクの伝達の際の遅れ、ブレーキ圧の発生遅れ等に起因すると考えている。また、この遅れは、フィードバックゲインの設計において想定した遅れとほぼ等しい。この場合、フィードバックゲインの設計値を使用しても、応答が不安定になった原因として、想定する遅れと実際の遅れがほぼ等しかったこと、遅れ以外のモデル化誤差の影響、そしてセンサ誤差の影響等を考えている。

実験結果から、フィードバックゲインの調整により、加速度の応答特性を規範モデルに追従させることができるが分かった。ここで加速度発生における $0.2[s]$ 程度の遅れの影響が縦方向制御に与える影響は小さいと考える。たとえば、加速度の目標値を $1[m/s^2]$ とした場合の規範モデルの応答と、 $0[s]$ から $0.2[s]$ までの加速度を 0 とし、 0.2

[s]以降は規範モデル応答に追従する応答を比較した場合、結果として生じる速度偏差は $0.0187[\text{m/s}]$ であり、位置偏差は $0.0013[\text{m}]$ である。この程度の偏差は、縦方向制御に与える影響ほとんどないと考えて良い。すなわち、上記実験結果程度の応答が得られれば、車両の制駆動特性を規範の一次遅れ特性を持つものとして扱っても良いと考えている。

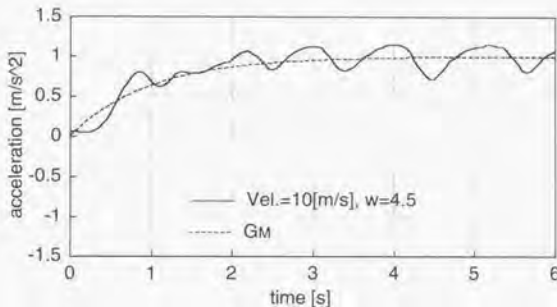


図 4.5.8 実験結果 (フィードバックゲイン=4.5)

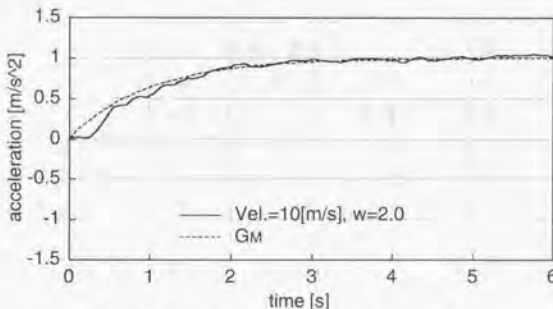


図 4.5.9 実験結果 (フィードバックゲイン=2.0)

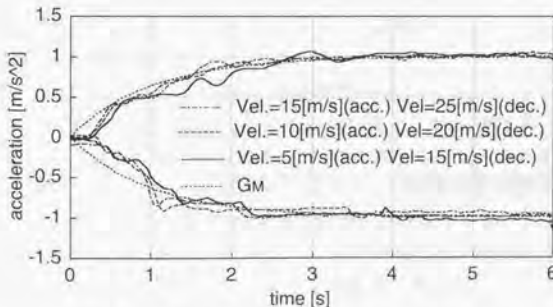


図 4.5.10 実験結果 (フィードバックゲイン=2.0)

4.6 第4章のまとめ

この章では、制駆動力特性のモデルマッチング制御について検討した。この章で明らかにしたことをまとめると以下ようになる。

- ・目標加速度に対する車両加速度の応答を規範の一次遅れ特性に追従させるためのモデルマッチング制御を提案し、その有効性をシミュレーションおよび実験により明らかにした。
- ・提案するモデルマッチング制御系は、速度による特性の差異、質量変動、勾配等の外乱に関わらず、その制御効果を発揮できることをシミュレーションにより明らかにした。

プラトウーンを構成する各車両にこの制御を行うことにより、プラトウーンを一力学系と扱うことが可能になる。また、自動運転車両全体にこの制御を行えば、各車両の動特性が既知かつ同一となるため、巨視的な解析やストリングスタビリティの評価を容易にすることが可能となる。また、自動運転システム以外にも、ドライブバイワイヤシステム、オートクルーズシステム等の加速度応答改善にも貢献するものであると考える。

この章で構築したモデルマッチング制御系の特徴は、その汎用性にある。本研究で構築したモデルマッチング制御は、制御対象を、入力—目標加速度、出力—車両加速度としたシステムとしている。また、制御対象の公称モデルの作成においても、厳密なモデル化をおこなわず、周波数特性に基づき、簡単な伝達関数モデルを採用した。よって提案する制御系は、入力—目標加速度、出力—車両加速度とするあらゆるシステム構成に適用可能である。また、フィードバック補償器の設計においても、閉ループの感度に自由度を持たせることにより、1つのパラメータの調整だけで、閉ループの外乱抑制特性とロバスト安定性のトレードオフ関係のバランスをとることができる。このことは、実機による調整作業の効率を高めるものであると考える。本研究で提案した制御系を様々な車両に適用するためには以下の手順を行えば良い。

- (1) 入力—目標加速度、出力—車両加速度としたシステムを構成する。
- (2) 周波数特性等を利用して上記システムの簡単な伝達関数モデルを作成する。
- (3) 伝達関数モデルに基づき、フィードフォワード補償器、フィードバック補償器を構築し、離散化して実装する。
- (4) 走行試験によりフィードバックゲインを調整する。

現代制御理論は、制御対象の忠実なモデル化を前提としたものであり、所望の制御効果を得るためには、制御対象の忠実なモデル化が要求される。これを自動運転の制御系に適用する場合、自動車毎の忠実なモデル化および制御系の設計が要求され、莫大の労力が要求されることになる。宇宙衛星、兵器等の特殊なシステムの制御には、最大限の制御効果を発揮するために、十分なモデル化と制御系の調整が大切である。しかし、自動車のような何百種類ものシステムの制御系設計においては、この章で提案した制御系のような、汎用性を考慮した設計アプローチが大切であると考えている。

4.7 記号

m	: 車両質量[kg] (2045)
V	: 縦方向速度[m/s]
$F_{f\delta}$: 前輪による駆動力[N]
F_{rx}	: 後輪による駆動力[N]
$drag$: 走行抵抗[N]
T_1	: エンジントルク[Nm]
T_2	: トルクコンバータタービン側トルク[Nm]
n_1	: エンジン回転数[rps]
n_2	: トルクコンバータタービン回転数[rps]
τ	: トルクコンバータトルク比特性
K_{tc}	: トルクコンバータトルク容量特性
$gear$: ギア比特性 (1速: 9.849792, 2速: 5.462672, 3速: 3.53800, 4速: 2.455972)
η	: 動力伝達係数 (1速・2速で0.90, 3速, 4速で0.93)
r_r	: タイヤの有効半径[m] (0.315)
α	: スロットル弁開度
α_{des}	: スロットル弁解開度目標値
b_p	: ブレーキ圧[kgf/cm ²]
b_{pdes}	: ブレーキ圧目標値[kgf/cm ²]
k_{br}	: ブレーキ圧と制動力の関係を表す比例係数 (140.22)
P	: プラント
$P_M(s)$: プラントモデル
$G_M(s)$: 規範モデル
T_m	: 規範モデルの一次遅れ時定数[s] (1.0)
$C(s)$: フィードバック補償機
$S(s)$: 閉ループの感度関数
w	: フィードバックゲイン (シミュレーション4.5, 実験4.5, 2.0)
$\Delta(s)$: プラントの乗法的不確かさ
$W(s)$: プラントの乗法的不確かさの重み関数
L	: プラントの乗法的不確かさの遅れ時間 (むだ時間)[s]

第5章 プラトーンを一力学系として扱った縦方向制御

この章では、プラトーンを一力学系として扱った制御系について検討する。プラトーン走行における車間距離の制御方式として、一定車間距離制御と一定車間時間制御が提案されている。車車間通信を利用しない車両レベルの制御のみでプラトーン走行を実現する場合、選択肢は一定車間時間制御に限られる。この理由は、第2章で説明したように、一定車間距離制御では、プラトーン先頭車の情報なしでストリングスタビリティを保証できないからである。しかし、一定車間時間制御は、一定車間距離制御に比べて実現できる交通容量が小さいことや、外乱により交通流が乱れた時に、交通流の回復に時間がかかる。このため、プラトーン走行には、車車間通信というコストをかけても、一定車間距離制御を適用するべきであるという考え方があり、本研究もこの考え方に従っている。本研究で提案する縦方向制御は、「プラトーン走行に車車間通信を利用するのであれば、通信情報を最大限に活用するべきである」という発想に基づいている。

従来提案されてきた縦方向制御は、制御車両前方の車間距離や前方車両との相対速度から制御入力を決するものが中心であった。すなわち、車両レベルの制御により、プラトーン走行を実現するものであった。しかし、車両への制御入力は前方車両との車間距離だけでなく、後方車両との車間距離、相対速度にも影響を与える。プラトーン走行の目的を車間距離維持のみに限定するならば、従来の提案されてきた制御で十分である。しかし、プラトーンのタスクとして、プラトーンの合流、離脱、交通状況に応じたプラトーン長の変化等を想定するならば、プラトーン内の各車間距離を必要に応じて個々に変化することが要求される。従来の制御では、プラトーンがこれらのタスクを見通し良く遂行できると言い難い。この章で提案する制御は、プラトーンを一力学系として扱い、プラトーン先頭車の速度と、プラトーン内の各車間距離を独立に制御するものである。この制御は、プラトーンが車間距離の維持のみならず車間距離の変化を必要とする様々なタスク遂行する見通しを良くするものであり、プラトーン走行の高度化に寄与するものであると考える。

この章における研究の流れは、図5.0.1のようになっている。以下の各節では、この流れに従い、プラトーンのモデル化、制御系の設計、制御系の評価結果についてそれぞれ説明する。

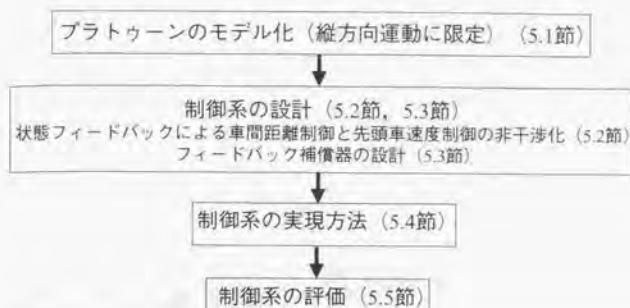


図 5.0.1 第 5 章の流れ

5.1 プラトウンのモデル化

この節では、縦方向制御の制御対象（プラント）モデルについて説明する。この章で説明する縦方向制御では、各車両に第 4 章で説明した制駆動力特性のモデルマッチング制御が動作していることを前提としている。モデルマッチング制御は、各車両の動特性を既知とするだけでなく、均一にするものである。各車両の動特性が既知であれば、動特性が異なってもプラトウンを一力学系としてモデル化することが可能である。しかし、プラトウンを構成する車両やその並び順によってプラトウンのモデルが異なるため、制御系の複雑化が余儀なくされ、制御の際に動特性を送受信する必要も生じる。本研究では、モデルマッチング制御により、動特性を既知のみならず、均一化することにより縦方向制御系の簡単化、一般化を実現している。

本研究では、図 5.1.1 に示すような i 台の車両により構成されるプラトウンを考える。各車両の目標加速度を入力として、先頭車の速度 (v_i) および各車間距離 (sp_n) を出力とするモデルは、図 5.1.2 のように表され、以下のような i 行 i 列の伝達関数行列で記述することができる。

$$\mathbf{G_p}(s) = \begin{bmatrix} G_v(s) & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -G_d(s) & G_d(s) & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -G_d(s) & G_d(s) & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & -G_d(s) & G_d(s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -G_d(s) & G_d(s) \end{bmatrix} \quad \dots (5.1.1)$$

ここで、

$$\begin{bmatrix} G_v(s) & G_d(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s(T_m s + 1)} & \frac{-1}{s^2(T_m s + 1)} \end{bmatrix} \quad \dots (5.1.2)$$

である。 T_m は、第 4 章の制駆動特性のモデルマッチング制御における一次遅れ特性の時定数である。式 (5.1.1) で、 $-G_d(s)$ が後方の車間距離に影響を及ぼす干渉項である。

たとえば、1番目の追従車が前方の車間距離 sp_1 を制御しようとして、加減速を行う場合、必然的に後方の車間距離 sp_2 に影響をおよぼす。すなわち、1つの入力がある2つの車間距離に影響を及ぼしている（入出力が干渉している）。この影響は、この個々の車間距離を必要に応じて独立に変化させることを困難にするだけでなく、車間距離誤差の影響が後続車への伝搬する原因となっている。

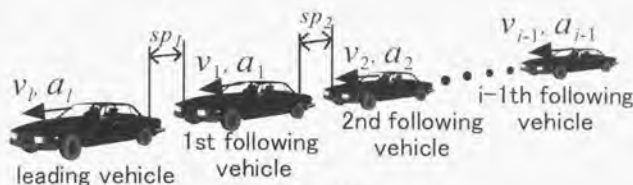


図5.1.1 プラトウーン

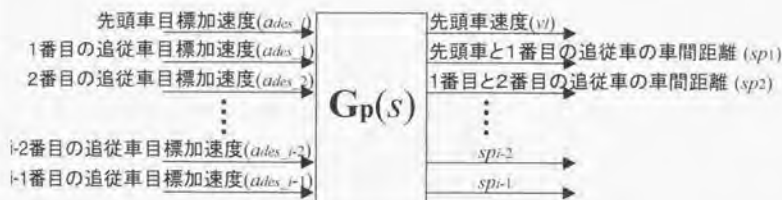


図5.1.2 プラトウーンにおける入出力

5.2 状態フィードバックによる車間距離制御と先頭車速度制御の非干渉化

この節では、第5.1節で示した干渉項を取り除く（非干渉化[184]）ための状態フィードバック制御について説明する。この状態フィードバック制御は、非干渉化により先頭車速度と各車間距離を独立に制御することを目的としている。

本研究では、非干渉化を図5.2.1に示す状態フィードバック制御によって実現する。図中のA, B, Cは、 $G_p(s)$ の状態空間表現であり、以下のように表したものである。

$$G_p(s) = C(sI - A)^{-1}B \quad \dots\dots\dots (5.2.1)$$

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \dots\dots\dots (5.2.2)$$

$$y = Cx \quad \dots\dots\dots (5.2.3)$$

ここで

$$x = [v_1, a_1, sp_1, \dot{sp}_1, a_2, \dots, sp_{i-1}, \dot{sp}_{i-1}, a_{i-1}]^T \quad \dots\dots\dots (5.2.4)$$

$$u = [a_{des,1}, a_{des,2}, \dots, a_{des,i-1}]^T \quad \dots\dots\dots (5.2.5)$$

I は単位行列である。各状態変数は以下の通りである。

v : 先頭車速度, a_1 : 先頭車加速度, sp_n : $n-1$ 番目の追従車と n 番目の追従車の車間距離, a_n : n 番目の追従車の加速度, $a_{des,1}$: 先頭車の目標加速度, $a_{des,n}$: n 番目の追従車の目標加速度

A, B, C はそれぞれ $3i-1 \times 3i-1$ 行列, $3i-1 \times i$ 行列, $i \times 3i-1$ 行列となり, 次のように書ける。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_m} & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_m} & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & \ddots & & \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -\frac{1}{T_m} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5.2.6)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{1}{T_m} & 0 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_m} & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_m} & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{T_m} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5.2.7)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & \ddots & & \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5.2.8)$$

このシステム対して, 適切なゲイン K_1 およびフィードバックゲインを K を決定することにより, 閉ループの伝達関数 $G_{pd}(s)$ を対角伝達関数行列にすれば, 非干渉化を実現

することができる。すなわち以下の式のようにできればよい。

$$\mathbf{G}_{pd}(s) = \mathbf{C} \{ \mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{BK}) \}^{-1} \mathbf{BK}_1 = \text{diag} \{ f_i(s) \} \quad \dots\dots\dots (5.2.9)$$

これは、入出力の関係を図5.2.2のようにすることである。本研究では、入力を先頭車目標速度および各車間距離の目標値とし、出力を先頭車速度および各車間距離として、閉ループを以下のような高次遅れ伝達関数を含む対角伝達関数行列となるように、 \mathbf{K}_1 , \mathbf{K} を決定する。高次遅れ伝達関数の次数は、 $\mathbf{G}_p(s)$ の対角要素の次数と等しいものとしている。

$$\mathbf{G}_{pd}(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{(T_f s + 1)^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{(T_f s + 1)^2} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{(T_f s + 1)^2} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5.2.10)$$

$\mathbf{G}_{pd}(s)$ を実現する、 \mathbf{K}_1 および \mathbf{K} は、文献[183]に説明されている手法により、以下のよう決定することができる。非干渉化可能条件は、次の非干渉化行列 \mathbf{D} が正則となることである。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 \mathbf{A}^{d_1-1} \mathbf{B} \\ \mathbf{c}_2 \mathbf{A}^{d_2-1} \mathbf{B} \\ \vdots \\ \mathbf{c}_{l-1} \mathbf{A}^{d_{l-1}-1} \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5.2.11)$$

ここで、 \mathbf{c}_i は、 \mathbf{C} をサブシステムに分離したものであり、 \mathbf{C} の各行に相当する。また、 d_i は、システムの相対次数に相当し以下の式で与えられる。

$$d_i = \min \{ k : \mathbf{c}_i \mathbf{A}^{k-1} \mathbf{B} \neq 0 \} \quad \dots\dots\dots (5.2.12)$$

