

平成28年度 修士論文

Master Thesis

電気自動車における旋回を考慮した速度軌道最適化による
航続距離延長自動運転に関する研究

**Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicles
Based on Optimal Velocity Trajectory
in Consideration of Cornering**

指導教員 藤本 博志 准教授
Professor Hiroshi FUJIMOTO

平成29年1月30日提出
January 30, 2017

東京大学大学院 新領域創成科学研究科
先端エネルギー工学専攻

Department of Advanced Energy, Graduate School of Frontier Sciences

The University of Tokyo

47-156060

池澤 佑太

Yuta Ikezawa

要約

近年、地球温暖化や化石燃料の枯渇などの環境問題が顕在化しており、その解決策の一つとして環境負荷の少ない電気自動車 (Electric Vehicle: EV) が注目されている。EV は走行中に二酸化炭素を排出せず、電気を動力源とし石油代替エネルギーの利用が可能であるため、前述の問題の解決策となり得る。

一方で、従来の内燃機関自動車と比較して一充電走行距離が短く、十分に普及していないのが現状である。この問題を解決するためにハード面、ソフト面から様々な研究が行われている。

著者らの研究グループでは、この問題に対し、車両に変更を加えずに、制御のみによって航続距離を延長する航続距離延長制御システム (Range Extension Control System: RECS) を提案してきた。RECS では運転者が速度を決定するという前提の下で消費電力を最小化することが可能である。直進走行のみを考慮した RECS では、前後輪モータの効率特性の違いに着目し、効率が最大となるようにトルクを前後輪に配分することで航続距離延長を実現する。また、旋回を考慮した RECS では左右の駆動力差モーメントを利用することで、コーナリング時に生じる抵抗を削減し、航続距離延長を実現する。

しかし、今後は、高度道路交通システム (Intelligent Transport Systems: ITS) の進展と共に自動運転技術が普及していくと考えられ、車両速度の決定権はドライバーから ITS へと移行していくと考えられる。これにより、車両の速度軌道を最適化することで移動時間を変化させることなく、航続距離を延長することが可能となる。

このような前提に基づき、著者らの研究グループでは、直進走行のみを想定し、勾配や信号情報を考慮して速度軌道を最適化する航続距離延長自動運転 (Range Extension Autonomous Driving: READ) を提案してきた。READ では、車両の運動、消費電力をモデル化した上で、最適制御問題を数値的に解くことで最適な速度軌道を導出することが出来る。しかしながら、実際の道路への適用を考えると、直進走行だけでなく、旋回も考慮する必要がある。そこで、本論文では旋回を考慮した READ を提案する。旋回時にはタイヤの横滑りによる抵抗や左右輪の車輪速差が生じるので、これらをモデル化した上で最適制御問題を数値的に解くことで最適な速度軌道を求めることが出来る。また、インホイールモータ搭載車両では左右輪の駆動力差を利用することが可能なので、速度軌道に加えて左右輪の駆動力配分を同時に最適化する手法を提案する。本来であれば、速度と駆動力配分の2次元の探索を行う必要があるが、提案手法では制御入力の取り方を工夫することで、この問題を1次元の最適化問題2つに分離することが出来、速度軌道が定まれば左右の配分比が自動的に決定されるようにすることが出来る。これに加え、車両追い越し時等の走行軌跡に自由度がある場合についても適用できるよう、速度、ヨーレート、横滑り角の同時最適化手法を提案する。一般的な自動車の走行では、主にヨーレートを用いて車の軌道を変更するが、前後輪アクティブステアアの車両であれば、横滑り角を積極的に使用して走行することで、タイヤの横滑りによる抵抗を抑えつつ軌道を変更することができることを示す。これらの提案法の有効性をシミュレーション及び実験で示した。

目次

1 序論	1
1.1 電気自動車の特徴	1
1.2 研究背景	1
1.2.1 昇降圧チョッパの高効率化	2
1.2.2 インバータの高効率化	3
1.2.3 前後駆動力配分による航続距離延長	4
1.2.4 左右駆動力配分による航続距離延長	5
1.3 ITS を活用した消費エネルギー低減	6
1.4 研究目的	7
1.5 本論文の構成	8
2 実験車両と車両モデル	9
2.1 実験車両	9
2.2 車両の運動モデル	11
2.2.1 車両の運動方程式	11
2.2.2 スリップ率	12
2.2.3 横力とコーナリング抵抗	13
2.3 入力電力モデル	14
2.4 損失分離	15
3 車両姿勢の制御系の設計	17
3.1 速度制御系	17
3.2 ラテラルフォースオブザーバ	18
3.3 ヨーモーメントオブザーバ	18
3.4 車両のヨーレートと車体横滑り角の同時制御	18
4 旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御	20
4.1 消費エネルギー最小速度軌道の導出	20
4.2 旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御の比較条件	21
4.3 旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション	22
4.4 旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御の実験	25

5 旋回を考慮した速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御	27
5.1 消費エネルギー最小速度軌道の導出	27
5.2 左右駆動力配分最適化による消費電力最小化	29
5.2.1 左右駆動力配分最適化法	29
5.2.2 駆動力差モーメントと消費電力の関係のシミュレーション	30
5.2.3 駆動力差モーメントと消費電力の関係の実験	30
5.3 速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御の比較条件	31
5.4 速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション	32
5.5 速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御の実験	34
6 速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御	37
6.1 コーナリング抵抗の近似	37
6.2 消費エネルギー最初速度軌道の導出	38
6.3 速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御の比較条件	39
6.4 速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション	40
6.4.1 case A	40
6.4.2 case B	41
6.5 速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御の実験	43
7 結論	44
7.1 本研究で得られた成果	44
7.2 今後の展望	45
謝辞	46
参考文献	47
発表文献	50
A 消費エネルギー制約下での速度軌道最適化による最短時間自動運転制御	52
A.1 移動時間最短速度軌道の導出	52
A.2 消費エネルギー制約下での速度軌道最適化による最短時間自動運転制御の比較条件	53
A.3 消費エネルギー制約下での速度軌道最適化による最短時間自動運転制御のシミュレーション	54
A.3.1 case A ($W_{lim} = 250$ kW)	54
A.3.2 case B ($W_{lim} = 300$ kW)	55
A.4 消費エネルギー制約下での速度軌道最適化による最短時間自動運転制御の実験	58
B 実験環境	60
B.1 走行試験場	60
B.2 Real Car Simulation Bench	60

C 最適制御問題の数値解法	62
C.1 オイラー・ラグランジュ方程式	62
C.2 勾配法	63

目次

1	High Efficient Energy Conversion System [10]	2
2	ヒステリシス制御 [10]	2
3	HEV 用 PMSM ドライブシステムの消費エネルギー [11]	4
4	配分比と消費エネルギーの関係 [13]	5
5	定常円旋回中の走行抵抗 [15]	6
6	定常円旋回中の消費電力 [15]	6
7	勾配を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御の実験結果 [22]	7
8	FPEV2-Kanon	9
9	インホイールモータの効率マップ	10
10	2 輪車両モデル	10
11	μ - λ 曲線 [25]	12
12	コーナリング抵抗	14
13	PMSM の dq 軸等価回路 [26]	15
14	車両姿勢制御系	19
15	旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御で想定する走行コース	22
16	旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション結果	24
17	旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御の実験結果	26
18	駆動力差モーメントと駆動力, 消費電力のシミュレーション結果	30
19	駆動力差モーメントと駆動力, 消費電力の実験結果	31
20	旋回を考慮した速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御で想定する走行コース	31
21	速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション結果	33
22	速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御の実験結果 (測定値)	35
23	速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御の実験結果 (計算値)	36
24	速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御で想定する走行	40
25	速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション結果 (case A)	41
26	速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション結果 (case B)	42
27	速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御の実験結果 (case A)	43

28	最短時間自動運転のシミュレーション結果 (case A: $W_{lim} = 250$ kW)	56
29	最短時間自動運転のシミュレーション結果 (case B: $W_{lim} = 300$ kW)	57
30	最短時間自動運転の実験結果 (case A: $W_{lim} = 250$ kW)	59
31	最短時間自動運転の実験結果 (case B: $W_{lim} = 300$ kW)	59
32	交通安全環境研究所自動車試験場	60
33	Real Car Simulation Bench	61

表 目 次

1	車輛諸元	10
2	インホイールモータ諸元	11
3	最短時間自動運転の比較条件	54
4	最短時間自動運転の移動時間	54
5	実装試験, RC-S, シャンダイナモの試験項目別対比表	61

第 1 章

序論

1.1 電気自動車の特徴

近年、地球温暖化や化石燃料の枯渇などの環境問題が顕在化しており、その解決策の一つとして環境負荷の少ない電気自動車 (Electric Vehicle: EV) が注目されている。EV は走行中に二酸化炭素を排出せず、電気を動力源とし石油代替エネルギーの利用が可能であるため、前述の問題の解決策となり得る。また、EV はモータを動力源として利用しているため、従来の内燃機関自動車と比較して以下の優位点を持つ [1]。

1. 従来の内燃機関を有する自動車と比較してトルク応答が 2 桁速い。
2. モータに流れる電流を測定することで、トルクを正確に把握できる。
3. 小型高出力であるため、分散配置が可能である。
4. 力行だけでなく回生が可能である。

これらの利点を活かし、EV の安全性や乗り心地を高めることを目的とした姿勢制御や運動制御に関する研究 [2, 3, 4] が行われている。

1.2 研究背景

一方で、従来の内燃機関自動車と比較して EV は一充電走行距離が短く、十分に普及していないのが現状である。この課題を解決するためにハード面、ソフト面から様々な研究が行われている。ハード面の研究としては、路面から走行中の EV にワイヤレス電力伝送によって給電する研究 [5, 6]、モータの高効率化に関する研究 [7, 8]、パワーエレクトロニクスを用いたシステムの高効率化に関する研究 [9, 10, 11] 等が行われている。

ソフト面の研究としては、前後輪に効率マップの異なるモータを搭載した車両を想定し、運転者の任意の駆動力を前後輪に最適に配分することで消費エネルギーを低減する研究 [12, 13] や左右輪に駆動力を配分することでコーナリングによる抵抗を削減しエネルギーを低減する研究 [14, 15] が行われている。

1.2.1 昇降圧チョッパの高効率化

現在市販されているEVはバッテリー、DC-DCコンバータ、インバータ、モータで構成されている。DC-DCコンバータは、インバータの電流容量を小さくするために用いられるが、DC-DCコンバータの導通損失によって全体の効率が悪くなる場合がある。また、駆動系全体の効率が良くなる場合においても、大容量のDC-DCコンバータは重量が大きいため、航続距離が短くなる場合がある。文献[10]では、これらの問題に対して、Dual Active Bridge (DAB) DC-DCコンバータを用いたHigh Efficient Energy Conversion System (HEECS)を提案している。

HEECSの基本的な構成をFig. 1に示す。ここで、 R_{out} はインバータを模擬している。Fig. 1のようにDABコンバータをバッテリーとインバータの間に挿入する構成には以下のような利点がある。

- 非昇圧動作時にはDABコンバータに電流が流れないので、高効率である。
- 昇圧動作時には全電力の一部のみがDABコンバータを通るので、高効率である。
- 全電力の一部のみしかDABコンバータを通らないので、比較的小容量のDABコンバータを利用できる。

低中出力時にはDABコンバータはオフとなり、2次側のスイッチのみがオンとなる一方、高出力時にはDABコンバータがオンとなり、出力電圧はバッテリー電圧 E とDABの出力 V_c の和となる。そのため、変圧比を $N:1$ とすると、昇圧動作時の効率 η_{total} は以下の式で近似できる。

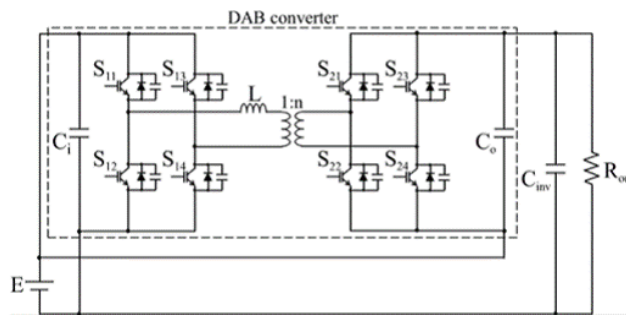


Fig. 1: High Efficient Energy Conversion System [10]

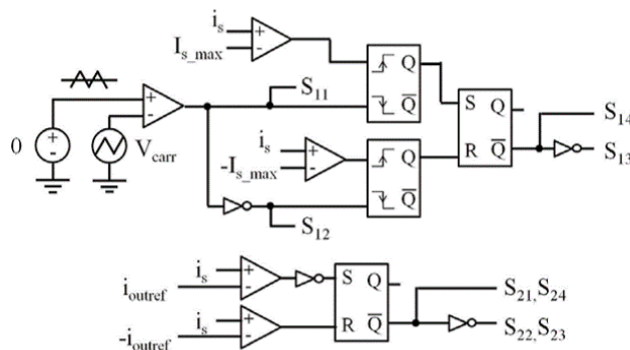


Fig. 2: ヒステリシス制御 [10]

$$\eta_{\text{total}} = \frac{N}{N+1}\eta_{\text{direct}} + \frac{1}{N+1}\eta_{\text{dab}} \quad (1-1)$$

ここで、 η_{direct} は負荷側へ直接供給される電力の効率、 η_{dab} は DAB の効率である。

DAB コンバータを一般的な用途で用いる場合、位相シフト制御される場合が多いが、位相シフト制御では過渡時にインダクタに過電流が流れる等の問題が生じる。そのため、過渡時に頻繁に使用される HEECS の DAB コンバータにこの制御法は適さない。

文献 [10] ではヒステリシス制御によって、2 次側電流 i_s を直接的に制御することでこの問題を解決している。制御原理を Fig. 2 に示す。1 次側は、基本的に開ループ制御で、出力は定期的に切り替わるが、制御開始時にインダクタ電流 i_s のピークが許容インダクタ電流 $i_{s,\text{max}}$ を超えた時のみ、1 次側の 4 つのスイッチのうち 2 つ (S_{13}, S_{14}) は制御される。2 次側は、出力電流指令値 i_{outref} を参照値、 i_s を制御量として用い、 i_s の絶対値が i_{outref} の絶対値を超えた時に出力が切り替わる。従って、 i_s はある範囲内に制御される。

1.2.2 インバータの高効率化

3 レベルインバータ等のマルチレベルインバータは、2 レベルインバータと比較して以下のような利点を有する。

- キャリア周波数を高くせずに、高調波成分を低減できるため、高調波損失を低減できる。
- インバータのスイッチング損失を低減できる。

文献 [11] では、実際の HEV システムにおいて、3 レベルインバータを用いた場合の消費電力低減効果を検証している。

駆動システムの効率 η は回転数 N とトルク T の関数として、以下の式で表される。

$$\eta(N, T) = \frac{(2\pi N/60)T}{(2\pi N/60)T + P_{\text{inv}}(N, T) + P_{\text{mot}}(N, T)} \quad (1-2)$$

ここで、 P_{inv} はインバータ損失、 P_{mot} は PMSM の損失であり、ともに N 、 T の関数となる。パターン走行時の消費電力を比較するため、 N 、 T は時間の関数として表されるので、システムの消費電力量 W は以下の式で表される。

$$W = \int \frac{(2\pi N(t)/60)T(t)(1 - \eta(N(t), T(t)))}{\eta(N, T) \times 3600} dt \quad (1-3)$$

N は走行パターンによって決定され、 T は以下の式で決定される。

$$T(t) = K_2(V(t))^2 + K_1 \frac{dV(t)}{dt} + K_0 \quad (1-4)$$

ここで、第 1 項は空気抵抗、第 2 項は加速抵抗、第 3 項は転がり抵抗である。

3 レベルインバータの消費電力低減効果を実際の HEV 駆動システムを用いて検討を行う。プリウスの PMSM を 2 レベルインバータで駆動した際の効率マップを基に、3 レベルインバータで駆動した際の効率マップを作成する。PMSM の銅損は基本波成分が支配的であるため、インバータ方式による差異は小さく、電磁鋼板は永久磁石と比べて渦電流が流れにくい構造であるため、高調波損失の差異も小さい。

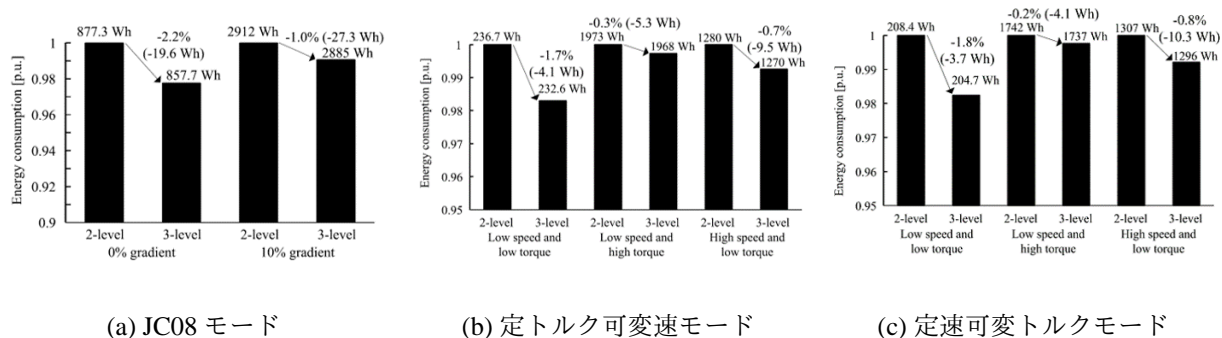


Fig. 3: HEV 用 PMSM ドライブシステムの消費エネルギー [11]

以上から、インバータ方式の違いによる消費電力の削減は、主として渦電流損の削減によるものであり、これは回転数、負荷トルクに依らず一定の削減が期待できる。

Fig. 3(a) に JC08 モードで平地、及び 10 % の勾配路を走行した際の消費電力を示す。勾配がある場合の方が 3 レベルインバータを使用することによる削減率が小さくなっている。これは勾配路の走行の方が必要なトルクは大きくなるものの、渦電流損の削減効果がトルクに依らないためである。また、定トルク可変速モードと定速可変トルクモードにより駆動した際の消費電力を Fig. 3(b), Fig. 3(c) に示す。勾配の場合と同様に、消費電力が大きな領域になるほど 3 レベルインバータによる消費電力削減率は小さくなっていることが確認できる。以上のことから、3 レベルインバータは市街地走行モードなど低速低トルクにおいて大きな消費電力削減効果が得られると言える。高速巡行モードや登坂走行モードでは削減効果が小さくなるものの、2 レベルインバータと比較すると消費電力を低減することはできる。

1.2.3 前後駆動力配分による航続距離延長

複数のモータを搭載した電気自動車では、駆動力を各輪に配分することができる。文献 [12] では、インホイールモータを 4 輪に搭載した電気自動車を想定し、総駆動力を維持しながら前後輪に駆動力を最適に配分することで、スリップ率損失を低減している。著者らのグループでも前後輪モータの効率特性が異なる 4 輪インホイールモータを搭載した電気自動車を想定し、制御で航続距離を延長する航続距離延長制御システム (Range Extension Control System: RECS)[13] に関する研究を提案してきた。直進走行を考慮した RECS では、前後輪に効率特性の異なるモータを搭載し、消費エネルギーが最少となるように制駆動力を前後輪に最適に配分することで航続距離延長を実現する。文献 [13] では、スリップ率、銅損、鉄損を考慮したモデルを用いて、モデルベースで最適な制駆動力配分比を導出している。Fig. 4 に示すように、実走行試験や台上試験においても、最適駆動力配分比を与えることで消費電力が最少最小化されている。

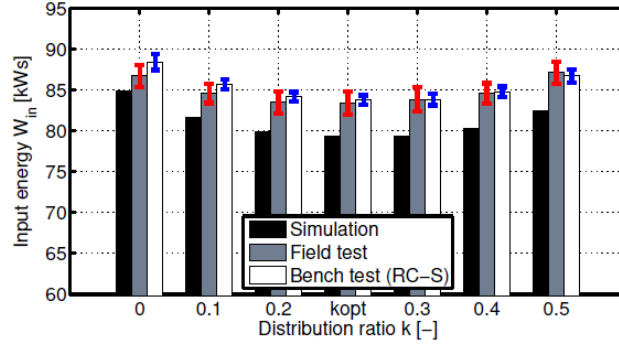


Fig. 4: 配分比と消費エネルギーの関係 [13]

