

首都大学東京 博士(工学) 学位論文

適応スライディングモード制御の
車両システムへの適用に関する研究

2017年9月

溝尻 太一

首都大学東京

目次

第 1 章	序論	6
1.1	背景	7
1.2	交通事故の主要因と高齢化問題	8
1.3	地球温暖化問題の現状と電気自動車導入の効果	11
1.4	自動運転技術	14
1.5	本研究で扱う制御系を構築するための主要要素技術	19
1.6	本論文の目的	27
1.7	本論文の構成	28
第 2 章	本研究で扱う制御対象と制御器の構成	30
2.1	制御対象と参照モデル	31
第 3 章	位置決め制御のための参照軌道修正法	33
3.1	数値シミュレーション	35
3.2	おわりに	36
第 4 章	非線形切換面および時変切換面のスライディングモード制御への適用	38
4.1	楕円切換面の導出	39
4.2	楕円切換面を持つモデル追従スライディングモード制御則の導出	42
4.3	楕円切換面を持つスライディングモード制御の誤差収束時間	44
4.4	Lemniscate 切換面を持つスライディングモード制御	46
4.5	Lemniscate 曲線に基づく切換面を持つモデル追従スライディングモード 制御則の導出	49
4.6	Lemniscate 切換面を持つスライディングモード制御の誤差収束時間	51
4.7	滑らかな軌道に沿って時間変化する線形時変切換面	52
4.8	数値シミュレーション	58

4.9	おわりに	71
第 5 章	境界層幅適応則によるチャタリング抑止	72
5.1	チャタリング抑止に関する従来研究	72
5.2	境界層幅適応則の導出と安定性の証明	78
5.3	シミュレーション	79
5.4	おわりに	91
第 6 章	境界層幅適応則および楕円切換面を持つスライディングモード制御の車 間制御への応用	92
6.1	はじめに	92
6.2	車両モデル	94
6.3	ACC システムの構成	94
6.4	スライディングモード制御器の設計	96
6.5	シミュレーション	101
6.6	まとめ	115
6.7	おわりに	115
第 7 章	境界層幅適応則および参照軌道修正法の自動駐車システムへの応用	116
7.1	はじめに	116
7.2	路面と目標駐車位置観測モデル	118
7.3	自動駐車システムの構成	119
7.4	車両横方向制御器設計	119
7.5	車両前後方向制御の設計	131
7.6	シミュレーション	139
7.7	おわりに	160
第 8 章	結論	161
	参考文献	165
	謝辞	173
	論文要旨	174
	研究業績	177

目次

1.1	世界の高齢化率の推移	10
1.2	世界平均地上気温の変化	11
1.3	日本が排出する温室効果ガス (2014 年)	12
1.4	二酸化炭素排出量の内訳	13
1.5	段差を伴うコインパーキング	16
1.6	路面勾配を伴う駐車場	16
1.7	段差を伴う駐車場	17
1.8	マイクロプロセッサのトランジスタ数の推移	20
1.9	先行研究における適用手法の分類	22
1.10	各参照軌道の比較	25
1.11	各参照軌道のトラジェクトリー	25
1.12	本論文の構成	29
2.1	モデル追従スライディングモード制御のブロック線図	32
2.2	2 自由度制御と外乱オブザーバを組み合わせた手法のブロック線図	32
3.1	滑らかな軌道修正	36
4.1	質点系の直線運動	39
4.2	任意の初期状態から平衡点に至る楕円軌道	40
4.3	補助的な線形切換面	45
4.4	トーラス体の断面	47
4.5	Lemniscate 曲線	47
4.6	縦横比をスケーリングされた Lemniscate 曲線	48
4.7	An example of a smooth trajectory.	56
4.8	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=1.0$) 追従誤差の時間変化	61

4.9	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=1.0$) トラジェクトリー	61
4.10	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=1.0$) エネルギー消費	62
4.11	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=1.0$) 制御入力	62
4.12	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.7$) 追従誤差の時間変化	63
4.13	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.7$) トラジェクトリー	64
4.14	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.7$) エネルギー消費	64
4.15	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.7$) 制御入力	65
4.16	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.3$) 追従誤差の時間変化	66
4.17	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.3$) トラジェクトリー	66
4.18	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.3$) エネルギー消費	67
4.19	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.3$) 制御入力	67
4.20	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=-1.0$) 追従誤差の時間変化	68
4.21	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=-1.0$) トラジェクトリー	69
4.22	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=-1.0$) エネルギー消費	69
4.23	各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=-1.0$) 制御入力	70
5.1	Approximation of the sign function.	74
5.2	状態量の時間変化	83
5.3	追従誤差の時間変化	84
5.4	位相平面上のトラジェクトリー	85
5.5	制御入力	86
5.6	適応パラメータの時間変化	87
5.7	エネルギー消費量	88
5.8	躍度絶対値の積分値	89
5.9	追従誤差絶対値の積分値	90
6.1	車間制御システムのブロック線図	94
6.2	Simulation condition.	96
6.3	Auxiliary linear sliding surface.	98
6.4	Approximation of the sign function.	100
6.5	Inter-vehicle distance, relative velocity, and velocity of the main vehicle. . .	104
6.6	Tracking error state response.	105
6.7	Phase portraits.	105

6.8	Boundary layer width.	106
6.9	Acceleration, jerk, and control input.	106
6.10	Energy consumption and the integral of absolute jerk.	107
6.11	Inter-vehicle distance, relative velocity, and velocity of the main vehicle. . .	108
6.12	Tracking error state response.	109
6.13	Phase portraits.	109
6.14	Boundary layer width.	110
6.15	Acceleration, jerk, and control input.	110
6.16	Energy consumption and the integral of absolute jerk.	111
6.17	CarSim によるシミュレーション結果 (t=0)	112
6.18	CarSim によるシミュレーション結果 (t=2.010)	112
6.19	CarSim によるシミュレーション結果 (t=3.995)	113
6.20	CarSim によるシミュレーション結果 (t=6.005)	113
6.21	CarSim によるシミュレーション結果 (t=7.990)	114
6.22	CarSim によるシミュレーション結果 (t=10)	114
7.1	Road configuration and camera setting.	118
7.2	Block diagram of the system.	119
7.3	Curvature profile.	121
7.4	Sample trajectory.	122
7.5	Steer angle profile.	123
7.6	Calculation of a turning back point.	124
7.7	Similar enlargement of the base trajectory.	125
7.8	Generation of the trajectory with a turning back point.	125
7.9	Calculation of the error correction trajectory.	126
7.10	Lateral vehicle model and reference trajectory.	127
7.11	1/2 vehicle model which climb over a bump.	131
7.12	Simulation condition.	141
7.13	Operating sequence (Step1).	143
7.14	Operating sequence (Step2).	144
7.15	Operating sequence (Step3).	145
7.16	Error correction of the reference trajectory.	145
7.17	Trajectory of the proposed method.	146

7.18	Trajectory of the conventional method.	147
7.19	Lateral tracking of the proposed method.	148
7.20	Longitudinal tracking of the proposed method.	148
7.21	Control inputs of the proposed method.	149
7.22	Lateral tracking of the conventional method.	149
7.23	Longitudinal tracking of the conventional method.	150
7.24	Control inputs of the conventional method.	150
7.25	Control inputs of the proposed method.	155
7.26	Lateral tracking of the conventional method.	155
7.27	Longitudinal tracking of the conventional method.	156
7.28	Control inputs of the conventional method.	156
7.29	CarSim によるシミュレーション結果 (t=0)	157
7.30	CarSim によるシミュレーション結果 (t=5.988)	157
7.31	CarSim によるシミュレーション結果 (t=10.776)	158
7.32	CarSim によるシミュレーション結果 (t=11.576)	158
7.33	CarSim によるシミュレーション結果 (t=16)	159

表目次

1.1	世界各国の四輪車保有台数（2014 年末現在）	7
1.2	主要国の四輪車普及率（人口 1,000 人当たり台数および 1 台当たり人口 ／ 2014 年末現在）	9
1.3	自動運転の自動化レベル	14
1.4	先行研究の目的別分類表	21
4.1	シミュレーションパラメータ	58
4.2	初期状態	58
4.3	各手法の設計パラメータ	59
4.4	各手法のエネルギー消費量	70
5.1	Simulation parameter	80
5.2	Initial state	80
5.3	各手法の制御性能比較	91
6.1	設計パラメータ	95
6.2	Design parameter list	102
7.1	Parameters of the vehicle model and trajectory.	128
7.2	Parameter of the simulation model.	132
7.3	Configuration of the simulation.	140
7.4	Simulation results (measurement error).	151
7.5	Simulation results (positioning error).	152
7.6	Simulation results (error statistics).	153

第 1 章

序論

自動車の歴史は、およそ 250 年前のジェームズ・ワットの蒸気機関の発明 (1767 年) に始まり、我々の日々の暮らしや社会経済活動に欠かせない存在となっている。しかし、自動車の普及に伴い交通事故の増加や大気汚染などの社会問題が深刻化しており、安全対策や環境保全、省エネルギー・省資源などが喫緊の課題である。そのため近年、省エネルギー・環境負荷低減のために、電気自動車の普及が進んでいる。また、安全対策に関する課題を克服するために、交通事故原因の大半を占める人的要因に起因する事故低減の打開策として自動運転技術が注目を集めている。自動車は、多様な交通条件、気象条件、地理的条件など様々な環境で使用されるため、天候、路面状態、路面勾配、横風外乱、積載重量など、様々な不確かさに対してロバストなシステムを構成しなくてはならないという課題がある。

本研究では、電気自動車への自動運転技術の適用を想定し、不確かさに対するロバスト性を保ちつつ、滑らかに素早く省エネルギーで車両を制御するシステムを構築し、現在深刻な社会問題となっている交通事故および環境負荷を低減することを目的とする。そのために、車両システムの制御にスライディングモード制御を適用する。この際、パラメータに不確かさを含む、2 次の正準形で表される 1 入力 1 出力システムを扱う。スライディングモード制御は、パラメータ変動や外乱、モデル化誤差などの不確かさに対してロバスト性が高い非線形制御手法として良く知られている。しかしながら、チャタリング現象と呼ばれる切換面近傍で生じる高周波振動や、初期状態が切換超平面上にない場合に、初期状態からスライディングモードに至るまでの期間（到達モード）においてロバスト性が保証されないという問題があるため実システム適用への阻害要因となっていた。本研究では、スライディングモード制御の特徴である不確かさに対するロバスト性を保ちつつ、チャタリングを抑止するために境界層幅適応則を提案する。また、古典的な線形時不変切換面よ

りも滑らかに、素早く、省エネルギーで誤差追従する制御系を構築するために、非線形切換面および滑らかな軌道に沿って変化する線形時変切換面を提案する。さらに、張らによって提案された躍度の時間変化率を最小化することで得られる位置決め制御のための滑らかな参照軌道 [1] に基づき、位置、速度、加速度、躍度の初期条件および終端条件を自由端問題に拡張して、任意の初期条件から任意の終端条件に至る滑らかな参照軌道を導出する。導出した軌道に基づき、制御中に滑らかさを損なうことなく参照軌道を修正する手法を提案する。これらの提案手法を自動駐車システムおよび車間制御システムへ適用し、シミュレーションを通して有効性を示す。

1.1 背景

2014 年における全世界の四輪車の保有台数は表 1.1 に示すように 12 億 967 万台であり、表 1.2 を見てわかるように人口 1,000 人当たり 167 台、約 6 人に 1 台まで普及している [2]。このように自動車は、我々の日々の暮らしや社会・経済活動に欠かせない存在となっているが、近年、自動車の普及に伴い交通事故の増加や大気汚染などの社会問題が深刻化しており、安全対策や環境保全、省エネルギー・省資源などが喫緊の課題である [3]。

表 1.1: 世界各国の四輪車保有台数 (2014 年末現在)

単位:台

国	乗用車	トラック・バス	計
ドイツ	44,403,124	3,244,457	47,647,581
イタリア	37,080,753	4,865,167	41,945,920
フランス	31,800,000	6,280,000	38,080,000
イギリス	32,612,782	4,500,576	37,113,358
スペイン	22,114,278	5,148,126	27,262,404
オランダ	8,192,570	1,044,958	9,237,528
ベルギー	5,511,080	876,401	6,387,481
オーストリア	4,694,921	444,500	5,139,421
スウェーデン	4,585,520	581,206	5,166,726
ポーランド	20,069,000	3,565,000	23,634,000
スイス	4,384,490	444,717	4,829,207
トルコ	9,857,915	4,474,671	14,332,586
ロシア	40,850,000	9,650,000	50,500,000
アメリカ	120,983,811	137,043,118	258,026,929
カナダ	21,729,596	1,120,204	22,849,800
メキシコ	25,509,204	10,381,046	35,890,250
アルゼンチン	10,092,000	3,191,000	13,283,000
ブラジル	32,715,000	9,027,000	41,742,000
日本	60,667,517	16,520,949	77,188,466
中国	120,724,000	22,107,000	142,831,000
韓国	15,747,162	4,370,793	20,117,955
インド	27,174,000	10,928,000	38,102,000
タイ	8,381,000	7,224,000	15,605,000
インドネシア	12,595,000	8,278,000	20,873,000
オーストラリア	13,297,260	3,500,302	16,797,562
南アフリカ	6,620,891	3,013,447	9,634,338
その他	141,988,946	43,467,474	185,456,420
世界合計	884,381,820	325,292,112	1,209,673,932

資料：国土交通省、Ward's 等

出典：<http://www.jama.or.jp/world/world/index.html>

1.2 交通事故の主要因と高齢化問題

我が国の平成27年の交通事故発生件数は73万6,688件、死者数は4,859人、負傷者数は66万6,023人であった。特に、高齢者は他の年齢層に比べて交通事故における致死率が約6.6倍高く、交通事故死者数の約半数を占める[4]。また、我が国の交通事故による経済損失は、年間6兆円規模であり、GDP比1%を超えると試算されている[5]。

自動車運転中の事故原因の約9割は人為的ミスであると言われている[6,7]。特に、高齢者は視覚・聴覚能力が低下するため交通環境を認知する能力が低くなる。また、判断機能も低下するため、認知した情報に対して瞬時に判断する能力も低下する。さらに、運動機能も低下するため瞬時に運転行動を起こすことが困難になる。そのため、特に短時間で認知・判断・行動を繰り返すようなシーンにおける自動車運転能力が低下する[8]。

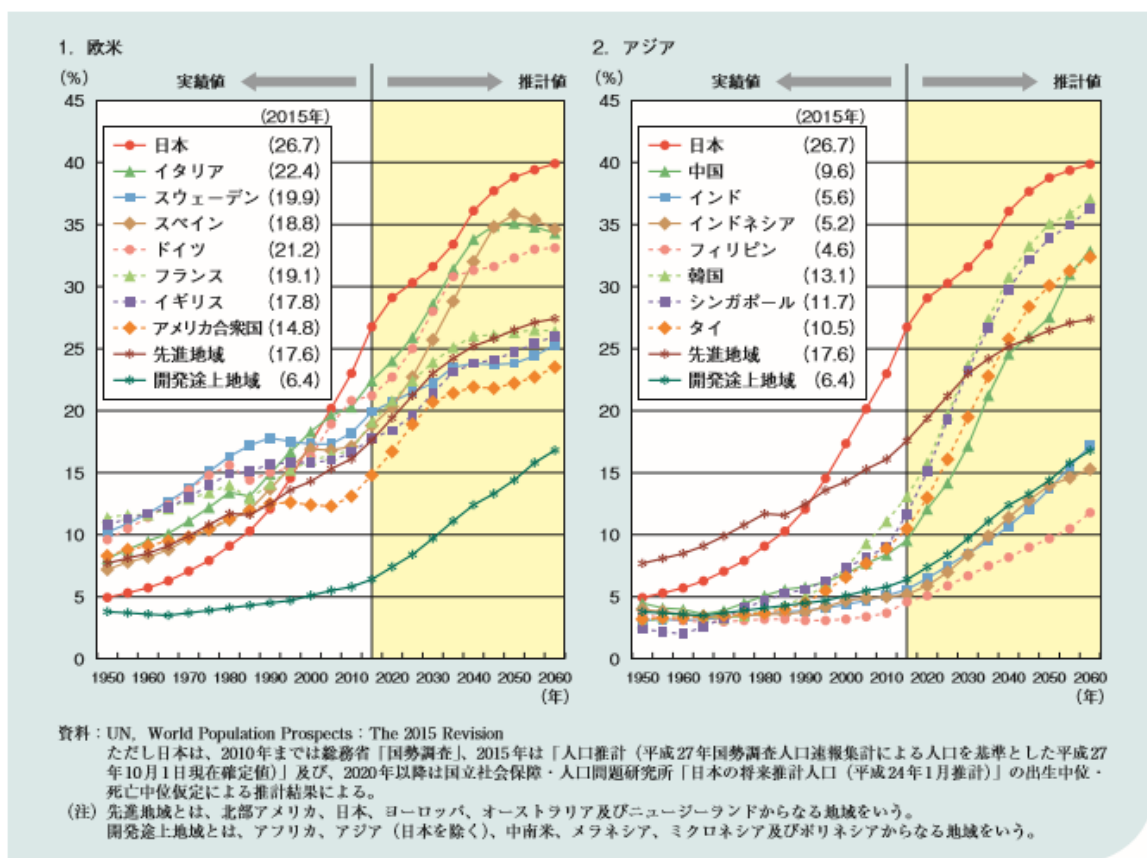
2015年10月1日現在、我が国の総人口は1億2,711万人、その内65歳以上の高齢者人口は3,392万人で、総人口に占める65歳以上の人口の割合（高齢化率）は、26.7%であり世界で最も高い。今や日本は人口の4人に1人が高齢者という超高齢社会に突入しており、今後ますます高齢化が進行していくことが予想されている[9]。また、高齢化の進行は日本をはじめとする先進国だけの問題ではなく、図1.1に示すように、新興国も含めて全世界的に社会問題となることが予想されている。今後、高齢者の交通事故を低減することが社会的に重要な課題となるであろう。

表 1.2: 主要国の四輪車普及率（人口 1,000 人当たり台数および 1 台当たり人口／2014 年末現在）

単位:台 👤 単位:人

国	人口1,000人当たりの台数		全四輪車の1台当たり人口 ()内は乗用車	
	全四輪車	乗用車	台数	人口
アメリカ	809	379	1.2 (2.6)	👤👤
オーストラリア	715	566	1.4 (1.8)	👤👤
イタリア	687	607	1.5 (1.6)	👤👤
カナダ	644	612	1.6 (1.6)	👤👤
日本	608	478	1.6 (2.1)	👤👤
オーストリア	605	552	1.7 (1.8)	👤👤
フランス	594	496	1.7 (2.0)	👤👤
スイス	589	535	1.7 (1.9)	👤👤
スペイン	587	476	1.7 (2.1)	👤👤
イギリス	583	512	1.7 (2.0)	👤👤
ドイツ	576	537	1.7 (1.9)	👤👤
ベルギー	575	496	1.7 (2.0)	👤👤
世界平均	167	122	6.0 (8.2)	👤👤👤👤👤👤

資料：国土交通省、Ward's 等 世界人口資料：OECD、国連
 出典：http://www.jama.or.jp/world/world/index.html

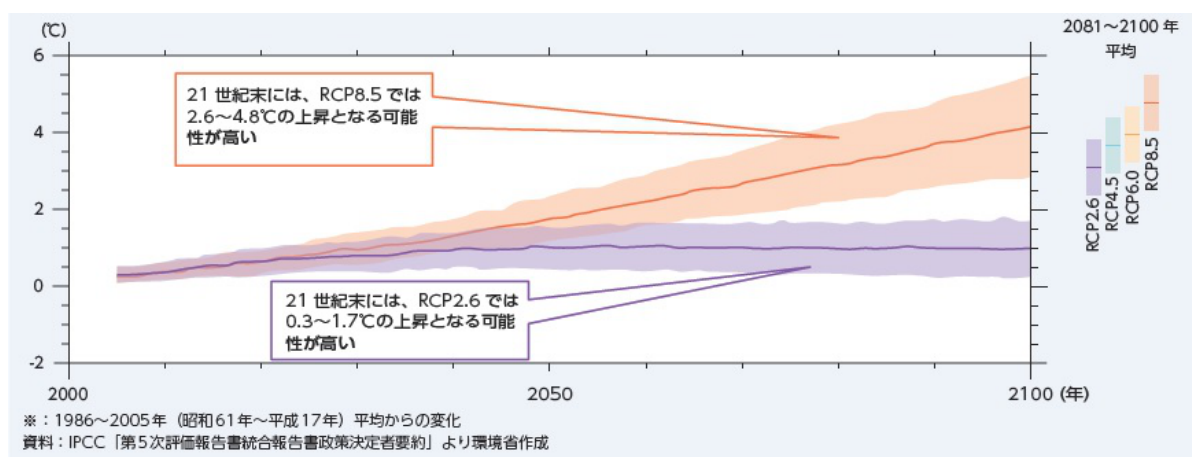


出典：内閣府 高齢社会白書 平成27年度 高齢化の状況及び高齢社会対策の実施状況

図 1.1: 世界の高齢化率の推移

1.3 地球温暖化問題の現状と電気自動車導入の効果

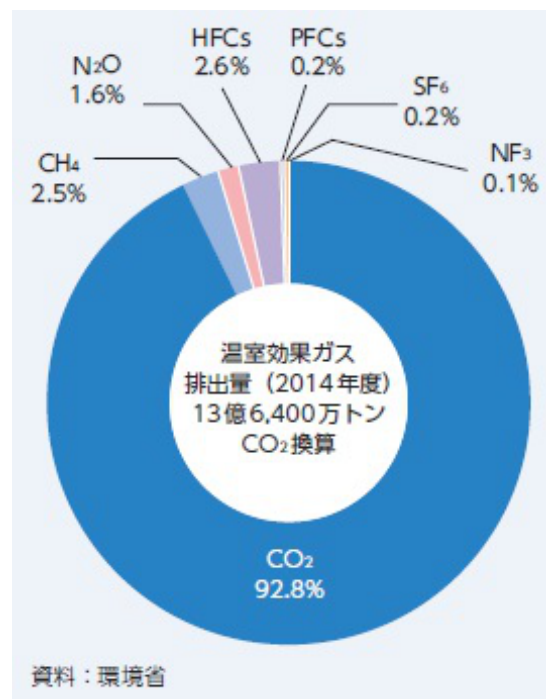
日本における20世紀末に対する21世紀末の年平均気温の将来予測として、次のような予測がされている。温暖化対策を講じ、その効果が有効であった場合であっても、日本全国で平均1.1℃上昇すると予測されている。また、最悪の場合では、日本全国で平均4.4℃上昇すると予測されている。参考のために、図1.2に、世界平均地上気温の変化を示す。現在、気候変動の影響として、気温・水温の上昇や、降水日数の減少等により農作物の収量、品質低下、漁獲量、動植物分布域変化などの問題が、すでに顕在化している。また、今後さらに農作物の品質低下や、様々な自然災害の増加などが予想されている [10]。



出典：環境省平成27年度環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書

図1.2: 世界平均地上気温の変化

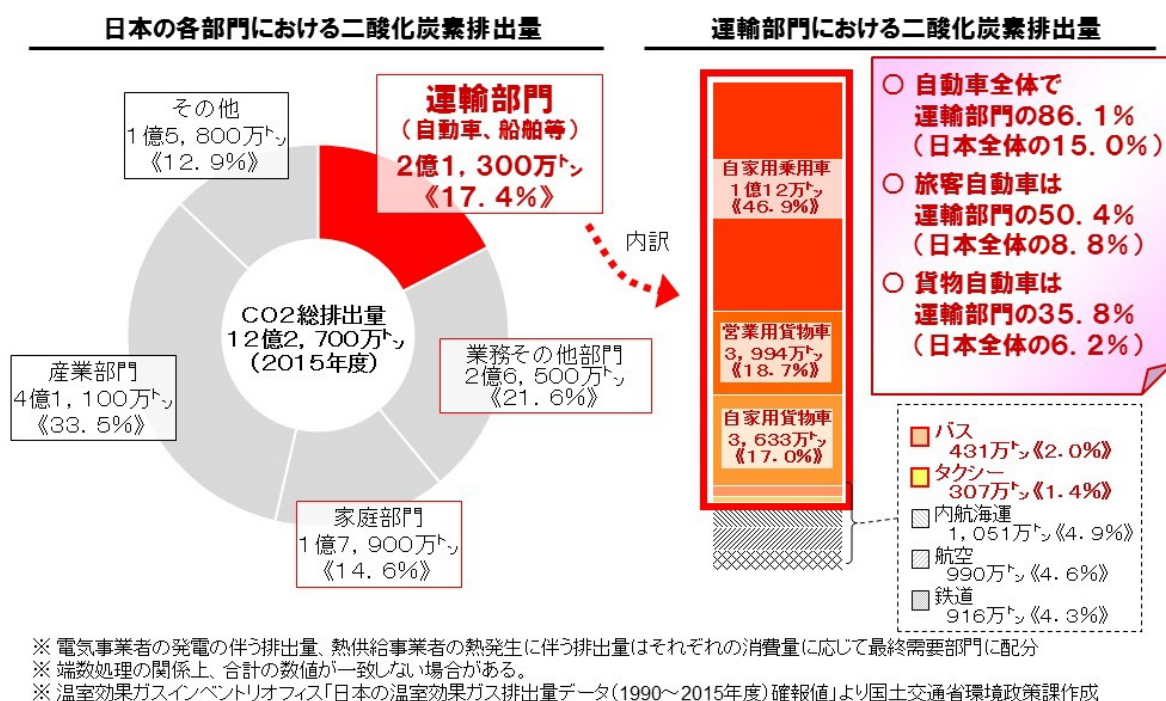
図 1.3 に、2014 年度の日本における温室効果ガス排出量の割合を示す。図を見てわかるように、日本における温室効果ガス排出量の約 93% が CO₂ であることがわかる。



出典：環境省平成 27 年度環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書

図 1.3: 日本が排出する温室効果ガス (2014 年)

1990年から2015年までの日本の温室効果ガス排出量の内訳を、図1.4に示す。図を見てわかるように、CO₂の総排出量に対する自動車が発するCO₂の割合は15%である[11]。1km走行当りのCO₂排出量は、ガソリン自動車193g-CO₂/kmに対して、電気自動車は49g-CO₂/kmであり、CO₂排出量を約75%削減できることから電気自動車の導入が、温室効果ガス低減による地球温暖化対策効果に対して最も高いと言われている[12]。現在、電気自動車を導入するだけでなく、更なるCO₂排出量低減が望まれており、ITS (Intelligent Transport Systems) 技術を導入して燃費を向上させるなど、様々な研究がなされている[13-16]。



出典：国土交通省ホームページ（運輸部門における二酸化炭素排出量）

図 1.4: 二酸化炭素排出量の内訳

1.4 自動運転技術

本節では、自動運転技術の研究背景と先行研究について述べる。はじめに、自動運転技術の概要について述べ、次いで本研究で取り扱う自動駐車技術、車間制御技術の先行研究を紹介する。

近い将来予想される世界的な高齢化社会の到来に向けて、高度な運転支援・自動運転システムの実現が望まれている。自動運転はアメリカ国防高等研究計画局（DARPA）が主催した自動運転技術の競技大会である未舗装路を想定したグランドチャレンジ（2004, 2005）、市街地コースを想定したアーバンチャレンジ（2007）をきっかけにして、近年急速に実現可能性が高まった。現在、Google や、主要な自動車メーカー、自動車部品サプライヤーなどが自動運転システムの普及・製品化を目指して研究開発を進めている。また、学術的研究としては [17–20] などが挙げられる。

米国運輸省道路交通安全局（NHTSA）は自動運転の自動化レベルを4段階に分け、段階的に自動化技術を実現する戦略を提言している。表 1.3 に自動運転の自動化レベルを示す。この戦略は、比較的危険度が低い低速域や、自動車専用道路など限定された環境における自動運転から、より危険度が高い高速域や一般道などの複雑な状況へ、段階的に自動運転の適用範囲を拡大する戦略である [21]。現在、普及している自動運転技術は、自動化レベル1の加減速や操舵などの単一特定機能を自動化したシステムであり、同一車線内での先行車追従（Auto Cruise Control）およびレーンキープ制御（Lane Keep Assist）、駐車支援（Intelligent Parking Assist）、横滑り防止装置（Electronic Stability Control system）による旋回時における車両姿勢安定化を目的としたシステムなどが実用化されている。

表 1.3: 自動運転の自動化レベル

自動化レベル	種別	システム例	備考
0	手動運転	—	—
1	運転支援システム	ACC,ESC,LKA,IPA	加減速、操舵などの単一特定機能の自動化。事故責任は運転者が負う
2	部分的な自動化	ACC+LKA	加減速、操舵などの複数の機能が統合され自動化されたシステム。事故責任は運転者が負う
3	状況限定自動走行システム	—	緊急時だけ運転者が対応する。事故責任は運転者が負う
4	完全自動走行システム	—	全ての操作を自動車が代行、運転者は操作に全く関与しない。運転者は事故責任を負わない

National Highway Traffic Safety Administration Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles
を基に作成

1.4.1 自動駐車技術

車両自動制御の究極の姿である運転の完全自動化の実現には、いまだ多くの技術課題が存在するものの、駐車のような低車速における特定の運転状況を前提とすれば、運転操作の一部を自動化可能である。駐車時の運転操作の煩わしさを解消し、安全性や快適性を向上するために操舵を自動化した駐車支援システム [22] が実用化されている。現在実用化されている駐車支援システムでは、車載カメラや超音波センサを用いて目標駐車位置を検出して目標駐車位置に至る軌跡を算出したうえで、この軌跡に沿って走行するように自動操舵する手法が主流である。この駐車支援システムでは車両横方向制御が自動化されているものの、車両前後方向制御はドライバーがアクセルやブレーキ操作する必要がある。

高齢化社会の到来に伴い、さらなる運転の自動化が望まれており、車両前後方向制御と横方向制御を統合したシステムの開発が急務である。先行研究では、路面が平坦路と見做せる理想的な環境を前提とした自動駐車システム [22–28] が検討されている。これらの研究では、実環境におけるパラメータ変動やモデル化誤差、路面外乱などの不確かさについて考慮されておらず、実環境における駐車シーンへの適用においてロバスト性に課題がある。ここで、実環境に存在する路面外乱の一例として、路面勾配や、うねり、コインパーキングの車止めなどが挙げられる。

実際の駐車シーンにおいて、路面勾配や段差が存在しても、人が運転操作する場合は、普段あまり意識することなく駐車することができる。しかしながら、通常、平坦路であることを想定した制御系で構成された自動駐車システムでは追従遅れが生じて車両位置決め精度の悪化、乗り心地悪化などの問題が生じる。図 1.5 から図 1.7 に、実環境に存在する路面外乱の例を示す。このように、路面勾配や段差などの路面外乱は、意外と身近に存在することがわかる。そのため、自動駐車システムの適用範囲を拡大するためには、これらの路面外乱に対してロバストな制御系を構築しなくてはならない。



図 1.5: 段差を伴うコインパーキング



図 1.6: 路面勾配を伴う駐車場



図 1.7: 段差を伴う駐車場

1.4.2 車間制御技術

Auto Cruise Control system (ACC) は、先行車と自車両間の距離を Radio Detection And Ranging (RADAR) や、Light Detection and Ranging (LIDAR) を用いて観測し、車間を自動的に所望の距離に保つシステムである。このシステムの目的は、車両前後方向制御を自動化することにより、ドライバーの運転負荷を低減することである。

一般に、産業界で広く用いられている PID 制御を代表とする線形状態フィードバック制御則では、制御対象を特性変動が無い線形時不変システムとみなして、観測された状態量、または観測された状態量と既知のシステムダイナミクスに基づき推定された状態量に一定のフィードバックゲインをかけてシステムを安定化する。しかし、自動車のように様々な環境下で運用される複雑な制御対象では、システムの非線形性やパラメータ変動が無視できない場合が多い。この様な場合、一定のフィードバックゲインを用いた線形状態フィードバックでは所望の制御性能を得ることが難しい。そのため、従来から非線形システムを区分別線形化して、ゲインスケジュール制御 [29] が適用されてきた。ゲインスケジュール制御は、あらかじめ用意されたゲインマップに基づき、状態量に応じてフィードバックゲインを調整する手法である。しかし、この手法は想定される全ての動作領域に対してゲインマップを作成する必要があるため、制御設計に大変な労力を要する。線形状態フィードバック制御則を用いた車間制御システムとして [30] が提案されており、現在、この制御手法が実用化されている。この手法で採用している制御則は、2 自由度制御および外乱オブザーバで構成されている。また、ゲインスケジュール制御を用いて、車速に応じて 2 自由度制御系の規範モデルパラメータおよびフィードバックゲインを調整している。

これに対して、不確かさに対して、さらにロバスト性が高い制御系を構築するために、車間制御にスライディングモード制御を適用した先行研究 [31–36] が行われている。しかし、これらの先行研究では、過大な制御量が許容されており、乗り心地について考慮されていない。そのため、実システム適用には、未だに多くの課題がある。

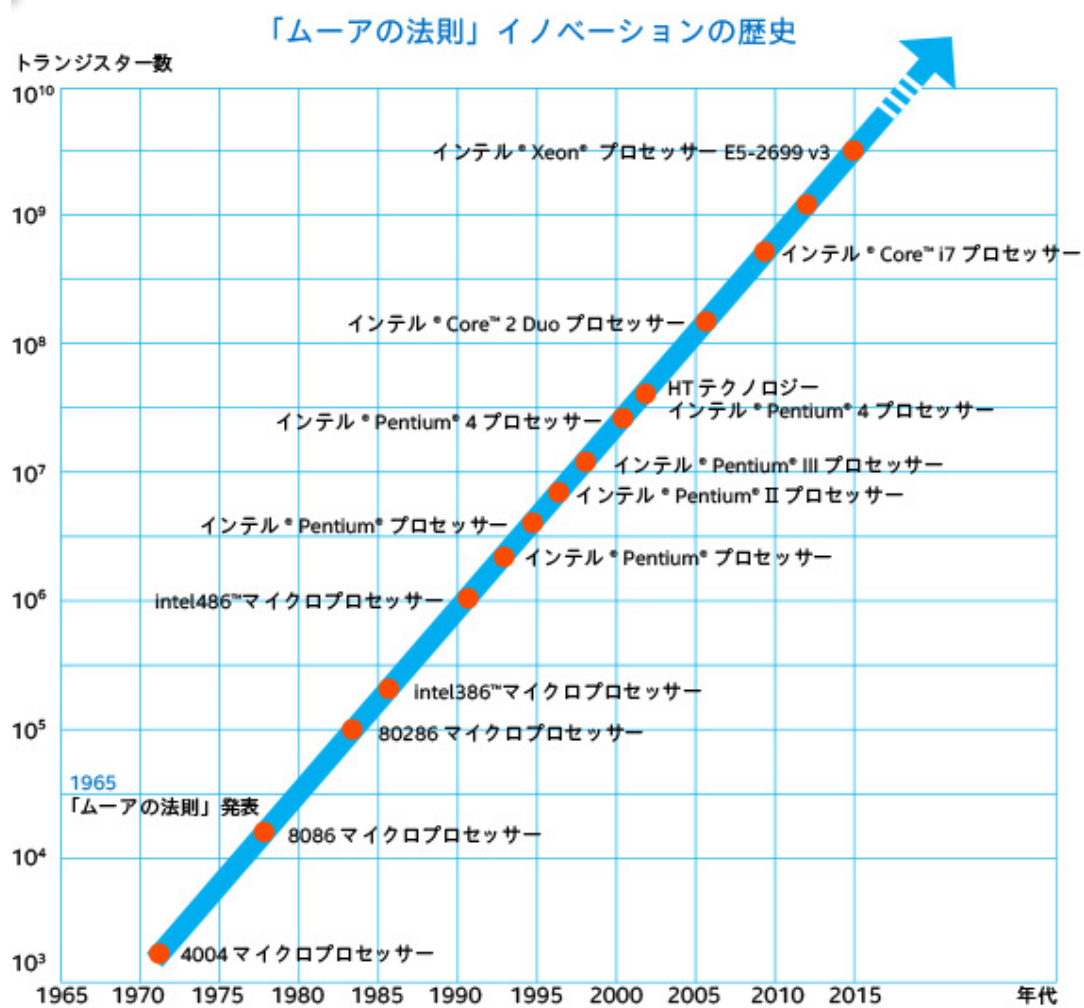
1.5 本研究で扱う制御系を構築するための主要要素技術

本節では、「不確かさに対してロバストな自動運転技術」を実現するために本研究で適用する主要要素技術について研究背景と先行研究を紹介する。はじめに、スライディングモード制御の歴史と従来研究について述べる。次いで、位置決め制御のための滑らかな参照軌道について述べる。

1.5.1 スライディングモード制御

スライディングモード制御は、パラメータ変動や外乱、モデル化誤差などの不確かさに対してロバスト性が高い非線形制御手法としてよく知られている。スライディングモード制御は、システムの状態空間において切換超平面を定義し、この切換超平面上に状態量が拘束された状態（スライディングモード）において不確かさの影響を受けにくいという特徴を持つ。特にマッチング条件と呼ばれる不確かさが制御入力チャンネルで表せるという条件を満たす場合に、その不確かさの影響を無効化できるという特長を持つため、近年盛んに実システムへの適用が検討されている [37]。

スライディングモード制御の起源である可変構造制御系 (Variable Structure Control System) は 1930 年代初頭に旧ソ連 (現ロシア) で誕生したと言われており、英語訳の著書 [38,39] の出版により広く知られるようになった。しかし、当時これらの文献で紹介されたスライディングモード制御は理論的研究が中心で実システムへの適用は困難であった。その理由として、切換制御に理想的な切換関数を用いていたためチャタリング現象が解決されていなかったことと、コンピュータの処理能力不足が挙げられる。1950 年代後期から 1960 年代初期にかけて初めてトランジスタを用いたコンピュータが表れた [40]。しかし、当時のコンピュータはアポロ 11 号に用いられた誘導コンピュータ、AGC (Apollo Guidance Computer) にみられるように、数千程度の総ゲート数で構成されており、今日のコンピュータに比べて計算能力が低く、複雑な制御ロジックを実装するのが困難であった [41]。参考のために、図 1.8 にマイクロプロセッサのトランジスタ数の推移を示す。その後、チャタリング現象の克服法が提案され、さらに 1980 年代以降にコンピュータの処理能力が向上したことによりスライディングモード制御は理論研究と共に応用研究も活発化した [42]。



出典：© Intel Corporation <http://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/innovation/processor.html>
 Intel, インテル, Intel ロゴ, Intel Core, Pentium, Xeon は, アメリカ合衆国および / または
 その他の国における Intel Corporation またはその子会社の商標または登録商標です

図 1.8: マイクロプロセッサのトランジスタ数の推移

1.5.2 先行研究

スライディングモード制御は、不確かさに対するロバスト性が高いという特長を持つ非線形制御手法である。しかし、システムの状態量が切換超平面上に拘束された状態（スライディングモード）において、チャタリングと呼ばれる高周波振動や、初期状態が切換超平面上にない場合に、初期状態からスライディングモードに至るまでの期間（到達モード）においてロバスト性が保証されないという課題がある。特に、チャタリングは、スライディングモード制御の最大の欠点であり、実システム適用への阻害要因であった。そのため、従来からこれらの欠点を克服するために様々な研究が行われてきた。表 1.4 に、スライディングモード制御の主な先行研究の目的別分類表を示す。表を見てわかるように、スライディングモード制御の先行研究は、主にチャタリング抑止を目的としたゲイン調整手法と、到達モード除去を目的とした切換面の調整手法に大別できる。

表 1.4: 先行研究の目的別分類表

主な目的	研究対象		時不変	時変
チャタリング抑止	ゲイン	切換制御	Utkin [43]	Poznyak [44] 陳 [45]
		境界層幅	Utkin [43]	Slotine [46] [47–59]
到達モード除去	切換面	線形	Utkin [43] Levant [61]	Choi [60] Otsuki [62] Faqir [63]
		非線形	Kuo-Kai [64] Gorugantu [65] Azad [66]	—
	その他	Integral SMC	Utkin [67]	—

図 1.9 に先行研究における適用手法の分類を示す。ゲイン調整法に分類される先行研究は、切換制御ゲイン調整手法と境界層幅調整手法に分類できる。また、切換面調整手法は、線形切換面を用いる手法と非線形切換面を用いる手法に分類できる。さらに、線形切換面を用いる手法は時変切換面を用いる手法と高次状態量を用いた **Higher Order Sliding Mode Control** に分類できる。これらの他に、**Integral SMC** が挙げられる。

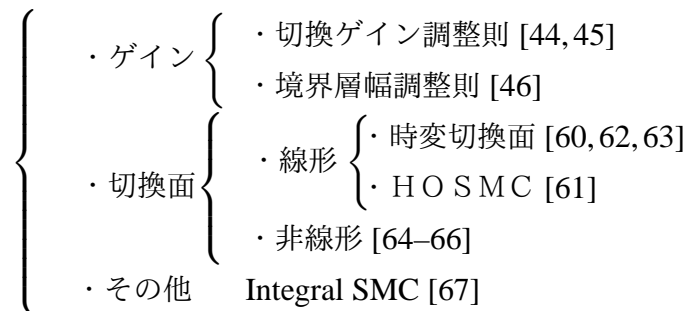


図 1.9: 先行研究における適用手法の分類

線形時変切換面 [60, 62, 63] は、切換面の傾きや切片が時間変化する線形時変切換面を用いて、状態量が常に切換面上に存在するように調整する手法である。これにより、ロバスト性が保証されない到達モードを除去する。

Higher Order Sliding Mode (HOSM) [61] は、切換関数の高次微分量を用いて制御入力を高次微分量の積分値として与えることによりチャタリングを抑止する。

非線形切換面は、初期状態から平衡状態に至る非線形切換面を用いることにより、到達モードを除去する。2つの双曲線を組み合わせて **Bang - Bang** 制御の軌跡に似た軌跡を切換面に用いる手法 [65] では、到達モードを除去でき、誤差収束時間が陽に得られる。また、位置決め制御において、目標位置に至る、あらかじめ決められた速度プロファイルを用いて描いた軌跡を切換面として用いる手法 [64] などがある。

その他に、**Integral Sliding Mode Control (ISMC)** [67] が提案されている。この手法は、あらかじめノミナルモデルに対して何らかの制御則を適用した上で、さらに外乱やモデル化誤差などの不確かさを補償する切換制御入力項を加える。この際、ノミナルモデルに対する追従誤差を補助変数として定義し、スライディングモード制御における切換面の切片項として導入することにより到達モードを低減する。この手法は、平行移動する時変切換面を用いた場合と等価である。

1.5.3 滑らかな参照軌道

制御対象の状態量を，目標とする参照軌道に追従させることを目的とした制御問題をサーボ問題という．ここで，制御対象に所望の動作をさせるためには，所望の動作を事前に設計する必要がある．通常，制御対象が発生しうる制御量は有限であり，この限られた制御量の下で，滑らかに，素早く，省エネルギーで制御対象を動作をさせたいという要求が生じることが多い．一般に，制御対象を素早く動作させるためには大きな制御量を必要とし，エネルギー消費量も増大する．これに対して，滑らかさを重視すると，制御量やエネルギー消費量は低減されるものの，素早さが犠牲となる．そのため，通常，これらの要求を同時に最小化することはできず，トレードオフの関係にある．

Bang-Bang 制御 [68]，は最短時間制御問題としてよく知られている．ここで， n 次の線形時不変系に対する最適制御は，最大制御量を $b > 0$ と置いたとき，制御入力を $\pm b$ として，高々 $n - 1$ 回の切換信号により得られる．Bang-Bang 制御は時間最適であるが，滑らかさが犠牲となっている．これに対して，位置決め制御のための滑らかな参照軌道として躍度最小化軌道が知られている [69–71]．躍度は単位時間当たりの加速度変化率であり，運動の滑らかさを表す指標として用いられる．躍度最小化軌道は，制御対象を始点から終点まで移動する行程において，加速度変化（躍度）が最小となる最適軌道である．躍度最小化軌道は式 (1.1) に示す 5 次の多項式で表される．

$$S(t) = L \left\{ 6 \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 - 15 \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 + 10 \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 \right\} \quad (1.1)$$

ここで， $S(t)$ は初期位置 0 を始点とした時刻 t における位置を表しており， L は目標位置， t_f は目標位置到達時間を表している．

従来から，エルミート曲線，ベジェ曲線，スプライン曲線などの多項式に基づく参照軌道 [72, 73] や，クロソイド曲線 [74]， C^∞ 級の滑らかな関数である正弦波を用いた参照軌道 [75, 76] など様々な手法が提案されてきた．式 (1.2) に，正弦波を用いた参照軌道を示す．ここで， L は，初期位置から目標位置までの距離， t_f は目標位置までの到達時間である．

$$S(t) = L \left\{ \frac{t}{t_f} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{t}{t_f} \right) \right\} \quad (1.2)$$

工作機械の送り動作における動作計画では，一般に“台形速度”，“台形加速度”，“ベル型加速度”プロファイルが用いられる．ここで，“台形速度”の位置の時間変化プロファイルは 2 次多項式で表される．この場合，加速度プロファイルはステップ状の波形となり，

加速度変化（躍度）がインパルス波形となるため高調波成分を多く含み機械構造やサーボ系の共振モードを加振しやすいという問題がある．これに対して，“台形加速度”は，位置の時間変化プロファイルが 3 次多項式で表され，加速度プロファイルが連続波形となる．“ベル型加速度”は位置の時間変化プロファイルが 5 次多項式で表され，“台形速度”や“台形加速度”に比べて，より滑らかな加速度変化（躍度）が実現できる．さらに，高調波成分も低減されることが報告されている [77]．

正弦波を用いた参照軌道と躍度最小化軌道は始点と終点において，躍度が不連続変化するため，機械系の位置決め制御に適用した場合に始点および終点において振動を誘発するという課題があった．この問題を解決するために張ら [1] は躍度の時間変化を最小化する軌道を提案し，位置決めの場合の始点および終点において躍度がゼロとなる滑らかな最適軌道を提案した．張らが提案した滑らかな参照軌道は，式 (1.3) に示す 7 次の多項式で表される．

$$S(t) = L \left\{ -20 \left(\frac{t}{t_f} \right)^7 + 70 \left(\frac{t}{t_f} \right)^6 - 84 \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 + 35 \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 \right\} \quad (1.3)$$

ここで， $S(t)$ は初期位置 0 を始点とした時刻 t における位置を表しており， L は目標位置， t_f は目標位置到達時間を表している．図 1.10 に，Bang-Bang 制御，躍度最小化軌道，躍度の時間変化率最小化軌道，正弦波を用いた軌道の一例を示す．同図は，目標位置 1m，目標到達時間 1s の場合の各軌道の位置，速度，加速度，躍度の時間変化を表している．また，図 1.11 に，位相平面上でのこれらの軌道のトラジェクトリーを示す．

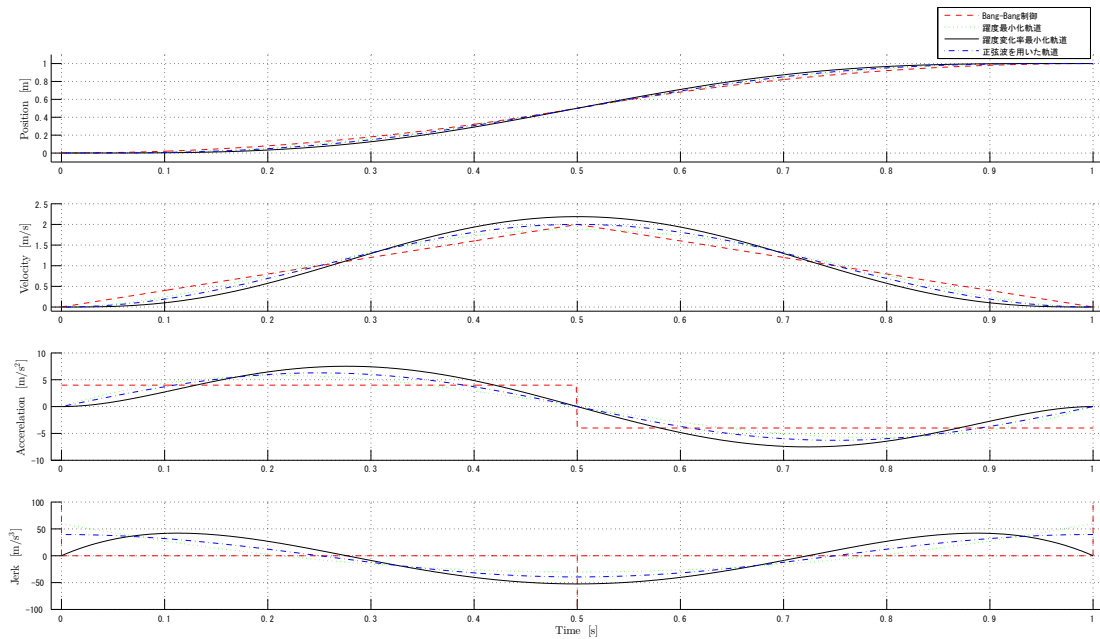


図 1.10: 各参照軌道の比較

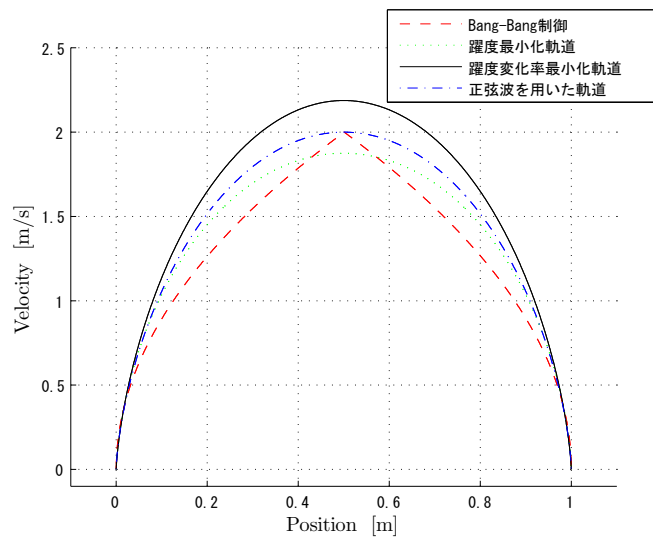


図 1.11: 各参照軌道のトラジェクトリー

これらの滑らかな軌道は、位置決め制御の参照軌道として定式化されているため、初期条件と終端条件終点において、終了位置以外の状態量は全て0である。一般的なサーボ問題では、動作中に周囲環境が変化し、当初想定していた参照軌道を変更する必要がある場合がある。そこで、制御対象が参照軌道に追従中に、滑らかさを損なわずに滑らかに位

位置決め参照軌道を修正する手法が必要となる。参照軌道の滑らかさを損なわずに参照軌道を修正する手法の先行研究として [78] が提案されている。この文献では、位置の時間変化プロファイルが 3 次多項式で表される“台形加速度”を用いた参照軌道において、位置決め動作中に滑らかに参照軌道を修正する手法が提案されている。この手法では、3 次多項式で表される参照軌道のプロファイルにおいて、加速度が台形波形であることと、躍度が符号の異なるステップ状波形であることに着目して、修正前の速度プロファイルを 7 つの区間に分割し、各区間ごとに状態量を解析的に解く。各区間ごとの状態量から任意の時刻における状態量を算出して修正後の軌道を導出している。

また、車両制御における滑らかな速度変化プロファイルの生成手法の従来研究として [79] がある。この文献では、“ベル型加速度”を持つ躍度最小化軌道による参照軌道を用いて、任意の初期状態（速度，加速度）から、任意の目標状態（速度，加速度）に至る滑らかな参照軌道が導出されている。しかし、これらの先行研究では、参照軌道の次数が低く、滑らかさが十分ではなかったり、速度制御における参照軌道の修正のみを扱っているため、滑らかさを保ちつつ位置決め制御の参照軌道を修正できない。

1.6 本論文の目的

本研究では、現在深刻な社会問題となっている交通事故および環境負荷を低減することを目的とする。そのために、電気自動車への適用を想定した「不確かさに対するロバスト性を保ちつつ滑らかに素早く省エネルギーで車両を制御する手法」を構築し、自動運転技術の適用範囲拡大を図る。この際、パラメータ変動や外乱、モデル化誤差などの不確かさに対してロバスト性が高い非線形制御手法として良く知られているスライディングモード制御を適用する。スライディングモード制御には、チャタリングと呼ばれる高周波振動や、初期状態が切換超平面上に存在しない場合に、初期状態からスライディングモードに至るまでの期間（到達モード）においてロバスト性が保証されないという問題がある。そのため、これらの問題がスライディングモード制御の実システム適用の阻害要因となっていた。また、参照軌道に沿って動作するサーボ系において、途中で参照軌道を変更する必要が生じた場合、滑らかに参照軌道を変更することは困難であった。本研究では、これらの問題を解決するために、次に示す3つの手法を提案する。

- (i) 境界層幅適応則の提案
- (ii) 非線形切換面および滑らかな参照軌道に沿って変化する線形時変切換面の提案
- (iii) 参照軌道の誤差修正手法の提案