\mathbf{D} を計算すると

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_m} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_m} & -1 & & & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_m} & \frac{1}{T_m} & -1 & & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_m} & \frac{1}{T_m} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{T_m} & -1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5.2.13)$$

となり、この行列は正則であるため、非干渉化が可能である。この \mathbf{D} を用いて、 \mathbf{K} は以下の式で与えられる。

$$\mathbf{K} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{N}_0 \quad \dots\dots\dots (5.2.14)$$

ここで、 \mathbf{N}_0 は以下の式で与えられる。

$$\mathbf{N}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_i \phi_i(\mathbf{A}) \\ \mathbf{c}_j \phi_j(\mathbf{A}) \\ \vdots \\ \mathbf{c}_{i-1} \phi_i(\mathbf{A}) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5.2.15)$$

ϕ_i, ϕ_j はシステムの相対次数 n_i と同じ次数を持つ任意の安定多項式であり、非干渉化されたシステムの対角要素を決定するものである。上式では、 ϕ_i が先頭車の速度制御を決定する部分であり、 ϕ_j が各車間距離制御に相当する部分である。非干渉化されたシステムが式(5.2.10)を実現するためには、

$$\frac{\phi_i(0)}{\phi_i(s)} = \frac{1}{(T_i s + 1)^2} \quad \dots\dots\dots (5.2.16)$$

$$\frac{\phi_j(0)}{\phi_j(s)} = \frac{1}{(T_j s + 1)^3} \quad \dots\dots\dots (5.2.17)$$

となるように ϕ_i, ϕ_j を決定すればよい。
すなわち、

$$\phi_i(\mathbf{A}) = \left(\mathbf{A} + \frac{1}{T_i} \mathbf{I} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (5.2.18)$$

$$\phi_j(\mathbf{A}) = \left(\mathbf{A} + \frac{1}{T_j} \mathbf{I} \right)^3 \quad \dots\dots\dots (5.2.19)$$

以上により \mathbf{K} は以下の式で与えることができる。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ k_1 & k_3 & k_4 & k_5 & k_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ k_1 & k_3 & k_4 & k_5 & 0 & k_4 & k_5 & k_6 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ k_1 & k_3 & k_4 & k_5 & 0 & k_4 & k_5 & 0 & k_4 & k_5 & k_6 & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & & & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ k_1 & k_3 & k_4 & k_5 & 0 & k_4 & k_5 & 0 & k_4 & k_5 & 0 & \dots & k_4 & k_5 & k_6 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5.2.20)$$

ここで、

$$k_1 = \frac{T_m}{T_i^2} \quad \dots\dots\dots (5.2.21)$$

$$k_2 = \frac{2T_m - T_i}{T_i} \quad \dots\dots\dots (5.2.22)$$

$$k_3 = \frac{2T_m T_j - 3T_m T_i}{T_i \cdot T_j} \quad \dots\dots\dots (5.2.23)$$

$$k_4 = \frac{-T_m}{T_j^3} \quad \dots\dots\dots (5.2.24)$$

$$k_5 = \frac{-3T_m}{T_f^2} \quad \dots\dots\dots (5.2.25)$$

$$k_6 = \frac{3T_m - T_f}{T_f} \quad \dots\dots\dots (5.2.26)$$

である。また、 \mathbf{K}_1 は以下の式で与えられる。

$$\mathbf{K}_1 = \mathbf{D}^{-1} \Phi_0 \quad \dots\dots\dots (5.2.27)$$

ここで、

$$\Phi_0 = \text{diag}\{\phi_i(0)\} \quad \dots\dots\dots (5.2.28)$$

である。

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} k_7 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ k_7 & k_8 & 0 & 0 & & 0 \\ k_7 & k_8 & k_8 & 0 & & 0 \\ k_7 & k_8 & k_8 & k_8 & & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ k_7 & k_8 & k_8 & k_8 & \dots & k_8 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5.2.29)$$

ここで、

$$k_7 = \frac{T_m}{T_f^2} \quad \dots\dots\dots (5.2.30)$$

$$k_8 = \frac{-T_m}{T_f^3} \quad \dots\dots\dots (5.2.31)$$

である。以上の手順により算出した \mathbf{K} および \mathbf{K}_1 により、プラトウーンの非干渉化が実現できる。すなわち、先頭車の速度、あるいは各車間距離の目標値を与えれば、 $\text{Gra}(s)$ の応答特性（先頭車の速度制御では二次の遅れ伝達関数、車間距離制御では三次の遅れ伝達関数特性）に従って目標値に漸近する。その際、別の個所の車間距離や先頭車の速度に全く影響を与えない。しかし、この状態フィードバック制御は、プラトウーンのモデルとして式(5.1.1)を前提として設計されているため、プラトウーンのモデルが式(5.1.1)と異なる場合は、非干渉化が実現できないばかりか、最悪の場合プラトウーン内車両間の衝突を招く可能性がある。すなわち、この状態フィードバックは、モデルを仮定したフィードフォワード制御と考えて良い。プラトウーンのモデルが式(5.1.1)と異なる条件として、モデルマッチング制御が正常に作動していないことや、外乱、車車間通信の遅れ等を挙げることができる。このような影響による制御性能の低下を抑制するためには、フィードバック補償を行えば良い。次節では、フィードバック補償器の設計について説明する。

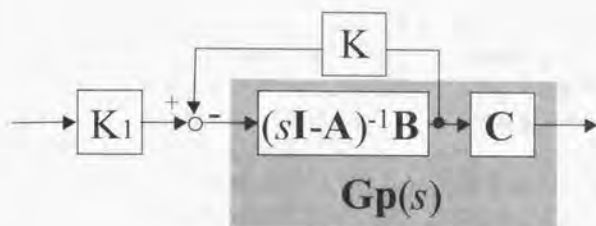


図 5.2.1 状態フィードバックによる非干渉化

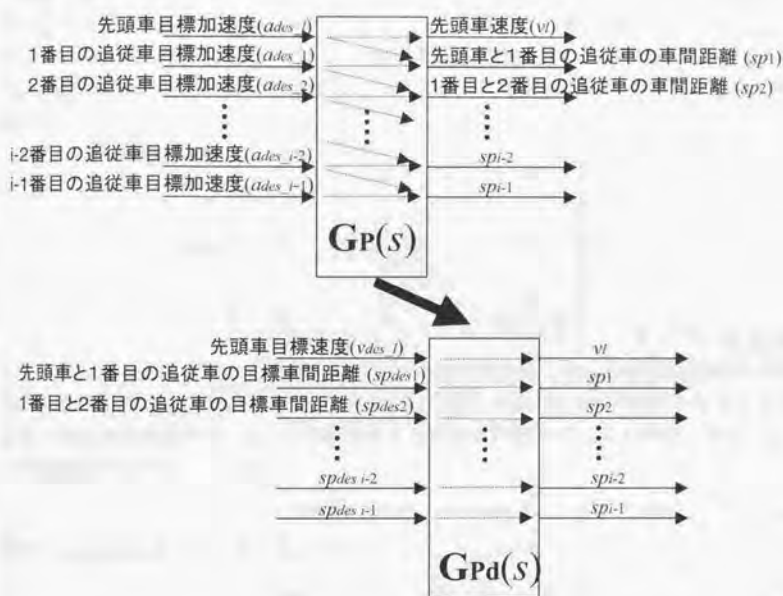


図 5.2.1 入出力の非干渉化

5.3 フィードバック補償器の設計

この節では、モデルマッチング制御の不完全さ、通信遅れ、外乱の影響下においても所望の制御性能を実現するためのフィードバック補償器について説明する。第5.2節で説明した状態フィードバック制御は、プラトウーンのモデルとして式(5.1.1)を仮定したフィードフォワード制御と考えて良い。この場合、モデルマッチング制御の不完

全さ、通信遅れ、外乱の影響によりプラトウーンのモデルが式(5.1.1)と異なる場合は、非干渉化が実現できないばかりか、最悪の場合プラトウーン内車両間の衝突を招く可能性がある。この節で設計するフィードバック補償器は、このような影響による制御性能の低下の抑制を目的としている。以下にフィードバック補償器の設計手順について説明する。

本研究では、フィードバック制御は図5.3.1のように付加する。この図において、 $G_{pd}(s)$ は、非干渉化されたシステムの規範応答である。すなわち、式(5.2.10)である。 $C_p(s)$ はフィードバック補償器であり、実際の応答と規範応答の差異を補償する。

$C_p(s)$ の決定方法について説明する。本研究では $C_p(s)$ を閉ループの外乱に対する感度関数に基づき決定している。入力信号($G_{pd}(s)$ からの応答)は高次遅れ伝達関数特性をもつので、閉ループの外乱に対する感度(感度関数)は低周波数領域で小さくなればよい。また、ある車両への外乱が、他の車両の制御出力に影響を及ぼさないためには、感度関数が対角行列の伝達関数行列になることが要求される。そこで感度関数 $S(s)$ を

$$S(s) = \begin{bmatrix} \frac{s^2}{(s+w_l)^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{s^3}{(s+w_f)^3} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{s^3}{(s+w_f)^3} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5.3.1)$$

として決定する。ここで、先頭車の速度制御の感度関数を二次、車両距離制御における感度関数を三次とすることにより、結果として導かれる $C_p(s)$ が積分器を持つことできる。 $C_p(s)$ が積分器を持てば、定常的誤差を効果的に抑制することが可能となる。 w_l , w_f は調整用のパラメータである。

$$S(s) = \{I + G_F(s) \cdot C_p(s)\}^{-1} \quad \dots\dots\dots (5.3.2)$$

より、 $C_p(s)$ は以下のように一意に定まる。

$$C_p(s) = \begin{bmatrix} C_l(s) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ C_l(s) & C_f(s) & 0 & & 0 \\ C_l(s) & C_f(s) & C_f(s) & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ C_l(s) & C_f(s) & C_f(s) & \cdots & C_f(s) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5.3.3)$$

ここで、

$$C_l(s) = \frac{k_{c1}s^2 + k_{c2}s + k_{c3}}{s} \quad \dots\dots\dots (5.3.4)$$

$$C_f(s) = \frac{k_{c4}s^3 + k_{c5}s^2 + k_{c6}s + k_{c7}}{s} \quad \dots\dots\dots (5.3.5)$$

$$k_{c1} = 2T_m w_l \quad \dots\dots\dots (5.3.6)$$

$$k_{c3} = T_m w_f^2 + 2w_f \quad \dots\dots\dots (5.3.7)$$

$$k_{c3} = w_f^2 \quad \dots\dots\dots (5.3.8)$$

$$k_{c4} = -3T_m w_f \quad \dots\dots\dots (5.3.9)$$

$$k_{c5} = -3T_m w_f^2 - 3w_f \quad \dots\dots\dots (5.3.10)$$

$$k_{c6} = -T_m w_f^3 - 3w_f^2 \quad \dots\dots\dots (5.3.11)$$

$$k_{c7} = -w_f^3 \quad \dots\dots\dots (5.3.12)$$

$C_p(s)$ はプロパーな補償器になっていないが、本研究では、各車両の速度、加速度の計測を想定しているので、 $C_p(s)$ が上記の形をしていても差し支えない。 w_f , w_f の値は、閉ループのロバスト安定性を調整するものであり、 w_f , w_f が小さいほど、ロバスト安定性が向上するが、外乱の抑制特性が劣化する。プラトーンモデルの不確かさが定式化できる場合は、その不確かさに対してロバスト安定化できるように、 w_f , w_f を調整することができる。しかし、プラトーンモデルの不確かさを定式化することは困難である。そこで本研究では、シミュレーションによって試行錯誤的に調整することで、 $w_f=3.8$, $w_f=3.8$ として決定した。

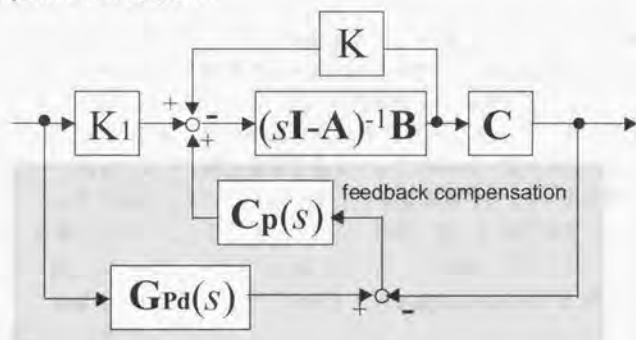


図 5.3.1 フィードバック補償器の付加

5.4 制御の実現方法

この節では、第5.2節、第5.3節で説明した制御を具体的にプラトーン走行で実現するための手法を説明する。この制御を実現するためには2つの方法が考えられる。1つは、プラトーンの中の1台の車両がプラトーンの中の全ての車両の情報を収集し、各車両の目標加速度を決定するものである。たとえばプラトーン先頭車が、各車両の目標加速度を決定する場合、先頭車の判断で、自由にプラトーン内車両距離

が変更できるので、交通の要求に応じて容易にブラトウーン挙動が制御できることになる。もう1つの方法は、ブラトウーン内の全ての車両がお互いの情報を共有し、自分の目標加速度を決定するものである。この場合、車間距離を変更する際に、全ての車両のコンセンサスが必要となり、挙動を自由に制御する融通に欠けるが、各車両の自律性が維持される。どちらの方式を採用する場合においても、車車間通信のプロセスが異なるだけで、目標車距離と、先頭車目標速度を実現するための目標加速度を決定する手順は全く同じものとなる。

5.4.1 目標加速度の算出

この項では、各車両の加速度の算出方法説明する。 i 台の車両により構成されるブラトウーンについて説明する、各車両の目標加速度の決定するために必要な情報は、以下の通りである。

- ・各車両の車間距離 ($sp_i \sim sp_i$)
- ・各車両の速度 ($v_i, v_i \sim v_i$)
- ・各車両の加速度 ($a_i, a_i \sim a_i$)
- ・先頭車目標速度 ($v_{dex,i}$)
- ・各車両の目標車間距離 ($sp_{dex,i} \sim sp_{dex,i}$)

上記第1～3項は、車車間通信により獲得することを想定している、上記第4項、第5項については、各車両の目標加速度を決定する車両（本研究では先頭車）が交通状況に応じて決定するものとしている。これらの情報を利用すれば、状態フィードバックによる非干渉化を実現するための目標加速度を決定することができる。また、フィードバック補償による目標加速度を算出するためには、図5.3.1の $Gpd(s)$ に対する誤差信号が必要である。ここで、 $Gpd(s)$ からの規範応答は、 $Gpd(s)$ を制御周期で離散化して逐次演算を行うことにより算出できる。規範応答（先頭車速度および各車間距離）を $v_{Gpd,i}, sp_{Gpd,i}, \dots, sp_{Gpd,i-1}$ として定義する。式 (5.2.20～26), (5.2.29～31), 式 (5.3.3～12) を用いて先頭車および1番目および2番目の追従車の目標加速度は以下のように算出される。

$$a_{dex,i} = k_1 v_{dex,i} - (k_1 v_i + k_2 a_i) + \left\{ k_{c1} (\ddot{v}_{Gpd,i} - a_i) + k_{c2} (v_{Gpd,i} - v_i) + k_{c3} \int (v_{Gpd,i} - v_i) dt \right\} \dots\dots\dots (5.4.1)$$

$$\begin{aligned} a_{dex,i} = & (k_1 v_{dex,i} + k_2 sp_{dex,i}) - (k_1 v_i + k_3 a_i + k_4 sp_i + k_5 v_i + k_6 a_i) \\ & + \left\{ k_{c1} (\ddot{v}_{Gpd,i} - a_i) + k_{c2} (v_{Gpd,i} - v_i) + k_{c3} \int (v_{Gpd,i} - v_i) dt \right. \\ & \left. + k_{c4} (\ddot{sp}_{Gpd,i} - a_i + a_i) + k_{c5} (\dot{sp}_{Gpd,i} - v_i + v_i) + k_{c6} (sp_{Gpd,i} - sp_i) + k_{c7} \int (sp_{Gpd,i} - sp_i) dt \right\} \dots\dots\dots (5.4.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{des,2} = & (k_7 v_{des,1} + k_8 s p_{des,1} + k_8 s p_{des,2}) - (k_1 v_1 + k_2 a_1 + k_4 s p_1 + k_5 v_1 + k_3 s p_2 + k_5 v_2 + k_6 a_2) \\
& + \left\{ k_{c1} (\dot{v}_{cpd,1} - a_1) + k_{c2} (v_{cpd,1} - v_1) + k_{c3} \int (v_{cpd,1} - v_1) dt \right. \\
& + k_{c4} (s \ddot{p}_{cpd,1} - a_1 + a_1) + k_{c5} (s \dot{p}_{cpd,1} - v_1 + v_1) + k_{c6} (s p_{cpd,1} - s p_1) + k_{c7} \int (s p_{cpd,1} - s p_1) dt \\
& \left. + k_{c8} (s \ddot{p}_{cpd,2} - a_1 + a_2) + k_{c9} (s \dot{p}_{cpd,2} - v_1 + v_2) + k_{c10} (s p_{cpd,2} - s p_2) + k_{c11} \int (s p_{cpd,2} - s p_2) dt \right\} \\
& \dots\dots\dots (5.4.3)
\end{aligned}$$