1.2.4 左右駆動力配分による航続距離延長

インホイールモータ搭載車両では、旋回時に左右の駆動力差モーメントを用いることで消費エネルギーを低減することができる。駆動力差ヨーモーメントを用いることで、同じヨーレートを出すのに必要な横力が減少し、タイヤ横滑り角を小さくすることができる。文献 [14] では、スリップ率と鉄損を無視したモデルを用いて、消費エネルギーを最小化する重み付き最小二乗解を導出している。

文献 [15] では、減速機方式のインホイールモータ搭載車両において、左右に駆動力を配分した際の消費電力を定式化し、評価している。駆動力差モーメントによって、Fig. 5 のようにコーナリング抵抗を削減することができる。しかしながら、図中のおよそ 300 Nm 以上の領域では内輪が回生し始めることで、次式で表される減速機の機械抵抗が増加する。

$$L_{mj} = \begin{cases} (\eta_g^{-1} - 1)\tau_{\omega j}\omega_j & (\tau_{\omega j} > 0) \\ (\eta_g - 1)\tau_{\omega j}\omega_j & (\tau_{\omega j} < 0) \end{cases} \quad (1-5)$$

ここで、 η_g は減速機の伝達効率である。コーナリング抵抗の削減効果は旋回半径に反比例して大きくなるため、旋回半径の大きな領域ではコーナリング抵抗の削減効果よりも機械抵抗の増加の方が大きくなるため、旋回半径によって傾向に差異がみられる。

次に、電氣的損失 L_{ej} を評価するため、インバータ・モータ損失をモデル化する。銅損 L_{Cuj} 、鉄損 L_{Fej} 、インバータ損 L_{Invj} はそれぞれ以下のような式で表される。

$$\begin{aligned} L_{Cuj} &= R_a I_{aj}^2 \\ &= R_a (i_{dj}^2 + i_{qj}^2) \end{aligned} \quad (1-6)$$

$$\begin{aligned} L_{Fej} &= \frac{v_{odj}^2 + v_{oqj}^2}{R_c} \\ &= \frac{\omega_{ej}^2 [(L_d i_{odj} + \Phi_a)^2 + (L_q i_{oqj})^2]}{R_c} \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$L_{Invj} = \kappa I_{aj} \quad (1-8)$$

$$L_{ej} = L_{Cuj} + L_{Fej} + L_{Invj} \quad (1-9)$$

ここで、 R_a は銅損抵抗、 i_{dj} は d 軸電流、 i_{qj} は q 軸電流、 v_{odj} は d 軸の誘起電圧、 v_{oqj} は q 軸の誘起電圧、 R_c は等価鉄損抵抗、 ω_{ej} は電気角速度、 L_d は d 軸インダクタンス、 i_{odj} は d 軸電流と銅損電流の

差, Φ_a は磁束鎖交数, L_q は q 軸インダクタンス, i_{oqj} は q 軸電流と銅損電流の差である。4 輪の機械出力を P_v とすると, 機械仕事率 P_m , 消費電力 P_e は次の式で表される。

$$P_m = P_v + \sum_{j=1}^4 L_{mj} \tag{1-10}$$

$$P_e = P_v + \sum_{j=1}^4 L_{mj} + \sum_{j=1}^4 L_{ej} \tag{1-11}$$

Fig. 6 に直接ヨーモーメントと消費電力の関係を示す。旋回抵抗と異なり, 旋回抵抗による仕事率は旋回半径の影響を受けないため, 2つの条件で同じような傾向が得られている。車両のパラメータ設定によっては, 左右に駆動力を配分することで, Fig. 6 よりも大きな消費電力削減効果が得られると考えられる。

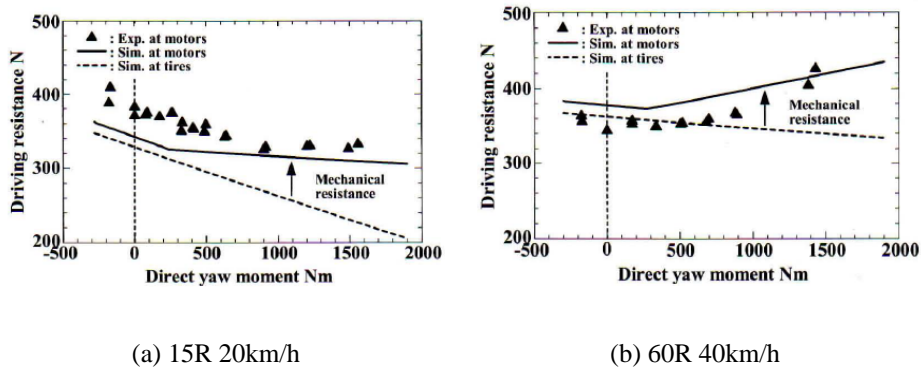


Fig. 5: 定常円旋回中の走行抵抗 [15]

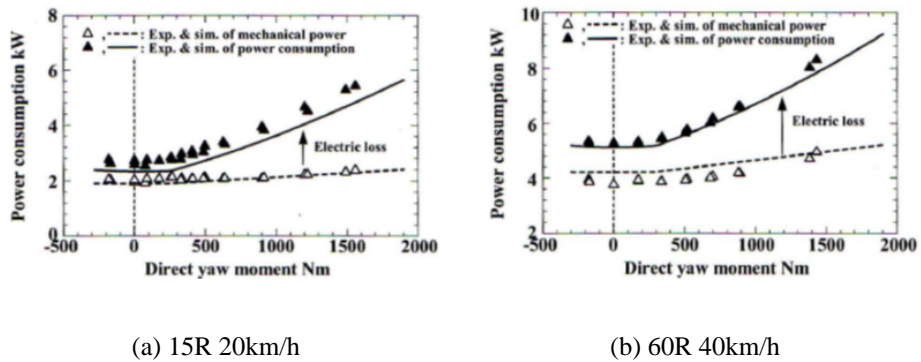


Fig. 6: 定常円旋回中の消費電力 [15]

1.3 ITS を活用した消費エネルギー低減

一方で, 高度道路交通システム (Intelligent Transport Systems: ITS)[16] を活用して, 交通流を改善することでエネルギー問題を解決しようとする研究もある。これらの研究では, 前後の車の情報を利用し

た隊列走行 [17] や仮想的な信号 [18] の導入によって交通流の改善が図られている。今後、高度道路交通システム (Intelligent Transport Systems: ITS) の進展と共に自動運転技術が普及していくと考えられ、車両速度の決定権はドライバーから ITS へと移行していくと考えられる。文献 [19] では、エンジン車を想定して、モデル予測制御を用いて、消費エネルギーを最小化する速度軌道を導出している。

著者らの研究グループでも、電気自動車を対象とし、勾配や信号情報を考慮して速度軌道を最適化する航続距離延長自動運転 (Range Extension Autonomous Driving: READ) を提案してきた [20, 21, 22, 23]。READ では、車両の運動、消費電力をモデル化した上で、最適制御問題を数値的に解くことで最適な速度軌道を導出することが出来る。

文献 [22] では、勾配を考慮して速度軌道の最適化が行われている。Fig. 7 に試験条件、実験結果を示す。提案手法では、坂路で位置エネルギーを運動エネルギーに変換し、平地に達してから減速することで、大きな制動力を発生させずに停止することができ、一定減速度で減速する場合と比較して、回生エネルギーが 23.5 % 増加している。

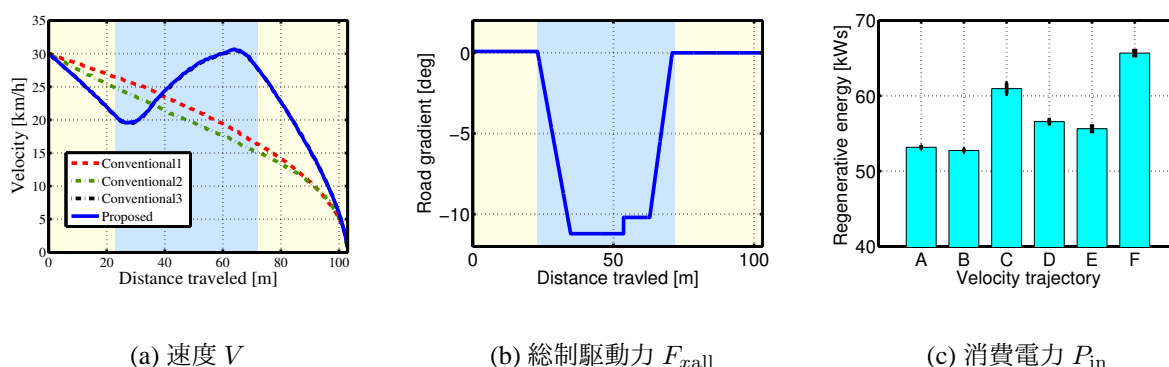


Fig. 7: 勾配を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御の実験結果 [22]

1.4 研究目的

従来の航続距離延長自動運転の課題として、直進走行のみを考慮しており、旋回を伴う走行が考慮されていないことがある。旋回時には、タイヤの横滑りによる抵抗や左右輪の車輪速の差が生じるので、これらを考慮せずに最適化計算を行うと、消費エネルギーが悪化する可能性がある。

そこで、本論文では旋回を考慮した航続距離延長自動運転として、従来考慮されていなかったタイヤの横滑りによる抵抗や左右輪の車輪速の差をモデル化し、旋回を含む経路でも適用できるよう理論を拡張する。また、インホイールモータ搭載車両を想定すると、旋回時には左右輪に駆動力を配分することでコーナリング時に生じる抵抗を低減することが可能となるので、速度軌道に加えて左右輪の駆動力配分を同時に最適化する手法を提案する。これに加え、車両追い越し時等の走行軌跡に自由度がある場合についても適用できるように、速度、ヨーレート、横滑り角の同時最適化手法を提案する。これらの手法の有効性をシミュレーション及び実験によって示す。

1.5 本論文の構成

次に、第3章で本論文の実験で使用した車両制御系について解説する。第4章から第6章では、提案する旋回を考慮した航続距離延長自動運転について提案する。第4章では、速度軌道のみ最適化によって航続距離を延長し、第5章では、速度軌道に加えて左右駆動力配分を最適化することで航続距離の延長を実現する。第6章では、速度軌道に加えて車両の横滑り角、ヨーレートを最適化することで更なる航続距離の延長を実現する。最後に、第7章で本研究で得られた知見と今後の展望を述べる。

第 2 章

実験車両と車両モデル

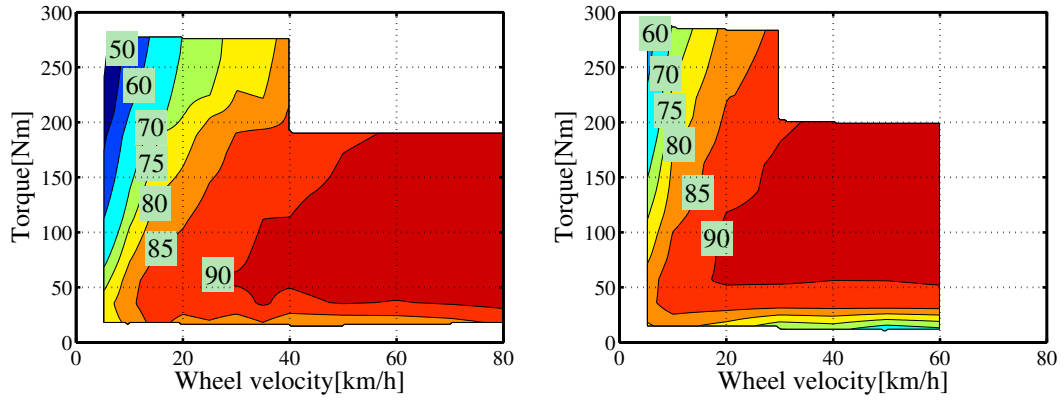
本章では、実験車両について紹介する。また、車両の運動モデル、消費電力モデルについて説明する。

2.1 実験車両

本論文では、著者らのグループが作成した実験車両 FPEV2-Kanon を使用した。車両の外観を Fig. 8、車両諸元を Tab. 1 に示す。この車両は 4 輪に東洋電機製造製アウターロータ型インホイールモータ (IWM) を搭載している。そのため、各輪独立駆動が可能である。このモータはダイレクトドライブ方式であるので、減速ギアのバックラッシュによる影響がなく、路面からの力が直接モータへ伝わる。また、このモータは Tab. 2 に示すように前後で仕様が異なり、Fig. 9 に示すように効率特性も異なるという特徴を有する。これに加えて、前後輪アクティブ操舵が可能であるので、車両横滑り角とヨーレートを独立に制御することが可能である。



Fig. 8: FPEV2-Kanon



(a) 前輪

(b) 後輪

Fig. 9: インホイールモータの効率マップ

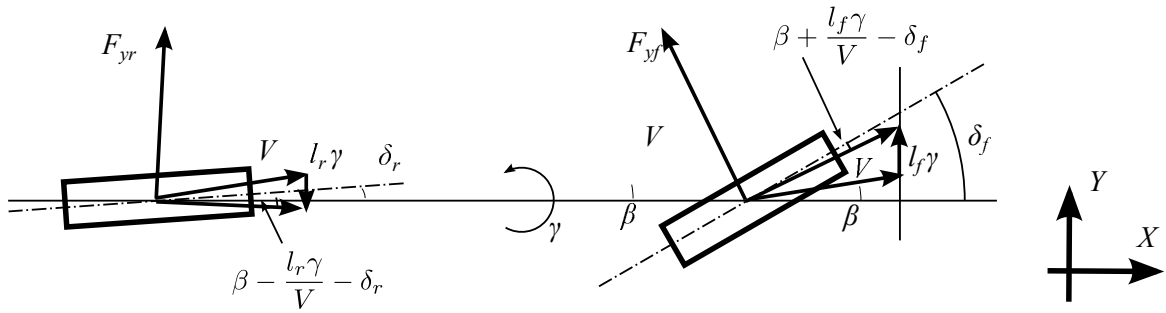


Fig. 10: 2輪車両モデル

Tab. 1: 車輛諸元

Vehicle mass M	854 kg
Wheelbase l	1.72 m
Distance from center gravity to front and rear axle l_f, l_r	$l_f: 1.01$ m $l_r: 0.702$ m
Gravity height h_g	0.510 m
Front wheel inertia J_{ω_f}	1.24 kg·m ²
Rear wheel inertia J_{ω_r}	1.26 kg·m ²
Wheel radius r	0.302 m
Front cornering stiffness C_f	12.5 kN/rad
Rear cornering stiffness C_r	28.2 kN/rad

Tab. 2: インホイールモータ諸元

	Front	Rear
Manufacturer	TOYO DENKI SEIZO K.K.	
Type	Direct Drive System	
Rated torque	110 Nm	127 Nm
Maximum torque	500 Nm	530 Nm
Rated power	6.00 kW	6.0 kW
Maximum power	20.0 kW	25.0 kW
Rated speed	300 rpm	450 rpm
Maximum speed	1113 rpm	1200 rpm

2.2 車両の運動モデル

本節では前後輪操舵，4輪独立駆動が可能な自動車の運動モデルについて述べる。

2.2.1 車両の運動方程式

本論文では Fig. 10 に示す 2 輪車両モデルで車両の運動を考える [24]。車輪回転方向の運動方程式は (2-1) 式，車両前後方向の運動方程式は (2-2) 式で表され，制駆動力は (2-3) 式のように 4 輪に配分される。また，横方向の運動方程式は (2-4) 式，ヨー方向の運動方程式は (2-5) 式，駆動力差モーメントは (2-6) 式で表される。

$$J_{\omega_i} \dot{\omega}_{ij} = T_{ij} - r F_{xij} \quad (2-1)$$

$$M \dot{V} = F_{xall} - \text{sgn}(V)(F_{DR} + F_{CR}) \quad (2-2)$$

$$F_{xij} = \kappa_{ij} F_{xall} \quad (2-3)$$

$$\begin{aligned} M a_y &= M V (\dot{\beta} + \gamma) \\ &\simeq 2Y_f + 2Y_r \end{aligned} \quad (2-4)$$

$$\begin{aligned} M_z &= I \dot{\gamma} \\ &= (F_{yfl} + F_{yfr}) l_f - (F_{yrl} + F_{yrr}) l_r + N_z \\ &\simeq 2(l_f Y_f - l_r Y_r) + N_z \end{aligned} \quad (2-5)$$

$$N_z = \frac{d_f}{2} (-F_{xfl} + F_{xfr}) + \frac{d_r}{2} (-F_{xrl} + F_{xrr}) \quad (2-6)$$

ここで， J_{ω_i} は車輪のイナーシャ， ω_{ij} は車輪角速度， T_{ij} は車輪軸周りのトルク， r はタイヤ半径， F_{xij} は一輪当たりの制駆動力， κ_{ij} は各輪への駆動力の配分比， M は車体重量， V は車体速， sgn は符号関数， F_{DR} は走行抵抗， F_{CR} はコーナリング抵抗， a_y は横加速度， β は車体横滑り角， γ はヨーレート， Y_i は各輪の横力， I は車体のイナーシャ， F_{yij} は各輪のコーナリングフォース， l_i は車両重心点から前後駆動点までの距離， N_z は左右輪の駆動力差モーメント， d_i は車両のトレッドである。また，添え字の i には前輪，後輪を示す f, r ，添え字の j には左輪，右輪を示す l, r が入る。走行抵抗 F_{DR} は以下

の式で表される。

$$F_{DR}(V) = \mu_0 Mg + b|V| + \frac{1}{2}\rho C_d S V^2 \quad (2-7)$$

ここで、 μ_0 は転がり摩擦係数、 b は V の一次に比例する抵抗係数、 ρ は空気密度、 C_d は抗力係数、 S は前方投影面積である。

2.2.2 スリップ率

次に、スリップ率 λ_{ij} を定義する。各車輪位置における車体速度 V_{ij} は

$$V_{ij} = V + \text{sgn}(j) \frac{d_i}{2} \gamma \quad (2-8)$$

で表される。ここで、 sgn は符号関数で、

$$\text{sgn}(j) = \begin{cases} -1 & (j = l) \\ 1 & (j = r) \end{cases} \quad (2-9)$$

である。車輪速 $V_{\omega_{ij}} = r\omega_{ij}$ 、各車輪位置における車体速 V_{ij} を用いて、スリップ率を (2-10) 式で定義する。

$$\lambda_{ij} = \frac{V_{\omega_{ij}} - V_{ij}}{\max(V_{\omega_{ij}}, V_{ij}, \epsilon)} \quad (2-10)$$

ここで、 ϵ は零割防止のための微小定数である。スリップ率 λ_{ij} が十分に小さければ、Fig. 11 のように摩擦係数 μ_{ij} はほぼ λ_{ij} に比例する [25]。この傾きをドライビングステイフネス D_s' と定義すると、一輪あたりの制駆動力 F_{xij} は (2-11) 式で表される。

$$F_{xij} = \mu_{ij} N_{zij} \simeq D_s' N_{zij} \lambda_{ij} \quad (2-11)$$

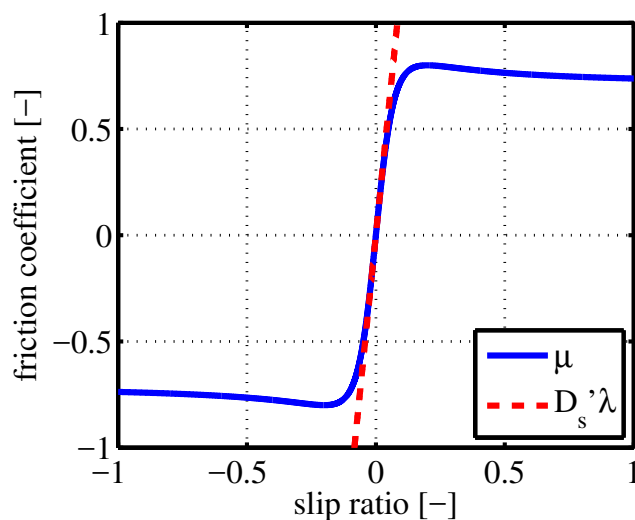


Fig. 11: μ - λ 曲線 [25]

ここで、 N_{zij} は車両が前後加速度 a_x 、横加速度 a_y で運動しているときの一輪当たりの垂直抗力であり、(2-12)–(2-15) 式で表される。

$$N_{zfl} = \frac{1}{2} \frac{l_r}{l} Mg - \frac{1}{2} \frac{h_g}{l} Ma_x - \rho_f \frac{h_g}{d_f} Ma_y \quad (2-12)$$

$$N_{zfr} = \frac{1}{2} \frac{l_r}{l} Mg - \frac{1}{2} \frac{h_g}{l} Ma_x + \rho_f \frac{h_g}{d_f} Ma_y \quad (2-13)$$

$$N_{zrl} = \frac{1}{2} \frac{l_f}{l} Mg + \frac{1}{2} \frac{h_g}{l} Ma_x - \rho_r \frac{h_g}{d_r} Ma_y \quad (2-14)$$

$$N_{zrr} = \frac{1}{2} \frac{l_f}{l} Mg + \frac{1}{2} \frac{h_g}{l} Ma_x + \rho_r \frac{h_g}{d_r} Ma_y \quad (2-15)$$