また、自動運転技術への提案手法適用のケーススタディとして、自動駐車システムおよび車間制御システムに適用して有効性を示す。

自動駐車システムの車両前後方向制御では、線形時不変切換面を用いた古典的なスライディングモード制御手法に「(i) 境界層幅適応則」を適用する。ここで、不確かさとして、一定の路面勾配および段差が存在する場合の車両位置決め制御のシミュレーションを行う。平坦路に接続する一定勾配路面は、緩やかに連続変化する不確かさ、段差は、急激に不連続変化する不確かさで見做すことができる。平坦路を走行することを想定した滑らかな参照軌道に沿って車両位置決め制御中に、未知の路面勾配や段差が存在する場合において、提案手法を適用することによりスライディングモード制御の最大の特長であるロバスト性を損なうことなくチャタリングを抑止できることを示す。また、「(iii) 参照軌道の誤差修正手法」を適用することにより、走行中に目標駐車位置を再検出して、駐車開始位置における目標駐車位置の検出誤差を滑らかに修正できることを示す。さらに、車両横方向制御において、前方注視点距離を導入した厳密線形化手法を適用し、先に述べた車両前後方向制御と統合することにより、路面外乱や目標駐車位置の観測誤差が存在しても乗り心

地を損なうことなく、滑らかに動作する高精度な自動駐車システムを構築する。

車間制御システムでは、「(ii) 非線形切換面」として楕円切換面を持つスライディングモード制御に「(i) 境界層幅適応則」を適用する。自車両が一定車速で先行車に追従中に先行車と自車両間に他車両が割り込むシーンのシミュレーションを行う。提案手法が、従来手法と同等の誤差追従性能を実現しつつ、従来手法よりも滑らかに、省エネルギーで車間制御できることを示す。ここでいう従来手法は、一定の境界層幅を適用した古典的な線形時不変切換面を持つスライディングモード制御である。本研究では、乗り心地や制御性能を犠牲にすることなく様々な不確かさに対してロバストな制御系を構築し、自動運転技術に適用することにより自動運転システムの適用範囲の拡大を目指す。

1.7 本論文の構成

本論文は 8 章から構成されている。本論文の構成を図 1.12 に示す。

第 1 章では、本研究の位置づけと社会的意義および、技術的な背景と目的を述べた。

第 2 章では、本研究で扱う制御対象と制御器の構成を説明する。本研究では制御対象に 1 入力 1 出力の 2 次正準形で表されるシステムを扱う。また、滑らかな参照軌道に沿って動作するモデル追従制御系を構成する。

第 3 章では、位置決め制御のための滑らかな参照軌道を扱う。ここで、張ら [1] によって提案された位置決め制御のための滑らかな軌道を導出する最適化問題を、任意の初期条件と終端条件に拡張し、任意の初期状態から任意の終端状態に至る滑らかな軌道を導出する。数値シミュレーションにより、位置決め制御中に当初の目標位置を修正する必要性が生じた場合に、滑らかさを損なうことなく参照軌道を修正できることを示す。

第 4 章では、非線形切換面と、滑らかな参照軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を提案する。非線形切換面として楕円切換面と Lemniscate 切換面を提案し、非線形切換面を持つスライディングモード制御則を導出する。また、第 3 章で紹介した滑らかな参照軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を持つスライディングモード制御則を導出する。数値シミュレーションにより、提案手法と従来線形時不変切換面を持つスライディングモード制御の制御性能を比較し、有効性を示す。

第 5 章では、チャタリング抑止に関する従来研究を紹介する。また、提案する境界層幅適応則を導出し、安定性を証明する。数値シミュレーションにより提案手法と従来手法の制御性能を比較し、提案手法の有効性を示す。

第 6 章では、車間制御に楕円切換面を持つスライディングモード制御と境界層幅適応則を適用する。自車両が一定車速で先行車に追従中に他車両が割り込むシーンのシミュレー

ションを通して提案手法の有効性を示す。

第7章では、自動駐車システムに線形時不変切換面を持つスライディングモード制御に境界層幅適応則と、第3章で説明する走行中に滑らかさを損なうことなく参照軌道を修正する手法を適用する。走行中に目標駐車位置を再検出して、駐車開始位置における目標駐車位置の検出誤差を滑らかに修正する。さらに、車両横方向制御において、前方注視点距離を導入した厳密線形化手法を適用し、先に述べた車両前後方向制御と統合することにより、路面外乱や目標駐車位置の観測誤差が存在しても乗り心地を損なうことなく、滑らかに動作する自動駐車システムを構築する。

第8章では、本論文の結論を述べる。また、今後の課題と研究の展望について述べる。

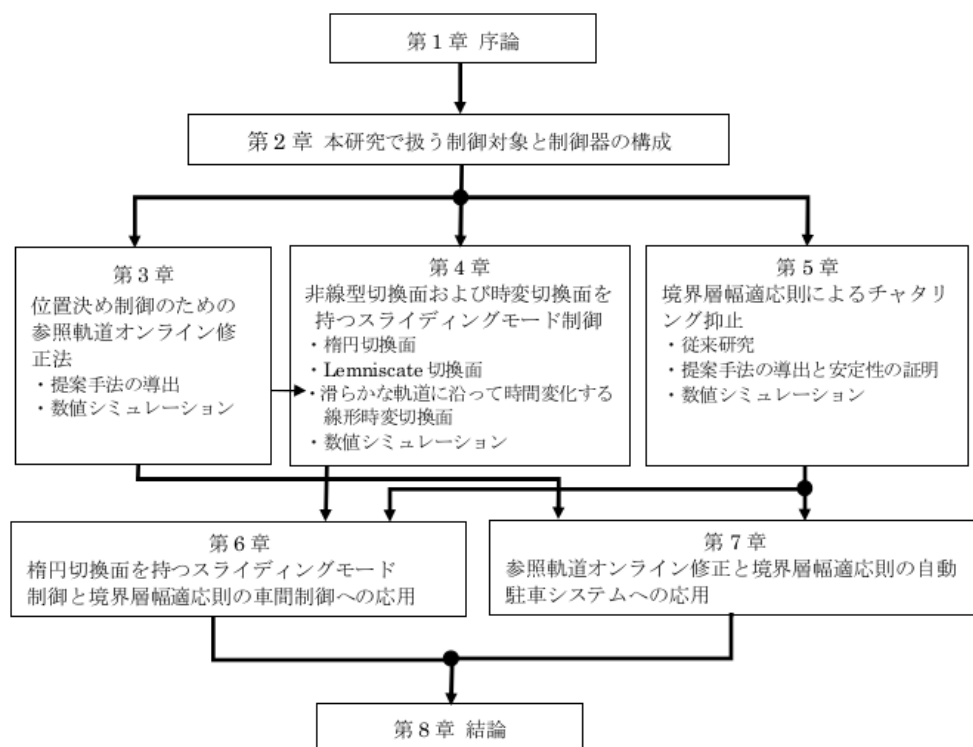


図 1.12: 本論文の構成

第 2 章

本研究で扱う制御対象と制御器の構成

本章では本研究で扱う制御対象と制御器の構成について説明する。ここで、本研究では制御対象として、モデルの構造は既知であるがパラメータに不確かさを含む 2 次の正準形で表される 1 入力 1 出力システムを扱う。また、外乱は制御入力チャンネルに印加されるものとする。

従来から、車両制御システムでは、外乱オブザーバによる外乱除去と 2 自由度制御を組み合わせた制御系がよく用いられてきた。この手法は、線形状態フィードバック則に基づいて、外乱オブザーバを用いて制御対象に印加される外乱の影響を抑止した上で、2 自由度制御を適用することにより、制御系の安定性と即応性を実現する制御手法である。しかしながら、ハイゲイン状態フィードバック則によるインナーループが働くため、大きな追従誤差が生じた場合に過大な制御量が発生し、大きな躍度が発生するという問題があった。これに対して、従来の線形時不変切換面を持つスライディングモード制御を用いたモデル追従制御系に置き換えた場合には、大きな追従誤差が生じた場合に、過大な制御量は発生せず、躍度の発生が最小限に抑えられるものの、到達モードにおいてロバスト性が保証できない、チャタリングに起因する躍度の増加に伴う乗り心地の悪化やエネルギー消費量の増加などの問題があった。

本研究ではモデル追従スライディングモード制御を構成して車両制御システムに適用する。ここで、モデル追従スライディングモード制御は従来の外乱オブザーバによる外乱除去と 2 自由度制御を組み合わせた制御系と互換性が高く、比較的容易に置き換え可能である。

2.1 制御対象と参照モデル

いま、制御対象として、次式で表される2次の正準形で表されるシステムを考える。ここで、上記システムの例としてバネ・マス・ダンパーで構成される機械システムを考える。

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}(t) \boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}(t) u(t) + \boldsymbol{d}(t), \quad (2.1)$$

ここで、 $\boldsymbol{x}(t)$ は参照モデルの状態変数、 $\boldsymbol{A}(t)$ は状態遷移行列、 $\boldsymbol{B}(t)$ は駆動行列、 $u(t)$ は制御入力、 $\boldsymbol{d}(t)$ は外乱を表しており、質点の位置 $x(t)$ と速度 $v(t)$ が観測できるものとする。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{A}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K(t)/M(t) & -D(t)/M(t) \end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{B}(t) &= [0 \quad 1/M(t)]^T, \\ \boldsymbol{x}(t) &= [x(t) \quad v(t)]^T. \end{aligned}$$

摩擦係数 $D(t)$ 、バネ定数 $K(t)$ 、質量 $M(t)$ は制御対象のパラメータであり、それぞれ不確かさを含む。

ここで、この制御対象に対してモデル追従制御を構築するために、次式に示す参照モデルを考える。

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{ref}(t) = \boldsymbol{A}_{ref} \boldsymbol{x}_{ref}(t) + \boldsymbol{B}_{ref} r(t), \quad (2.2)$$

ここで、 $\boldsymbol{x}_{ref}(t)$ は参照モデルの状態変数、 \boldsymbol{A}_{ref} は状態遷移行列、 \boldsymbol{B}_{ref} は駆動行列、 $r(t)$ は参照入力を表している。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{A}_{ref} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K_m/M_m & -D_m/M_m \end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{B}_{ref} &= [0 \quad 1/M_m]^T, \\ \boldsymbol{x}_{ref}(t) &= [x_{ref}(t) \quad v_{ref}(t)]^T. \end{aligned}$$

摩擦係数 D_m 、バネ定数 K_m 、質量 M_m は参照モデルのパラメータである。

図 2.1 にモデル追従スライディングモード制御のブロック線図を示す。同図において、 r は参照入力、 x_r は参照軌道、 x は制御対象の状態量、 e は追従誤差、 u は制御入力、 d は外乱である。

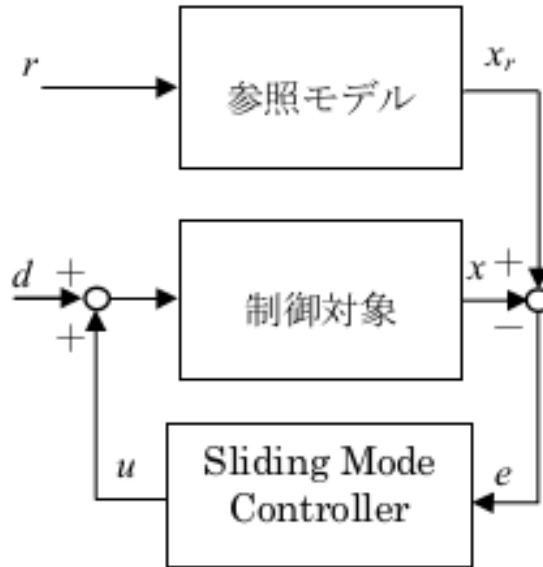


図 2.1: モデル追従スライディングモード制御のブロック線図

参考のために、図 2.2 に提案手法の制御性能比較のために用いる 2 自由度制御と外乱オブザーバを組み合わせた手法のブロック線図を示す。

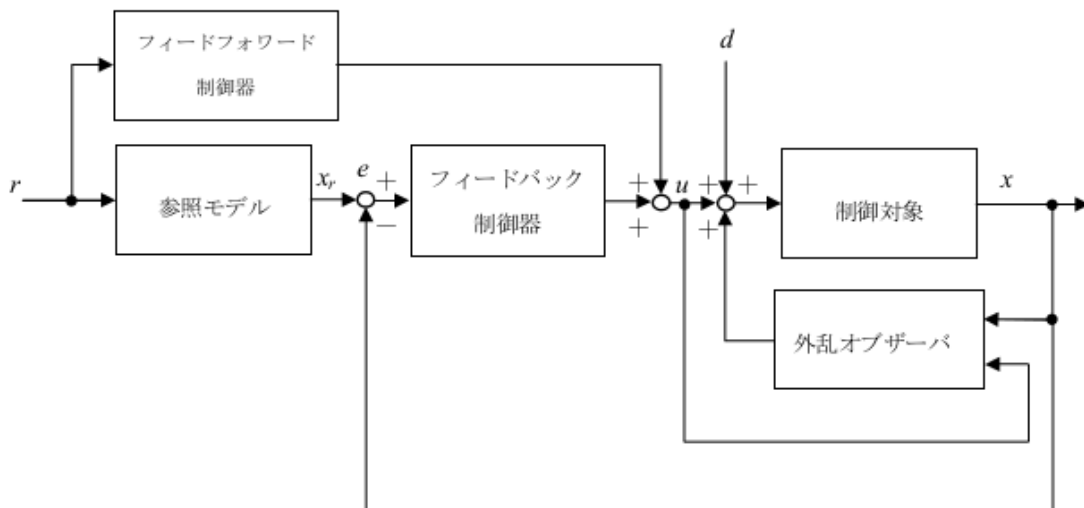


図 2.2: 2 自由度制御と外乱オブザーバを組み合わせた手法のブロック線図

第3章

位置決め制御のための参照軌道修正法

張ら [1] は, Flash と Hogan が提案した躍度最小化軌道 [69] の問題点であった位置決め制御における始点および終点における機械振動を抑制するために, 躍度の時間変化率を最小化する最適制御問題を解いて以下に示す滑らかな参照軌道を提案した.

$$x(t) = L \left\{ -20 \left(\frac{t}{T} \right)^7 + 70 \left(\frac{t}{T} \right)^6 - 84 \left(\frac{t}{T} \right)^5 + 35 \left(\frac{t}{T} \right)^4 \right\} \quad (3.1)$$

$$v(t) = \frac{L}{T} \left\{ -140 \left(\frac{t}{T} \right)^6 + 420 \left(\frac{t}{T} \right)^5 - 420 \left(\frac{t}{T} \right)^4 + 140 \left(\frac{t}{T} \right)^3 \right\} \quad (3.2)$$

$$a(t) = \frac{L}{T^2} \left\{ -840 \left(\frac{t}{T} \right)^5 + 2100 \left(\frac{t}{T} \right)^4 - 1680 \left(\frac{t}{T} \right)^3 + 420 \left(\frac{t}{T} \right)^2 \right\} \quad (3.3)$$

$$j(t) = \frac{L}{T^3} \left\{ -4200 \left(\frac{t}{T} \right)^4 + 8400 \left(\frac{t}{T} \right)^3 - 5040 \left(\frac{t}{T} \right)^2 + 840 \left(\frac{t}{T} \right) \right\} \quad (3.4)$$

ここで, L は目標位置, T は目標位置に至るまでの時間, $x(t), v(t), a(t), j(t)$ は, それぞれ位置, 速度, 加速度, 躍度を表している. ここで, 躍度とは, 加速度の時間微分である. この軌道は, 位置決め制御のための軌道であるため, 始点および終点における位置以外の状態量は 0 である.

本研究では、張らが提案した滑らかな参照軌道を用いた位置決め制御において、目標位置に至る任意の時刻で、目標位置を滑らかに修正する方法を提案する。そのために、張らが提案した滑らかな参照軌道の導出方法に基づき、境界条件を拡張し、始点および終点における速度、加速度、躍度に任意の値を与えられる軌道を導出する。ここで、次の汎関数を最小化する最適化問題を考える。

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}, u, t) = \int_0^{t_f} \mathbf{L}(\mathbf{x}, u, t) dt, \quad (3.5)$$

ここで、ラグランジアンは

$$\begin{aligned} \mathbf{L}(\mathbf{x}, u, t) = & \frac{1}{2} \{\dot{j}(t)\}^2 + \frac{1}{2} \{u(t)\}^2 \\ & + \boldsymbol{\lambda}^T(t) \{\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u - \dot{\mathbf{x}}\}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

拘束条件として、次に示すシステムダイナミクスを用いる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (3.7) \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

また、境界条件は、

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \\ a(t) \\ j(t) \end{bmatrix}, \mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} x(0) \\ v(0) \\ a(0) \\ j(0) \end{bmatrix}, \mathbf{x}(t_f) = \begin{bmatrix} x(t_f) \\ v(t_f) \\ a(t_f) \\ j(t_f) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

ここで、 $\mathbf{x}(0)$ と $\mathbf{x}(t_f)$ は、それぞれ、初期状態と終端状態である。この最適化問題を解くと次式が得られる。

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a_0 t^2 + \frac{1}{6} j_0 t^3 + \frac{A}{6} \left(\frac{t}{t_f}\right)^7 - \frac{D}{6} \left(\frac{t}{t_f}\right)^6 + \frac{B}{2} \left(\frac{t}{t_f}\right)^5 - \frac{C}{6} \left(\frac{t}{t_f}\right)^4 \quad (3.9)$$

$$v(t) = v_0 + a_0 t + \frac{1}{2} j_0 t^2 + \frac{1}{t_f} \left\{ \frac{7A}{6} \left(\frac{t}{t_f}\right)^6 - D \left(\frac{t}{t_f}\right)^5 + \frac{5B}{2} \left(\frac{t}{t_f}\right)^4 - \frac{2C}{3} \left(\frac{t}{t_f}\right)^3 \right\} \quad (3.10)$$

$$a(t) = a_0 + j_0 t + \frac{1}{t_f^2} \left\{ 7A \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 - 5D \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 + 10B \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 - 2C \left(\frac{t}{t_f} \right)^2 \right\} \quad (3.11)$$

$$j(t) = j_0 + \frac{1}{t_f^3} \left\{ 35A \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 - 20D \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 + 30B \left(\frac{t}{t_f} \right)^2 - 4C \left(\frac{t}{t_f} \right) \right\} \quad (3.12)$$

ここで,

$$\begin{aligned} A &= 120(x_0 - x_1) + 60(v_0 + v_1)t_f + 12(a_0 - a_1)t_f^2 + (j_0 + j_1)t_f^3, \\ B &= 168(x_0 - x_1) + (90v_0 + 78v_1)t_f + (20a_0 - 14a_1)t_f^2 + (2j_0 + j_1)t_f^3, \\ C &= 210(x_0 - x_1) + (120v_0 + 90v_1)t_f + (30a_0 - 15a_1)t_f^2 + (4j_0 + j_1)t_f^3, \\ D &= 420(x_0 - x_1) + (216v_0 + 204v_1)t_f + (45a_0 - 39a_1)t_f^2 + (4j_0 + 3j_1)t_f^3. \end{aligned}$$

式 (3.1) - (3.4) で表される参照軌道に沿って動作中に, 任意の時刻 t_c における状態量 $\mathbf{x}(t_c)$ が算出できる. これを初期条件 $\mathbf{x}(0)$ と置き, 修正後の終端条件 $\mathbf{x}(t_f)$ と置いて式 (3.9) - (3.12) に代入すれば, 時刻 t_c 以降の修正軌道が算出できる.

3.1 数値シミュレーション

数値例を用いて, 本研究で提案する滑らかさを損なわずに目標位置を修正する手法の有効性を示す.

以下に, シミュレーション条件を示す. 式 (3.1)-(3.4) で表される参照軌道において, 目標位置 $L = 1m$, 到達時間 $T = 1s$, $t = 0s$ における初期位置 $x(0) = 0$ とする. このとき, 式 (3.9)-(3.12) を用いて $t = 0.25, 0.5, 0.75s$ から $t = 1s$ までの期間に, それぞれ目標位置を $-0.2, -0.1, 0.1m$ 修正する参照軌道を算出する.

図 3.1 にシミュレーション結果を示す. 同図は, 上から参照軌道の位置 $x(t)$, 速度 $v(t)$, 加速度 $a(t)$, 躍度 $j(t)$ を表している. ここで, 黒色の破線は, $t = 0s$ で設定した, 目標到達時間 $t = 1s$ に $x(1) = 1$ に至る滑らかな参照軌道, 青色の実線は $t = 0.25s$ から $t = 1s$ に $x(1) = 0.8$ に至る滑らかな修正軌道, 赤色の点線は $t = 0.50s$ から $t = 1s$ に $x(1) = 0.9$ に至る滑らかな修正軌道, 緑色の一点鎖線は $t = 0.75s$ から $t = 1s$ に $x(1) = 1.1$ に至る滑らかな修正軌道を表している. 図を見てわかるように, 提案手法は, 参照軌道の位置 $x(t)$, 速度 $v(t)$, 加速度 $a(t)$, 躍度 $j(t)$ の次元まで, 連続性を失わず, 滑らかに参照軌道を修正することが可能であることがわかる.

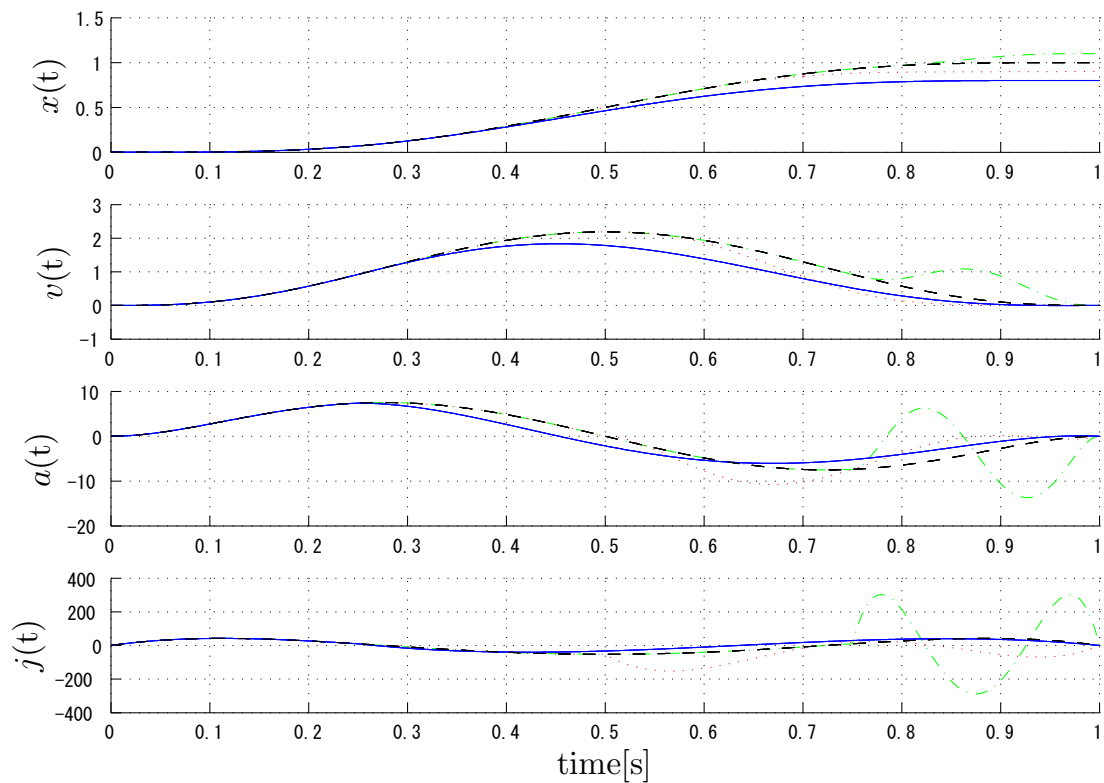


図 3.1: 滑らかな軌道修正

3.2 おわりに

本章では、張らが提案した滑らかな参照軌道を用いた位置決め制御において、目標位置に至る任意の時刻で、目標位置を滑らかに修正する方法を提案した。ここで、張らが提案した滑らかな参照軌道の境界条件を拡張し、始点および終点における速度、加速度、躍度に任意の値を与えられる軌道を導出した。また、数値シミュレーションにより提案手法の有効性を示した。本手法は任意の初期状態から任意の終了状態に至る滑らかな軌道を7次の多項式で表すことができる。そのため、位置決め制御のための参照軌道の修正だけでなく、速度制御の目標値修正や、スライディングモード制御のための滑らかな切換面の生成

に応用可能である。修正軌道の解析に関する検討として、参照軌道の速度プロファイルが単峰性となる条件を解析することにより、車両位置決め制御の乗り心地を損なうことなく目標位置をオンラインで修正する手法の検討 [C3] が研究されている。しかし、この研究では、数値的に速度プロファイルが単峰性となる条件を導出している。今後は、この条件を解析的に導出するとともに、目標到達時間を延長・短縮した場合に対する解析も検討する予定である。また、スライディングモード制御のための滑らかな切換面の生成において、オーバードamping特性となる初期条件を解析的に導出する予定である。

第4章

非線形切換面および時変切換面のスライディングモード制御への適用

古典的な線形時不変切換面を持つスライディングモード制御では、等価制御入力と呼ばれる線形状態フィードバックと非線形切換制御入力を用いて、制御対象の動特性を、プラントダイナミクスとは異なる1次遅れ特性となるように制御する。1次遅れ特性は初期状態において最も変化率が大きく、素早く変化する。そのため、システムダイナミクスが1次遅れとは異なるプラントを1次遅れ特性で誤差追従させた場合、初期状態において、過大な制御入力が必要となる。また、1次遅れ特性は変化率が状態量に比例するため、時間が経過するにつれて変化率が減少する。誤差収束時間を短縮するためには切換面の勾配を増大させる必要があり、スライディングモードを保つためには制御量の増大が避けられない。このように、従来の線形時不変切換面を持つスライディングモード制御を用いたサーボ系において速やかに追従誤差をゼロに収束させるためには、過大な制御入力が必要となり、チャタリングを誘発する要因となっていた。

また、従来から到達モードを除去するために2つの双曲線を組み合わせてBang - Bang制御の軌跡に似た軌跡を切換面に用いる手法 [65] や、位置決め制御において、目標位置に至る、あらかじめ決められた速度プロファイルを用いて描いた軌跡を切換面として用いる手法 [64] などが提案されてきた。これらの従来研究では、複数の軌道を組み合わせて切換面を構成し、所望の動特性を実現している。本研究では、これらの従来研究のアイデアを参考にして、提案する非線形切換面を提案するに至った。

本研究では、切換面を制御対象の動特性に近付けることで過大な制御入力を抑止し、無駄なエネルギー消費とチャタリングを低減するために非線形切換面および、滑らかな参照軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を提案する。ここで、非線形切換面として楕円

および Lemniscate に基づく切換面を導入する。

まず，高次状態量を用いることなく，滑らかで時間最適なトラジェクトリーに近い曲線を得るために，5 次多項式で表される躍度最小化軌道 [69] を楕円軌道で近似することを考え，楕円切換面を持つスライディングモード制御則を導く。

次いで，Lemniscate に基づく切換面を導出し，Lemniscate に基づく切換面を持つスライディングモード制御則を導く。さらに，先に示した躍度の変化率最小化軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を導出し，この線形時変切換面を持つスライディングモード制御則を導く。最後に，1 入力 1 出力の 2 次正準形で表されるシステムに，これらの手法を適用して制御性能を比較する。提案手法は，スライディングモード制御の特徴である不確かさに対するロバスト性を犠牲にすることなく，従来の線形切換面を用いるスライディングモード制御に比べ，より素早く，滑らかに，省エネルギーで制御できることを示す。また，提案手法は初期状態から平衡状態まで至る切換面を幾何的に導出するので到達モードが発生せず，誤差収束時間が陽に得られるという特徴を持つことを示す。

4.1 楕円切換面の導出

システムの状態変数を座標軸とする空間を状態空間または位相空間と呼び，状態に対応する点が時間と共に動いた軌跡をトラジェクトリーという [80]。特に，2 つの状態量 x_1, x_2 の関係が $\dot{x}_1 = x_2$ のとき， $x_1 - x_2$ 平面を位相面という。いま，位相面上に定義されるトラジェクトリーの物理的な意味を明確にするために，図 4.1 に示す質点系 m の直線運動を考える。質点系の位置，速度に関するトラジェクトリーは時計回りに時間発展し，このトラジェクトリー上の任意の点における接線の傾きは，次式で与えられる [81]。

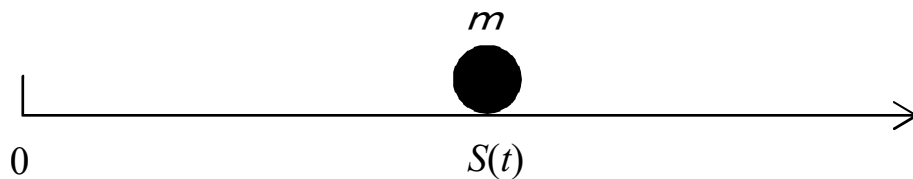


図 4.1: 質点系の直線運動

$$\frac{dV(t)}{dS(t)} = \left(\frac{dV(t)}{dt} \right) / \left(\frac{dS(t)}{dt} \right) = \frac{A(t)}{V(t)} \quad (4.1)$$

ここで， $S(t)$ は質点系の位置， $V(t)$ は速度， $A(t)$ は加速度を表している。

いま，任意の初期状態 $P(x_0, \dot{x}_0)$ から平衡状態（原点）に至る楕円切換面を導出するた

めに、次式で表される楕円の方程式を考える。

$$\frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{\dot{x}^2}{b^2} = 1 \quad (4.2)$$

また、楕円上の点 P における接線 L の方程式は、次式で表せる。

$$\dot{x} = -\frac{b^2(x_0-a)}{a^2\dot{x}_0}(x-a) + \frac{b^2}{\dot{x}_0} \quad (4.3)$$

図 4.2 は楕円軌道を表しており、 P は初期状態、 L は、この点における接線である。

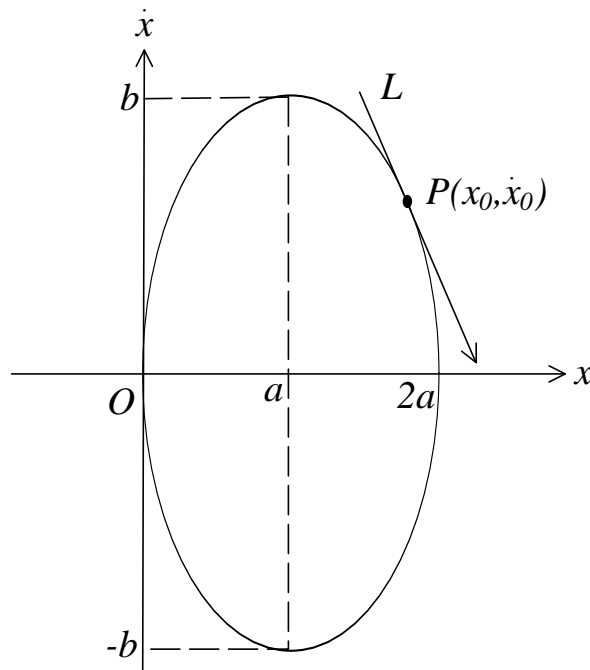


図 4.2: 任意の初期状態から平衡点に至る楕円軌道

(4.1) 式と (4.3) 式から、楕円上の点 P における接線 L の傾きは次式で与えられる。

$$\frac{dV(t)}{dS(t)} = \left(\frac{dV(t)}{dt} \right) / \left(\frac{dS(t)}{dt} \right) = \frac{\ddot{x}_0}{\dot{x}_0} \quad (4.4)$$

式 (4.3) と、式 (4.4) から、次式が得られる。

$$\ddot{x}_0 = -\frac{b^2(x_0-a)}{a^2} \quad (4.5)$$

ここで、楕円の方程式 (4.2) へ、点 P の座標を代入して式変形すると次式が得られる。

$$\frac{b^2(x_0-a)}{a^2} = \frac{b^2 - \dot{x}_0^2}{x_0-a} = -\ddot{x}_0 \quad (4.6)$$

式(4.6)左辺, 右辺からパラメータ b を除去するために, 媒介変数 s を導入する.

$$\begin{aligned} s^2(x_0 - a) &= -\ddot{x}_0 \\ \Leftrightarrow s^2 &= -\frac{\ddot{x}_0}{(x_0 - a)} \end{aligned} \quad (4.7)$$

式(4.6)の中辺, 右辺に, 式(4.5)と式(4.7)を代入すると次式が得られる.

$$a = \frac{\dot{x}_0^2 x_0 - \ddot{x}_0 x_0^2}{\dot{x}_0^2 - 2\ddot{x}_0 x_0}, \quad b = a \sqrt{\frac{-\ddot{x}_0}{x_0 - a}} \quad (4.8)$$

4.2 楕円切換面を持つモデル追従スライディングモード制御則の導出

いま，式 (4.9) で表される 1 入力 1 出力の 2 次システムを考える．

$$\ddot{x} = -\alpha(t)\dot{x} - \beta(t)x + u \quad (4.9)$$

ここで， α と β は正の実定数， u は制御入力である．また，ノミナルモデルを式 (4.10) に示す．

$$\ddot{x}_r = -\alpha_r\dot{x}_r - \beta_rx_r + r \quad (4.10)$$

ここで， α_r と β_r は正の実定数， r は参照入力である．いま，式 (4.9) で表されるシステムに与える目標値を x_r とすると，追従誤差 e は式 (4.11) で表せる．

$$e := x - x_r \quad (4.11)$$

式 (4.11) を 2 回時間微分して，式 (4.9) と式 (4.10) を代入すると次式が得られる．ここで， $(\alpha(t) - \alpha_r)$ と $(\beta(t) - \beta_r)$ がマッチング条件を満たすと仮定すると，これらの項は無視できる [37]．

$$\begin{aligned} \ddot{e} &= \ddot{x} - \ddot{x}_r = -\alpha(t)\dot{x} - \beta(t)x + u + \alpha_r\dot{x}_r + \beta_rx_r - r \\ &= -\alpha_r(\dot{x} - \dot{x}_r) - (\alpha(t) - \alpha_r)\dot{x} - \beta_r(x - x_r) - (\beta(t) - \beta_r)x + u - r \\ &\approx -\alpha_r\dot{e} - \beta_re + u - r \end{aligned} \quad (4.12)$$

いま，楕円切換面を式 (4.13) のように定義する．

$$\sigma = \frac{(e - a)^2}{a^2} + \frac{\dot{e}^2}{b^2} - 1 \quad (4.13)$$

また，Lyapunov 関数の候補を式 (4.14) のように定義する．

$$V = \frac{1}{2}\sigma^2 \quad (4.14)$$

このとき，式 (4.15) を満たせば状態が切換面に拘束されることが保証される．

$$\dot{V} = \sigma\dot{\sigma} < 0 \quad (4.15)$$

式 (4.15) に式 (4.13) と，式 (4.13) の時間微分を代入すると，次式が得られる．

$$\left\{ \dot{e} \left(\frac{(e - a)^2}{a^2} + \frac{\dot{e}^2}{b^2} - 1 \right) \right\} \left\{ \left(\frac{e}{a^2} + \frac{\ddot{e}}{b^2} - \frac{1}{a} \right) \right\} < 0 \quad (4.16)$$

式 (4.16) の左辺に含まれる左側の波括弧内の式は、楕円切換面の方程式と、 $\dot{e} = 0$ で表される直線の方程式である。それ故、誤差状態量が楕円の内側に存在する場合、この方程式は負の値をとる。これに対して、誤差状態量が楕円切換面の外側に存在する場合、この方程式は正の値をとる。式 (4.15) の条件を満足するためには、式 (4.16) の左辺に含まれる左右の波括弧内の方程式は、それぞれ異なる符号をとる必要がある。ここで、式 (4.16) の左辺 = 0 と置いて、式 (4.12) を代入すると次式が得られる。

$$u = -\dot{e} \left\{ \left(\frac{b^2}{a^2} - \beta_r \right) e - \alpha_r \dot{e} - \frac{b^2}{a} + r \right\} - K \operatorname{sgn} \left\{ \left(\frac{(e-a)^2}{a^2} + \frac{\dot{e}^2}{b^2} - 1 \right) \right\} \quad (4.17)$$

式 (4.17) は、楕円切換面を持つスライディングモード制御則を表している。この式の右辺第1項は等価制御入力、第2項は切換制御入力を表している。この制御則によって、誤差状態量は楕円切換面に拘束され、平衡点に導かれる。

4.3 楕円切換面を持つスライディングモード制御の誤差収束時間

本節では、前節までに導出した平衡点（原点）と初期状態を表す位相面上の点を通る楕円切換面に沿って、初期状態から平衡点に至るまでの誤差収束時間を導出する。

いま、横軸を追従誤差 e ，縦軸を追従誤差の時間微分 \dot{e} と置いた位相面において、楕円切換面を定義する。ここで、初期状態 $P(e_0, \dot{e}_0)$ ，平衡状態 $O(0, 0)$ ，楕円の横軸スケールングファクター a ，縦軸スケールングファクター b とすると、楕円切換面は次式で表すことができる。

$$\begin{cases} e = a(\cos \theta + 1) \\ \dot{e} = b \sin \theta \end{cases} \quad (4.18)$$

式 (4.18) の第 1 式を時間微分して、第 2 式に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} -a \sin \theta \frac{d\theta}{dt} &= b \sin \theta \\ \Leftrightarrow \frac{d\theta}{dt} &= -\frac{b}{a} \end{aligned} \quad (4.19)$$

また、初期状態における偏角は次式で与えられる。

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{e}_0}{e_0 - a} \right) \quad (4.20)$$

式 (4.19) を θ と t について解き、式 (4.20) を用いて、積分区間 $[-\pi, \theta_0]$ として積分すると任意の初期状態 $P(e_0, \dot{e}_0)$ から楕円切換面に沿ってシステムの平衡点 $O(0, 0)$ へ至るまでの収束時間を表す式 (4.21) が得られる。

$$t_{conv} = \frac{a}{b} (\pi + \theta_0) \quad (4.21)$$

4.3.1 平衡点近傍の補助的な線形切換面

楕円は閉曲線であるため、状態量は楕円切換面に沿って平衡点に至った後、再び楕円切換面に沿って平衡点から離れてしまう。そのため、状態量を平衡点に留めるために、平衡点近傍において、楕円の代わりに別の切換面を適用する必要がある。図 4.3 に示すように、次式で与えられる平衡点近傍の領域において、平衡点に状態量を留めるための補助的な線形切換面を適用する。

$$\frac{e^2}{a^2} + \frac{\dot{e}^2}{b^2} = q^2 \quad (4.22)$$

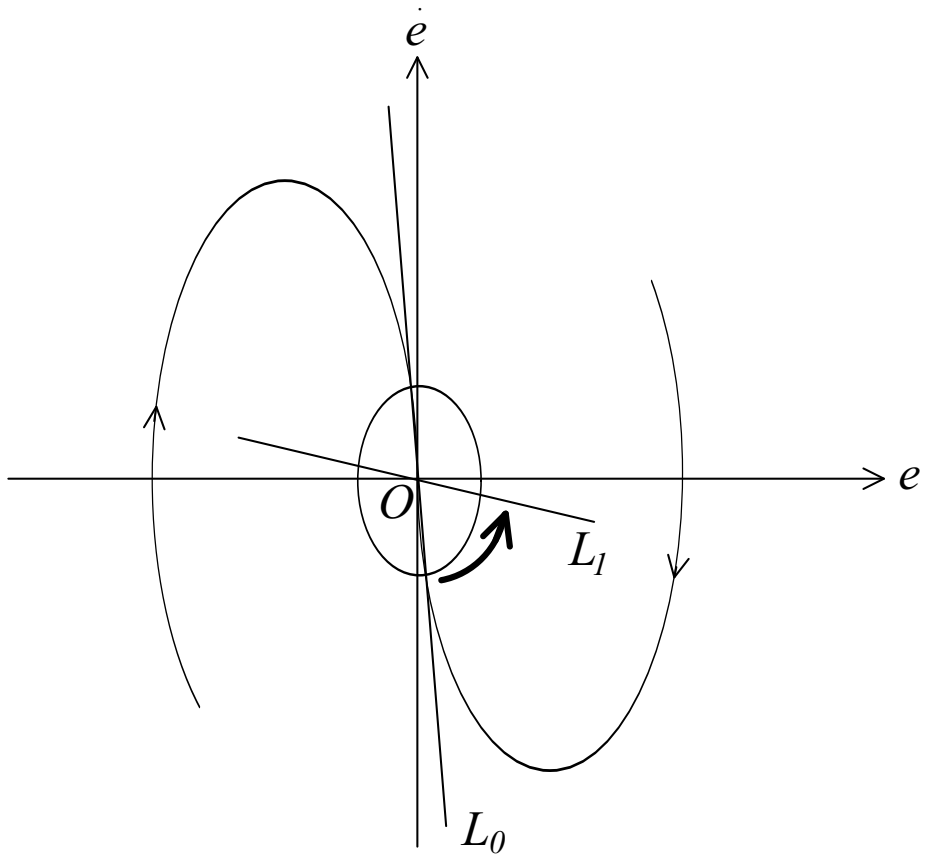


図 4.3: 補助的な線形切換面

ここで、 q は、平衡点に状態量を留めるための補助的な線形切換面を適用する領域の大きさを決めるスケーリングパラメータである。

4.4 Lemniscate 切換面を持つスライディングモード制御

前節では，楕円切換面を持つスライディングモード制御則を導出した．楕円切換面は，制御対象がアンダーダンピング特性を持つ場合に対して，従来の線形切換面を持つスライディングモード制御に比べて滑らかに素早く省エネルギーで追従可能なサーボ系が構築可能である．しかし，制御対象がオーバーダンピング特性を持つ場合では，元のシステムの動特性が 1 次遅れ系に似た挙動を示すため，従来の線形切換面を持つスライディングモード制御の方がエネルギー効率が良い場合がある．そこで，本節では，初期状態から平衡状態に至る滑らかな曲線として原点近傍で傾きが ± 1 の直線となる 4 次曲線である Lemniscate 曲線を用いた切換面の適用を検討する．

4.4.1 Lemniscate 曲線

Lemniscate 曲線は，図 4.4 に示すドーナツ状のトーラス体を輪切りにすることで得られる 8 の字型の曲線である．Lemniscate 曲線の式を式 (4.23) に示す．また， $x-y$ 平面上に描いた Lemniscate 曲線の例を図 4.5 に示す．

$$(x^2 + y^2)^2 = c(x^2 - y^2) \quad (4.23)$$

いま，原点および原点以外の任意の点（初期状態）を通る曲線を得るために，この曲線の縦横比をスケールリングする．Lemniscate 曲線は， x 軸， y 軸に対して線対称であるため，第 1 象限と，その他の象限における曲線は合同である．それ故，以下，第 1 象限に初期状態 $P(x_0, \dot{x}_0)$ が存在する場合を例にとって考える．初期状態 P と原点 O を通る縦横比がスケールリングされた Lemniscate 曲線に基づくトラジェクトリーを導出するために，次式を定義する．

$$\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{\dot{x}^2}{b^2}\right)^2 = \frac{x^2}{a^2} - \frac{\dot{x}^2}{b^2} \quad (4.24)$$

図 4.6 に 縦横比がスケールリングされた Lemniscate 曲線を示す．ここで， P は初期状態， l は，この点における接線を表している．ここで， a と b は，それぞれ x 軸と y 軸に対するスケールリングファクターである．スケールリングされた Lemniscate 曲線に基づくトラジェクトリー上の点 P における接線 l の傾きは，式 (4.25) で表される．

$$\frac{d\dot{x}_0}{dx_0} = -\frac{b^2 x_0 \left(\frac{x_0^2}{a^2} + \frac{\dot{x}_0^2}{b^2} - \frac{1}{2}\right)}{a^2 \dot{x}_0 \left(\frac{x_0^2}{a^2} + \frac{\dot{x}_0^2}{b^2} + \frac{1}{2}\right)} \quad (4.25)$$

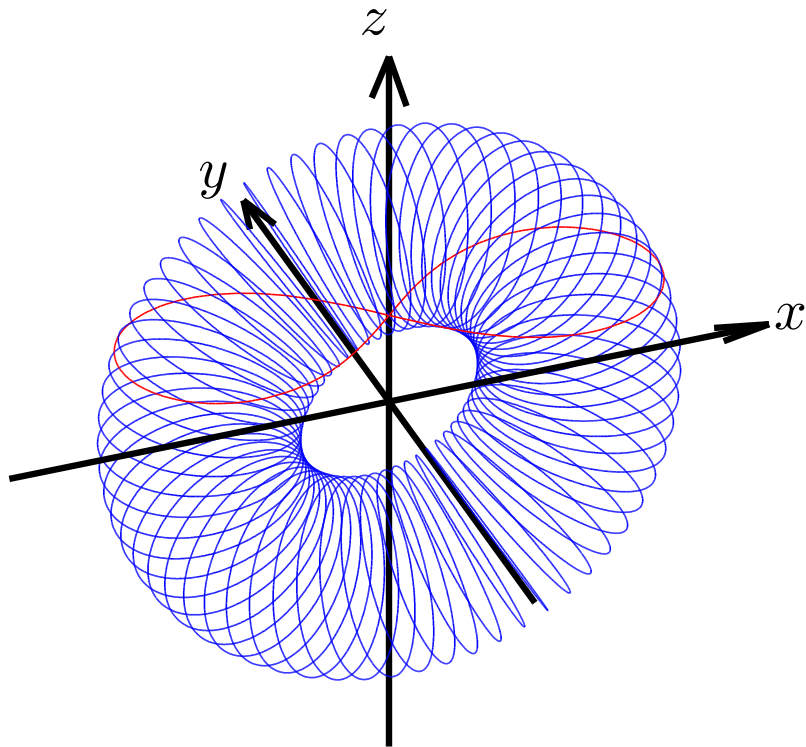


図 4.4: トーラス体の断面

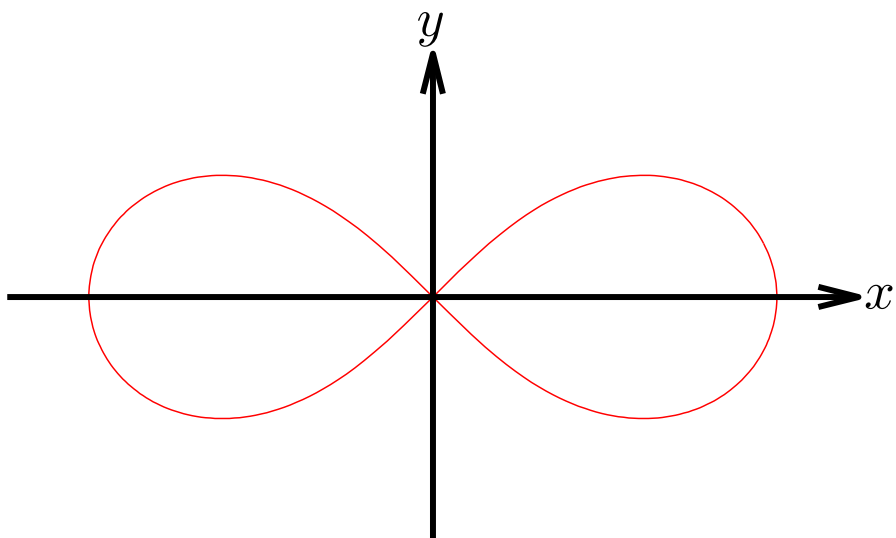


図 4.5: Lemniscate 曲線

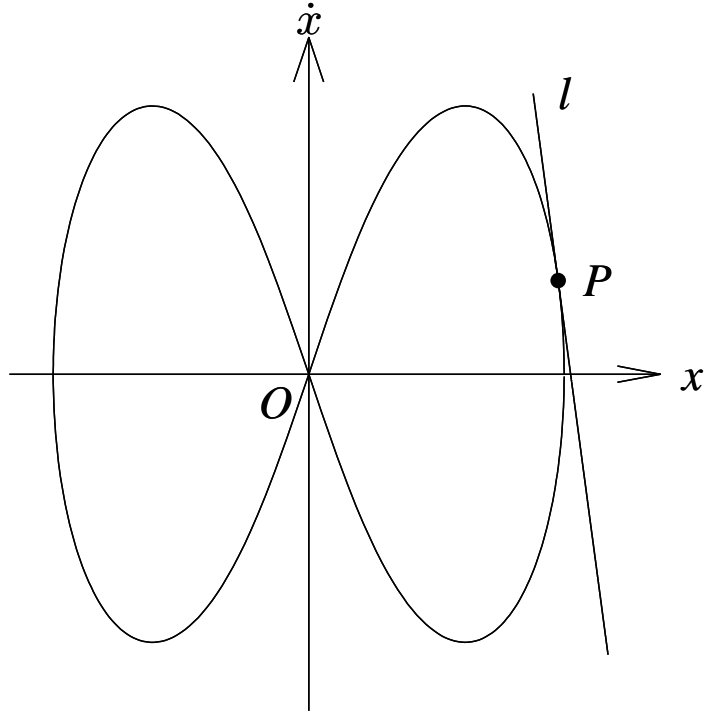


図 4.6: 縦横比をスケーリングされた Lemniscate 曲線

ここで、位相面上における速度，加速度の関係式 (4.4) を再掲する。

$$\frac{dV(t)}{dS(t)} = \left(\frac{dV(t)}{dt} \right) / \left(\frac{dS(t)}{dt} \right) = \frac{\ddot{x}_0}{\dot{x}_0} \quad (4.26)$$

式 (4.24) を式変形すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{x_0^2}{a^2} + \frac{\dot{x}_0^2}{b^2} \right)^2 &= \frac{x_0^2}{a^2} - \frac{\dot{x}_0^2}{b^2} \\ \iff \left(\frac{b^2 x_0^2 + a^2 \dot{x}_0^2}{a^2 b^2} \right)^2 &= \frac{b^2 x_0^2 - a^2 \dot{x}_0^2}{a^2 b^2} \\ \iff \frac{b^2 x_0^2 + a^2 \dot{x}_0^2}{a^2 b^2} &= \frac{b^2 x_0^2 - a^2 \dot{x}_0^2}{b^2 x_0^2 + a^2 \dot{x}_0^2} \\ \iff \frac{x_0^2}{a^2} + \frac{\dot{x}_0^2}{b^2} &= \frac{b^2 x_0^2 - a^2 \dot{x}_0^2}{b^2 x_0^2 + a^2 \dot{x}_0^2} \end{aligned} \quad (4.27)$$

ここで、式 (4.27) に式 (4.25) を代入すると次式が得られる。

$$\ddot{x}_0 = -\frac{b^2 b^2 x_0^3 - 3a^2 \dot{x}_0^2 x_0}{a^2 3b^2 x_0^2 - a^2 \dot{x}_0^2} \quad (4.28)$$

元の Lemniscate 曲線に対するスケーリングされた Lemniscate 曲線の縦横比を $b : a$ とする。ここで、 $b = as$ と置いて、式 (4.28) に代入すると、媒介変数表示された次式が得ら

れる。

$$x_0^3 s^4 + 3x_0 (x_0 \ddot{x}_0 - \dot{x}_0^2) s^2 - x_0^2 \ddot{x}_0 = 0 \quad (4.29)$$

さらに、 $T = s^2$ と置くと、2次方程式の解の公式から次式が得られる。

$$T = \frac{-3(x_0 \ddot{x}_0 - \dot{x}_0^2) \pm \sqrt{9(x_0 \ddot{x}_0 - \dot{x}_0^2)^2 + 4x_0 \dot{x}_0^2 \ddot{x}_0}}{2x_0^2} \quad (4.30)$$

Lemniscate 曲線は原点における傾きが ± 1 となる 8 の字型の曲線である。スケーリングされた Lemniscate 曲線は元の Lemniscate 曲線に対して、 x 軸方向に a 倍、 y 軸方向に b 倍拡大されるので、スケーリングされた Lemniscate 曲線の原点における傾きは $s = b/a$ となる。

また、式 (4.29) に、式 (4.28) と式 (4.30) を代入すると次式が得られる。

$$a = \frac{x_0}{\sqrt{\cos 2\theta_0 \cos \theta_0}}, \quad b = as \quad (4.31)$$

本節では、任意の初期状態から平衡状態に至る Lemniscate 曲線に基づく軌跡を幾何的な解析によって導出した。

4.5 Lemniscate 曲線に基づく切換面を持つモデル追従スライディングモード制御則の導出

本節では、Lemniscate 曲線に基づく切換面を持つモデル追従スライディングモード制御則を導出する。ここで、制御対象として、1 入力 1 出力の 2 次システムを考える。

$$\ddot{x} = -\alpha(t)\dot{x} - \beta(t)x + u(t) \quad (4.32)$$

ここで、 $\alpha(t)$ と $\beta(t)$ は正の実数、 $u(t)$ は制御入力である。また、ノミナルモデルを式 (4.33) に示す。

$$\ddot{x}_r = -\alpha_r \dot{x}_r - \beta_r x_r + r(t) \quad (4.33)$$

ここで、 α_r と β_r は正の実定数、 $r(t)$ は参照入力である。いま、式 (4.32) で表されるシステムに与える目標値を x_r とすると、追従誤差 e は式 (4.34) で表せる。

$$e := x - x_r \quad (4.34)$$

Lemniscate 曲線に基づく切換面を次式のように定義する。

$$\sigma = \left(\frac{e^2}{a^2} + \frac{\dot{e}^2}{b^2} \right)^2 - \frac{e^2}{a^2} + \frac{\dot{e}^2}{b^2} \quad (4.35)$$