となる。ここで、各係数は、式 (5.2.21) ~ (5.2.26)、式 (5.2.30) ~ (5.2.31) および式 (5.3.6) ~ (5.3.12) に示されるものである。上式を見てわかるように、プラトーン内の後続車に行くに従い目標加速度の算出が煩雑になる。ここで、式 (5.2.20)、式 (5.2.29) および式 (5.3.3) を見ると、各行列が周期的な要素を持つ、下三角行列となっている。このことに着目すると、1番目と2番目の追従車の目標加速度を以下のように漸化式的に算出できる。

$$\begin{aligned}
a_{des,1} = & a_{des,1} + k_8 s p_{des,1} - \{ (k_3 - k_2) a_1 + k_4 s p_1 + k_5 v_1 + k_6 a_1 \} \\
& + \left\{ k_{c4} (s \ddot{p}_{cpd,1} - a_1 + a_1) + k_{c5} (s \dot{p}_{cpd,1} - v_1 + v_1) + k_{c6} (s p_{cpd,1} - s p_1) + k_{c7} \int (s p_{cpd,1} - s p_1) dt \right\} \\
& \dots\dots\dots (5.4.4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{des,2} = & a_{des,1} + k_8 s p_{des,2} - (-k_6 a_1 + k_4 s p_2 + k_5 v_2 + k_6 a_2) \\
& + \left\{ k_{c4} (s \ddot{p}_{cpd,2} - a_1 + a_2) + k_{c5} (s \dot{p}_{cpd,2} - v_1 + v_2) + k_{c6} (s p_{cpd,2} - s p_2) + k_{c7} \int (s p_{cpd,2} - s p_2) dt \right\} \\
& \dots\dots\dots (5.4.5)
\end{aligned}$$

これを一般化すると、先頭車については、

$$\begin{aligned}
a_{des,n} = & k_7 v_{des,1} - (k_1 v_1 + k_2 a_1) + \left\{ k_{c1} (\dot{v}_{cpd,1} - a_1) + k_{c2} (v_{cpd,1} - v_1) + k_{c3} \int (v_{cpd,1} - v_1) dt \right\} \\
& \dots\dots\dots (5.4.6)
\end{aligned}$$

1番目の追従車については、

$$\begin{aligned}
a_{des,1} = & a_{des,1} + k_8 s p_{des,1} - \{ (k_3 - k_2) a_1 + k_4 s p_1 + k_5 v_1 + k_6 a_1 \} \\
& + \left\{ k_{c4} (s \ddot{p}_{cpd,1} - a_1 + a_1) + k_{c5} (s \dot{p}_{cpd,1} - v_1 + v_1) + k_{c6} (s p_{cpd,1} - s p_1) + k_{c7} \int (s p_{cpd,1} - s p_1) dt \right\} \\
& \dots\dots\dots (5.4.7)
\end{aligned}$$

2番目以降の追従車については、

$$\begin{aligned}
a_{des,n} = & a_{des,n-1} + k_8 s p_{des,n} - (-k_6 a_{n-1} + k_4 s p_n + k_5 v_n + k_6 a_n) \\
& + \left\{ k_{c4} (s \ddot{p}_{cpd,n} - a_{n-1} + a_n) + k_{c5} (s \dot{p}_{cpd,n} - v_{n-1} + v_n) + k_{c6} (s p_{cpd,n} - s p_n) + k_{c7} \int (s p_{cpd,n} - s p_n) dt \right\} \\
& \dots\dots\dots (5.4.8)
\end{aligned}$$

として目標加速度を算出することができる。これにより、プラトーン内の車両構成台数によって制御系を再構築することなく、追従車の目標加速度を決定することができる。

5.4.2 加速度の制限

この項では、加速度の制限について説明する。一般に縦方向制御では、車両に加速度を発生させる場合、設定した上限値（加速時）以上あるいは下限値（減速時）以下の加速度を発生しないように制御する。これを実現する最も簡単な方法は、加速度目標値に制限をつけることである。本研究の場合は、先頭車の目標加速度を決定してから、制限値を越える場合は制限値の加速度を修正し、1番目の追従車の加速度を式(5.4.6)により決定する。同様にそれが制限値を越える場合は制限値の加速度を修正し、2番目の追従車の加速度を決定するという手順を繰り返せばよい。もちろん、この場合、フィードバック補償器における規範応答も加速度の修正を加味した応答を算出する必要がある。しかし、このように加速度に制限をつけても、先頭車の速度や車間距離を大きく変化させる状況においては、制限値での加速が継続し、プラトーン内での相対速度が大きくなる可能性がある。この解決法として、本研究では、先頭車目標速度および目標車間距離に対して図5.4.1のFの部分にフィルタを導入する。このフィルタの目的は、現在の先頭車速度や車間距離から大きく異なる値を制御系の目標値として与えないことである。ここで、フィルタからの出力を v_{des_ff} , sp_{des_ff} とすると、

$$v_{des_ff} = v_{des_l} \quad (th_{v_min} \leq v_{des_l} - v_l \leq th_{v_max} \text{ の場合}) \dots\dots\dots (5.4.9)$$

$$v_{des_ff} = v_l + th_{v_max} \quad (v_{des_l} - v_l > th_{v_max} \text{ の場合}) \dots\dots\dots (5.4.10)$$

$$v_{des_ff} = v_l + th_{v_min} \quad (v_{des_l} - v_l < th_{v_min} \text{ の場合}) \dots\dots\dots (5.4.11)$$

ここで、しきい値 th_{v_max} , th_{v_min} については、

$$th_{v_min} < 0 < th_{v_max} \dots\dots\dots (5.4.12)$$

である。

$$sp_{des_ff} = sp_{des_s} \quad (th_{sp_min} \leq sp_{des_s} - sp_s \leq th_{sp_max} \text{ の場合}) \dots\dots\dots (5.4.13)$$

$$sp_{des_ff} = sp_s + th_{sp_max} \quad (sp_{des_s} - sp_s > th_{sp_max} \text{ の場合}) \dots\dots\dots (5.4.14)$$

$$sp_{des_ff} = sp_s + th_{sp_min} \quad (sp_{des_s} - sp_s < th_{sp_min} \text{ の場合}) \dots\dots\dots (5.4.15)$$

ここで、しきい値 th_{sp_max} , th_{sp_min} については、

$$th_{sp_min} < 0 < th_{sp_max} \dots\dots\dots (5.4.16)$$

である。制御系における先頭車目標速度、目標車間距離にそれぞれ v_{des_ff} , sp_{des_ff} を使用することにより、先頭車の速度変化時や、車間距離変化時の車両挙動を安定化と加速度の制限を両立できる。たとえば、先頭車が10[m/s]で走行している時に先頭車の目標速度を20[m/s]にした場合、フィルタを使用しなければ、制御系に v_{des_l} として、20が代入され、先頭車に大きな加速度が発生する。ここで、先頭車の最大加速度を a_{lim} に制限する場合、式より

$$th_{v_max} = \frac{1+k_2}{k_1} a_{lim} \dots\dots\dots (5.4.17)$$

として、フィルタの出力を速度目標値として使用すると最大加速度 a_{lim} 以下で、 $20[m/s]$ に加速することができる。たとえば、 $th_{v_max}=3.1$ とする場合、先頭車の速度が $10[m/s]$ の時に制御系に代入される目標速度は $13.1[m/s]$ となり、先頭車の速度が $15[m/s]$ の時に制御系に代入される目標速度は $18.1[m/s]$ となる。また、先頭車の速度が $18[m/s]$ の時に制御系に代入される目標速度は $20[m/s]$ となる。

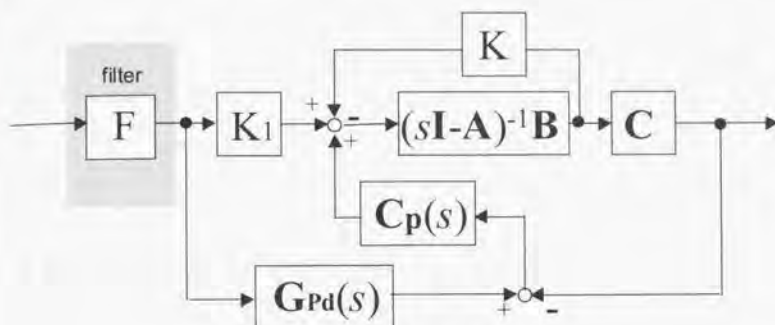


図 5.4.1 加速度制限フィルタ

5.4.3 先頭車の車間距離制御との組み合わせ

プラトーン走行を行う場合、プラトーン先頭車は、前方にプラトーンあるいは単体車両が存在する場合、それらとの車間距離を維持する必要がある。この場合、先頭車の車間距離制御方式として、本研究では、一定車間時間制御を採用する。この理由は、本研究でプラトーン間あるいはプラトーン-単体車両間の密な車間通信を想定していないためである。本研究では、一定車間時間制御として、以下の式で示される簡単な PD 制御系を使用している。

$$a_{des,i} = k_d(v_p - v_i) + k_p(sp_i - hv_i - L_m) \quad \dots\dots\dots (5.4.18)$$

ここで、 k_d, k_p はそれぞれ、微分ゲイン、比例ゲインであり、 v_p は前方走行車速度、 sp_i は先頭車と前方車両との車間距離、 h は車間時間、 L_m は最低車間距離である。この場合、ストリングスタビリティを保証するためのゲイン条件として、以下を満たすものとしている [30]。

$$\begin{cases} k_d + hk_p \leq \frac{1}{2T_m} \\ 2hk_d + h^2k_p > 2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5.4.19)$$

または、

$$\left\{ \begin{array}{l} k_d + h k_p \geq \frac{1}{2T_m} \\ \left(k_d - \frac{1}{2T_m} \right)^2 < \left(\frac{h}{T_m} - 2 \right) k_p \end{array} \right. \quad \dots\dots\dots (5.4.20)$$

先頭車が速度制御ではなく、車間距離制御を行う以上、追従車の目標加速度も先行車の車間距離制御に応じたものにする必要がある。先頭車が車間距離制御を行う場合の各車両の目標加速度は以下になる。先頭車については、

$$a_{dev,1} = k_d(v_p - v_1) + k_p(sp_1 - hv_1 - L_m) \quad \dots\dots\dots (5.4.21)$$

1 番目の追従車については、

$$\begin{aligned} a_{dev,1} = & a_{dev,1} + k_8 sp_{dev,1} - \{ (k_1 - k_2) a_1 + k_4 sp_1 + k_5 v_1 + k_6 a_1 \} \\ & + \left\{ k_{c4} (sp_{Cpl,1} - a_1 + a_1) + k_{c5} (sp_{Cpl,1} - v_1 + v_1) + k_{c6} (sp_{Cpl,1} - sp_1) + k_{c7} \int (sp_{Cpl,1} - sp_1) dt \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5.4.22)$$

2 番目以降の追従車については、

$$\begin{aligned} a_{dev,n} = & a_{dev,n-1} + k_8 sp_{dev,n} - \{ -k_6 a_{n-1} + k_4 sp_n + k_5 v_n + k_6 a_n \} \\ & + \left\{ k_{c4} (sp_{Cpl,n} - a_{n-1} + a_n) + k_{c5} (sp_{Cpl,n} - v_{n-1} + v_n) + k_{c6} (sp_{Cpl,n} - sp_n) + k_{c7} \int (sp_{Cpl,n} - sp_n) dt \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5.4.23)$$

となる。ここで、追従車の目標加速度は、先頭車が速度制御を行っている場合と全く同じ式となる。漸化式的に各車両の目標加速度を算出する場合、追従車の目標加速度を決定する式の中に、先頭車の速度制御の変数(T_1)が現われない。そのため、先頭車の車間距離制御、速度制御に関わらず、同じ式を用いて追従車の目標加速度を決定できる。

5.4.4 最小加速度制御による車間距離変更と指定車両の加速度をゼロとした車間距離変更

本研究で提案する縦方向制御の特徴は、先頭車速度と各車両の車間距離を独立に制御できることである。ここで、先頭車の速度制御の自由度を別の制御に利用することにより、各車両加速度の二乗和を最小化したり、特定の車両の加速度をゼロとしたプラトウーン挙動を実現することが可能となる。この項では、プラトウーンの車間距離変更の際に、上記挙動を実現する手法を説明する。車間距離の変更は、プラトウーンを形成する際、プラトウーンに車両が合流する際、プラトウーンから車両が離脱する際、交通状況によって車間距離の変更を必要とする際に行われることを想定している。そこで、車間距離を変更する際に各車両の加速度の二乗和を最小化する方法と特定の車両の加速度をゼロとする方法について説明する。加速度の二乗和を最小化することにより、プラトウーン内車間距離の変更の際に全体としての乗り心地のよい状態を維持することができる。特定の車両の加速度をゼロとすることにより、たとえば、プラ

トウーン末尾車両の加速度をゼロにしてプラトウーン内車間距離の変更が実現できる。プラトウーン末尾車両の加速度をゼロにすることにより、後続のプラトウーンに影響を与えずに車間距離変更を実現できる。また、大型車などの、加減速に伴う燃料消費や排出ガスが多い車両の加速度をゼロとすることも可能である。

車間距離を変更する際に各車両の加速度の二乗和を最小化する場合や特定の車両の加速度をゼロとする場合、先頭車の速度制御はできない。\$i\$ 台の車両で構成されるプラトウーンは \$i\$ 個の入力を有する。そのため、独立に制御できる状態量は最大 \$i\$ 個となる。各車間距離を独立に制御する場合、\$i-1\$ 個の状態量を独立に制御することになるので、独立に制御できる状態量は残り 1 つとなる。よって、各車両の加速度の二乗和を最小化する場合や特定の車両の加速度をゼロとする場合は、この自由度を利用することになるので、先頭車の速度制御は不可能となる。よって、先頭車の速度制御を無視して、以下のように目標加速度を算出する。先頭車については、

$$a_{des,1} = 0 \quad \dots\dots\dots (5.4.24)$$

1 番目の追従車については、

$$\begin{aligned} a_{des,1} = & a_{des,i} + k_8 sp_{des,1} - \{(k_3 - k_2)a_i + k_4 sp_i + k_5 v_i + k_6 a_i\} \\ & + \{k_{14}(s\dot{p}_{cpd,i} - a_i + a_i) + k_{15}(s\dot{p}_{cpd,i} - v_i + v_i) + k_{16}(sp_{cpd,i} - sp_i) + k_{17} \int (sp_{cpd,i} - sp_i) dt\} \end{aligned}$$

$$\dots\dots\dots (5.4.25)$$

2 番目以降の追従車については、

$$\begin{aligned} a_{des,n} = & a_{des,n-1} + k_8 sp_{des,n} - (k_6 a_{n-1} + k_4 sp_n + k_5 v_n + k_6 a_n) \\ & + \{k_{14}(s\dot{p}_{cpd,n} - a_{n-1} + a_n) + k_{15}(s\dot{p}_{cpd,n} - v_{n-1} + v_n) + k_{16}(sp_{cpd,n} - sp_n) + k_{17} \int (sp_{cpd,n} - sp_n) dt\} \end{aligned}$$

$$\dots\dots\dots (5.4.26)$$

とする。次に加速度の二乗和を最小化する場合は、

$$\frac{d}{da_{sq}} \{ (a_{des,1} - a_{sq})^2 + (a_{des,2} - a_{sq})^2 + \dots + (a_{des,i-1} - a_{sq})^2 \} = 0 \quad \dots\dots\dots (5.4.27)$$

とする \$a_{sq}\$ を求め、各車両の目標加速度から、\$a_{sq}\$ を引いた値を目標加速度とすればよい。この場合 \$a_{sq}\$ は、

$$a_{sq} = \frac{a_{des,1} + a_{des,2} + \dots + a_{des,i-1}}{i} \quad \dots\dots\dots (5.4.28)$$

となる。特定の車両の加速度をゼロとする場合は、各車両の目標加速度から、その車両の目標加速度を引けば良い。たとえば、\$m\$ 番目の追従車の加速度を 0 とする場合は、\$a_{des,m}\$ を各車両の目標加速度から引けば良い。この際、各追従車のフィードバック補償器の項（係数が \$k_{c*}\$ の項）に関しては、全く変更を加えずに使用することができる。追従車のフィードバック補償器は、各車両の相対運動のみを扱っている。先行車の速度制御を行う場合、各車両の加速度の二乗和を最小化する場合、特定の車両の加速度をゼロとする場合のいずれにおいても各車両の相対運動は変化しないので、同じフィー

バック補償器を使用することができる。

5.4.5 車車間通信遅れの補償

本研究で提案する縦方向制御では、車両の状態量の車車間通信が必須であるが、隣接車車間通信を利用する場合、通信遅れの影響が制御性能の劣化を招く可能性がある。隣接車車間通信では、前後に隣接している車両の間で情報伝達を行う。この方式の通信は赤外線通信の利用等が可能である利点をもつが、非隣接車両の情報の伝達に遅れが生じる。すなわち、プラトーン先頭車の情報が、4番目の追従車に伝達されるまでに、3通信サイクル分の時間を要する。この影響を補償する手段として、第4章で説明したモデルマッチング制御を応用した、通信情報の補正方法を説明する。本研究で提案する縦方向制御を実現するために必要な情報は第5.4.1項で説明した通りである。車車間通信でこれらの情報を送信する際に、加速度の目標値 a_{des} を組み込む。モデルマッチング制御により、目標加速度と車両加速度の特性は、時定数 T_m (1.0[s]とする) の一次遅れ伝達関数特性となっていることに着目し、通信情報の補正を行う。この伝達関数の入力を r 、出力を y としてサンプリングタイム = 通信サイクル T_{com} (50[ms]とする) で、0次ホールドを仮定して離散時間系に変換すると、

$$y[n+1] = 0.9512y[n] + 0.0488r[n] \quad \dots\dots\dots (5.4.29)$$

となるので、情報伝達時に以下のように情報を補正する。

$$a_n(T+T_{com}) = 0.9512a_n(T) + 0.0488a_{des,n}(T) \quad \dots\dots\dots (5.4.30)$$