ここで、 h_g は重心高、 ρ_i はロール剛性前後配分比である。

2.2.3 横力とコーナリング抵抗

次に、タイヤ横力、コーナリング抵抗のモデル化を行う。前輪に加わる横力、コーナリング抵抗を Fig. 12 に示す。コーナリングフォースは車輪横滑り角に比例するので、以下の式で表される。

$$F_{yi} = -C_i \alpha_i \quad (2-16)$$

ここで、 C_i は各輪のコーナリングステイフネス、 α_i は各輪の車輪横滑り角である。車輪横滑り角が十分に小さければ、コーナリングフォースとタイヤ横力 Y_i は等しいとみなせる。

$$Y_i \simeq F_{yi} = -C_i \alpha_i \quad (2-17)$$

各輪のタイヤ横力のうち、車輪進行方向成分を F_{CR}' とすると

$$F_{CR}' \simeq -2F_{yf} \sin \alpha_f - 2F_{yr} \sin \alpha_r \quad (2-18)$$

$$\simeq 2C_f \alpha_f^2 + 2C_r \alpha_r^2 \quad (2-19)$$

となる。このうち、 x 方向の力のみをコーナリング抵抗 F_{CR} とすると以下のようになる。

$$\begin{aligned} F_{CR} &\simeq 2C_f \alpha_f^2 \cos \delta_f + 2C_r \alpha_r^2 \cos \delta_r \\ &\simeq 2C_f \alpha_f^2 + 2C_r \alpha_r^2 \end{aligned} \quad (2-20)$$

ここで、車輪横滑り角 α_f 、 α_r は幾何学的関係から以下の式で表される。

$$\alpha_f(V, \beta, \gamma, \delta_f) = \beta + \frac{l_f \gamma}{V} - \delta_f \quad (2-21)$$

$$\alpha_r(V, \beta, \gamma, \delta_r) = \beta - \frac{l_r \gamma}{V} - \delta_r \quad (2-22)$$

ここで、旋回半径 R の定常円旋回 ($\dot{\beta} = 0$, $\dot{\gamma} = 0$) を仮定すると、コーナリング抵抗 F_{CR} は (2-23) 式で近似できる。

$$F_{CR}(V, R, N_z) \simeq \frac{M^2}{2l^2} \left(\frac{l_r^2}{C_f} + \frac{l_f^2}{C_r} \right) \frac{V^4}{R^2} + D_c N_z^2 - \frac{1 + 2AV^2}{R} N_z \quad (2-23)$$

ここで、 D_c は以下の式で表される定数である。

$$D_c = \frac{C_f + C_r}{2l^2 C_f C_r} \quad (2-24)$$

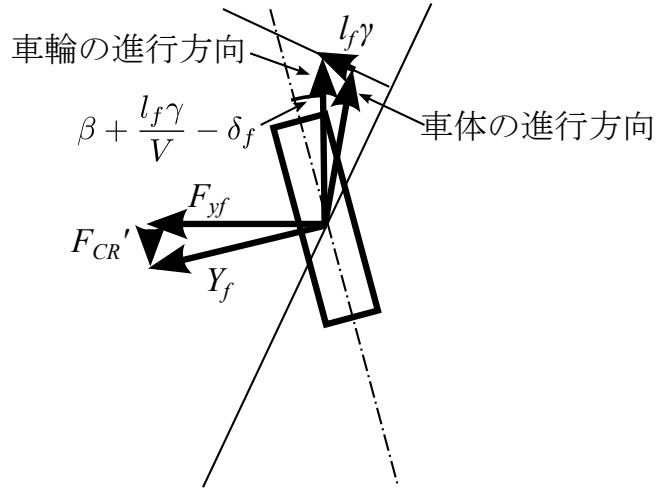


Fig. 12: コーナリング抵抗

2.3 入力電力モデル

モータの機械損，インバータ損失を無視するとインバータ入力電力 P_{in} は(2-25)式で表される [13]。

$$P_{in} = P_{out} + P_c + P_i \quad (2-25)$$

ここで， P_{out} は各モータの機械出力の和， P_c は各モータの銅損の和， P_i は各モータの鉄損の和である。

まず，機械出力のモデル化を行う。車輪の慣性力によるトルクは十分小さく，スリップ率 λ_{ij} も小さいとすると，車軸周りのトルク T_{ij} ，車輪角速度 ω_{ij} は以下の式で表される。

$$T_{ij} \simeq r F_{ij} \quad (2-26)$$

$$\omega_{ij} \simeq \frac{V_{ij}}{r} (1 + \lambda_{ij}) \quad (2-27)$$

従って，機械出力 P_{out} は(2-28)式で表される。

$$\begin{aligned} P_{out} &= \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} \omega_{ij} T_{ij} \\ &\simeq \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} \kappa_{ij} F_{xall} (V + \text{sgn}(j) \frac{d_i}{2} \gamma) \left(1 + \frac{\kappa_{ij} F_{xall}}{D_s' N_{zij} (a_x, a_y)} \right) \end{aligned} \quad (2-28)$$

次に，モータ銅損のモデル化を行う。銅損，鉄損のモデル化においては，Fig. 13 に示す PMSM の等価回路を用いる [26]。リラクタンストルクに比べてマグネットトルクが十分大きく， q 軸電流が d 軸電流に比べて十分大きいとすると，モータ銅損 P_c は次式で示される。

$$\begin{aligned} P_c &= \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} R_i i_{qij}^2 \\ &\simeq r^2 \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} \frac{R_i \kappa_{ij}^2}{K_{ti}^2} F_{xall}^2 \end{aligned} \quad (2-29)$$

ここで， R_i はモータの電機子巻線抵抗， i_{qij} は q 軸電流， K_{ti} はトルク定数である。

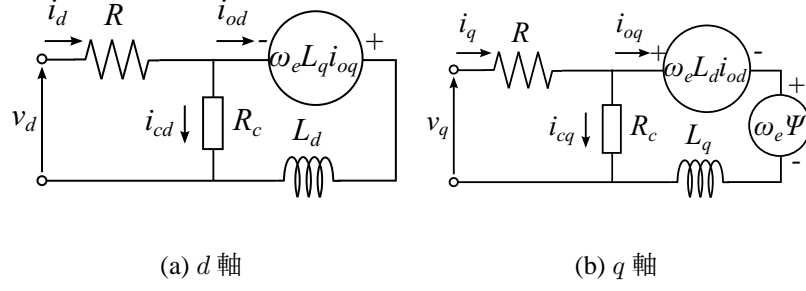


Fig. 13: PMSM の dq 軸等価回路 [26]

次に、モータ鉄損のモデル化を行う。 d 軸電機子反作用が永久磁石に依る速度起電力に比べて十分に小さいとして無視し、スリップ率 λ_{ij} も十分に小さいとして無視すると、モータ鉄損 P_i は次式で示される。

$$\begin{aligned}
 P_i &= \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} \frac{v_{odij}^2 + v_{oqij}^2}{R_{cij}} \\
 &\simeq \frac{1}{r^2} \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} \frac{P_{ni}^2}{R_{cij}} (V + \text{sgn}(j) \frac{d_i}{2} \gamma) \left\{ \left(\frac{r L_{qi} \kappa_{ij} F_{xall}}{K_{ti}} \right)^2 + \Psi_i^2 \right\}
 \end{aligned} \quad (2-30)$$

ここで、 v_{odij} 、 v_{oqij} はそれぞれ dq 軸の誘起電圧、 R_{cij} は等価鉄損抵抗、 ω_{eij} はモータの電気角速度、 L_{di} は d 軸インダクタンス、 L_{qi} は q 軸インダクタンス、 i_{odij} 、 i_{oqij} はそれぞれ dq 軸電流と銅損電流の dq 軸成分の差、 P_{ni} は極対数、 Ψ_i は磁束鎖交数である。等価鉄損抵抗 R_{cij} は (2-31) 式で表される。

$$\frac{1}{R_{cij}(\omega_{eij})} = \frac{1}{R_{c0i}} + \frac{1}{R_{c1i} |\omega_{eij}|} \quad (2-31)$$

ここで、右辺第 1 項は渦電流損、第 2 項はヒステリシス損を示す。

2.4 損失分離

シミュレーションにおいて、エネルギー損失を詳細に分析するために、(2-32)–(2-38) 式のように、機械出力 P_{out} を車両の運動エネルギー変化の仕事 P_M 、車輪の回転運動エネルギー総和変化の仕事 P_J 、走行抵抗で失われる仕事 P_{DR} 、コーナリング抵抗で失われる仕事 P_{CR} 、スリップで失われる仕事 P_S 、駆動力差モーメントに寄与する仕事 P_{N_z} に分離する。

$$P_{out} = P_M + P_J + P_{DR} + P_{CR} + P_S + P_{N_z} \quad (2-32)$$

$$P_M = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} M V^2 \right) \quad (2-33)$$

$$P_J = \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J_{\omega_i} \omega_{ij}^2 \right) \quad (2-34)$$

$$P_{DR} = F_{DR} V \quad (2-35)$$

$$P_{CR} = F_{CR} V \quad (2-36)$$

$$P_S = \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} \kappa_{ij} F_{xall} (V + \text{sgn}(j) \frac{d_i}{2} \gamma) \lambda_{ij} \quad (2-37)$$

$$P_{N_z} = N_z \gamma \quad (2-38)$$

また、これらの積分値を以下のように定義する。

$$W_X = \int_{t_0}^{t_f} P_X(t) dt \quad (2-39)$$

ここで、添え字の X には M, J, DR, CR, S, N_z , c, i が入る。

第3章

車両姿勢の制御系の設計

車両の運動は車両速度 V ，車体横滑り角 β ，ヨーレート γ で表現される。本論文では車両速度 V を駆動力 F_{xall} ，ヨーレート γ をヨーモーメント M_z ，車体横滑り角 β を横力 F_y で制御する。走行試験においては，車体横滑り角は光学式車速計，ヨーレートは車体重心に設置したジャイロセンサから取得する。車両横滑り角制御に対してラテラルフォースオブザーバ (LFO) を設計し，ヨーレート制御にはヨーモーメントオブザーバ (YMO) を用いた車両制御法 [27] を利用する。2自由度制御を組み，横滑り角とヨーレートを制御する。制御法のブロック線図を Fig. 14 に示す。

3.1 速度制御系

モデル化誤差の影響を受けずに，車体速を指令値に追従させるために，車体速制御系を構成する。車体速指令値 V^* を入力として，フィードフォワードと車体速フィードバックにより総制駆動力指令値 F_{xall}^* を生成する。総制駆動力指令値 F_{xall}^* は駆動力差モーメントが N_z^* となるように左右輪駆動力指令値 F_{ij}^* に配分される。前後輪のトルク指令値 T_{ij}^* は前後輪のスリップ率を考慮し次式で与える。

$$T_{ij}^* = rF_{ij}^* + \frac{J\omega_i a_x^*}{r}(1 + \lambda_{ij}^*) \quad (3-1)$$

ここで，右辺第2項は車輪慣性力を補償する項である。本論文では， λ_{ij}^* は以下の式で与えた。

$$\lambda_{ij}^* = \begin{cases} 0.05 & (a_x^* > 0) \\ 0 & (a_x^* = 0) \\ -0.05 & (a_x^* < 0) \end{cases} \quad (3-2)$$

また，センサのノイズによる影響を考慮し， a_x^* は指令値を用いた。車体加速度制御器 $C_{PI}(s)$ はPI制御器であり，以下の式で示されるプラントに対して極配置法により極が -5 rad/s となるように設計した。

$$\frac{V}{F_{all}} = \frac{1}{Ms} \quad (3-3)$$

3.2 ラテラルフォースオブザーバ

外乱を考慮に入れた車両横方向の運動方程式は以下になる。

$$MV(\dot{\beta} + \gamma) = F_y + Y_d \quad (3-4)$$

ここで、(3-4) 式を以下のように変形する。

$$MV\dot{\beta} = F_y + Y_{td} \quad (3-5)$$

$$Y_{td} := -MV\gamma + Y_d \quad (3-6)$$

外乱オブザーバを構成すれば以下のようにノミナル化される。

$$\beta = \frac{1}{M_n V_n s} F_y = P_\beta(s) F_y \quad (3-7)$$

3.3 ヨーモーメントオブザーバ

車両に働く制御入力と外乱を考慮すると、車両重心点における鉛直軸周りのヨー運動方程式は

$$I \frac{d\gamma}{dt} = M_z + N_{td} \quad (3-8)$$

と記述できる。ただし、 N_{td} は外乱ヨーモーメントである。外乱オブザーバを構成すれば、外乱モーメント N_{td} は抑圧され(3-8) 式は以下のようにノミナル化される。

$$\gamma = \frac{1}{I_n s} M_z = P_\gamma(s) M_z \quad (3-9)$$

3.4 車両のヨーレートと車体横滑り角の同時制御

YMO 及び LFO によりノミナル化したプラントを制御するのに2自由度制御を用いた。フィードフォワード項において、逆システムをプロパーにするため用いたローパスフィルタ $G_\beta(s)$, $G_\gamma(s)$ のカットオフ周波数は 10 rad/s である。フィードバック制御において指令値と出力を比較する際、指令値にフィードフォワード制御に用いたものと同じローパスフィルタをかけた。ヨーレートのフィードバック制御器 C_γ は PI 制御、車体横滑り角のフィードバック制御器 C_β は PI 制御とし、極配置法によりそれぞれの極が -5 rad/s となるように設計した。

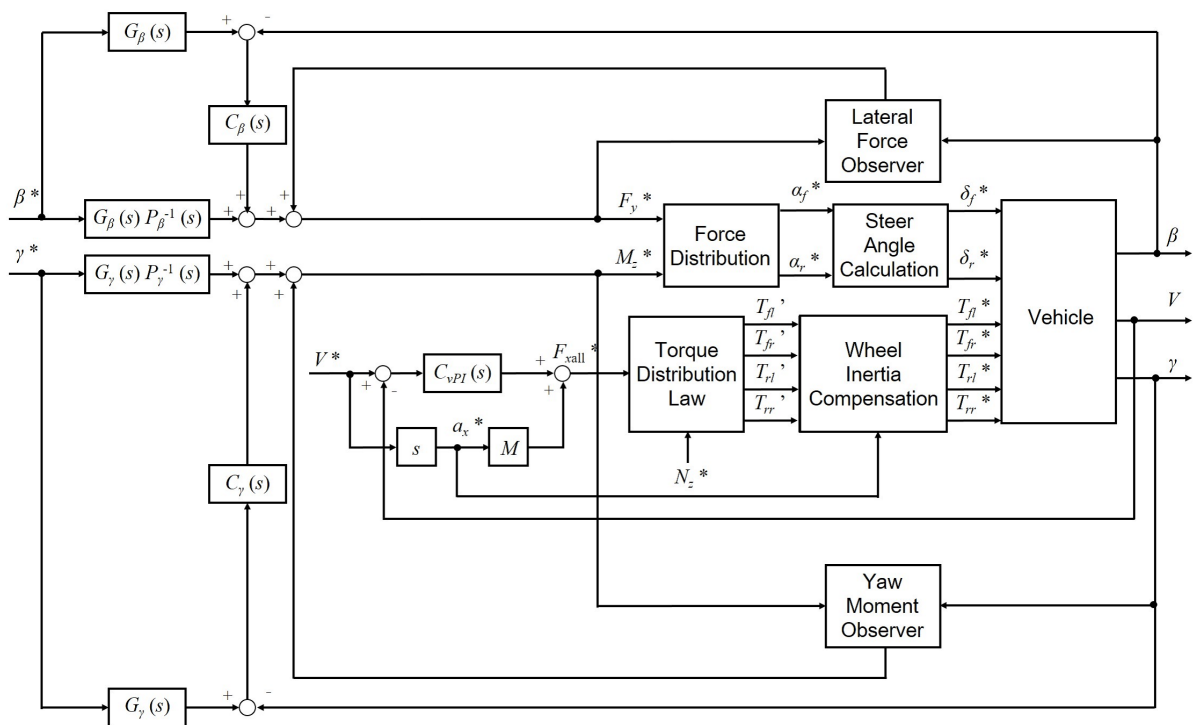


Fig. 14: 車両姿勢制御系

第4章

旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御

本章では自動運転を想定し、旋回を含む経路において速度軌道を最適化することによって消費電力を低減する航続距離延長自動運転制御を提案する。なお、本章では速度軌道最適化のみによる効果を検証するため、各輪への駆動力配分は等しくし、 $\kappa_{ij} = 0.25$ とする。本手法の有効性をシミュレーションと実験によって示す。

4.1 消費エネルギー最小速度軌道の導出

初期条件、終端条件を満たしつつ、消費エネルギー W_{in} を最小とする速度軌道 $V(t)$ を求める。よって、評価関数、拘束条件は以下ようになる。

$$\min. \quad W_{in} = \int_{t_0}^{t_f} P_{in}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{M} [F_{xall} - \text{sgn}(V)(F_{DR}(V) + F_{CR}(V, R))] \\ V(t) \\ -\frac{2(C_f + C_r)}{MV} \beta - \left[\frac{2(l_f C_f - l_r C_r)}{MV^2} - 1 \right] \gamma + \frac{2C_f}{MV} \delta_f + \frac{2C_r}{MV} \delta_r \\ -\frac{2(l_f C_f + l_r C_r)}{I} \beta - \frac{2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{IV} \gamma + \frac{2l_f C_f}{I} \delta_f - \frac{2l_r C_r}{I} \delta_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} \chi(\mathbf{x}(t_0)) &= \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 \\ &= \begin{bmatrix} V(t_0) - V_0 \\ X(t_0) - X_0 \\ \beta(t_0) - \beta_0 \\ \gamma(t_0) - \gamma_0 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4-3)$$

$$\begin{aligned}\psi(\mathbf{x}(t_f)) &= \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f \\ &= \begin{bmatrix} V(t_f) - V_f \\ X(t_f) - X_f \\ \beta(t_f) - \beta_f \\ \gamma(t_f) - \gamma_f \end{bmatrix} = \mathbf{0}\end{aligned}\quad (4-4)$$

ここで,

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \\ \beta(t) \\ \gamma(t) \end{bmatrix}\quad (4-5)$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} F_{xall}(t) \\ \delta_f(t) \\ \delta_r(t) \end{bmatrix}\quad (4-6)$$

である。また、 \mathbf{x}_0 は初期条件、 \mathbf{x}_f は終端条件である。但し、本章では計算を簡易化するため、準定常円旋回を仮定し、

$$\beta = 0\quad (4-7)$$

$$\gamma = \frac{V}{R}\quad (4-8)$$

として、総制駆動力 F_{xall} のみを最適化する。この最適制御問題を勾配法 [28] を用いて解くことで、消費エネルギーを最小化する速度軌道を導出する。

4.2 旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転 制御の比較条件

本章では Fig. 15 のようなコースでの走行を考慮する。また、終端時間 t_f を 35.0 s とし、以下の 3 通りの比較条件で最適化計算を行う。

従来法 1 一定加速度 a_x で加速した後、一定速度 V_{max} で走行し、一定加速度 $-a_x$ で減速する速度軌道を考える。(4-9) 式で表される速度軌道のうち、旋回を考慮した際に消費エネルギーが最少となる速度軌道で走行する。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 + a_x t & (t_0 < t < t_1) \\ V_{max} & (t_1 < t < t_2) \\ V_{max} - a_x t & (t_2 < t < t_f) \end{cases}\quad (4-9)$$