式 (4.35) を時間微分することにより，次式が得られる．

$$\dot{\sigma} = 2\dot{e} \left\{ \frac{2}{a^4} e^3 + \frac{2}{b^2} \dot{e}^2 \ddot{e} + \frac{2}{a^2 b^2} (e\dot{e}^2 + \dot{e}\ddot{e}) - \frac{1}{a^2} e + \frac{1}{b^2} \ddot{e} \right\} \quad (4.36)$$

また，Lyapunov 関数の候補を次式のように定義する．

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (4.37)$$

式 (4.37) を時間微分することにより，次式が得られる．

$$\dot{V} = \sigma \dot{\sigma} < 0 \quad (4.38)$$

式 (4.38) を満たせば，状態が切換面に拘束されることが保証される．

式 (4.32) から (4.36) までを式 (4.38) に代入すると，次式が得られる．

$$\dot{e} \left\{ \left(\frac{e^2}{a^2} + \frac{\dot{e}^2}{b^2} \right)^2 - \frac{e^2}{a^2} + \frac{\dot{e}^2}{b^2} \right\} \left\{ \left(\frac{2}{a^4} e^3 + \frac{2}{b^2} \dot{e}^2 \ddot{e} + \frac{2}{a^2 b^2} (e\dot{e}^2 + \dot{e}\ddot{e}) - \frac{1}{a^2} e + \frac{1}{b^2} \ddot{e} \right) \right\} < 0 \quad (4.39)$$

式 (4.38) の左辺に含まれる左側の波括弧内の式は，Lemniscate 曲線に基づく切換面の方程式である．それ故，誤差状態量が Lemniscate 曲線に基づく切換面の内側に存在する場合，この方程式は負の値をとる．これに対して，誤差状態量が Lemniscate 曲線に基づく切換面の外側に存在する場合，この方程式は正の値をとる．式 (4.37) の条件を満足するためには，式 (4.38) の左辺に含まれる左右の波括弧内の方程式は，それぞれ異なる符号をとる必要がある．それ故，次式で表される制御則によって，誤差状態量は Lemniscate 曲線に基づく切換面に拘束され，平衡点に導かれる．

$$u = - \left\{ \frac{b^2 \left(\frac{2}{a^2} e^2 + \frac{2}{b^2} \dot{e}^2 - 1 \right)}{a^2 \left(\frac{2}{a^2} e^2 + \frac{2}{b^2} \dot{e}^2 + 1 \right)} - \beta_r \right\} e + \alpha_r \dot{e} + r(t) - K \operatorname{sgn} \left[\dot{e} \left\{ \left(\frac{e^2}{a^2} + \frac{\dot{e}^2}{b^2} \right)^2 - \frac{e^2}{a^2} + \frac{\dot{e}^2}{b^2} \right\} \right] \quad (4.40)$$

Lemniscate 曲線は閉曲線なので，誤差状態量は平衡点に留まらず，トラジェクトリーは時計回りに回転する．ここで，誤差状態量を原点に留めるために，平衡点近傍において付加的な線形切換面を定義する．付加的な線形切換面を定義する平衡点近傍の領域を以下に示す．

$$\frac{e^2}{a^2} + \frac{\dot{e}^2}{b^2} = q^2 \quad (4.41)$$

提案する Lemniscate 曲線に基づく滑らかな切換面は原点（平衡点）近傍で傾き $\pm b/a$ の直線となる．故に，平衡点近傍における楕円形の領域において，傾き $-b/a$ の線形時不変切換面を適用すれば，スムーズに誤差状態量を原点に留めることができる．

4.6 Lemniscate 切換面を持つスライディングモード制御の誤差収束時間

本節では、前節までに導出した平衡点（原点）と初期状態を表す位相面上の点を通る Lemniscate 切換面に沿って、初期状態から平衡点に至るまでの誤差収束時間を導出する。

いま、横軸を追従誤差 e 、縦軸を追従誤差の時間微分 \dot{e} と置いた位相面において、Lemniscate 切換面を定義する。ここで、初期状態 $P(e_0, \dot{e}_0)$ 、平衡状態 $O(0, 0)$ 、Lemniscate 曲線の横軸のスケールリングファクター a 、縦軸のスケールリングファクター b とすると、Lemniscate 切換面は次式で表すことができる。

$$\begin{cases} e &= \frac{a \cos \theta}{\sin^2 \theta + 1} \\ \dot{e} &= \frac{b \cos \theta \sin \theta}{\sin^2 \theta + 1} \end{cases} \quad (4.42)$$

式 (4.42) の第 1 式を時間微分して、第 2 式に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} -\frac{2a \sin \theta (\cos^2 \theta + 1)}{(\sin^2 \theta + 1)^2} \frac{d\theta}{dt} &= \frac{b \cos \theta \sin \theta}{\sin^2 \theta + 1} \\ \Leftrightarrow \frac{d\theta}{dt} &= -\frac{b \cos \theta (\sin^2 \theta + 1)}{2a(\cos^2 \theta + 1)} \end{aligned} \quad (4.43)$$

また、初期状態における偏角を式 (4.44) と置くと、

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{e}_0}{e_0} \right) \quad (4.44)$$

式 (4.43) を θ と t について解き、式 (4.44) を用いて、積分区間 $[-\pi/2, \theta_0]$ として積分すると任意の初期状態 $P(e_0, \dot{e}_0)$ から Lemniscate 曲線に基づく切換面に沿ってシステムの平衡点 $O(0, 0)$ へ至るまでの収束時間を表す式 (4.45) が得られる。

$$\frac{a}{b} \left(3 \operatorname{atan} \left(\sin \left(\frac{\pi}{2} - \epsilon \right) \right) + \operatorname{atanh} \left(\sin \left(\frac{\pi}{2} - \epsilon \right) \right) + 3 \operatorname{atan} (\sin (\theta_0)) + \operatorname{atanh} (\sin (\theta_0)) \right) \quad (4.45)$$

ここで、 ϵ は収束時間が無限大となるのを防ぐための正の微小量である。

4.7 滑らかな軌道に沿って時間変化する線形時変切換面

古典的なスライディングモード制御では，到達モードにおいてロバスト性を保つことができないという問題があった．Choiら [60] は，2次の正準形で表される不連続システムに対してスライディングモード制御を適用し，初期状態からスライディングモードを確立するために，従来から用いられてきた古典的な線形時不変切換面に基づき，サンプリング周期毎に切換面を回転，平行移動する手法を提案した．この手法は，初期状態において切換超平面上に状態量が存在するように設計し，超平面上に状態量を拘束させたまま切換超平面を動かして，最終的に拘束させたい切換超平面まで変化させてシステムを安定化する．しかし，時変切換面を用いて設計された制御系の安定性について示されていなかった．また，牛島ら [62] は， n 次の正準形で表されるシステムに対して，連続系の線形時変切換面を定式化した．この際，スライディングモードにおける状態変数を最小化するような評価関数を定義し，最適な切換超平面を設計する手法が提案された．ここで，調整されるのは切換面の傾きだけであった．

本節では，2次の正準形で表される連続システムを制御対象として，滑らかな軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を持つスライディングモード制御則を導出し，その安定性を証明する．この際，線形切換面の傾きだけでなく切片も考慮するため切換面は回転および平行移動を伴う．

4.7.1 滑らかな参照軌道

任意の初期条件から平衡状態に至る滑らかな軌道を算出するために，第3章で導出した結果を用いる．以下に，第3章で示した任意の初期状態から任意の終了状態に至る滑らかな参照軌道の式 (3.9) - (3.12) を再掲する．

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a_0 t^2 + \frac{1}{6} j_0 t^3 + \frac{A}{6} \left(\frac{t}{t_f}\right)^7 - \frac{D}{6} \left(\frac{t}{t_f}\right)^6 + \frac{B}{2} \left(\frac{t}{t_f}\right)^5 - \frac{C}{6} \left(\frac{t}{t_f}\right)^4 \quad (4.46)$$

$$v(t) = v_0 + a_0 t + \frac{1}{2} j_0 t^2 + \frac{1}{t_f} \left\{ \frac{7A}{6} \left(\frac{t}{t_f}\right)^6 - D \left(\frac{t}{t_f}\right)^5 + \frac{5B}{2} \left(\frac{t}{t_f}\right)^4 - \frac{2C}{3} \left(\frac{t}{t_f}\right)^3 \right\} \quad (4.47)$$

$$a(t) = a_0 + j_0 t + \frac{1}{t_f^2} \left\{ 7A \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 - 5D \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 + 10B \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 - 2C \left(\frac{t}{t_f} \right)^2 \right\} \quad (4.48)$$

$$j(t) = j_0 + \frac{1}{t_f^3} \left\{ 35A \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 - 20D \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 + 30B \left(\frac{t}{t_f} \right)^2 - 4C \left(\frac{t}{t_f} \right) \right\} \quad (4.49)$$

ここで、 L は目標位置、 t_f は目標位置に至るまでの時間、 $x(t), v(t), a(t), j(t)$ は、それぞれ位置、速度、加速度、躍度を表している。躍度とは、加速度の時間微分である。また、初期条件 $\mathbf{x}(0)$ および終了条件 $\mathbf{x}(t_f)$ は

$$\mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} x(0) \\ v(0) \\ a(0) \\ j(0) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}(t_f) = \begin{bmatrix} x(t_f) \\ v(t_f) \\ a(t_f) \\ j(t_f) \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

$$\begin{aligned} A &= 120(x_0 - x_1) + 60(v_0 + v_1)t_f + 12(a_0 - a_1)t_f^2 + (j_0 + j_1)t_f^3, \\ B &= 168(x_0 - x_1) + (90v_0 + 78v_1)t_f + (20a_0 - 14a_1)t_f^2 + (2j_0 + j_1)t_f^3, \\ C &= 210(x_0 - x_1) + (120v_0 + 90v_1)t_f + (30a_0 - 15a_1)t_f^2 + (4j_0 + j_1)t_f^3, \\ D &= 420(x_0 - x_1) + (216v_0 + 204v_1)t_f + (45a_0 - 39a_1)t_f^2 + (4j_0 + 3j_1)t_f^3 \end{aligned}$$

である。

4.7.2 線形時変切換面を持つスライディングモード制御の設計

線形時変切換面を持つスライディングモード制御則を導き、その安定性を示す。いま、次に示す2次の正準形で表されるシステムを考える。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)u(t) + \mathbf{d}(t) \quad (4.51)$$

ここで、 $\mathbf{x}(t)$ は参照モデルの状態変数、 $\mathbf{A}(t)$ は状態遷移行列、 $\mathbf{B}(t)$ は駆動行列、 $u(t)$ は制御入力、 $\mathbf{d}(t)$ は外乱を表しており、制御対象の状態量として位置 $x(t)$ と速度 $v(t)$ が観測できるものとする。

ここで、この制御対象に対してモデル追従制御を構築するために、次式に示す参照モデルを考える。

$$\dot{\mathbf{x}}_{ref}(t) = \mathbf{A}_{ref}\mathbf{x}_{ref}(t) + \mathbf{B}_{ref}r(t) \quad (4.52)$$

ここで、 $\mathbf{x}_{ref}(t)$ は参照モデルの状態変数、 \mathbf{A}_{ref} は状態遷移行列、 \mathbf{B}_{ref} は駆動行列、 $r(t)$ は参照入力を表している。

この制御器の目的は、制御対象の状態量を参照軌道に追従させることである。いま、追従誤差 $\mathbf{e}(t)$ を次式で定義する。

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_{ref}(t), \quad (4.53)$$

ここで、

$$\mathbf{e}(t) = [x(t) - x_{ref}(t) \quad v(t) - v_{ref}(t)]^T$$

である。

式(4.53)を時間微分すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= \mathbf{A}_{ref}\mathbf{e}(t) + (\mathbf{A}(t) - \mathbf{A}_{ref})\mathbf{x}(t) \\ &\quad + \mathbf{B}(t)u(t) - \mathbf{B}_{ref}r(t) + \mathbf{d}(t). \end{aligned} \quad (4.54)$$

ここで、 $(\mathbf{A}(t) - \mathbf{A}_{ref})$, $\mathbf{B}(t)$, $\mathbf{d}(t)$ がマッチング条件を満たすと仮定すると、これらの項を無視することができる。ここで、マッチング条件とは、不確かさが $\mathbf{B}(t)$ のレンジスペースに含まれることを意味している。いま、切換関数を $\sigma(t) = \mathbf{S}(t)\mathbf{e}(t) + b(t)$, $\mathbf{S} = [S_1(t) \ 1]$ と定義し、時間微分すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}(t) &= \dot{\mathbf{S}}(t)\mathbf{e}(t) + \mathbf{S}(t)[\mathbf{A}_{ref}\mathbf{e}(t) \\ &\quad - \mathbf{B}_{ref}r(t)] + \dot{b}(t). \end{aligned} \quad (4.55)$$

ここで、 $S_1(t)$ は切換面の傾き、 $b(t)$ は切換面と位相平面の縦軸との切片である。いま、スライディングモードの存在を証明するために Lyapunov 関数を用いる。次式に示す Lyapunov 関数の候補を定義する。

$$V(t) = \frac{1}{2}\sigma(t)^2 > 0 \quad (4.56)$$

式(4.56)を時間微分すると、安定性条件が得られる。

$$\frac{dV(t)}{dt} = \sigma(t)\dot{\sigma}(t) < 0. \quad (4.57)$$

式(4.57)から、傾きと平行移動を伴う線形時変切換面を持つスライディングモード制御

則 $u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t)$ が導出できる.

$$\begin{aligned} u_{eq}(t) &= -(\mathbf{S}(t) \mathbf{B}_{ref})^{-1} \left[\left(\dot{\mathbf{S}}(t) + \mathbf{S}(t) \mathbf{A}_{ref} \right) \mathbf{e}(t) \right. \\ &\quad \left. - \mathbf{S}(t) \mathbf{B}_{ref} r(t) + \dot{b}(t) \right], \\ u_{sw}(t) &= -\Gamma \operatorname{sgn}(\sigma(t)) \end{aligned} \quad (4.58)$$

ここで, $u_{eq}(t)$ は等価制御入力項, $u_{sw}(t)$ は切換制御入力項, Γ は切換制御ゲイン, $\operatorname{sgn}(\sigma(t))$ は符号関数を表している.

次式の条件を満たせば, $\sigma(t)$ はゼロに収束し, スライディングモードが保たれる.

$$\frac{dV(t)}{dt} = -\Gamma \sigma(t) \operatorname{sgn}(\sigma(t)) < 0. \quad (4.59)$$

切換面の傾き $S_1(t)$ と切片 $b(t)$ は次式で与えられる.

$$S_1(t) = \frac{\ddot{e}(t)}{\dot{e}(t)} \quad (4.60)$$

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -S_1(t) e(t) - b(t) \\ &= -\frac{\ddot{e}(t)}{\dot{e}(t)} e(t) - b(t) \\ \Leftrightarrow b(t) &= -\dot{e} - \frac{e(t) \ddot{e}(t)}{\dot{e}(t)} \end{aligned} \quad (4.61)$$

ここで, 式 (4.60), (4.61) を時間微分すると次式が得られる.

$$\dot{S}_1(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\ddot{e}(t)}{\dot{e}(t)} \right) = \frac{e^{(3)}(t) \dot{e}(t) - \ddot{e}(t)^2}{\dot{e}(t)^2} \quad (4.62)$$

$$\dot{b}(t) = \frac{e(t) \left[e^{(3)}(t) \dot{e}(t) - \ddot{e}(t)^2 \right]}{\dot{e}(t)^2}. \quad (4.63)$$

誤差の初期状態と終了状態 (平衡状態) を式 (4.46) – (4.50) に代入すると滑らかな参照軌道に沿って誤差収束する線形時変切換面の式 (4.60) – (4.63) が得られる. 図 4.7 に, 滑らかな軌道に沿って時間変化する線形時変切換面の一例を示す. 同図において, 赤線は滑らかな軌道, 青線は滑らかな軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を表している.

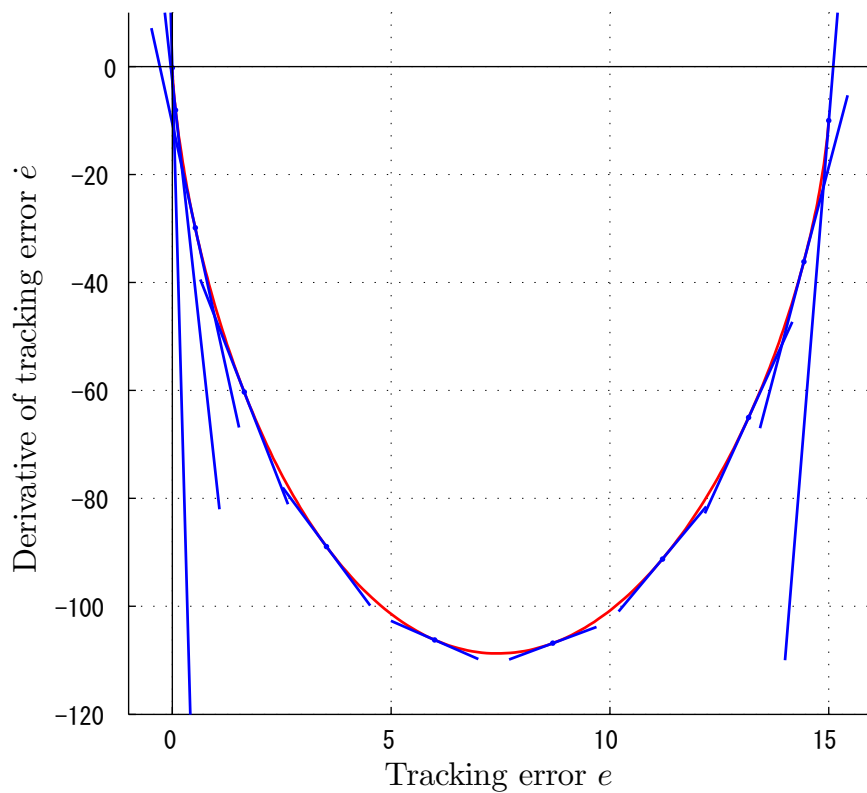


図 4.7: An example of a smooth trajectory.

4.7.3 まとめ

本節では滑らかな誤差追従特性を持つ線形時変切換面を持つスライディングモード制御則を導出し、その安定性を示した。提案手法では、線形切換面の傾きと切片を調整することにより、滑らかな軌道に沿った誤差収束特性を実現している。一般に位相平面上のトラジェクトリーは時計回りに発展する。そのため、位相平面上で第1象限から第4象限に至る瞬間と、第3象限から第2象限に至る瞬間において切換面の傾きが無限大となる。線形切換面の傾きは1次遅れ系で表される誤差追従特性の時定数を表しているため、象限をまたぐ瞬間に無限大の制御ゲインが必要となり所望のトラジェクトリーに追従できないという問題が発生する。以上の理由から、本手法は第2、第4象限でのみ、もしくは第2象限から第1象限に至る問題と第4象限から第3象限に至る問題に有効であり、これらの象限に至るまでは他の切換面を用いた手法を用いなくてはならないという課題がある。ま

た，一般に誤差追従特性に対する要求としてオーバードamping特性が求められることが多い．現状では，誤差の初期条件に対してオーバードamping特性を保つような条件を満たすために，平衡点を通る楕円もしくは Lemniscate に基づくトラジェクトリーを算出し，この状態量に基づき初期状態を算出している．

今後は，複数の象限をまたぐトラジェクトリーの検討とオーバードamping特性が実現できる状態量の組み合わせや，その範囲を解析する予定である．

4.8 数値シミュレーション

本節では、本章で示した楕円切換面，Lemniscate 切換面，滑らかな軌道に沿って時間変化する線形時変切換面，従来の線形時不変切換面を持つスライディングモード制御を用いたモデル追従制御系を1入力1出力の2次標準形で表される制御対象に適用し，制御性能を比較する。

4.8.1 シミュレーション条件

ここで，規範モデル，プラントおよびアクチュエータは式(4.64)に示す2次標準形の伝達関数で表される。

$$G_*(s) = \frac{\omega_*^2}{s^2 + 2\zeta_*\omega_*s + \omega_*^2} \quad (4.64)$$

尚，参照モデルに入力される参照入力を $r = 30\sin(2\pi f_r t)$ ， $f_r = 1[\text{Hz}]$ とした。アクチュエータダイナミクスとプラントパラメータ変動は未知，参照モデルのパラメータをノミナル値として制御系を設計した。参照モデル，プラント，アクチュエータのパラメータを表4.1に示す。また，シミュレーションの初期状態を表4.2に示す。ここで，プラントパラ

表 4.1: シミュレーションパラメータ

	ζ_*	ω_*	$f_*[\text{Hz}]$
Reference model	1.0	$2\pi f_r$	0.5
Plant	$\zeta_p \pm 30\%$	$2\pi f_p \pm 30\%$	1.0
Actuator	1.0	$2\pi f_a$	100

表 4.2: 初期状態

	x_0	\dot{x}_0	\ddot{x}_0
Reference model	0	0	0
Plant	20	-50	-1000

メータは式(4.65)に示すように正弦波状に変動するものとする。

$$\begin{aligned} \zeta_p &= \zeta_n \{1 + \Delta \sin(2\pi f_\zeta t + \pi/2)\}, f_\zeta = 4[\text{Hz}] \\ \omega_p &= \omega_n \{1 + \Delta \sin(2\pi f_\omega t + \pi/3)\}, f_\omega = 3[\text{Hz}] \end{aligned} \quad (4.65)$$

ここで、 $\Delta = 0.3$ はパラメータ変動係数である。さらに、次のようなステップ状外乱を加えた。 $d = -2000$ ($0.01 < t < 0.05$), 2000 ($0.4 < t < 0.45$)

制御対象のノミナル角周波数 $\omega_n = 2\pi f$, $f=1\text{Hz}$, 減衰係数ノミナル値 ζ_n を $-1.0 \sim 1.0$ まで変化させて、各手法の特性を比較する。ここで、楕円切換面を用いた手法の切換ゲイン $K_{ellipsoid}$ を基準として、切換面に対する追従性が同等となるように各手法の切換ゲイン倍率 ($K_{mag}\text{MinJ LTV}$:滑らかな軌道に沿って時間変化する線形時変切換面, $K_{mag}\text{Lemniscate}$:Lemniscate 曲線に基づく切換面, $K_{mag}\text{LTI}$:線形時不変切換面) を調整した。線形時不変切換面の傾きは、Lemniscate 切換面の平衡点における傾きと同じ 12.9181, 平衡点近傍で付加的な線形切換面を適用する領域の設計パラメータ $q = 0.3$ に設定した。尚、切換面の違いが制御性能に与える影響を調べるために、切換関数の連続関数による近似をはじめとするチャタリング抑止手法は適用していない。表 4.3 に、各手法の設計パラメータを示す。ここで、 u_{max} は制御入力の最大値である。

表 4.3: 各手法の設計パラメータ

ζ_n	$K_{ellipsoid}$	$K_{mag}\text{MinJ LTV}$	$K_{mag}\text{Lemniscate}$	$K_{mag}\text{LTI}$	u_{max}
1.0	600	5.8	3.0	3.0	2000
0.7	800	4.5	2.5	2.5	2000
0.3	1000	3.6	2.0	1.8	8000
-1.0	3000	1.6	0.75	1.5	8000

4.8.2 シミュレーション結果

図 4.8-図 4.11 に制御対象の減衰係数ノミナル値 $\zeta_n=1.0$ の場合の各手法のシミュレーション結果を示す。

図 4.8 は追従誤差 e と追従誤差の時間変化率 \dot{e} を表している。同図において、緑色の一点鎖線は楕円切換面を持つスライディングモード制御の応答波形、マゼンタの実線は滑らかな軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を持つスライディングモード制御の応答波形、赤色の点線は Lemniscate に基づく切換面を持つスライディングモード制御の応答波形、青色の破線は線形時不変切換面を持つスライディングモード制御の応答波形を表している。ここで、緑色の丸印は楕円切換面の誤差収束時間、赤色の丸印は Lemniscate に基づく切換面の誤差収束時間を表している。

図 4.9 は、横軸が追従誤差 e 、縦軸が追従誤差の時間変化率 \dot{e} とした位相平面上のトラジェクトリーを表している。同図において黒色の破線は線形時不変切換面、黒色の細い一点鎖線は楕円切換面、黒色の太い一点鎖線は線形時変切換面が沿う滑らかな軌道、黒色の点線は Lemniscate に基づく切換面である。図を見てわかるように、各手法共に設計された切換面に沿って初期状態から平衡状態に至ることがわかる。

図 4.10 は各手法のエネルギー消費量の時間変化を表している。ここで、エネルギー消費量は、状態量 x の時間変化 \dot{x} と制御量 $u(t)$ の積の絶対値を時間積分して算出した。

図 4.11 は各手法の制御入力 $u(t)$ を表している。

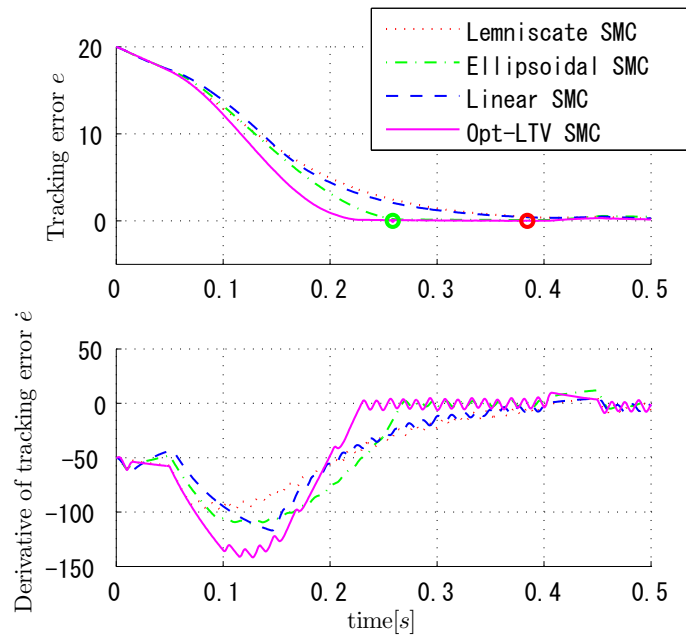


図 4.8: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=1.0$) 追従誤差の時間変化

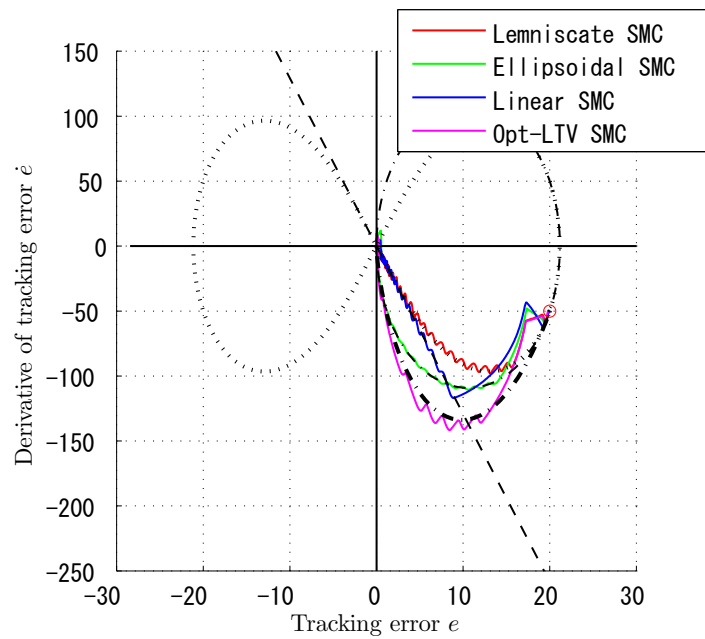


図 4.9: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=1.0$) トラジェクトリー

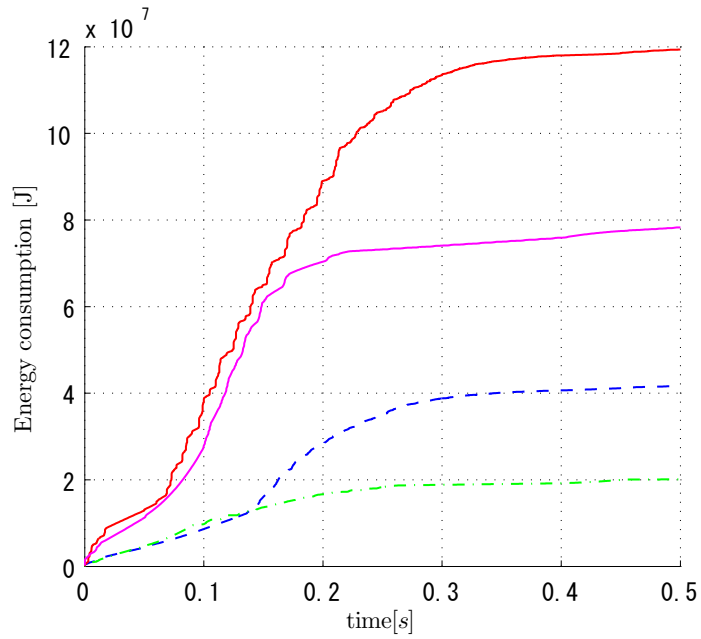


図 4.10: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=1.0$) エネルギー消費

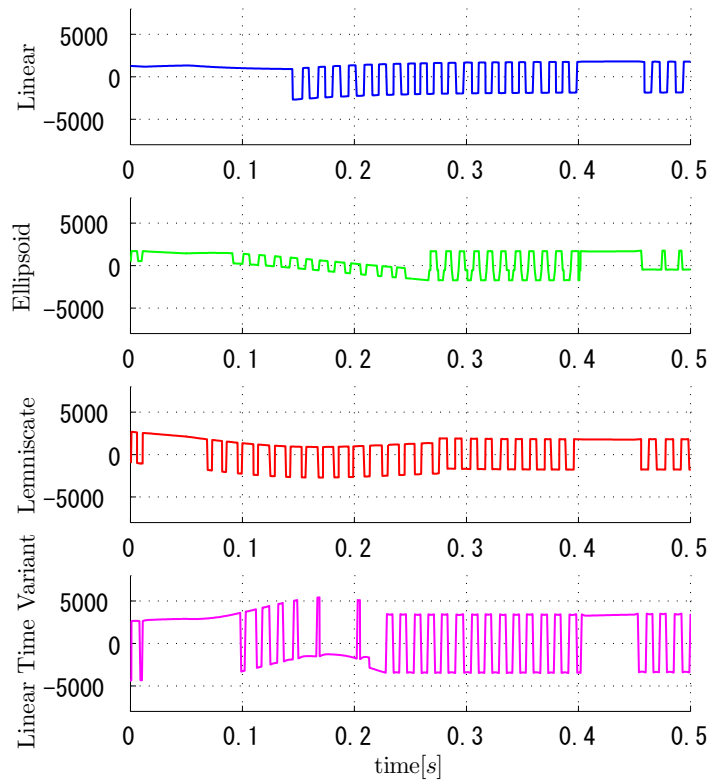


図 4.11: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=1.0$) 制御入力

図 4.12 は追従誤差 e と追従誤差の時間変化率 \dot{e} を表している。同図において、緑色の一点鎖線は楕円切換面を持つスライディングモード制御の応答波形，マジェンタの実線は滑らかな軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を持つスライディングモード制御の応答波形，赤色の点線は Lemniscate に基づく切換面を持つスライディングモード制御の応答波形，青色の破線は線形時不変切換面を持つスライディングモード制御の応答波形を表している。ここで、緑色の丸印は楕円切換面の誤差収束時間，赤色の丸印は Lemniscate に基づく切換面の誤差収束時間を表している。

図 4.13 は、横軸が追従誤差 e ，縦軸が追従誤差の時間変化率 \dot{e} とした位相平面上のトラジェクトリーを表している。同図において黒色の破線は線形時不変切換面，黒色の細い一点鎖線は楕円切換面，黒色の太い一点鎖線は線形時変切換面が沿う滑らかな軌道，黒色の点線は Lemniscate に基づく切換面である。図を見てわかるように、各手法共に設計された切換面に沿って初期状態から平衡状態に至ることがわかる。

図 4.14 は各手法のエネルギー消費量の時間変化を表している。

図 4.15 は各手法の制御入力を表している。

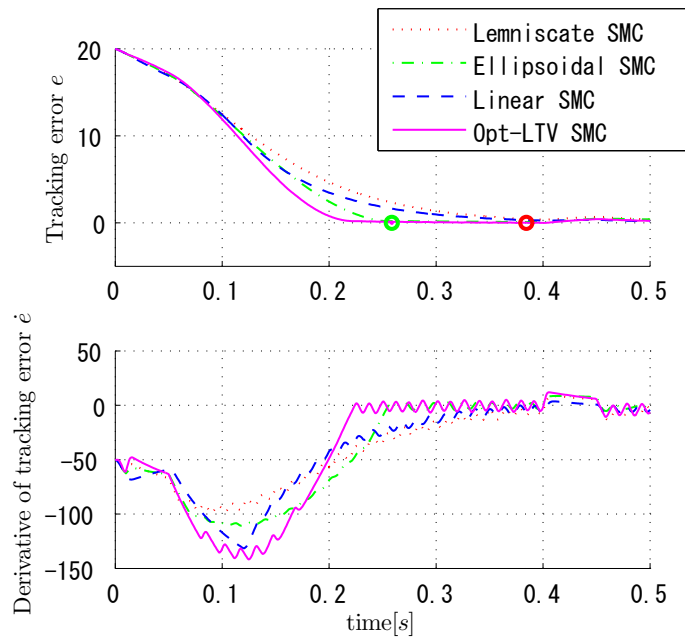


図 4.12: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.7$) 追従誤差の時間変化

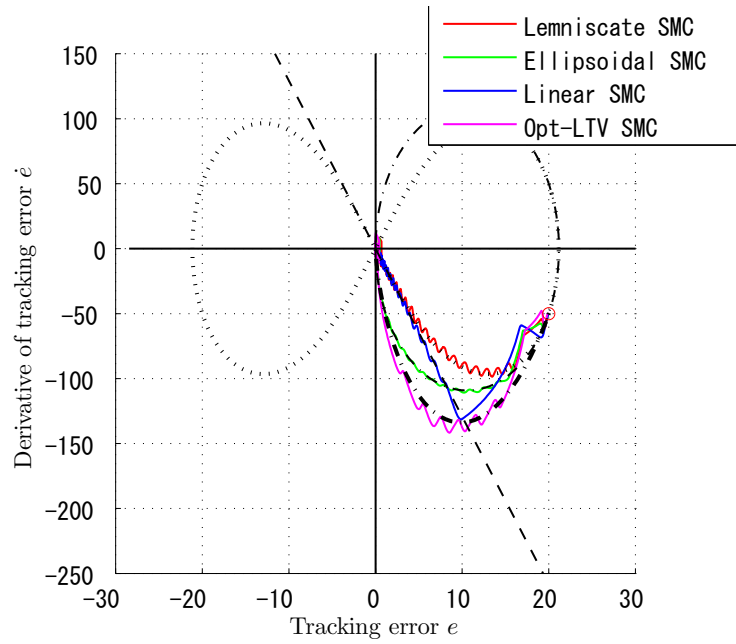


図 4.13: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.7$) トラジェクトリー

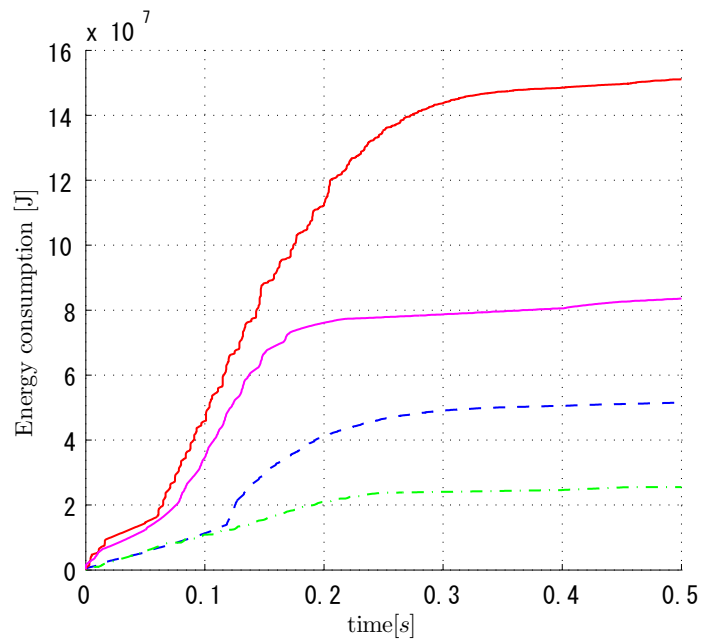


図 4.14: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.7$) エネルギー消費

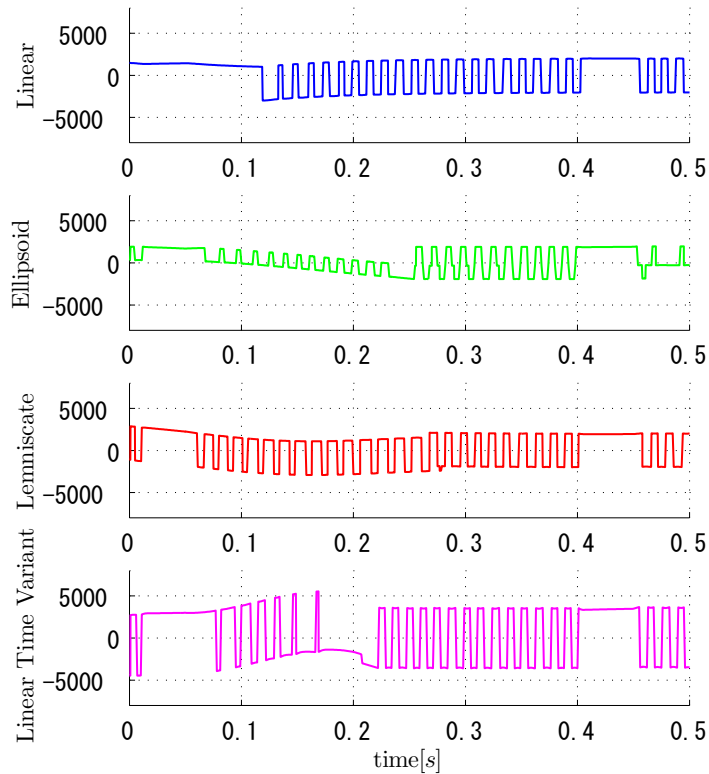


図 4.15: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.7$) 制御入力

図 4.16 は追従誤差 e と追従誤差の時間変化率 \dot{e} を表している。同図において、緑色の一点鎖線は楕円切換面を持つスライディングモード制御の応答波形，マジェンタの実線は滑らかな軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を持つスライディングモード制御の応答波形，赤色の点線は Lemniscate に基づく切換面を持つスライディングモード制御の応答波形，青色の破線は線形時不変切換面を持つスライディングモード制御の応答波形を表している。ここで、緑色の丸印は楕円切換面の誤差収束時間，赤色の丸印は Lemniscate に基づく切換面の誤差収束時間を表している。

図 4.17 は、横軸が追従誤差 e ，縦軸が追従誤差の時間変化率 \dot{e} とした位相平面上のトラジェクトリーを表している。同図において黒色の破線は線形時不変切換面，黒色の細い一点鎖線は楕円切換面，黒色の太い一点鎖線は線形時変切換面が沿う滑らかな軌道，黒色の点線は Lemniscate に基づく切換面である。図を見てわかるように、各手法共に設計された切換面に沿って初期状態から平衡状態に至ることがわかる。

図 4.18 は各手法のエネルギー消費量の時間変化を表している。

図 4.19 は各手法の制御入力を表している。

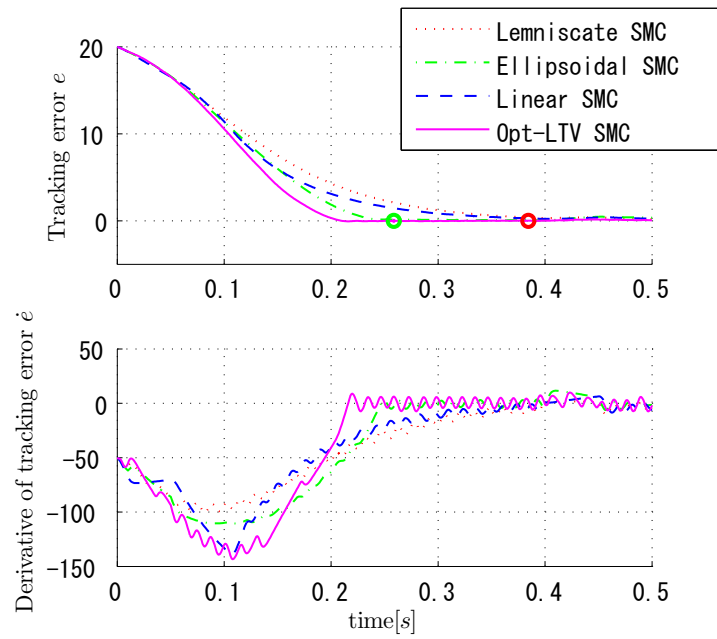


図 4.16: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.3$) 追従誤差の時間変化

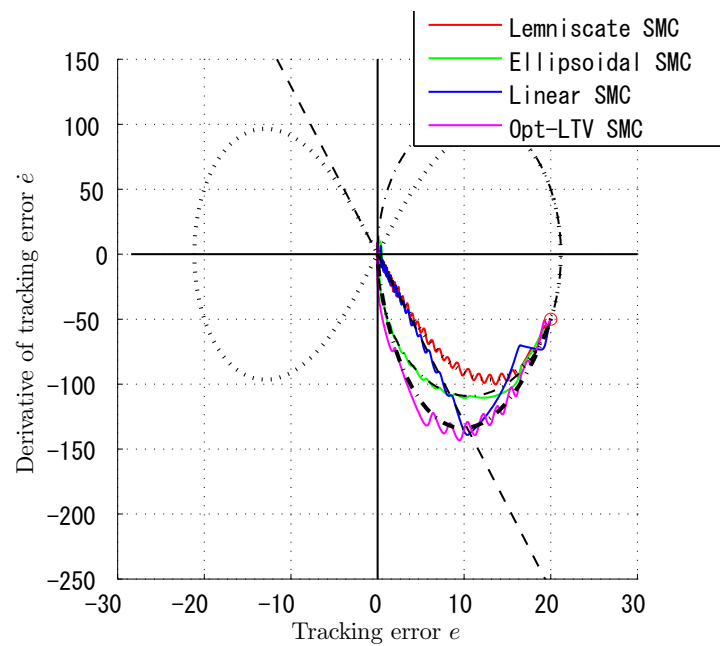


図 4.17: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.3$) トラジェクトリー

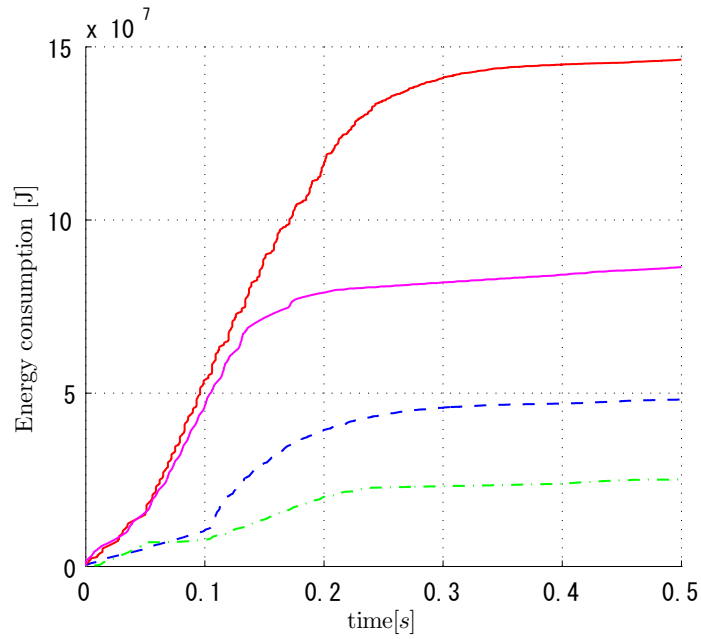


図 4.18: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.3$) エネルギー消費

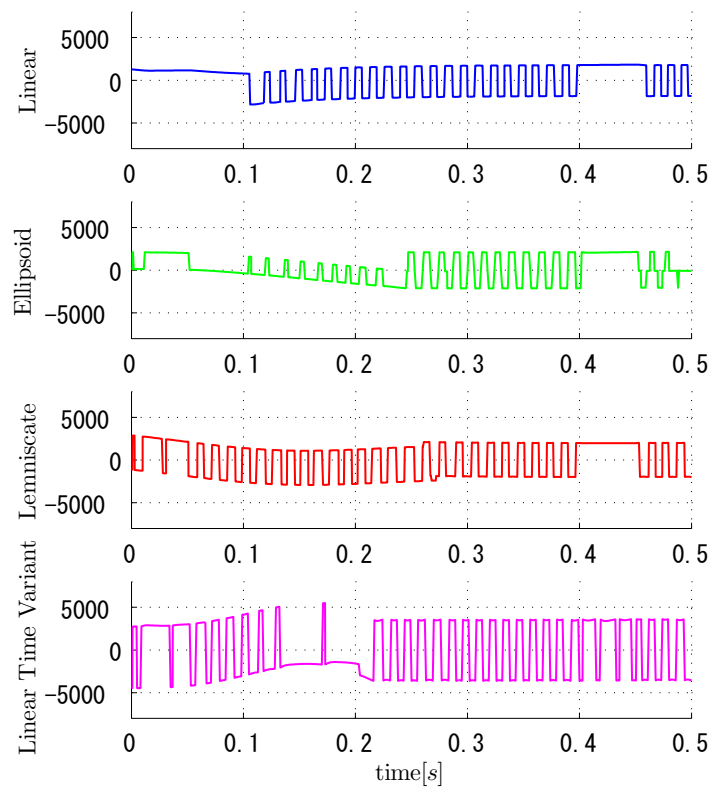


図 4.19: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=0.3$) 制御入力

図 4.20 は追従誤差 e と追従誤差の時間変化率 \dot{e} を表している。同図において、緑色の一点鎖線は楕円切換面を持つスライディングモード制御の応答波形，マジェンタの実線は滑らかな軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を持つスライディングモード制御の応答波形，赤色の点線は Lemniscate に基づく切換面を持つスライディングモード制御の応答波形，青色の破線は線形時不変切換面を持つスライディングモード制御の応答波形を表している。ここで、緑色の丸印は楕円切換面の誤差収束時間，赤色の丸印は Lemniscate に基づく切換面の誤差収束時間を表している。

図 4.21 は、横軸が追従誤差 e ，縦軸が追従誤差の時間変化率 \dot{e} とした位相平面上のトラジェクトリーを表している。同図において黒色の破線は線形時不変切換面，黒色の細い一点鎖線は楕円切換面，黒色の太い一点鎖線は線形時変切換面が沿う滑らかな軌道，黒色の点線は Lemniscate に基づく切換面である。図を見てわかるように、各手法共に設計された切換面に沿って初期状態から平衡状態に至ることがわかる。

図 4.22 は各手法のエネルギー消費量の時間変化を表している。

図 4.23 は各手法の制御入力を表している。

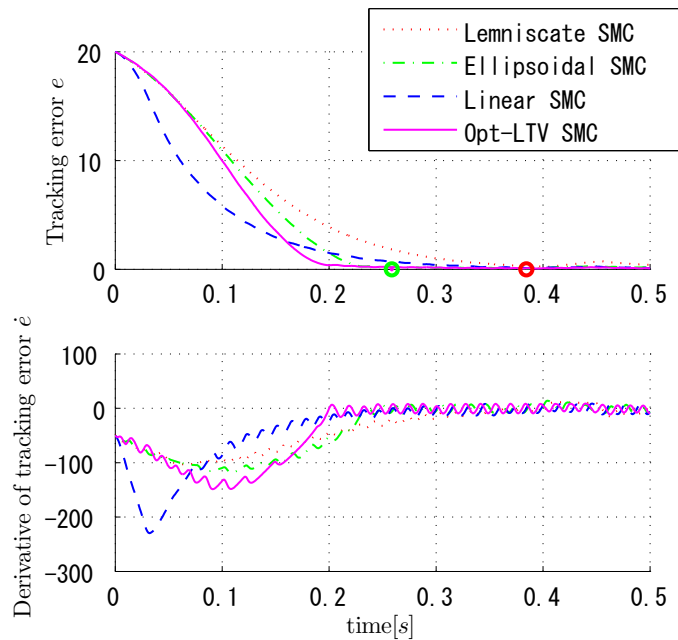


図 4.20: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n = -1.0$) 追従誤差の時間変化

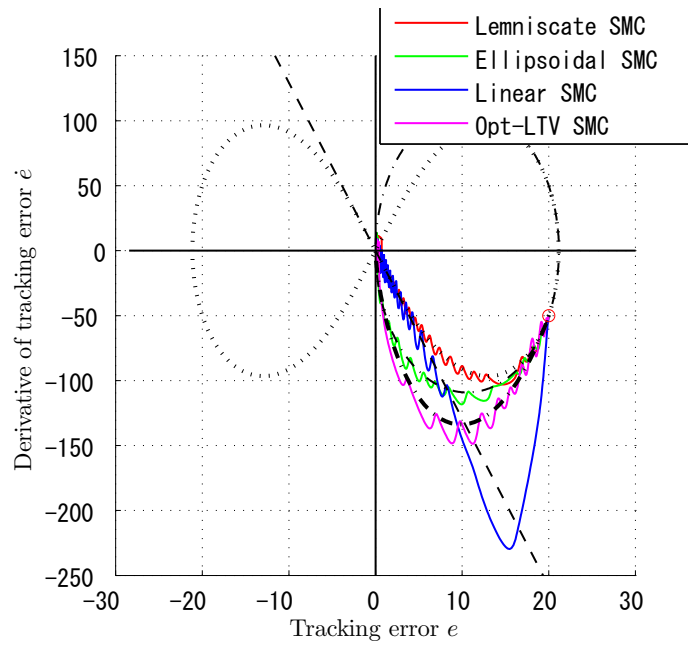


図 4.21: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=-1.0$) トラジェクトリー

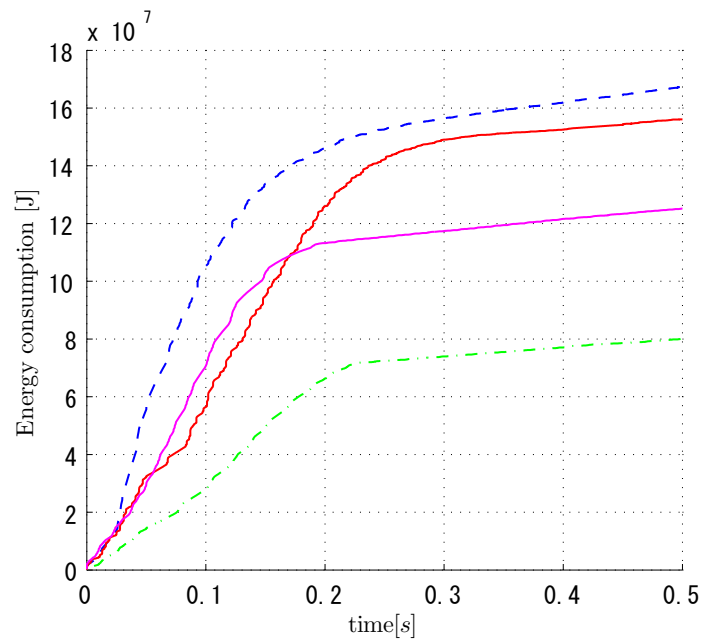


図 4.22: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=-1.0$) エネルギー消費

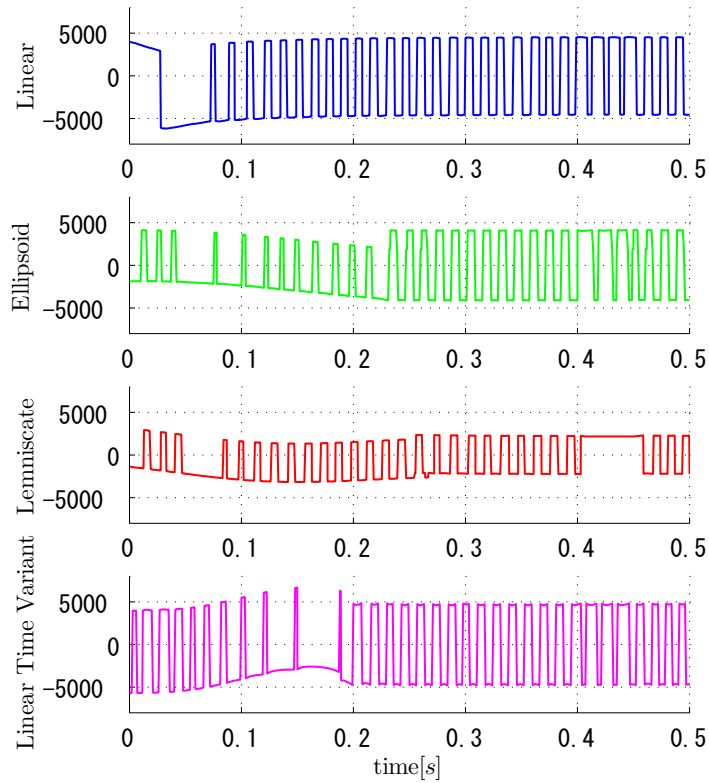


図 4.23: 各切換面の制御性能比較 ($\zeta_n=-1.0$) 制御入力

表 4.4: 各手法のエネルギー消費量

ζ_n	Ellipsoid	MinJ LTV	Lemniscate	LTI
1.0	2.01×10^7	7.83×10^7	1.19×10^8	4.19×10^7
0.7	2.55×10^7	8.36×10^7	1.51×10^8	5.16×10^7
0.3	2.51×10^7	8.84×10^7	1.48×10^8	4.82×10^7
-1.0	8.01×10^7	1.25×10^8	1.56×10^8	1.67×10^8

