

東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
基盤科学研究系  
先端エネルギー工学専攻

平成30年度

修士論文

電気自動車における信号機を考慮した  
航続距離延長自動運転に関する研究

指導教員 藤本 博志 准教授

2019年1月29日提出

47176070 小川 尚志

# 要約

近年、自動車業界は歴史的転換期を迎えていると言える。未来のモビリティに必要な要素として、電動化(electrified)、自動運転(autonomous driving)、コネクテッド(connected)が注目され、世界中で盛んに研究が行われている。電動化では、内燃機関搭載車(Internal Combustion Engine Vehicles: ICEV)からの排ガスによる大気汚染や、二酸化炭素による地球温暖化問題、さらに石油等の燃料枯渇問題が深刻化している。これらの問題の解決策として、電気自動車(Electric Vehicles: EV)が注目を集めている。従来の内燃機関の代わりに電気で動くモータを用いているため、ゼロエミッション化に期待が出来る。また、EVはモータ駆動のため、トルク応答がICEVと比較して2桁速い、モータの分散配置、各輪独立制御が可能、モータ電流からトルクが正確に測定可能、力行だけでなく回生も可能といった利点を持つため、これらのモータの特性を活かし、EVの運動制御や姿勢制御により、安全かつ快適な走行を実現する研究が行われており、自動運転との親和性も高く、注目を集めている。

一方で、内燃機関を有する自動車と比べてEVは一充電航続距離が短く、普及の妨げとなっている。高性能電池を大量に搭載することにより航続距離は伸びるが、同時にEVの高価格化、燃費の悪化へと繋がるため、航続距離を延長するために様々な研究が行われている。

著者らの研究グループでは、車両に変更を加えず、制御のみによって航続距離延長を図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。このRECSでは、ドライバーがEVの運動を決定するという前提の下、効率の異なるモータを複数有するEVに対し、各モータに最適にトルクを配分することで所望の運動を実現しつつ消費電力を減らせる手法である。

また、コネクテッド分野では無線通信の高速・大容量化により、リアルタイムかつ容量の大きなデータを送受信可能となり、クラウド・コンピューティングの普及により、データの迅速かつ大容量な生成、蓄積、分析、活用も可能になり、コネクテッドカーと呼ばれるインターネット通信技術を搭載した車両を用いて新たな価値やサービスを生み出すことに期待が寄せられている。具体的な技術として、他の車両と情報通信を行う車車間通信や高度道路交通システム(Intelligent Transport System: ITS)と呼ばれる路上のインフラ設備(信号機など)と情報通信を行う路車間通信が挙げられる。これらの技術は走行に役立つ情報を収集できるため、自動運転においても非常に重要な技術である。著者らの研究グループでは、直進や旋回、道路情報や信号情報を

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も省エネルギーな速度軌道を導出することが出来る。

しかし、従来の READ では限定的な場面を想定しており、実用性の観点で更なる適用範囲の拡張が必要であった。そこで、本稿では消費エネルギーが増加する一般的な場面として信号機のある直線路に着目し、従来の単一の信号機のみが考慮されていた理論を拡張し、信号情報が外部から得られるという仮定の下、複数の信号機の存在する直線路においても適用できるように拡張し、消費エネルギーが最小となる速度軌道導出手法を提案する。さらにその発展として、外部から信号情報が得られない環境を想定し、信号情報の代わりに信号通過確率を用いた速度軌道導出手法を提案する。提案手法では、車両の運動及び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求めることができる。また、これらの提案法の有効性をシミュレーション及び実験にて検証する。

# 目次

<b>1 はじめに</b>	<b>1</b>
1.1 自動車業界の転換期	1
1.1.1 電動化 (electrified)	1
1.1.2 自動運転 (autonomous driving)	2
1.1.3 コネクテッド (connected)	2
1.2 研究背景	2
1.2.1 電動化 (electrified) の課題	2
1.2.2 自動運転 (autonomous driving) の課題	5
1.2.3 コネクテッド (connected) の課題	6
1.3 研究目的	10
1.4 本稿の構成	10
<b>2 最適化手法</b>	<b>11</b>
2.1 最適化とは	11
2.2 最適化問題の数値解法	11
2.2.1 オイラー・ラグランジュ方程式 [33]	11
2.2.2 勾配法 [33]	12
2.2.3 動的計画法 [33]	14
<b>3 実験車両と車両モデル</b>	<b>17</b>
3.1 実験車両	17
3.2 車両モデル	18
3.3 インバータ入力電力モデル [28]	19
3.4 損失分離	22
3.5 信号機のモデル	23
<b>4 信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証</b>	<b>24</b>
4.1 消費エネルギー最小化問題の定式化	24