さらに後続車に送信する場合は、以下のように情報を補正する。

$$a_n(T+2T_{com}) = 0.9512a_n(T+T_{com}) + 0.0488a_{des,n}(T) \quad \dots\dots\dots (5.4.31)$$

速度、車間距離に関しては、以下のように情報を補正する。

$$v_n(T+T_{com}) = v_n(T) + a_n(T)T_{com} \quad \dots\dots\dots (5.4.32)$$

$$sp_n(T+T_{com}) = sp_n(T) + v_{n-1}(T)T_{com} + \frac{a_{n-1}(T)T_{com}^2}{2} - v_n(T)T_{com} - \frac{a_n(T)T_{com}^2}{2} \quad \dots (5.4.33)$$

表1、表2に、ある走行状態のある時間における各車両に伝達された先頭車の速度情報を示す。表1が補正をしなかった場合であり、表2が補正をした場合である。補正を行わない場合、 $time=32.150$ [s]の時の先頭車の速度は 10.563959 [m/s]であるが、この時4番目の追従車に伝達されている値は、 $time=32.000$ [s]の時の先頭車の速度である、 11.349641 [m/s]である。一方、補正を行った場合は、 10.559023 [m/s]となり、先頭車の速度に近い値となっている。すなわち、この補正が有効であることがわかる。

表1 車車間通信の遅れを補償しない場合に各車両に伝達された先頭車速度情報

time	leading vehicle	1st following vehicle	2nd following vehicle	3rd following vehicle	4th following vehicle
32.000	11.349641	11.349641	11.616657	11.88569	12.156737
32.050	11.084929	11.084929	11.349641	11.616657	11.88569
32.100	10.823419	10.823419	11.084929	11.349641	11.616657
32.150	10.563959	10.563959	10.823419	11.084929	11.349641
32.200	10.30533	10.30533	10.563959	10.823419	11.084929

表2 車車間通信の遅れを補償した場合に各車両に伝達された先頭車速度情報

time	leading vehicle	1st following vehicle	2nd following vehicle	3rd following vehicle	4th following vehicle
32.000	11.349641	11.349641	11.34806	11.346678	11.344885
32.050	11.084929	11.084929	11.084201	11.081288	11.07956
32.100	10.823419	10.823419	10.821225	10.820693	10.816251
32.150	10.563959	10.563959	10.563762	10.559601	10.559023
32.200	10.30533	10.30533	10.304646	10.306246	10.299957

5.5 シミュレーションによる評価

第5.2節および第5.3節で説明した制御系を評価するために、5台の車両によって構成されるプラトーン走行のシミュレーションを行った。第5.5.1項～第5.5.3項のシミュレーションでは、車両モデルとして第4.1節で説明した車両モデルに第4章で説明したモデルマッチング制御を組み込んだものを使用している。目標加速度の決定の方式としては、各車両が状態量を共有し、自車の車間距離を決定する方式を使用した。なお、第5.5.4項のシミュレーションは、モデルマッチング制御の不完全性や通信遅れの影響を評価するものであり、車両モデル、プラトーン構成車両台数、通信方式は、第5.5.1項～第5.5.3項のシミュレーションと異なったものとなっている。

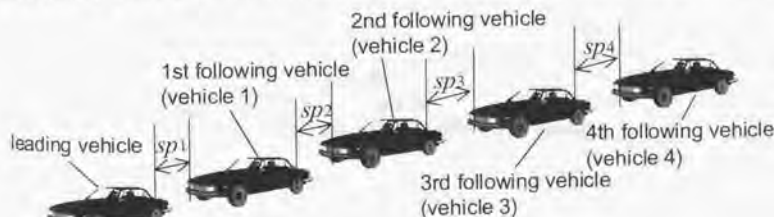


図5.5.1 5台の車両により構成されるプラトーン

5.5.1 非干渉化の確認1

この項では、車間距離制御における入出力の非干渉化を確認するためのシミュレーションを行う。5台の車両が速度20[m/s]、車間距離1[m]で走行し、以下の条件で車間距離を変化させる。

- ・シミュレーション開始5秒後に先頭車と1番目の追従車の車間距離(sp_1)の目標値を5[m]にする。
- ・シミュレーション開始15秒後に1番目と2番目の追従車の車間距離(sp_2)の目標値を5[m]にする。
- ・シミュレーション開始18秒後に1番目と2番目の追従車の車間距離(sp_3)の目標値を5[m]にする。
- ・シミュレーション開始20秒後に1番目と2番目の追従車の車間距離(sp_4)の目標値を5[m]にする。
- ・シミュレーション開始35秒後に全ての車間距離の目標値を1[m]にする。

図5.5.2にシミュレーションの結果を示す。比較として図5.5.3に非干渉化を考慮せずに設計したLQ制御による制御結果を示す。LQ制御による結果では、各車両が車間距離を大きくした場合、その車両の後続車の車間距離が小さくなり、かつ目標車間距離に対してオーバーシュートする傾向がある。一方、非干渉化されている場合は、各車両が、別の車両の車間距離制御の影響を受けることなく、車間距離を制御できている。また、車間距離目標値に対する応答も、設計した伝達関数特性を一致したものとなっている。シミュレーション開始35秒後で後続車の車間距離の変化に遅れがあるが、これは加速度目標値の最大値を1[m/s²]に制限していることに起因している。

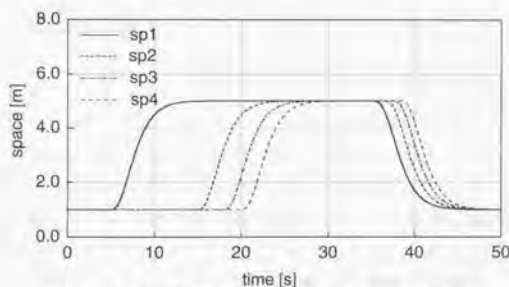


図5.5.2 車間距離変化の様子（提案する縦方向制御）

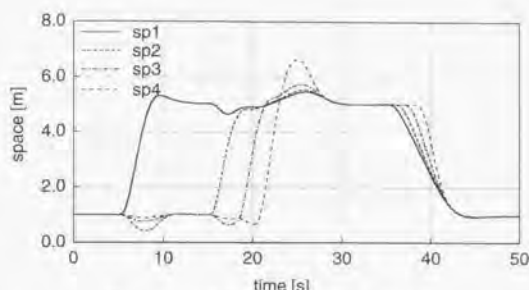


図 5.5.3 車間距離変化の様子 (LQ 制御)

5.5.2 非干渉化の確認 2

この項では、プラトーン挙動制御時における車間距離制御性能をシミュレーションで確認する。このシミュレーションでは、第 5.5.1 項のシミュレーションよりも車間距離の変化量を大きくし、先頭車の速度変化を伴う車間距離変化、各車両の加速度の二乗和を最小化する車間距離変化 (第 5.4.4 項参照)、プラトーン末尾車両の加速度をゼロとした車間距離変化 (第 5.4.4 項参照) を評価する。シミュレーション条件は以下の通りである。5 台の車両が速度 20[m/s]、車間距離 1[m] で走行し、以下の条件で車間距離を変化させる。

- ・シミュレーション開始 5 秒後に先頭車と 1 番目の追従車の車間距離 (sp_1) の目標値を 15[m] にする。
- ・シミュレーション開始 15 秒後に 1 番目と 2 番目の追従車の車間距離 (sp_2) 目標値目標値を 15[m] にする。
- ・シミュレーション開始 18 秒後に 1 番目と 2 番目の追従車の車間距離 (sp_3) 目標値を 15[m] にする。
- ・シミュレーション開始 20 秒後に 1 番目と 2 番目の追従車の車間距離 (sp_4) 目標値を 15[m] にする。
- ・シミュレーション開始 50 秒後に全ての車間距離の目標値を 5[m] にする。

また、加速度目標値の最大値および最小値は、それぞれ $1[\text{m/s}^2]$ 、 $-4[\text{m/s}^2]$ としている。また、加速度を制限するための先頭車目標速度および目標車間距離のフィルタしきい値 (第 5.4.2 項参照) はそれぞれ $th_{v_max}=3.1$ 、 $th_{v_min}=-3.1$ 、 $th_{sp_max}=4$ 、 $th_{sp_min}=4$ としている。上記条件を共通とし、以下のと異なる条件を加えた 4 種のシミュレーションを行う。

- シミュレーション 1: プラトーン先頭車の速度目標値を 20[m/s] (一定) とする。
- シミュレーション 2: プラトーン先頭車の速度目標値が $20+2\sin(t/2)$ [m/s] とする。
- シミュレーション 3: プラトーン先頭車の速度を制御せず、第 5.4.4 項の手法により各車両の加速度目標値の二乗和を最小化する。
- シミュレーション 4: プラトーン先頭車の速度を制御せず、第 5.4.4 項の手法によりプラトーンの末尾車両 (4 番目の追従車) の加速度を常にゼロにする。

図5.5.4～図5.5.11にシミュレーションの結果を示す。結果は、各シミュレーションにおける先頭車速度と各車間距離および各車両の加速度となっている。

図5.5.4、図5.5.5は、シミュレーション1の結果である。提案する縦方向制御では、非干渉化が可能であることは第5.5.1項のシミュレーションで確認済みである。このシミュレーションが、第5.5.1項のシミュレーションと異なる点は、車間距離の変化量が大きいことである。この場合、車間距離変化の応答特性は、加速度の制限があるため設計した高次遅れ伝達関数特性とはならない（直線的に変化する部分が存在する）。シミュレーションの結果から、加速度を制限しても、各車間距離が独立に制御できていることがわかる。すなわち、提案する縦方向制御では、加速度を制限と非干渉化が同時に実現できることがわかる。

図5.5.6、図5.5.7は、シミュレーション2の結果である。このシミュレーションではプラトーン先頭車の目標速度を正弦波状に変化させている。先頭車の速度が変化しても、車間距離は全く影響を受けないことがわかる。すなわち、先頭車の速度と車間距離を独立に制御できることがわかる。

図5.5.8、図5.5.9にシミュレーション3の結果を示す。このシミュレーションでは、第5.4.4項の手法を用いて車間距離変化に伴う各車両の加速度目標値の二乗和を最小化している。もちろんこの場合は、プラトーン先頭車の速度制御はできない。よって先頭車はプラトーン内の車間距離を大きくする場合は加速し、小さくする場合は減速するような挙動を示す。図5.5.9と図5.5.5と比較すると、このシミュレーションでは、加速度の絶対値がシミュレーション1の加速度の絶対値に比べて小さく抑えられていることがわかる。このシミュレーションにおける加速度の二乗和は、シミュレーション1における加速度の二乗和の40%になっている。

図5.5.10、図5.5.11にシミュレーション4の結果を示す。このシミュレーションでは、第5.4.4項の手法を用いてプラトーンの末尾車（4番目の追従車）の加速度を常にゼロにしている。この場合は、シミュレーション3同様、プラトーン先頭車の速度制御はできない。シミュレーション結果により、4番目の追従車の加速度が常にゼロを維持しながら、車間距離変化を実現できていることがわかる。

以上のシミュレーション結果により、車間距離の変化が大きい場合や先頭車速度が変化する場合においても、提案する縦方向制御で各車間距離を独立に制御できることがわかる。また、先頭車の速度制御の自由度を、加速度目標値の二乗和の最小化や特定の車両の加速度をゼロに保つことに転用できることを明らかにした。

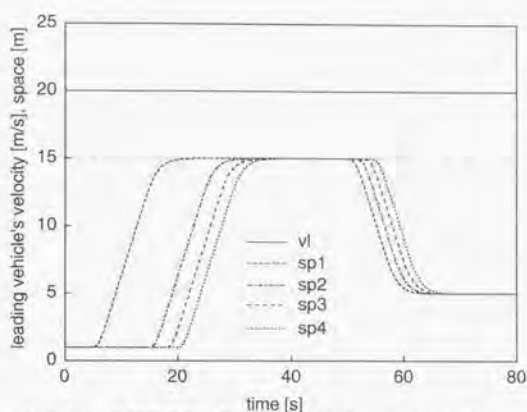


図 5.5.4 先頭車速度と各車間距離 (シミュレーション 1)

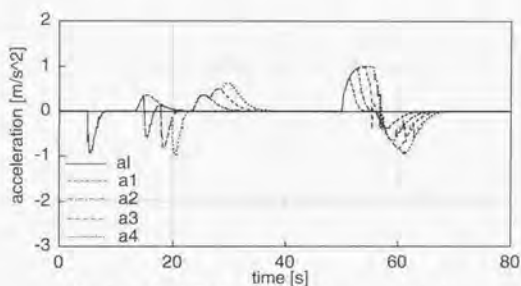


図 5.5.5 各車両の加速度 (シミュレーション 1)

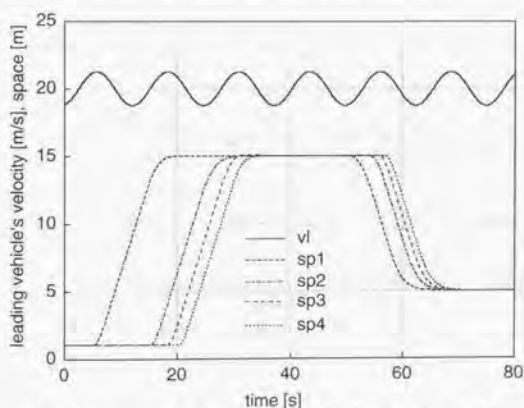


図 5.5.6 先頭車速度と各車間距離 (シミュレーション 2)

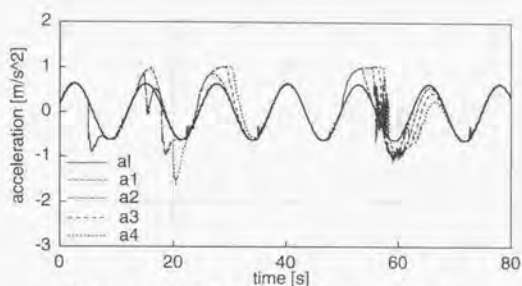


図 5.5.7 各車両の加速度 (シミュレーション 2)

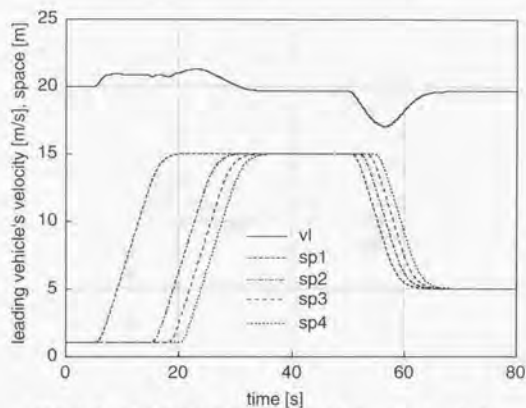


図 5.5.8 先頭車速度と各車間距離 (シミュレーション 3)

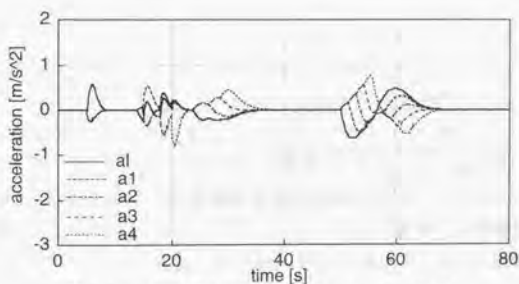


図 5.5.9 各車両の加速度 (シミュレーション 3)

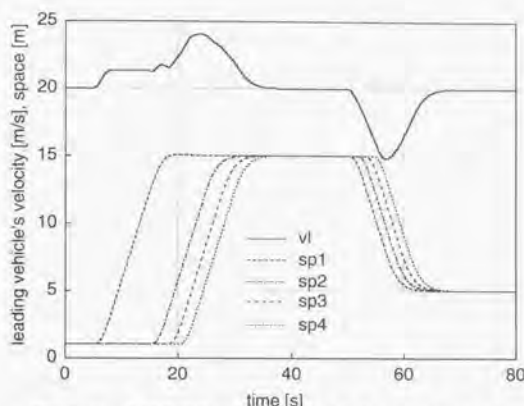


図 5.5.10 先頭車速度と各車間距離 (シミュレーション 4)

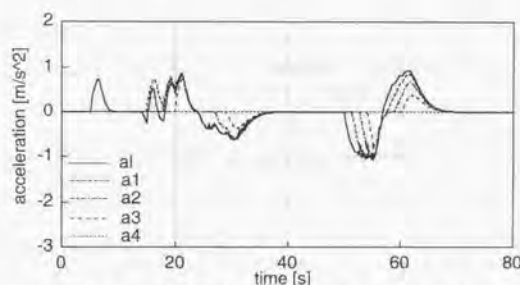


図 5.5.11 各車両の加速度 (シミュレーション 4)

5.5.3 フィードバック補償器の効果の確認

この項では、フィードバック補償器の効果の確認を目的として、モデルマッチングの不完全さや車車間通信遅れが存在する場合におけるシミュレーションを行う。シミュレーションの条件は以下の通りである。先頭車が目標速度 20[m/s] で走行し、シミュレーション開始 5 秒後に目標速度を 25[m/s] とする。20 秒後に目標速度目標速度を 15[m/s] とする。さらにに 35 秒後にに加速度 $-3\text{[m/s}^2\text{]}$ で制動を行い停止する。図 5.5.12 に先頭車の速度を示す。目標車間距離は 1[m] (一定) としている。先頭車の速度と各車間距離は、非干渉化されているので、この走行条件では車間距離誤差が常に 0 となることが予想できる。よって以下の条件を付け加えることにより、フィードバック補償器の効果を確認する。

- ・通信遅れあり (但し第 5.4.5 項で説明した通信情報の補正は行う)