3種類の提案手法（楕円切換面，Lemniscateに基づく切換面，滑らかな軌道に沿って変化する線形時変切換面）と線形時不変切換面を用いた従来手法の制御性能を，同一条件で比較した．表 4.4 に，各手法のエネルギー消費量を示す．同表において，同じ減衰係数 ζ_n の制御対象に対するエネルギー消費量が最小のものを青字で，最大のものを赤字で示した．与えられたシミュレーション条件の下で，楕円切換面を持つスライディングモード制御則が最もエネルギー効率が良いことが示された．

ここで、特筆すべきは、従来の線形時不変切換面を用いた場合の誤差収束時間 $0.35s$ に対して楕円切換面を用いた場合の誤差収束時間 $0.259s$ であり、誤差収束時間が約 26% 短縮され、さらにエネルギー消費量を半減することができることである。

4.9 おわりに

本章では、非線形切換面として楕円切換面と Lemniscate に基づく切換面を提案した。これらの非線形切換面を持つスライディングモード制御則を導出し、その安定性を示した。また、第3章で示した躍度の変化率最小化軌道に沿って変化する線形時変切換面を提案した。線形時変切換面を持つスライディングモード制御則を導出し、その安定性を示した。最後に、1入力1出力の2次正準形で表されるシステムに、これらの手法を適用し、数値シミュレーションにより制御性能を比較した。楕円切換面を用いたスライディングモード制御は、スライディングモード制御の特徴である不確かさに対するロバスト性を犠牲にすることなく、従来の線形切換面を用いるスライディングモード制御に比べ、より素早く、省エネルギーで制御できることを示した。

第5章

境界層幅適応則によるチャタリング抑止

スライディングモード制御は不確かさを含む制御対象に対して、比較的容易にロバスト性を保つ制御系を構築することができる非線形制御手法として知られている。しかし、切換超平面近傍においてチャタリングと呼ばれる高周波振動が生じるという問題があった。そのため、従来からチャタリングを抑止するために様々な研究がなされてきた。本章では、いくつかのチャタリング抑止に関する従来研究を紹介する。また、本研究で提案するチャタリング抑止のための境界層幅調整則を導出し、その安定性を証明する。さらに、2次の正準形で表されるシステムに適用することにより提案手法と従来手法の制御性能を比較し、提案手法の有効性を示す。

5.1 チャタリング抑止に関する従来研究

本節では、チャタリング抑止に関する従来研究を紹介し、これらの手法の得失を説明する。

スライディングモード制御では、理論的には、切換制御入力項の符号関数が不連続変化するため、不連続変化する制御量が要求される。一般に、不連続な制御量に完全に追従可能なアクチュエータは存在せず、そのダイナミクスは何らかの時間遅れを持って応答する。そのため、この時間遅れが原因でチャタリングが発生することが知られている。そこで、従来から平滑化関数や飽和関数などの連続関数を用いて符号関数を近似し、切換面近傍に一定の境界層を設定することによりチャタリングを抑止する手法が提案されている [43]。

一定幅の境界層を用いた場合、境界層の幅を広く設定すると、スライディングモード制御の最大の特徴であるロバスト性が損なわれる。これに対して、境界層の幅を狭く設定すると、十分にチャタリング抑止効果が得られないという問題がある。そのため、不確かさのダイナミクスが時不変、もしくは切換制御入力への応答に対して十分に遅い場合にはロバスト性を保ちつつチャタリング抑止効果を得ることができる。しかし、不確かさのダイナミクスが大きく時間変化する場合には、十分にチャタリング抑止効果を発揮できないという問題があった。また、比較的ゆっくり連続変化する遅いダイナミクスを持った不確かさと、不連続変化する速いダイナミクスを持った不確かさが混在する場合のように、複数の不確かさを持つ制御対象を扱う場合には、スライディングモード制御の特徴である不確かさに対するロバスト性を犠牲にすることなく、十分なチャタリング抑止効果を発揮できない。例えば、切換制御入力のダイナミクスに対して、制御対象が十分にゆっくり時間変化する見做せるシステムのパラメータ変動と、無駄時間や機械系減速機のバックラッシュのような強い非線形性をもつ速いダイナミクスを持つ要素を併せ持つ場合には、ロバスト性とチャタリング抑止の両立が困難である。

このような問題を解決するために切換ゲインを調整する手法 [44, 82, 83] が提案されている。この手法は切換関数のゲインを調整することによりチャタリングを低減する。しかし、この手法では設計パラメータが多く、切換制御の応答性は調整されず、切換ゲインの大きさだけが調整されるため、ロバスト性とチャタリング抑止の両立が難しく、実システムへの適用が困難であった。

また、飽和関数の境界層幅を不確かさの程度に応じて調整する手法が提案されている [46]。この手法ではシステムが持つ不確かさを構造が既知でパラメータが未知な確定要素と、有界な不確定要素に分離して扱っている。この手法では、構造が既知な確定要素を推定し、その推定値に基づき補償し、残りの不確定要素を切換制御入力で補償する。ここで、不確定要素の上界値に基づき境界層幅を調整する。しかしながら、構造が既知でパラメータが未知な確定要素を何らかの方法で推定する必要があり、この推定精度が制御性能に直接影響を及ぼすという問題があった。

5.1.1 連続関数による符号関数の近似

本項では，連続関数による符号関数の近似を用いたチャタリング抑止手法を説明する．図 5.1 に符号関数 $\text{sgn}(\cdot)$ の連続関数による近似を示す．同図において，実線は式 (5.1) で表される符号関数，一点鎖線は式 (5.2) で表される飽和関数，破線は式 (5.3) で表される平滑化関数を表している．図から，符号が切り換る切換面近傍に幅 ϵ の境界層が生じることがわかる．

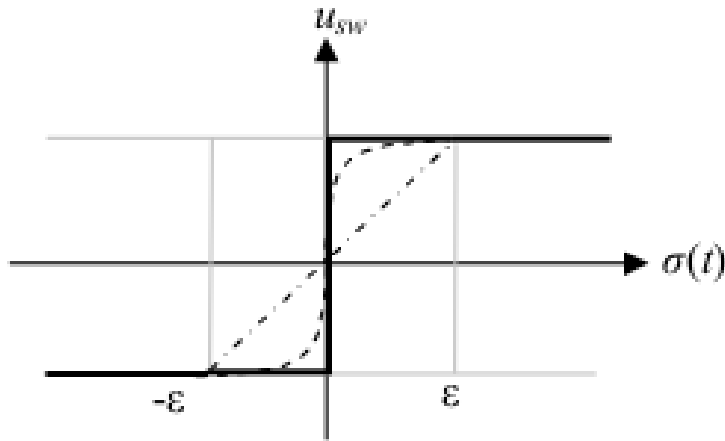


図 5.1: Approximation of the sign function.

$$\text{sgn}(\sigma(t)) = \frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)|} \quad (5.1)$$

$$\text{sat}(\sigma(t)) = \begin{cases} K \text{sgn}(\sigma(t)) & |\sigma(t)| > \epsilon \\ \sigma(t) & |\sigma(t)| \leq \epsilon \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)| + \delta} \quad (5.3)$$

5.1.2 ゲイン適応則

Poznyak ら [44] は、スライディングモード制御におけるチャタリング抑止のために、以下に示すような切換ゲイン適応則を提案した。

(i) $|\sigma| \neq 0$ の場合

$$\dot{K} = \bar{K}_1 \cdot |\sigma(x, t)| \quad (5.4)$$

ここで、 $\bar{K}_1 > 0$ である。

(ii) $|\sigma| = 0$ の場合

$$K(t) = \bar{K}_2 \cdot |\eta| + \bar{K}_3 \quad (5.5)$$

$$\tau \dot{\eta} + \eta = \text{sign}(\sigma(x, t)) \quad (5.6)$$

ここで、 τ はローパスフィルタの時定数であり、十分小さい値を用いる。また、 $\bar{K}_2, \bar{K}_3 > 0$ である。この手法では、到達モードでゲインが増加し、スライディングモードにおいて切換制御をローパスフィルタで平均化した状態 η に基づきゲイン適応する。しかしながら、不確かさ/摂動が変化して、その大きさが \bar{K}_2 を超えるとスライディングモードから外れる。このとき (i) を経て再度スライディングモードに至る。この手法は切換制御をローパスフィルタで平均化した状態 η に基づいて切換ゲインを調整する。そのため、この制御系の性能はローパスフィルタの時定数 τ の選び方に大きく依存する。また、設計パラメータ $(\bar{K}_1, \bar{K}_2, \bar{K}_3, \tau)$ が4つあり、それぞれのパラメータが、互いに影響をおよぼすので調整が難しいという問題がある。

5.1.3 従来の境界層幅適応則

Slotine [46] は、システムが持つ不確かさを構造が既知でパラメータが未知な確定要素と、有界な不確定要素に分離して扱った。この手法では、確定要素を何らかの方法で推定し、推定した確定要素に基づいて補償する。その上で、残りの有界な不確定要素の上界値に基づき境界層の幅を調整する。いま、次に示す 2 次系を考える。

$$\ddot{x} + f + u = 0 \quad (5.7)$$

ここで、 u は制御入力、 f は制御対象のダイナミクスを表している。尚、制御対象のダイナミクスは線形時不変系だけでなく、線形時変系や非線形系でも良い。この制御系の制御目的は状態量 $x(t)$ を参照値 $x_d(t)$ に追従させることである。いま、追従誤差 e とすると、次式が与えられる。

$$e(t) = x(t) - x_d(t) \quad (5.8)$$

ここで、制御対象のダイナミクスの推定値 \hat{f} に対する推定誤差の上界値 F を次式で表す。

$$|\hat{f} - f| \leq F \quad (5.9)$$

線形時不変切換面を持つスライディングモード制御則において、有界な不確定要素の上界値に基づく境界層幅を調整則を導出するために Lyapunov 関数の候補として、次式を考える。

$$|\sigma| \geq \Phi \Rightarrow \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \sigma^2 \geq (\dot{\Phi} - \eta) |\sigma| \quad (5.10)$$

ここで、 σ は切換面を表す方程式、 η は正の定数、 Φ は境界層幅である。

このとき、境界層幅適応則として次式が導かれる。

$$\dot{\Phi} = -\lambda\Phi + (F + \eta) \quad (5.11)$$

また、制御入力は次式で与えられる。

$$u = \ddot{x}_d - \lambda\dot{e} + \hat{f} - (F + \eta - \dot{\Phi}) \text{sat}[(\dot{e} + \lambda e) / \Phi] \quad (5.12)$$

ここで、 λ はスライディングモードにおける誤差収束特性を決める時定数であり、切換面の傾きを表す定数である。この手法は、確定要素を何らかの方法で推定することを前提としている。そのため、制御性能が推定精度に依存するため精度良く確定要素を推定できない場合に制御性能が低下するという問題がある。

5.1.4 Higher Order Sliding Mode (HOSM)

HOSM (Higher Order Sliding Mode) [61] は、従来のスライディングモード制御の考え方に基づき一般化された手法である。この手法は、切換関数 σ の高次微分量を用いることにより、従来の SMC が持つロバスト性と制御性能を保ちつつ、チャタリングを低減する。

HOSM では、実装の簡単さから、特に 2 次の制御器がよく用いられる。その中でも最も多く用いられている二次のスーパーツイストスライディングモード制御を紹介する。いま、次式で表される切換関数を考える。

$$\dot{\sigma}(t) = \Phi(\sigma, t) + \gamma(\sigma, t) u_{st} \quad (5.13)$$

ここで、 $|\phi| \leq \Phi$, $0 \leq \Gamma_m \leq \gamma(\sigma, t) \leq \Gamma_M$ である。このとき、スーパーツイスティングコントローラの制御入力は、

$$u_{st} = u_1 + u_2 \quad (5.14)$$

$$u_1 = \begin{cases} -u_{st} & \text{if } |u_{st}| > U \\ -W \operatorname{sgn}(\sigma) & \text{if } |u_{st}| \leq U \end{cases} \quad (5.15)$$

$$u_2 = \begin{cases} -\lambda \sqrt{|\sigma_0|} \operatorname{sgn}(\sigma) & \text{if } |\sigma| > \sigma_0 \\ -\lambda \sqrt{|\sigma|} \operatorname{sgn}(\sigma) & \text{if } |\sigma| \leq \sigma_0 \end{cases} \quad (5.16)$$

ここで、 W と λ は次式を満たす。

$$W > \frac{\Phi}{\Gamma_m} \quad (5.17)$$

$$\lambda^2 \geq \frac{4\Phi\Gamma_M(W + \Phi)}{\Gamma_m^2\Gamma_m(W - \Phi)} \quad (5.18)$$

5.2 境界層幅適応則の導出と安定性の証明

一般に、状態フィードバック則に基づくサーボ系において、システムの不確かさが増大すると追従誤差が生じる。ここで、追従誤差を不確かさの尺度として用いると誤差が十分大きくなると調整効果が得られないという問題が生じる。この問題に対する対策として、スライディングモード制御における境界層幅調整則をハイゲインに設定すると観測誤差やノイズに対して敏感になり、振動が誘発されて十分なチャタリング抑止効果が得られない。そこで、追従誤差 $e(t)$ および追従誤差の変化率 $\dot{e}(t)$ に応じて境界層幅の変化速度を調整し、不確かさに対して適切な境界層幅に調整することにより、スライディングモード制御の最大の特徴であるロバスト性を犠牲にすることなくチャタリングを抑止する手法を提案する。提案手法では、不確かさのダイナミクスに応じて適切に切換制御の応答性が調整されるので、比較的ゆっくり連続変化する不確かさと不連続変化する不確かさが混在するシステムに対しても適切に切換制御の応答性を調整することができる。

いま、境界層の幅 $\delta > 0$ を適応的に調整することを考える。ここで、 $\gamma = 1/\delta$ と置いて、Lyapunov 関数の候補を式 (5.19) とする。

$$V = \frac{1}{2} (|\sigma| - \gamma)^2 \quad (5.19)$$

このとき、式 (5.19) の時間微分が式 (5.20) を満たせばよい。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (|\sigma| - \gamma) \left(\frac{\sigma}{|\sigma|} \dot{\sigma} - \dot{\gamma} \right) < -\eta ||\sigma| - \gamma| \\ &\iff \frac{|\sigma| - \gamma}{||\sigma| - \gamma|} \left(\frac{\sigma}{|\sigma|} \dot{\sigma} - \dot{\gamma} \right) < -\eta \end{aligned} \quad (5.20)$$

ここで、 η は収束の速さを決める正の定数である。

式 (5.20) は 2 つの符号関数を含んでいる。これにより、次の境界層幅調整則が得られる。

- (i) $|\sigma| < \gamma$ のとき
 - (a) $\sigma > 0$ のとき $\dot{\gamma} > -\eta + \dot{\sigma}$
 - (b) $\sigma < 0$ のとき $\dot{\gamma} < -\eta - \dot{\sigma}$
- (ii) $|\sigma| > \gamma$ のとき
 - (a) $\sigma > 0$ のとき $\dot{\gamma} < \eta + \dot{\sigma}$
 - (b) $\sigma < 0$ のとき $\dot{\gamma} > \eta - \dot{\sigma}$

上記の適応則を用いることにより σ の時間変化よりも η の寄与分だけ速く境界層幅 δ が調整される。また、 $|\sigma|\delta = 1$ となるように働くので、切換面からの距離 σ に反比例するように境界層幅 δ が調整される。ここで、境界層幅に上限値と下限値を設定する。上限値は追従誤差の許容値を満たす範囲で最大となる値を用いる。下限値は最も不確かさが少ない場合にチャタリングが発生しない範囲で最小となる値を用いる。さらに、 σ および、 $\dot{\sigma}$ に応じて、収束の速さを調整するために式 (5.21) を用いて収束の速さを調整する。

$$\eta = \frac{|\sigma|}{|\dot{\sigma}| + \epsilon} \quad (5.21)$$

ここで、 ϵ は分母のゼロ割を防ぐための微小な正の定数である。式 (5.21) を用いることにより、切換面から遠く、ゆっくり変化する程急峻に、切換面に近く、速く変化する程緩やかに誤差収束するように調整則を動作させることができる。

5.3 シミュレーション

本節では、本章で示した境界層幅適応則を線形時不変切換面および楕円切換面に適用して数値シミュレーションを行う。また、同一シミュレーション条件における制御性能を従来手法と比較することで提案手法の有効性を示す。

5.3.1 シミュレーション条件

第2章に示した、1入力1出力の2次正準形で表されるシステムに対してモデル追従スライディングモード制御を適用する。この制御系の目的は、規範モデルに参照入力 r を入力して得られる応答にプラントの状態量を追従させることである。

ここで、規範モデル、プラントおよびアクチュエータは式 (5.22) に示す2次標準形の伝達関数で表される。

$$G_*(s) = \frac{\omega_*^2}{s^2 + 2\zeta_*\omega_*s + \omega_*^2} \quad (5.22)$$

尚、参照モデルに入力される参照入力を $r = 500\sin(2\pi f_r t)$, $f_r = 0.5[\text{Hz}]$ とした。アクチュエータダイナミクスとプラントパラメータは未知、参照モデルのパラメータをノミナル値として制御系を設計した。また、参考のために2自由制御と外乱オブザーバを用いたシミュレーションを行った。参照モデル、プラント、アクチュエータ、外乱オブザーバのローパスフィルタのパラメータを表5.1に示す。また、シミュレーションの初期状態を表5.2に示す。

表 5.1: Simulation parameter

	ζ_*	ω_*	$f_*[\text{Hz}]$
Reference model	1.0	$2\pi f_r$	1.0
Plant	$0.4 \pm 30\%$	$2\pi f_m \pm 30\%$	1.0
Actuator	1.0	$2\pi f_a$	100
Low pass Filter	1.0	$2\pi f_f$	30

表 5.2: Initial state

	x_0	\dot{x}_0	\ddot{x}_0
Reference model	0	0	0
Plant	30	15	-3000

本研究では、従来手法の設計パラメータとして、Poznak らの手法では、 $\bar{K}_1 = 10000$, $\bar{K}_2 = 5000$, $\bar{K}_3 = 1000$, $\tau = 0.01$, を用いた。また、Slotine らの手法の設計パラメータとして $\eta = 150$, $F = 8000$ を用いた。HOSM の設計パラメータは、 $U = 500$, $\lambda = 5000$, $W = 180$, $\sigma_0 = 10$ を用いた。線形時不変切換面の傾き $S = 20$, 提案手法の設計パラメータ $K=5000$, 境界層幅の調整範囲 $20 < \delta < 78$ を用いた。尚、Slotine らの手法において、制御対象のダイナミクスの推定値 \hat{f} は真値 f が得られるものと仮定してシミュレーションを行った。さらに、参考のために 2 自由度制御と外乱オブザーバを用いた手法によるシミュレーションを行った。ここで、参照モデルは、モデル追従スライディングモード制御と同一モデルを用い、2 自由度制御と外乱オブザーバのプラントモデルはノミナルプラントモデルを用いた。状態フィードバック則には PID 制御を適用した。フィードバックゲインは、それぞれ、 $K_P : 6000$, $K_I = 0$, $K_D : 170$ である。また、外乱オブザーバのフィードバックゲイン $K_{DOBS} : 0.99$ とした。

ここで、プラントパラメータは式 (5.23) に示すように正弦波状に変動するものとする。

$$\begin{aligned}
 \zeta_m &= 0.6 \{1 + \Delta \sin(2\pi f_\zeta t + \pi/6)\}, f_\zeta = 4[\text{Hz}] \\
 \omega_m &= 0.7 \{1 + \Delta \sin(2\pi f_\omega t + \pi/2)\}, f_\omega = 3[\text{Hz}]
 \end{aligned} \tag{5.23}$$

ここで、 $\Delta = 0.3$ はパラメータ変動係数である。さらに、次のようなステップ状外乱 d を加えた。 $d = -2000$ ($0.02 < t < 0.09$), 2000 ($0.4 < t < 0.45$) また、制御対象の状態量 x, \dot{x} の観測量には、それぞれパワー 1.0×10^{-6} , 1.0×10^{-3} のホワイトノイズを印加した。

5.3.2 数値シミュレーション

図 5.2-図 5.9 にシミュレーション結果を示す．ここで，青色の実線は Poznak らの手法のシミュレーション結果，水色の実線は Slotine の手法のシミュレーション結果，緑色の実線は HOSM 手法のシミュレーション結果，赤色の実線は提案する境界層幅適応則と線形時不変切換面を組み合わせた場合のシミュレーション結果，黒色の実線は，一定幅境界層を線形時不変切換面を適用した場合のシミュレーション結果，マゼンタの実線は，提案する境界層幅適応則と楕円切換面を組み合わせた場合のシミュレーション結果を表している．また，黄色の実線は，2 自由度制御と外乱オブザーバを用いた場合のシミュレーション結果を表している．図 5.2 に，制御対象の状態量と，その時間変化率を示す．ここで，黒色の点線は参照軌道である．図を見てわかるように，各手法とも，よく参照軌道に追従していることがわかる．

図 5.3 に，追従誤差と，その時間変化率の時間応答を示す．同図より，楕円切換面を用いた提案手法は約 $t=0.15s$ において誤差収束している．これに対して，その他の線形時不変切換面を用いた手法は約 $t=0.3s$ において誤差収束していることがわかる．

図 5.4 に，追従誤差とその時間変化率の相平面トラジェクトリーを示す．図中の右下の軌跡が膨らんだ部分と原点付近において，ステップ状の外乱が印加されているためトラジェクトリーが切換面からずれているが外乱がなくなると直ちに切換面に追従している．点線の直線は従来手法の線形切換面，楕円は提案手法の切換面を表している．

図 5.5 に，各手法の制御入力を示す．図を見てわかるように，Poznyk らの手法ではチャタリングが低減しているが，完全に除去できていない．しかしながら，状態量の観測ノイズの影響を受けていない．また，HOSM は状態量の観測ノイズの影響を受けて制御量に高周波振動が生じている．これに対して，提案手法はこれらの手法に比べてノイズの影響を受けにくく，制御量の最大値も比較的小さい．

図 5.6 に，各手法の適応パラメータの時間変化と切換関数 $\sigma(t)$ を示す．ここで，黒色の点線は各手法の境界層幅を表している．

図 5.7 に，提案手法と従来手法のエネルギー消費量を示す．ここで，エネルギー消費量は，状態量 x の時間変化と制御量の積の絶対値を時間積分して算出した．提案手法は，提案する境界層幅適応則と楕円切換面を組み合わせた手法が最もエネルギー消費量が少なく，次いで提案する境界層幅適応則と線形時不変切換面を組み合わせた手法がエネルギー消費量が少ないことがわかる．

図 5.8 に，提案手法と従来手法の躍度絶対値の積分値を示す． $0 < t < 0.15$ までの楕円

切換面の区間において、提案する境界層幅適応則と楕円切換面を組み合わせた手法が最も躍度絶対値の積分値が小さく、次いで提案する境界層幅適応則と線形時不変切換面を組み合わせた手法が躍度絶対値の積分値が小さいことがわかる。

図 5.9 に、提案手法と従来手法の追従誤差絶対値の積分値を示す。図より、各手法共に、追従誤差絶対値の積分値に大きな差はないが Slotine の手法が最も追従誤差絶対値の積分値が小さい。これは、制御対象のダイナミクスの推定値に真値を用いたためである。

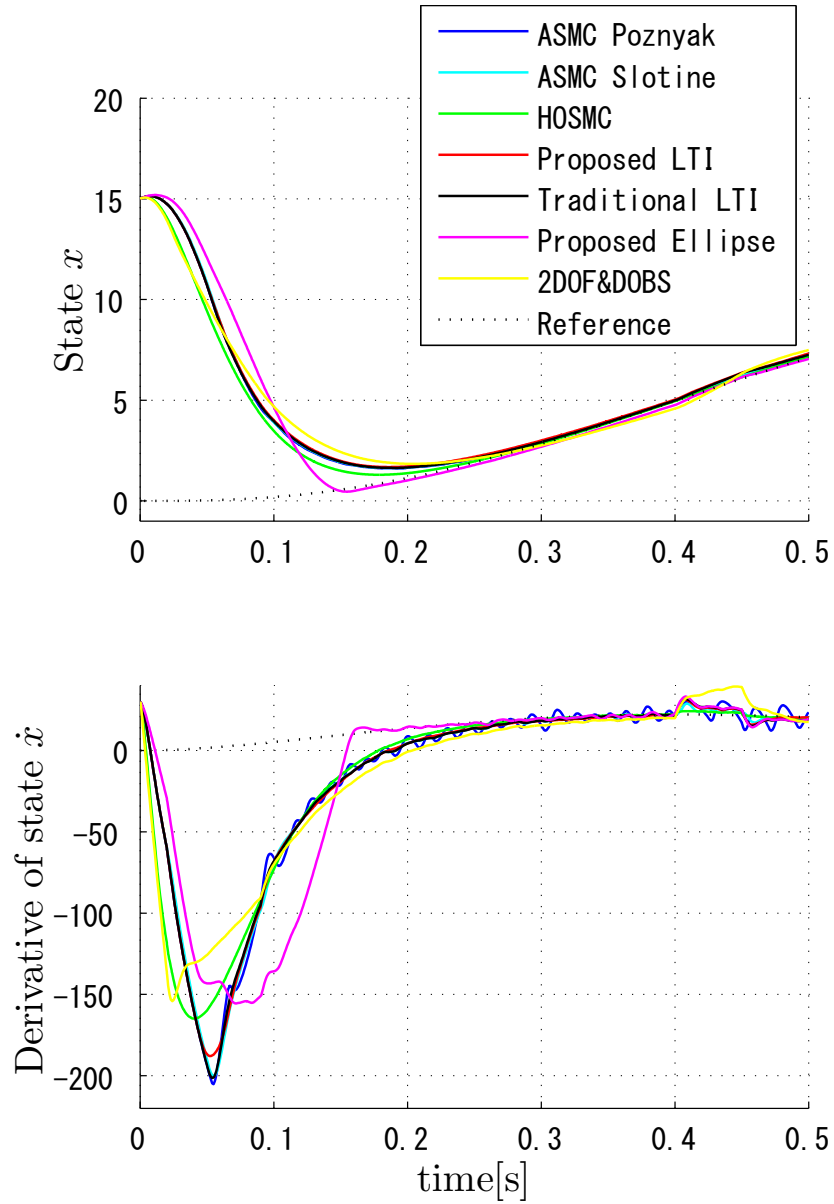


図 5.2: 状態量の時間変化

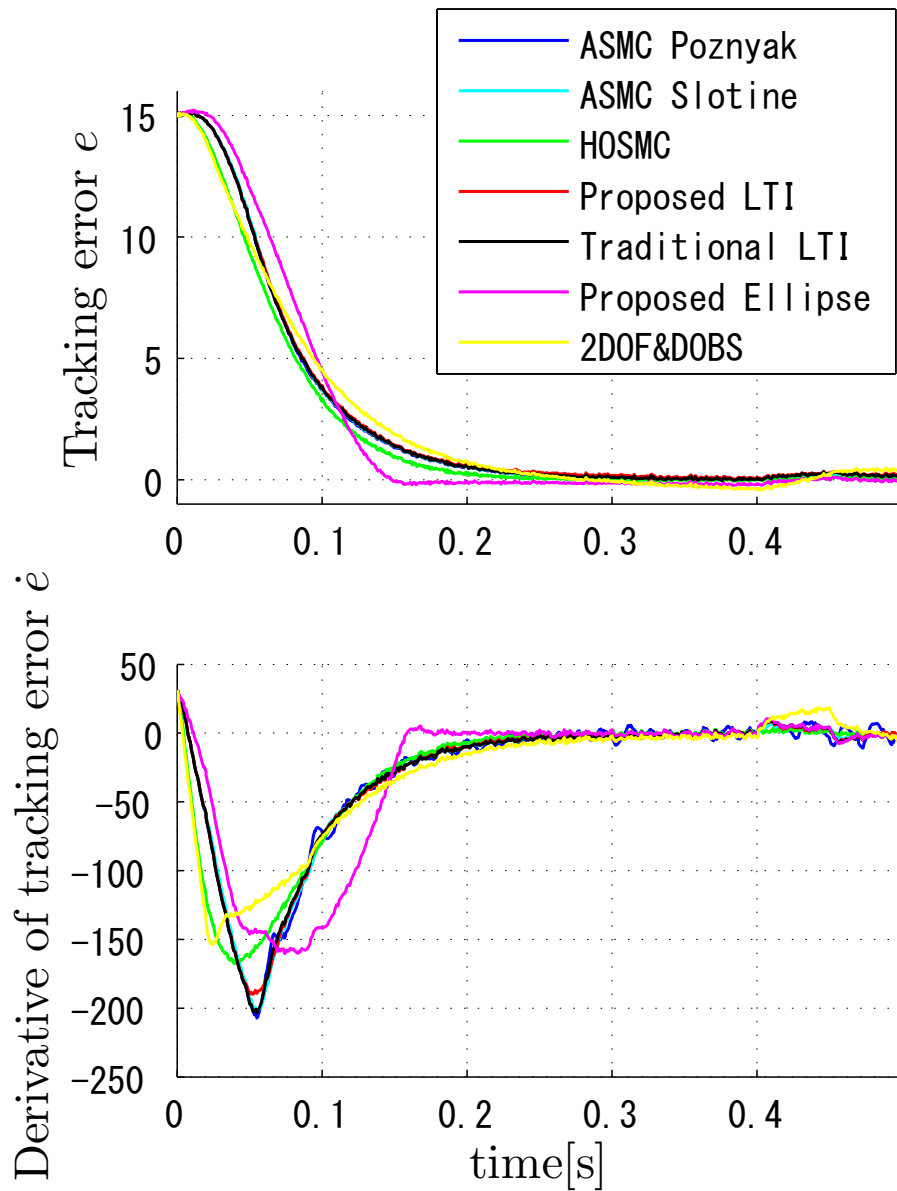


図 5.3: 追従誤差の時間変化

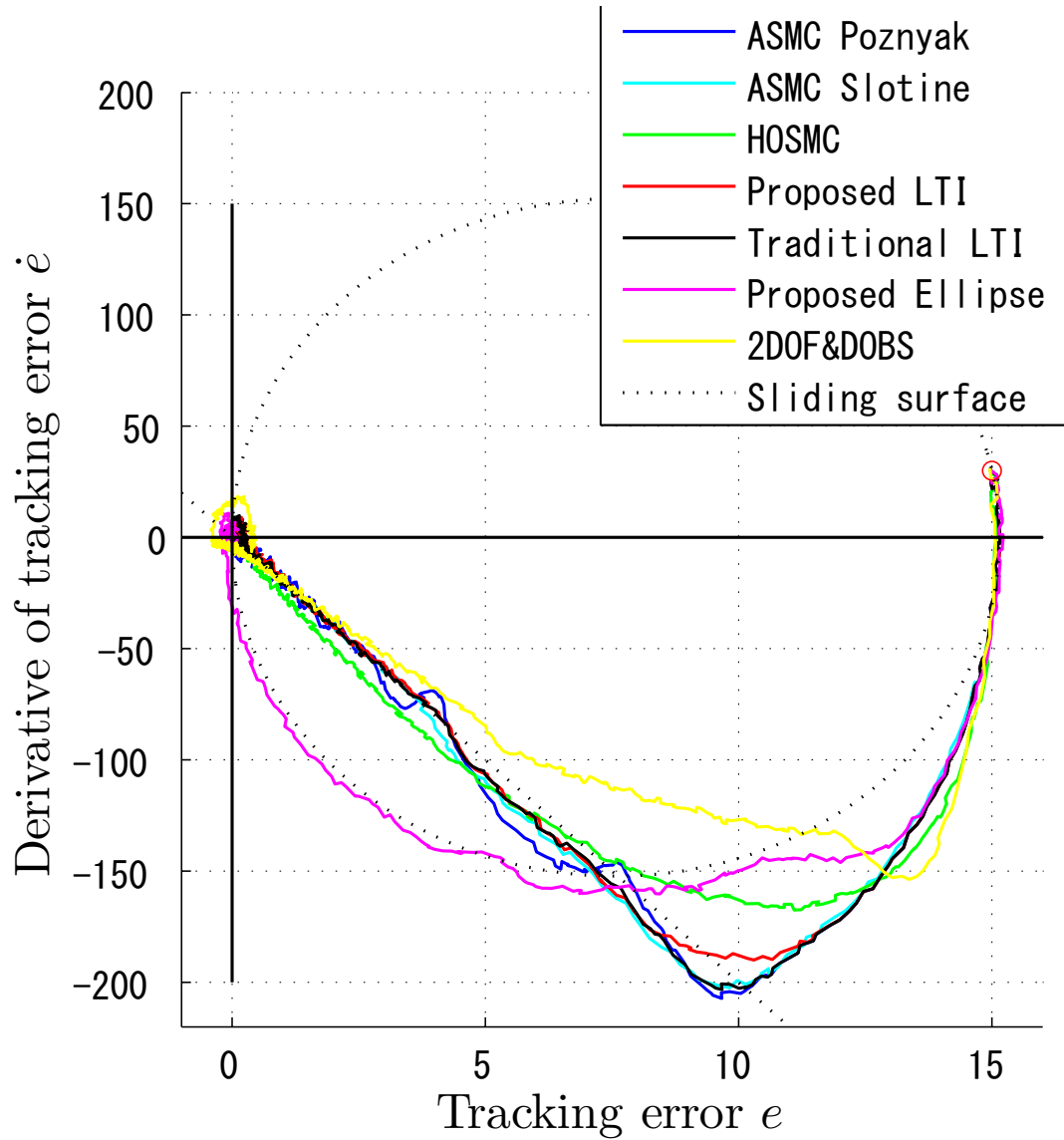


図 5.4: 位相平面上のトラジェクトリー

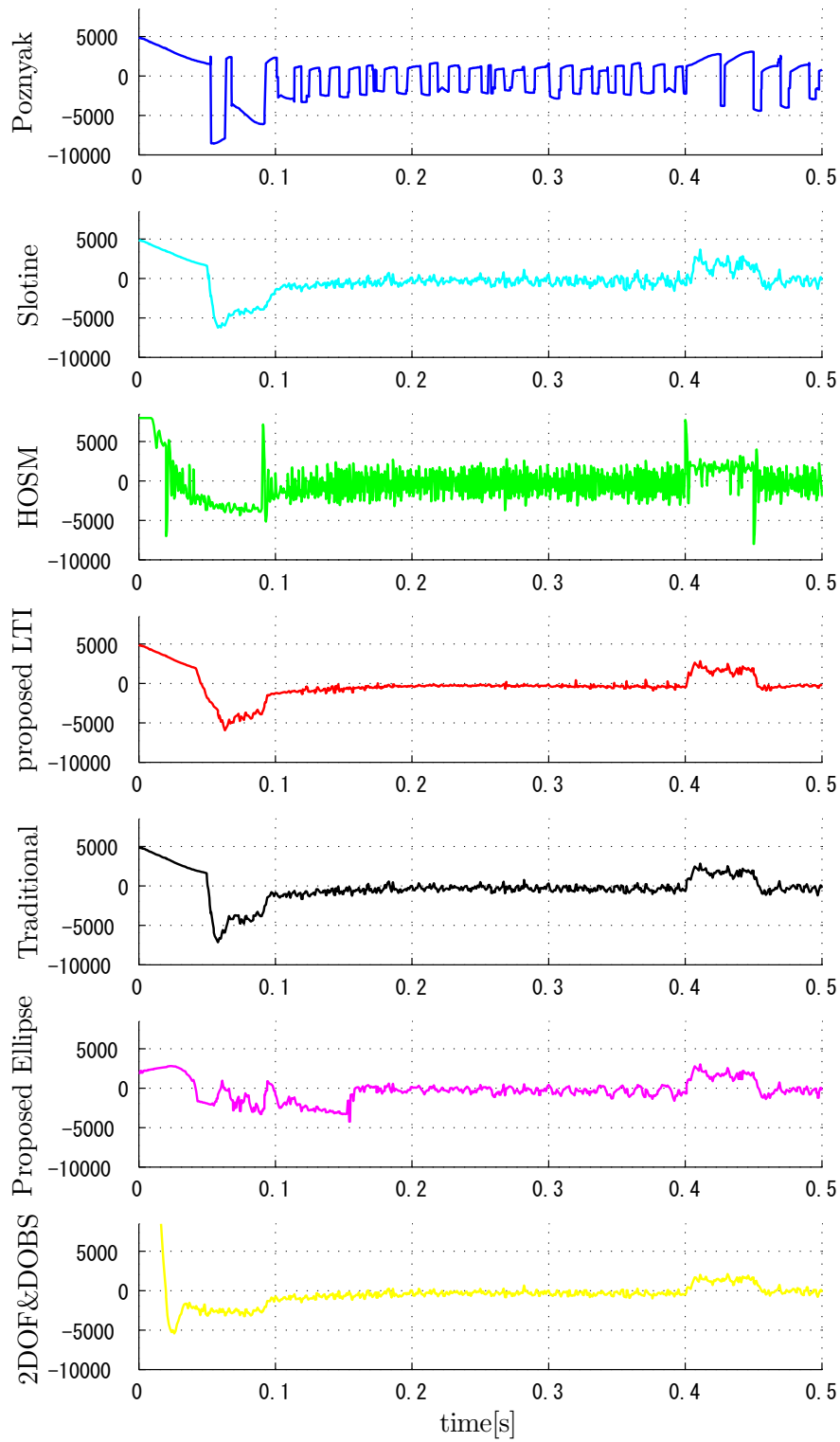


図 5.5: 制御入力

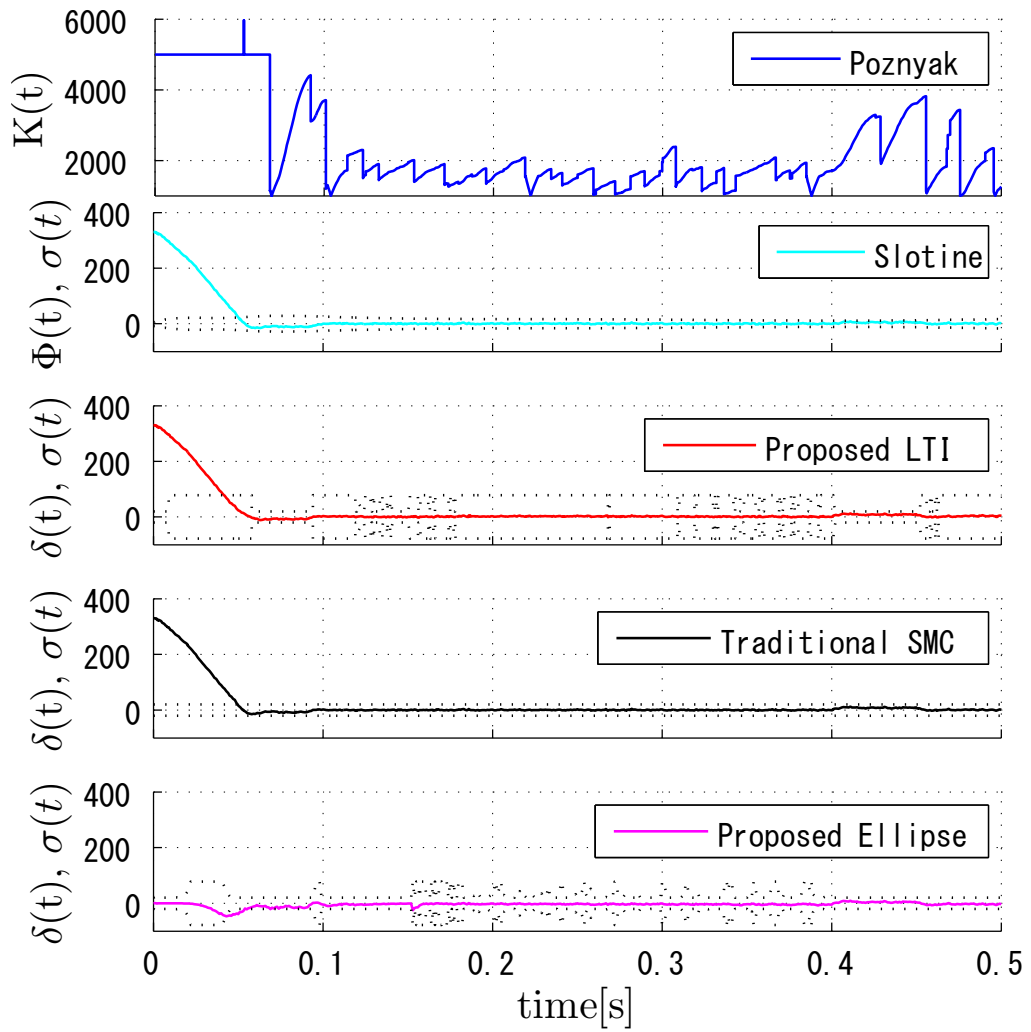


図 5.6: 適応パラメータの時間変化

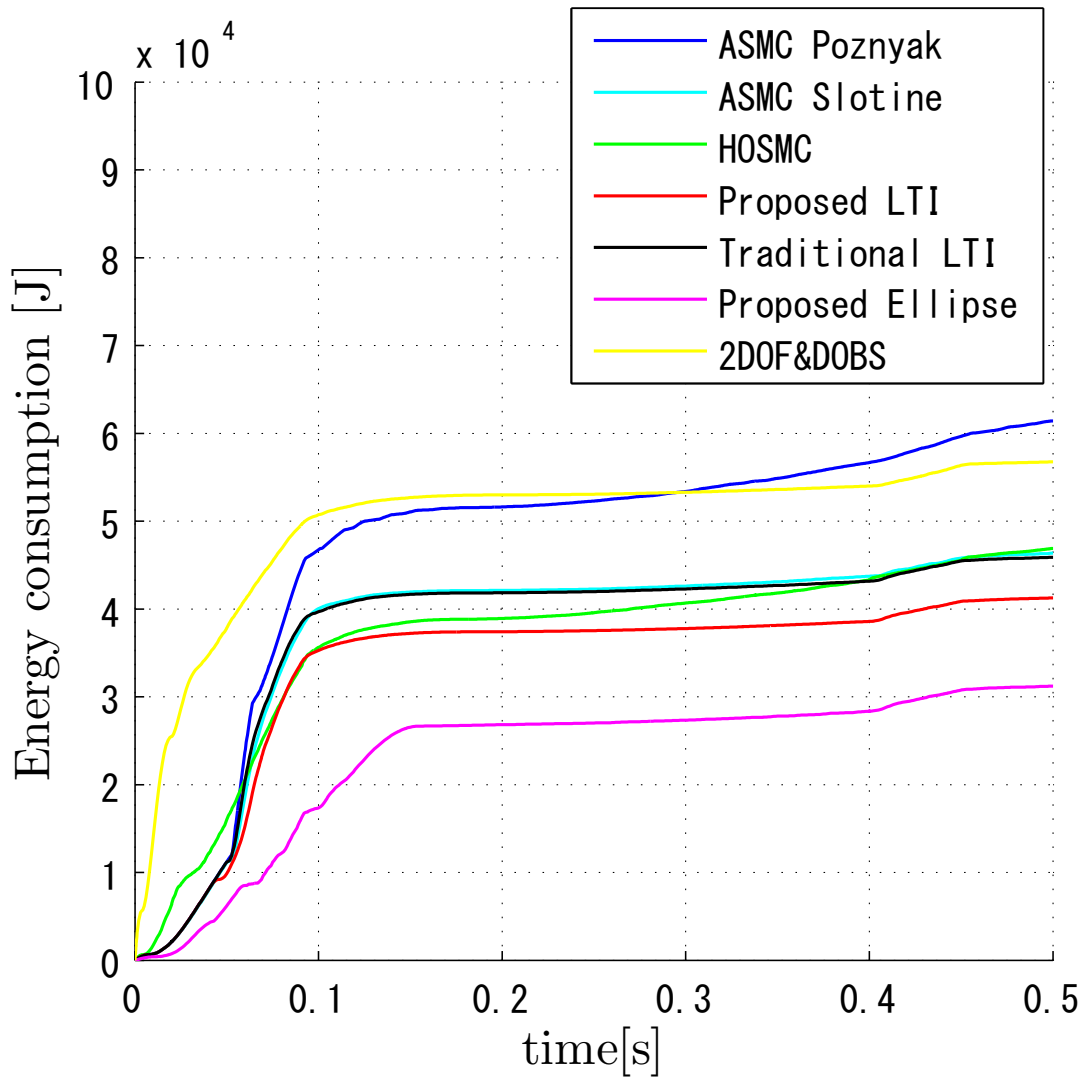


図 5.7: エネルギー消費量

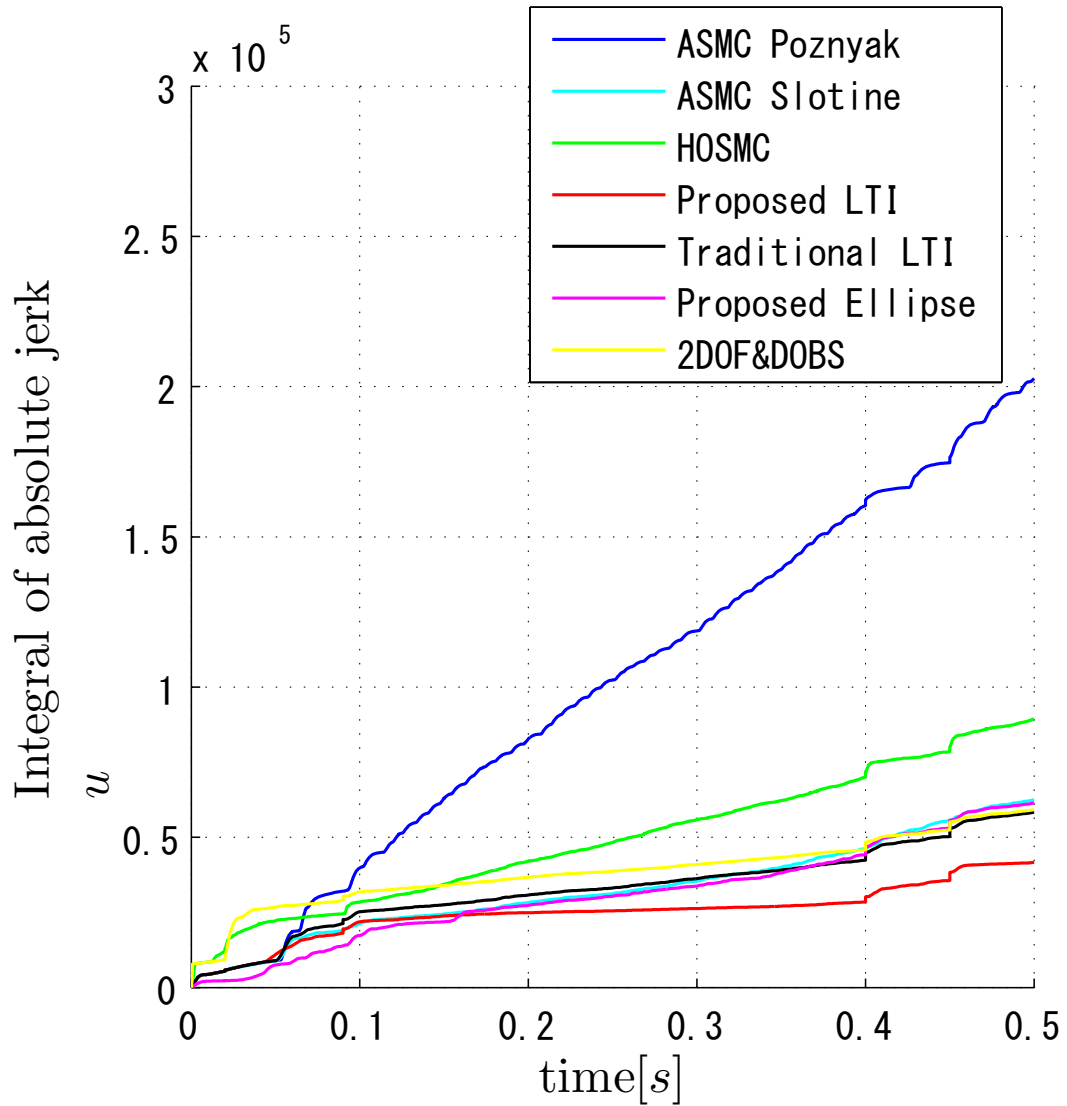


図 5.8: 躍度絶対値の積分値

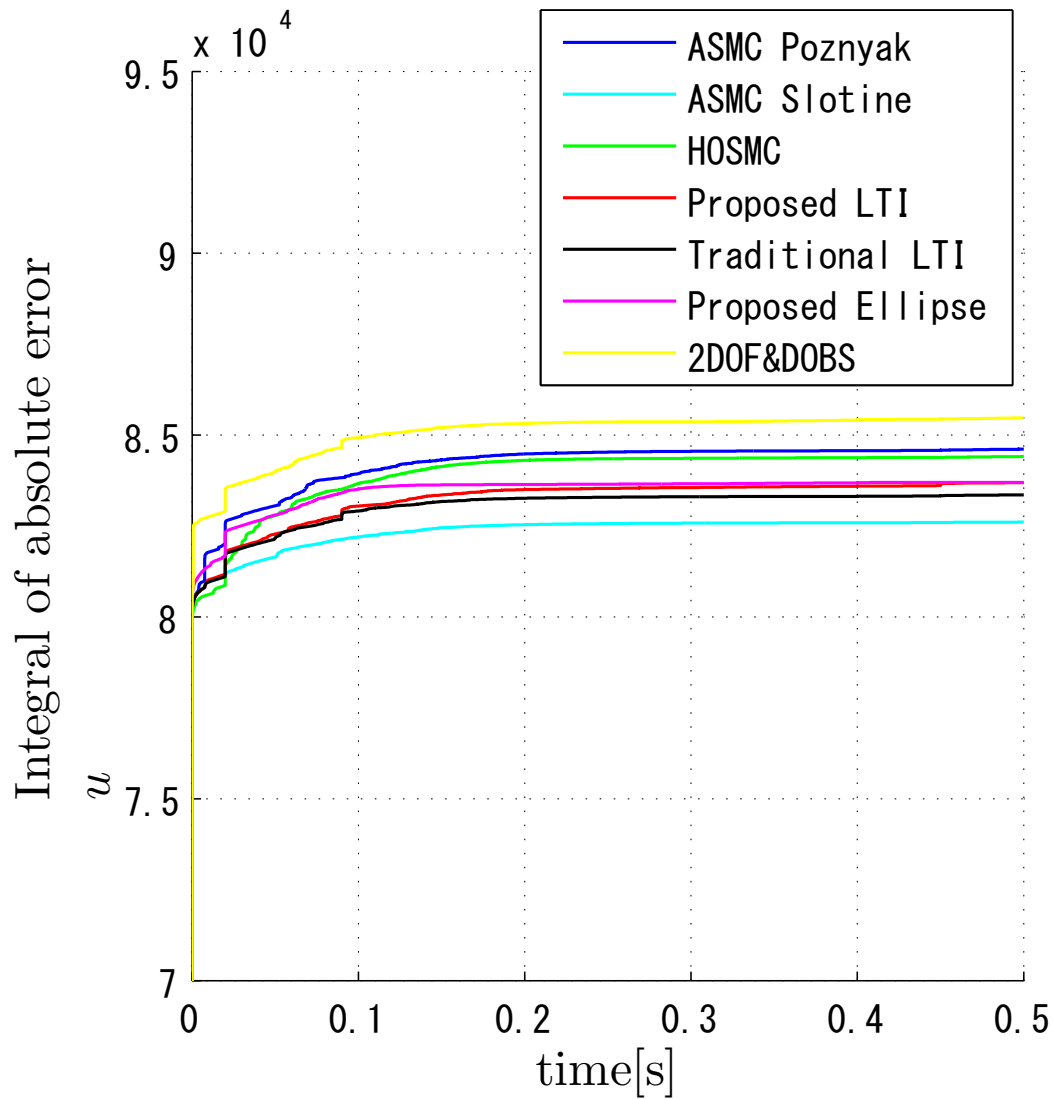


図 5.9: 追従誤差絶対値の積分値

以上のシミュレーション結果をまとめて、表 5.3 に各手法の得失を示す。いま、制御性能の比較のために、以下に示す 5 つの評価指標を用いる。ここで、素早さの評価指標として、誤差収束時間を用いる。また、滑らかさの評価指標として、躍度絶対値の積分値を用いる。さらに、エネルギー効率の評価指標として、エネルギー消費量，最大制御量を用いる。表を見てわかるように、制御性能の評価指標を総合すると提案する境界層幅適応則と楕円切換面を組み合わせた手法が最も優れており、次いで提案する境界層幅適応則と線形時不変切換面を組み合わせた手法が優れていることがわかる。

表 5.3: 各手法の制御性能比較

評価指標	提案手法 (楕円)	提案手法 (線形時不変)	Slotine	Poznak	HOSM	境界層幅一定 (線形時不変)	2 自由度制御& 外乱オブザーバ
誤差収束時間	◎	○	○	○	○	○	○
最大制御量	◎	◎	○	△	△	○	×
滑らかさ	◎	○	○	×	△	○	△
エネルギー消費	◎	○	△	×	△	△	×
耐ノイズ性	○	○	△	◎	×	○	◎

5.4 おわりに

本章では、スライディングモード制御の最大の欠点であるチャタリング現象を抑止するために、境界層幅を調整する手法を提案した。提案手法を適用したモデル追従スライディングモード制御による、不確かさを含む 2 次システムに対するサーボ問題のシミュレーションを行った。提案手法と、従来手法の制御性能を比較し、提案手法の有効性を示した。提案する楕円切換面を持つスライディングモード制御と境界層幅適応則を組み合わせた手法を用いた場合、他の手法に比べて、誤差収束時間を 50 から 65% 程度，エネルギー消費量を 50 から 75% 程度，躍度の絶対値積分量を 38 から 50% 程度に低減できることを示した。提案手法はスライディングモード制御の特長である不確かさに対するロバスト性を犠牲にすることなく、従来の線形切換面を用いるスライディングモード制御に比べて、より素早く，滑らかに，省エネルギーで制御できることが示された。

第6章

境界層幅適応則および楕円切換面を持つスライディングモード制御の車間制御への応用

6.1 はじめに

スライディングモード制御 (SMC) は、位相平面において定義された切換面と呼ばれる超平面上に状態量が拘束された状態 (スライディングモード) において外乱やモデル化誤差, パラメータ変動等の不確かさに対して高いロバスト性を示す非線形制御手法として良く知られている [43]. SMC は, 不確かさに対して高いロバスト性を持つため, 近年アダプティブクルーズコントロール (ACC) システムへの適用が検討されている [31–33, 35, 36]. ACC は, 運転負荷低減のための車両前後方向制御システムである. このシステムの目的は, 先行車と自車間の距離を所望の状態に保つことである.