4.2	信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証の問題設定	25
4.2.1	車両速度軌道導出法	25
4.3	信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証のシミュレーション	26
4.3.1	信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証のシミュレーション条件	26
4.3.2	信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証のシミュレーション結果	27
4.4	信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証の実験	28
4.4.1	信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証の台上試験	28
4.4.2	信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証の実走実験	29
4.5	一時停止による消費エネルギー量の考察	31
4.6	本章のまとめ	33
<b>5</b>	<b>複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転</b>	<b>34</b>
5.1	複数の信号機を考慮した消費エネルギー最小化問題の定式化	34
5.2	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転の問題設定	35
5.3	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転のシミュレーション	36
5.3.1	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転の比較条件	37
5.3.2	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転のシミュレーション結果	38
5.3.3	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転のシミュレーション結果における損失分離	41
5.4	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転の実験	44
5.4.1	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転の台上試験	44
5.4.2	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転の実走試験	49
5.5	本章のまとめ	51
<b>6</b>	<b>確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の基礎検討</b>	<b>66</b>
6.1	信号通過確率	66
6.2	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の定式化	67
6.2.1	消費エネルギー量期待値を用いた手法	67
6.2.2	$t_p$ を用いた手法	69

6.3	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の問題設定 . . . . .	70
6.4	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の比較条件 . . . . .	71
6.5	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転のシミュレーション . . . . .	72
6.5.1	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転のシミュレーション結果 . . . . .	72
6.5.2	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転のシミュレーション結果における損失分離 . . . . .	74
6.6	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の実験 . . . . .	76
6.6.1	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の台上試験 . . . . .	76
6.6.2	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の実走試験 . . . . .	79
6.7	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における提案手法の比較 . . . . .	80
6.8	本章のまとめ . . . . .	81
<b>7</b>	<b>まとめ</b> . . . . .	<b>90</b>
7.1	本研究で得られた成果 . . . . .	90
7.2	今後の展望 . . . . .	91

# 目次

1	RECS の実験結果 [13]	3
2	機械学習を用いた消費エネルギー削減システムの実験結果 (SOC)[9]	4
3	機械学習を用いた消費エネルギー削減システムの実験結果 (エンジン動作点)[9]	5
4	信号情報を考慮した READ のシミュレーション結果 [31]	8
5	信号機のパラメータ [26]	8
6	青信号時間の長さの推定に用いられたヒストグラム [26]	9
7	推定値と真値の誤差と交通流量 [26]	9
8	FPEV2-Kanon.	17
9	$\mu$ - $\lambda$ 曲線.	20
10	PMSM の等価回路	21
11	一時停止による消費エネルギー量の検証における走行経路	25
12	一時停止による消費エネルギー量の検証におけるシミュレーション結果	28
13	一時停止による消費エネルギー量の検証における RC-S 台上試験による実証実験結果	30
14	一時停止による消費エネルギー量の検証における実走実験結果	32
15	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における問題設定	36
16	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.1)	44
17	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.2)	45
18	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.3)	46
19	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.4)	47
20	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.5)	48

21	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.6)	49
22	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.1)	53
23	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.2)	54
24	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.3)	55
25	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.4)	56
26	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.5)	57
27	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.6)	58
28	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.1)	59
29	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.2)	60
30	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.3)	61
31	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.4)	62
32	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.5)	64
33	複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.6)	65
34	先行研究で用いられた信号通過確率	68
35	提案した信号通過確率	69
36	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の問題設定	71
37	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.1)	76
38	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.2)	77
39	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.3)	78
40	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.1)	83



41	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.2) . . . . .	84
42	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.3) . . . . .	85
43	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.1) . . . . .	86
44	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.2) . . . . .	87
45	確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.3) . . . . .	88
46	$t_r = 20 \text{ s}$ , $t_g = 20 \text{ s}$ , $t_s = 25 \text{ s}$ の場合の速度軌道と走行距離 ( $t_p$ を用いる手法) . . . . .	89
47	Real Car Simulation Bench . . . . .	98
48	交通安全環境研究所の実験場 . . . . .	99
49	日本自動車研究所 (JARI) の V2X 市街地 . . . . .	100