ここで,

$$t_1 = \frac{V_{max} - V_0}{a_x} + t_0\quad (4-10)$$

$$t_2 = t_f - \frac{V_{max} - V_f}{a_x}\quad (4-11)$$

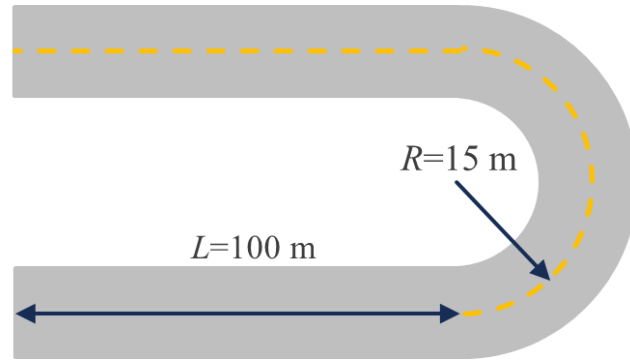


Fig. 15: 旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御で想定する走行コース

である。

従来法 2 一定加速度 a_x で加速した後、一定速度 V_{\max} で走行し、コーナー開始地点からコーナー中間地点まで走行抵抗とコーナリング抵抗のみで減速し、それ以降は速度軌道を時間軸を対象に折り返した速度軌道を考える。(4-12) 式で表される速度軌道のうち、旋回を考慮した際に消費エネルギーが最少となる速度軌道で走行する

$$V(t) = \begin{cases} V_0 + a_x t & (t_0 < t < t_1) \\ V_{\max} & (t_1 < t < t_2) \\ V_{\max} - \frac{1}{M} \int_{t_2}^t (F_{\text{DR}}(V) + F_{\text{CR}}(V, R)) dt & (t_2 < t < t_3) \\ V(2t_3 - t) & (t_3 < t < t_f) \end{cases} \quad (4-12)$$

ここで、

$$t_1 = \frac{V_{\max} - V_0}{a_x} + t_0 \quad (4-13)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{1}{V_{\max}} \left(L - \frac{V_{\max}^2 - V_0^2}{2a_x} \right) \quad (4-14)$$

$$t_3 = \frac{t_f + t_0}{2} \quad (4-15)$$

である。

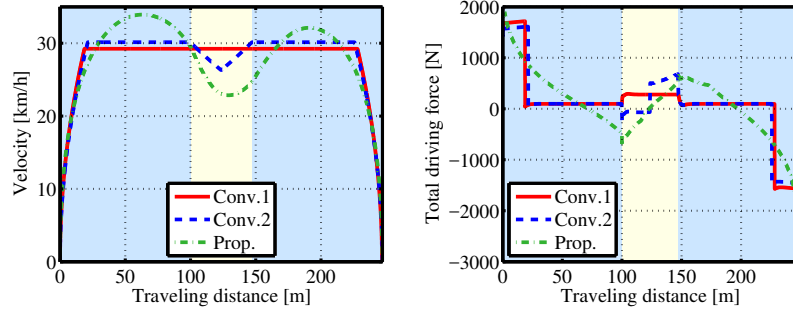
提案法 4.1 節で示した旋回を考慮した最適制御問題を解き、導出された速度軌道で走行する。

4.3 旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション

Fig. 16 にシミュレーション結果を示す。従来法 2 では、コーナー入り口からコーナー中間地点まで駆動力を出さないため、従来法 1 と比較して旋回中の速度が低くなっている。コーナリング抵抗は速度 V の 4 乗に比例するため、Fig. 16(g) に示すように、コーナリング抵抗による損失 W_{CR} が従来法 1 と比較して、13.2 % 削減されている。そのため、従来法 1 と比較して、消費エネルギーが 1.45 % 削減されている。

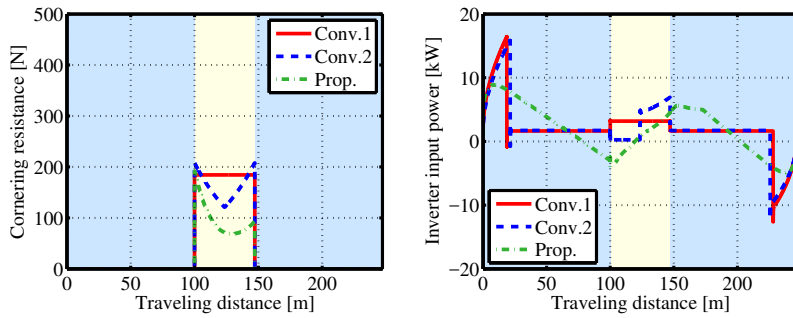
提案法では、従来法よりも高い速度まで加速した後、コーナー手前から減速を開始し、コーナー出口付近から再加速する特徴的な速度軌道が得られた。提案法の速度軌道は、従来法 1 と比較して旋回中

の速度が更に低くなっている。そのため、従来法 1 と比較して、Fig. 16(g) に示すように、コーナリング抵抗による損失 W_{CR} が 49.0 % 削減されている。旋回中の速度を更に下げると、コーナリング抵抗による損失の削減率は更に大きくなるものの、最高速度、最大加減速度が大きくなり、銅損、走行抵抗による損失が増加する。本章で最適化を行った条件では、加減速度の最大値が従来法 1 と比較して 51.0 % 大きくなっているものの、大きな駆動力を出して走行する時間が短いため、銅損 W_c の増加は 1.53 % に留まっている。また、最高速度は従来法 1 と比較して 16.1 % 増加しているものの、旋回中の速度が従来法よりも低いこともあり、走行抵抗による損失 W_{DR} の増加は 0.57 % と小さな値となっている。提案法では、銅損、走行抵抗による損失の増加量と比較して、コーナリング抵抗による損失の削減量が十分に大きいため、従来法 1 と比較して消費エネルギーが 5.63 % 削減されている。



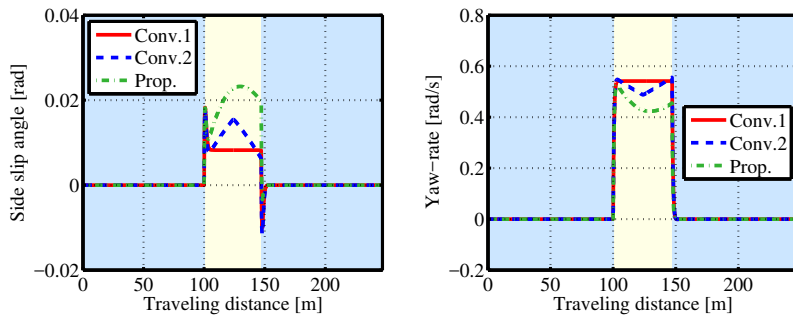
(a) Velocity V .

(b) Total driving force F_{xall} .



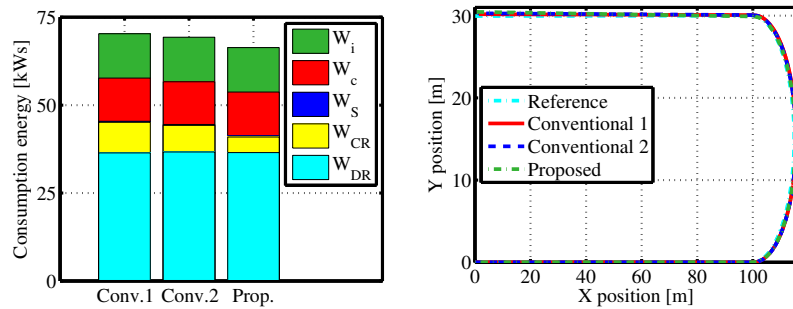
(c) Cornering resistance F_{CR} .

(d) Inverter input power P_{in} .



(e) Side slip angle β .

(f) Yaw rate γ .



(g) Consumption energy W_{in} .

(h) XY position.

Fig. 16: 旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション結果

4.4 旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御の実験

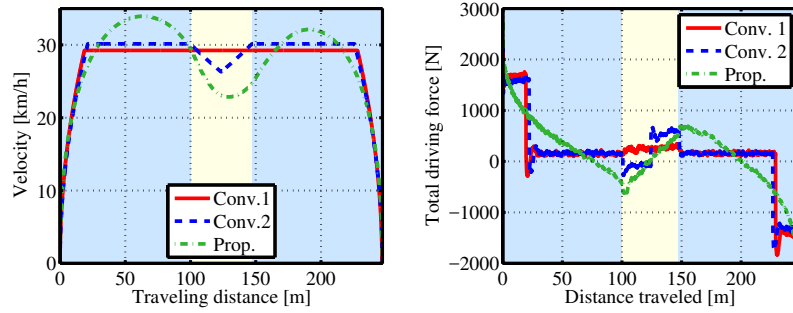
提案法の有効性を検証するため、シミュレーションと同様の条件で交通安全環境研究所自動車試験場にて走行試験を行った。3章で述べた速度制御系を用いて速度軌道に追従させ、軌道へ追従するように前輪舵角を手動で入力し実験を行った。

実験結果を Fig. 17 に示す。測定は、それぞれの条件に対して5回ずつ行った。また、インバータ入力電力 P_{in} は測定値を用いて次式で求めた。

$$P_{in} = V_{dc} \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} I_{dcij} \quad (4-16)$$

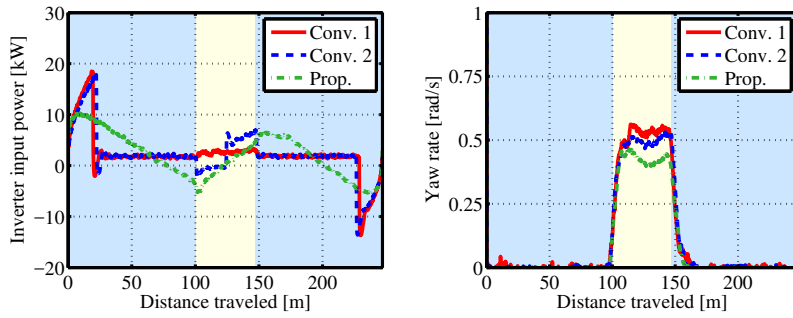
ここで、 V_{dc} はインバータ入力電圧、 I_{dcij} は左右輪のインバータ入力電流の和である。なお、本章では4輪の車輪速の平均値を車体速 V として用いた。

Fig. 17(b) より、総制駆動力 F_{xall} はシミュレーション結果とよく一致しており、走行抵抗、コーナリング抵抗のモデルの妥当性が示された。また、Fig. 17(c) より、消費電力は加減速時にシミュレーションと僅かにズレがあるものの、概ねシミュレーション結果と一致している。Fig. 17(e) より、従来法1と比較して、従来法2では1.58%、提案法では2.33%の消費エネルギー削減を達成した。シミュレーションと比較して、消費電力の削減率が低下している原因として、前述の消費電力のモデル化誤差の影響があげられる。



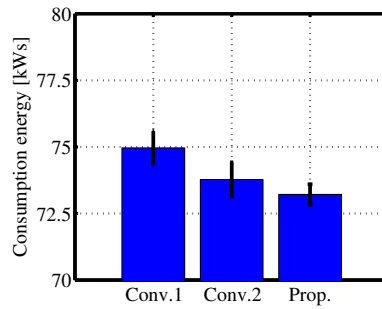
(a) Velocity V .

(b) Total driving force F_{xall} .



(c) Inverter input power P_{in} .

(d) Yaw rate γ .



(e) Consumption energy W_{in} .

Fig. 17: 旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御の実験結果

第 5 章

旋回を考慮した速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御

前章では速度軌道のみ最適化によって航続距離の延長を図ったが、IWM 搭載車両では各輪への駆動力配分に自由度が存在する。本章では後輪 2 輪に IWM が搭載された車両を想定し、速度軌道及び左右駆動力配分を同時に最適化することによって消費電力を低減する航続距離延長自動運転制御を提案する。本来であれば、速度と駆動力配分の 2 次元の探索を行う必要があるが、提案手法では制御入力を取り方を工夫することで、この問題を 1 次元の最適化問題 2 つに分離することが出来、速度軌道が定まれば左右の配分比が自動的に決定されることを示す。なお、実験車両は前後輪に効率特性の異なるインホイールモータを搭載しているが、左右駆動力差モーメントによる効果に着目するため、本章では後輪 2 輪のみを用い、 $\kappa_{fj} = 0$ とする。本手法の有効性をシミュレーションと実験によって示す。

5.1 消費エネルギー最小速度軌道の導出

初期条件、終端条件を満たしつつ、消費エネルギー W_{in} を最小とする速度軌道 $V(t)$ 、左右駆動力配分比 $k(t)$ を求める。よって、評価関数、拘束条件は以下ようになる。

$$\min. \quad W_{in} = \int_{t_0}^{t_f} P_{in}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \quad (5-1)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \\ &= \begin{bmatrix} a_x(t) \\ V(t) \\ -\frac{2(C_f+C_r)}{MV} \beta - \left(\frac{2(l_f C_f - l_r C_r)}{MV^2} - 1\right) \gamma + \frac{2C_f}{MV} \delta_f + \frac{2C_r}{MV} \delta_r \\ -\frac{2(l_f C_f + l_r C_r)}{I} \beta - \frac{2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{IV} \gamma + \frac{2l_f C_f}{I} \delta_f - \frac{2l_r C_r}{I} \delta_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5-2)$$

$$\begin{aligned}\chi(\mathbf{x}(t_0)) &= \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 \\ &= \begin{bmatrix} V(t_0) - V_0 \\ X(t_0) - X_0 \\ \beta(t_0) - \beta_0 \\ \gamma(t_0) - \gamma_0 \end{bmatrix} = \mathbf{0}\end{aligned}\tag{5-3}$$

$$\begin{aligned}\psi(\mathbf{x}(t_f)) &= \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f \\ &= \begin{bmatrix} V(t_f) - V_f \\ X(t_f) - X_f \\ \beta(t_f) - \beta_f \\ \gamma(t_f) - \gamma_f \end{bmatrix} = \mathbf{0}\end{aligned}\tag{5-4}$$

ここで,

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \\ \beta(t) \\ \gamma(t) \end{bmatrix}\tag{5-5}$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} a_x(t) \\ k(t) \\ \delta_f(t) \\ \delta_r(t) \end{bmatrix}\tag{5-6}$$

である。なお、 k は左右駆動力配分比で、本章では

$$\kappa_{rl} = 1 - k\tag{5-7}$$

$$\kappa_{rr} = k\tag{5-8}$$

とする。以上の最適制御問題を勾配法 [28] を用いて解くことで、消費エネルギーを最小化する速度軌道、左右駆動力配分比を導出する。

但し、本章では計算を簡易化するため、準定常円旋回を仮定し、

$$\beta = 0\tag{5-9}$$

$$\gamma = \frac{V}{R}\tag{5-10}$$

とし、 a_x , k のみを最適化する。従って、状態変数、制御入力、状態方程式は以下のように書き直すことが出来る。

$$\mathbf{x}_1(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \end{bmatrix}\tag{5-11}$$

$$\mathbf{u}_1(t) = \begin{bmatrix} a_x(t) \\ k(t) \end{bmatrix}\tag{5-12}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t) = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1(t), \mathbf{u}_1(t)) = \begin{bmatrix} a_x(t) \\ V(t) \end{bmatrix}\tag{5-13}$$

5.2 左右駆動力配分最適化による消費電力最小化

5.2.1 左右駆動力配分最適化法

本節では速度軌道と左右駆動力配分比の2変数の最適化問題が、速度軌道と左右駆動力配分比の1変数の最適化問題2つに分離できることを示す。まず、随伴変数を $\boldsymbol{\nu} = [\nu_1 \ \nu_2]^T$ として、(5-14) 式でハミルトニアンを定義する。

$$H(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1, \boldsymbol{\nu}) = P_{\text{in}}(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1) + \boldsymbol{\nu}(t)^T \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1) \quad (5-14)$$

左右の駆動力配分を考えない前章のように制御入力 of 1つを総制駆動力 F_{xall} とし、 $\mathbf{u}(t) = [F_{\text{xall}}(t) \ k(t)]^T$ とすると、最適解が満たすべきオイラー・ラグランジュ方程式は、ハミルトニアンを用いて以下の式で表される。

$$\frac{\partial H}{\partial F_{\text{xall}}} = \frac{\partial P_{\text{in}}}{\partial F_{\text{xall}}} + \nu_1 = 0 \quad (5-15)$$

$$\frac{\partial H}{\partial k} = \frac{\partial P_{\text{in}}}{\partial k} - \nu_1 \text{sgn}(V) \frac{\partial F_{\text{CR}}(V, R, k)}{\partial k} = 0 \quad (5-16)$$

このように制御入力を選ぶと、随伴変数が(5-15), (5-16) 式の両方に含まれているため、総制駆動力 F_{all} , 左右制駆動力配分比 k の2次元の探索を行う必要がある。

本手法のように $\mathbf{u}(t) = [a_x(t) \ k(t)]^T$ とすると、最適解が満たすべきオイラー・ラグランジュ方程式は、ハミルトニアンを用いて以下の式で表される。

$$\frac{\partial H}{\partial a_x} = \frac{\partial P_{\text{in}}}{\partial a_x} + \nu_1 = 0 \quad (5-17)$$

$$\frac{\partial H}{\partial k} = \frac{\partial P_{\text{in}}}{\partial k} = 0 \quad (5-18)$$

随伴変数が(5-18) 式には含まれていないため、左右駆動力配分比に関しては(5-18) 式を満たす配分比 k_{opt} を与えれば良い。最適解を求める際、 $V(t)(t_0 \leq t \leq t_f)$ に対して、常に k_{opt} を与えることで、数値計算の際の探索の次元を2次元から1次元に減らすことが出来る。

最適な左右駆動力配分比 k_{opt} を求めるに際し、まず、消費電力モデルから F_{xall} を消去し、前後加速度 a_x で表すことを考える。(2-2), (2-23) 式より、総制駆動力は a_x, V, k, R の関数として表される。

$$\begin{aligned} Ma_x &= F_{\text{xall}} - F_{\text{DR}} - F_{\text{CR}}(V, F_{\text{all}}, k) \\ &= F_{\text{xall}} - F_{\text{DR}} - F_{\text{CR}}|_{k=0.5} - D_c \frac{d_r^2}{4} (-1 + 2k)^2 F_{\text{xall}}^2 + \frac{1 + 2AV^2}{R} \frac{d_r}{2} (-1 + 2k) F_{\text{xall}} \end{aligned} \quad (5-19)$$

$$F_{\text{xall}} \simeq \frac{2R(Ma_x + F_{\text{DR}} + F_{\text{CR}}|_{k=0.5})}{d_r(1 + 2AV^2)(-1 + 2k) + 2R} \quad (5-20)$$

よって、加速度 a_x で走行時のインバータ入力電力 P_{in} は以下のように、車体速 V , 左右輪駆動力配分比 k , 旋回半径 R の関数で表される。

$$P_{\text{in}}(V, a_x, k, R) = P_{\text{out}}(V, a_x, k, R) + P_c(V, a_x, k, R) + P_i(V, a_x, k, R) \quad (5-21)$$

ここで、 $\frac{\partial P_{\text{in}}}{\partial k} = 0$ とすると、瞬間消費電力 P_{in} を最小化する左右輪駆動力配分比 k_{opt} が一意に求まる。

$$\begin{aligned} k_{\text{opt}} &= \frac{8AV^3 d_r R [2R - d_r(1 + 2AV^2)] + 8R^2 (Ma_x + F_{\text{DR}})}{-16d_r^2 AV^3 R (1 + 2AV^2) + 8R^2 (Ma_x + F_{\text{DR}}} \\ &\quad + \frac{F_{\text{CR}}|_{k=0.5} [2R + d_r(1 + 2AV^2)] \left[\frac{\omega_{rl}}{D_s N_{zrl}} + \frac{r^2 R_r}{K_{tr}^2} + \left(\frac{\omega_{rl} P_{nr} L_{qr}}{K_{tr}} \right)^2 \frac{1}{R_{crl}} \right]}{+ F_{\text{CR}}|_{k=0.5} \sum_{j=l,r} [2R - \text{sgn}(j) d_r (1 + 2AV^2)] \left[\frac{\omega_{rj}}{D_s N_{zrj}} + \frac{r^2 R_r}{K_{tr}^2} + \left(\frac{\omega_{rj} P_{nr} L_{qr}}{K_{tr}} \right)^2 \frac{1}{R_{crj}} \right]} \end{aligned} \quad (5-22)$$

5.2.2 駆動力差モーメントと消費電力の関係のシミュレーション

旋回半径 $R = 15$ m, 速度 $V = 15$ km/h にて旋回を行った場合の駆動力差モーメント N_z と総駆動力 F_{xall} , 機械出力 P_{out} , 消費電力 P_{in} の関係を Fig. 18 に示す。

Fig. 18(a) より, N_z が大きくなるにつれて, コーナリング抵抗を削減できていることが確認できる。これに伴い必要な機械出力も減少するため, 駆動力差モーメントを与えることで消費電力が低減される。一方で, ある値以上に N_z を大きくすると, コーナリング抵抗の削減による機械出力の削減量に比べて, 1 輪辺りの駆動力が増加することによる銅損の増加量が大きくなるので, 消費電力が増加する。以上のことから, 機械出力の減少と銅損の増加のトレードオフによって最適な左右駆動力配分比が決まるといえる。