交通事故原因の 90 % 以上が人的要因だと言われている. 特に, 車間距離制御タスクの自動化は長時間運転における交通事故低減に効果的である. また, もし全ての車両が ACC を適用したら, 交通渋滞の緩和が期待できる.

ACC および協調 ACC (CACC) のための 2 つの異なる切換面を持つ SMC 設計が提案されている [32]. この研究では, 車々間通信によって得られる車間距離, 速度, 加速度が用いられた. CACC は ACC よりも時間遅れを低減することができ, 追従性能を改善できることが示されている. また, [33] では, 加速度情報を推定するためのスライディングモードオブザーバーと, 2 次 SMC が ACC に適用された. 文献 [36] では, 車間距離はレーダーで観測され, 自車速と相対加速度がスライディングモードオブザーバーで推定さ

れている。これに加えて、2次 SMC で構築された ACC システムが提案されている。また、[35] では、追従性能を改善するために tracking differentiator を用いて相対加速度が算出された。このシステムの制御ループは2重構造であり、外側のループは距離フィードバック、内側のフィードバックループは加速度フィードバック構造となっている。文献 [31] では、制御性能を改善するために、距離と相対速度情報に加えて相対加速度情報と適応 SMC が用いられている。これらの従来手法は線形切換面を持つ2次 SMC を適用している。そのため、スライディングモードと到達モードが存在する場合、滑らかな追従と速い応答を両立するのは困難である。さらに、到達モードではロバスト性が保証されない。また、エネルギー消費量について考慮されていない。従来研究では、追従性能やロバスト性については良好な制御性能が達成されている。しかし、チャタリングや制御入力 of 急激な変化によってジャークが発生し、その結果乗り心地が犠牲になっているという問題があった。本研究では、乗り心地を損なうことなく追従性能を保つために、筆者らが提案した楕円切換面を持つ SMC を ACC システムに適用する。本手法は、到達モードが発生しないので、従来の線形切換面を持つ SMC に比べて、よりロバスト性が高い。さらに、楕円切換面は尖点を持たない滑らかな曲線であるため、従来の線形切換面に比べてチャタリングが抑止される。また、エネルギー消費量も低減できる。しかし、楕円は閉曲線であるため、平衡点付近でチャタリングなどの摂動を受けると、状態量は平衡点に留まらず、楕円上を回転し続ける。そこで、筆者らは、原点近傍において誤差に応じて切換面の勾配が時間変化する付加的な線形時変切換面を用いて状態量を平衡点に留める手法を提案した [B1]。しかしながら、この手法は状態量を平衡点に留めることは可能であるものの、楕円から線形時変切換面に変える瞬間において尖点が生じるため、この点においてジャークが発生し、エネルギー消費量が増加する。この問題を解決するために、楕円から線形時変切換面に変える瞬間において、楕円切換面の接線を線形時変切換面に適用し、誤差に応じて線形切換面を平行移動して原点（平衡点）に状態量を導く。これにより、滑らかに切換面を変更することが可能となる。

SMC の最大の欠点であるチャタリングを抑止する方法として、不連続な切換関数を連続関数で近似する手法が知られている。これにより、不連続な切換関数が連続関数によって近似され、切換面近傍に境界層が生じる。一般に、チャタリングを抑止するために、分厚い一定幅の境界層を与えると、不確かさに対するロバスト性が損なわれる。これに対して、薄い一定幅の境界層を与えると、不確かさに対するロバスト性は保たれるものの、チャタリングを抑止できなくなる。そこで、不確かさに対するロバスト性とチャタリング抑止性能を両立するために、筆者らは境界層幅適応則を提案した [C1]。提案手法の有効性を示すために、楕円切換面を持つ SMC と、従来の線形時不変切換面を持つ SMC を ACC

システムに適用したシミュレーションを行い、制御性能を比較する。

6.2 車両モデル

本節では Auto Cruise Control システム (ACC) のシミュレーションに用いる車両モデルについて説明する。シミュレーションに用いる設計パラメータを表 6.1 に示す。

車両前後方向のダイナミクスは式 (6.1) で表せる。

$$\begin{cases} v_s(t) &= \dot{x}_s(t) \\ \dot{v}_s(t) &= \frac{1}{m+dm} \{F(t) - f(v_s)\} \\ \dot{F}(t) &= \frac{1}{T_m} \left(\frac{N}{R} \tau(t) - F(t) \right) \end{cases} \quad (6.1)$$

ここで、式 (6.1) の第 3 式は 1 次遅れ系の伝達関数で近似されたアクチュエータ-モデルである。一般に、車両の走行抵抗は式 (6.2) で与えられる。

$$f(v_s) = \frac{1}{2} \rho C_d A v_s^2 + \mu_r (m + dm) g \quad (6.2)$$

ここで、式 (6.2) の第 1 項は空気抵抗、第 2 項はタイヤの転がり抵抗を表している。

6.3 ACC システムの構成

ACC はドライバーの運転負荷を低減するために開発された車両前後方向制御システムであり、その制御目的は先行車と自車間を所望の距離に保つことである。現在、2 自由度制御器と外乱オブザーバを用いた車間制御システムが実用化されている [30]。本研究では、文献 [30] で用いられている参照モデルを採用する。さらに、制御系における誤差追従制御器を提案手法および、従来の線形時不変切換面を用いる SMC に置き換えて、制御性能を比較する。車間制御システムのブロック線図を図 6.1 に示す。

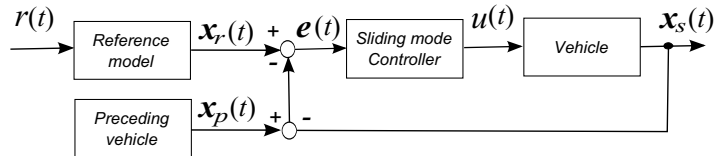


図 6.1: 車間制御システムのブロック線図

車間制御システムにおいて、乗員に違和感を与えないためには、目標値に対して若干オーバーシュートするような誤差追従特性が必要であることが報告されている [30]。車間

表 6.1: 設計パラメータ

	Parameter	Value
m	Mass of the vehicle	1800[kg]
dm	Payload	200[kg]
g	Acceleration of gravity	9.8[m/s ²]
ρ	Air density	1.226[kg/m ³]
C_d	Air resistance coefficient	0.28
A	Frontal projection area	2[m ²]
μ_r	Rolling resistance coefficient of tires	0.01
$f(v_s)$	Running resistance	[N]
N	Gear ratio	8
T_m	Time constant of the motor	0.01[s]
R	Rolling radius of tire	0.3[m]
$\tau(t)$	Motor torque	[Nm]
τ_{max}	Maximum motor torque	300[Nm]
$F(t)$	Longitudinal force	[N]
$x_s(t)$	Position of the subject vehicle	[m]
$v_s(t)$	Velocity of the subject vehicle	[m/s]
$x_p(t)$	Position of the preceding vehicle	[m]
$v_p(t)$	Velocity of the preceding vehicle	[m/s]
$x_r(t)$	Reference distance	[m]
$v_r(t)$	Reference relative velocity	[m/s]
r	Reference distance	[m]
$e_r(t)$	Distance error	[m]
$\dot{e}_r(t)$	Relative velocity error	[m/s]

制御における参照モデルのパラメータは車速に応じて変化するため、官能評価実験により導出される。車間制御における参照モデルは、次式で表される2次標準形の伝達関数で表される。

$$G_R(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}. \quad (6.3)$$

本研究では，車間参照モデルのパラメータ $\zeta = 0.7, \omega = 0.6981$ を採用した．

図 6.2 に示す自車両 A が一定速で先行車 B を追従中に車両 C が割り込むシーンを考える．このとき，先行車が車両 B から割り込み車両 C に突然切換わるタイミングで参照モデルの積分器にたまった誤差が急激な制御入力の変化を引き起こす．この問題を回避するために，割り込み車両 C が割り込んだタイミングでレーダーで観測した相対速度と車間距離で積分器を初期化する．

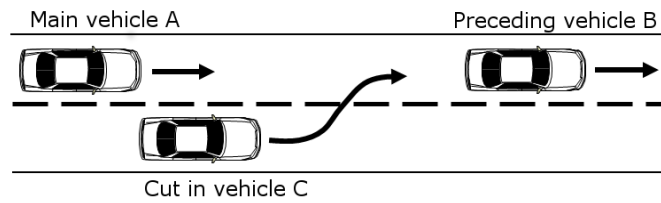


図 6.2: Simulation condition.

6.4 スライディングモード制御器の設計

本節では，チャタリングを抑止するために境界層幅適応則を適用した楕円切換面を持つスライディングモード制御則を導出する．

6.4.1 楕円切換面を持つスライディングモード制御

次式で表される 1 入力 1 出力の 2 次正準形システムに対してモデル追従制御を適用する．

$$\dot{\boldsymbol{x}}_s(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_s(t) + \boldsymbol{B}(t)u(t) + \boldsymbol{\xi}(t) \quad (6.4)$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{B}(t) = [0 \quad 1/(m + dm)]^T,$$

$$\boldsymbol{x}_s(t) = [x_s(t) \quad v_s(t)]^T, \quad u(t) = \frac{N}{R}\tau(t),$$

$$\boldsymbol{\xi}(t) = [0 \quad -f(v_s)/(m + dm)]^T.$$

ここで, T_m は駆動力モータの機械的時定数であり, 制御対象のドミナントポールに対して十分に小さい値とみなして無視する. 参照モデルは次式で表される.

$$\dot{\boldsymbol{x}}_r(t) = \boldsymbol{A}_r \boldsymbol{x}_r(t) + \boldsymbol{B}_r(t) r(t) \quad (6.5)$$

ここで, $\alpha_r = 2\zeta\omega, \beta_r = \omega^2, r(t)$ は参照入力である. また, 追従誤差は次式で表される.

$$\boldsymbol{A}_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\beta_r & -\alpha_r \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{B}_r = [0 \quad 1/m]^T, \\ \boldsymbol{x}_r(t) = [x_r(t) \quad v_r(t)]^T$$

ここで, $\alpha_r = 2\zeta\omega, \beta_r = \omega^2, r(t)$ は参照入力である.

また, 追従誤差は次式で与えられる.

$$e(t) := x_r(t) - \{x_p(t) - x_s(t)\}. \quad (6.6)$$

楕円切換面は次式で表される.

$$\sigma(t) = \frac{(e(t) - a)^2}{a^2} + \frac{\dot{e}(t)^2}{b^2} - 1. \quad (6.7)$$

このとき, 次式で表される楕円切換面を持つスライディングモード制御則が導出される.

$$u(t) = \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{b^2}{a^2} - \beta_r \right) e(t) - \alpha_r \dot{e}(t) - \frac{b^2}{a} + r(t) \\ & - K \operatorname{sgn} \left\{ \dot{e}(t) \left(\frac{(e(t)-a)^2}{a^2} + \frac{\dot{e}(t)^2}{b^2} - 1 \right) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (6.8)$$

ここで, K は切換ゲイン $\operatorname{sgn}(\cdot)$ は切換関数を表している. 尚, 楕円切換面に関する詳細は第4章を参照のこと.

6.4.2 付加的な線形時変切換面

楕円は閉曲線であるため, 状態量は平衡点 O に留まらず楕円切換面 E_1 上を周回し続ける. そこで, 状態量を平衡点に収束させて留めるために, 図 6.3 に示すように平衡点近傍の楕円状の領域 E_2 内において付加的な線形切換面を適用する. ここで, 付加的な線形切換面を適用する平衡点近傍の領域 E_2 は次式で表される.

$$\frac{e(t)^2}{a^2} + \frac{\dot{e}(t)^2}{b^2} = q^2. \quad (6.9)$$

ここで, 平衡点近傍において楕円切換面から線形切換面に滑らかに切換えるために, 切換点 P で楕円 E_1 に接する線形切換面 L_0 を用いる. その後, 平衡点 O を通る線形切換面

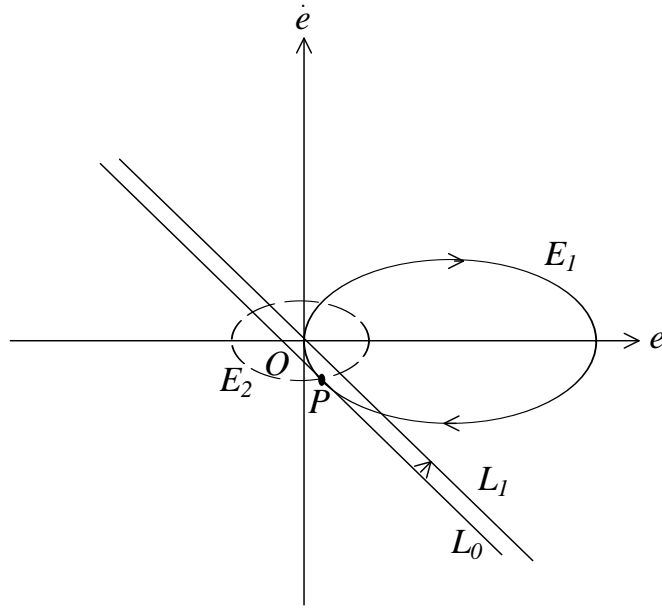


図 6.3: Auxiliary linear sliding surface.

L_1 に至るまで誤差に応じて線形切換面を平行移動する．本研究では，パラメータ a, b は所望の滑らかな誤差応答と誤差収束時間となるようにあらかじめ設計された定数を用いる．ここで，収束時間は線形時不変切換面を用いた場合にに基づき決定した．提案手法は，従来の線形時不変切換面を用いた場合に比べて滑らかな誤差追従軌跡を実現できる．誤差追従軌跡を付加的な線形切換面を適用する平衡点近傍の領域 E_2 はパラメータ a, b, q で決められる．ここで， a, b は楕円切換面と同じ定数を用いる．また， q は所望の誤差追従精度から決定する．いま，平衡点近傍における点 P における線形切換面を次式で定義する．

$$\begin{aligned} \dot{e} &= S_P e(t_P) + \kappa(t_P), & (6.10) \\ S_P &= -\frac{b(q^2 - 2)}{aq\sqrt{4 - q^2}}, \kappa(t_P) = -\frac{bq}{\sqrt{4 - q^2}}. \end{aligned}$$

ここで， t_P は，状態量が点 P を通過した瞬間の時刻である．点 P は次式で表される．

$$P \left(\frac{aq^2}{2}, -bq\sqrt{1 - \frac{q^2}{4}} \right) \quad (6.11)$$

位相平面の縦軸と線形切換面との交点 $\kappa(t)$ は次式で調整される．

$$\kappa(t) = \frac{\sqrt{e(t)^2 + \dot{e}(t)^2}}{|OP|} \kappa(t_P) \quad (6.12)$$

それ故、平行移動する線形時変切換面は次式で表される.

$$\sigma(t) = \mathbf{S}e(t) + \kappa(t) \quad (6.13)$$

ここで、 $e(t) = [e(t) \ \dot{e}(t)]$, $\mathbf{S} = [S_P \ -1]$ であり、 $e(t)$ を時間微分することにより次式が導かれる.

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) = & \mathbf{A}_r e(t) + (\mathbf{A}_r - \mathbf{A}) \mathbf{x}(t) \\ & + \mathbf{B}_r r(t) - \mathbf{B}u(t) + \mathbf{d}(t) \end{aligned} \quad (6.14)$$

ここで、 S_P は切換面の傾き、 $\kappa(t)$ は線形切換面の切片、 $\mathbf{d}(t)$ は外乱を表している. また、 $(\mathbf{A} - \mathbf{A}_r)$, \mathbf{B}_r , $\mathbf{d}(t)$ はマッチング条件を満たすと仮定し、無視する. ここで、マッチング条件とは、不確かさがレンジスペース \mathbf{B} に属することを意味している. (6.13) 式を時間微分し、 \mathbf{B} を \mathbf{B}_r に置き換えることにより次式が得られる.

$$\dot{\sigma}(t) = \mathbf{S}[\mathbf{A}_r e(t) + \mathbf{B}_r r(t) + \mathbf{B}_r u(t)] + \dot{\kappa}(t) \quad (6.15)$$

平行移動する線形時変切換面を持つスライディングモード制御則 $u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t)$ は次式で表される.

$$\begin{aligned} u_{eq}(t) &= (\mathbf{S}\mathbf{B}_r)^{-1} [\mathbf{S}\mathbf{A}_r e(t) + \mathbf{S}\mathbf{B}_r r(t) + \dot{\kappa}(t)], \\ u_{sw}(t) &= -(\mathbf{S}\mathbf{B}_r)^{-1} K \operatorname{sgn}(\sigma(t)) \end{aligned} \quad (6.16)$$

ここで、 $u_{eq}(t)$ は等価制御入力項、 $u_{sw}(t)$ は切換制御入力項を表している. また、 K は切換制御ゲイン、 $\operatorname{sgn}(\cdot)$ は符号関数を表している.

6.4.3 境界層幅適応則

通常、スライディングモード制御を実システムに適用する場合には、チャタリング抑止のために、平滑化関数や飽和関数などの連続関数を用いて符号関数を近似する.

一般に、一定の広い境界層幅を適用した場合にはチャタリングは抑止できるものの、誤差追従性能が悪化する. これに対して、狭い境界層幅を適用した場合には誤差追従性は保たれるものの、チャタリングが避けられない. 本研究で用いる境界層幅適応則は制御対象に時間変化する不確かさを含む場合においても境界層幅を適切に調整し、精度の良い誤差追従性とチャタリング抑止性能を両立することが可能である.

本研究では、(6.17) 式で与えられる平滑化関数を用いてチャタリングを抑止する.

$$\operatorname{sgn}(\sigma(t)) = \frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)|} \approx \frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)| + \delta} \quad (6.17)$$

図 6.4 に符号関数 $\text{sgn}(\cdot)$ の近似を示す. 同図において, 青色の破線は符号関数, 赤色の実線は (6.17) 式による符号関数の近似を表している. 境界層幅 $\delta(t) > 0$, $\gamma(t) = 1/\delta(t)$

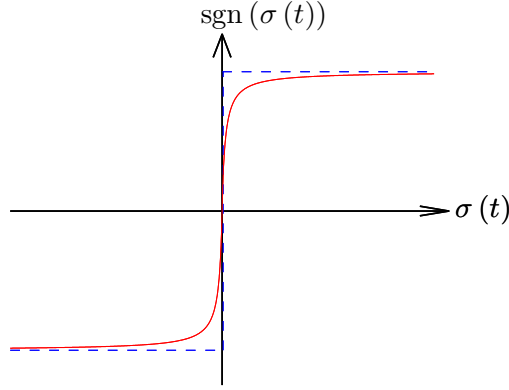


図 6.4: Approximation of the sign function.

と置き, 次式で表される Lyapunov 関数の候補を考える.

$$V(t) = \frac{1}{2} (|\sigma(t)| - \gamma(t))^2 \quad (6.18)$$

ここで, 式 (6.18) を時間微分すると次式が得られる.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= (|\sigma(t)| - \gamma(t)) \left(\frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)|} \dot{\sigma}(t) - \dot{\gamma}(t) \right) \\ &< -\eta(t) ||\sigma(t)| - \gamma(t)| \\ &\Leftrightarrow \frac{|\sigma(t)| - \gamma(t)}{||\sigma(t)| - \gamma(t)|} \left(\frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)|} \dot{\sigma}(t) - \dot{\gamma}(t) \right) < -\eta(t) \end{aligned} \quad (6.19)$$

ここで, $\eta(t)$ は Lyapunov 関数の収束時間を決める正のパラメータである.

式 (6.19) から, 以下に示す境界層幅適応則が導かれる.

- (i) If $|\sigma(t)| < \gamma(t)$
 - (a) If $\sigma(t) > 0$ then $\dot{\gamma}(t) > -\eta(t) + \dot{\sigma}(t)$
 - (b) If $\sigma(t) < 0$ then $\dot{\gamma}(t) < -\eta(t) - \dot{\sigma}(t)$
- (ii) If $|\sigma(t)| > \gamma(t)$
 - (a) If $\sigma(t) > 0$ then $\dot{\gamma}(t) < \eta(t) + \dot{\sigma}(t)$
 - (b) If $\sigma(t) < 0$ then $\dot{\gamma}(t) > \eta(t) - \dot{\sigma}(t)$

上記の適応則を用いることにより $\sigma(t)$ の時間変化よりも $\eta(t)$ の寄与分だけ速く境界層幅 $\delta(t)$ が調整される。また、 $|\sigma(t)|\delta(t) = 1$ となるように働くので、切換面からの距離 $\sigma(t)$ に反比例するように境界層幅 $\delta(t)$ が調整される。ここで、境界層幅に上限値と下限値を設定する。上限値は追従誤差の許容値を満たす範囲で最大となる値を用いる。下限値は最も不確かさが少ない場合にチャタリングが発生しない範囲で最小となる値を用いる。さらに、 $\sigma(t)$ および、 $\dot{\sigma}(t)$ に応じて、Lyapunov 関数がゼロへ収束する速さを調整するために (6.20) 式を適用する。

$$\eta(t) = \frac{|\sigma(t)|}{|\dot{\sigma}(t)| + \epsilon} \quad (6.20)$$

ここで、 ϵ は分母のゼロ割を防ぐための微小な正の定数である。(6.20) 式を用いることにより追従誤差が切換面から遠く、ゆっくり変化する程急峻に、切換面に近く、速く変化する程緩やかに収束するように調整則を動作させることができる。また、この手法は調整パラメータが境界層幅の上限値と下限値のみであるため、チューニングが比較的容易であるという特徴を持つ。

6.5 シミュレーション

本節では、提案手法の有効性を示すために車間制御 (Auto Cruise Control (ACC)) システムのシミュレーション条件とシミュレーション結果を示す。ここで、提案手法とは楕円切換面を持つスライディングモード制御と境界層幅適応則を組み合わせたものである。また、従来手法とは線形時不変切換面と一定の境界層幅を組み合わせたものである。

6.5.1 シミュレーション条件

提案手法の有効性を検証するために、図 6.2 に示す自車両が一定車速で先行車を追従中に他の車両が割り込むシーンを考える。以下に、このシミュレーション条件の詳細を示す。 $t = 0\text{s}$ において、自車両 A は 30m 前方を車速 70km/h で走行中の先行車 B を追従している。 $t = 2\text{s}$ において、隣の車線の自車両 A の前方 20m を車速 65km/h 走行していた車両 C が車両 A と車両 B の間に割り込む。ここで、自車両 A と先行車間の目標車間距離は 30m とする。提案手法と従来手法の設計パラメータを表 6.2 に示す。

表 6.2: Design parameter list

	Ellipsoid	Auxiliary Linear	Linear
Switching gain K	300	300	300
Parameter a	0.3	-	-
Parameter b	0.22	-	-
Equilibrium area q	-	0.2	-
Gradient of sliding surface S	-	3.6114	1.0
Maximum boundary layer width δ_{max}	0.025	0.08	-
Minimum boundary layer width δ_{min}	0.001	0.01	-
Initial boundary layer width δ_{init}	0.025	0.08	0.028

6.5.2 シミュレーション結果

図 6.5 に、提案手法と従来手法を ACC システムに適用したシミュレーション結果を示す。同図において、黒色の点線は参照軌道を表しており、赤色の実線は提案手法、青い破線は従来手法の時間応答を表している。また、1 番目の図は車間距離、2 番目は相対速度、3 番目は自車両 A の車速を表している。 $t = 2s$ において目標値がステップ状に変化している。そのため、従来手法では約 $t = 3s$ において相対速度に若干オーバーシュートが発生している。これに対して、提案手法は滑らかに誤差追従していることがわかる。

図 6.6 は、ACC システムの参照軌道に対する追従誤差 e と、追従誤差の時間変化率 \dot{e} を表している。不確かさがマッチング条件を満たしており、切換制御ゲインが不確かさに対して十分に大きい場合、理論的には到達モードが生じることなく楕円切換面に沿って平衡点に至る。しかしながら、現実的な駆動力モータトルク上限値 (280Nm) に対して、状態量を楕円切換面に沿わせるために必要なモーター駆動トルクが不足しているため、到達モードが生じている (赤色の実線 $2 \leq t \leq 3.16$)。また、従来手法の到達モードの区間は (青色の破線 $2 \leq t \leq 3.47$) である。

図 6.7 に位相平面上のトラジェクトリーを示す。同図において、黒色の点線は設計された切換面、黒色の一点鎖線は提案手法において付加的な線形時変切換面を適用する領域を表している。提案手法のトラジェクトリーは到達モードの後、楕円切換面に沿って平衡点に導かれていることがわかる。

図 6.8 は境界層幅 δ を表している。同図において、赤色の実線は提案手法の境界層幅を表しており、青色の破線は従来手法の一定値をとる境界層幅を表している。

図 6.9 は ACC システム動作時の自車両の加速度、躍度、制御入力を表している。図を見てわかるように、提案手法は従来手法に比べてチャタリング抑止効果が高く、滑らかに動作していることがわかる。

図 6.10 はエネルギー消費量と絶対値をとった躍度の積分値を表している。ここで、エネルギー消費量 $E_n(t)$ は次式を用いて算出した。

$$E_n(t) = \int_0^{T_{sim}} \omega_m \tau dt \quad (6.21)$$

ここで、 T_{sim} は総シミュレーション時間、 τ は駆動モータのトルク、 ω_m は駆動モータの角速度を表している。同図から提案手法は従来手法に比べて約 10% エネルギー消費量を低減し、絶対値をとった躍度の積分値を約 20% 低減できることがわかる。図 6.5 - 図 6.10 から、提案手法は従来手法と同等の誤差追従特性を実現しつつ、従来手法に比べて滑らかに省エネルギーで動作する ACC システムを実現可能であることを示した。

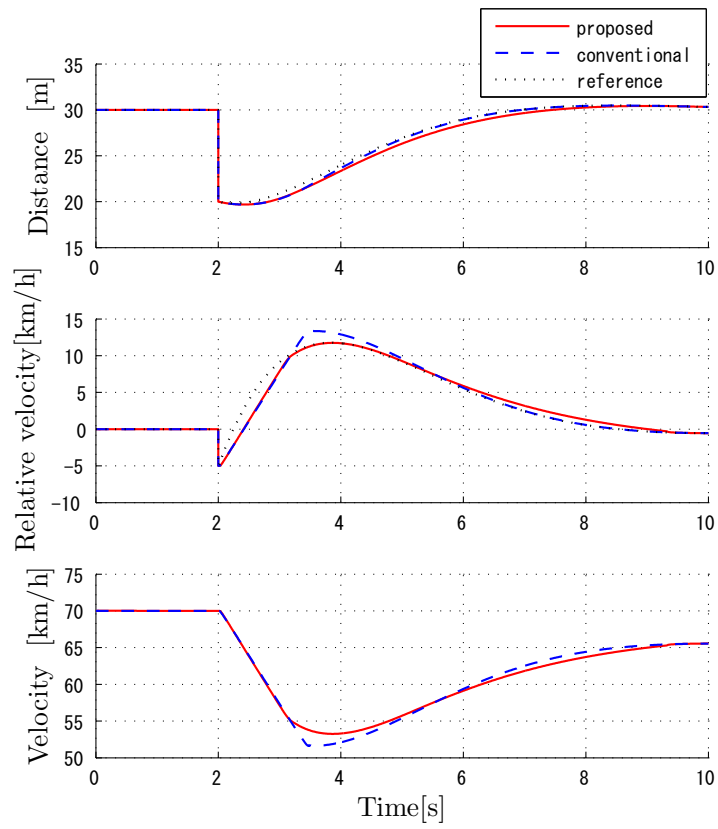


図 6.5: Inter-vehicle distance, relative velocity, and velocity of the main vehicle.

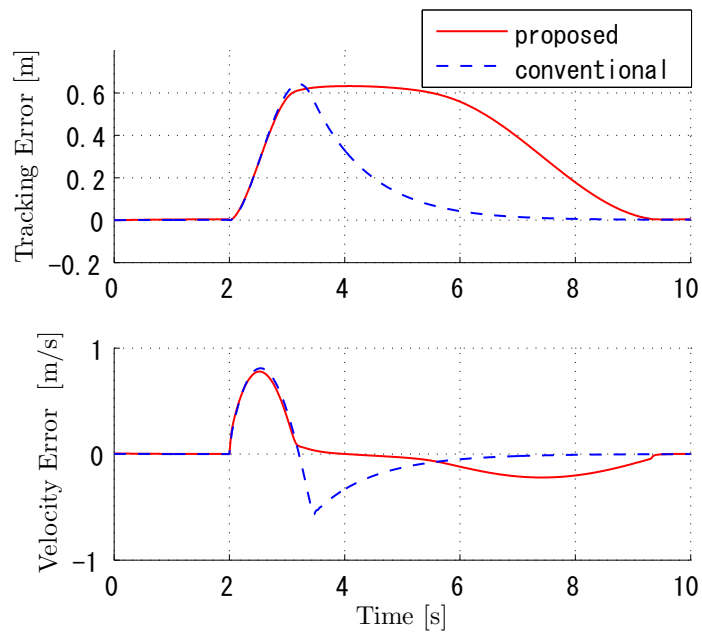


図 6.6: Tracking error state response.

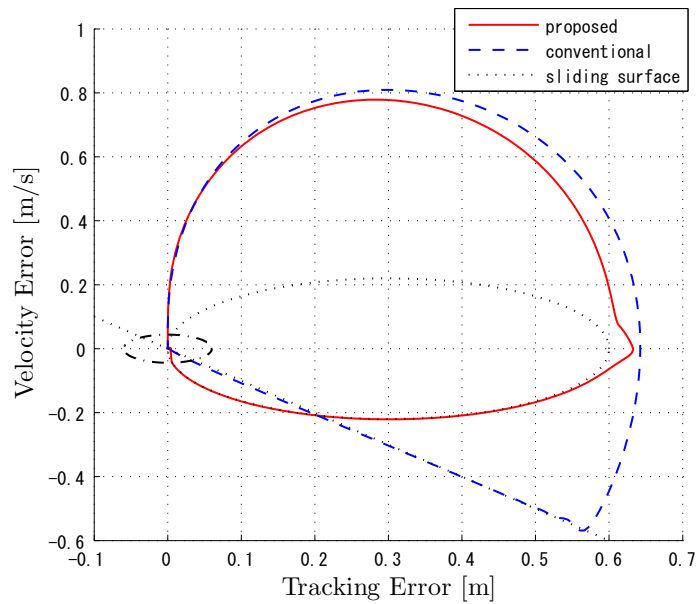


図 6.7: Phase portraits.

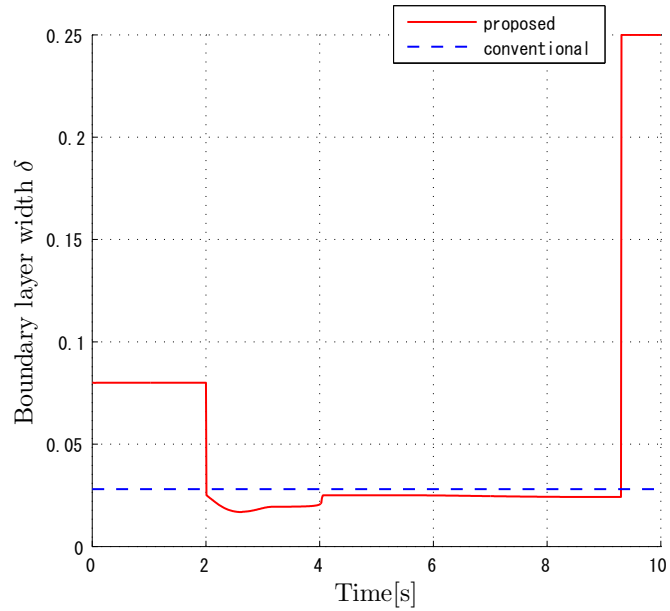


図 6.8: Boundary layer width.

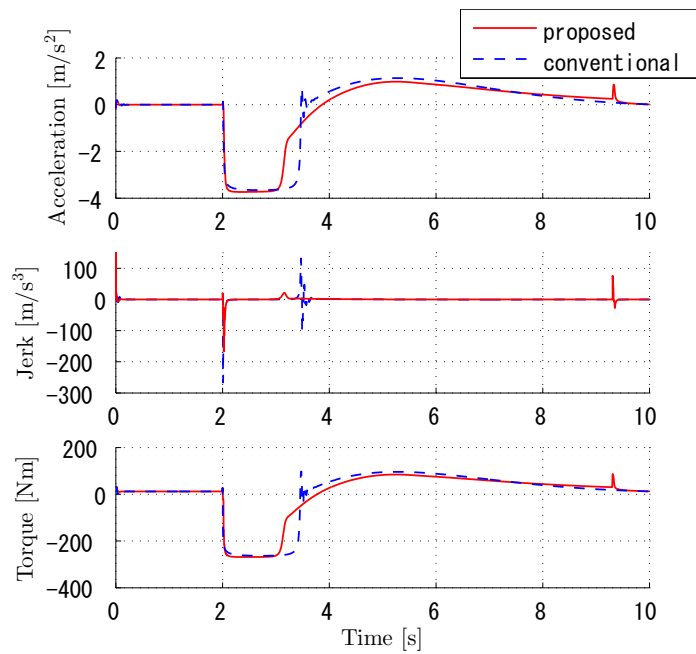


図 6.9: Acceleration, jerk, and control input.

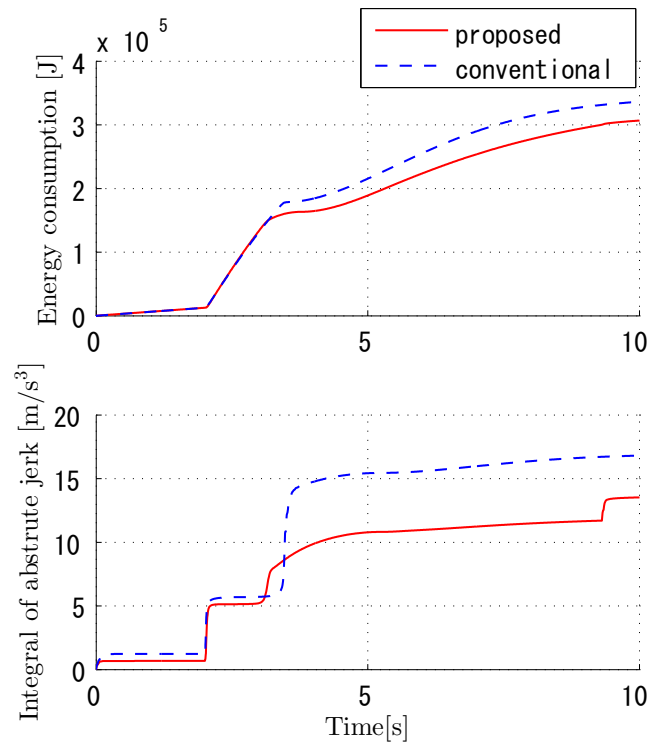


図 6.10: Energy consumption and the integral of absolute jerk.

6.5.3 CarSim によるシミュレーション結果

米国 Mechanical Simulation 社製 CarSim は 27 自由度のフルビークル動力学モデルと非線形タイヤモデル，路面形状などが詳細にモデル化されている市販のシミュレーション環境である．本研究では，提案手法の実車適用性を検証するために CarSim9.0 を用いてシミュレーションを行った．ここで， $b = 0.3, \delta_{max} = 0.05, \delta_{max} = 0.2, q = 0.1$ と設定した．その他の条件は先に示したシミュレーション条件と同じ条件でシミュレーションを行った．図 6.11-図 6.16 にシミュレーション結果を示す．ここで，シミュレーション開始直後の $t = 0.5s$ 付近において車速変動と約 $0.05m$ の定常偏差が生じているが，これらの原因究明には至らなかった．しかしながら，車間制御システムとしての機能を満たす追従精度と，楕円切換面に沿った滑らかな誤差追従特性が実現できた．また，図 6.17-図 6.22 に CarSim シミュレーション結果のアニメーションの様子を示す．図を見てわかるようにフルビークルモデルを用いたシミュレーションにより提案手法の実車適用への有効性が示された．

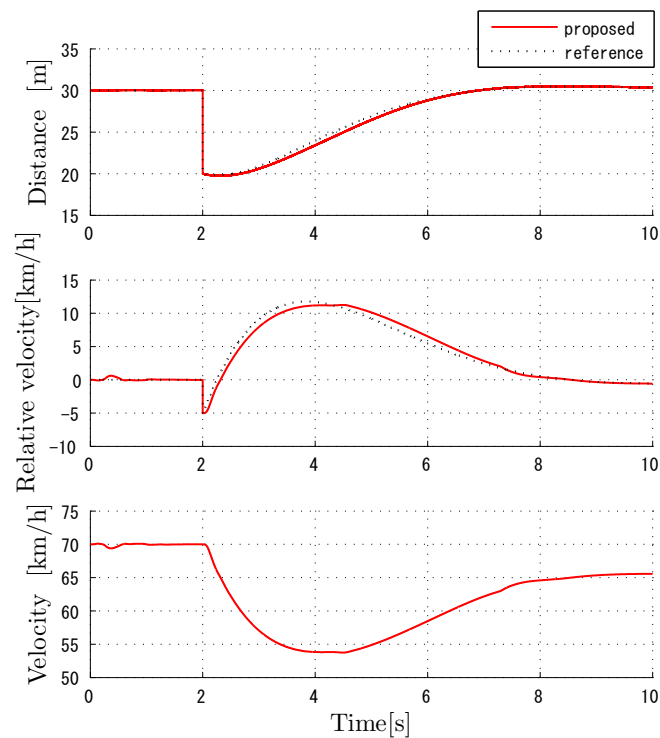


図 6.11: Inter-vehicle distance, relative velocity, and velocity of the main vehicle.

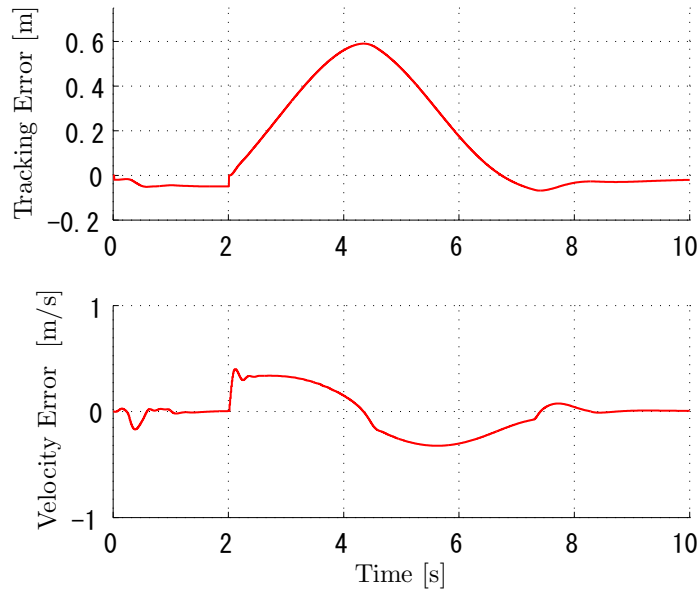


図 6.12: Tracking error state response.

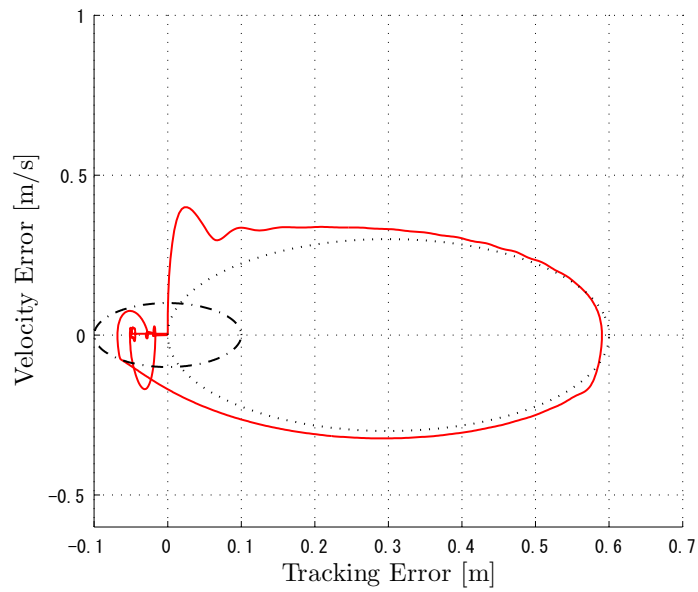


図 6.13: Phase portraits.

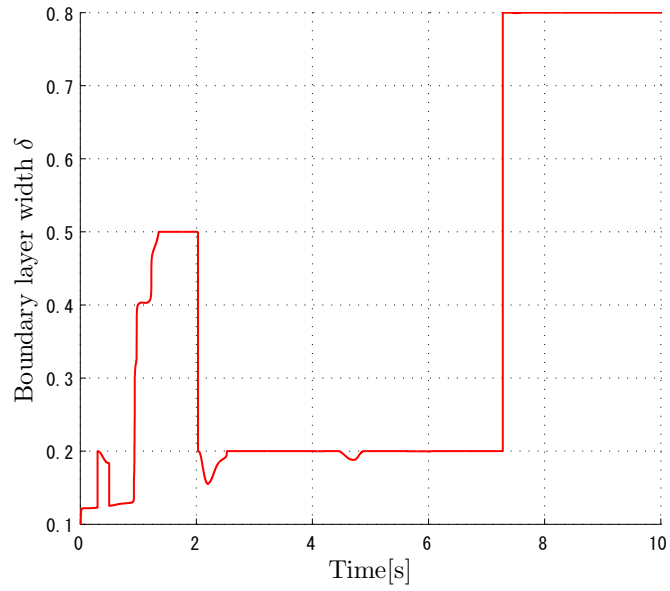


図 6.14: Boundary layer width.

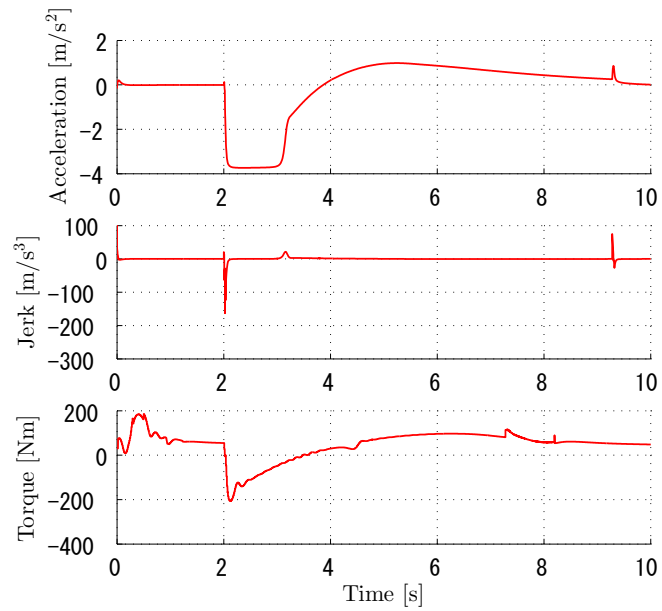


図 6.15: Acceleration, jerk, and control input.

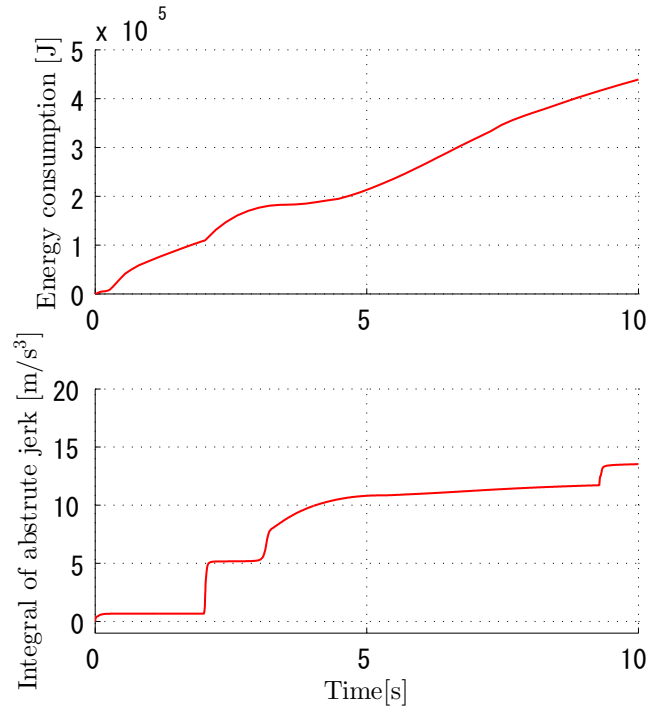


図 6.16: Energy consumption and the integral of absolute jerk.