# 表 目 次

1	機械学習を用いた消費エネルギー削減システムの実験結果(消費エネルギー量)[9] . . . . .	5
2	機械学習を用いた消費エネルギー削減システムの実験結果(計算時間)[9] . . . . .	6
3	車両諸元 . . . . .	18
4	インホイールモータ諸元 . . . . .	18
5	総消費エネルギー量 [kWs](一時停止による消費エネルギー量の検証におけるシミュレーション結果) . . . . .	27
6	総消費エネルギー量 [kWs](一時停止による消費エネルギー量の検証における RC-S 台上試験による実証実験) . . . . .	29
7	総消費エネルギー量 [kWs](一時停止による消費エネルギー量の検証におけるシミュレーション結果と RC-S 台上試験による実証実験結果の比較) . . . . .	29
8	総消費エネルギー量 [kWs](一時停止による消費エネルギー量の検証におけるシミュレーション結果と実走実験結果の比較) . . . . .	31
9	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.1) . . . . .	43
10	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.2) . . . . .	43
11	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.3) . . . . .	47
12	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.4) . . . . .	48
13	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.5) . . . . .	49
14	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.6) . . . . .	50
15	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.1) . . . . .	50

16	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.2) . . .	51
17	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.3) . . .	51
18	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.4) . . .	52
19	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.5) . . .	52
20	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.6) . . .	52
21	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.1) . . . . .	52
22	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.2) . . . . .	52
23	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.3) . . . . .	52
24	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.4) . . . . .	63
25	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.5) . . . . .	63
26	総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.6) . . . . .	63
27	総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.1) . . . . .	75
28	総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.2) . . . . .	75
29	総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.3) . . . . .	79
30	総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.1)	79
31	総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.1)	80
32	総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.3)	80
33	総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.1) . . . . .	81

34	総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.2) . . . . .	81
35	総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.3) . . . . .	82

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 自動車業界の転換期

近年，自動車業界は歴史的転換期を迎えていると言える．世界中に支店を持つ総合コンサルティングファーム PricewaterhouseCoopers 社の発表した今後の自動車業界に関する調査資料 [1] によると，未来の自動車業界のキーワードとして電動化 (electrified)，自動運転 (autonomous driving)，コネクテッド (connected) が挙げられている．これらのキーワードは，未来のモビリティに必要な要素であると考えられ，世界中の自動車メーカー，大学，研究所においてこれらに関連する研究が多数行われている．

#### 1.1.1 電動化 (electrified)

電動化が注目されている背景には環境問題が問題視されている点とモータ駆動によって得られる恩恵が優れている点が考えられる．

環境問題が問題視されている点に関しては，近年，内燃機関搭載車 (Internal Combustion Engine Vehicles : ICEV) からの排ガスによる大気汚染や，二酸化炭素による地球温暖化問題，さらに石油等の燃料枯渇問題が深刻化している．これらの問題の解決策として，電気自動車 (Electric Vehicles: EV) が注目を集めている．従来の内燃機関の代わりに電気で動くモータを用いているため，ゼロエミッション化に期待が出来る．

また，モータ駆動によって得られる恩恵が優れている点に関しては，EV はモータ駆動のため，トルク応答が ICEV と比較して 2 桁速い，モータの分散配置，各輪独立制御が可能，モータ電流からトルクが正確に測定可能，力行だけでなく回生も可能といった利点を持つ [2]．これらのモータの特性を活かし，EV の運動制御や姿勢制御により，安全かつ快適な走行を実現する研究が行われている．

### 1.1.2 自動運転 (autonomous driving)

自動運転が注目されている背景には人工知能 (AI) や機械学習, 深層学習といった技術分野の急速な進歩によって自動運転の実現性が高まったためである。自動運転とは, ドライバーが行っていた運転操作を自動化する事である。自動運転の実現によって, 人為的ミスによる事故の低減や運転負荷低減による利便性の向上, 渋滞解消, 新たなサービスの創出などが期待できる。自動運転では, ドライバーが行っていた認知, 判断, 操作を AI が行う事で自動化をする。そのため, 複雑な交通環境を正しく認知するためのセンサ技術や画像処理技術, 認知した情報を用いて正しい行動, 軌道を判断する AI 技術, 判断された行動, 軌道を素早く正確に実現する車両運動制御技術が求められる。EV はモータ駆動のため, 制御応答性の観点から自動運転との相性がよい。この点も EV が注目を集めている要因の一つであると言える。