- ・2 番目の追従車に第 4 章のモデルマッチング制御が働かない

ここで、通信遅れとは、車車間通信の範囲を隣接車両のみに限定し、各車両が隣接す

る車両に情報を伝達する際に50[ms]要するものとしている、この場合、4番目の追従車の状態量の情報が先頭車に伝達されるまでに、200[ms]を要する。

図5.5.13にシミュレーション結果を示す。比較のため、フィードバック補償を行わなかった場合の結果を図5.5.14に示す。結果は車間距離の目標車間距離に対する誤差で示されている。シミュレーション結果から、フィードバック補償を行わない場合は、大きな追従誤差が発生するが、フィードバック補償を行うことで追従誤差の増大を抑えられることがわかる。

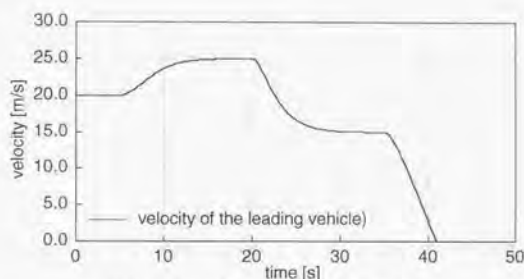


図 5.5.12 プラトーン先頭車の速度

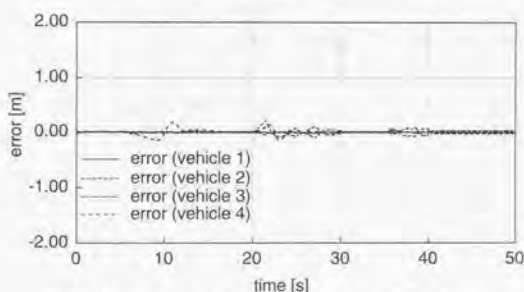


図 5.5.13 車間距離誤差 (フィードバック補償器あり)

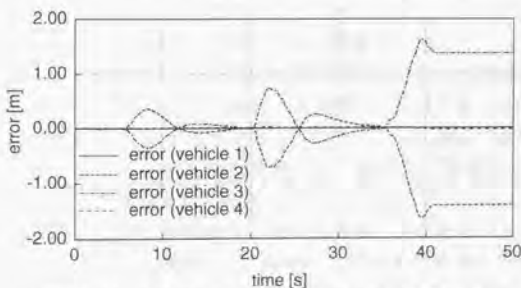


図 5.5.14 車間距離誤差 (フィードバック補償器なし)

5.5.4 モデルマッチング制御の不完全性、車車間通信遅れの影響の確認

この項では、シミュレーションによりモデルマッチング制御の不完全性と車車間通信遅れの影響を評価し、所望の車間距離維持精度を実現するために許容される、モデルマッチング制御の不完全性の度合い、車車間通信遅れの度合いを明らかにする。モデルマッチング制御の不完全性は、車間距離維持精度に大きく影響する。もちろん、この影響はフィードバック補償器により、ある程度抑制することができる。しかし、モデルマッチングの不完全性が大きくなりすぎると、閉ループの発散を招くことになる。また車車間通信遅れの影響は、車間距離維持精度にそれほど大きく影響しないが、車車間通信遅れが大きくなると閉ループの発散を招くことになる。このシミュレーションでは、車両モデルとして、目標加速度と車両加速度の関係が一次遅れ特性となる簡単なモデルを利用して評価を行う。シミュレーションの条件は以下の通りである。

- ・先頭車は完全なモデルマッチング制御が動作しているものとする
- ・先頭車は、目標速度 $15[\text{m/s}]$ で走行し、シミュレーション開始 100 秒後に目標速度を $25[\text{m/s}]$ とする。さらにに 150 秒後にに加速度 $-3[\text{m/s}^2]$ で制動を行い停止する。
- ・目標車間距離は $1[\text{m}]$ (一定) とする
- ・先頭車が発生する加速度目標値の範囲は $-3 \sim 1[\text{m/s}^2]$ とし、追従車が発生する加速度目標値の範囲は $-4 \sim 2[\text{m/s}^2]$ とする
- ・制御周期、通信周期は共に $50[\text{ms}]$ とする

モデルマッチング制御の不完全性を評価するシミュレーションでは、10台の車両により構成されるプラトーンで、各追従車の目標加速度と車両加速度の関係を一次遅れ時定数を $1+T_v$ 、 $1-T_v$ としたものを交互に並べて走行する。 $1-T_v$ が 0.1 未満の場合は、一次遅れ時定数を 0.1 としている。時定数のばらつきが $1 \pm T_v$ の範囲内にあるとき、最大車間距離誤差が発生する条件は、時定数が最大なものとき定数が最小なものが隣接することである。よって時定数 $1+T_v$ としたものと時定数 $1-T_v$ としたものとを交互に並べて走行することは、時定数のばらつきが $1 \pm T_v$ の範囲内にあるときの最悪のケースを表現するものである。フィードバックゲイン w_f は、0 (フィードバック補償なし)、0.1、0.5、1、2、3、4 としたものを評価した。

車車間通信遅れを評価するシミュレーションでは、2 種の方法を評価した。1 つは、第 5.5.3 項同様の隣接車車間通信の場合を評価した。この場合は、プラトーンの構成車両台数を増大することにより、通信遅れの影響が大きくなる。なお、このシミュレーションでは第 5.4.5 項で説明した通信遅れの補償は行わない。もう 1 つの方法としては、プラトーン先頭車が全ての車両の情報を収集して、目標加速度を決定し、各車両に送信する方式を評価した。この場合、先頭車は、第 10 章で説明する通信方式 (TDMA) で情報を送受信するものとしている。この方式では、通信の遅れ時間は先頭車と追従車の距離に依存しない。全ての車両間で全く遅れなく情報を送受信できるか、一様に同じ時間だけ遅れて情報を送受信することになる。このシミュレーションでは、先頭車が収集する情報と各車両が受信する目標加速度に遅れを導入している。たとえば、遅れが 0.1 秒とすると、先頭車は 0.1 秒前の各車両の状態量を利用して、各車両の目標加速度を決定することになる。また追従車は、0.1 秒前に先頭車が決定した目標

加速度情報を目標加速度として制御を行うことになる。各方式において、追従車には完全なモデルマッチング制御が動作しているものとしている。フィードバックゲインについては、0（フィードバック補償なし）、0.1、0.5、1、2、3、4としたものを評価した。

図5.5.15～図5.5.17にシミュレーション結果を示す。図5.5.15は、モデルマッチング制御の不完全性に対する最大車間距離誤差である。途中で線が切れているものは、線の切断点以降は、閉ループが発散していることを示している。フィードバックゲインが大きいくほど、最大車間距離誤差が小さく抑えられるが、小さな T_v で閉ループが発散することがわかる。シミュレーション結果から、最大追従誤差を1[m]以下に抑えるためには、 T_v を0.8以下（時定数のばらつきを 1 ± 0.8 の範囲内にする）にし、フィードバックゲインを0.5とする必要があることがわかる。

図5.5.16は、隣接車車間通信利用時におけるシミュレーション結果である。各フィードバックゲインに対し、閉ループの安定性を維持し、かつ最大追従誤差を1[m]以下にできるプラトーン内車両の最大数を表している。フィードバックゲインの増大に従い、最大数が減少していることがわかる。フィードバックゲインが1以上の場合、プラトーン内車両台数が結果に示される最大数以下の場合は高精度に車間距離を維持するが、最大数を超えると急激に車間距離維持精度が劣化し、発散に至る傾向があった。シミュレーション結果から、フィードバックゲインを0.5とした場合、23台までのプラトーン構成車両台数を許容できることがわかる。しかし、モデルマッチング制御が不完全である場合は、最大数が23台よりも小さくなる。たとえば、フィードバックゲイン0.5で、 T_v が0.4の場合、最大追従誤差を1[m]以下にできるプラトーン内車両の最大数は10台となることを確認している。

図5.5.17は、プラトーン先頭車が全ての車両の情報を収集して、目標加速度を決定し、各車両に送信する方式のシミュレーション結果である。各フィードバックゲインに対し、閉ループの安定性を維持し、かつ最大追従誤差を1[m]以下にできる通信の最大遅れ時間を表している。フィードバックゲインの増大に従い、最大遅れ時間が短くなっていることがわかる。すべてのゲイン条件で、通信の遅れ時間が結果に示される最大値以下の場合は高精度に車間距離を維持することを確認した。この理由は、通信遅れが存在しても、全ての車両の情報が等しく遅れているため、車両の相対運動はほとんど生じないためである。しかし、結果に示される最大値を超えた瞬間、全てのフィードバックゲイン条件において閉ループが発散した。シミュレーション結果から、フィードバックゲインを0.5とした場合、0.2秒までの通信遅れを許容できることがわかる。

以上の結果により、モデルマッチング制御の不完全性と通信遅れの影響を定量的に明らかにした。このシミュレーションでは、線形モデルを使用しているため、実際の車両に含まれる非線形性の影響や遅れ時間（むだ時間）、センサノイズの影響までを考慮したものではない。そのため、実走行においては、これらの影響によりフィードバックゲインの上限値が大きく制約される可能性があり、車間距離維持精度もさらに劣化する可能性がある。シミュレーション結果から、あえて提案する縦方向制御を実現す

るために必要なモデルマッチング制御と通信遅れの仕様を提案するならば、

- ・モデルマッチング制御による時定数のばらつきを 1 ± 0.8 の範囲内にする
- ・通信方式として、通信の遅れ時間が車両間距離に依存しない方式（第10章で説明する TDMA など）を利用し、通信の遅れ時間を $0.2[s]$ 以下にする

あるいは、

- ・モデルマッチング制御による時定数のばらつきを 1 ± 0.4 の範囲内にする
- ・通信方式として、隣接車車間通信を利用し、プラトーンの最大構成車両台数を 10 台とする

となる。上記仕様は、シミュレーションにおいて閉ループの安定性を維持し、かつ最大追従誤差を $1[m]$ 以下に抑えることを保証するものである。このシミュレーションで仮定した隣接車車間通信では、10 番目の追従車から先頭車に情報が届くまで $50[ms] \times 10 = 500[ms]$ を要することになる。しかし通信技術の現状を考えると、隣接車車間通信を利用したとしても、これほどの時間を要するとは考えにくい。車車間通信においては、通信の遅れ時間が車両間距離に依存しない方式（第10章で説明する TDMA など）を利用することが現実的であると考えている。よって上記では 2 通りの仕様を示したが、前者の仕様が現実的なものであると考えている。

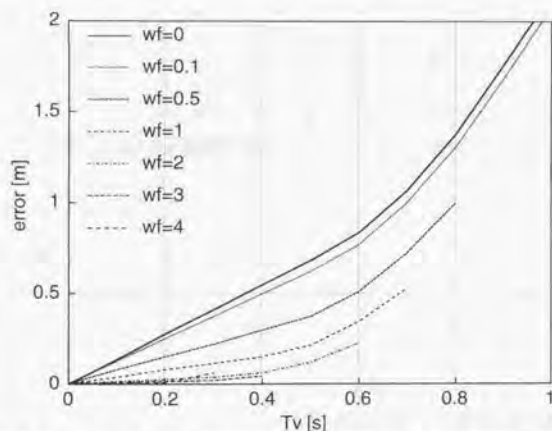


図 5.5.15 モデルマッチング制御の不完全性の度合いと最大追従誤差の関係

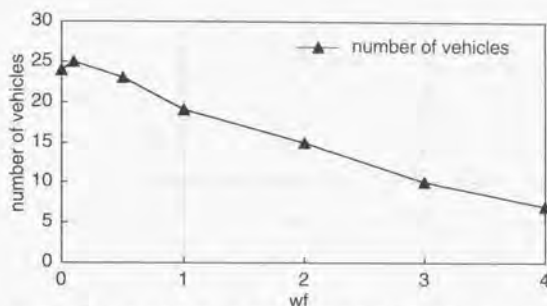


図 5.5.16 隣接車車間通信を利用した場合に許容できる最大プラトーン構成車両台数

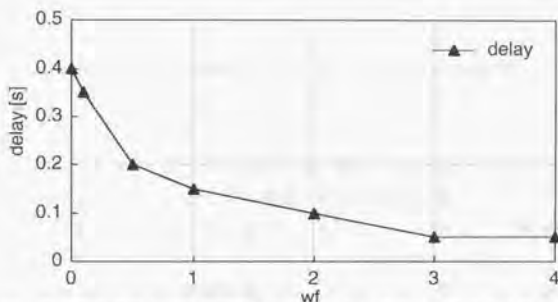


図 5.5.17 車車間通信遅れが車両間距離に依存しない場合に許容できる最大通信遅れ

5.6 第5章のまとめ

この章では、プラトーンを一力学系として扱った縦方向制御について検討した。この章で明らかにしたことをまとめると以下のようになる。

- ・プラトーンを一力学系としてモデル化し、状態フィードバックを利用した非干渉化を行うことで、プラトーン内の任意の車両間距離と先頭車の速度を独立に制御に制御できることを明らかにした。
 - ・モデルマッチング制御の不完全性、通信遅れ、外乱等の影響を補償するためのフィードバック補償器を構築し、その有効性を明らかにした。
 - ・プラトーン内の先頭車の速度制御の自由度を利用して、各車両の加速度目標値の二乗和を最小化する車両間距離変更や、特定の車両の加速度をゼロとした車両間距離変更が実現できることを明らかにした。
 - ・提案する縦方向制御を実現する際に許容できるモデルマッチング制御の不完全性の度合いと車車間通信遅れの度合いを明らかにした。
- 提案する縦方向制御により、プラトーンの挙動を交通の要求に応じて容易に制御

することが可能となる。例えば、車両が合流する際に、合流車両に最も近い部分の車両間距離を大きくして、プラトーン内に合流させることや、交通量が大きいところでは、短車両間距離、交通量が少ないところでは大きな車両間距離で走行することなどが容易となる。また、プラトーン構成車両台数に応じて車両間距離を変化し、プラトーンの前端から末尾までの距離を常に一定に保つような制御も可能となる。このように、プラトーンの挙動制御の実現が可能であるという、大きな特徴に加え、この制御は大型車等の加減速性能の低い車両の縦方向制御にも適している。大型車の場合は、加減速性能が低いため、車両レベルの制御を中心とする縦方向制御では、先行車の急な減速等に対応することが困難である。しかし、提案する縦方向制御によりプラトーンレベルの制御を行うことで、強力なフィードフォワード入力を実現し、先行車の減速等に対し、全く遅れることなく対応することが可能となる。

この章で構築した縦方向制御の特徴は、車車間通信の活用である。従来提案された一定車両間距離制御では、車車間通信を利用しプラトーン先頭車の状態量を利用することでストリングスタビリティを確保している。すなわち、後続車への車両間距離誤差の伝達関数の最大ノルムを1未満にする。この章で構築した縦方向制御は、車車間通信を利用して全ての車両の状態量を利用することで、後続車への車両間距離誤差の伝達関数のノルムを0にするものである。「縦方向制御で車車間通信を利用する以上は、車車間通信を最大限に活用する」ことが、制御系を構築する際にとった方針である。車車間通信は、単一の車両で実現できる技術ではない、そのため、自動運転システムの中で実用化しにくい技術の1つである。また、自動運転の目的をドライバの負担軽減のみとするのであれば、十分な車両間距離をとった縦方向制御により、車車間通信を利用することなく安全な自動運転が可能であると考ええる。しかし、自動運転の大きな目的である自動車交通の効率化、高容量化を実現するためには、車車間通信の利用が必須であり、車車間通信は実装の困難さを遥かに超える恩恵をもたらすものであると考える。コンピュータが通信技術の恩恵によって、大きく変化し、躍進したように、自動車も通信技術によって、大きく変化し、躍進するものと考ええる。この章で提案した縦方向制御も車車間通信の実現によって達成される恩恵の1つである。

5.7 記号

i	: プラトーン構成車両台数[台]
a_i	: プラトーン先頭車加速度[m/s ²]
a_n	: $n(1 \leq n \leq i-1)$ 番目の追従車の加速度[m/s ²]
$a_{des,i}$: プラトーン先頭車目標加速度[m/s ²]
$a_{des,n}$: $n(1 \leq n \leq i-1)$ 番目の追従車の目標加速度[m/s ²]
v_i	: プラトーン先頭車速度[m/s]
v_n	: $n(1 \leq n \leq i-1)$ 番目の追従車の速度[m/s]