5.2.3 駆動力差モーメントと消費電力の関係の実験

シミュレーションと同様に旋回半径 $R = 15$ m, 速度 $V = 15$ km/h にて旋回を行った場合の駆動力差モーメント N_z と総駆動力 F_{xall} , 消費電力 P_{in} の関係を Fig. 19 に示す。図中のバーは標準偏差を表す。なお, 実験においては, インバータ入力電力 P_{in} は測定値を用いて次式で求めた。

$$P_{in} = V_{dc} \sum_{j=l,r} I_{dcrj} \quad (5-23)$$

ここで, V_{dc} はインバータ入力電圧, I_{dcrj} は左右輪のインバータ入力電流である。また, 本章では非駆動輪である前輪 2 輪の車輪速の平均値を車体速 V として用いた。Fig. 19 より, 駆動力, 消費電力共にシミュレーションと同様の傾向が得られており, 近似の妥当性が示された。

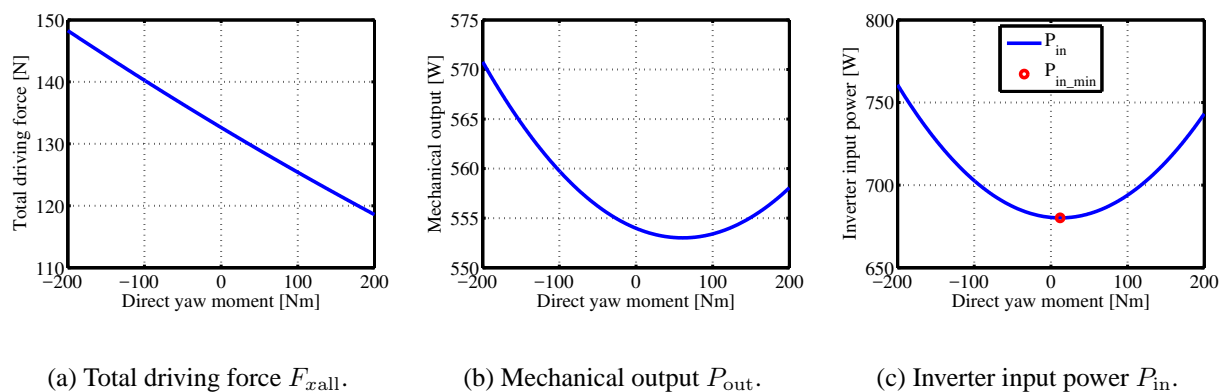


Fig. 18: 駆動力差モーメントと駆動力, 消費電力のシミュレーション結果

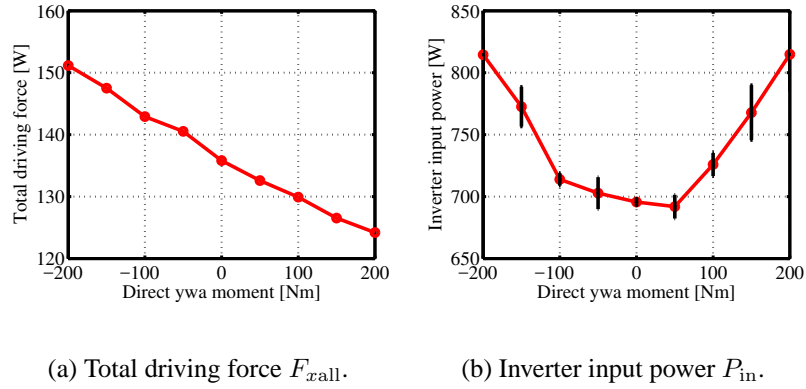


Fig. 19: 駆動力差モーメントと駆動力, 消費電力の実験結果

5.3 速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御の比較条件

本章では, Fig. 20 のようなコースでの走行を考慮する。また, 初期速度 V_0 , 終端速度 V_f をそれぞれ 20 km/h, 走行時間 $t_f - t_0$ を 8.0 s とし, 以下の 3 通りの比較条件で最適化計算を行う。従来法 一定減速度 $-a_x$ で減速した後, 一定加速度 a_x で加速する速度軌道を考える。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 - a_x(t - t_0) & (t_0 < t < t_1) \\ V_0 + a_x(t - t_f) & (t_1 < t < t_f) \end{cases} \quad (5-24)$$

ここで,

$$a_x = \frac{E + \sqrt{E^2 + (t_f - t_0)^2(V_f - V_0)^2}}{(t_f - t_0)^2} \quad (5-25)$$

$$t_1 = \frac{t_0 + t_f}{2} + \frac{V_0 - V_f}{2a_x} \quad (5-26)$$

$$E = -2(X_f - X_0) + (V_0 + V_f)(t_f - t_0) \quad (5-27)$$

である。

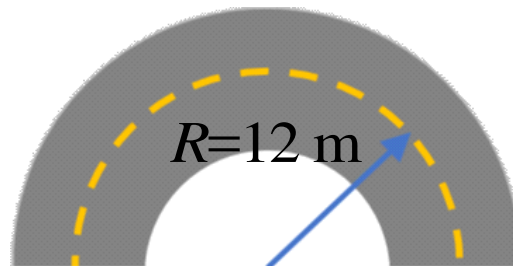


Fig. 20: 旋回を考慮した速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御で想定する走行コース

提案法 1 左右駆動力配分比 $k = 0.5$ として，速度軌道のみを最適化する。

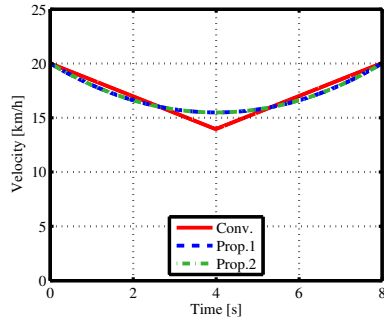
提案法 2 左右駆動力配分比，速度軌道を同時に最適化する。

5.4 速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動 運転制御のシミュレーション

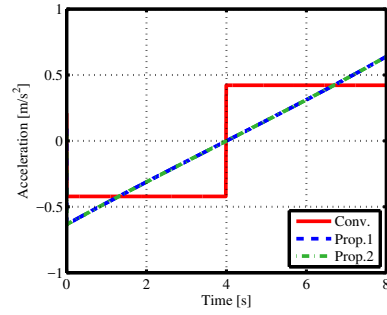
3章に示した制御系を用いて， β ， γ ， V ， N_z を制御し，シミュレーションを行った。駆動力差モーメントの指令値 N_z^* はオフラインで導出した F_{xall}^* ， k^* から求めた。Fig. 21 にシミュレーション結果を示す。

提案法 1 においては，早い段階で大きく減速することで，コーナリング抵抗による損失を 3.7 % 削減している。また，大きな駆動力を出す時間を削減することで，銅損が 23 % 削減されている。結果として，従来法と比較して 4.6 % の消費エネルギー削減を達成した。

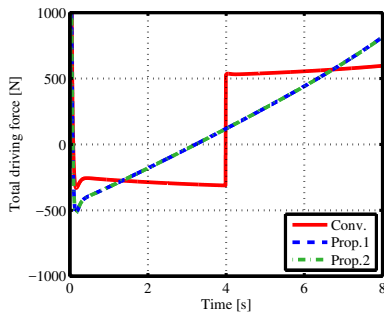
提案法 2 においては，速度軌道は提案法 1 と殆ど変わらないものの，Fig. 21(e) に示すように正の駆動力差モーメントを発生させている。これによって，コーナリング抵抗が僅かに減少するため，提案法 1 と比較するとコーナリング抵抗による損失が 6.4 % 減少している。一方で，駆動力差モーメントを発生させることで一輪辺りの駆動力が増加するため，銅損が 1.0 % 増加している。結果として，従来法と比較して 4.7 % の消費エネルギー削減を達成した。



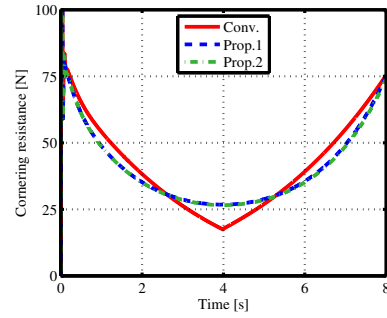
(a) Velocity V .



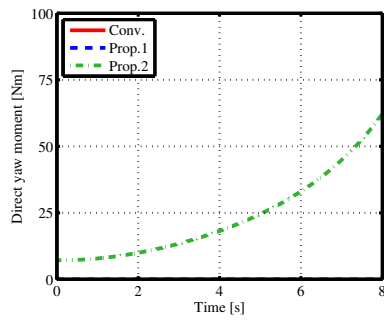
(b) Acceleration a_x .



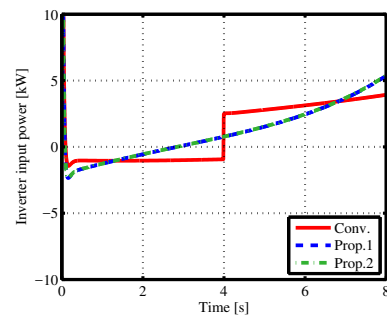
(c) Total driving force $F_{x,all}$.



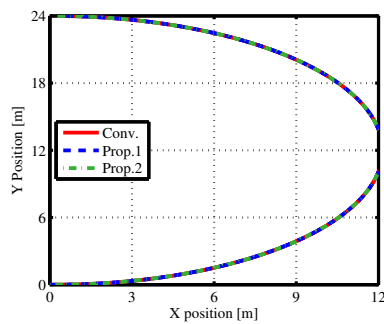
(d) Cornering resistance F_{CR} .



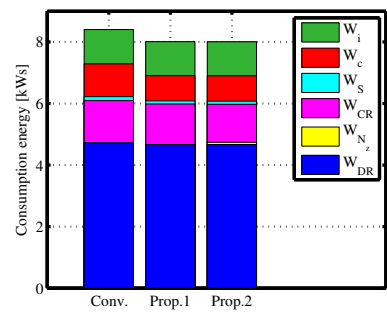
(e) Direct yaw moment N_z .



(f) Inverter input power P_{in} .



(g) XY position.



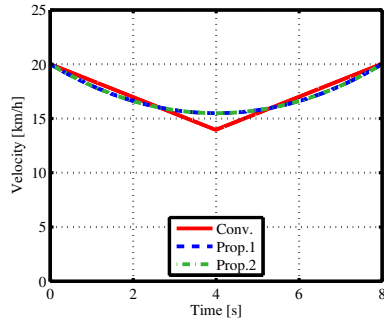
(h) Consumption energy W_{in} .

Fig. 21: 速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション結果

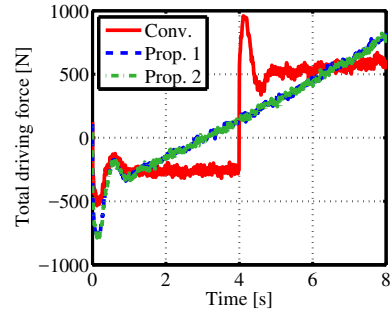
5.5 速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御の実験

シミュレーションと同様の条件で実験を行った。Fig. 22 に実験結果を示す。測定はそれぞれの条件に対して6回ずつ行った。

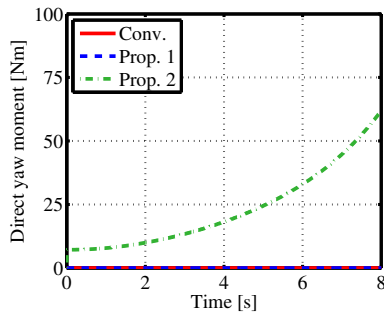
従来法と比較して、提案法1で8.1%、提案法2で9.1%の消費電力削減を達成しており、シミュレーションと比較して改善率が大きくなっている。これは従来法において加速度が不連続に変化している時刻 ($t = 4$ s) から少しの間、速度制御系の影響で駆動力が上振れしており、これによって従来法の消費電力が悪化しているためであると考えられる。このことを確認するため、実験的に得られた各輪の角速度 ω_{rj} 、トルク T_{rj} から、消費電力モデルを用いて瞬間消費電力 P_{in} 、消費エネルギー W_{in} を計算した。その結果を Fig. 23 に示す。Fig. 23(b) より、計算値では、従来法と比較して、提案法1で5.0%、提案法2で5.3%の消費電力削減となっており、従来法からの改善率はシミュレーション結果と近くなっている。このことから、 $t = 4$ s 付近での駆動力の上振れが従来法の消費電力の悪化に寄与しているということが出来る。しかしながら、消費電力の大きさで見ると、計算値は実験値よりも小さくなっており、これは消費電力のモデル化に際して、インバータ損失を無視しているためであると考えられる。この影響もあり、シミュレーションと比較して実験では消費電力が悪化していると考えられる。



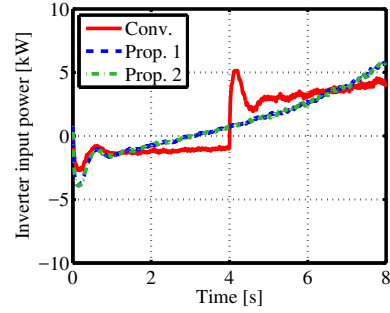
(a) Velocity V .



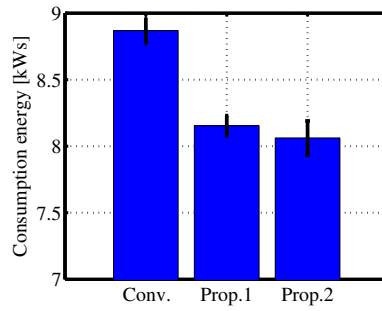
(b) Total driving force F_{xall} .



(c) Direct yaw moment N_z .



(d) Inverter input power P_{in} .



(e) Consumption energy W_{in} .

Fig. 22: 速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御の実験結果 (測定値)

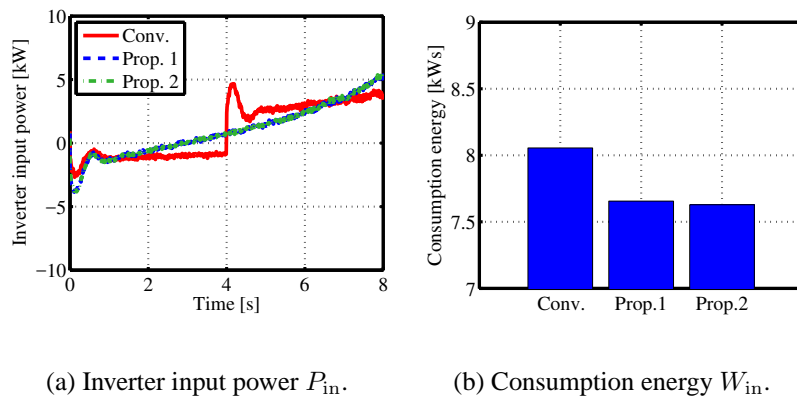


Fig. 23: 速度軌道及び左右駆動力配分最適化による航続距離延長自動運転制御の実験結果 (計算値)

第 6 章

速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御

本章では車両追い越し時等の走行軌跡に自由度がある場合を想定し、速度軌道に加えて、車体横滑り角、ヨーレートを同時に最適化することによって消費電力を低減する航続距離延長自動運転制御を提案する。なお、本章では速度軌道、走行軌跡最適化による効果を検証するため、各輪への駆動力配分は等しくし、 $\kappa_{ij} = 0.25$ とする。一般的な自動車の走行では、主にヨーレートを用いて車の軌道を変更するが、前後輪アクティブステアの車両であれば、横滑り角を積極的に使用して走行することで、タイヤの横滑りによる抵抗を抑えつつ軌道を変更することができることを示す。本手法の有効性をシミュレーションと実験によって示す。

6.1 コーナリング抵抗の近似

前章まででは準定常円旋回を近似し、コーナリング抵抗を近似したが、本章では横滑り角、ヨーレートも含めた最適化を行うので、前章までで扱った (2-23) 式では不適切である。そこで、本章で制御入力として用いる横力、ヨーモーメントの関数としてコーナリング抵抗を表すことを考える。

横力の総和を $F_{yall} = 2Y_f + 2Y_r$ と定義すると、(2-4)、(2-5) 式より、車輪横滑り角と横力の総和、ヨーモーメントは以下の式で示される。

$$\begin{bmatrix} -2C_f & -2C_r \\ -2C_f l_f & 2C_r l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_f \\ \alpha_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{yall} \\ M_z \end{bmatrix} \quad (6-1)$$

従って、前後輪の車輪横滑り角は以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \alpha_f \\ \alpha_r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -2C_f & -2C_r \\ -2C_f l_f & 2C_r l_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{yall} \\ M_z \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2lC_f C_r} \begin{bmatrix} -C_r l_r F_{yall} - C_r M_z \\ -C_f l_f F_{yall} + C_f M_z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6-2)$$

(2-17), (2-20), (6-2) 式より, コーナリング抵抗は横力の総和, ヨーモーメントの関数として記述できる。

$$F_{CR} \simeq \frac{1}{2l^2 C_f C_r} \{C_f(l_f F_{yall} - M_z)^2 + C_r(l_r F_{yall} + M_z)^2\} \quad (6-3)$$

6.2 消費エネルギー最初速度軌道の導出

初期条件, 終端条件を満たしつつ, 消費エネルギー W_{in} を最小とする速度軌道 $V(t)$, 車両横滑り角 $\beta(t)$, ヨーレート $\gamma(t)$ を求める。よって, 評価関数, 拘束条件は以下ようになる。

$$\min. \quad W_{in} = \int_{t_0}^{t_f} P_{in}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \quad (6-4)$$

$$\text{s.t.} \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$$

$$= \begin{bmatrix} V \cos(\theta + \beta) \\ V \sin(\theta + \beta) \\ \frac{F_{yall}}{MV} - \gamma \\ \frac{M_z}{I} \\ \gamma \\ \frac{1}{M} \{F_{xall} - F_{DR}(V) - F_{CR}(F_{yall}, M_z)\} \end{bmatrix} \quad (6-5)$$

$$\chi(\mathbf{x}(t_0)) = \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0$$

$$= \begin{bmatrix} X_{pos}(t_0) - X_0 \\ Y_{pos}(t_0) - Y_0 \\ \beta(t_0) - \beta_0 \\ \gamma(t_0) - \gamma_0 \\ \theta(t_0) - \theta_0 \\ V(t_0) - V_0 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (6-6)$$

$$\psi(\mathbf{x}(t_f)) = \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f$$

$$= \begin{bmatrix} X_{pos}(t_f) - X_f \\ Y_{pos}(t_f) - Y_f \\ \beta(t_f) - \beta_f \\ \gamma(t_f) - \gamma_f \\ \theta(t_f) - \theta_f \\ V(t_f) - V_f \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (6-7)$$

ここで,

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} X_{\text{pos}}(t) \\ Y_{\text{pos}}(t) \\ \beta(t) \\ \gamma(t) \\ \theta(t) \\ V(t) \end{bmatrix} \quad (6-8)$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} F_{x\text{all}}(t) \\ F_{y\text{all}}(t) \\ M_z(t) \end{bmatrix} \quad (6-9)$$

である。以上の最適制御問題を勾配法 [28] を用いて解くことで、消費エネルギーを最小化する速度軌道、車両横滑り角、ヨーレートを導出する。

6.3 速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御の比較条件

本章では Fig. 24 のような条件での走行を考慮する。初期条件, 終端条件を $\mathbf{x}_0 = [0, 0, 0, 0, 0, 30/3.6]$, $\mathbf{x}_f = [50, 5, 0, 0, 0, 30/3.6]$, 走行時間 $t_f - t_0$ は 5 s とした場合を case A, 初期条件, 終端条件を $\mathbf{x}_0 = [0, 0, 0, 0, 0, 30/3.6]$, $\mathbf{x}_f = [25, 5, 0, 0, 0, 30/3.6]$, 走行時間 $t_f - t_0$ は 2.75 s とした場合を case B とし、それぞれに対して以下の 3 通りの比較条件で最適化計算を行う。

従来法 初期条件, 終端条件を満たすように (6-11) 式で与えられるクロソイド曲線の組み合わせで車両の走行軌道を定める。

$$x(l) = \int_0^l \cos \frac{\theta^2}{2} d\theta \quad (6-10)$$

$$y(l) = \int_0^l \sin \frac{\theta^2}{2} d\theta \quad (6-11)$$

ここで, l は無次元化された曲線長で, 無次元化された旋回半径 r と $rl = 1$ の関係がある。このような走行軌跡を $\beta = 0$ の条件の下で, (6-12) 式で与えられる台形速度パターンで走行した際の消費エネルギー W_{in} が最少となるように最高速度 V_{max} を最適化する。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 + a_x t & (t_0 < t < t_1) \\ V_{\text{max}} & (t_1 < t < t_2) \\ V_{\text{max}} - a_x t & (t_2 < t < t_f) \end{cases} \quad (6-12)$$