第6章 境界層幅適応則および楕円切換面を持つスライディングモード制御の車間制御への応用

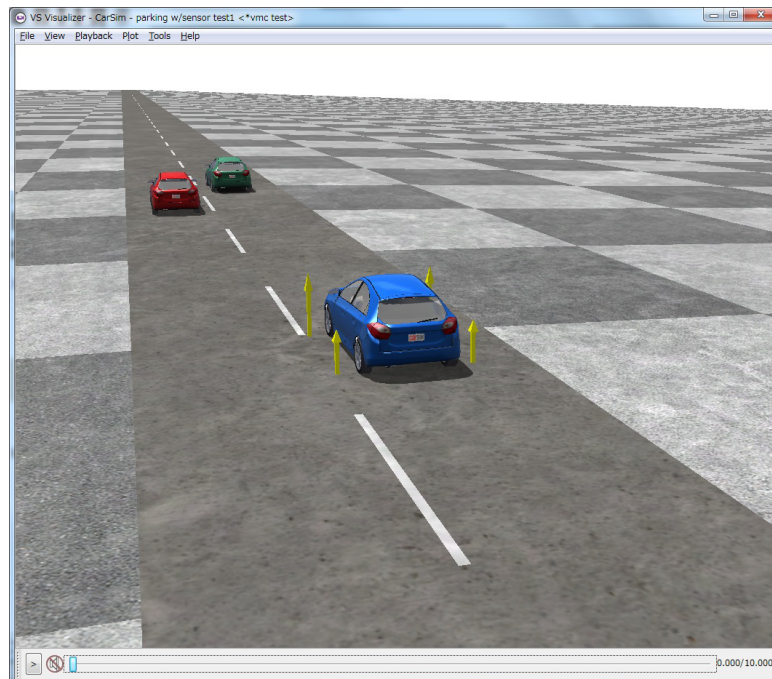


図 6.17: CarSim によるシミュレーション結果 (t=0)

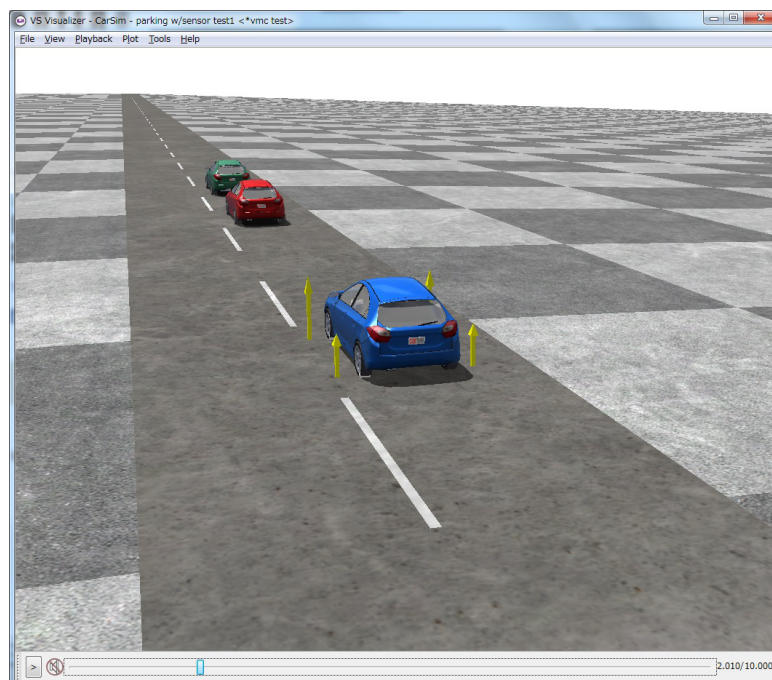


図 6.18: CarSim によるシミュレーション結果 (t=2.010)

第6章 境界層幅適応則および楕円切換面を持つスライディングモード制御の車間制御への応用

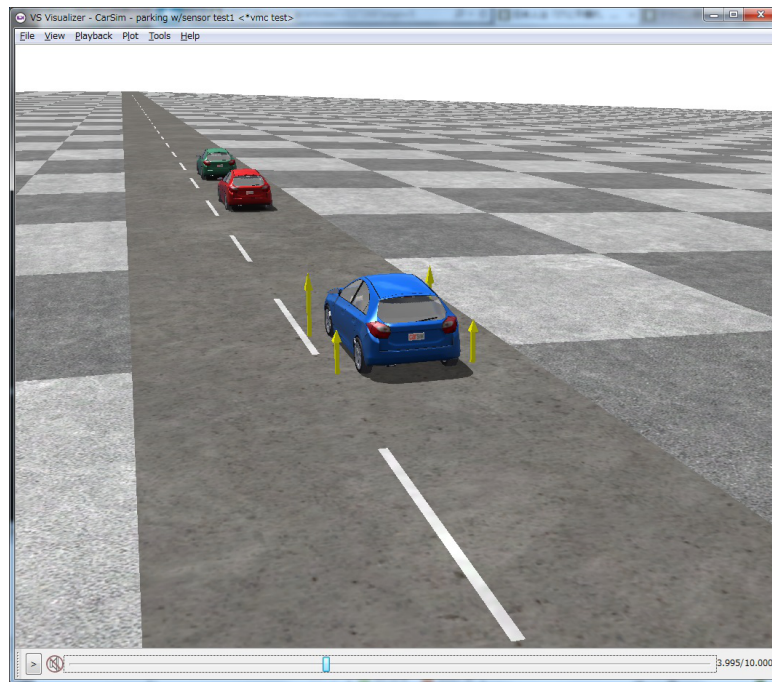


図 6.19: CarSim によるシミュレーション結果 (t=3.995)

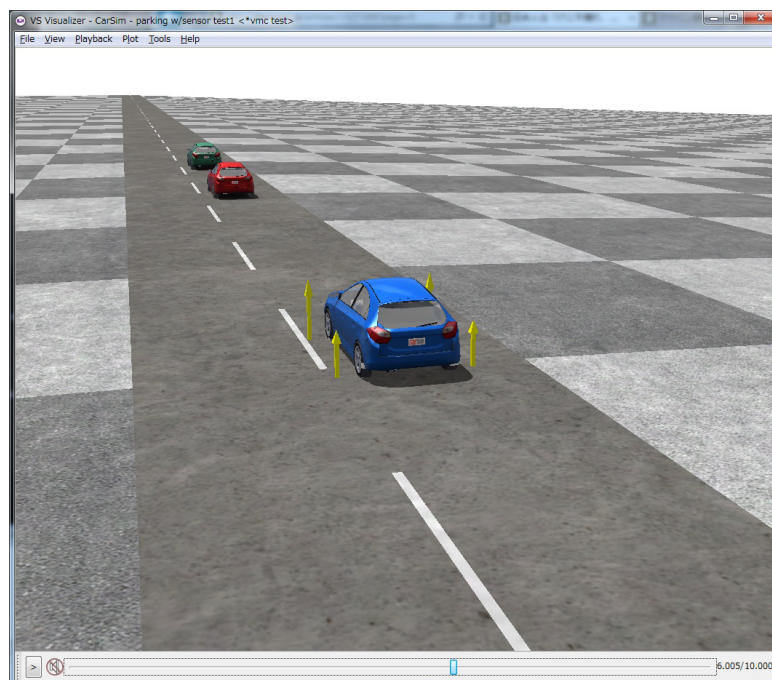


図 6.20: CarSim によるシミュレーション結果 (t=6.005)

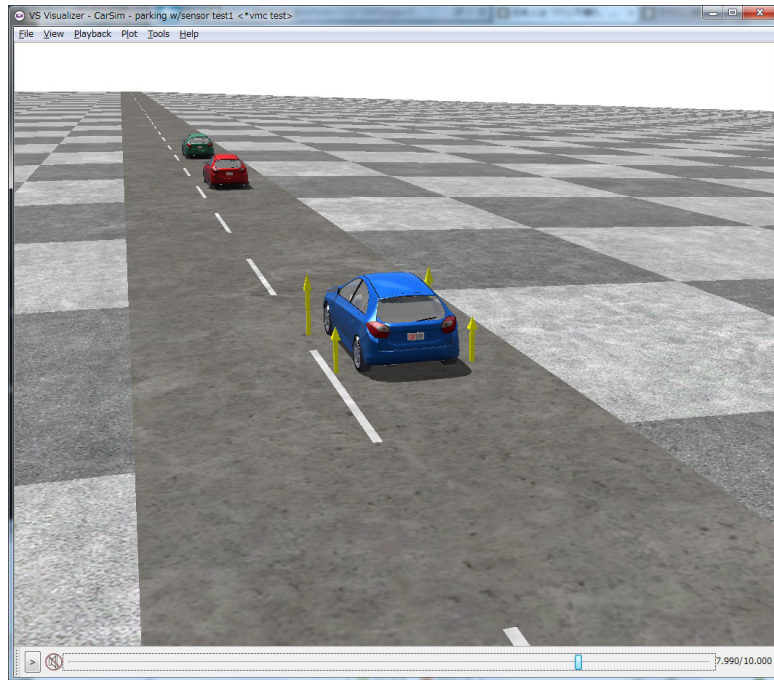


図 6.21: CarSim によるシミュレーション結果 (t=7.990)

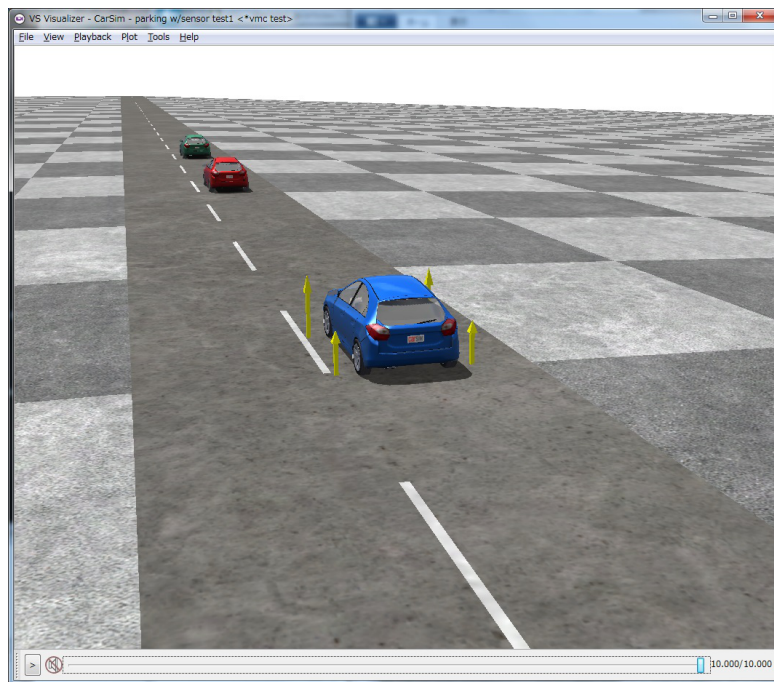


図 6.22: CarSim によるシミュレーション結果 (t=10)

6.6 まとめ

理論的には提案手法は到達モードを完全に除去できる。しかしながら、本研究のシミュレーションでは、モータトルクの制限値が原因で到達モードが完全に除去されなかった。しかし、従来手法に比べて、提案手法の到達モード期間を約 2/3 に低減できた。また提案手法は、従来手法に比べてエネルギー消費量が約 10% 低減し、絶対値をとった躍度の積分値が約 25% 低減することが示された。ここで、本研究では、線形時不変切換面を持つ従来手法の収束時間に基づいてあらかじめ楕円切換面のパラメータを決定した。相対加速度はレーダーにより観測される先行車との車間距離および相対速度からカルマンフィルタを用いて推定可能である。これにより、状況に応じて適切な楕円切換面をオンラインで設計可能と考える。

6.7 おわりに

本研究では、楕円切換面を持つスライディングモード制御を ACC システムに適用した。さらに、境界層幅適応則を用いることにより、ロバスト性を損なうことなく高い誤差追従性とチャタリング抑止の両立を実現した。ACC システム動作中に先行車と自車間に他車両が割り込むシーンを用いたシミュレーションを行い、提案手法の有効性を検証した。提案手法は線形時不変切換面と一定の境界層を適用した従来手法と同等の誤差追従特性を実現しつつ、従来手法に比べて滑らかに省エネルギーで動作する ACC システムを実現可能であることを示した。今後の課題は、相対加速度を推定して適応的に楕円切換面を設計する手法の検討である。

第7章

境界層幅適応則および参照軌道修正法の自動駐車システムへの応用

7.1 はじめに

駐車時の運転操作の煩わしさを解消し、安全性や快適性を向上するために操舵を自動化した駐車支援システム [22] が実用化されている。現在実用化されている駐車支援システムでは、車載カメラや超音波センサを用いて目標駐車位置を検出して目標駐車位置に至る軌跡を算出したうえで、この軌跡に沿って走行するように自動操舵する手法が主流である。この駐車支援システムでは車両横方向制御が自動化されているものの、車両前後方向制御はドライバーがアクセルやブレーキを操作する必要がある。高齢化社会の到来に伴い、さらなる運転の自動化が望まれており、車両前後方向制御と横方向制御を統合したシステムの開発が急務である。

従来研究のほとんどは、路面が平坦路と見做せる理想的な環境を前提とした自動駐車システム [23–28, 84] の検討である。しかし、実環境では路面勾配やうねり、コインパーキングの車止めなど様々な路面外乱が存在する。本研究では、この様な実環境に存在する路面外乱に対してロバストな自動駐車システムの提案を目的とする。尚、本研究で検討する自動駐車システムは、目標駐車枠を車載カメラで観測可能な停車位置において動作を開始する。この停車位置から目標駐車枠内の駐車位置に至る1回の繰り返し軌道を算出して、この軌道に沿って並列駐車を行う。この際、走行中に目標駐車位置を再検出し、途中で停車することなく滑らかに目標駐車位置を誤差修正する。ここで、周囲には駐車枠外に停車している他車両や壁などの障害物は存在しないこととする。

自動駐車における低速走行時の車両ダイナミクスは非ホロノミックな拘束を持つ運動方

程式で表される非線形システムとしてよく知られており、様々な制御手法 [85–88] が提案されている。しかし、これらの研究では適用できる車両の姿勢角の制限や操舵角制御量の制約条件などの問題から実システムへの適用には課題があることが報告 [23] されている。

本研究では、車両の現在位置から目標駐車位置に至る目標軌道に沿って走行するための車両横方向制御則として、適用できる車両の姿勢角の制限が無い前方注視点距離を導入した厳密線形化手法 [89–91] に基づいた手法を適用する。ここで、[91] で指摘されているように、これらの手法では理想的な速度制御が構成されていることが仮定されているため、路面外乱などの影響を受けて、この仮定が成り立たなくなると制御器の安定性が損なわれる場合がある。そこで、本研究では、車両前後方向制御に、筆者らが提案した路面外乱に対してロバストな車両前後方向の位置決め制御手法 [92] を用いて、この問題を回避する。

自動駐車システムにおける駐車スペース検出の従来研究として LIDAR を用いて駐車位置を検出する手法 [25] が提案されている。LIDAR は、レーザー光線を用いて光の飛行時間を計測することにより測距する。一般に、LIDAR はカメラに対して照明条件に対するロバスト性、遠距離測距精度が良いという特長がある。しかし、カメラに比べて解像度が低い、装置が大型になる、非常に高価、雨や霧など天候の影響を受けやすいことから実システムへの適用には課題がある。また、この他にステレオカメラを用いた白線検出手法 [93] が提案されている。ステレオビジョンを用いて高精度の距離情報を得るためには、原理的にカメラ間距離を長くする必要がある。しかし、カメラ間距離を長くするとオクルージョン問題による計測範囲の減少や、装置の大型化が避けられず、車載が困難となる。これらの理由により、現在実用化されている駐車支援システムでは、複数の単眼カメラを用いた俯瞰映像に基づく駐車枠検出手法や超音波センサを用いて駐車スペースを検出する手法が主流である。本研究では、実用的な自動駐車システムを検討するために複数の単眼カメラを用いた俯瞰映像に基づく駐車枠検出手法を用いた場合について検討する。

路面勾配や段差を含む並列駐車シーンをケーススタディとして自動駐車システムのシミュレーションを行い、提案手法の有効性を示す。

7.2 路面と目標駐車位置観測モデル

俯瞰映像提示システム [94] では、複数の車載カメラから得られる映像を、それぞれのカメラ位置から路面に見立てた水平面へ射影変換し、車両上部に視点位置を設置することで俯瞰映像を生成する。このとき、車載カメラの被写体が平坦な路面であることを仮定しているため、高さのある物体が撮影されると俯瞰画像にゆがみが発生することが報告 [95] されている。一般に、舗装路面には水はけを良くするために 2% (1.1deg) 程度の排水勾配がつけられている。そのため、路面が平坦であることを前提とした射影変換に基づき駐車位置を算出すると誤差が生じるという課題がある。この問題を再現するために図 7.1 に示す路面モデルと並列駐車におけるシミュレーション条件を用いる。ここで、図中のハッチ

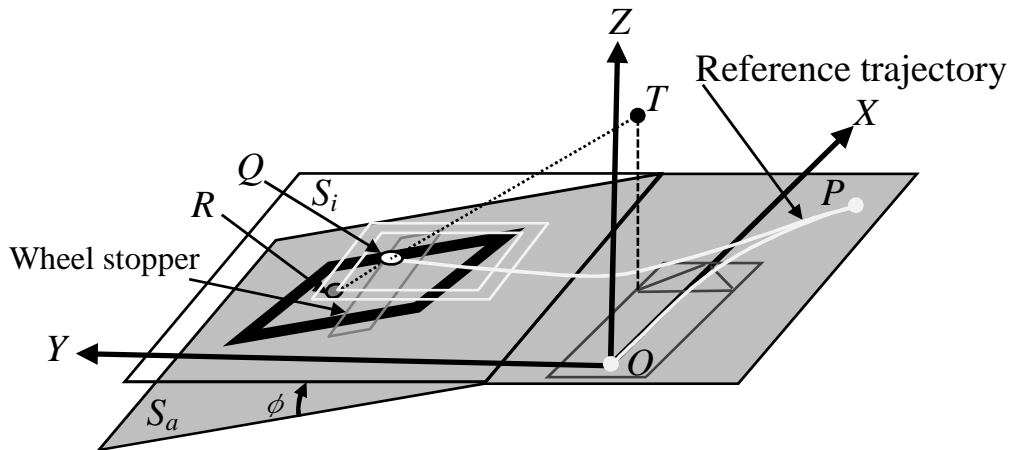


図 7.1: Road configuration and camera setting.

ング部分 S_a は部分的に勾配がついた実際の路面、 S_i は仮想的な平坦路面を表している。いま、初期位置の後輪車軸中心座標 $O(x, y, z, \theta_h)$ 、左ドアミラーに設置されたカメラ座標 $T(x, y, z)$ の場合を考えると、真の目標位置の後輪車軸中心座標 $R(x, y, z, \theta_h)$ に対して、左ドアカメラ画像を仮想的な平坦路面に射影変換することにより、カメラから得られる画像を用いて検出される目標位置の後輪車軸中心座標 $Q(x, y, z, \theta_h)$ が算出できる。ここで、撮像系のレンズ歪は、あらかじめキャリブレーションされており補正されることを前提として無視する。また、コインパーキングを想定して駐車目標位置の手前に車止めが存在し、 $y > 1$ において ϕ [deg] の勾配が存在するものとする。

7.3 自動駐車システムの構成

図 7.2 に、提案する自動駐車システムの構成図を示す。本システムは車両前部，後部および左右のドアミラーに設置された 4 台の車載カメラにより得られた画像情報を基に駐車枠位置を検出し，検出した駐車枠位置から目標駐車位置および姿勢を算出する。さらに，車両初期位置から目標駐車位置に至る切り返しを含む軌跡と，速度プロファイルを算出する。算出した軌跡に沿って車両が走行するように前方注視点距離を導入した厳密線形化制御器により操舵角指令値 $Steer_com$ が与えられ，車両横方向制御を行う。また，モデル追

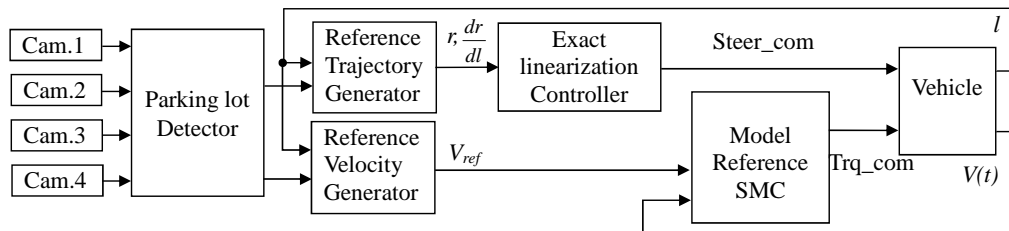


図 7.2: Block diagram of the system.

従 SMC は，与えられた位置・速度指令値に沿って動作するようにトルク指令値 Trq_com を生成し，車両前後方向制御を行う。さらに，車両初期位置で検出した目標駐車位置に近づく目標駐車位置を再検出し，目標駐車位置の観測誤差を検出した場合には，走行中に停車することなく滑らかに軌道修正を行う。この軌道修正は 2 回実施される。1 回目は，後輪車軸中心座標が最初に検出した駐車枠の入口に到達した時点で目標走行軌跡を修正する，2 回目は修正軌跡の midpoint で最終的な目標駐車位置を再度検出し，車両前後方向軌道のみを修正する。

7.4 車両横方向制御器設計

7.4.1 軌道生成

これまでに，自動駐車のための軌道生成手法として様々な手法が提案されてきた。円弧と直線を用いた軌道生成手法 [24] では，互いに接する円弧もしくは円弧に接する直線を構成要素とする軌道が生成される。しかし，この手法では構成要素どうしの接続点において曲率が不連続変化するため，実際に車両を軌道に追従させるためには，構成要素の接続点において一旦停止して据え切り操作が必要となる。一般に，駐車などの極低速走行で

は、車速が低い程タイヤや操舵装置に負担がかかることが知られている [96]. 特に、停車中の据え切り操作は最もタイヤや操舵装置に負担がかかる. この問題を解決するためにクロソイド曲線を用いて直線と円弧を用いた軌道を補間する手法 [97] が提案されている. この手法では、クロソイド曲線の始点および終点において直線もしくは円弧と接続する. そのため、軌道構成要素の接続点において曲率が連続変化し、構成要素どうしの接続点において一旦停止することなく車両を軌道に追従させることができる. しかし、この手法で生成された軌道は、軌道構成要素の接続点において曲率変化率が不連続変化するため、クロソイド曲線の始点および終点においてステアリングアクチュエータに過大なトルクが要求されて振動が発生し、乗員に違和感を与える要因となる.

従来から車両の乗り心地に関する重要なファクターとして加速度の時間微分値である躍度が知られている. 張らは、ハードディスクドライブのような高精度位置決め制御のための参照軌道として、躍度の時間微分値を最小化する滑らかな軌道を提案した [1]. いま、張らが提案した滑らかな軌道に基づき、直進軌道（曲率：0）から目標曲率 ρ_e に滑らかに変化する曲率プロファイルを考える. ここで、曲率0から目標曲率 ρ_e に至るまでの距離 L_e [m], 走行距離 l [m] と置くと、参照軌道の曲率 $\rho_{ref}(t)$ は

$$\rho_{ref}(t) = \rho_e \left\{ -20 \left(\frac{l}{L_e} \right)^7 + 70 \left(\frac{l}{L_e} \right)^6 - 84 \left(\frac{l}{L_e} \right)^5 + 35 \left(\frac{l}{L_e} \right)^4 \right\} \quad (7.1)$$

で表される. 図 7.3 に横軸に軌道の曲線長、縦軸に曲率をとった曲率プロファイルの一例を示す. 同図において、破線はクロソイド曲線と円弧を用いた場合の曲率プロファイルである. 図を見てわかるように、軌道構成要素の接続点において曲率変化率が不連続変化することがわかる. また、実線は、この問題を解決するために、クロソイド曲線のかわりに躍度最小化軌道に基づく滑らかな軌道 [1] を用いた場合の曲率プロファイルを表している. 図 7.4 に、図 7.3 の軌道を示す. 図 7.4 において、一点鎖線は円弧を用いた軌道を表しており、破線および実線は、それぞれ、始点および終点において円弧に接するクロソイド曲線を用いた軌道と躍度最小化軌道に基づく滑らかな軌道を用いた場合の軌道を表している. 図 7.5 に、図 7.3, 7.4 に示した軌道を一定速度で走行した場合の操舵量の一例を示す. 同図は、上から操舵角、操舵角速度、操舵角加速度を表しており、破線はクロソイド曲線と円弧を用いた軌道を用いた場合、実線は躍度最小化軌道に基づく滑らかな軌道を用いた場合の操舵量を表している. 図を見てわかるように、クロソイド曲線と円弧を用いた場合はインパルス状の操舵角加速度波形が生じる. これに対して、滑らかな軌道を用いた操舵角加速度は滑らかに変化し、最大値も小さい. 一般に、躍度は運動の滑らかさを表す指標として用いられる. 急激な操舵加速度変化（躍度）が生じると操舵系に衝撃が生じる

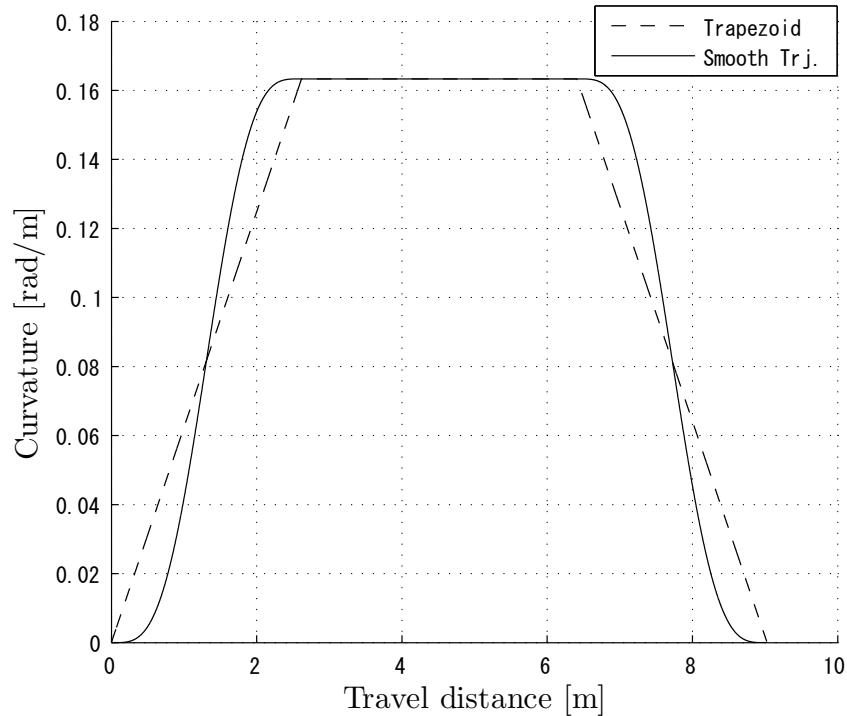


図 7.3: Curvature profile.

ため、滑らかな軌道を用いることで操舵系の負荷と振動を大幅に改善できることがわかる。しかし、躍度最小化軌道に基づく滑らかな軌道を用いた場合の操舵角速度最大値は、クロソイド曲線と円弧を用いた場合の約2倍となることに注意を要する。

本研究では、駐車軌道生成において、車両の現在位置から目標位置に至る目標軌道を2段階に分けて算出する。ここで、並列駐車における繰り返し駐車軌道生成を例にとって説明する。第1段階では、図7.6に示すように、観測された目標駐車位置に基づき円弧と直線を用いた軌道生成手法を用いて切り返し点 P と切り返し点における車両姿勢を算出する。ここで、車両の最小旋回半径 R_{min} のとき、1回の切り返しで軌道生成可能な条件は $|C_a C_b| > 2R_{min}$ である。このとき、それぞれ直線 OC_a , $Q' C_b$ の延長線上に中心をもつ互いに接する円を用いる。第2段階では、軌道を車両の始点から切り返し点に至る問題と切換え点から目標駐車位置へ至る問題に分割する。分割したそれぞれの軌道に対して、クロソイド曲線、円弧、直線から構成される基本軌道を相似拡大して軌道生成する手法に基づき、クロソイド曲線のかわりに躍度最小化軌道に基づく滑らかな軌道を用いて、切り返し点においてそれぞれの軌道が共通の接線を持つ軌道を生成する。本研究では、駐車枠を跨ぐ軌道が生成されるのを防ぐために、駐車開始位置で生成される初期軌道において、駐

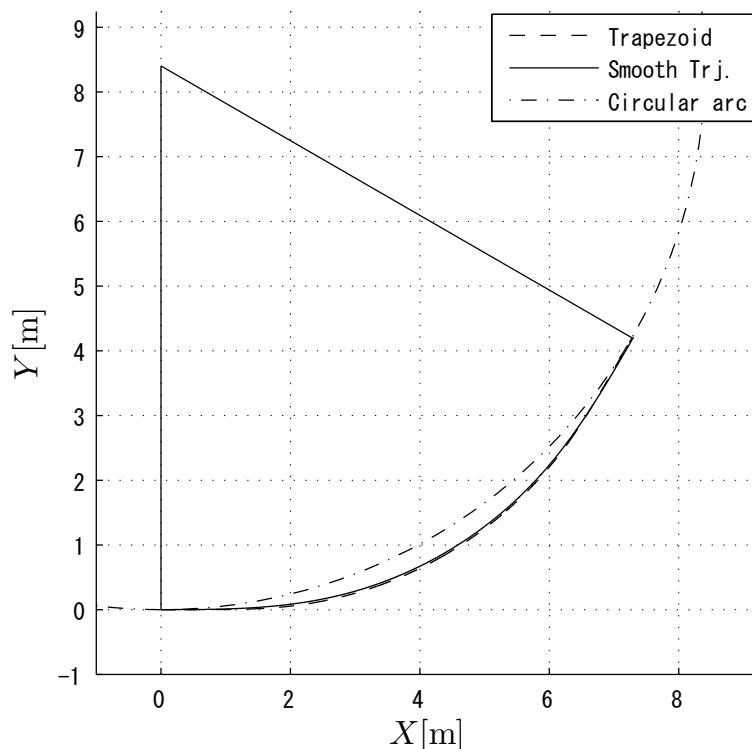


図 7.4: Sample trajectory.

車枠内に直線軌道が付加されている。

図 7.7 は、車両姿勢角が θ_h となる場合の基本軌道を相似拡大して軌道生成する手法を表している。この手法では、あらかじめ車両初期位置から任意の車両姿勢角 θ_h に至る最も旋回半径が小さい基本軌道を数値積分により算出する。その軌道を相似拡大し、その前後に直線を接続することで任意の位置・姿勢に至る軌道を生成する。ここで、領域①、④、⑤は軌道を得られない領域、領域②は先に直線を与えて、その後に基本軌道の相似拡大軌跡を接続することにより軌道が得られる領域、領域③は基本軌道の相似拡大軌跡の後に直線を接続することにより軌道を得られる領域である。これを、車両の現在位置 O から切り返し点 P に至る問題と、切り返し点 P から目標位置 Q に至る問題に適用する。図 7.8 に示すように、それぞれの切り返し点算出可能領域の共通部分（ハッチング部分）から切り返し点 P を選定する。通常、最も走行距離が短くなるように、切り返し点算出可能領域の境界線上から選ぶと良い。本研究では、目標軌道生成の第 1 段階で用いる P 点で接する 2 円の半径比を、黄金分割法を用いて探索することで、駐車開始位置から目標駐車位置に至る 1 回切り返し最短軌道を算出した。

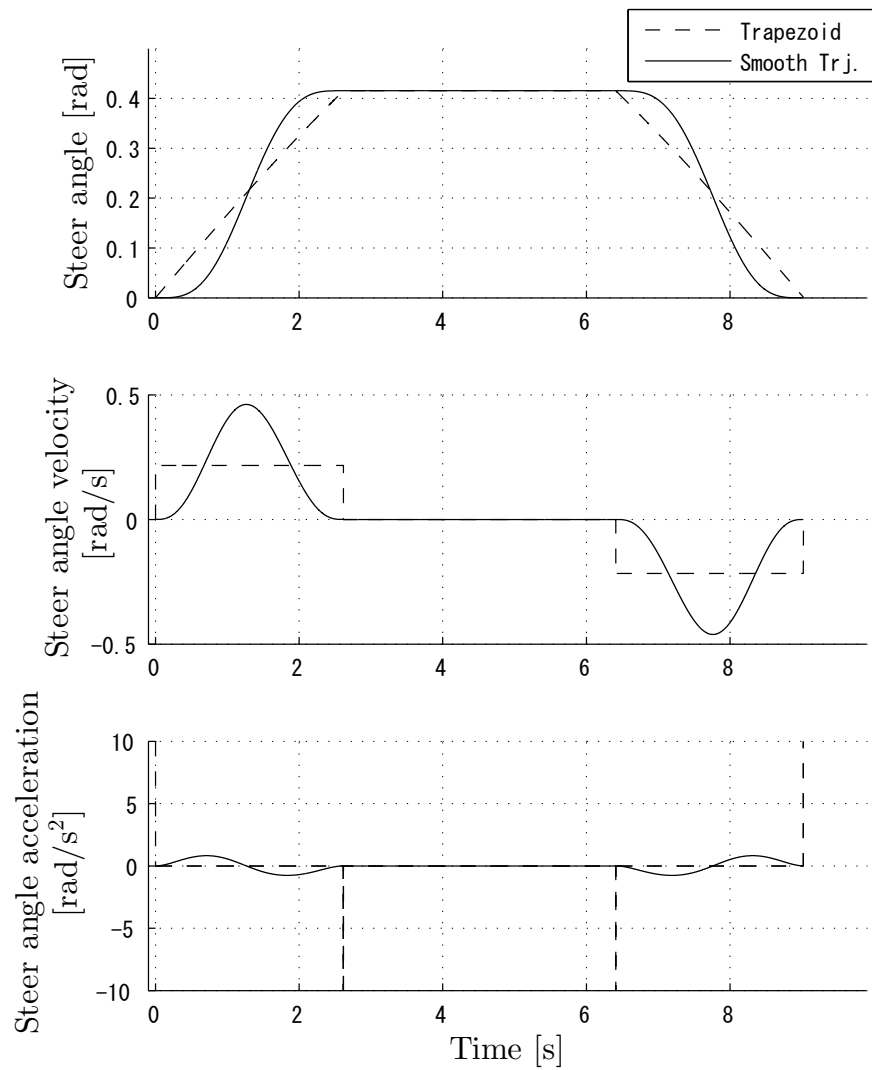


図 7.5: Steer angle profile.

また，本研究では繰り返し軌道生成と同様のアルゴリズムを用いて誤差修正軌道を算出する．図 7.9 に，4 種類の誤差修正軌道生成アルゴリズムを示す．

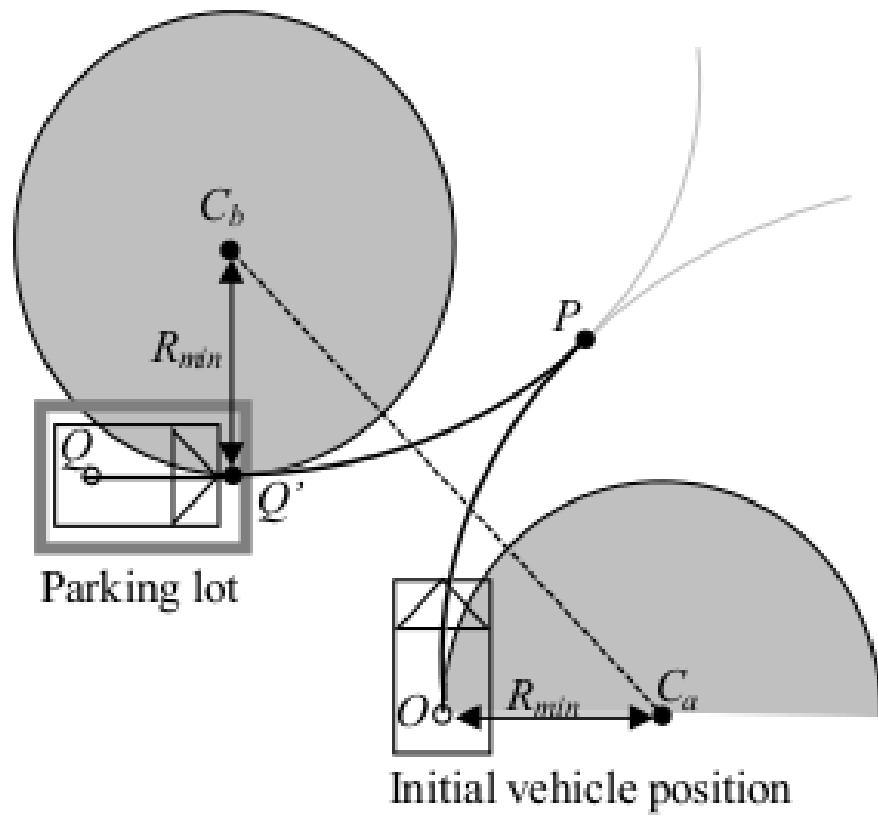


図 7.6: Calculation of a turning back point.

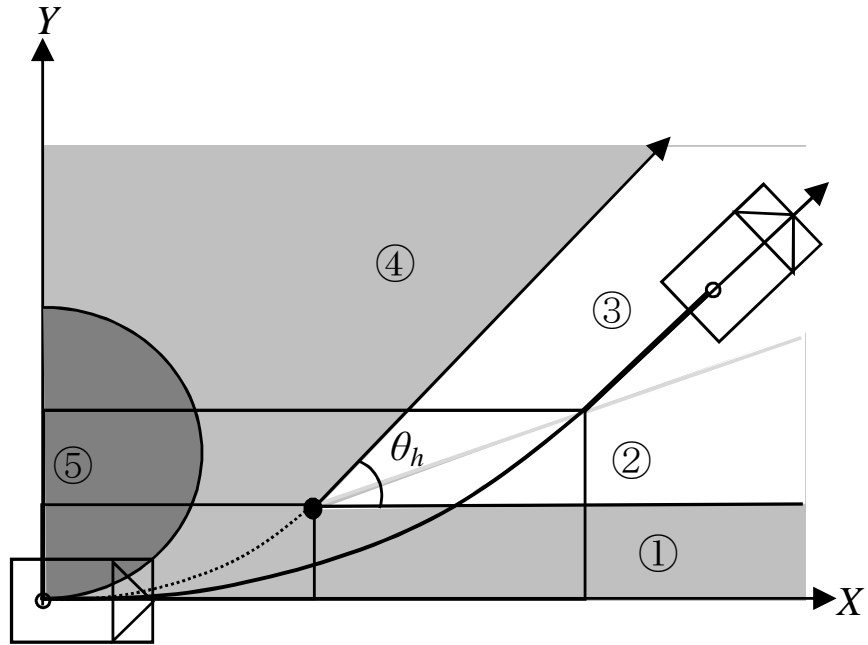


図 7.7: Similar enlargement of the base trajectory.

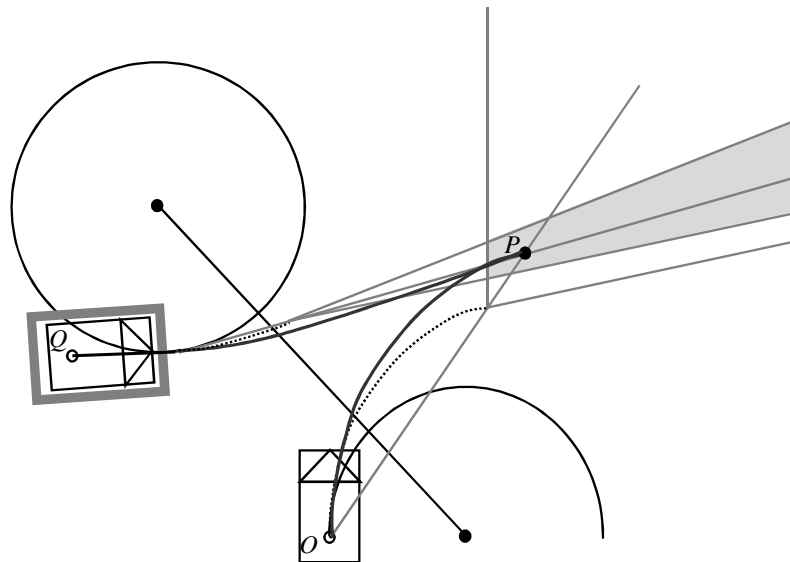


図 7.8: Generation of the trajectory with a turning back point.

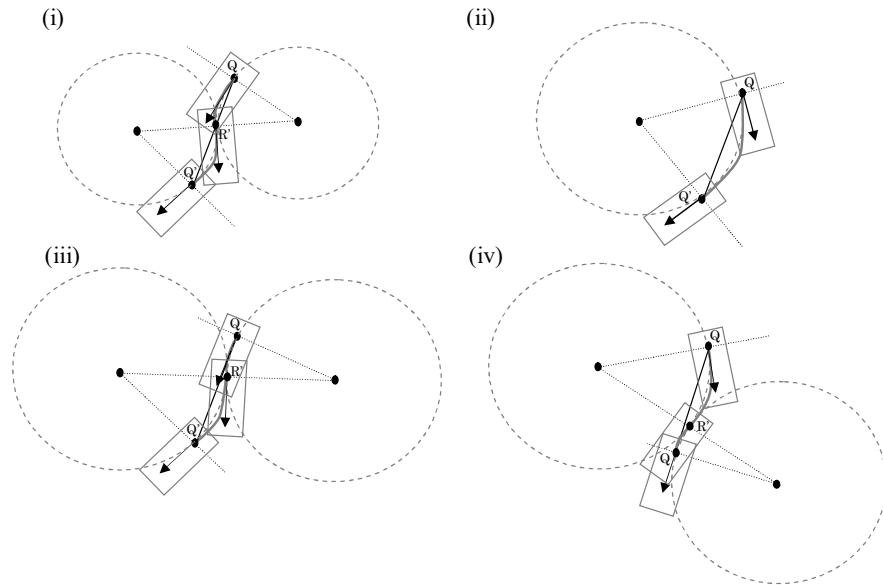


図 7.9: Calculation of the error correction trajectory.

7.4.2 前方注視点を導入した厳密線形化制御器設計

四輪車両の低速走行におけるダイナミクスは、タイヤ横滑りが発生しないと仮定することができ、(7.2)式で表すことができる。このモデルを図7.10に示す。ここで、転舵輪は

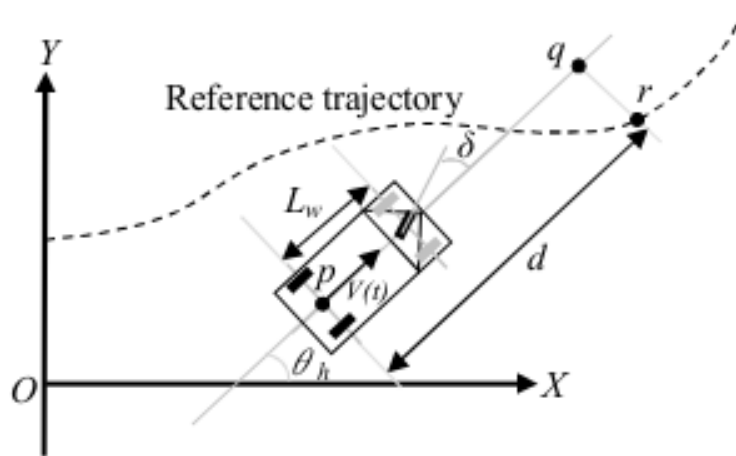


図7.10: Lateral vehicle model and reference trajectory.

前輪とする。また、簡単のために前輪を一輪化して扱う。このシステムは非ホロノミック拘束を持つ非線形系として良く知られている。図7.10における記号の意味を表7.1に示す。

本手法では、駐車開始位置における車両位置・姿勢を基準として並列駐車軌道を算出するため、駐車開始位置における参照軌道に対する追従誤差は常にゼロである。また、本手法における並列駐車のリターン参照軌道は、リターン前の前進軌道とリターン後の後退軌道で構成される。これらの軌道は、それぞれ曲率が同符号の範囲内で絶対値が単調増加した後に単調減少する。また、誤差修正軌道では、変曲点を高々1つ持つ曲線で構成される。本研究で扱う参照軌道は連続かつ滑らかに変化するので理論的には完全に車両が追従可能であるという特徴を持つ。ここで、車両の最小旋回半径 R_{min} をとる最大曲率 ρ_{max} 以下となるように設計された走行距離 l に対する参照軌道の曲率プロファイル $\rho_r(l)$ を用いる。

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = V(t) \cos\theta_h(t) \\ \frac{dy(t)}{dt} = V(t) \sin\theta_h(t) \\ \frac{d\theta_h(t)}{dt} = V(t) \frac{\tan\delta(t)}{L_w} \end{cases} \quad (7.2)$$

ここで、車速 $V(t)$ とヨーレート $\omega_h(t)$ を制御入力と置くと (7.2) 式は (7.3) 式で表せる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \theta_h(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_h(t) & 0 \\ \sin\theta_h(t) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(t) \\ \omega_h(t) \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

しかしながら、この式を用いて経路追従制御を行うと、操舵角制御指令値の算出過程で車速 $V(t)$ を分母とする式が現れる。そこで、極低速時に生じるゼロ割を回避し、車両前後方向制御と横方向制御を分離するために時間に関する微分方程式 (7.3) 式を距離に関する微分方程式に変換する。

$$\frac{d}{dl} \begin{bmatrix} x(l) \\ y(l) \\ \theta_h(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_h(l) & 0 \\ \sin\theta_h(l) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \rho(l) \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

表 7.1: Parameters of the vehicle model and trajectory.

$p(x, y)$	Position coordinate of the center of the rear axle [m]
$q(x_q, y_q)$	Position coordinate of the look-ahead point [m]
$r(x_r, y_r)$	Position coordinate of the reference trajectory [m]
$\theta_h(\cdot)$	Vehicle heading angle [rad]
$\omega_h(t)$	Yaw rate [rad/s]
$\delta(\cdot)$	Steering angle [rad]
$V(t)$	Vehicle speed [m/s]
d	Look-ahead distance [m]
L_w	Wheelbase [m]
$\rho(l)$	Curvature of the vehicle trajectory
$\rho_r(l)$	Curvature of the reference trajectory
l	Travel distance [m]
t	Time [s]

このシステムは affine 系と呼ばれる形式で表すことができる。

$$\dot{\chi} = f(\chi) + g(\chi)u \quad (7.5)$$

ここで、制御入力 u 、状態量 $\chi = [x(l) \ y(l) \ \theta_h(l)]^T$ 、 $f(\chi) = 0$ である。

車両後輪車軸中心座標に対して前方注視点距離 d だけ離れた点における座標 q は (7.6) 式で表される。

$$q(l) = \begin{bmatrix} x(l) + d\cos\theta_h(l) \\ y(l) + d\sin\theta_h(l) \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

(7.6) 式を車両走行距離 l で微分すると

$$\begin{aligned} \frac{dq(l)}{dl} &= \begin{bmatrix} \frac{dx_q}{dl} \\ \frac{dy_q}{dl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_h(l) & -d\sin\theta_h(l) \\ \sin\theta_h(l) & d\cos\theta_h(l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \rho(l) \end{bmatrix} \\ &= g(\chi) u(l) \end{aligned} \quad (7.7)$$

(7.7) 式から次式が得られる.

$$\begin{aligned} u(l) &= \begin{bmatrix} 1 \\ \rho(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_h(l) & \sin\theta_h(l) \\ -\frac{\sin\theta_h(l)}{d} & \frac{\cos\theta_h(l)}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dx_q}{dl} \\ \frac{dy_q}{dl} \end{bmatrix} \\ &= g^{-1}(\chi) \frac{dq(l)}{dl} \end{aligned} \quad (7.8)$$

いま, 目標軌道座標 $r(l)$ に対する前方注視点における座標 $q(l)$ の追従誤差 $e(l)$ を次式で表す.

$$e(l) = q(l) - r(l) \quad (7.9)$$

(7.9) 式を走行距離 l で微分して整理すると次式が得られる.

$$\frac{dq(l)}{dl} = \frac{de(l)}{dl} + \frac{dr(l)}{dl} \quad (7.10)$$

ここで, (7.10) 式において, $\frac{de(l)}{dl} = k_l e(l)$, $k_l < 0$ とすれば追従誤差を指数安定化することができる. それ故, 制御入力を (7.11) 式のように選ぶと (7.7) 式は (7.12) 式で表すことができる.

$$u(l) = g^{-1}(\chi) \left\{ \frac{dr(l)}{dl} + k_l e(l) \right\} \quad (7.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dq(l)}{dl} &= g(\chi) u(l) = g(\chi) g^{-1}(\chi) \left\{ \frac{dr(l)}{dl} + k_l e(l) \right\} \\ &= \frac{dr(l)}{dl} + k_l (q(l) - r(l)) \end{aligned} \quad (7.12)$$

(7.12) 式を整理すると (7.13) 式が得られる.

$$\frac{de(l)}{dl} = k_l e(l) \quad (7.13)$$

ここで, k_l は追従誤差の動特性を決定する設計パラメータである. (7.13) 式から, $k_l < 0$ とすれば誤差 $e(l)$ は走行距離に対して指数安定化可能であることが示せた. また, 操舵角指令値は次式で表せる.

$$\delta(l) = \tan^{-1}(L_w \rho(l)) \quad (7.14)$$

7.4.3 追従誤差が存在する場合の解析

本項では、何らかの理由で参照軌道 $r(l)$ に対する追従誤差 $e(l)$ が生じる場合における (7.8) 式の第1項の成立条件について解析する。

ここで、(7.11) 式で表される制御則を適用した場合、(7.8) 式の第1項は次式で表される。

$$\cos\theta_h(l) \left(\frac{dx_r(l)}{dl} + k_l x_e(l) \right) + \sin\theta_h(l) \left(\frac{dy_r(l)}{dl} + k_l y_e(l) \right) = 1 \quad (7.15)$$

本研究で扱う地表平面上で表される参照軌道は C^∞ 級の曲線である。故に、参照軌道 $r(l)$ 上の任意の点における接線成分は次式で表される。

$$\begin{cases} \frac{dx_r(l)}{dl} = \cos\theta_r(l) \\ \frac{dy_r(l)}{dl} = \sin\theta_r(l) \end{cases} \quad (7.16)$$

ここで、 $\theta_r(l) = \int_0^l \rho(l) dl$ である。

いま、(7.15) 式に (7.16) 式を代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \cos\theta_h(l) (\cos\theta_r(l) + k_l x_e(l)) + \sin\theta_h(l) (\sin\theta_r(l) + k_l y_e(l)) &= 1 \\ \iff \cos(\theta_h(l) - \theta_r(l)) + k_l (x_e(l) \cos\theta_h(l) + y_e(l) \sin\theta_h(l)) &= 1 \end{aligned} \quad (7.17)$$

ここで、 $\theta_h(l) - \theta_r(l) \ll 1$, $1 - \cos(\theta_h(l) - \theta_r(l)) \ll k_l$ と仮定すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} x_e(l) \cos\theta_h(l) + y_e(l) \sin\theta_h(l) &\simeq 0 \\ \iff y_e(l) \sin\theta_h(l) &= -x_e(l) \cos\theta_h(l) \\ \iff \frac{y_e(l)}{x_e(l)} \tan\theta_h(l) &= -1 \end{aligned} \quad (7.18)$$

(7.18) 第3式より、車両の姿勢角ベクトル \vec{pq} と追従誤差ベクトル \vec{e} が $\vec{pq} \perp \vec{e}$ を満たせば、 $\theta_h(l) - \theta_r(l) \ll 1$ の条件の下で (7.15) 式が成立する事が示せた。

7.5 車両前後方向制御の設計

本節では、段差や路面勾配などの未知外乱に対してロバスト性を保ちつつ、滑らかに省エネルギーで車両前後方向の位置決め制御を行う手法を提案する。この制御系は、モデル追従スライディングモード制御で構成されている。ここで、理想的な平坦路を想定して、躍度最小化軌道に基づく滑らかな軌道 [1] を参照軌道として採用する。

7.5.1 段差・車両モデル

前輪駆動方式の4輪電気自動車を現在位置から目標位置まで自動走行させる際に、乗り心地や目標軌道追従性を損なう要因となる路面外乱の一例として高さ h の段差および路面勾配を考える。この段差を前輪で乗り上げる問題を図 7.11 のようにモデル化すると (7.19) 式が得られる。

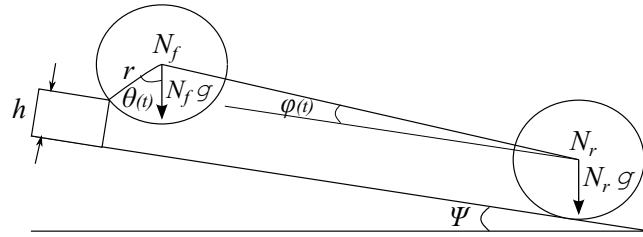


図 7.11: 1/2 vehicle model which climb over a bump.

$$\frac{d\omega_f}{dt} = \frac{1}{J_1} \left\{ NT_f - N_f g r \sin(\theta_0 - \theta(t) + \psi) - N_r g r \sin(\psi) - J_2 \omega_f^2 \right\} \quad (7.19)$$

ただし、

$$J_1 = (J_f + N_f r^2) + (J_r + N_r r^2) \frac{\cos(\theta_0 - \theta(t))}{\cos(\varphi) \cos(\theta_0 - \theta(t) - \varphi(t))}$$

$$J_2 = (J_r + N_r r^2) \frac{\sin(\theta_0 - \theta(t))}{\cos(\varphi(t)) \cos(\theta_0 - \theta(t) - \varphi(t))}$$

表 7.2 に (7.19) 式のパラメータを示す。

表 7.2: Parameter of the simulation model.

J_f	Total moment of inertia of the two front wheels [kgm ²]
J_r	Total moment of inertia of the two rear wheels [kgm ²]
N_f	Front body mass [kg]
N_r	Rear body mass [kg]
ω_f	Front wheel rotation angular velocity [rad/s]
N	Reduction ratio
T_f	Actuator torque [Nm]
$\theta_f(t)$	Front wheel rotation angle [rad]
$\theta(t)$	The angle made by the gravity vector and a front wheel radius vector in contact with the bump [rad]
θ_0	θ at the time of initial contact between front tire and bump [rad]
ψ	Road gradient angle [rad]
$\varphi(t)$	Vehicle body tilt angle from the road surface [rad]
h	Bump height [m]
r	Radius of the tires [m]

7.5.2 躍度最小化軌道に基づく参照軌道

従来から車両の乗り心地に関する重要なファクターとして加速度の時間微分値である躍度が知られている。本研究では、車両前後方向制御の目標軌道に張ら [1] が提案した位置決め制御のための滑らかな参照軌道を採用する。ここで、目標移動距離 L_d [m]、目標到達時間 t_f [s]、タイヤ半径 R [m] と置くと、目標軌道は (7.20) 式で表される。

$$\theta_{ref}(t) = \frac{L_d}{R} \left\{ -20 \left(\frac{t}{t_f} \right)^7 + 70 \left(\frac{t}{t_f} \right)^6 - 84 \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 + 35 \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 \right\} \quad (7.20)$$

7.5.3 滑らかな参照軌道の修正

第3章では、張ら [1] が提案した位置決め制御のための滑らかな参照軌道を、任意の初期状態から終端状態へ至る問題に拡張し、位置決め制御中に滑らかに参照軌道を修正する手法を提案した。ここで、状態量 $\mathbf{x}_c(t)$ 、初期状態 $\mathbf{x}_c(0)$ 、終端状態 $\mathbf{x}_c(t_f)$ と置くと、誤差修正参照軌道の位置 $x(t)$ 、速度 $v(t)$ 、加速度 $a(t)$ 、躍度 $j(t)$ は (7.22) ~ (7.25) 式で表される。

$$\mathbf{x}_c(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \\ a(t) \\ j(t) \end{bmatrix}, \mathbf{x}_c(0) = \begin{bmatrix} x(0) \\ v(0) \\ a(0) \\ j(0) \end{bmatrix}, \mathbf{x}_c(t_f) = \begin{bmatrix} x(t_f) \\ v(t_f) \\ a(t_f) \\ j(t_f) \end{bmatrix} \quad (7.21)$$

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a_0 t^2 + \frac{1}{6} j_0 t^3 + \frac{A}{6} \left(\frac{t}{t_f} \right)^7 - \frac{D}{6} \left(\frac{t}{t_f} \right)^6 + \frac{B}{2} \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 - \frac{C}{6} \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 \quad (7.22)$$

$$v(t) = v_0 + a_0 t + \frac{1}{2} j_0 t^2 + \frac{1}{t_f} \left\{ \frac{7A}{6} \left(\frac{t}{t_f} \right)^6 - D \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 + \frac{5B}{2} \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 - \frac{2C}{3} \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 \right\} \quad (7.23)$$

$$\begin{aligned}
 a(t) = a_0 + j_0 t + \frac{1}{t_f^2} \left\{ 7A \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 - 5D \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 \right. \\
 \left. + 10B \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 - 2C \left(\frac{t}{t_f} \right)^2 \right\} \quad (7.24)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 j(t) = j_0 + \frac{1}{t_f^3} \left\{ 35A \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 - 20D \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 \right. \\
 \left. + 30B \left(\frac{t}{t_f} \right)^2 - 4C \left(\frac{t}{t_f} \right) \right\} \quad (7.25)
 \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
 A &= 120(x_0 - x_1) + 60(v_0 + v_1)t_f \\
 &\quad + 12(a_0 - a_1)t_f^2 + (j_0 + j_1)t_f^3 \\
 B &= 168(x_0 - x_1) + (90v_0 + 78v_1)t_f \\
 &\quad + (20a_0 - 14a_1)t_f^2 + (2j_0 + j_1)t_f^3 \\
 C &= 210(x_0 - x_1) + (120v_0 + 90v_1)t_f \\
 &\quad + (30a_0 - 15a_1)t_f^2 + (4j_0 + j_1)t_f^3 \\
 D &= 420(x_0 - x_1) + (216v_0 + 204v_1)t_f \\
 &\quad + (45a_0 - 39a_1)t_f^2 + (4j_0 + 3j_1)t_f^3
 \end{aligned}$$

いま, 元の参照軌道に沿って制御中に $t = t_1$ において, 滑らかさを損なうことなく目標位置を修正することを考える. 修正後の目標位置 L_e とすると, 位置決め制御中の誤差修正開始時刻の参照軌道状態量を, 初期状態 $\mathbf{x}_c(0) = \begin{bmatrix} x(t_1) & v(t_1) & a(t_1) & j(t_1) \end{bmatrix}^T$, 終端状態 $\mathbf{x}_c(t_f) = \begin{bmatrix} L_e & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ と置いて誤差修正軌道を算出し, 元の参照軌道と置き換えることで位置決め制御中に滑らかに目標位置を修正することができる.