- v_{des_i} : プラトーン先頭車目標速度[m/s]
 sp_n : $n(1 \leq n \leq i-1)$ 番目と $n-1$ 番目の追従車の車間距離[m]
 sp_{des_n} : $n(1 \leq n \leq i-1)$ 番目と $n-1$ 番目の追従車の目標車間距離[m]
 T_m : 制駆動力特性のモデルマッチング制御における一次遅れ時定数[s] (1.0)
 $Gp(s)$: プラトーンの伝達関数モデル
 A : プラトーンのモデルの状態空間表現
 B : プラトーンのモデルの状態空間表現
 C : プラトーンのモデルの状態空間表現
 I : 単位行列
 $Gpd(s)$: 非干渉化されたプラトーンのモデルの状態空間表現
 K : 非干渉化のためのフィードバック行列
 K_1 : 非干渉化のためのゲイン行列
 c_i : C の i 行目の要素
 c_n : C の $n+1(1 \leq n \leq i-1)$ 行目の要素
 D : 非干渉化行列
 d_i : $Gp(s)$ における先頭車部分の相対次数 (2)
 d_n : $Gp(s)$ における $n(1 \leq n \leq i-1)$ 番目の追従車の部分の相対次数 (3)
 T_i : 先頭車速度制御における時定数[s] (1.5)
 T_f : 車間距離制御における時定数[s] (1.0)
 $Cp(s)$: フィードバック補償器
 $S(s)$: 制御系の感度関数
 w_i : 先頭車速度制御のフィードバックゲイン (3.8)
 w_f : 車間距離制御のフィードバックゲイン (3.8, 0, 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 4)
 v_{Gpd_i} : 先頭車速度の規範応答[m/s]
 sp_{Gpd_n} : $n(1 \leq n \leq i-1)$ 番目と $n-1$ 番目の追従車の車間距離の規範応答[m]
 v_{des_ff} : 先頭車目標速度のフィルタ出力
 sp_{des_ff} : $n(1 \leq n \leq i-1)$ 番目と $n-1$ 番目の追従車の目標車間距離のフィルタ出力[m]
 th_{v_max} : 先頭車目標速度のフィルタ用しきい値[m/s] (3.1)
 th_{v_min} : 先頭車目標速度のフィルタ用しきい値[m/s] (-3.1)
 th_{sp_max} : 目標車間距離のフィルタ用しきい値[m] (4.0)
 th_{sp_min} : 目標車間距離のフィルタ用しきい値[m] (-4.0)
 a_{lim} : 加速度の上限値[m/s²] (1.0)
 k_d : 先頭車の車間距離制御における微分ゲイン (0.8)
 k_p : 先頭車の車間距離制御における比例ゲイン (0.2)
 v_p : 先頭車の車間距離制御における先行車の速度[m/s]
 sp_i : 先頭車の車間距離制御における先頭車と先行車の車間距離[m]

- h : 先頭車の車間距離制御における目標車間時間[s] (1.0)
 L_m : 先頭車の車間距離制御における最低車間距離[m] (4.0)
 a_{sq} : 目標加速度の修正値[m/s²]
 T_{com} : 車車間通信周期[s] (0.05)
 T_v : モデルマッチング制御の不完全性に起因する時定数のばらつき[s]

第6章 DGPSを利用した絶対位置情報の獲得手法

この章ではDifferential Global Positioning System (DGPS)を利用した絶対位置情報の車両運動制御への利用可能性の検討を目的として、DGPSと車両運動状態量を利用した絶対位置推定手法を提案し、その有効性を確認する。

従来、絶対位置情報は、ナビゲーションの分野等においてその有効性が明らかにされてきた。一方、自動運転制御においては、制御車両と道路中心または先行車との絶対位置関係により制御入力を決定してきた。この理由として制御に利用するために十分高精度でリアルタイムな絶対位置計測が困難であったことを挙げることができる。しかし今日、GPSを差動(Differential GPS)化することにより、計測誤差の大きな要因であるSA (Selective Availability)等の影響を排除することが可能になった。さらに信号搬送波の位相情報を利用することによりセンチメートルオーダーの精度でのリアルタイム計測が可能になった[185]。このようなDGPSによる絶対位置計測技術の発展は、自動運転制御への絶対位置情報の適用の展望を与え、DGPSを用いた自動運転システムの概観に関する研究[167]、DGPSからの情報を大型車の車線逸脱防止に適用する研究[168]等が報告されるようになった。

絶対位置情報を自動運転システムに適用した場合次のような利点が得られる。

- ・磁気ネイル等のインフラを設置することなく自動運転が可能になり、大幅なコスト削減が実現できる。
- ・路車間、車々間で絶対位置情報を交換しあうことにより、自動運転制御の高度化の見通しが得られる。
- ・路車間、車々間で絶対位置情報を交換しあうことにより、車間距離センサや障害物検出センサ等との冗長系が構築できる。
- ・ナビゲーションとの融合が可能になる。

等を挙げることができる。一方、克服しなければならない課題としては、

- ・DGPS受信機からの情報の精度の問題
- ・DGPS受信機からの情報の遅れの問題
- ・DGPS受信機からの情報のサンプル周期の問題

等を挙げることができる。この章では、上記問題を克服するための手法として、カルマンフィルタ、デッドレコニングを用いた絶対位置推定法を提案する。さらに、シミュレーションと実車実験による評価を行い、評価提案する絶対位置推定法によって自動運転制御で利用するための十分な精度とリアルタイム性を有する絶対位置情報が獲得できることを明らかにする。

この章の流れは図6.0.1のようになっている。以下の各節では、この流れに従いDGPSから得られた絶対位置情報の問題点、カルマンフィルタによる絶対位置情報の補正、

デッドレコニングによる遅れの補償と補間、推定手法の実現方法、シミュレーションによる評価、実験による評価について説明する。

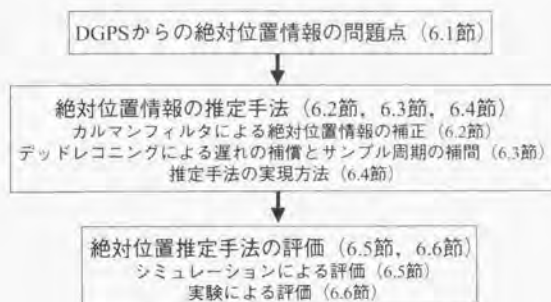


図 6.0.1 第 6 章の流れ

6.1 DGPS からの絶対位置情報の問題点

DGPS を用いて計測した絶対位置情報の問題点として、精度、遅れ、サンプリング周期を挙げることができる。表 6.1.1 に実験で使用した DGPS 受信機の公称スペックを示す。

絶対位置情報の精度は、目標コースに対する追従精度に直接的に影響する。さらに絶対位置情報の不連続性により、制御において不連続な出力を引き起こし、振動、乗り心地悪化の原因となる。また、絶対位置情報の誤差の影響は、車両方位角の推定にも大きな影響を及ぼす。車両の方位角を図 6.1.1 のように絶対位置情報の履歴によって推定する場合、絶対位置情報の誤差によって、車両方位角の推定値も真値と大きく異なったものとなる。この影響は、特に低速走行時に大きくなる。

次に遅れとサンプリング周期の問題について述べる。絶対位置情報の遅れは、DGPS 受信機内での信号処理時間と制御コンピュータへの情報伝達時間に起因する。たとえば、遅れが 200[ms] である場合、速度 20[m/s] にて走行中に DGPS によって計測した値は情報獲得時の絶対位置より 4[m] 後方の絶対位置を示すことになる。サンプリング周期が制御周期に比べて大きいことも問題である。本研究では、制御周期として 50[ms] を想定しているが、実験に使用した DGPS 受信機のサンプル周期は 200[ms] である。なお、この DGPS 受信機のサンプル周期は現行機種の中で、最も短い部類に入るものである。

表 6.1.1 実験で使った DGPS 受信機の諸元

Product name	NovAtel RT-20
Accuracy	< 20[cm] (standard deviation)
Signal processing time	< 70[ms]
Data transmission time	About 120[ms] at 9600[bps]
Sampling period	About 200[ms]



図 6.1.1 計測誤差の影響

6.2 カルマンフィルタによる絶対位置情報の補正

この節では、DGPSによって計測した絶対位置情報を補正し、精度と情報の連続性の向上を図るためのカルマンフィルタ[186]について説明する。カルマンフィルタを利用する根拠はDGPSによる計測誤差の分布が正規分布に近いことが知られていることと、車両の絶対位置は車両運動に支配されるため、車両運動の状態量を補正のために使用することが有効であると考えられるからである。以下にカルマンフィルタについて説明する。なお、この節で示される離散方程式はすべてDGPS受信機のサンプル周期 T_d で離散化されている。

システムの状態量として、車両の絶対位置 (X, Y) 、方位角 θ を使用する。DGPS受信機のサンプル周期 T_d における車両座標系上での変位量 $(\Delta x_v, \Delta y_v)$ は、図6.2.1に示される幾何学的関係より、以下のように表せる。

$$\Delta x_v[k] = D_1 \cos E_1 \quad \dots\dots\dots (6.2.1)$$

$$\Delta y_v[k] = D_1 \sin E_1 \quad \dots\dots\dots (6.2.2)$$

ここで、

$$D_1 = 2D_2 / (\gamma[k] \cdot T_d) \cdot \sin(\gamma[k] \cdot T_d / 2) \quad \dots\dots\dots (6.2.3)$$

$$D_2 = V[k] \cdot T_d \quad \dots\dots\dots (6.2.4)$$

$$E_1 = E_2 / 2 + \beta[k] \quad \dots\dots\dots (6.2.5)$$

$$E_2 = \gamma[k] \cdot T_\theta \quad \dots\dots\dots (6.2.6)$$

である。ここで、 V 、 γ および β はそれぞれ、車両の速度、ヨーレートおよび重心の横滑り角である。これを座標変換し絶対座標系で表し、 X 、 Y に関する離散方程式を立てると

$$\begin{aligned} X[k+1] &= X[k] + \Delta x_i \cos \theta[k] - \Delta y_i \sin \theta[k] \\ &= X[k] + D_1 \cos E_1 \cos \theta[k] - D_1 \sin E_1 \sin \theta[k] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6.2.7)$$

$$\begin{aligned} Y[k+1] &= Y[k] + \Delta x_i \sin \theta[k] + \Delta y_i \cos \theta[k] \\ &= Y[k] + D_1 \cos E_1 \sin \theta[k] + D_1 \sin E_1 \cos \theta[k] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6.2.8)$$

となる。一方 θ については、以下のように表せる。

$$\theta[k+1] = \theta[k] + E_2 \quad \dots\dots\dots (6.2.9)$$

X, Y, θ を状態量として、システムの状態方程式を記述する場合、状態量 X, Y の中に θ の非線形関数が含まれる。本研究では、文献[169]を参考し、状態量を $X, Y, \cos \theta, \sin \theta$ とすることにより、1自由度冗長化した状態方程式を構築する。この手法により、線形の状態方程式でシステムを記述することが可能となる。状態方程式は以下のように表される。

$$\mathbf{z}[k+1] = \mathbf{F}[k] \mathbf{z}[k] + \mathbf{G}[k] \mathbf{w}[k] \quad \dots\dots\dots (6.2.10)$$

ここで、 $\mathbf{F}[k]$ と $\mathbf{z}[k]$ については、

$$\mathbf{z}[k] = [x[k] \quad y[k] \quad \cos \theta[k] \quad \sin \theta[k]]^T \quad \dots\dots\dots (6.2.11)$$

$$\mathbf{F}[k] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & D_1 \cos E_1 & -D_1 \sin E_1 \\ 0 & 1 & D_1 \sin E_1 & D_1 \cos E_1 \\ 0 & 0 & \cos E_2 & -\sin E_2 \\ 0 & 0 & \sin E_2 & \cos E_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (6.2.12)$$

である。 $\mathbf{G}[k], \mathbf{w}[k]$ はシステムノイズに関する項である。システムノイズとして、速度の計測誤差による移動量の誤差 n_v 、ヨーレートの計測誤差による方位角変化量の誤差 n_θ を想定する。 $\mathbf{G}[k], \mathbf{w}[k]$ は以下の式で表される。

$$\mathbf{G}[k] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial D_2} D_1 \cos(\theta[k] + E_1) & \frac{\partial}{\partial E_2} D_1 \cos(\theta[k] + E_1) \\ \frac{\partial}{\partial D_2} D_1 \sin(\theta[k] + E_1) & \frac{\partial}{\partial E_2} D_1 \sin(\theta[k] + E_1) \\ 0 & \frac{\partial}{\partial E_2} \cos(\theta[k] + E_2) \\ 0 & \frac{\partial}{\partial E_2} \sin(\theta[k] + E_2) \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \cos \theta[k] & -(1/2) D_2 \sin \theta[k] \\ \sin \theta[k] & (1/2) D_2 \cos \theta[k] \\ 0 & -\sin \theta[k] \\ 0 & \cos \theta[k] \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (6.2.13)$$

$$\mathbf{w}[k] = [n_x[k] \quad n_y[k]]^T \quad \cdots \cdots \cdots (6.2.14)$$

式(6.2.10)の状態方程式の中にはシステムパラメータとして V, γ, β が含まれる。これらの状態量は、センサまたはオブザーバを用いて逐次計測または推定することを想定している。次に観測方程式について説明する。観測値はDGPS受信機からの絶対位置情報である。観測方程式は以下のように表される。

$$\mathbf{m}[k] = \mathbf{H}[k] \mathbf{z}[k] + \mathbf{v}[k] \quad \cdots \cdots \cdots (6.2.15)$$

ここで、

$$\mathbf{m}[k] = [X_m[k] \quad Y_m[k]]^T \quad \cdots \cdots \cdots (6.2.16)$$

$$\mathbf{H}[k] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots \cdots (6.2.17)$$

$$\mathbf{v}[k] = [n_x[k] \quad n_y[k]]^T \quad \cdots \cdots \cdots (6.2.18)$$

である。観測ノイズ(n_x, n_y)はDGPS受信機からの絶対位置情報に含まれる誤差である。制御車両の方位角は以下の式により算出できる。

$$\theta[k] = \tan^{-1}(\sin \theta[k] / \cos \theta[k]) \quad \cdots \cdots \cdots (6.2.19)$$

以上で、システムの状態方程式と観測方程式を記述できたことになる。

このシステムにカルマンフィルタを適用する。本研究では、状態方程式のシステムパラメータ、すなわち式(6.2.10)の各要素には、時変パラメータである V, γ, β が含まれる。そのため、このシステムで適用するカルマンフィルタは、離散非定常カルマンフィルタとなる。フィルタの方程式は以下の式で与えられる[187]。

$$\hat{\mathbf{z}}[k+1/k] = \mathbf{F}[k] \hat{\mathbf{z}}[k/k] \quad \cdots \cdots \cdots (6.2.20)$$

$$\hat{\mathbf{z}}[k/k] = \hat{\mathbf{z}}[k/k-1] + \mathbf{K}[k](\mathbf{m}[k] - \mathbf{H}[k] \hat{\mathbf{z}}[k/k-1]) \quad \cdots \cdots \cdots (6.2.21)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{z}}[n/m]$ は、時刻 m における $\mathbf{z}[n]$ の推定値である。カルマンゲイン \mathbf{K} は以下の式で更新される。

$$\mathbf{K}[k] = \mathbf{P}[k/k-1] \mathbf{H}[k]^T (\mathbf{H}[k] \mathbf{P}[k/k-1] \mathbf{H}[k]^T + \mathbf{R}[k])^{-1} \quad \cdots \cdots \cdots (6.2.22)$$

ここで、観測誤差の共分散行列 \mathbf{R} は、

$$\mathbf{R}[k] = \begin{bmatrix} \sigma^2(n_x[k]) & 0 \\ 0 & \sigma^2(n_y[k]) \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots \cdots (6.2.23)$$

であり、使用するDGPS受信機の性能およびフィルタの安定性を考慮してチューニングされる。推定誤差共分散行列 \mathbf{P} は、以下の式で更新される。

$$\mathbf{P}[k+1/k] = \mathbf{F}[k] \mathbf{P}[k/k] \mathbf{F}[k]^T + \mathbf{G}[k] \mathbf{Q}[k] \mathbf{G}[k]^T \quad \cdots \cdots \cdots (6.2.24)$$

$$\mathbf{P}[k/k] = \mathbf{P}[k/k-1] - \mathbf{K}[k] \mathbf{H}[k] \mathbf{P}[k/k-1] \quad \cdots \cdots \cdots (6.2.25)$$

ここで、システムノイズの共分散行列 \mathbf{Q} は、

$$Q[k] = \begin{bmatrix} \sigma^2(n_x[k]) & 0 \\ 0 & \sigma^2(n_y[k]) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (6.2.26)$$

であり、速度センサおよびヨーレートセンサの分解能により決定される。カルマンフィルタより得られるにより、制御車両の絶対位置の補正値と方位角の推定値を得ることができる。

図6.2.2、図6.2.3にカルマンフィルタによる絶対位置と方位角の推定のシミュレーション結果を示す。DGPS受信機の計測誤差は標準偏差0.2[m]の正規分布に従うものとしている。この結果から、カルマンフィルタが計測誤差を半減し、DGPS受信機の計測誤差の不連続性を除去していることがわかる。また、方位角の推定については、初期値誤差に関わらずほぼ真値を推定できることがわかる。

表6.2.1にDGPSの計測誤差別のシミュレーション結果を示す。シミュレーションでは車両が20[m/s]で直進走行を行っている。結果は計測誤差の標準偏差が0.02[m]～10[m]における推定誤差の標準偏差として示されている。この結果から、各計測誤差における推定誤差の標準偏差が半分以下になっていることがわかる。

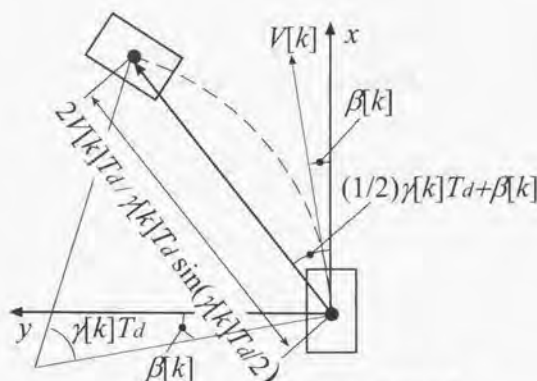


図 6.2.1 DGPSの計測周期あたりの車両変位量

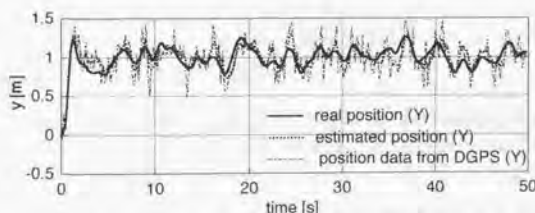


図 6.2.2 カルマンフィルタによる絶対位置の推定結果

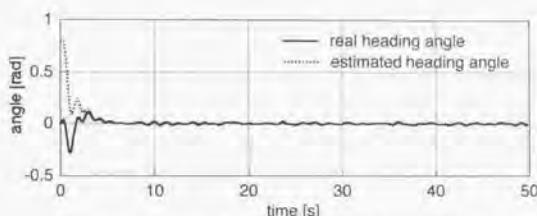


図 6.2.2 カルマンフィルタによる方位角の推定結果

表 6.2.1 各計測誤差におけるカルマンフィルタの推定誤差

計測値の誤差の標準偏差[m]	推定値の誤差の標準偏差[m]
10	3.4971
5	1.9805
2	0.8098
1	0.4099
0.5	0.2087
0.2	0.0886
0.1	0.0459
0.05	0.0220
0.02	0.0097