### 1.1.3 コネクテッド (connected)

コネクテッドが注目されている背景には情報通信技術の発達起因している。近年, インターネットやスマホの普及により, 様々なモノと情報が繋がる時代になった。無線通信の高速・大容量化により, リアルタイムかつ容量の大きなデータを送受信可能となり, クラウド・コンピューティングの普及により, データの迅速かつ大容量な生成, 蓄積, 分析, 活用も可能になった。これらの技術を用いて自動車業界でも, コネクテッドカーと呼ばれるインターネット通信技術を搭載した車両を用いて新たな価値やサービスを生み出すことに期待が寄せられている。具体的な技術として, 他の車両と情報通信を行う車車間通信や路上のインフラ設備 (信号機など) と情報通信を行う路車間通信が挙げられる。これらの技術は走行に役立つ情報を収集できるため, 自動運転においても非常に重要な技術である。

## 1.2 研究背景

これらは期待される一方で, それぞれ実現に向けていくつかの課題も存在している。

### 1.2.1 電動化 (electrified) の課題

EV の普及を阻んでいる問題点として, 従来の ICEV と比較して一充電航続距離が短いという点がある。高性能電池を大量に搭載することにより航続距離は伸び

るが、同時にEVの高価格化、燃費の悪化へと繋がるため、航続距離を延長するために様々な研究が行われている。

航続距離延長のための研究は、走行中のEVsに道路からワイヤレス給電を行う研究[3][4]や駆動力の最適配分により消費電力低減を図る研究[5]、速度軌道と駆動力配分を同時に最適化することで消費電力を低減する研究[6]、ヨーモーメントを制御し、電力損失を低減する研究[7]、ルート探索により消費電力低減する研究[8]、強化学習を用いて消費エネルギー低減する研究[9][10]などが挙げられる。このように、EVの航続距離を延長するために、様々な研究が行われている。

### 前後輪への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EVは、必要とされる駆動力に応じたトルクを各モータに配分することが可能である。モータは速度とトルクによって効率が変わるため、特性の違うモータを複数持つEVにはどのモータをどれだけ駆動させ、EVに所望の動作をさせるのかという自由度が生まれる。著者らのグループでは、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(IWM)を搭載したEVに対し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, 14, 15, 16, 17]を提案してきた。直進走行を想定したRECSでは、前後輪のモータ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最適配分することで消費電力削減を達成する。文献[13]では、スリップ率、モータ損失を考慮した消費電力モデルにおいて、最適な駆動力配分を速度、加速度の変数として定式化することで消費電力の低減を図っている。実験結果をFig. 1に示す。直進走行のRECSにより、パターン走行の場合約20%程度の消費電力削減に成功している。また、旋回走行を考慮したRECS[14]では、モータの損失やス

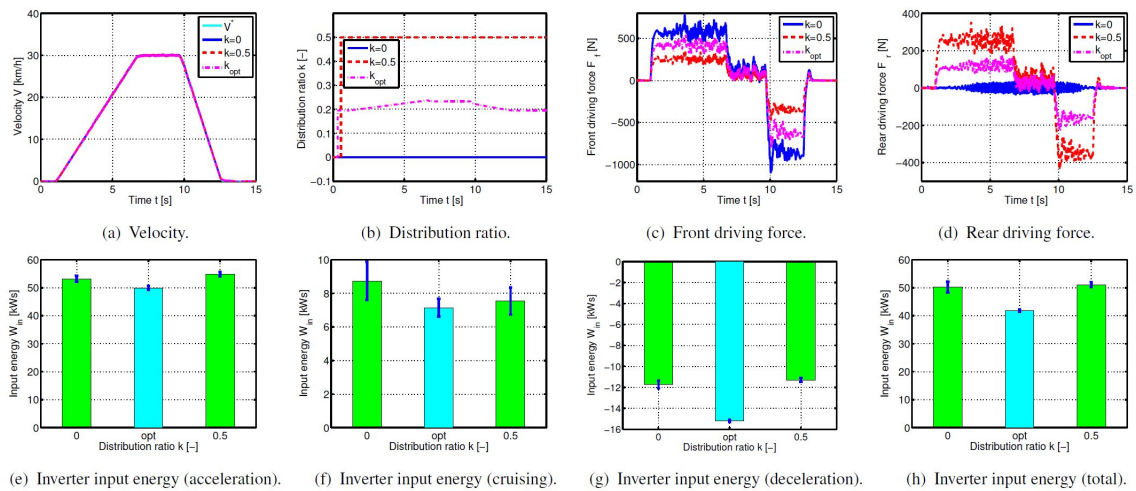


Fig. 1: RECS の実験結果 [13]