ここで,

$$a_x = \frac{(V_{\text{max}} - V_0)^2 + (V_{\text{max}} - V_f)^2}{2V_{\text{max}}(t_f - t_0) - (X_f - X_0)} \quad (6-13)$$

$$t_1 = t_0 + \frac{V_{\text{max}} - V_0}{a_x} \quad (6-14)$$

$$t_2 = t_f - \frac{V_{\text{max}} - V_f}{a_x} \quad (6-15)$$

である。

提案法 1 $\beta = 0$ の条件の下で，制御入力 $\mathbf{u}(t) = [F_{xall}(t) M_z(t)]^T$ を最適化する。

提案法 2 $\beta = 0$ の制約を与えずに，制御入力 $\mathbf{u}(t) = [F_{xall}(t) F_{yall}(t) M_z(t)]^T$ を最適化する。

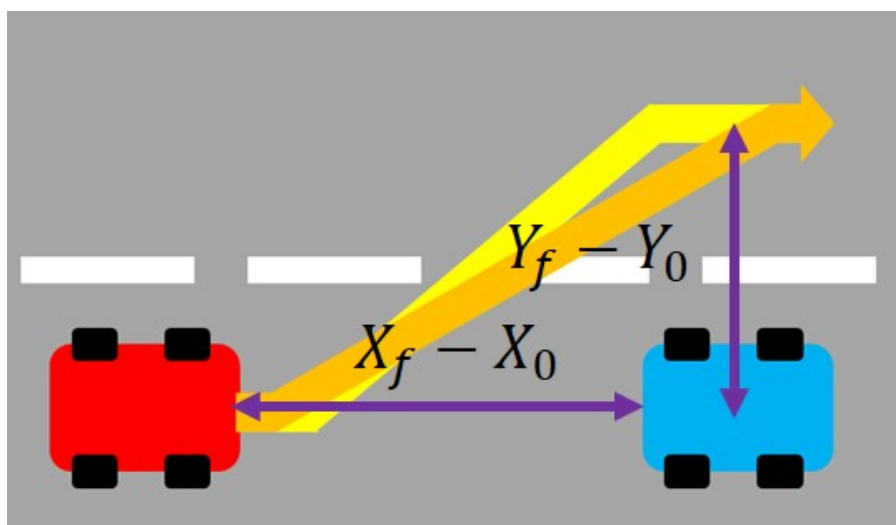


Fig. 24: 速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御で想定する走行

6.4 速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション

6.4.1 case A

Fig. 25 にシミュレーション結果を示す。Fig. 25(g), Fig. 25(h), Fig. 25(i) より，従来法，提案法 1 では車両横滑り角を発生させずにヨーレートのみで車両の進行方向を変更していたのに対し，提案法 2 では殆どヨーレートを発生させずに，車両横滑り角を発生させることで車両の進行方向を変更していることがわかる。 $\beta = 0$ として，ヨーレートのみで車両の進行方向を変更しようとする，発生したヨーレートによって β が負になるのを防ぐために横力が必要となる。コーナリング抵抗は横力，ヨーモーメントの 2 乗に比例するので，提案法 1 では従来法と比較してヨーレートの最大値を小さくすることで，必要となる横力，ヨーモーメントの最大値を小さくし，コーナリング抵抗による損失を抑制している。提案法 2 では， $\gamma \simeq 0$ であるので，ヨーモーメントは殆どコーナリング抵抗に寄与せず，横力による影響が殆どである。そのため，従来法と比較して，提案法 1 で 55.5 %，提案法 2 で 70.2 % のコーナリング抵抗による損失の削減が可能である。

また，提案法 1, 2 では従来法と比較して， $t = 0$ s, $t = 5$ s 付近での加減速度が大きくなっている。これによって，その他の時刻における総駆動力を小さくすることができ，銅損を削減することができる。そのため，従来法と比較して，提案法 1 で 11.2 %，提案法 2 で 10.4 % の銅損の削減が可能である。

結果として，従来法と比較して提案法 1 で 7.7 %，提案法 2 で 8.0 % の消費エネルギー削減を達成した。

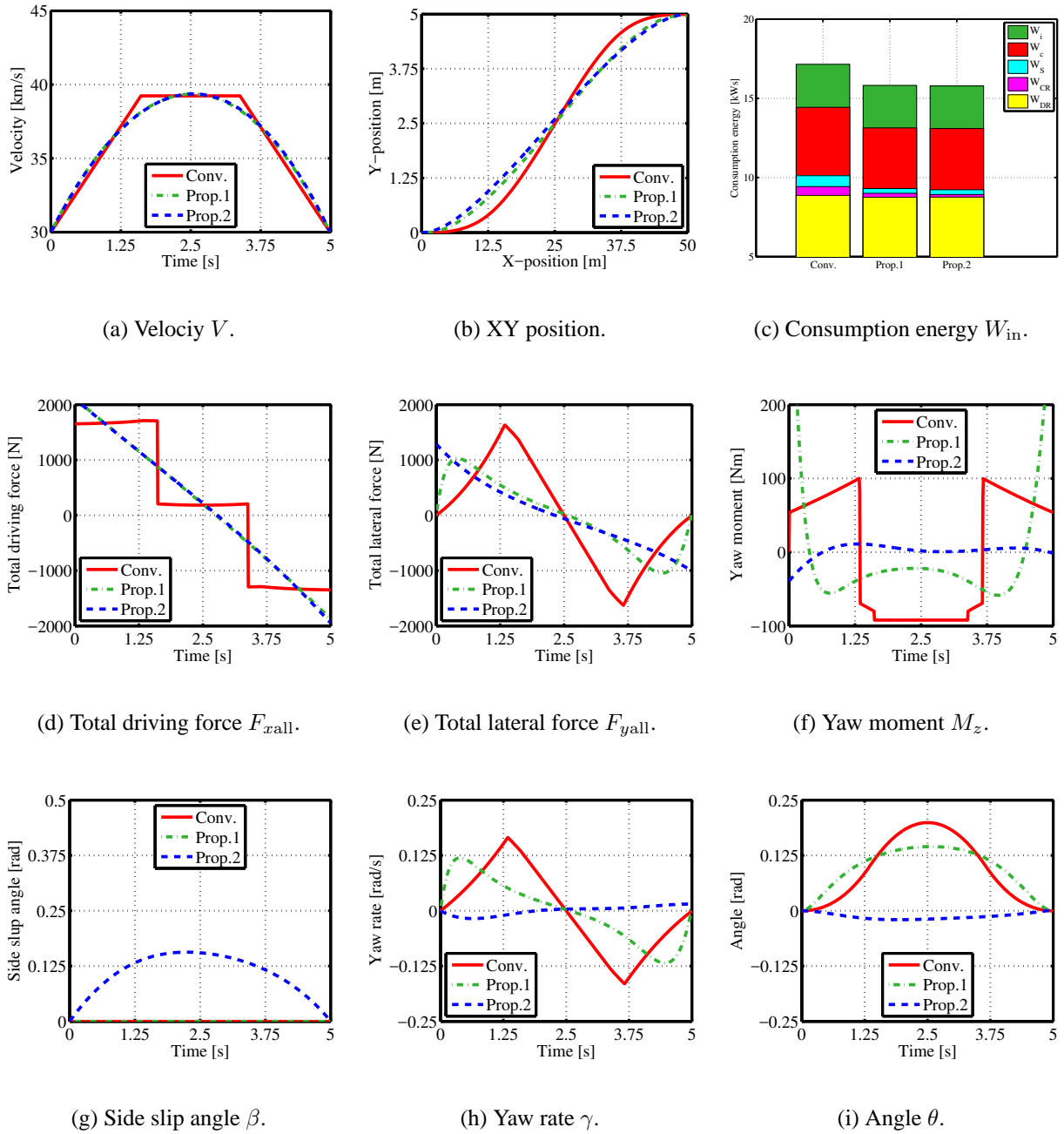
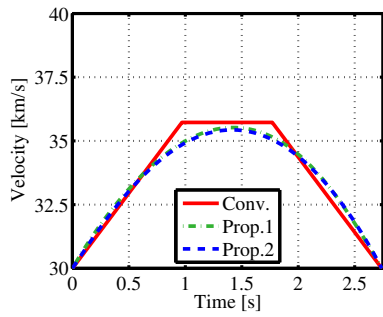


Fig. 25: 速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション結果 (case A)

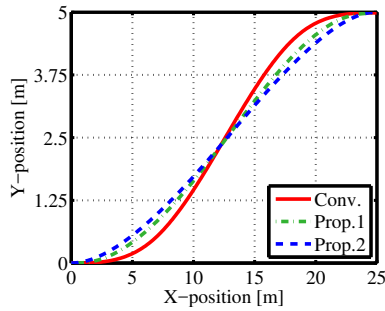
6.4.2 case B

Fig. 26 にシミュレーション結果を示す。case A と同様に、従来法、提案法 1 では車両横滑り角を発生させずにヨーレートのみで車両の進行方向を変更していたのに対し、提案法 2 では殆どヨーレートを発生させずに、車両横滑り角を発生させることで車両の進行方向を変更している。case A と比較して、コーナリング抵抗による損失の削減率が提案法 1 で 42.2 %、提案法 2 で 54.9 % と小さくなっているものの、損失全体に対するコーナリング抵抗による損失が大きくなっているため、消費エネルギーは提案法 1 で 17.5 %、提案法 2 で 21.8 % 削減されている。このことから、短い距離でレーンチェンジする場合等では、前後輪舵角を同相に切り、横滑り角を利用して横方向に移動することで消費エネルギーを大

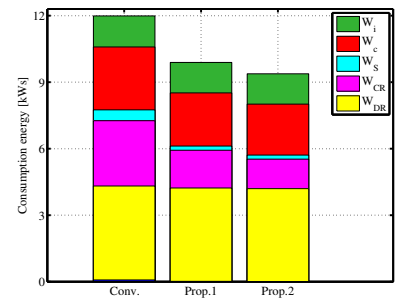
大きく削減できるといえる。



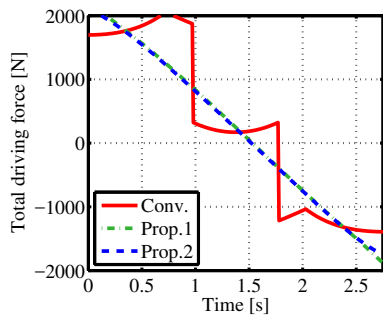
(a) Velocity V .



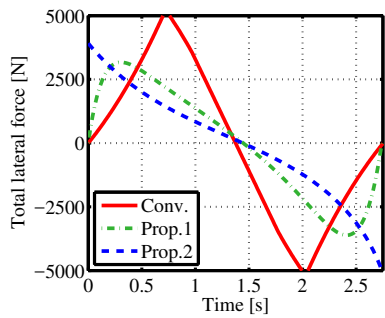
(b) XY position.



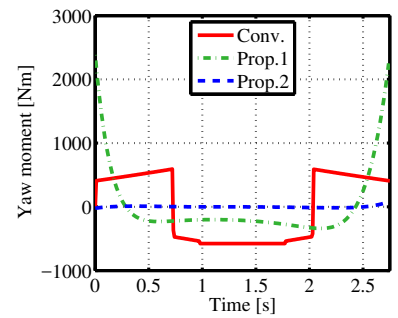
(c) Consumption energy W_{in} .



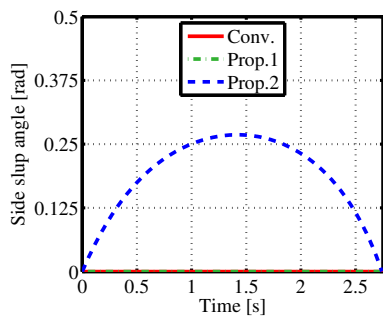
(d) Total driving force F_{xall} .



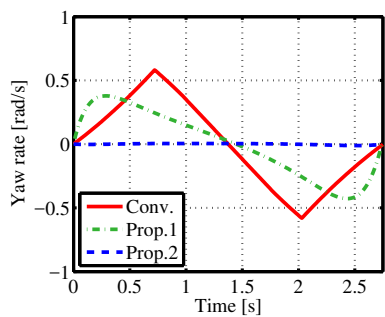
(e) Total lateral force F_{yall} .



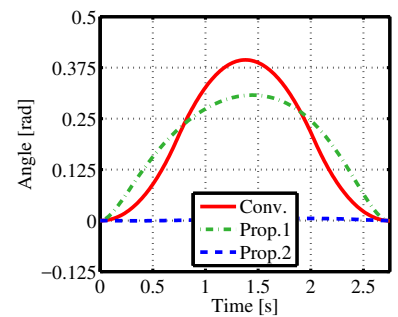
(f) Yaw moment M_z .



(g) Side slip angle β .



(h) Yaw rate γ .



(i) Angle θ .

Fig. 26: 速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御のシミュレーション結果 (case B)

6.5 速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御の実験

(株)小野測器が所有する Real Car Simulation Bench(RC-S)[29]にて, Fig. 14 に示す制御系を用いて, 車体の β , γ , V を制御し, case A と同じ条件で実験を行った。Fig. 27 に実験結果を示す。測定は, それぞれの条件に対して5回ずつ行った。また, インバータ入力電力 P_{in} は測定値を用いて次式で求めた。

$$P_{in} = V_{dc} \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} I_{dcij} \quad (6-16)$$

ここで, V_{dc} はインバータ入力電圧, I_{dcij} は各輪のインバータ入力電流である。なお, 本章では RC-S で演算された車体速 V , 横滑り角 β , ヨーレート γ を測定値として用いた。

Fig. 27(b) より, 従来法の加速度がステップ上に変化している点付近を除いて, 総制駆動力 F_{xall} はシミュレーション結果とよく一致しており, 走行抵抗, コーナリング抵抗のモデルの妥当性が示された。提案法においては消費電力はシミュレーションと殆ど一致しており, 従来法と比較して提案法1で13.3%, 提案法2で13.6%の消費エネルギー削減を達成した。シミュレーションと比較して消費電力の改善率が良化しているが, これは従来法の消費電力が悪化したためであり, 加速度がステップ上に変化している付近においてシミュレーションよりも大きな制駆動力が発生し, これによりシミュレーションより大きな銅損が発生したためである。

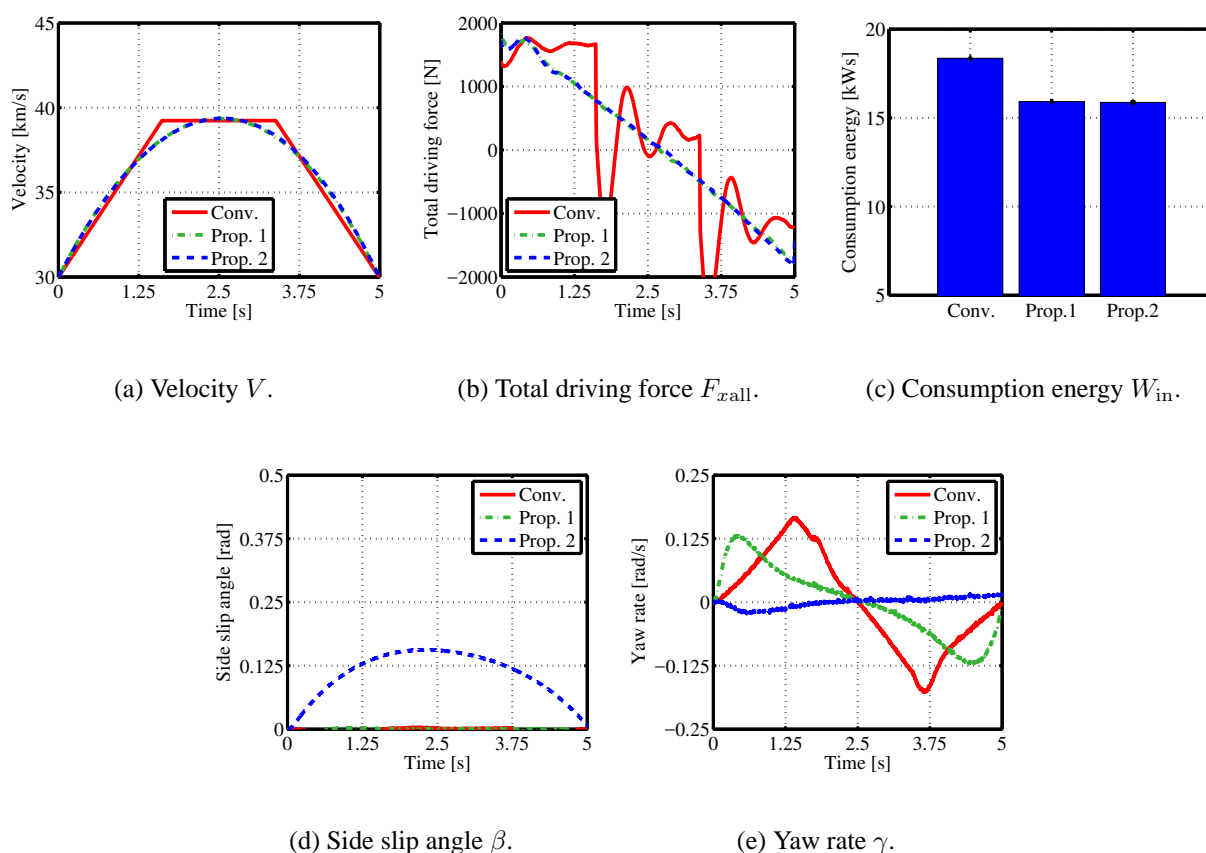


Fig. 27: 速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転制御の実験結果 (case A)

第7章

結論

7.1 本研究で得られた成果

本論文では自動運転を想定した速度軌道最適化として、旋回を考慮した時間制約下での航続距離最大化手法を提案した。提案法では、旋回時にタイヤの横滑りによって生じる抵抗や左右輪の車輪速差をモデル化した上で、最適制御問題を数値的に解くことで、消費エネルギーを最小化する速度軌道を導出することが出来る。タイヤの横滑りによる抵抗は、速度の4乗、旋回半径の-2乗に比例するので、旋回中の速度を抑制しつつ、その前後の速度を高くすることで消費エネルギーを低減することが出来る。提案法に依って、主に銅損、走行抵抗、コーナリング抵抗のトレードオフによって最適な軌道が定まることを明らかにした。

また、インホイールモータ搭載車両を想定し、速度軌道に加えて左右の駆動力差を同時に最適化する手法を提案し、更なる航続距離延長を実現した。本来であれば、速度と駆動力配分の2次元の探索を行う必要があるが、提案手法では制御入力の取り方を工夫することで、この問題を1次元の最適化問題2つに分離することが出来、速度軌道が定まれば左右の配分比が自動的に決定されるようにすることが出来る。提案手法では、主に駆動力差モーメントを用いることによるコーナリング抵抗による損失の削減量と1輪当たりの駆動力が増加することによる銅損の増加量のトレードオフによって最適な左右制駆動力配分比が定まることを示した。

これに加え、走行軌跡に自由度がある場合にも適用できるように、速度、横滑り角、ヨーレートを同時に最適化する手法を提案した。一般的な自動車の走行では、主にヨーレートを用いて車の軌道を変更するが、前後輪アクティブステアの車両であれば、横滑り角を積極的に使用して走行することで、タイヤの横滑りによる抵抗を抑えつつ軌道を変更することができるので、更に消費エネルギーを低減することができる。

本論文で提案した手法を適用することで、直進走行だけでなく、旋回を含む経路においても、エネルギーを考慮した自動運転が可能となる。また、これまでに著者らのグループで研究してきた勾配、信号等を考慮した手法と併せることで、実際の道路環境に適用することも可能となる。

7.2 今後の展望

これまでに著者らのグループで提案してきた航続距離延長自動運転では1台の電気自動車の航続距離延長を扱ってきたが、今後は車群全体の航続距離延長を考慮する必要がある。そのため、複数台の車両の速度軌道を同時に最適化する手法や、速度軌道をオンラインで導出する手法を考える必要がある。また、勾配や旋回、信号が単一で存在する状況ではなく、実際の道路を想定した複数の要素が混在した条件で最適化を行い、効果の検証を行う必要がある。これらによって、より実環境に近い問題となり、実車への応用が期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、毎週の研究相談会及び研究発表会の場において熱意あるご指導と適切なご助言を頂いた藤本博志准教授、研究発表会の場において丁寧なご指導をして頂いた堀洋一教授、居村岳広特任講師に心から感謝致します。