7.5.4 モデル追従 Sliding mode controller 設計

制御の目的は，車重変動などのパラメータ変動，減速器バックラッシュなどのモデル化誤差，路面勾配などの外乱などの不確かさに対するロバスト性とチャタリング抑止効果を両立しつつ，目標軌道に追従することである。

モデル追従コントローラの規範モデル状態方程式として (7.26) 式を用いる．ここで $\boldsymbol{x}_{ref}(t)$ は目標軌道である．

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{ref}(t) = \boldsymbol{A}_{ref}\boldsymbol{x}_{ref}(t) + \boldsymbol{B}_{ref}(t)\ddot{\theta}_{ref}(t) \quad (7.26)$$

ただし，

$$\boldsymbol{A}_{ref} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{B}_{ref} = [0 \ 1]^T$$

$$\boldsymbol{x}_{ref}(t) = [\theta_{ref}(t) \ \dot{\theta}_{ref}(t)]^T$$

ここで $\boldsymbol{x}_{ref}(t)$ は規範モデルの状態量， \boldsymbol{A}_{ref} は規範モデルの状態遷移行列， \boldsymbol{B}_{ref} は規範モデルの駆動行列を表している．システムの状態量 $\boldsymbol{x}(t)$ を目標軌道 $\boldsymbol{x}_{ref}(t)$ に追従させるために状態変数の追従誤差ベクトル $\boldsymbol{e}(t)$ を (7.27) 式で定義する．これを時間微分することで誤差ダイナミクス $\dot{\boldsymbol{e}}(t)$ を (7.28) 式で表すことができる．

$$\boldsymbol{e}(t) = \boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{x}_{ref}(t) \quad (7.27)$$

ただし，

$$\boldsymbol{e}(t) = [\theta(t) - \theta_{ref}(t) \ \dot{\theta}(t) - \dot{\theta}_{ref}(t)]^T$$

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{e}}(t) &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{A}_{ref}\boldsymbol{x}_{ref}(t) + \boldsymbol{B}u(t) - \boldsymbol{B}_{ref}\ddot{\theta}_{ref}(t) \\ &= \boldsymbol{A}_{ref}\boldsymbol{e}(t) + (\boldsymbol{A} - \boldsymbol{A}_{ref})\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}u(t) - \boldsymbol{B}_{ref}\ddot{\theta}_{ref}(t) \end{aligned} \quad (7.28)$$

ここで，切換関数 $\sigma(t) = \boldsymbol{S}\boldsymbol{e}(t)$ ， $\boldsymbol{S} = [S_1 \ 1]$ と置き，時間微分すると (7.29) 式が得られる．

$$\dot{\sigma}(t) = \boldsymbol{S} \left[\boldsymbol{A}_{ref}\boldsymbol{e}(t) + (\boldsymbol{A} - \boldsymbol{A}_{ref})\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}u(t) - \boldsymbol{B}_{ref}\ddot{\theta}_{ref}(t) \right] \quad (7.29)$$

いま、正定関数 $V(t)$ の候補を (7.30) 式のように選ぶと、Lyapunov の安定定理から安定条件は (7.31) 式となる。

$$V(t) = \frac{1}{2}\sigma(t)^2 > 0 \quad (7.30)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \sigma(t) \left(\mathbf{S}\mathbf{A}_{ref}\mathbf{e}(t) + \mathbf{S}\mathbf{B}u(t) - \mathbf{S}\mathbf{B}_{ref}\ddot{\theta}_{ref}(t) \right) < 0 \quad (7.31)$$

それ故、 $u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t)$ として

$$\begin{cases} u_{eq}(t) &= -(\mathbf{S}\mathbf{B})^{-1} \left(\mathbf{S}\mathbf{A}_{ref}\mathbf{e}(t) - \mathbf{S}\mathbf{B}_{ref}\ddot{\theta}_{ref}(t) \right) \\ u_{sw}(t) &= -(\mathbf{S}\mathbf{B})^{-1} K \operatorname{sgn}(\sigma(t)) \end{cases} \quad (7.32)$$

に選べば

$$\frac{dV(t)}{dt} = -K\sigma(t) \operatorname{sgn}(\sigma(t)) < 0 \quad (7.33)$$

$\sigma(t)$ に関して漸近安定となり $\sigma(t) = 0$ に収束するので、スライディングモードの存在が示せる。ここで、 $u_{eq}(t)$ は等価制御入力、 $u_{sw}(t)$ は切換制御入力である。また、 K は切換制御入力の大きさを表し、 $\operatorname{sgn}(\sigma(t))$ は符号関数である。

7.5.5 境界層幅適応則

スライディングモード制御では、切換関数に符号関数を用いるとチャタリングが発生するため、従来から平滑化関数や飽和関数を用いて切換面近傍に一定の境界層を設定したり、切換制御ゲイン適応則を用いてチャタリングを抑止する方法が検討されてきた。本研究では、第5章で提案した境界層幅を調整する境界層幅適応則を用いる。これにより、スライディングモード制御の特徴である不確かさに対するロバスト性を保ちつつチャタリングを抑止する。いま、境界層の幅 $\delta_w(t) > 0$ を適応的に調整することを考える。ここで、 $\gamma(t) = 1/\delta_w(t)$ と置いて、Lyapunov 関数の候補を (7.34) 式とする。

$$V(t) = \frac{1}{2} (|\sigma(t)| - \gamma(t))^2 \quad (7.34)$$

このとき、(7.34) 式の時間微分が (7.35) 式を満たせばよい。

$$\dot{V}(t) = \frac{|\sigma(t)| - \gamma(t)}{|\sigma(t)| - \gamma(t)} \left(\frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)|} \dot{\sigma}(t) - \dot{\gamma}(t) \right) < -\eta(t) \quad (7.35)$$

ここで、 $\eta(t)$ は Lyapunov 関数がゼロへ収束する速さを決める正の定数である。(7.35) 式より、次の境界層幅調整則が得られる。

- (i) $|\sigma(t)| < \gamma(t)$ のとき
 - (a) $\sigma(t) > 0$ のとき $\dot{\gamma}(t) > -\eta(t) + \dot{\sigma}(t)$
 - (b) $\sigma(t) < 0$ のとき $\dot{\gamma}(t) < -\eta(t) - \dot{\sigma}(t)$
- (ii) $|\sigma(t)| > \gamma(t)$ のとき
 - (a) $\sigma(t) > 0$ のとき $\dot{\gamma}(t) < \eta(t) + \dot{\sigma}(t)$
 - (b) $\sigma(t) < 0$ のとき $\dot{\gamma}(t) > \eta(t) - \dot{\sigma}(t)$

上記の適応則を用いることにより $\sigma(t)$ の時間変化よりも $\eta(t)$ だけ早く境界層幅 $\delta_w(t)$ が調整される。また、 $|\sigma(t)|\delta_w(t) = 1$ となるように働くので、切換面からの距離 $\sigma(t)$ に反比例するように境界層幅 $\delta_w(t)$ が調整される。ここで、境界層幅に上限値と下限値を設定する。上限値は追従誤差の許容値を満たす範囲で最大となる値を用いる。下限値は最も不確かさが少ない場合にチャタリングが発生しない範囲で最小となる値を用いる。さらに、 $\sigma(t)$ および、 $\dot{\sigma}(t)$ に応じて、Lyapunov 関数がゼロへ収束する速さを調整するために (7.36) 式を適用する。

$$\eta(t) = \frac{|\sigma(t)|}{|\dot{\sigma}(t)| + \epsilon} \quad (7.36)$$

ここで、 ϵ は分母のゼロ割を防ぐための微小な正の定数である。(7.36)式を用いることにより追従誤差が切換面から遠く、ゆっくり変化する程急峻に、切換面に近く、速く変化する程緩やかに収束するように調整則を動作させることができる。また、この手法は調整パラメータが境界層幅の上限値と下限値のみであるため、チューニングが比較的容易であるという特徴を持つ。

7.6 シミュレーション

7.6.1 シミュレーション条件

第2節で説明した勾配と段差が存在する路面における並列駐車シーンのシミュレーション条件を示す。前後方向制御および横方向制御器の設計パラメータ，駐車枠寸法などを表7.3に示す。尚，ノミナル車重 M に対して，乗員や積載物などによる重さ変動として ΔM のモデル化誤差を含む。また，提案手法の路面外乱に対するロバスト性を検証するために，車両前後方向および横方向制御に従来手法（前方注視点を用いた厳密線形化）を用いた場合と提案手法の制御性能を比較する。ここで，従来手法の速度制御には，最適レギュレータによる線形状態フィードバック制御則を用いた。最適レギュレータの評価関数 J_e と設計パラメータを (7.37) 式に示す。

$$J_e = \int_0^{\infty} (e^T Q_e e + u^T R_e u) dt \quad (7.37)$$

$$Q_e = \begin{bmatrix} 1.0 \times 10^7 & 0 \\ 0 & 4.0 \times 10^5 \end{bmatrix}, R_e = 5.0$$

図7.12にシミュレーションに用いる車両初期位置と目標駐車位置を示す。ここで，実線で示されたコの字の白抜き図形は駐車枠を表している。駐車枠内の 'o' は，真の目標駐車位置における後輪車軸中心座標 $(x, y) = (3.5\text{m}, 5.7\text{m})$ を表しており，目標車両姿勢角 $\theta_h = -90\text{deg}$ である。また，駐車枠中央の矩形は駐車目標位置の前方 1.2m に存在する高さ 0.05m，幅 0.3m のコインパーキングの車止めを想定した段差である。破線で示された矩形は真の目標駐車位置における車両外形，破線矢印は車両姿勢角を表している。また，9つの '!' は，初期車両位置における後輪車軸中心座標を表しており $x = (0, -0.5, -1.0\text{m}), y = (0, -0.5, -1.0\text{m})$ である。実線で示された矩形は，車両初期位置 $(x, y, \theta_h) = (0\text{m}, 0\text{m}, 0\text{deg})$ における車両外形，実線矢印は，車両姿勢角を表している。初期位置における車両外形を中心とした大きい実線矩形領域は車両周囲 6.5m の車載カメラを用いて駐車枠検出可能な範囲を表している。太い破線は平坦路と勾配路の境界を表しており，太い破線を境に $y > 1$ では路面に一定勾配 $\phi = (-4, -3, -2, 2\text{deg})$ がついている。ここで， $\phi < 0$ は下り勾配を表している。また， $y \leq 1$ では路面は平坦である。これらの初期条件の組み合わせの中から，1. 車載カメラで駐車枠全体が検出可能，2. 初期車両位置において車輪接地点が平坦路面上に存在する，3. 提案手法を用いて1回切

表 7.3: Configuration of the simulation.

Look-ahead distance d	0.01 m
Lateral control gain k_l	0.01
Vehicle mass M	1543 kg
Parameter variation ΔM	150 kg
Switching gain K	280
Gradient of siding surface S_1	20
Motor max torque	280 Nm
Dead zone width	25
Dead time	40 ms
Tire radius R	0.305 m
Gear ratio N	7.9
Vehicle length	4.65 m
Vehicle width	1.8 m
Wheel base L_w	2.7 m
Front overhang	0.95 m
Rear overhang	1.0 m
Boundary layer width	$3.5 \leq \delta_w(t) \leq 4.0$
Parking slot length	5.15 m
Parking slot width	2.3 m
Line width of parking slot	0.15 m

り返し軌道生成可能の3条件を満たすパラメータを抽出してシミュレーションを行う。表7.4に、これらの条件を満たす車両初期位置で検出される駐車目標位置および姿勢角の観測誤差を示す。尚、駐車枠外に停車している他車両や壁などの障害物は存在しないこととする。

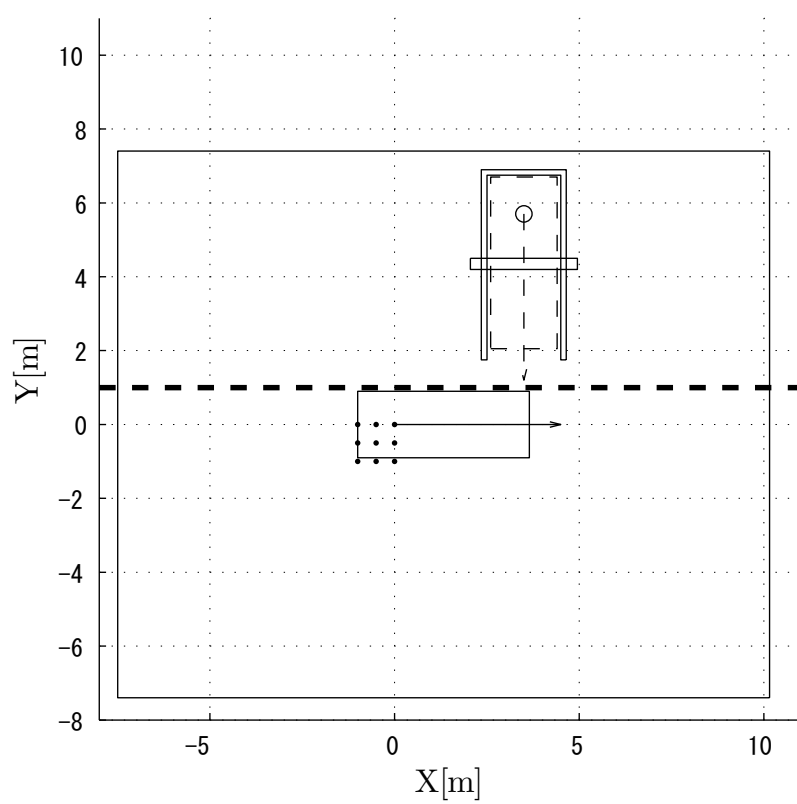


図 7.12: Simulation condition.

7.6.2 シミュレーション結果

本節では，車両初期位置 $(x, y, \theta_h) = (-0.5\text{m}, -0.5\text{m}, 0\text{deg})$ ， $y > 1$ における路面勾配 $\phi = -2\text{deg}$ に対する詳細なシミュレーション結果を示す．本研究で検討する自動駐車システムの動作は，3つの動作ステップで構成されている．それぞれの動作ステップにおいて駐車枠を検出し，滑らかに誤差修正して最終的な目標駐車位置に至る．図 7.13～図 7.15 は提案手法の3つの動作ステップを表している．ここで，図 7.13 は初期駐車位置 (Step1) における駐車枠検出結果と目標軌道を表している．また，図 7.14 は1回目の誤差修正位置 (Step2) における駐車枠検出結果と目標軌道を表している．図 7.15 は，2回目の誤差修正位置 (Step3) における駐車枠検出結果と目標軌道を表している．各図において，実線で示されたコの字の白抜き図形は真の駐車枠，破線で示されたコの字の白抜き図形は，各動作ステップの誤差修正点で観測される駐車枠を表している．また，'।' は，車両初期位置における後輪車軸中心座標，'×' は，初期位置で検出される目標駐車位置，'*' は，1回目の誤差修正点，'+ ' は，1回目の誤差修正点で検出される目標駐車位置，'✖' は，2回目の誤差修正点，'o' は，真の目標駐車位置（いずれも後輪車軸中心座標）を表している．太い実線の矩形は，各動作ステップにおける車両外形，太い一点鎖線の矩形は，各動作ステップで検出される目標駐車位置における車両外形，点線の矩形は車両初期位置および切り返し点における車両外形を表している．'◁, ▷, △, ▽' は，車載カメラ位置を表している．また，太い実線の矩形領域を中心とした大きい実線矩形領域は車載カメラを用いて駐車枠検出可能な範囲を表しており，太い破線は平坦路と勾配路の境界を表している．図 7.16 に前後方向制御における後輪車輪回転に関する参照軌道を示す．同図は4つのグラフで構成されており，上から順に後輪回転角度，角速度，角加速度，躍度を表している．ここで，破線は初期駐車位置 (Step1) で算出した切り返し経路の参照軌道である． $t = 6.1\text{s}$ までは切り返し点まで前進し，それ以降は後退して目標駐車位置に至る．実線は， $t = 11.6\text{s}$ までは初期駐車位置 (Step1) で算出した切り返し経路である．それ以降は2回目の誤差修正位置 (Step3) で算出される誤差修正された参照軌道である．ここで，1回目の誤差修正位置 (Step2) では横方向制御の参照軌道のみ修正し，前後方向制御の参照軌道は修正しないことに注意を要する．

図 7.17 に提案手法，図 7.18 に従来手法のシミュレーション結果を示す．提案手法の真の駐車目標位置 'o' に対する位置決め誤差は，X 軸方向 -0.006m ，Y 軸方向 -0.014m ，姿勢角 -0.196deg であり，精度良く目標駐車位置に車両を駐車することができていることがわかる．一方，目標駐車位置の誤差修正をすることなく，従来手法（線形状態フィー

ドバックを用いて速度制御された、前後・横方向ともに前方注視点距離を導入した厳密線形化手法)を適用した場合の真の駐車目標位置 'o' に対する位置決め誤差は、X 軸方向 -0.255m 、Y 軸方向 -0.583m 、姿勢角 -3.134deg であり、駐車枠内に駐車することができないことがわかる。ここで、従来手法の初期位置で検出される目標駐車位置 'x' に対する決め誤差は、X 軸方向 0.024m 、Y 軸方向 0.1572m 、姿勢角 -0.9420deg であることから、従来手法に比べて提案手法の位置決め精度が大幅に改善されていることがわかる。

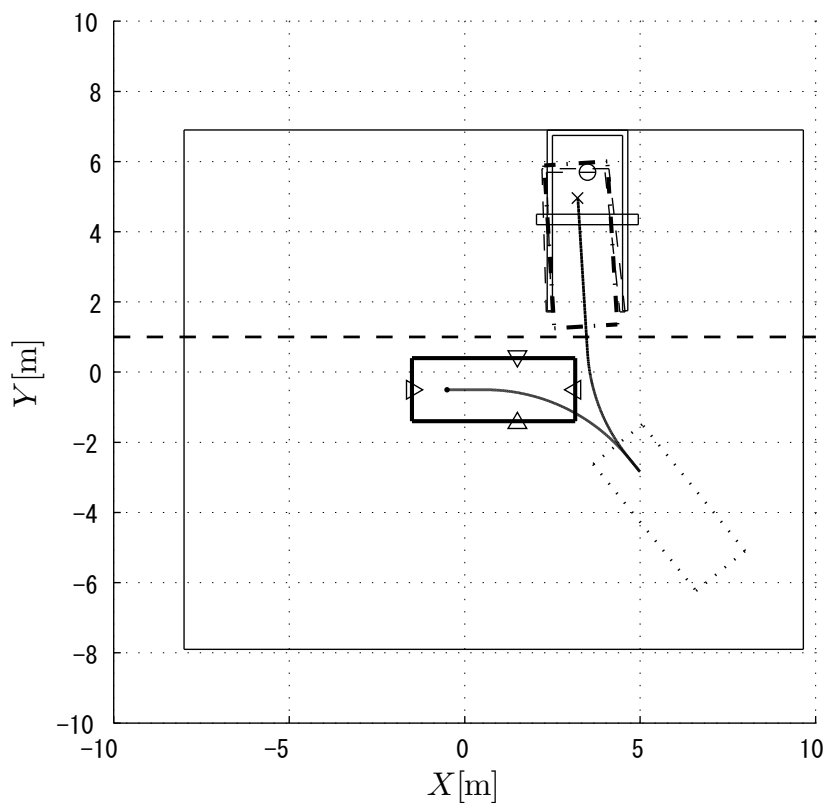


図 7.13: Operating sequence (Step1).

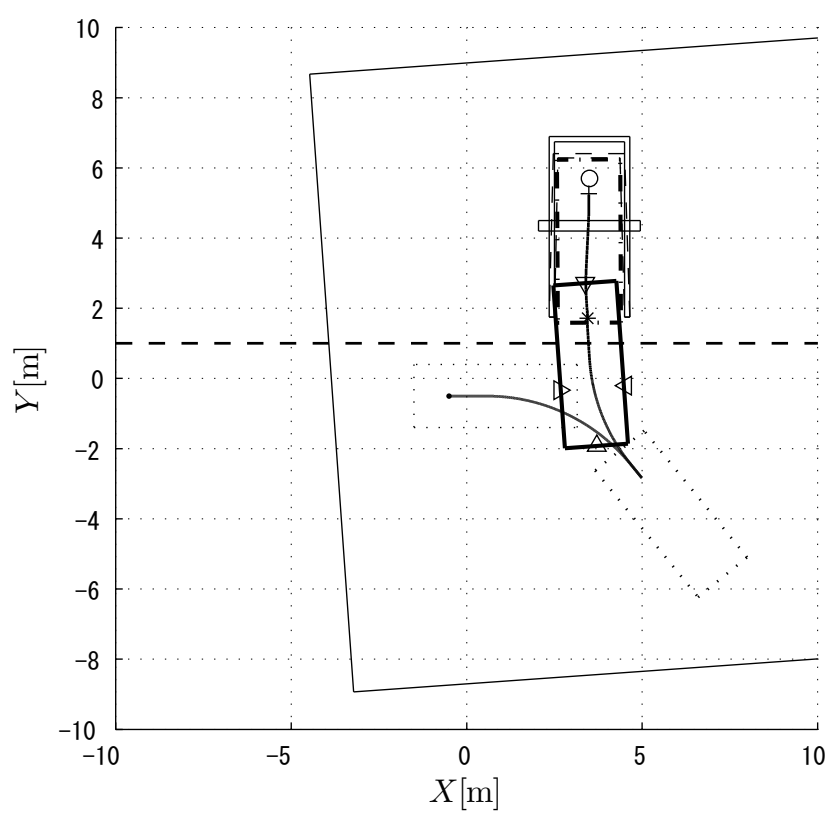


図 7.14: Operating sequence (Step2).

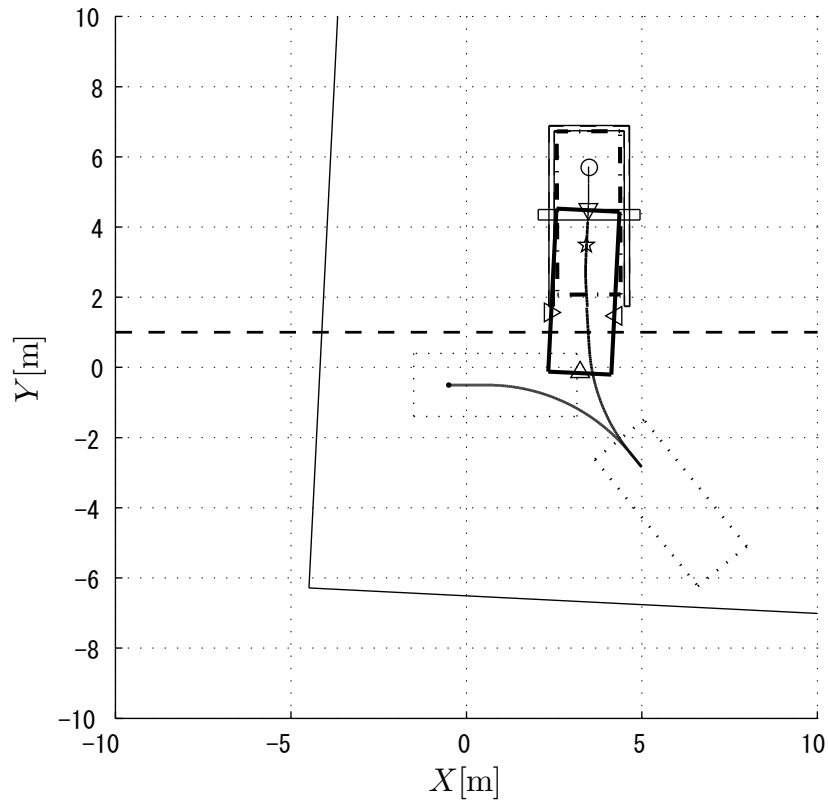


図 7.15: Operating sequence (Step3).

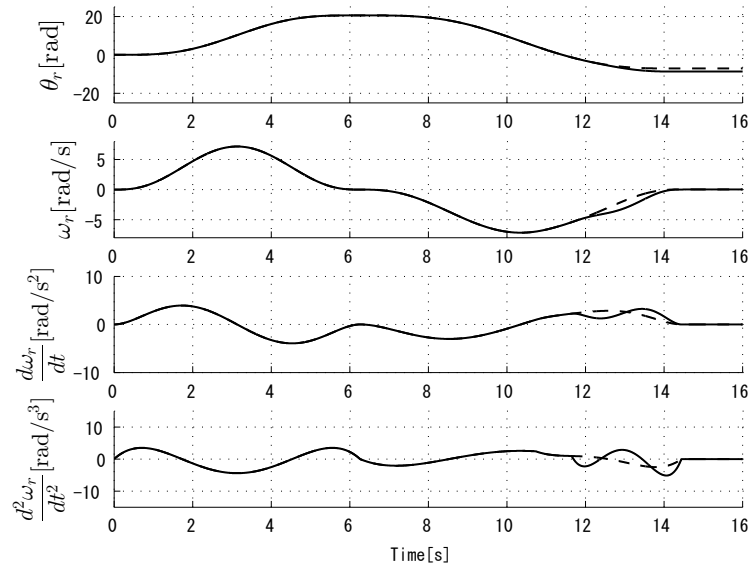


図 7.16: Error correction of the reference trajectory.

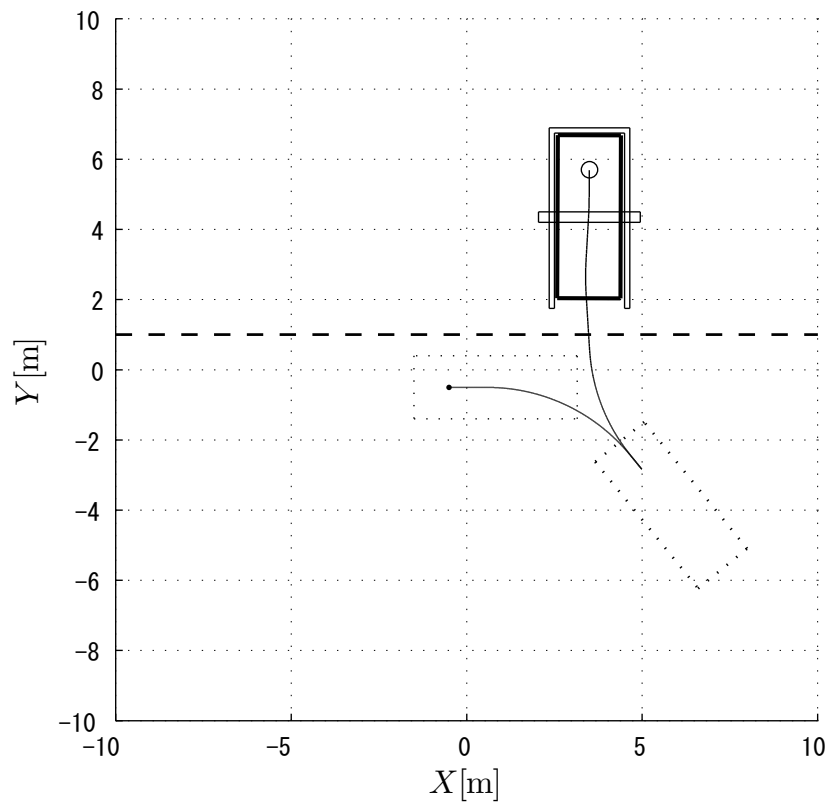


図 7.17: Trajectory of the proposed method.

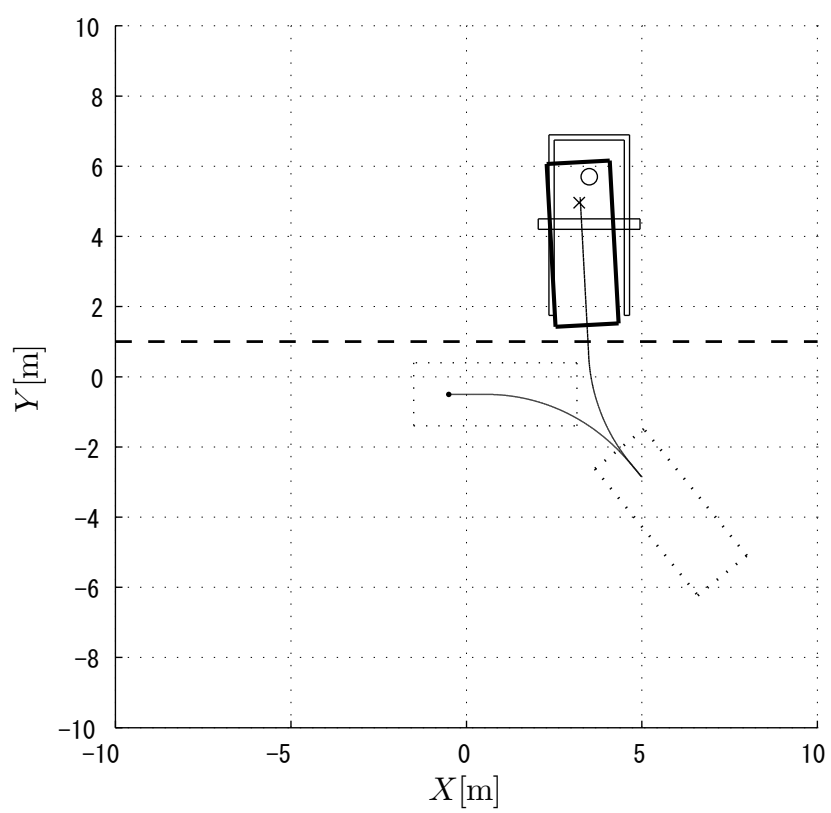


図 7.18: Trajectory of the conventional method.

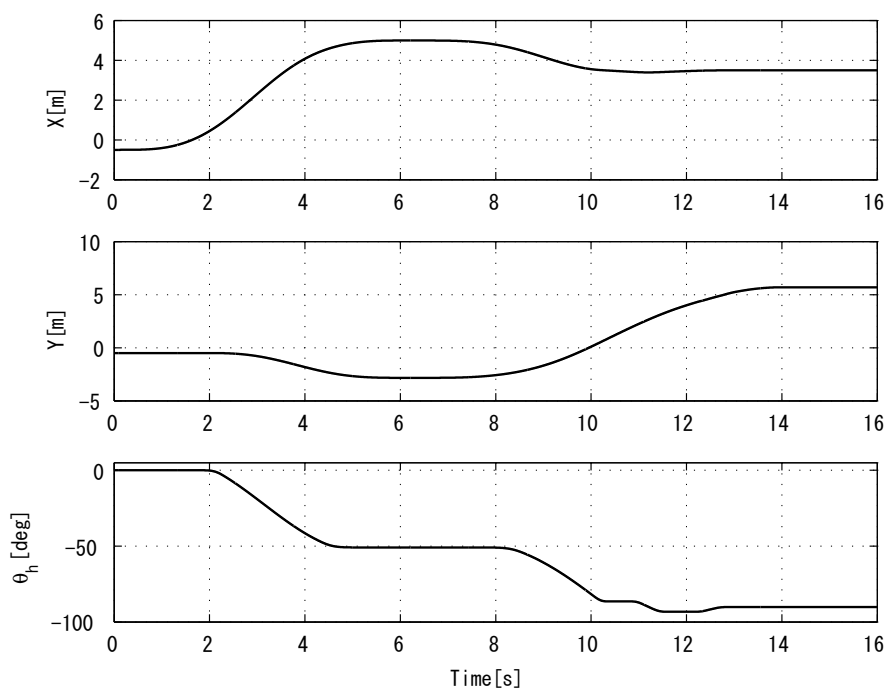


図 7.19: Lateral tracking of the proposed method.

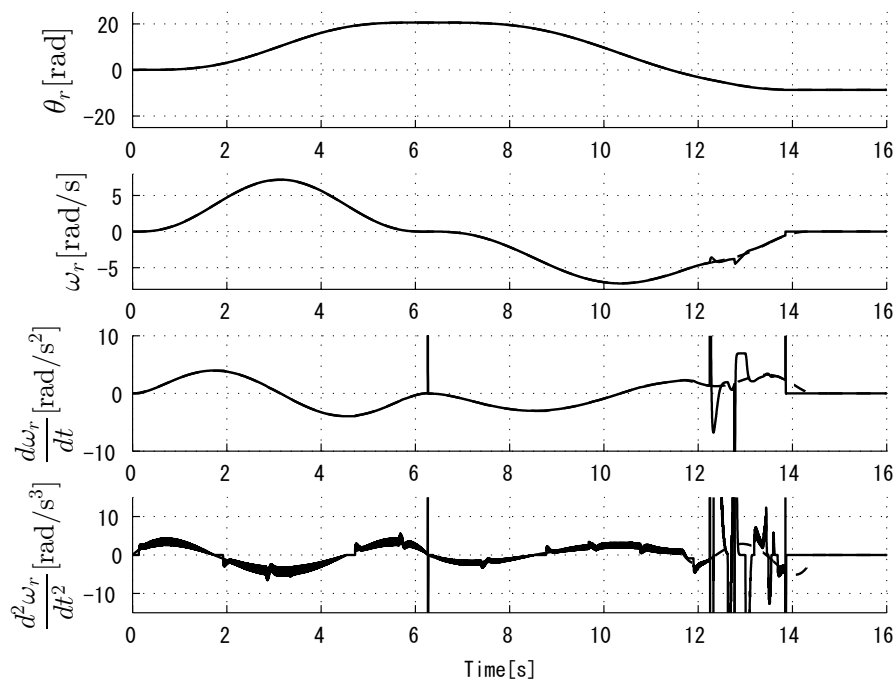


図 7.20: Longitudinal tracking of the proposed method.

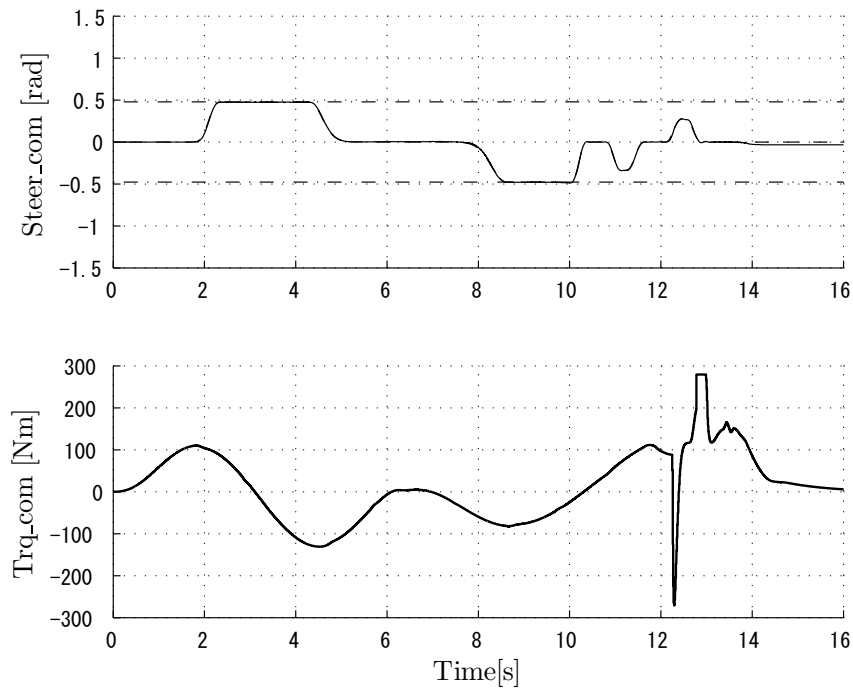


図 7.21: Control inputs of the proposed method.

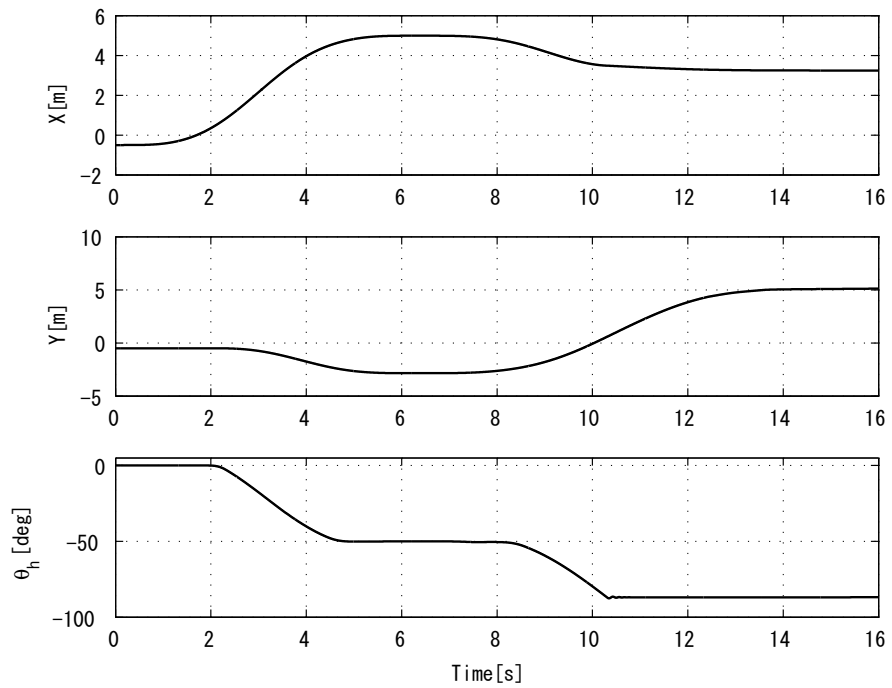


図 7.22: Lateral tracking of the conventional method.

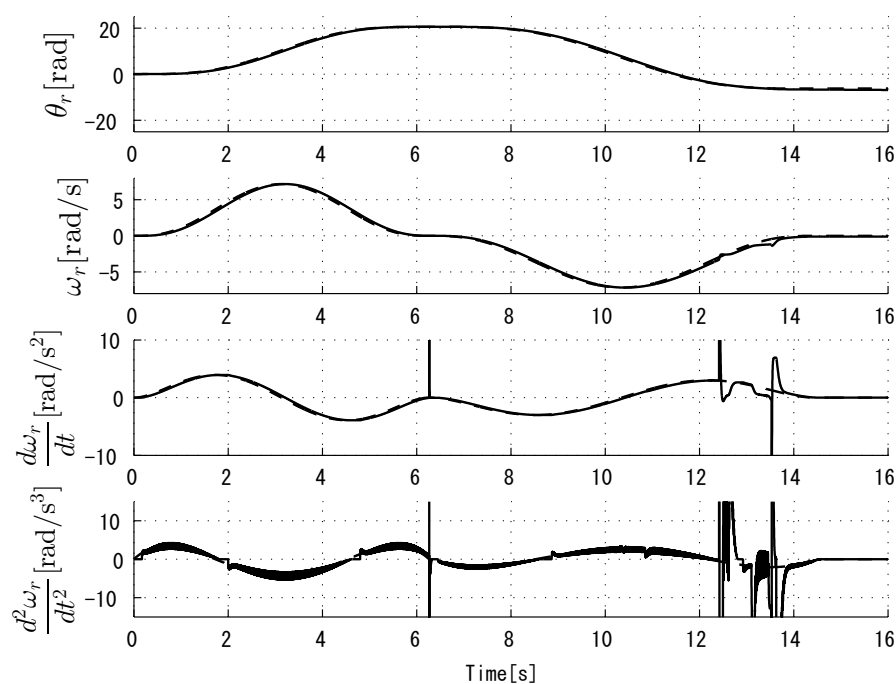


図 7.23: Longitudinal tracking of the conventional method.

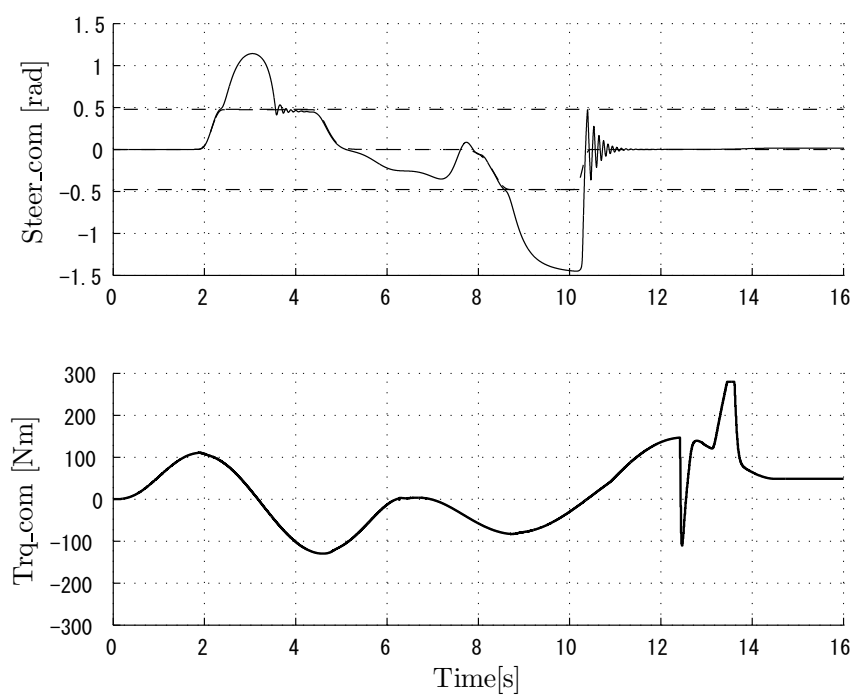


図 7.24: Control inputs of the conventional method.

表 7.4: Simulation results (measurement error).

Gradient	Initial State			Measurement error		
	ϕ [deg]	X[m]	Y[m]	θ_h [deg]	X[m]	Y[m]
-4	0	0	-6	-0.349	-1.228	-5.743
			-4	-0.356	-1.21	-5.822
			-2	-0.363	-1.192	-5.911
			2	-0.380	-1.158	-6.116
-3	0	0	-6	-0.279	-0.981	-4.290
			-4	-0.284	-0.967	-4.355
			-2	-0.29	-0.953	-4.427
			2	-0.303	-0.925	-4.593
	-0.5	0	0	-0.296	-1.038	-4.628
			2	-0.303	-1.024	-4.716
			4	-0.311	-1.010	-4.811
		0	-6	-0.378	-0.981	-5.801
			-4	-0.383	-0.967	-5.860
			-2	-0.389	-0.953	-5.926
-2	0	0	-6	-0.199	-0.700	-2.848
			1	-0.356	-1.210	-5.822
		-0.5	0	-0.211	-0.740	-3.057
			1	-0.214	-0.735	-3.088
	-0.5	0	-6	-0.2700	-0.700	-3.855
			-2	-0.277	-0.680	-3.948
			2	-0.287	-0.660	-4.061
		-0.5	0	-0.282	-0.740	-4.073
			5	-0.295	-0.716	-4.231
			10	-0.310	-0.693	-4.417
	-1.0	0	9	-0.306	-0.768	-4.456
			15	-0.326	-0.742	-4.712
		-0.5	0	-0.342	-0.695	-4.879
			3	-0.360	-0.655	-5.084
	-1.0	-0.5	0	-0.352	-0.74	-5.087
			6	-0.368	-0.711	-5.272
			12	-0.386	-0.684	-5.498
		-1.0	8	-0.374	-0.773	-5.438
			12	-0.386	-0.755	-5.595
			17	-0.404	-0.734	-5.816
2	-0.5	0	-6	0.375	0.975	3.784
			-5	0.378	0.968	3.815
			-4	0.381	0.961	3.847
			-3	0.383	0.953	3.881
		-0.5	-2	0.386	0.947	3.915
			0	0.393	0.933	3.988
			1	0.396	0.926	4.027
			0	0.393	1.031	3.92
	-1.0	0	1	0.396	1.024	3.958
			-5	0.476	0.968	4.802
			-2	0.485	0.947	4.905
			0	0.491	0.933	4.981
		-0.5	2	0.498	0.919	5.061
			0	0.491	1.031	4.896
			2	0.498	1.017	4.975
			3	0.501	1.011	5.016
		-1.0	6	0.513	0.991	5.146
			9	0.525	0.972	5.288
			8	0.521	1.076	5.151
			9	0.525	1.07	5.198

表 7.5: Simulation results (positioning error).

Gradient ϕ [deg]	Initial State			Positioning error		
	X [m]	Y [m]	θ_h [deg]	X [m]	Y [m]	θ_h [deg]
-4	0	0	-6	-0.033	-0.069	-0.634
			-4	-0.046	-0.067	-0.613
			-2	-0.058	-0.066	-0.629
			2	-0.098	-0.021	-0.609
-3	0	0	-6	0.019	-0.034	-0.498
			-4	0.013	-0.033	-0.487
			-2	0.004	-0.032	-0.455
			2	-0.018	-0.019	-0.453
	-0.5	-0.5	0	0.007	-0.031	-0.475
			2	-0.002	-0.031	-0.461
			4	0.011	-0.011	-0.442
		0	0	-0.056	-0.033	-0.331
			-4	-0.062	-0.032	-0.330
			-2	-0.073	-0.030	-0.311
-2	0	0	-6	0.001	-0.011	-0.286
			1	0.026	0.012	-0.274
		-0.5	0	-0.001	-0.012	-0.275
			1	0.003	-0.009	-0.283
	-0.5	0	-6	-0.005	-0.014	-0.211
			-2	-0.008	-0.014	-0.216
			2	-0.013	-0.011	-0.184
		-0.5	0	-0.006	-0.014	-0.196
			5	-0.013	-0.009	-0.166
			10	-0.018	-0.008	-0.134
	-1.0	-1.0	9	-0.014	-0.008	-0.142
			15	-0.031	-0.007	-0.104
		0	-5	-0.033	-0.010	-0.104
			3	-0.039	-0.006	-0.144
	-1.0	-0.5	0	-0.039	-0.011	-0.112
			6	-0.058	-0.01	-0.063
			12	-0.065	-0.006	-0.088
		-1.0	8	-0.064	-0.007	-0.036
			12	-0.076	-0.008	-0.021
			17	-0.086	-0.005	-0.031
2	-0.5	0	-6	-0.043	0.011	0.249
			-5	-0.044	0.011	0.253
			-4	-0.042	0.012	0.247
			-3	-0.051	0.013	0.254
		-0.5	0	-0.042	0.013	0.255
			0	-0.043	0.014	0.288
			1	-0.045	0.013	0.307
			0	-0.044	0.012	0.288
	-1.0	-0.5	1	-0.032	0.022	0.294
			-5	-0.044	0.015	0.584
		0	-2	-0.048	0.014	0.658
			0	-0.043	0.015	0.660
			2	-0.047	0.013	0.744
			0	-0.047	0.013	0.653
		-0.5	2	-0.047	0.016	0.694
			3	-0.047	0.014	0.712
			6	-0.044	0.015	0.757
			6	-0.047	0.015	0.846
			8	-0.047	0.015	0.782
			-1.0	9	-0.049	0.016

表 7.6: Simulation results (error statistics).

(n = 54)	Measurement error			Positioning error		
	X [m]	Y [m]	θ_h [deg]	X [m]	Y [m]	θ_h [deg]
Mean	-0.034	-0.171	-1.313	-0.034	-0.001	0.010
Variance	0.144	0.818	21.098	0.001	0.000	0.196
Standard deviation	0.379	0.904	4.593	0.027	0.022	0.443
Maximum error	0.525	1.076	5.288	0.026	0.022	0.846

表 7.5 に、先に示した全てのシミュレーション条件に対する提案手法の位置決め精度を示す。また、表 7.6 に、初期位置における目標駐車位置の計測誤差および提案手法の位置決め精度の平均、分散、標準偏差、最大誤差を示す。同表から、提案手法は、ばらつきが少なく、高精度で車両を自動駐車可能であることがわかる。

図 7.19～図 7.21 に提案手法のシミュレーション結果を示す。また、図 7.22～図 7.24 に従来手法のシミュレーション結果を示す。

図 7.19, 図 7.22 は、それぞれ先に示した図 7.17, 図 7.18 の車両後輪車軸中心座標および車両姿勢角 θ_h の時間変化を表している。また、図 7.20, 図 7.23 は、前後方向制御における後輪車輪回転の時間変化を表している。ここで、破線は参照軌道、実線は車両の実軌道を表している。図を見てわかるように、提案手法では実軌道が完全に参照軌道に追従しているのに対して、従来手法では若干遅れて追従していることがわかる。提案手法では、 $t = 10.4$ s 以降において 2 deg の下り勾配となり、 $t = 12.2 \sim 12.8$ s において、高さ 0.05 m, 幅 0.3 m の段差を乗り越えている。従来手法では、 $t = 10.5$ s 以降において 2 deg の下り勾配となり、 $t = 12.4 \sim 13.2$ s において、高さ 0.05 m, 幅 0.3 m の段差を乗り越えている。また、提案手法、従来手法共に、角加速度および躍度のグラフの $t = 6.2$ s において、インパルス状の波形が生じている。これは、切り返し点において前進後退のギア切換が原因で生じる振動である。

図 7.21, 図 7.24 は、操舵制御信号 $Steer_com$ と駆動トルク信号 Trq_com の時間変化を表している。上段の操舵制御信号のグラフにおいて、破線は参照軌道、実線は車両横方向制御器が出力する操舵制御信号である。また、一点鎖線は車両の最大転舵角である。提案手法の操舵制御信号は、参照軌道によく一致している。ここで、1 回目の誤差修正位置 (Step2) $t = 10.7$ s において、目標駐車位置が修正され、修正操舵が付加されていることがわかる。尚、誤差修正しない場合は、 $t = 10.7$ s 以降の参照軌道の値は 0 となる。これに対して、従来手法では、先に示した速度指令値に対する追従誤差が原因で操舵指令値が

参照軌道から大きく外れたり、激しい振動が生じている。

下段の駆動トルク信号のグラフでは、提案手法、従来手法共に、約 $t = 6.2$ [s] までは車両が前進しており、それ以降は後退しているため、これを境に制御信号の符号が反転している。また、 $t = 12.5 \sim 14$ s において、符号の異なるスパイク状の波形が、1回ずつ発生している。これは、このタイミングで段差を上り下りしており、この影響を抑止する制御指令が発生しているためである。

7.6.3 CarSim によるシミュレーション結果

米国 Mechanical Simulation 社製 CarSim は 27 自由度のフルビークル動力学モデルと非線形タイヤモデル、路面形状などが詳細にモデル化されている市販の車両運動シミュレーション環境である。本研究では、提案手法の実車適用性を検証するために CarSim9.0 を用いて、先に示したシミュレーションと同じ条件を構築してシミュレーションを行った。尚、 $d = 0.1, k_l = 0.001$ と設定した。その他の条件は先に示したシミュレーション条件と同じである。図 7.25～図 7.28 にシミュレーション結果を示す。位置決め誤差は $X_{err} = 0.08m, Y_{err} = 0.06m, \theta_{err} = 1.3deg$ であった。ここで、コントローラ設計においてモデル化されていない操舵系の非線形性と不感帯が原因と思われる操舵系応答の遅れが生じているのが誤差の原因と考えられる。また、図 7.29～図 7.33 に CarSim シミュレーション結果のアニメーションの様子を示す。図を見てわかるようにフルビークルモデルを用いたシミュレーションにおいても提案手法の有効性が示せた。

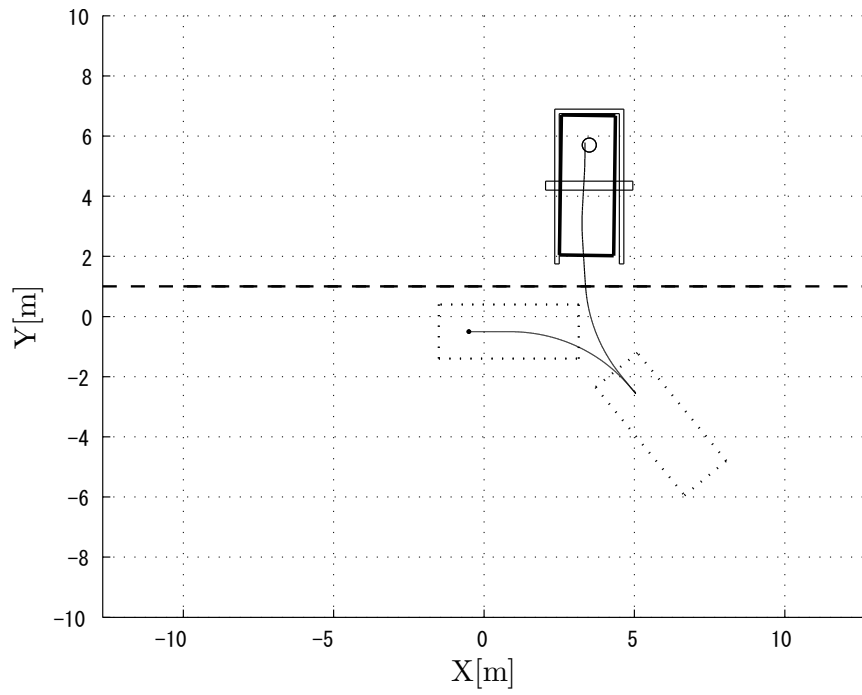


図 7.25: Control inputs of the proposed method.