リップ率のモデルは考慮していないが、定常円旋回において左右のIWMで駆動

力差モーメントを発生させることで消費電力を低減している。

### 機械学習を用いた消費エネルギー削減システム [9]

近年，エネルギー管理システムの研究ではオンライン最適化の手法が注目を集めている。ゲーム理論 [11]，凸最適化 [12]，機械学習など様々な新技術が発表されてきた。本節では，ハイブリッド電気自動車において強化学習を用いたエネルギー管理システム [9] について紹介する。

まず，ハイブリッド電気自動車のエンジンとバッテリーをモデル化し，エネルギー管理の問題を定式し，次に，近傍法やファジィ符号化を用いて入力電力の遷移確率を導出する。導出した遷移確率を用いて強化学習のアルゴリズムにより，燃料消費を最小限に抑え，バッテリーの充電率を高く維持するエネルギー管理システムを提案している。

実験結果を Fig. 2, Fig. 3, Tab. ??, Tab. ?? に示す。Fig. 2 を見ると提案法である FEP, NNP の SOC 値が他よりも高いことがわかる。また，Fig. 3 を見るとエンジン動作点のばらつきが少なく効率よくエンジンが使われているのがわかる。Tab. ?? の消費エネルギー量を見るとオフラインの動的計画法 (DP) には劣るものの消費エネルギーの削減に成功している。また，Tab. ?? の計算時間を比較するとオフラインの動的計画法よりも少ないことがわかる。

このように，オンライン最適化を用いた研究は近年増加傾向にある。

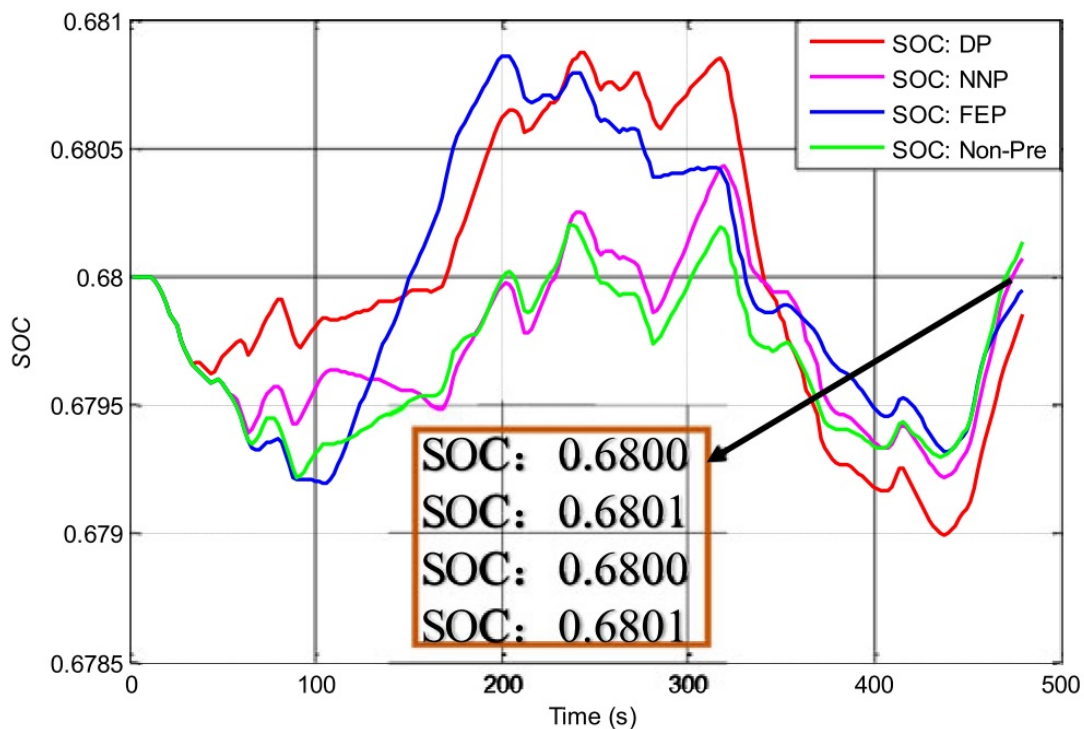


Fig. 2: 機械学習を用いた消費エネルギー削減システムの実験結果 (SOC)[9]