6.3 デッドレコニングによる遅れの補償とサンプル周期の補間

第6.2節のカルマンフィルタより得られる絶対位置情報と方位角情報は、DGPS受信機の信号処理時間、情報伝達時間、カルマンフィルタによる演算時間に起因する遅れ T_l を含む。また、カルマンフィルタおよびDGPS受信機のサンプル周期は本研究で想定している制御周期よりも長い。この節では、デッドレコニングによる微小時間変位情報を利用して、遅れを補正し、制御周期で絶対位置情報を獲得する手法を説明する。なお、この節で示される離散方程式はすべて制御周期 T_c で離散化されている。図6.2.1に示される幾何学的関係について、 T_d を T_c と書きかえることにより、車両座標系上での制御周期における微小変位ベクトル $\Delta \vec{P}_k$ は、

$$\Delta \vec{P}_k[k] = \begin{bmatrix} \Delta x_c[k] \\ \Delta y_c[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{2(V[k] \cdot T_c) / (\gamma[k] \cdot T_c) \cdot \sin(\gamma[k] \cdot T_c / 2)\} \cos(\gamma[k] \cdot T_c / 2 + \beta[k]) \\ \{2(V[k] \cdot T_c) / (\gamma[k] \cdot T_c) \cdot \sin(\gamma[k] \cdot T_c / 2)\} \sin(\gamma[k] \cdot T_c / 2 + \beta[k]) \end{bmatrix} \quad (6.3.1)$$

と表せる。これを図6.3.1のように絶対座標系での微小変位ベクトル $\Delta \vec{P}_0$ に変換すると、

$$\Delta \bar{P}_c[k] = \begin{bmatrix} \cos \theta[k] & -\sin \theta[k] \\ \sin \theta[k] & \cos \theta[k] \end{bmatrix} \Delta \bar{P}_c[k] \quad \dots\dots\dots (6.3.2)$$

となる。時刻 k においてカルマンフィルタより絶対位置および方位角情報が得られた場合、情報の遅れは、微小変位量を足しあわせることで以下のように補正できる。

$$\bar{P}_c[k] = \bar{P}_c[k] + \sum_{i=0}^{T_d/T_c-1} \Delta \bar{P}_c[k-i] \quad \dots\dots\dots (6.3.3)$$

$$\theta_c[k] = \theta_c[k] + \sum_{i=0}^{T_d/T_c-1} \gamma[k-i] \cdot T_c \quad \dots\dots\dots (6.3.4)$$

カルマンフィルタからの絶対位置および方位角情報が得られる・得られないに関わらず、時刻 k における絶対位置と方位角情報は、以下のように時刻 $k-1$ の絶対位置ベクトルと方位角に微小変位量を足しあわせることで推定することができる。

$$\bar{P}[k] = \bar{P}[k-1] + \Delta \bar{P}_c[k] + \Delta \bar{P}_c[k] \quad \dots\dots\dots (6.3.5)$$

$$\theta[k] = \theta[k-1] + \gamma[k] \cdot T_c + \Delta \theta_c[k] \quad \dots\dots\dots (6.3.6)$$

ここで、 $\Delta \bar{P}_c$, $\Delta \theta_c$ はカルマンフィルタからの情報に基づく補正值である。この補正值は、デッドレコニングの初期値誤差の影響を時間と共に減少し、かつ精度を維持するためのものである。以下に補正值の決定法について説明する。時刻 k にカルマンフィルタから絶対位置情報を獲得したと仮定すると、 $\bar{P}_c[k]$ と $\bar{P}[k]$ は一般に一致しない。これはデッドレコニングおよびカルマンフィルタによる情報の誤差が 0 でないことに起因する。このとき、図 6.3.2 上段のように、 $\bar{P}[k] = \bar{P}_c[k]$ として、絶対位置ベクトルを更新すると、絶対位置情報が、周期 T_d で不連続性を持つことになる。この不連続性は、自動運転制御において不連続な制御入力を招き、乗り心地、追従精度の悪化や無駄なアクチュエータ出力の原因となる。本研究では、補正量を T_d/T_c 個に分離し、図 6.3.2 下段のように T_d/T_c 回に分けて逐次補正することで情報の連続性を維持する。時刻 k にカルマンフィルタより絶対位置および方位角情報が得られと仮定すると、時刻 $k+l$ における補正量は、

$$\Delta \bar{P}_c[k+l] = \frac{\bar{P}_c[k] - \bar{P}[k]}{\sum_{i=1}^{T_d/T_c} \sin\left(\frac{i\pi}{T_d/T_c}\right)} \cdot \sin\left\{\frac{(l+1)\pi}{T_d/T_c}\right\} \quad \dots\dots\dots (6.3.7)$$

$$\Delta \theta_c[k+l] = \frac{\theta_c[k] - \theta[k]}{\sum_{i=1}^{T_d/T_c} \sin\left(\frac{i\pi}{T_d/T_c}\right)} \cdot \sin\left\{\frac{(l+1)\pi}{T_d/T_c}\right\} \quad \dots\dots\dots (6.3.8)$$

とする。このように補正量に周波数特性を持たせることで、絶対位置と方位角情報の変動成分に周波数特性を持たせている。周波数特性を持たせた絶対位置と方位角情報にローパスフィルタを施すことで、高周波変動成分を効果的に除去することができる。研究では、式(6.3.5)、(6.3.6)により得られた絶対位置と方位角情報に一次遅れ特性を持つローパスフィルタ施したものを絶対位置と方位角の推定値として制御に使用する

る。推定した絶対位置または方位角の初期値が真値とずれている場合、ローパスフィルタにより真値への収束が遅くなる。しかし、ローパスフィルタにより、センサ、DGPS受信機からの異常な入力に対する安定性を維持することができる。

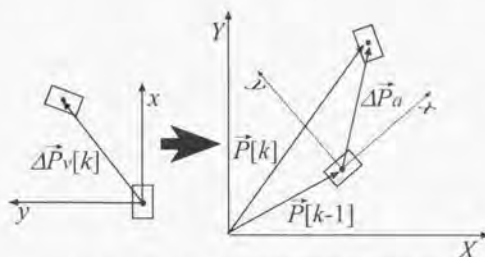


図 6.3.1 車両座標系から絶対座標系への変換

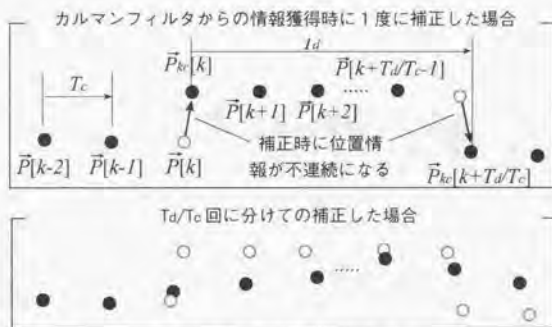


図 6.3.2 絶対位置情報の補正

6.4 推定手法の実現方法

この節では、第 6.2 節および第 6.3 節で説明した、DGPS と車両運動状態量を利用した絶対位置推定手法を実現するための具体的な方法を説明する。

6.4.1 絶対位置の推定手順

第 6.2 節および第 6.3 節で説明した絶対位置推定手法は、図 6.4.1 のようにまとめることができる。DGPS による絶対位置計測に加え、計測する状態量は、速度、ヨーレートおよび重心の横滑り角である。この際、横滑り角の計測は困難であるため、本研究では、線形オブザーバーを使用して推定している。これらの状態量は、制御周期で計測あるいは推定する。DGPS からの情報が入ったら、第 6.2 節で説明した手法を利用し

て、絶対位置および車両方位角 (X_k, Y_k, θ_k) を推定する。推定値の計算の際にカルマンフィルタのシステムパラメータとして使用する速度、ヨーレート、横滑り角の情報は、DGPSの情報遅れ時間と同期させる必要がある。たとえば、DGPSの計測周期が200[ms]、情報遅れが200[ms]である場合、カルマンフィルタのシステムパラメータとして使用する速度、ヨーレート、横滑り角の情報は推定値の計算開始時刻 (DGPSからのデータが来た時刻) の300[ms]前の情報を使用する。この300[ms]とは、情報遅れ時間 (200[ms]) + 計測周期 (200[ms]) / 2 として算出した値である。よって、逐次計測あるいは推定した速度、ヨーレート、横滑り角の情報は、一定時間格納しておく必要がある。この格納した状態量情報は、遅れの補償の際にも必要である。(X_k, Y_k, θ_k) の計算後、第6.3節の式 (6.3.3)、式 (6.3.4) により、遅れを補正した絶対位置、および車両方位角 ($X_{kc}, Y_{kc}, \theta_{kc}$) を求める。この情報と、制御周期で式 (6.3.5)、式 (6.3.6) を用いて計算した X_d, Y_d, θ_d にて、式 (6.3.7)、式 (6.3.8) を用いて、補正值 $\Delta X_c, \Delta Y_c, \Delta \theta_c$ を求める。この補正量は、式 (6.3.5)、式 (6.3.6) の中で使用される。制御で利用される絶対位置および車両方位角情報は、式 (6.3.5)、式 (6.3.6) を用いて計算した、 X_d, Y_d, θ_d となる。

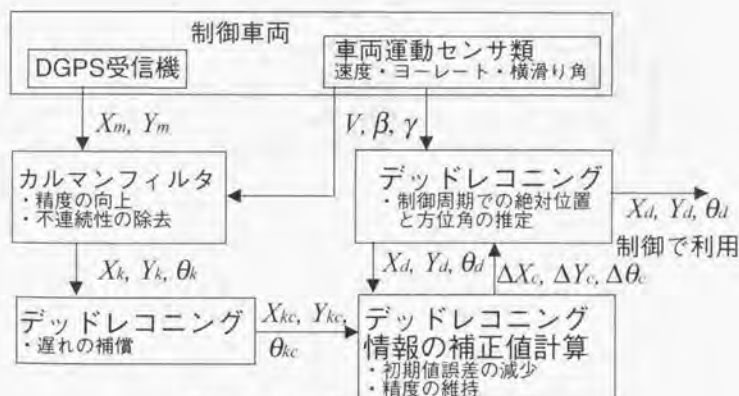


図6.4.1 絶対位置および方位角の推定手順

6.4.2 緯度、経度情報から距離情報への変換

本研究の実験で使用したDGPS受信機からの位置情報は緯度（単位は度で、十進法）、経度（単位は度で、十進法）、高度 [m] の情報である。この項では、緯度、経度の情報を距離情報に変換する手法を説明する。基準座標をとる地点の緯度、経度を Lat_0, Lon_0 とする。文献[188]によると東京付近の緯度、経度と距離の関係は表6.4.1のようになる。本研究では、緯度おける緯度、経度と距離の関係を二次式で近似して算出している。例えば、北緯 x_{lat} における経度1秒に対する弧の長さ c_{lon} は、

$$c_{lon} = -0.003835714286x_{lat}^2 - 0.0399585714287x_{lat} + 31.4550857142874 \cdots \quad (6.4.1)$$

となり、緯度1秒に対する弧の長さ c_{lat} は、

$$c_{lat} = 0.00005x_{lat}^2 + 0.00155x_{lat} + 30.7013 \quad \dots\dots\dots (6.4.2)$$

となる。この近似式は北緯35度前後で有効な式であり、緯度が35度よりも5度以上離れた場所においては利用できない。DGPSからの情報として緯度 Lat_{gps} 、経度 Lon_{gps} が得られた場合の絶対位置（北方向をY軸方向、東方向をX軸方向とする）は、

$$X = 3600(Lon_{gps} - Lon_0)c_{lon} \quad \dots\dots\dots (6.4.3)$$

$$Y = 3600(Lat_{gps} - Lat_0)c_{lat} \quad \dots\dots\dots (6.4.4)$$

として算出できる。

表 6.4.1 緯度・経度と距離の関係

緯度[度]	経度1秒に対する弧の長さ[m]	緯度1秒に対する弧の長さ[m]
30	26.8017	30.7923
31	26.5290	30.7971
32	26.2481	30.8019
33	25.9592	30.8068
34	25.6624	30.8118
35	25.3578	30.8168
36	25.0445	30.8219
37	24.7255	30.8271
38	24.3979	30.8324
39	24.0629	30.8376
40	23.7205	30.8430

6.5 シミュレーションによる評価

この節では、第6.2節～第6.4節で説明した絶対位置推定手法を評価するためのシミュレーションとその結果について説明する。評価する値は、推定した絶対位置の実際の絶対位置に対する誤差である。

6.5.1 シミュレーションの方法

車両モデルとして、実験車両の諸元を持つ平面二輪モデル（第7.1節参照）を使用する。計測する状態量は速度、ヨーレートとし、横滑り角は線形オブザーバで推定している。目標コースデータとして、図6.5.1、図6.5.2に示す2つの目標コースデータを用意した。この節では図6.5.1に示される直線状の目標コースをコース1と呼ぶ、図6.5.2に示される、R640、R320、R160、R105のカーブが連続するコースをコース2と呼ぶ。絶対座標の原点は制御車両の初期座標とし、初期方位角とX軸の方向が一致するものとする。車両の走行速度は20[m/s]（一定）とし、車両の操舵制御は、推定した絶対位置情報、方位角情報およびコース情報を利用して、第8.3節で説明する制御ア

ルゴリズムによって行っている。DGPS受信機の計測誤差は標準偏差0.2[m]の正規分布に従うものとしている[189]。DGPSの計測周期、情報の遅れ時間、車両運動センサの計測周期（デッドレコニングの周期）はそれぞれ、200[ms]、200[ms]、50[ms]としている。

上記のシミュレーションに加え、DGPSの受信機の計測情報の遅れ補正と補間のみを行った絶対位置情報に基づくシミュレーションを行う。このシミュレーションはコース1のみについて行う。またカルマンフィルタを使用しないため、制御車両の方位角は、計測された絶対位置の履歴から算出している。

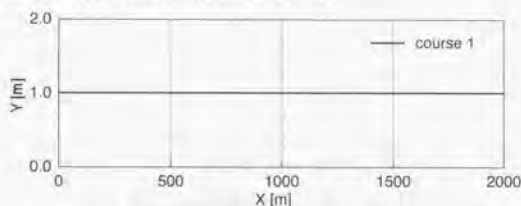


図 6.5.1 コース 1

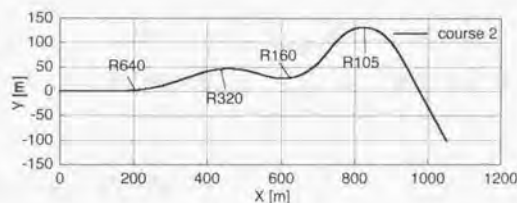


図 6.5.2 コース 2

6.5.2 シミュレーションの結果

図 6.5.3 に本研究で提案する絶対位置推定手法を利用したシミュレーションの結果を示す。結果は、真の絶対位置に対する車上推定値の誤差として示されている。各コースにおいて、計測誤差は0.1[m]以下に収まっている。また誤差の変動は振動的でなく、滑らかなに変動していることがわかる。コースの2における誤差を見ると誤差の値は走行路の曲率に依存しないことがわかる。

図 6.5.4 に DGPS 受信機の計測情報の遅れ補正と補間のみを行った絶対位置情報に基づいた制御のシミュレーション結果を示す。DGPS 受信機の絶対位置計測誤差をそのまま反映したものとなっている。また車両方位角の推定誤差も大きいため、遅れの補償の際に、誤った方向へ補償することになる。このため、推定誤差は DGPS の計測誤差よりもさらに大きなものとなる場合もある。

シミュレーションの結果により、本研究で提案する手法が、第6.5.1節で説明したDGPSからの絶対位置情報の問題点を克服し、高精度でリアルタイムな絶対位置情報の獲得を実現するものであることがわかる。

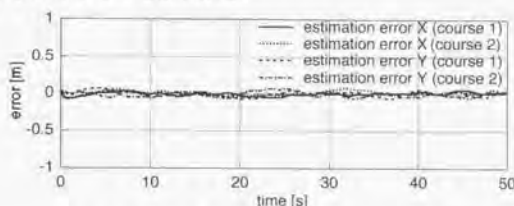


図6.5.3 絶対位置の推定誤差（提案する推定手法）

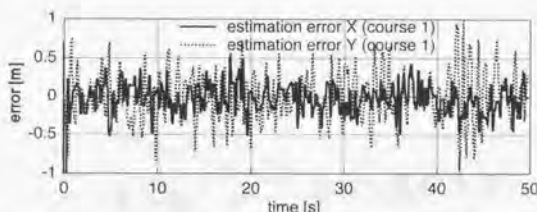


図6.5.4 絶対位置の推定誤差（カルマンフィルタを使用しなかった場合）

6.6 実験による評価

この節では、第6.2節～第6.4節で説明したの絶対位置推定手法の実車実験による評価とその結果について説明する。以下の各項では、実験システム、実験の方法、実験結果について説明する。