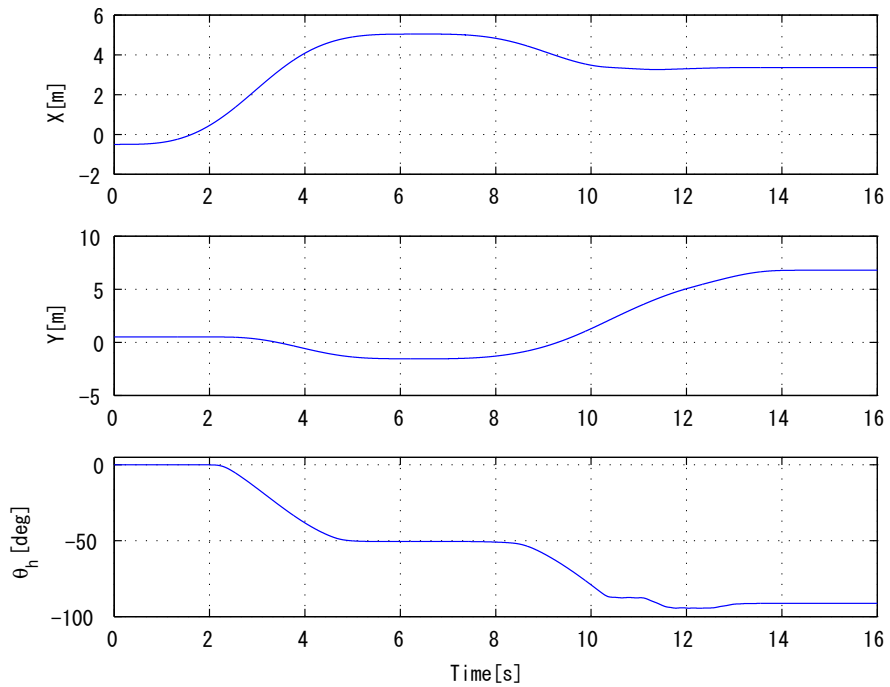


図 7.26: Lateral tracking of the conventional method.

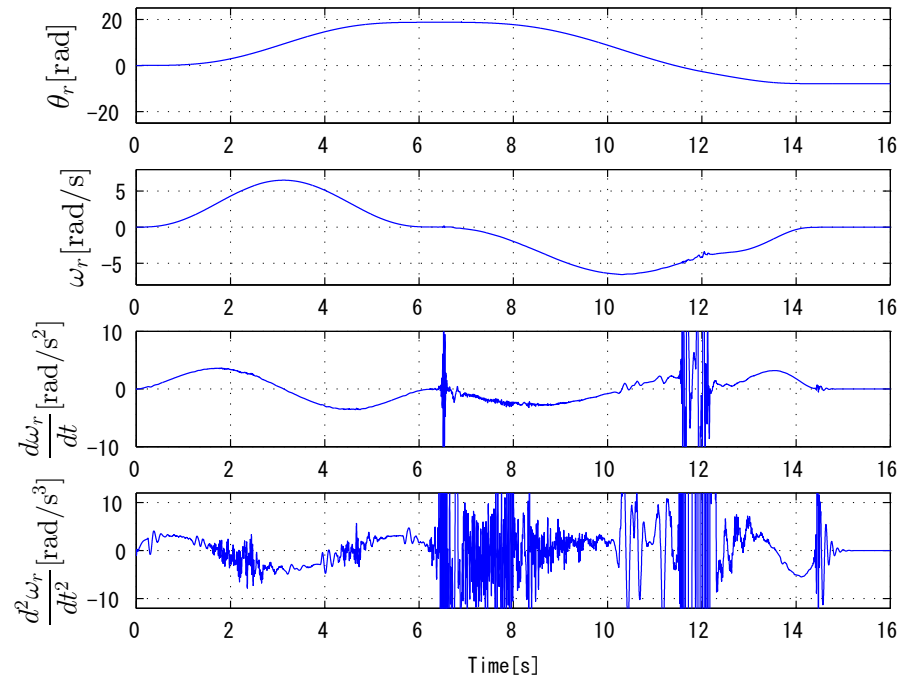


図 7.27: Longitudinal tracking of the conventional method.

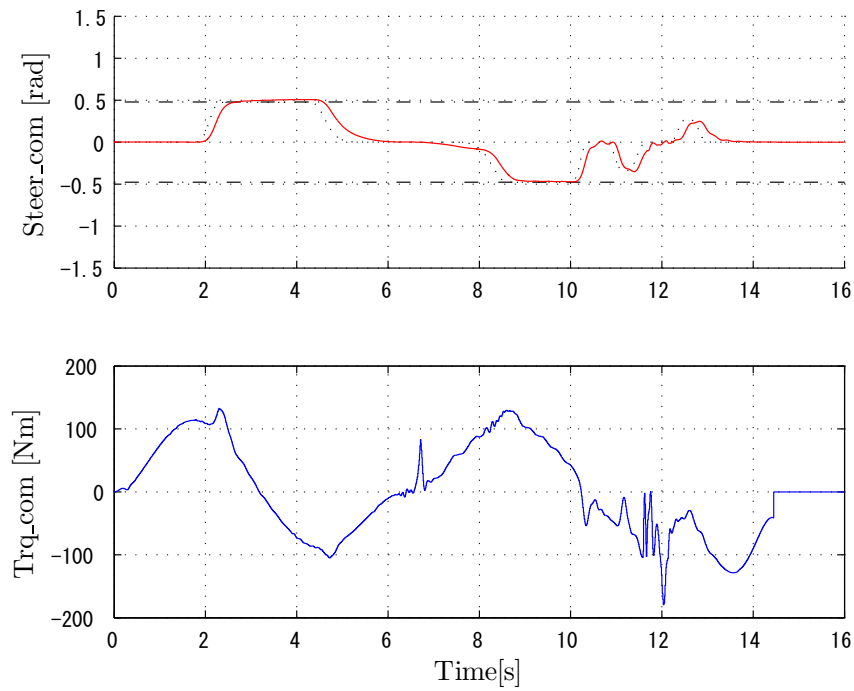


図 7.28: Control inputs of the conventional method.

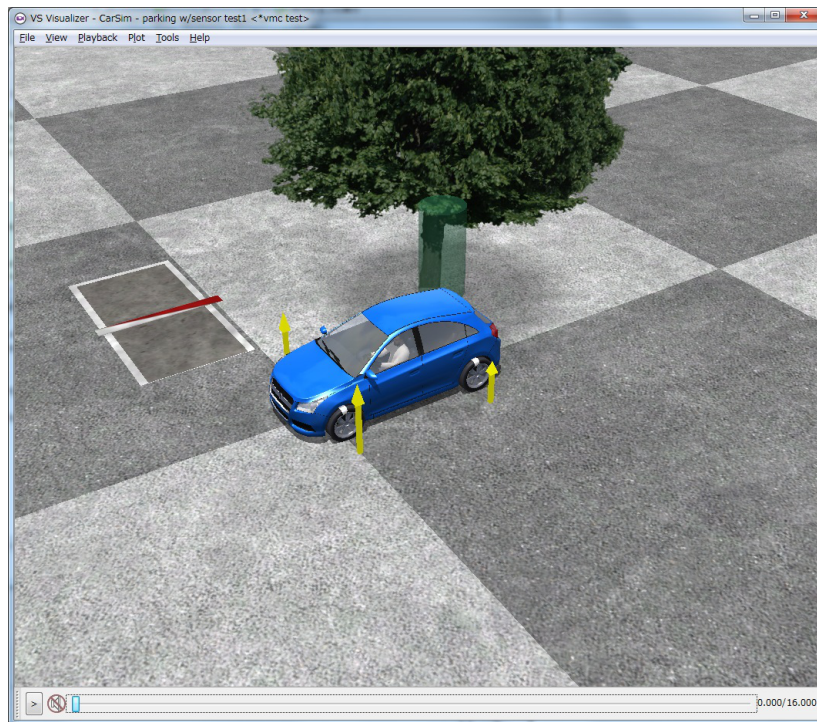


図 7.29: CarSim によるシミュレーション結果 (t=0)

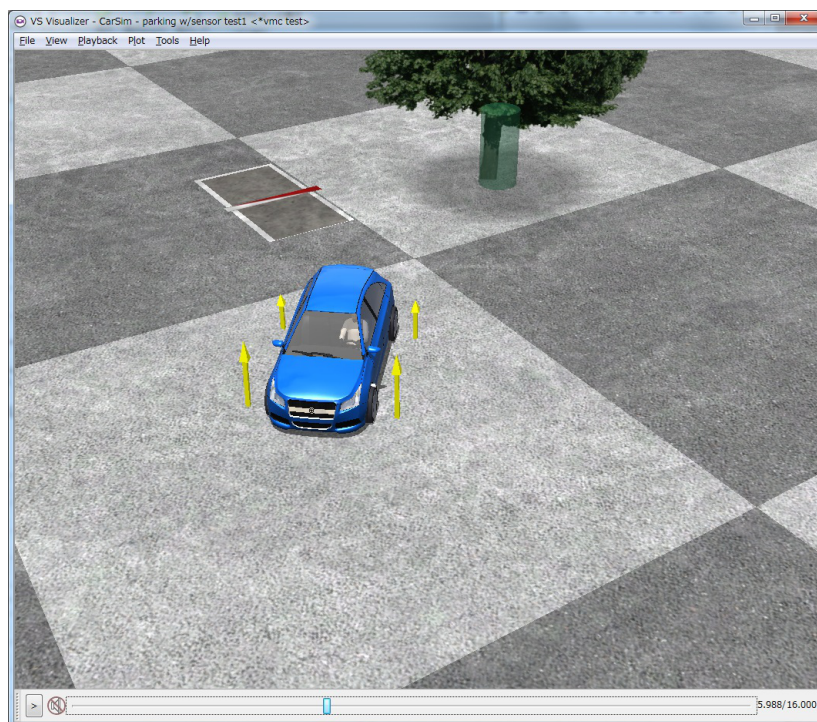


図 7.30: CarSim によるシミュレーション結果 (t=5.988)

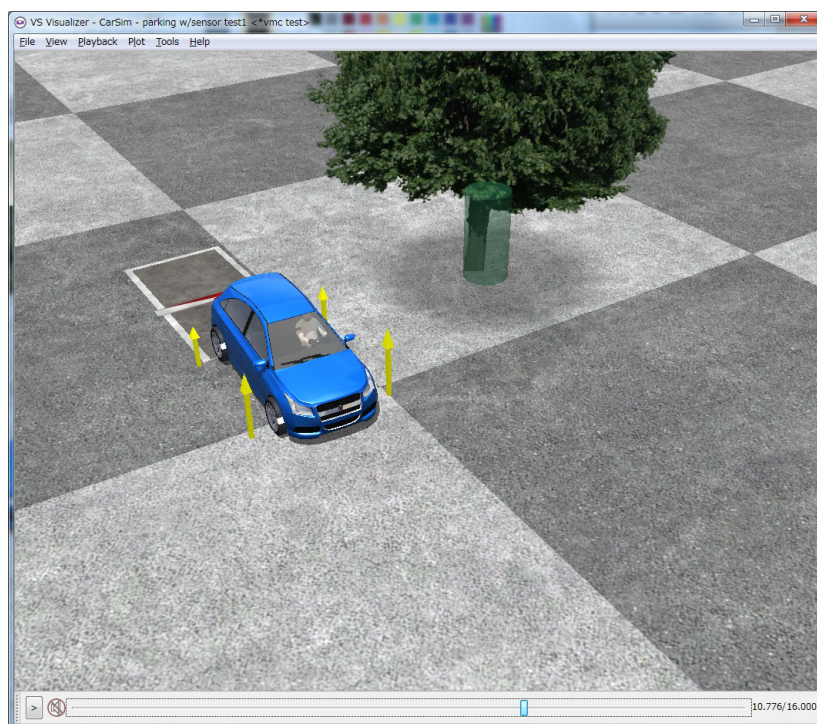


図 7.31: CarSim によるシミュレーション結果 (t=10.776)

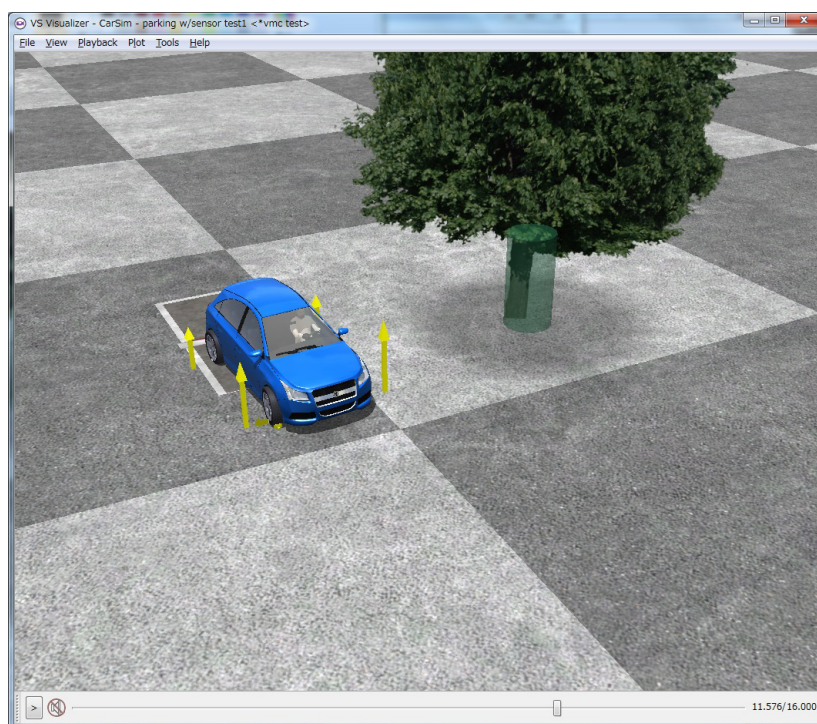


図 7.32: CarSim によるシミュレーション結果 (t=11.576)

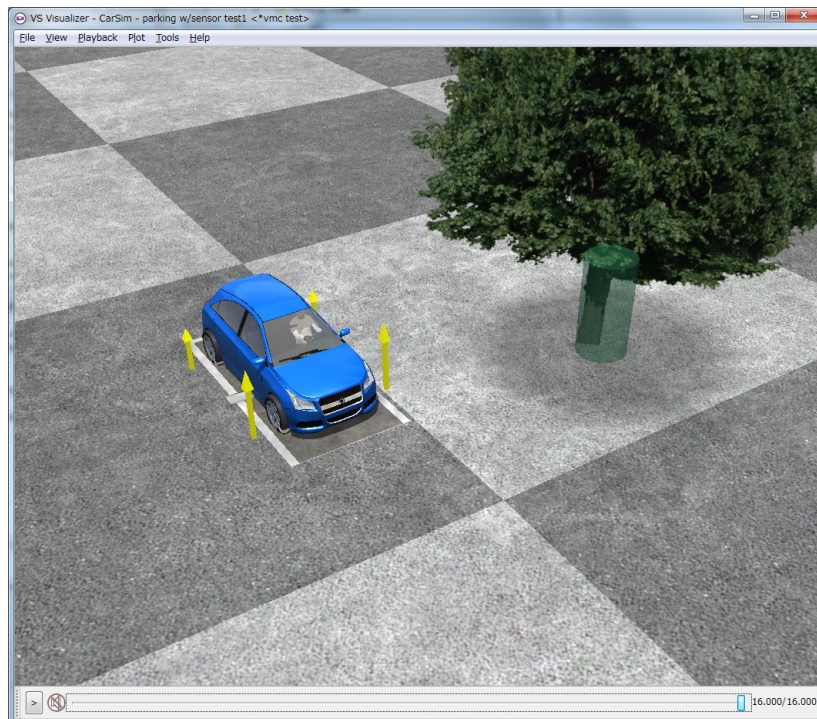


図 7.33: CarSim によるシミュレーション結果 (t=16)

7.7 おわりに

本章では，車両初期位置において車載カメラを用いて駐車枠を認識し，1回の切り返しで並列駐車を行う自動駐車システムについて検討した．ここで，駐車開始位置から目標駐車位置に至る目標軌道に沿って走行するための車両横方向制御則として前方注視点距離を導入した厳密線形化手法に基づいた手法を適用した．また，車両前後方向制御に筆者らが提案した路面外乱に対してロバストな車両前後方向の位置決め制御手法を適用して統合することにより，路面外乱に対してロバストな自動駐車システムを構築した．さらに，駐車目標位置検出誤差を考慮し，車両位置決め制御における参照軌道を走行中に滑らかに修正する手法を適用した．

路面勾配や段差を含む並列駐車シーンをケーススタディとして自動駐車システムのシミュレーションを行い，提案手法の有効性を示した．本研究で提案した手法を適用することにより，従来手法では適用が困難であったコインパーキングにおけるフラップ式ロック装置や，歩道に隣接する駐車場などで歩道の段差，路面勾配などの路面外乱が存在する駐車シーンへの自動駐車システムの適用範囲拡大が期待できる．

今後は，本研究で提案した手法に基づき，狭い駐車場における壁や，駐車枠外に存在する他の駐車車両などの障害物を考慮した複数切り返し軌道生成問題，周囲に歩行者などの移動物体を検出した場合について検討する予定である．

第8章

結論

本研究では，現在深刻な社会問題となっている交通事故および環境負荷を低減することを目的として，電気自動車への適用を想定した「不確かさに対するロバスト性を保ちつつ滑らかに素早く省エネルギーで車両を制御する手法」を構築し，自動運転技術の適用範囲拡大を図った．この際，パラメータ変動や外乱，モデル化誤差などの不確かさに対してロバスト性が高い非線形制御手法として良く知られているスライディングモード制御を適用した．スライディングモード制御には，チャタリングと呼ばれる高周波振動問題や，初期状態が切換超平面上に存在しない場合に，初期状態からスライディングモードに至るまでの期間（到達モード）においてロバスト性が保証されないという問題がある．そのため，これらの問題がスライディングモード制御の実システム適用の阻害要因となっていた．また，参照軌道に沿って動作するサーボ系において，途中で参照軌道を変更する必要が生じた場合，滑らかに参照軌道を変更することは困難であった．

本論文では，これらの問題を解決するために，次に示す3つの手法を提案した．

- (i) 境界層幅適応則の提案
- (ii) 非線形切換面および滑らかな参照軌道に沿って変化する線形時変切換面の提案
- (iii) 参照軌道の誤差修正手法の提案

本論文を通じて得られた結果を以下にまとめる．

第1章では，本論文の位置づけと社会的意義および研究の技術的な背景と目的を述べた．

第2章では，本研究で扱う制御対象と制御器の構成を説明した．本研究では制御対象に1入力1出力の2次正準形で表されるシステムを扱った．ここで，滑らかな参照軌道に沿って動作するモデル追従制御系を構成した．

第 3 章では、位置決め制御のための滑らかな参照軌道を紹介した。張らが提案した滑らかな参照軌道を用いた位置決め制御において、目標位置に至る任意の時刻で、目標位置を滑らかに修正する方法を提案した。ここで、位置決め制御のための滑らかな軌道を導出する最適化問題を、任意の初期条件と終端条件に拡張し、任意の初期状態から任意の終端状態に至る滑らかな軌道を導出した。数値シミュレーションを通して、位置決め制御中に当初の目標位置を修正する必要が生じた場合に、滑らかさを損なうことなく参照軌道を修正できることを示した。今後は、参照軌道の速度プロファイルが単峰性となる条件を解析的に導出するとともに、目標到達時間を延長・短縮した場合に対する解析も検討する予定である。また、スライディングモード制御のための滑らかな切換面の生成において、オーバーダンピング特性となる初期条件を解析的に導出する予定である。

第 4 章では、非線形切換面と、滑らかな参照軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を提案した。非線形切換面として楕円切換面と Lemniscate 切換面を提案し、非線形切換面を持つスライディングモード制御則を導出し、その安定性を示した。与えられた条件の下で、提案した楕円切換面を用いた手法が、従来の線形時不変切換面を用いた手法に比べて誤差収束時間を約 26% 低減し、さらにエネルギー消費量を半減できることを数値シミュレーションを通して示した。また、第 3 章で紹介した滑らかな参照軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を持つスライディングモード制御則を導出し、その安定性を示した。提案した線形時変切換面を持つスライディングモード制御手法では、線形切換面の傾きと切片を調整することにより、滑らかな軌道に沿った誤差収束特性を実現した。一般に位相平面上のトラジェクトリーは時計回りに発展する。そのため、位相平面上で第 1 象限から第 4 象限に至る瞬間と、第 3 象限から第 2 象限に至る瞬間において切換面の傾きが無限大となる。線形切換面の傾きは 1 次遅れ系で表される誤差追従特性の時定数を表しているため、象限をまたぐ瞬間に無限大の制御ゲインが必要となり所望のトラジェクトリーに追従できないという問題が発生する。以上の理由から、本手法は第 2, 第 4 象限でのみ有効であり、これらの象限に至るまでは他の切換面を用いた手法を用いなくてはならないという課題がある。また、一般に誤差追従特性に対する要求としてオーバーダンピング特性が求められることが多い。現状では、誤差の初期条件に対してオーバーダンピング特性を保つような条件を満たすために、平衡点を通る楕円もしくは Lemniscate に基づくトラジェクトリーを算出し、この状態量に基づき初期状態を算出している。今後は、複数の象限をまたぐトラジェクトリーの検討とオーバーダンピング特性が実現できる状態量の組み合わせや、その範囲を解析する予定である。

第 5 章では、スライディングモード制御の最大の欠点であるチャタリング現象を抑止するために、境界層の幅を調整する手法を提案した。提案手法を不確かさを含む 2 次システム

に対して、モデル追従スライディングモード制御によるサーボ問題に適用し、シミュレーションを行った。提案手法と、従来手法の制御性能を比較し、提案手法の有効性を示した。数値シミュレーションにより、提案手法はスライディングモード制御の特長である不確かさに対するロバスト性を犠牲にすることなく、従来の線形切換面を用いるスライディングモード制御に比べて、より素早く、滑らかに、省エネルギーで制御できることを示した。

第6章では、車間制御に楕円切換面をもつスライディングモード制御と境界層幅適応則を適用した。ACCシステム動作中に先行車と自車間に他車両が割り込むシーンを用いたシミュレーションを行い、提案手法の有効性を検証した。提案手法は線形時不変切換面と一定の境界層を適用した従来手法と同等の誤差追従特性を実現しつつ、従来手法に比べて滑らかに省エネルギーで動作するACCシステムを実現可能であることを示した。理論的には楕円切換面を用いた手法は到達モードを完全に除去できる。しかしながら、本研究のシミュレーションでは、モータトルクの制限値が原因で到達モードを完全に除去されなかった。また、本研究では、線形時不変切換面を持つ従来手法の収束時間に基づいてあらかじめ楕円切換面のパラメータを決定した。相対加速度はレーダーにより観測される先行車との車間距離および相対速度からカルマンフィルタを用いて推定可能である。これにより、状況に応じて適切な楕円切換面を設計可能と考える。今後の課題として、相対加速度を推定して適応的に楕円切換面を設計する手法の検討が挙げられる。

第7章では、車両初期位置において車載カメラを用いて駐車枠を認識し、1回の切り返しで並列駐車を行う自動駐車システムについて検討した。ここで、駐車開始位置から目標駐車位置に至る目標軌道に沿って走行するための車両横方向制御則として前方注視点距離を導入した厳密線形化手法に基づいた手法を適用した。また、車両前後方向制御に筆者らが提案した路面外乱に対してロバストな車両前後方向の位置決め制御手法を適用して統合することにより、路面外乱に対してロバストな自動駐車システムを構築した。さらに、駐車目標位置検出誤差を考慮し、車両位置決め制御における参照軌道を走行中に滑らかに修正する手法を適用した。路面勾配や段差を含む並列駐車シーンをケーススタディとして自動駐車システムのシミュレーションを行い、提案手法の有効性を示した。本研究で提案した手法を適用することにより、従来手法では適用が困難であったコインパーキングにおけるフラップ式ロック装置や、歩道に隣接する駐車場などで歩道の段差、路面勾配などの路面外乱が存在する駐車シーンへの自動駐車システムの適用範囲拡大が期待できる。今後は、本研究で提案した手法に基づき、狭い駐車場における壁や、駐車枠外に存在する他の駐車車両などの障害物を考慮した複数切り返し軌道生成問題、周囲に歩行者などの移動物体を検出した場合について検討する予定である。

本研究では、自動運転システムの適用範囲の拡大を目指し、乗り心地や制御性能を犠牲

にすることなく様々な不確かさに対してロバストな制御系を構築し、自動運転技術に適用した。本研究により得られた結果を用いることにより自動運転システムの普及が促進され、現在深刻な社会問題となっている交通事故および環境負荷が低減することが期待できる。

参考文献

- [1] B. Chang and Y. Hori. High speed positioning trajectory design for tdof controller of hard disk drives with mechanical vibration. The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC' 04), pp. 317–322, 2004.
- [2] 一般社団法人日本自動車工業会 (Japan Automobile Manufacturers Association) . <http://www.jama.or.jp/world/world/index.html>.
- [3] 独立行政法人環境再生保全機構 (Environmental Restoration, Conservation Agency) . <http://www.erca.go.jp/yobou/taiki/siryou/siryoukan/>.
- [4] 平成 28 年版交通安全白書 第 1 章 道路交通事故の動向. White paper, 内閣府, 2016.
- [5] 交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査報告書 technical note 国総研資料 第 135 号. White paper, 国土交通省 国土技術総合研究所内閣府政策統括官 (共生社会政策担当) , 3 月 2012.
- [6] J.R.Treat, N.S.Tumbas, S.T.McDonald, D.Shinar, R.D.Hume, R.E.Mayer, R.L.Stansifer, and N.J.Castellan. Tri-level study of the causes of traffic accidents: final report. executive summary. *National Highway Traffic Safety Administration report*, May 1979.
- [7] National Highway Traffic Safety Administration. Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey. *TRAFFIC SAFETY FACTS Crash Stats*, February 2015.
- [8] 道路空間高度化研究室. 国土技術政策総合研究所資料 高齢者の運転特性に関する研究 technical note 国総研資料 第 135 号. White paper, 国土交通省 国土技術総合研究所, November 2003.
- [9] 平成 27 年版高齢社会白書 高齢化の状況. White paper, 内閣府, June 2015.
- [10] 平成 27 年度環境白書 第 2 部各分野の施策等に関する報告. White paper, 環境省, 2015.

-
- [11] 国土交通省ホームページ（運輸部門における二酸化炭素排出量）. White paper, 国土交通省.
- [12] 平成 21 年度 ヒートアイランド現象による環境影響等に関する調査業務報告書. White paper, 内閣府, 2009.
- [13] G. Valenzuela, T. Kawabe, and M. Mukai. Nonlinear model predictive control of battery electric vehicle with slope information. In *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, pp. 1–5, Dec 2014.
- [14] H. Yoshida and H. Fujimoto. Range extension autonomous driving for electric vehicles based on optimal velocity trajectory considering road gradient information. In *IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control 2015*, pp. 1–6, 2015.
- [15] 徳田大誠, 鈴木理基, 神田翔平, 重野寛. 隊列走行のための車両接近方法及び隊列形成可否を考慮した速度決定アルゴリズムの提案. 2011-its-45(2), 研究報告 高度交通システム (ITS), 2011.
- [16] 加藤晋, 津川定之. エコドライブ車両における制御情報の後続車両への提示について : 内容やタイミングに対する基礎検討 (its 画像処理, 映像メディア, 視覚及び一般). White paper, 電子情報通信学会技術研究報告. IE, 画像工学 110(421), 2009.
- [17] R. Okuda, Y. Kajiwara, and K. Terashima. A survey of technical trend of adas and autonomous driving. In *Proceedings of Technical Program - 2014 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Application (VLSI-TSA)*, pp. 1–4, April 2014.
- [18] A. Khodayari, A. Ghaffari, S. Ameli, and J. Flahatgar. A historical review on lateral and longitudinal control of autonomous vehicle motions. In *Mechanical and Electrical Technology (ICMET), 2010 2nd International Conference on*, pp. 421–429, Sept 2010.
- [19] B. Paden, M. Čáp, S. Z. Yong, D. Yershov, and E. Frazzoli. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Vol. 1, No. 1, pp. 33–55, March 2016.
- [20] M. Worner, F. Schuster, F. Dolitzscher, C. G. Keller, M. Haueis, and K. Dietmayer. Integrity for autonomous driving: A survey. In *2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, pp. 666–671, April 2016.
- [21] Preliminary statement of policy concerning automated vehicles. White paper, U.S. Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration, June 2013.
- [22] 里中久志, 岩田洋一, 岩切英之, 岩崎克彦, 遠藤知彦, 田中優. 自動操舵後退駐車支援システム. 計測と制御 Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 45, No. 3, pp. 227–230, mar 2006.

- [23] クアン ダオミン, 劉康志, 大形明弘. 4 輪車自動駐車システムの開発: 理論と実験. 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 12, pp. 1211–1219, dec 2004.
- [24] クアン ダオミン, 井上拓哉, 劉康志. 自動車の自動駐車技術の実用化に関する研究. 計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 7, pp. 765–774, jul 2006.
- [25] 宮原陽洋, 小林康秀, 塩谷弦, 疋田真一, 齋藤充行, 小野貴彦. 車載レンジファインダによる車両に認識と自動駐車システムの開発. 自動車技術会論文集, 第 40 巻, pp. 973–978, 2009.
- [26] 大川一也, 藻垣彰人. 離散的な獲得データに基づく自動駐車のための経路計画と連続した動作の実現. 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 4, pp. 376–383, may 2011.
- [27] 大川一也. Ga を用いた自動駐車・自動着岸システム: 機械学習の移動体制御への応用. 電気学会誌 = The journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 133, No. 6, pp. 348–351, jun 2013.
- [28] 能登紀泰, 奥田裕之, 田崎勇一, 鈴木達也, 早川聡一郎, 三田誠一, 片山正昭, 大日方五郎. 排他機構を組み込んだコンセンサス制御による協調的自動駐車システム. 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 11, pp. 986–993, 2013.
- [29] 藤森篤. ロバスト制御. コロナ社, 2001.
- [30] 安達和孝, 金井喜美雄, 越智徳昌. 車間距離制御システムへの二自由度制御手法の応用. 計測と制御 = Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 44, No. 7, pp. 504–509, jul 2005.
- [31] 熊本博光, 坂元一郎, 天目健二, 下浦弘. スライディングモードによる自動車の縦方向制御. 計測自動制御学会論文集, Vol. 34, No. 7, pp. 734–740, 1998.
- [32] Xiao-Yun Lu, J. K. Hedrick, and M. Drew. Acc/cacc-control design, stability and robust performance. In *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No. CH37301)*, Vol. 6, pp. 4327–4332 vol.6, May 2002.
- [33] A. Ferrara and P. Pisu. Minimum sensor second-order sliding mode longitudinal control of passenger vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 5, No. 1, pp. 20–32, March 2004.
- [34] A. Ferrara and C. Vecchio. Low vibration vehicle traction control to solve fastest acceleration/deceleration problems via second order sliding modes. In *2007 American Control Conference*, pp. 5236–5241, July 2007.
- [35] Zhigang Li and Aijuan Song. Sliding mode control based on tracking differentiator for intelligent vehicle headway distance control. In *Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009. ICIS 2009. IEEE International Conference on*, Vol. 2, pp. 489–493, Nov

- 2009.
- [36] B. Ganji, A. Z. Kouzani, S. Y. Khoo, and M. Nasir. A sliding-mode-control-based adaptive cruise controller. In *11th IEEE International Conference on Control Automation (ICCA)*, pp. 394–397, June 2014.
- [37] 吉田和夫, 野波健蔵, 小池裕二, 横山誠, 西村秀和, 平田光男, 大川一也, 高橋正樹, 藤井飛光. 運動と振動の制御の最前線 機械工学最前線 1 日本機械学会編. 共立出版, 2007.
- [38] U. Itkis. *Control System of Variable Structure*. John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [39] V. I. Utkin and A. Parnakh. *Sliding Modes and Their Applications in Variable Structure Systems*. MIR Publishers, 1978.
- [40] ジョン・L・ヘネシー, デイビッド・A・パターソン. ヘネシー & パターソンコンピュータアーキテクチャ定量的アプローチ第5版. 翔泳社, 2015.
- [41] 児玉祐悦. 知識ベース知識の森6群1編3章. 電子情報通信学会, April 2010.
- [42] 野波健蔵, 田宏奇. スライディングモード制御. コロナ社, 2007.
- [43] V. Utkin, J. Guldner, and J. Shi. *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems*. CRC Press, second edition edition, 2009.
- [44] F. Plestan, Y. Shtessel, V. Bregeault, and A. Poznyak. New methodologies for adaptive sliding mode control. *International Journal of Control*, Vol. 83, No. 9, pp. 1907–1919, 2010.
- [45] 陳芸峰, 美多勉. 適応ロバースライディングモード制御. 電気学会論文誌, Vol. 113, No. 3, pp. 103–210, 1993.
- [46] J. J. E. Slotine and W. Li. *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall, 1991.
- [47] Min-Shin Chen, Yean-Ren Hwang, and M. Tomizuka. A state-dependent boundary layer design for sliding mode control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 47, No. 10, pp. 1677–1681, Oct 2002.
- [48] P. Kachroo and M. Tomizuka. Chattering reduction and error convergence in the sliding-mode control of a class of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 41, No. 7, pp. 1063–1068, Jul 1996.
- [49] Agamemnon Crassidis and Raul Mittmann Reis. Model-free sliding mode control method. Proceedings of the 3rd International Conference on Control, Dynamic Systems, and Robotics (CDSR' 16), No. 100, Ottawa, Canada, May 2016.
- [50] Hong-Ming Chen, Jyh-Chyang Renn, and Juhng Perng Su. Sliding mode control with varying boundary layers for an electro-hydraulic position servo system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 117–123, July

- 2005.
- [51] Chyun-Chau Fuh. Variable-thickness boundary layers for sliding mode control. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 288–294, 2008.
- [52] J. Zhu and K. Khayati. Adaptive sliding mode control with smooth switching gain. In *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2014 IEEE 27th Canadian Conference on*, pp. 1–6, May 2014.
- [53] W. Yong-Chao, C. Ya-Long, C. Li-Jia, C. Guang-Bin, and H. Xiao-Xiang. Fuzzy boundary layer adaptive sliding mode controller design for a hypersonic vehicle based on tangent reaching law. In *Mechatronics and Control (ICMC), 2014 International Conference on*, pp. 164–169, July 2014.
- [54] D. S. Yoo. Integral sliding mode control with adaptive boundary of nonlinearities for robot manipulators. In *ICCAS-SICE, 2009*, pp. 5184–5186, Aug 2009.
- [55] J. Zhu and K. Khayati. New algorithms of adaptive switching gain for sliding mode control: Part ii - real case. In *Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2014 International Conference on*, pp. 447–452, Nov 2014.
- [56] B. W. Bekit, J. F. Whidborne, and L. D. Seneviratne. Sliding mode control for robot manipulators using time-varying switching gain and boundary layer. In *Control '98. UKACC International Conference on (Conf. Publ. No. 455)*, pp. 1198–1203 vol.2, Sep 1998.
- [57] Z. Has, M. F. Rahmat, A. R. Husain, and R. Ghazali. Sliding mode control with switching-gain adaptation based-disturbance observer applied to an electro-hydraulic actuator system. In *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 668–673, June 2013.
- [58] M. C. Pai and A. Sinha. Sliding mode output feedback control of time-varying mismatched uncertain systems. In *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 1355–1360, Oct 2006.
- [59] C. L. Hwang. Sliding mode control using time-varying switching gain and boundary layer for electrohydraulic position and differential pressure control. *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, Vol. 143, No. 4, pp. 325–332, Jul 1996.
- [60] S. B. Choi, D. W. Park, and S. Jayasuiya. A timevarying sliding surface for fast and robust tracking control of second-order uncertain systems. *Automatica*, Vol. 30, No. 5, pp. 899–904, 1994.
- [61] V. Emeryanov, S. K. Korovin, and A. Levant. High-order sliding modes in control

- systems. *Computational Mathematics and Modeling*, Vol. 7, No. 3, pp. 29–318, 1996.
- [62] M. Otsuki, Y. Ushijima, K. Yoshida, H. Kimura, and T. Nakagawa. Application of nonstationary sliding mode control to suppression of transverse vibration of elevator rope using input device with gaps. *JSME international journal*, Vol. 49, No. 2, pp. 385–394, 2006.
- [63] A.Sivert. Faqir, B. Nahidmobarakeh, and F. Betin. Moving switching surfaces for high precision position control electrical drives. In *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Vol. 1, pp. 175–180, Dec. 2004.
- [64] Kuo-Kai Shyu and C. K. Lai. Incremental motion control of synchronous reluctance motor via multi segment sliding mode control method. In *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 10, pp. 169–176, March 2002.
- [65] Ramsai Gorugantu and Prasanna Gandhi. Control design based on novel parabolic sliding surface. In *IEEE 12th International Workshop on Variable Structure Systems*, pp. 410–415, Mumbai, January 2012.
- [66] Azad Ghaffari and Mohammad Javad Yazdanpanah. Nonlinear sliding surfaces; computing and existence of solution control. In *International Conference on Automation and Systems (ICCAS 2008)*, pp. 1610–1615, Oct. 2008.
- [67] Vadim Utkin and Jingxin Shi. Integral sliding mode in systems operating under uncertainty conditions. In *Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control*, pp. 4591–4596, Kobe, Japan, Dec. 1996.
- [68] R. Bellman, I. Glicksberg, and O. Gross. On the “bang-bang” control problem. *Quarterly Appl. Math.*, Vol. 14, No. 1, pp. 11–18, April 1956.
- [69] T. Flash and N. Hogan. The coordination of arm movements. *Journal of Neuroscience*, Vol. 5, No. 7, pp. 1988–1703, 1985.
- [70] 山浦弘. 制振シーク制御. 計測と制御, Vol. 41, No. 6, pp. 421–427, 6 2002.
- [71] Y. Mizoshita, S. Hasegawa, and K. Takaishi. Vibration minimized control for disk drives. *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 32, No. 3, pp. 1793–1798, 1996.
- [72] S. Burak. Cnc 工作機械のための軌道生成. 精密工学会誌, Vol. 79, No. 7, pp. 631–638, 2013.
- [73] 英二中野, 清小森谷, 完米田, 隆行高橋. 高知能移動ロボティクス. 大学院情報理工学 4. 講談社サイエンティフィク, 2004.
- [74] 大澁谷, 深白杵, 憲二郎三浦. クロソイド曲線を用いた曲率変化の滑らかな軌道生成 (動作計画と制御の新展開). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp.

- 2A1–B01(1)–2A1–B01(4), may 2012.
- [75] H. Li and W. Lin. Motion profile planning for reduced jerk and vibration residuals. Technical Report 1, The Singapore Institute of Manufacturing Technology (SIMTech), Jan-Mar 2007.
- [76] S. Perumaal and N. Jawahar. Synchronized trigonometric s-curve trajectory for jerk-bounded time-optimal pick and place operation. *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 27, No. 4, pp. 385–395, 2012.
- [77] センジヤルブラック. Cnc 工作機械のための軌道生成. 精密工学会誌, Vol. 79, No. 7, pp. 631–638, 2013.
- [78] S. Liu. An on-line reference-trajectory generator for smooth motion of impulse-controlled industrial manipulators. In *7th International Workshop on Advanced Motion Control(AMC)*, July 2002.
- [79] T. Saitoh, T. C. Hwa, and Y. Hori. Realtime generation of smart speed pattern for evs taking driver’s command change into account. In *The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control(AMC)*, March 2004.
- [80] 示村悦二郎. 線形システム解析入門. コロナ社, 1987.
- [81] 平井一正. 非線形制御. 現代非線形科学シリーズ, No. 9. コロナ社, 2003.
- [82] Ying-Jeh Huang, Tzu-Chun Kuo, and Shin-Hung Chang. Adaptive sliding-mode control for nonlinear systems with uncertain parameters. In *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics-part B:cybernetics*, Vol. 38, pp. 603–607, 2008.
- [83] H. Lee and V. I. Utkin. Chattering suppression methods in sliding mode control systems. *Annual Reviews in Control*, Vol. 31, pp. .179–188, 2007.
- [84] 小山健太郎, 野中謙一郎. 障害物回避と切り返し点の自動調整によるモデル予測車庫入れ制御. 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 1, pp. 9–17, 2014.
- [85] 三平満司, 伊藤毅. 非線形制御理論を用いた車両の経路追従制御と移動計画一切り返しを用いた車庫入れ制御. システム制御情報学会論文誌, Vol. 6, No. 1, pp. 37–47, 1993.
- [86] 江上正, 望月光一郎, 中崎哲. 任意曲線経路に対する移動車両の経路制御. 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 11, pp. 986–993, Nov. 2013.
- [87] J. Luo and P. Tsiotras. Exponentially convergent control laws for nonholonomic systems in power form. *Systems&Control Letters*, No. 35, pp. 87–95, 1998.
- [88] K.Z. Liu and A. Kanehara. Steering control of vehicles by discontinuous control approach. In *Proc. of ACC’2001*, pp. 1521–1526, 2001.

-
- [89] X. Yun and Y. Yamamoto. Internal dynamics of a wheeled mobile robot. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Yokohama*, pp. 1288–1294, 1993.
- [90] V. Kumar H. G. Tanner, G. J. Pappas. Leader-to-formation stability. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 20, No. 3, pp. 443–455, 2004.
- [91] G. Grabmair. Model-based nonlinear control of 2-wmr. In *Proceedings of the International Conference on Research and Education in Robotics (EUROBOT2011)*, pp. 123–129, 2011.
- [92] 溝尻太一, 森泰親. 適応 slidingmode 制御のロボスト車両位置決め制御への適用. 電気学会論文誌 C 編, Vol. 11, No. 135, pp. 1411–1418, Nov. 2015.
- [93] 志磨, 健, 的野, 春樹, 掛川, 晋司, 門司, 竜彦. 自動車向け画像認識技術とステレオカメラによる距離計測. 光学, Vol. 41, No. 5, pp. 287–291, 2012.
- [94] 鈴木政康, 知野見聡, 高野照久. アラウンドビューモニタの開発. 日本機械学会誌, Vol. 111, No. 1073, p. 332, 2008.
- [95] 鈴木, 光一郎, 中村, 卓磨, 石田, 佐句, 酒卷, 祥平. 富士通研究所における自動車運転支援システムの開発現場. 映像メディア学会誌, Vol. 10, No. 66, pp. 850–852, 2012.
- [96] 泉谷圭亮, 冷水由信. Eps 消費エネルギー推定手法の開発. *JTEKT engineering journal*, No. 1007, pp. 44–47, 2009.
- [97] 辻澤隆彦. 自動車の自動駐車技術の実用化に関する研究. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 73, No. 729, pp. 1273–1278, 2007.

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導，ご教示いただいた首都大学東京大学院システムデザイン研究科 森泰親教授に心より感謝と御礼を申し上げます。また，学位論文審査において多くの貴重なご指導，ご助言をいただきました首都大学東京大学院システムデザイン研究科 児島晃教授，首都大学東京大学院システムデザイン研究科 増田士郎教授，首都大学東京大学院理工学研究科 小口俊樹教授に厚く御礼申し上げます。

社会人博士の研究機会を与えて頂きました日産自動車株式会社に感謝します。日産自動車株式会社総合研究所の森春人氏，星正勝氏，クライソン・トロンナムチャイ氏，小宮山晋氏，平林智己氏をはじめ，多くの方々に多忙な業務にもかかわらず学業への多大な配慮・ご協力いただいたことを記し，深く感謝申し上げます。

東京都立産業技術高等専門学校准教授 笠原美左和氏，マレーシア日本国際工科院 (MJIT) Senior Lecturer Fitri Yakub 氏には，研究について多くの議論と助言をいただきましたことを感謝します。また，森研究室の卒業生，学生の皆さんには研究活動において大変お世話になりました。

論文要旨

今日、自動車は我々の日々の暮らしや社会経済活動に欠かせない存在となっている。しかし、近年、自動車の普及に伴い交通事故の増加や大気汚染などの社会問題が深刻化している。そのため、省エネルギー・環境負荷低減を目的として、電気自動車の普及が進んでいる。また、安全対策に関する課題を克服するために、交通事故原因の大半を占める人的要因に起因する事故低減の打開策として自動運転技術が注目を集めている。自動車は、多様な交通条件、気象条件、地理的 条件の下で使用されるため、天候、路面状態、路面勾配、横風外乱、積載重量など、様々な不確かさに対してロバストなシステムを構成しなくてはならないという課題がある。

本研究では、現在深刻な社会問題となっている交通事故および環境負荷を低減することを目的として、電気自動車への適用を想定した「不確かさに対するロバスト性を保ちつつ滑らかに素早く省エネルギーで車両を制御する手法」を構築し、自動運転技術の適用範囲拡大を図る。この際、パラメータ変動や外乱、モデル化誤差などの不確かさに対してロバスト性が高い非線形制御手法として良く知られているスライディングモード制御を適用する。スライディングモード制御には、チャタリング現象と呼ばれる高周波振動や、初期状態からスライディングモードに至るまでの期間（到達モード）においてロバスト性が保証されないという問題があるため、実システム適用の阻害要因となっていた。また、参照軌道に追従するサーボ系において、動作中に周囲環境が変化して途中で目標位置を変更する必要が生じた場合、滑らかさを損なわずに参照軌道を変更することは困難であった。これらの問題を解決するために、本論文では次に示す3つの手法を新たに提案している。

今日、自動車は我々の日々の暮らしや社会経済活動に欠かせない存在となっている。しかし、近年、自動車の普及に伴い交通事故の増加や大気汚染などの社会問題が深刻化している。そのため、省エネルギー・環境負荷低減を目的として、電気自動車の普及が進んでいる。また、安全対策に関する課題を克服するために、交通事故原因の大半を占める人的要因に起因する事故低減の打開策として自動運転技術が注目を集めている。自動車は、

多様な交通条件，気象条件，地理的 条件の下で使用されるため，天候，路面状態，路面勾配，横風外乱，積載重量など，様々な不確かさに対してロバストなシステムを構成しなくてはならないという課題がある。

本研究では，現在深刻な社会問題となっている交通事故および環境負荷を低減することを目的として，電気自動車への適用を想定した「未知の不確かさに対するロバスト性を保ちつつ滑らかに素早く省エネルギーで車両を制御する手法」を構築し，自動運転技術の適用範囲拡大を図る．この際，パラメータ変動や外乱，モデル化誤差などの不確かさに対してロバスト性が高い非線形制御手法として良く知られているスライディングモード制御を適用する．スライディングモード制御には，チャタリング現象と呼ばれる高周波振動や，初期状態からスライディングモードに至るまでの期間（到達モード）においてロバスト性が保証されないという問題があるため，実システム適用の阻害要因となっていた．また，参照軌道に追従するサーボ系において，動作中に周囲環境が変化して途中で目標位置を変更する必要が生じた場合，滑らかさを損なわずに参照軌道を変更することは困難であった．これらの問題を解決するために，本論文では次に示す 3 つの手法を新たに提案している．

- (i) 境界層幅適応則の提案
- (ii) 非線形切換面および滑らかな参照軌道に沿って変化する線形時変切換面の提案
- (iii) 参照軌道の誤差修正手法の提案

本研究を通じて得られた結果を以下にまとめる．

第 1 章では，本研究の位置づけと社会的意義および研究の技術的な背景と目的を述べる．

第 2 章では，本研究で扱う制御対象と制御器の構成を説明する．

第 3 章では，位置決め制御中に，滑らかさを損なうことなく参照軌道を修正する手法を提案する．先行研究では，参照軌道の次数が低く滑らかさが十分ではない，速度制御における参照軌道修正のみを扱っているなど，そのままでは位置決め制御の参照軌道の修正に適用できないという問題があった．本研究では，張らが提案した位置決め制御のための滑らかな軌道を任意の初期条件と終端条件に拡張することで，躍度の微分の次元まで連続性が保たれる修正軌道を導出している．さらに，数値シミュレーションを通して，提案手法の有効性を示している．

第 4 章では，非線形切換面（楕円切換面と Lemniscate 切換面）と滑らかな参照軌道に沿って時間変化する線形時変切換面を提案する．所望の切換面を持つスライディングモード制御則を導き，制御則と閉ループ制御系の安定性を示している．数値シミュレーションを通して，楕円切換面を用いた提案手法が，ロバスト性を犠牲にすることなく，従来の線

形時不変切換面を用いた手法に比べて約26%誤差収束時間が改善され、エネルギー消費量を半減できることを示している。

第5章では、スライディングモード制御の最大の欠点であるチャタリング現象を抑止するために、境界層幅適応則を提案する。不確かさを含む2次システムに対して、モデル追従スライディングモード制御によるサーボ問題に適用している。数値シミュレーションを通して、提案手法が従来手法に比べて、誤差収束時間を50から65%程度、エネルギー消費量を50から75%程度、躍度の絶対値積分量を38から50%程度低減できることを示している。

第6章では、楕円切換面を持つスライディングモード制御と境界層幅適応則を組み合わせた手法を車間制御問題に適用する。先行車と自車間に他車両が割り込むシーンを想定したシミュレーションを通して、提案手法が線形時不変切換面と一定の境界層を適用した従来手法と同等の誤差追従特性を実現しつつ、従来手法に比べて滑らかに省エネルギーで動作することを示している。

第7章では、車両前後方向制御にモデル追従スライディングモード制御を、車両横方向制御に前方注視点距離を導入した厳密線形化手法を適用する。車両前後方向制御と横方向制御を統合することで路面外乱に対してロバストな自動駐車システムを構築する。ここで、車両前後方向制御には線形時不変切換面を持つスライディングモード制御と境界層幅適応則を組み合わせた手法を適用している。また、駐車目標位置検出誤差を考慮して、車両位置決め制御における参照軌道を走行中に滑らかさを損なうことなく修正する手法を適用している。路面勾配や段差を含む並列駐車シーンを想定したシミュレーションを通して、提案手法が従来手法に比べて路面外乱や目標駐車位置観測誤差に対するロバスト性が高いことを示している。

第8章は、本論文のまとめであり、本研究により得られた結果を用いることで自動運転システムの普及が促進され、現在深刻な社会問題となっている交通事故および環境負荷の低減が期待できることを述べている。

研究業績

本論文各章と研究発表との関連を次に示す。

- ・ 1 章 :
- ・ 2 章 : A(1), A(2), A(3), B(1), B(2), B(3), B(4), B(5), B(6), C(1), C(2), C(3), C(4)
- ・ 3 章 : A(3), B(3), B(5), C(3)
- ・ 4 章 : A(2), B(1), B(2), B(3), B(4), B(5), C(1)
- ・ 5 章 : A(1), A(2), A(3), B(4), C(1), B(6)
- ・ 6 章 : A(2), B(1), C(1)
- ・ 7 章 : A(1), A(3), B(3), C(1), C(4)
- ・ 8 章 :

A. 学会誌論文

- ・ A(1) 溝尻 太一, 森 泰親 :
「適応 SlidingMode 制御のロバスト車両位置決め制御への適用」,
電気学会論文誌 C, 電子・情報・システム部門誌, Vol.135, No.11, pp. 1411-1418
(2015)
- ・ A(2) T. Mizoshiri, Y. Mori:
” Application of an Adaptive Sliding Mode Control with an Ellipsoidal Sliding Surface
for Vehicle Distance Control”,
SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.10, No.1, pp.25-
31 (2017)
- ・ A(3) 溝尻 太一, 森 泰親 :
「路面外乱に対するロバスト性を考慮した自動駐車システムの検討」,
電気学会論文誌 C, 電子・情報・システム部門誌, Vol.137, No.8, pp.1070-1082

(2017)

B. 国際論文発表（査読あり）

- ・ B(1) T. Mizoshiri, Y. Mori:
” Sliding mode control with ellipsoidal sliding surface” ,
Proceedings of the SICE Annual Conference 2014, Sapporo, pp.721-726, September
(2014)
- ・ B(2) T. Mizoshiri, Y. Mori:
” Sliding mode control with a lemniscate-based sliding surface” ,
Proceedings of the SICE Annual Conference 2015, Hangzhou, pp.428-433, July (2015)
- ・ B(3) T. Mizoshiri, Y. Mori:
” Online smooth error correction method for the reference trajectory that leads from an
arbitrary initial state to the end state in positioning control” ,
Proceedings of IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII),
Nagoya, Japan, pp.495 - 499 (2015)
- ・ B(4) N. Watanabe, T. Mizoshiri, Y. Mori:
” Reduction of the reaching mode by the sliding mode control with time-varying sliding
surface” ,
Proceedings of IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII),
Nagoya, Japan, pp.295 - 300 (2015)
- ・ B(5) T. Mizoshiri, Y. Mori:
” Sliding mode control with a linear sliding surface that varies along a smooth trajec-
tory” ,
Proceedings of the SICE International Symposium on Control Systems 2016, Nagoya,
pp.1 - 6, March (2016)
- ・ B(6) N. Watanabe, T. Mizoshiri, Y. Mori:
” Integral sliding mode control with adaptive switching gain: An application to the
vehicle positioning control” ,
Proceedings of 22nd International Symposium on Artificial Life and Robotics, Beppu,
GS15-1, January (2017)

C. 国内学会発表（口頭発表）

- ・ C(1) 溝尻 太一, 森 泰親：
「楕円切換面を持つ境界層幅調整による適応スライディングモード制御」,
自動制御連合講演会講演論文集 57, pp.1205-1208 (2014)

- ・ C(2) 陳 鑫, 溝尻太一, 森 泰親 :
「2 次遅れ系を対象としたスラーディングモード制御のための切換面に関する研究」,
電気学会全国大会, 東京都市大学, No. 3-035(2015)
- ・ C(3) 陳 鑫, 溝尻太一, 森 泰親 :
「躍度小化軌道に基づくオンライン参照軌道修正方法」,
自動制御連合講演会講演論文集 58, pp.1205-1208 (2015)
(関連 国内発表)
- ・ C(4) 溝尻 太一, 金井 喜美雄 :
「乗り心地を考慮したロバスト車両位置決め制御」,
電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.145 - 148 (2012)