交通安全環境研究所の後藤様、川野様、奥井様には共同研究を行うにあたりご助言を頂くだけでなく、走行試験場の日程調整や試験時の気象データ取得にご尽力頂きました。心より感謝申し上げます。

小野測器の佐藤様、武田様、槌本様、小長谷様、越後様、秋元様には共同研究における台上試験に関してご尽力頂き、また、試験方法に関しても様々なアドバイスを頂きました。感謝申し上げます。

本田技術研究所の飽田様、森様には研究内容に関して適切なご助言、ご意見を頂きました。深く御礼申し上げます。

三菱自動車の吉田様、松見様、西田様、水井様には技術交流という形で本研究に対するご助言を頂くだけでなく、当研究室の試験車両に関してご助力を頂きました。心より感謝致します。

JTEKTの石原様、川原様、瀬川様、木村様、西村様、村田様には新規実験車両の立ち上げに関してご尽力頂きました。誠にありがとうございます。

ブルーヘイズの鈴木様には当研究室の車両製作において大変お世話になりました。感謝申し上げます。

さらに、本研究室博士研究員の王亜飛様、並びに博士課程の郡司大輔様、佐藤基様には外部実験の際にRAとして実験をサポートして頂いただけでなく、研究内容に関して様々なアドバイスを頂き、深く感謝致します。

EV・EAチームの皆様には本研究における実験を行う際快く協力して頂いただけでなく、論文校正や研究内容に関する様々なアドバイスを頂きました。特に、関連研究を行っていた吉田様、福田様には研究に関して独創的な意見を多数頂くなど、大変お世話になりました。誠にありがとうございました。

最後に、学ぶ機会を与えてくれた家族の支援に心から感謝致します。

参考文献

- [1] Y. Hori: “Future vehicle driven by electricity and control – research on four-wheel-motored “UOT Electric March II””, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 51, No. 5, pp. 954–962 (2004).
- [2] E. Katsuyama and A. Omae: “Improvement of Ride Comfort by Upsprung Negative Skyhook Damper Control Using In-Wheel Motors”, 2016 JSAE Annual Congress (Spring), pp. 674–679 (2016).
- [3] K. Maeda H. Fujimoto and Y. Hori: “Four-wheel Driving-force Distribution Method for Instantaneous or Split Slippery Roads for Electric Vehicle”, *Automatika - Journal for Control Measurement Electronics Computing and Communications* pp. 103–113 (2013).
- [4] K. Nam, H. Fujimoto, and Y. Hori: “Advanced Motion Control of Electric Vehicles Based on Robust Lateral Tire Force Control via Active Front Steering”, IEEE/ASME Trans. MECHATRONICS, Vol. 19, No. 1, pp. 289–299 (2014).
- [5] T. E. Stamati and P. Bauer: “On-road charging of Electric Vehicles”, *Transportation Electrification Conference and Expo*, Vol. 15, No. 2, pp. 1–8 (2013).
- [6] K. K. Ean, T. Imura, and Y. Hori: “New Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling for Charging Moving Electric Vehicle”, *EVteC & APE Japan 2014* (2014).
- [7] H. Hijikata and K. Akatsu: “Principle and Basic Characteristic of MATRIX Motor with Variable Parameters Achieved through Arbitrary Winding Connections”, *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 2, No. 6, pp. 283–291 (2013).
- [8] D. Sato and J. Itoh: “Loss Minimization Design Using Permeance Method for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor”, *IEEJ Trans. on Industry Applications*, Vol. 135, No. 2, pp. 138–146 (2014).
- [9] Y. Hosoyamada, M. Takeda, T. Nozaki, N. Motoi, and A. Kawamura: “High Efficiency Series Chopper Power Train for Electric Vehicles Using a Motor Test Bench”, *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 4, No. 4, pp. 460–468 (2015).
- [10] K. Aoyama, N. Motoi, Y. Tsuruta, and A. Kawamura: “High Efficiency Energy Conversion System for Decreases in Electric Vehicle Battery Terminal Voltage”, *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 5, No. 1, pp. 12–19 (2016).

- [11] D. Sato and J. Ito: “Improvement of the Electric Energy Consumption of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System Using Three-level Inverter”, *IEEJ Trans. on Industry Applications*, Vol. 135, No. 6, pp. 632–640 (2015).
- [12] O.Nishihara and T.Kumazawa: “Electric Power Conservation by Driving/Braking Force Distribution in Electric Vehicle”, *Dynamics and Design Conference*, pp. 330–1–300–6 (2010) (inJapanese).
- [13] H. Fujimoto and S. Harada : “Model–Based Range Extension Control System for Electric Vehicles With Front and Rear Driving-Braking Force Distributions”, *IEEE Trans. on INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Vol. 62, No. 5, pp. 3245–3254 (2015).
- [14] T. Yone and H. Fujimoto: “ Proposal of a Range Extension Control System with Arbitrary Steering for In-Wheel Motor Electric Vehicle with Four Wheel Steering”, *The 13th International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 368–373 (2014).
- [15] T. Kobayashi, E. Katsuyama, H. Sugiura, E. Ono, and M. Yamamoto: “Study on Driving Force Distribution and Power Consumption in Cornering,” *2013 JSAE Annual Congress (Spring)*, No.70-13, pp. 9–14 (2013) (in Japanese).
- [16] J. Zhang, F. Y. Wang, K. Wang, W. H. Lin, X. Xu, and C. Chen: “Data-Driven Intelligent Transportation Systems:A Survey”, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, No. 4, pp.1624–1639 (2011).
- [17] J. W. Kwon and D. Ghwa: “Adaptive Bidirectional Platoon Control Using a Coupled Sliding Mode Control Method”, *Trans. on Intelligent Transport Systems*, Vol. 15, No. 5, pp.2040–2048 (2014).
- [18] M. Ferreira and P. M. d’Orey: “On the Impact of Virtual Traffic Lights on Carbon Emissions Mitigation”, *IEEE Trans. on Intelligent Transport Systems*, Vol. 13, No. 1, pp. 284–295 (2002).
- [19] A. Kaku, M. Mukai, and T. Kawabe: “A Study on Fuel Economy Effect of Vehicle Platooning Control System Using Model Predictive Control with Road Geography Information”, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 49, No. 7, pp. 678–687 (2013).
- [20] T. Yone and H. Fujimoto: “Generation Method of Time Function of Vehicle Velocity for Range Extension of Electrical Vehicle during Circular Driving”, *IIC-14-058, MEC-14-046*, pp. 13–18 (2014) (in Japanese).
- [21] Y. Ikezawa, H. Fujimoto, Y. Hori, D. Kawano, Y. Goto, M. Tsuchimoto, and K. Sato: “Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicles Based on Optimal Vehicle Velocity Trajectory Generation and Front-Rear Driving-Braking Force Distribution”, *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 5, No. 3, pp. 228–235 (2016).
- [22] H. Yoshida, H. Fujimoto, D. Kawano, Y. Goto, M. Tsuchimoto, K. Sato: “Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicles Based on Optimal Velocity Trajectory and Driving Braking Force Distribution Considering Road Gradient Information”, *41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 4754–4759 (2015).

- [23] H. Yoshida, H. Fujimoto, D. Kawano, Y. Goto, M. Tsuchimoto, and K. Sato: “Bench Test of Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicles Based on Optimization of Velocity Profile Considering Traffic Signal Information”, International Electric Vehicle Technology Conference & Automotive Power Electronics Japan 2016 (2016).
- [24] M. Abe: “Automotive Vehicle Dynamics Theory and Applications”, Tokyo Denki University Press (2008) (in Japanese).
- [25] H. B. Pacejka and E. Bakker: “The Magic Formula Tyre Model”, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 21, No. 1, pp. 1–18 (1992).
- [26] S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda, and T. Hirasu: “Loss Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 41, No. 5, pp. 511–517 (1994).
- [27] Y. Yamauchi, and H. Fujimoto: “Vehicle Motion Control Method Using Yaw-moment Observer and Lateral Force Observer for Electric Vehicle”, Trans. IEE of Japan, Vol. 130, No. 8, pp. 939–944 (2010) (in Japanese).
- [28] T. Ohtsuka: “Introduction to Nonlinear Optimal Control”, CORONA PUBLISHING CO.,LTD. (2011) (in Japanese)
- [29] D. Kawano, Y. Goto, K. Echigo, and K. Sato: “Analysis of Behavior of Fuel Consumption and Exhaust Emissions under On-road Driving Conditions Using Real Car Simulation Bench (RC-S)”, 2009 JSAE Annual Congress (Spring), Vol. 1, pp. 9–12 (2009) (in Japanese).

発表文献

論文誌論文

- Yuta Ikezawa, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, Daisuke Kawano, Yuichi Goto, Misaki Tsuchimoto, and Koji Sato: “Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicles Based on Optimal Vehicle Velocity Trajectory Generation and Front-Rear Driving-Braking Force Distribution”, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.5, No.3, pp.228–235 (2016).
- 池澤佑太, 藤本博志, 川野大輔, 後藤雄一, 武田雄資, 佐藤宏治: “電気自動車における旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御”, 電気学会論文誌 D (投稿予定).

査読のある国際学会

- Yuta Ikezawa, Hiroshi Fujimoto, and Yoichi Hori: “Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicles Based on Optimal Vehicle Velocity Trajectory Generation and Front-Rear Driving-Braking Force Distribution with Time Constraint”, The 1st IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, pp.1–6 (2015).
- Yuta Ikezawa, Hiroshi Fujimoto, Daisuke Kawano, Yuichi Goto, Misaki Tsuchimoto, and Koji Sato: “Bench Test of Minimum Time Autonomous Driving for Electric Vehicle Based on Optimization of Velocity Profile Considering Energy Constraint”, 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.4609–4614 (2015).
- Yuta Ikezawa, Hiroshi Fujimoto, Daisuke Kawano, Yuichi Goto, Misaki Tsuchimoto, and Koji Sato: “Fundamental Research on Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicle Based on Optimization of Vehicle Velocity Profile in Consideration of Cornering”, The 29th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (2016).

国内学会

- 池澤佑太, 藤本博志, 川野大輔, 後藤雄一, 槌本みさき, 佐藤宏治: “電気自動車におけるエネルギー制約を考慮した速度軌道最適化による最短時間自動運転制御”, 平成 27 年電気学会産業応用部門大

会, Vol.4, pp.121–126 (2015).

- 池澤佑太, 藤本博志, 川野大輔, 後藤雄一, 槌本みさき, 佐藤宏治: “電気自動車における旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御の基礎検討”, 機械学会第 24 回交通・物流部門大会 (2015).
- 池澤佑太, 藤本博志, 川野大輔, 後藤雄一, 武田雄資, 佐藤宏治: “電気自動車における駆動力差モーメントを考慮した航続距離延長自動運転”, 機械学会第 25 回交通・物流部門大会 (2016).
- 池澤佑太, 藤本博志, 川野大輔, 後藤雄一, 武田雄資, 佐藤宏治: “電気自動車における速度軌道及び走行軌跡最適化による航続距離延長自動運転”, 第 4 回制御部門マルチシンポジウム (2017) (発表予定).

共著論文

- 藤本博志, 吉田英樹, 池澤佑太, 川野大輔, 後藤雄一, 槌本みさき, 佐藤宏治: “道路形状を考慮した EV の航続距離延長のための自動運転”, 自動車技術会 2016 年春季大会, pp.385–390 (2016).
- 吉田英樹, 池澤佑太, 藤本博志, 川野大輔, 後藤雄一, 武田雄資, 佐藤宏治: “電気自動車における勾配を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御”, 電気学会論文誌 D (投稿予定).

受賞

- SAMCON2015:Best presentation in session TT4-1: Motion and Energy Control of Mobility
- 2016 年度自動車技術会大学院研究奨励賞 (受賞予定)

付録 A

消費エネルギー制約下での速度軌道最適化による最短時間自動運転制御

本編では、移動時間制約下で消費エネルギーを低減する航続距離延長自動運転制御について述べたが、ITS が速度軌道を決断するという前提に立てば、消費エネルギーに制約を与えた上で移動時間を最小化することも可能である。本章では、直進走行のみを考慮し、エネルギー制約下で移動時間を最小化する最短時間自動運転制御 (Minimum Time Autonomous Driving: MTAD) を提案する。本手法の有効性をシミュレーションと実験によって示す。

A.1 移動時間最短速度軌道の導出

初期条件、終端条件、エネルギー制約、速度制約、制駆動力制約を満たしつつ、移動時間 t_t を最小とする速度軌道 $V(t)$ 及び前後輪駆動力配分比 $k(t)$ を求める。評価関数、拘束条件は以下のように示される。

$$\min. \quad t_t = \int_{t_0}^{t_f} dt \quad (\text{A-1})$$

$$\text{s.t.} \quad W_{\text{in}}(t) = \int_{t_0}^{t_f} P_{\text{in}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \leq W_{\text{lim}} \quad (\text{A-2})$$

$$|F_{x\text{all}}(t)| \leq F_{\text{lim}} \quad (\text{A-3})$$

$$V(t) \leq V_{\text{lim}} \quad (\text{A-4})$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{M}(F_{x\text{all}} - \text{sgn}(V)F_{\text{DR}}(V)) \\ V(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

$$\begin{aligned}\chi(\mathbf{x}(t_0)) &= \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 \\ &= \begin{bmatrix} V(t_0) - V_0 \\ X(t_0) - X_0 \end{bmatrix} = \mathbf{0}\end{aligned}\tag{A-6}$$

$$\begin{aligned}\psi(\mathbf{x}(t_f)) &= \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f \\ &= \begin{bmatrix} V(t_f) - V_f \\ X(t_f) - X_f \end{bmatrix} = \mathbf{0}\end{aligned}\tag{A-7}$$

ここで、 W_{lim} は使用できるエネルギー、 F_{lim} は最大の制駆動力、 V_{lim} は制限速度である。また、本章では左右輪の駆動力は等しく、前後輪に以下のように総制駆動力を配分するものとする。

$$\kappa_{fj} = \frac{1-k}{2}\tag{A-8}$$

$$\kappa_{rj} = \frac{k}{2}\tag{A-9}$$

この最適制御問題を勾配法を用いて最適速度軌道を導出する。また、(A-3)、(A-4) 式の拘束条件を満たすために、以下のようなペナルティ関数を被積分項に加える [28]。

$$P_1(t) = \begin{cases} \frac{r_1}{2}(F_{\text{lim}} - |F_{x\text{all}}(t)|)^2 & (F_{\text{lim}} < F_{x\text{all}}(t)) \\ 0 & (F_{\text{lim}} \geq F_{x\text{all}}(t)) \end{cases}\tag{A-10}$$

$$P_2(t) = \begin{cases} \frac{r_2}{2}(V_{\text{lim}} - |V(t)|)^2 & (V_{\text{lim}} < V(t)) \\ 0 & (V_{\text{lim}} \geq V(t)) \end{cases}\tag{A-11}$$

ここで、 r_1 、 r_2 はペナルティ関数の重みである。

A.2 消費エネルギー制約下での速度軌道最適化による最短時間自動運転制御の比較条件

比較条件として以下の3通りの速度パターンを考える。

従来法 制限速度 V_{lim} まで一定加速度 a_x で加速した後、一定速度で走行し、その後一定減速度 $-a_x$ で減速する速度軌道を考える。このような速度パターンは以下の式で与えられる。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 + a_x t & (t_0 < t < t_1) \\ V_{\text{lim}} & (t_1 < t < t_2) \\ V_{\text{lim}} - a_x t & (t_2 < t < t_f) \end{cases}\tag{A-12}$$

ここで、

$$a_x = \frac{V_{\text{lim}}(V_f + V_0) - \frac{1}{2}V_0^2 - \frac{1}{2}V_f^2 - V_{\text{lim}}^2}{X_t - V_{\text{lim}}(t_f - t_0)}\tag{A-13}$$

$$X_t = X_f - X_0\tag{A-14}$$

$$t_1 = t_0 + \frac{V_{\text{lim}} - V_0}{a_x}\tag{A-15}$$

$$t_2 = t_f - \frac{V_{\text{lim}} - V_f}{a_x}\tag{A-16}$$

である。(A-12)式で与えられる速度パターンのうち、エネルギー制約を満たしつつ、移動時間 t_t が最少となる速度軌道で走行する。

提案法 1 $k = 0.5$ として、A.1 章で示した最適制御問題を解き、導出された速度軌道で走行する。

提案法 2 瞬間消費電力を最小とする $k = k_{\text{opt}}$ として、A.1 章で示した最適制御問題を解き、導出された速度軌道で走行する。 k_{opt} は $\partial P_{\text{in}}/\partial k|_{k=k_{\text{opt}}} = 0$ を満たすので、以下の式で表される。

$$k_{\text{opt}}(V, F_{\text{all}}) = \frac{\frac{V}{D_s' N_f(V, F_{\text{all}})} + \frac{r^2 R_f}{K_{t_f}^2} + \frac{V^2}{R_{c_f}(\omega_{e_f})} \left(\frac{L_{q_f}}{\Psi_f} \right)^2}{\frac{V}{D_s'} \sum_{j=f,r} \frac{1}{N_j(V, F_{\text{all}})} + r^2 \sum_{j=f,r} \frac{R_j}{K_{t_j}^2} + V^2 \sum_{j=f,r} \frac{1}{R_{c_j}(\omega_{e_j})} \left(\frac{L_{q_j}}{\Psi_j} \right)^2} \quad (\text{A-17})$$

A.3 消費エネルギー制約下での速度軌道最適化による最短時間自動運転制御のシミュレーション

Tab. 3 に示される条件で速度軌道を最適化し、シミュレーションによって提案法の有効性を検証した。シミュレーション結果を Fig. 28, 29 に示す。Tab. 4 に各条件での移動時間を示す。従来法と比較して、case A では提案法 1 で 11.0 %，提案法 2 で 12.6 % の移動時間削減，case B では提案法 1 で 3.39 %，提案法 2 で 5.07 % の移動時間削減を達成した。

Tab. 3: 最短時間自動運転の比較条件

	V_0	V_f	$X_f - X_0$	F_{max}	V_{max}	W_{lim}
case A	0 km/h	0 km/h	800 m	2000 N	60 km/h	250 kW
case B	0 km/h	0 km/h	800 m	2000 N	60 km/h	300 kW

Tab. 4: 最短時間自動運転の移動時間

	Traveling time [s]		
	Conventional	Proposed 1	Proposed 2
case A	74.34	66.20	65.00
case B	59.52	57.50	56.50

A.3.1 case A ($W_{\text{lim}} = 250 \text{ kW}$)

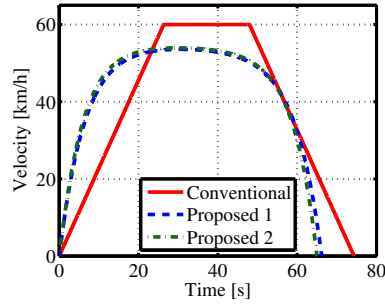
Fig. 28(a) に車体速を示す。提案法 1 では、従来法と比較して最高速度は低くなるものの、低速時の加速速度を大きくすることで、移動時間の短縮を図っている。低速時の加速度を大きくすることで、Fig. 28(b) のように高速時の駆動力を小さくすることができ、最高速度も抑えることができるので、Fig. 28(e),

28(g)のように、鉄損、走行抵抗による損失を抑圧することができる。一方で、従来法と比較して、総制動力 F_{xall} の最大値は大きくなるので、Fig. 28(f)のように低速時の銅損が大きくなる。その結果、Fig. 28(h)に示すように、消費エネルギーに占める銅損 W_c の割合が増加する。

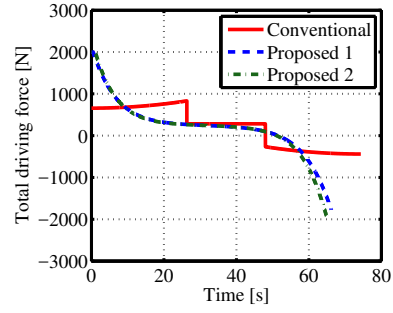
提案法2では、前後輪駆動力配分比 k を最適化しているのので、提案法1と比較して、モータによる損失を抑圧できる。そのため、提案法1よりも小さなモータ銅損 W_c 、鉄損 W_i で僅かに大きな駆動力を発生させることができる。 W_c 、 W_i を削減することで、機械出力 W_{out} を増加させることができるので、最高速度を上げることができる。提案法2では、最適駆動力配分比 k_{opt} を導入することで提案法1と比較して W_c が 10.0%、 W_i が 2.15% 削減され、 W_R が 1.65% 増加した。これによって、提案法1と比較して 1.81% の移動時間削減を達成した。また、 W_s が提案法1と比較して増加しているが、これは前輪の駆動力を後輪より大きくすることで、前輪のスリップ率 λ_f が増加した影響である。

A.3.2 case B ($W_{lim} = 300$ kW)

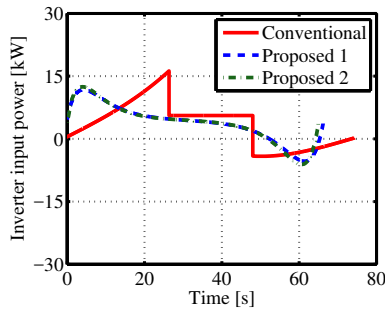
Fig. 29 に case B のシミュレーション結果を示す。提案法1, 2共に case A と同様の傾向が見られる。case A と比較して、提案法1, 2共に、制限速度 V_{lim} で走行する時間が増加するので、速度軌道最適化による移動時間削減効果は小さくなる。一方で、提案法2では提案法1と比較して、1.74% の移動時間削減を達成しており、駆動力配分比 k の最適化による移動時間削減効果は case A と比較して大きな差がないといえる。



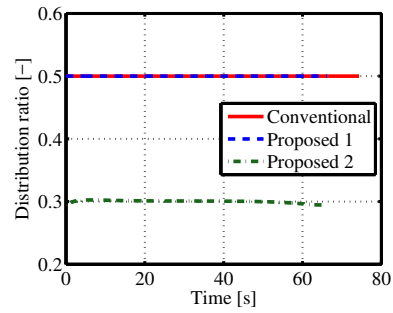
(a) Velocity V .