6.6.1 実験システム

実験車両として、日産インフィニティ Q45（排気量4500cc）を使用している。実験車両の写真は図4.5.1に示されている。図6.6.1、図6.6.2に実験車両内の計測システムの概図および詳細図を示す。

状態量として、後輪車輪速、ヨーレートを計測している。後輪車輪速は、後輪の回転と共に発生するパルスの周波数を計測することにより算出している。ヨーレートは光ファイバージャイロにより計測している。図6.6.3に使用した光ファイバージャイロの写真を示す。横滑り角については、計算時間短縮のため、線形オブザーバーを使用せず、定常状態におけるヨーレート、速度、横滑り角の関係より算出した[190]。

DGPS受信機として、表6.1.1に示したDGPS受信機を2台使用している。このDGPS受

信機は、基地局および移動局としての利用が可能である。本研究では1台を基地局として使用し、1台を移動局として実験車両に取り付けている。基地局からの補正情報は、小電力無線モデム(9600bps)で送信している。補正情報を受信する無線モデムと受信アンテナの間にプリアンプを接続することにより、基地局-車両(移動局)間が1[km]以上離れていても補正情報が受信可能となる。図6.6.4、図6.6.5にそれぞれ移動局用セットアップ、基地局用セットアップの写真を示す。また図6.6.6、図6.6.7にそれぞれ実験車両内に取りつけられたDGPS受信機、基地局として地上に設置されたDGPS受信機を示す。

絶対位置推定用コンピュータとしては、AT互換機(CPU:Pentium 200[Mz])を使用している。このコンピュータに取り付けられた、A/D、D/A変換ボード(12bit、A/D:16チャンネル、D/A:8チャンネル)、パルスカウンタボード(2チャンネル)により信号の入出力を行っている。また、実験機器とボードの間に信号入出力ボックスを介して信号線を接続している。また図6.6.8に実験用プログラムのフローチャートを示す。

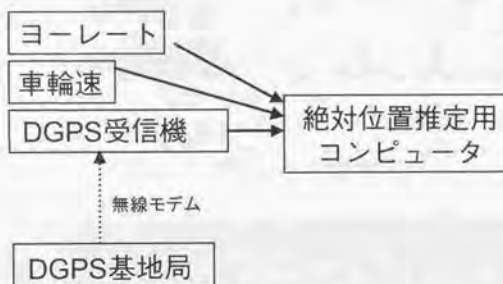


図6.6.1 実験システムの概図

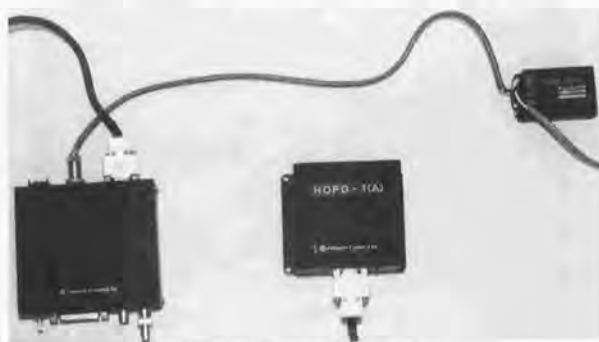


図6.6.3 光ファイバージャイロ

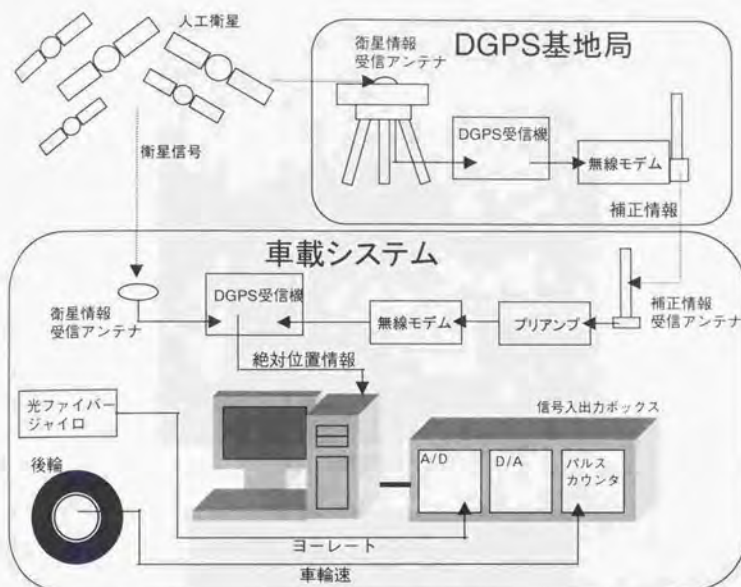


図 6.6.2 実験システムの詳細図



図 6.6.4 DGPS 基地局用セッアップ



図 6.6.5 DGPS 移動局用セッアップ



図 6.6.6 DGPS 基地局



図 6.6.7 実験車両に取り付けられた DGPS 受信機

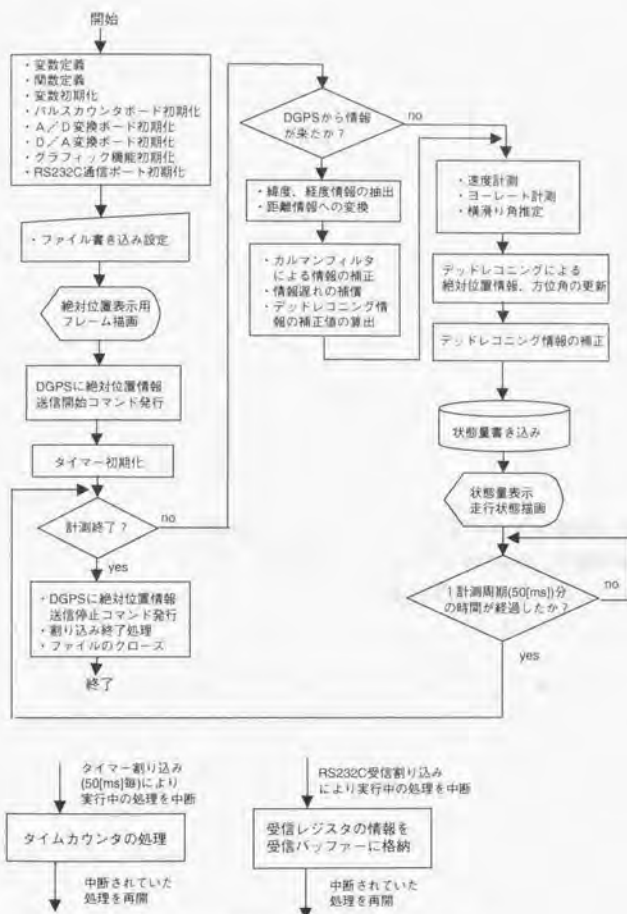


図 6.6.8 実験用プログラムのフローチャート

6.6.2 実験の方法

実験は機械システム振興協会のテストコース（御殿場）にておこなった、図6.6.9にテストコースを示す。図中のアルファベットは説明の便宜のためにつけた記号である。この図では、DGPS 基地局の位置を原点とし、東方向にX軸、北方向にY軸をとっている。絶対位置の計測および推定は走行速度3～5[m/s]で行った。絶対位置の初期値は、推定開始時にDGPSにより計測した絶対位置とし、車両方位角の初期値は0[rad]（X軸方向）としている。もちろん、DGPSにより、2回以上位置計測を行えば、方位角の初期

値も、実際の方位角に近い値を与えることができる。しかし、この実験では、絶対位置の推定値が真値に収束することを確認するために敢えて、方位角の初期値を0[rad] (X軸方向)とした。

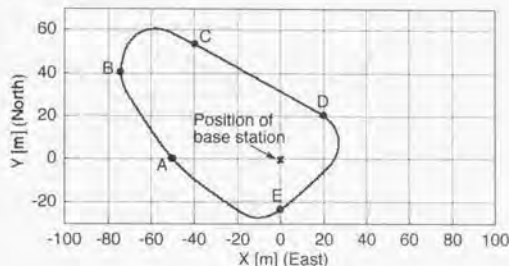


図 6.6.9 実験コース

6.6.3 実験結果

図 6.6.10～図 6.6.12 に実験結果を示す。図 6.6.10 は絶対位置計測開始後の絶対位置推定状態を示している。コース上を時計周りに走行中、区間 CD の中間部から絶対位置の推定を開始している。方位角の初期誤差の影響で計測開始後しばらくは、絶対位置の推定値が真値と異なったものとなっているが、A 点に達するところで、ほぼ真値に収束していることがわかる。

図 6.6.11、図 6.6.12 は計測開始約 50 秒後の絶対位置の推定状態を示す。このときには絶対位置の推定値はほぼ真値に収束している。図 6.6.11 は区間 CD の中間点近傍を走行中の絶対位置の推定値と DGPS 受信機による計測値である。推定した絶対位置は、DGPS 受信機からの絶対位置計測値を補間し、かつ連続性を有するものとなっていることがわかる。また DGPS 受信機による計測値のばらつきが小さいことがわかる。

図 6.6.12、X 座標の推定値を時系列で表したものである。DGPS 受信機による計測値が階段状になっているのは、DGPS 受信機による計測値の更新周期に起因している。これに対し、絶対位置の推定値は、50[ms] 毎に更新されている。また、計測値を 200[ms] 分進めた値と推定値がほぼ一致している。このことは、推定値が計測値の遅れを適切に補償していることを示している。

実験結果により、本研究で提案する手法が、実車上の運用においても有効であることを明らかにした。

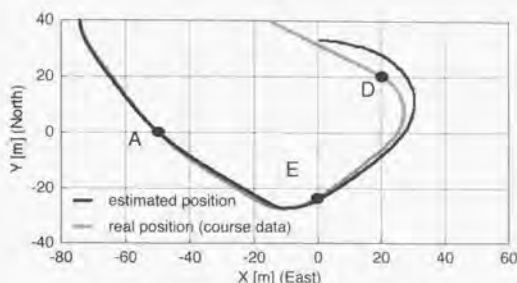


図 6.6.10 絶対位置推定値の収束の様子

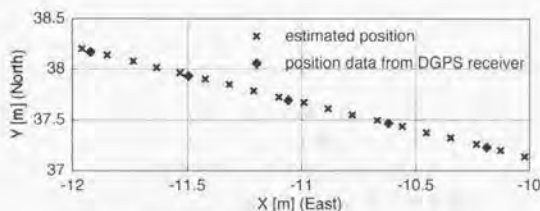


図 6.6.11 絶対位置計測値と推定値 (X, Y プロット)

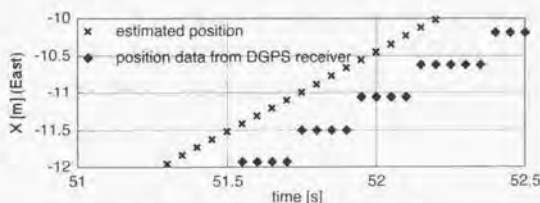


図 6.6.12 絶対位置計測値と推定値 (時系列)

6.7 第 6 章のまとめ

この章では、DGPSを利用した絶対位置情報の車両運動制御への利用可能性を検討した。絶対位置情報を車両運動制御に利用するためには、絶対位置情報の精度とリアルタイム性が要求される。しかし、DGPS単体における絶対位置情報は、十分にこの要求を満たすものとは言えない。そこで本研究では、車両運動状態量を利用することにより、車両運動制御に利用するために十分な精度とリアルタイム性を有する絶対位置情報の獲得手法を提案し、その有効性を明らかにした。この章で明らかにしたことをま

とめると以下ようになる。

- ・DGPSからの絶対位置情報を車両運動制御で利用する際の問題点として、精度、遅れ、サンプル周期の問題があることを明らかにした。
- ・車両運動状態量をシステムパラメータとした、非定常カルマンフィルタを提案し、これにより、DGPSの計測精度を向上と車両方位角の推定が実現できることを明らかにした。
- ・車両運動状態量を利用した短サンプル周期のデッドレコニングにより、DGPSからの絶対位置情報の遅れを補償とサンプル周期の補間を行う方法を提案した。
- ・上記2項目を組み合わせた、絶対位置の推定手法を提案し、これにより、高精度かつリアルタイムな絶対位置情報が獲得できることを、シミュレーションおよび実験により明らかにした。

この章で提案する絶対位置推定手法は、絶対位置情報を自動運転システムへ利用する展望を与えるものであると考える。たとえば、磁気ネイル等の路上マーカが敷設されていない道路での自動運転、車両同士の絶対位置情報の交換によるプラトウンの合流・離脱の制御、インフラと車両の絶対位置情報の交換によるインフラによる車両監視や車両制御、ナビゲーションシステムとの融合などの応用が可能である。しかし、克服されなければならない問題も依然として残っている。たとえば、トンネルや建物による衛星情報の断絶、基地局からの補正情報の断絶、長距離走行時の基地局のハンドオーバー、DGPS受信機のコストなどの問題がある。

この章で提案する絶対位置推定手法の特徴は、推定アルゴリズムの中で、車両質量や、コーナリングパワー、重心位置などの車両パラメータを全く使用していない点である。そのため、この推定手法はあらゆる車両に全く変更を加えることなく適用できる汎用性を有している。車両パラメータを利用した場合の利点として、

- ・ヨーレートなどの情報を操舵角により推定できるため安価なシステム構成が実現できる
- ・カルマンフィルタのシステムパラメータを時不変パラメータのみで記述することが可能となり、定常カルマンフィルタを構築できる。その結果、カルマンフィルタの演算量が低減する。

を挙げることができるが、現在はヨーレートジャイロが安価に入手できることやコンピュータが十分高速であることを鑑み、上記利点よりも汎用性を重視したものとしている。但し、本研究では横滑り角を線形オブザーバーで推定しているため、この部分でのみ車両パラメータを利用している。

6.8 記号

- T_d : DGPSのサンプル周期[s] (0.2)
- T_c : 制御周期およびデッドレコニングのサンプル周期[s] (0.05)

T_f	: DGPS からの絶対位置情報の遅れ時間[s] (0.2)
X	: 絶対座標系における車両のX座標[m]
Y	: 絶対座標系における車両のY座標[m]
θ	: 絶対座標系における車両の方位角 (ヨー角)[rad]
Δx_s	: 車両座標系におけるサンプル時間あたりのx方向変位[m]
Δy_s	: 車両座標系におけるサンプル時間あたりのy方向変位[m]
V	: 車両の速度[m/s]
γ	: 車両のヨーレート[rad/s]
β	: 車両の重心における横滑り角[rad]
F	: カルマンフィルタのシステム行列
z	: カルマンフィルタの状態量
G	: カルマンフィルタのシステム行列 (システムノイズ部分)
w	: カルマンフィルタのシステムノイズ
n_v	: 速度計測誤差に起因する車両変位量の推定誤差[m]
n_γ	: ヨーレート計測誤差に起因する方位角変化量の誤差[rad]
m	: カルマンフィルタの観測量
H	: カルマンフィルタの観測方程式のシステム行列
P	: カルマンフィルタの推定誤差共分散行列
v	: カルマンフィルタの観測ノイズ
n_x	: DGPS のX方向の計測誤差[m]
n_y	: DGPS のY方向の計測誤差[m]
R	: カルマンフィルタの観測ノイズの共分散行列
Q	: カルマンフィルタのシステムノイズの共分散行列
K	: カルマンフィルタのカルマンゲイン
$\hat{z}_{n/m}$: 時刻 m における $z[n]$ の推定値
$\Delta \hat{P}_s$: 車両座標系におけるサンプル時間あたりの車両変位ベクトル[m]
$\Delta \hat{P}_a$: 絶対座標系におけるサンプル時間あたりの車両変位ベクトル[m]
\hat{P}_t	: カルマンフィルタにより推定された車両絶対位置ベクトル[m]
\hat{P}_{tc}	: \hat{P}_t の遅れを補償した車両絶対位置ベクトル[m]
θ_t	: カルマンフィルタにより推定された車両方位角[rad]
θ_{tc}	: θ_t の遅れを補償した車両方位角[rad]
$\Delta \hat{P}_p$: デッドレコニングによる絶対位置情報の補正ベクトル[m]
$\Delta \theta_c$: デッドレコニングによる方位角の補正值[rad]
X_m	: DGPS による絶対位置計測値のX座標[m]
Y_m	: DGPS による絶対位置計測値のY座標[m]
X_k	: カルマンフィルタにより推定された車両絶対位置のX座標[m]
Y_k	: カルマンフィルタにより推定された車両絶対位置のY座標[m]
X_{kc}	: X_k の遅れを補償した車両絶対位置推定値のX座標[m]
Y_{kc}	: Y_k の遅れを補償した車両絶対位置推定値のY座標[m]

ΔX_c	: デッドレコニングによる絶対位置推定値の X 座標補正值[m]
ΔY_c	: デッドレコニングによる絶対位置推定値の Y 座標補正值[m]
X_d	: デッドレコニングによる絶対位置推定値の X 座標[m]
Y_d	: デッドレコニングによる絶対位置推定値の Y 座標[m]
θ_d	: デッドレコニングによる方位角推定値[rad]
Lat_0	: 絶対位置基準点の緯度[deg]
Lon_0	: 絶対位置基準点の経度[deg]
c_{lat}	: 緯度から距離への変換係数[m/deg]
c_{lon}	: 経度から距離への変換係数[m/deg]
Lat_{gps}	: DGPS による緯度計測値[deg]
Lon_{gps}	: DGPS による経度計測値[deg]