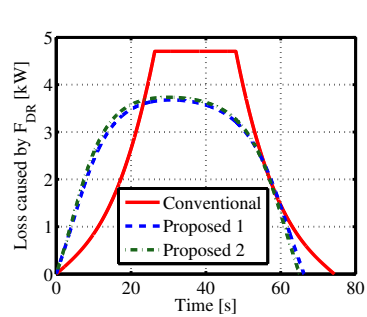
(b) Total driving force F_{xall} .



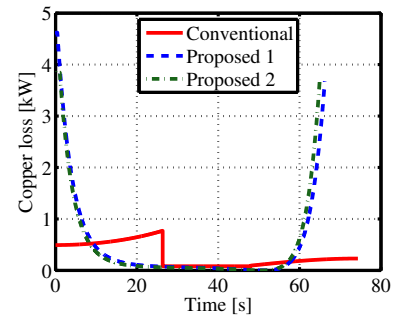
(c) Inverter input power P_{in} .



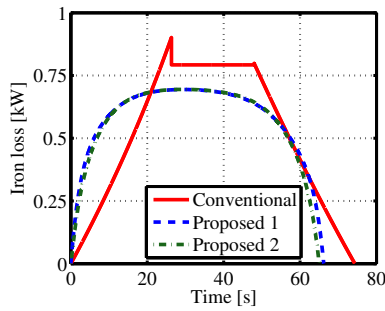
(d) Distribution ratio k .



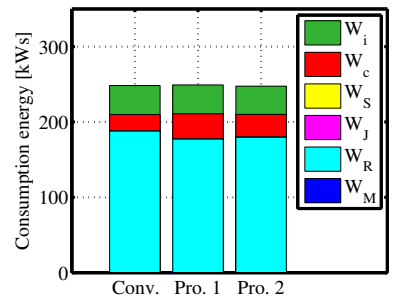
(e) Loss caused by driving resistance P_R .



(f) Copper loss P_c .

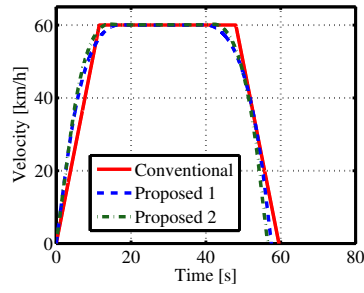


(g) Iron loss P_i .

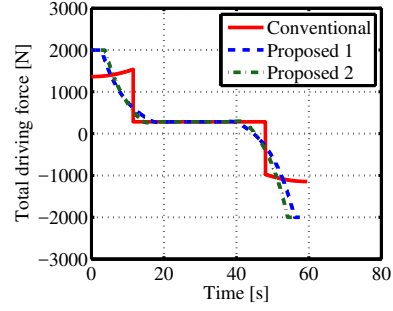


(h) Consumption energy W_{in} .

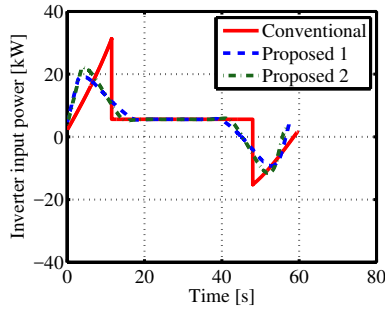
Fig. 28: 最短時間自動運転のシミュレーション結果 (case A: $W_{lim} = 250$ kW)



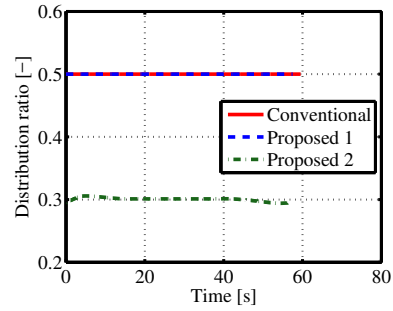
(a) Velocity V .



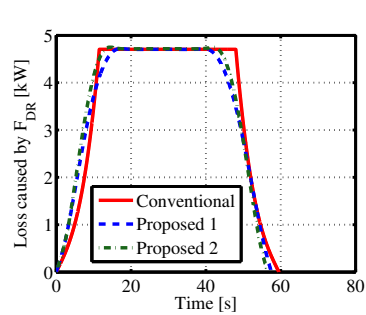
(b) Total driving force F_{xall} .



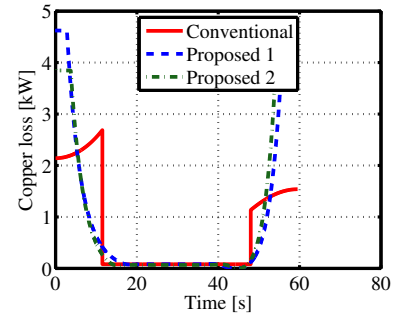
(c) Inverter input power P_{in} .



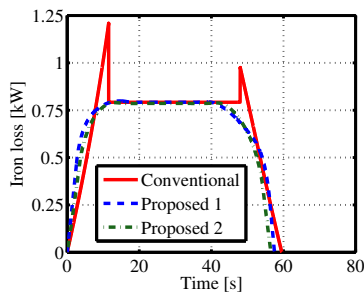
(d) Distribution ratio k .



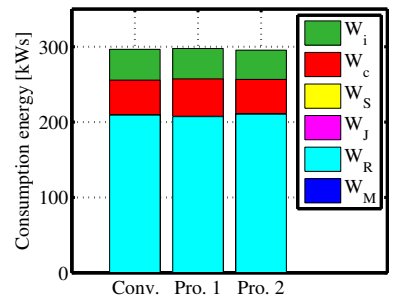
(e) Loss caused by driving resistance P_R .



(f) Copper loss P_c .



(g) Iron loss P_i .



(h) Consumption energy W_{in} .

Fig. 29: 最短時間自動運転のシミュレーション結果 (case B: $W_{lim} = 300$ kWs).

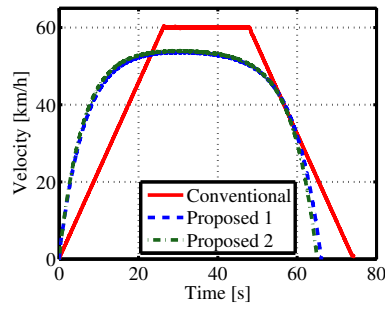
A.4 消費エネルギー制約下での速度軌道最適化による最短時間自動運転制御の実験

実験結果を Fig. 30, 31 に示す。測定は、それぞれの条件に対して 6 回ずつ行った。また、インバータ入力電力 P_{in} は測定値を用いて次式で求めた。

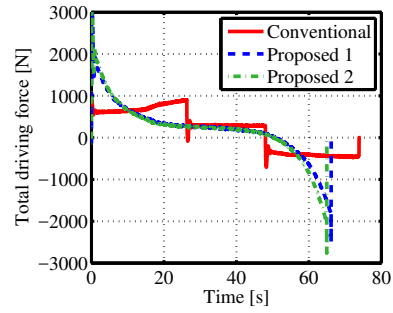
$$P_{in} = V_{dc} \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} I_{dcij} \quad (A-18)$$

ここで、 V_{dc} はインバータ入力電圧、 I_{dcij} は左右輪のインバータ入力電流の和である。また、車体速 V としては RC-S の車体モデルから計算された速度を用いる。

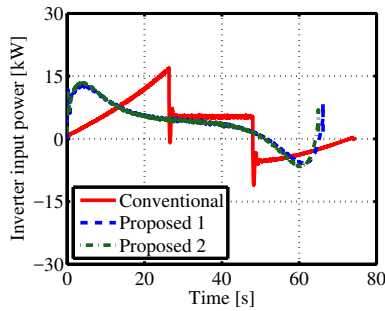
Fig. 30(b), 31(b) より、加速開始直後において、大きな総制駆動力が発生しているが、この点を除けば駆動力制約を満たしていることが確認できる。また、従来法では加速度 a_x がステップ状に切り替わる点において、シミュレーション結果と差異が見られるものの、これらの点を除けばシミュレーションと同様の傾向を得ることができた。前述の差異は大きなジャークによる影響である。これに伴い、大きなジャークの発生している点において、インバータ入力電力もシミュレーションと差異が見られる。また、シミュレーション同様、Fig. 30(d), 31(d) より、全ての速度軌道生成法においてエネルギー制約が満たされている。従来法と比較して、case A では提案法 1 で 11.0 %，提案法 2 で 12.6 % の移動時間削減，case B では提案法 1 で 3.39 %，提案法 2 で 5.07 % の移動時間削減を達成した。



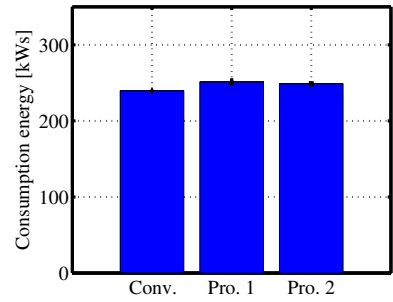
(a) Velocity V .



(b) Total driving force F_{xall} .

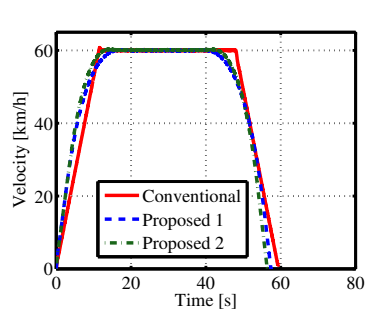


(c) Inverter input power P_{in} .

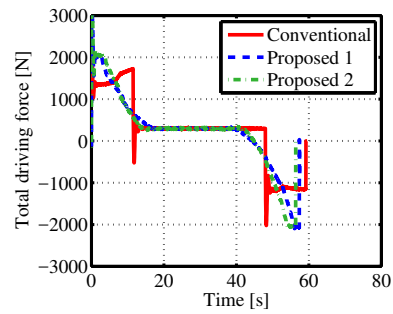


(d) Consumption energy W_{in} .

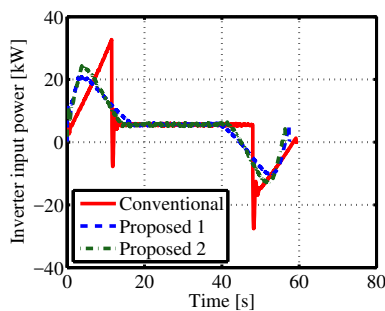
Fig. 30: 最短時間自動運転の実験結果 (case A: $W_{lim} = 250$ kWs)



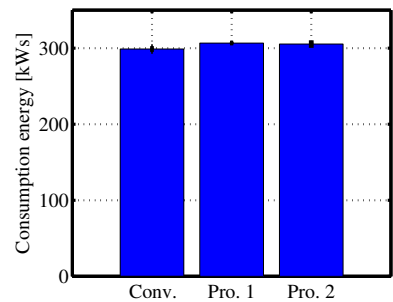
(a) Velocity V .



(b) Total driving force F_{xall} .



(c) Inverter input power P_{in} .



(d) Consumption energy W_{in} .

Fig. 31: 最短時間自動運転の実験結果 (case B: $W_{lim} = 300$ kWs).

付録 B

実験環境

B.1 走行試験場

走行試験では，交通安全環境研究所自動車試験場にて実証実験を行った。Fig. 32 にテストコースの概観を示す。本試験場では全長 1350 m の走行試験路や坂路があり，自動車を評価する様々な走行試験が可能である。



Fig. 32: 交通安全環境研究所自動車試験場

B.2 Real Car Simulation Bench

Fig. 33 に RC-S の外観を示す。また，実車試験，RC-S，シャシダイナモ (CDM) の試験項目別対比表を Tab. 5 に示す [29]。RC-S は CDM のようにローラー上を走行する機構とは異なり，駆動輪のドライブシャフトに直接ダイナモを接続して駆動力を吸収する。また，低慣性ダイナモを使用しているため，応答の速い電気自動車の過渡的挙動を解析するのに適している。

従来の CDM では、実験条件の再現性には優れているが、勾配やスリップを伴うような路面状況変化や過渡的な運動条件を考慮できない。実車試験では、これらの影響を解析することができるものの、実験状況の再現性という点では劣る。

RC-S では、車両の振動系の自由度を低下させることなく、実路走行における様々な過渡的運動条件をベンチ上で高精度かつ安全に再現できる。そのため、電気自動車の電費性能の解析に最も適した試験システムであると考えられる。



Fig. 33: Real Car Simulation Bench

Tab. 5: 実装試験，RC-S，シャシダイナモの試験項目別対比表

	vehicle test	RC-S	CDM
Steady-state fuel consumption	○	○	○
Transient fuel consumption	○	○	△
Mild acceleration	◎	○	○
Full acceleration	◎	○	△
Mild braking	◎	○	△
Full braking	◎	○	×
Low friction road	◎	○	×
Transitional steering	◎	△	×
Swing motion	◎	△	×
Stability control	◎	○	×
Repeatability	△	○	○

◎: Excellent, ○: Good, △: Fair, × : N/A

付録 C

最適制御問題の数値解法

本章では、本論文で用いた最適化手法である勾配法 [28] について説明する。

C.1 オイラー・ラグランジュ方程式

初期時刻 t_0 ，終端時刻 t_f ，および初期状態 $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ が与えられ，状態方程式

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (\text{C-1})$$

のみが拘束条件として課されている場合を考える。最小化すべき評価関数は

$$J = \varphi(\mathbf{x}(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \quad (\text{C-2})$$

で与えられているとする。ここで， $\varphi(\mathbf{x}(t_f))$ は終端ペナルティである。ここで考える最適制御問題は，関数 $\mathbf{x}(t)$ と $\mathbf{u}(t)$ の汎関数である評価関数 J を等式拘束条件である状態方程式の下で最小化する変分問題である。そこで，等式拘束条件 $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) - \dot{\mathbf{x}} = 0$ に対応するラグランジュ乗数のベクトルを $\boldsymbol{\lambda}(t)$ とし，拘束条件のもとでの停留条件を求めるための汎関数 \bar{J} を構成すると

$$\bar{J} = \varphi(\mathbf{x}(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) + \boldsymbol{\lambda}^T(\mathbf{f} - \dot{\mathbf{x}}) dt \quad (\text{C-3})$$

となる。最適制御問題において， $\boldsymbol{\lambda}$ は随伴変数と呼ばれる。ここで，ハミルトン関数 H を以下のように定義する。

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t) = L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (\text{C-4})$$

これを用いて \bar{J} を表すと

$$\bar{J} = \varphi(\mathbf{x}(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t) - \boldsymbol{\lambda}^T \dot{\mathbf{x}} dt \quad (\text{C-5})$$

となる。この式の第 1 変分は以下ようになる。

$$\delta \bar{J} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}(t_f)) - \boldsymbol{\lambda}^T(t_f) \right) \delta \mathbf{x}(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} \left\{ \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \dot{\boldsymbol{\lambda}}^T \right) \delta \mathbf{x} + \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} \delta \mathbf{u} \right\} dt \quad (\text{C-6})$$

ここで $\delta \mathbf{x}$ は制御入力を $\delta \mathbf{u}$ だけ変化させた場合の \mathbf{x} の変化である。この時、評価関数 J を最小にするには、以下のオイラー・ラグランジュ方程式を満たす必要がある。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (\text{C-7})$$

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad (\text{C-8})$$

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}} = - \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t) \right) \quad (\text{C-9})$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_f) = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}(t_f)) \right) \quad (\text{C-10})$$

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t) = 0 \quad (\text{C-11})$$

C.2 勾配法

本節ではオイラー・ラグランジュ方程式の構造を利用した数値解法の1つである勾配法について述べる。勾配法は評価関数を減少させるように制御入力の修正を繰り返し、勾配が0になった時点で終了する方法である。

状態方程式が成り立っているならば (C-5) 式の値は元の評価関数 J の値に等しい。そこで J の代わりに \bar{J} の微小変化を考える。(C-6) 式において、 $\boldsymbol{\lambda}(t)$ がオイラー・ラグランジュ方程式のうち (C-9) 式, (C-10) を満たすならば、

$$\delta \bar{J} = \int_{t_0}^{t_f} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} \delta \mathbf{u} dt \quad (\text{C-12})$$

となり、評価関数値の微小変化 $\delta \bar{J}$ が制御入力の微小変化 $\delta \mathbf{u}$ で簡潔に表される。

$$\int_{t_0}^{t_f} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} \mathbf{s}(t) < 0 \quad (\text{C-13})$$

を満たす関数 $\mathbf{s}(t)$ が降下方向に相当する。勾配を用いて探索方向を決定する反復法を総称して勾配法といい、その代表的なものとして最急降下法と共役勾配法がある。

以下では、本論文で用いた最急降下法について述べる。最急降下法では、探索方向として

$$\mathbf{s} = - \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} \right)^T \quad (\text{C-14})$$

を選ぶ。これは勾配にマイナスをつけたものであり、最急降下方向に相当する。例えば、十分小さな正のスカラ $\alpha > 0$ に対して

$$\delta \mathbf{u} = -\alpha \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} \right)^T \quad (\text{C-15})$$

とすれば、 $\partial H / \partial \mathbf{u} \neq \mathbf{0}$ である限り、

$$\delta \bar{J} = -\alpha \int_{t_0}^{t_f} \left\| \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} \right\|^2 dt < 0 \quad (\text{C-16})$$

となり、 \bar{J} は減少する。 \bar{J} が減少しなくなるのは $\partial H / \partial \mathbf{u} = \mathbf{0}$ となったときであり、このとき、オイラー・ラグランジュ方程式 (C-7) 式~(C-11) が満たされる。以上より、最急降下法のアルゴリズムは以下のようになる。

1. 適当な時間関数 $\mathbf{u}(t)(t_0 \leq t \leq t_f)$ を制御入力の初期推定解として与える。
2. 初期条件 (C-8) から状態方程式 (C-7) を終端時刻 t_f まで数値的に解き、状態 $\mathbf{x}(t)(t_0 \leq t \leq t_f)$ を求める。
3. 終端条件 (C-10) から随伴方程式 (C-9) を初期時刻 t_0 まで逆時間方向へ数値的に解き、随伴変数 $\boldsymbol{\lambda}(t)(t_0 \leq t \leq t_f)$ を求める。
4. 以上で求めた \mathbf{x} , \mathbf{u} , $\boldsymbol{\lambda}$ から、各時刻 $t(t_0 \leq t \leq t_f)$ における勾配 $\partial H/\partial \mathbf{u}$ を計算する。勾配のノルム $\left(\int_{t_0}^{t_f} \|\partial H/\partial \mathbf{u}\|^2 dt\right)^{\frac{1}{2}}$ が十分 0 に近ければ停止、そうでなければ次のステップへ。
5. $\mathbf{s} = -(\partial H/\partial \mathbf{u})^T$ と置く。
6. 制御入力を $\mathbf{u} + \alpha \mathbf{s}$ としたときの評価関数値 $J[\mathbf{u} + \alpha \mathbf{s}]$ が最小になるスカラー $\alpha > 0$ を求め、それを α^* とする。
7. $\mathbf{u} := \mathbf{u} + \alpha^* \mathbf{s}$ として、ステップ 2 へ。