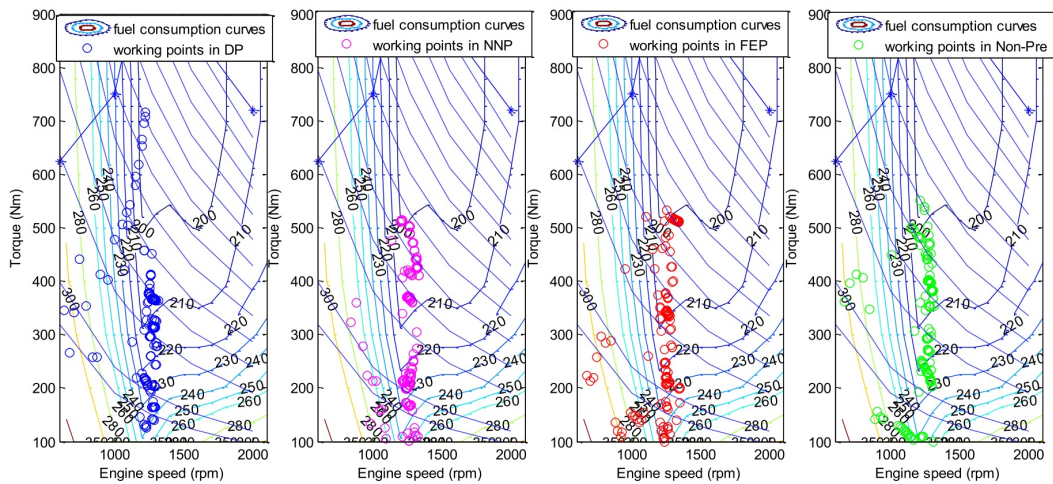


Fig. 3: 機械学習を用いた消費エネルギー削減システムの実験結果 (エンジン動作点)[9]

Tab. 1: 機械学習を用いた消費エネルギー削減システムの実験結果 (消費エネルギー量)[9]

Algorithms	Fuel consumption (g)	Relative increase (%)
DP	172	—
FEP	179	4.07
NNP	188	9.3
NonPre	196	13.95

### 1.2.2 自動運転 (autonomous driving) の課題

自動運転技術の問題点として、周辺環境の認識性能が不十分であるという点がある。

環境認識に関する研究は、車載カメラ映像を用いて高速道路上の交通標識の認知、判別を行う研究 [18], 赤外線レーダを用いて動的障害物の検出, 人と車両の判別を行う研究 [19], カメラとレーザの両方を用いるセンサーフュージョンによって障害物を回避する軌道を導出する研究 [20] などが挙げられる。このように自動運転に関する周辺環境認識において、様々な研究が行われている。

Tab. 2: 機械学習を用いた消費エネルギー削減システムの実験結果 (計算時間)[9]

Algorithms	Time <sup>a</sup> (min)	Relative increase (%)
NonPre	4.02	—
NNP	4.58	13.98
FEP	5.65	41.27
DP	8.21	104.23

<sup>a</sup>A 2.4 GHz microprocessor with 12 GB RAM was used.

### 1.2.3 コネクテッド (connected) の課題

コネクテッドの普及の課題として、収集して得られたデータをどのように活用するかという点と使用するために設備が必要である点がある。高度道路交通システム (Intelligent Transport Systems: ITS) の発達により、信号機などのインフラ設備から道路情報を得る事が道路情報を得ること出来る。実際に日本国内ではトヨタ自動車株式会社が ITS Connect と呼ばれるサービスをすでに開始している。ITS Connect は信号情報などを道路と車両、あるいは車両同士が直接通信して取得し、ドライバーに知らせることで安全運転支援するサービスであり、設備を搭載した一部の車両であれば東京、愛知、神奈川など一部の地域の設備が搭載された交差点などで使用が出来る。このように一部実用化がされてはいるものの更なる発展、活用が期待されている。

データの活用については、道路情報を用いて走行時の速度を最適化することで消費電力を低減する研究や交通事故のデータを分析し、交通事故を予測する研究 [21]、リアルタイムの交通データを用いて高速道路のリアルタイム渋滞予測を行う研究 [22]、前後の車両情報を用いた隊列走行の研究 [23]、各信号機の信号灯の色と切り替わりタイミングのデータ (traffic-signal phase and timing: SPAT) を用いた研究 [24] やフローティングカーデータ (Floating Car Data: FCD) を用いて信号灯の推定する研究 [25]、信号機を通過する車両の速度データを用いて推定する研究 [26]、信号機の切り替わり確率を導出する研究 [27] などが挙げられる。

使用するために設備が必要である点に関しては、現状、有力な解決策は見られない。しかし、この問題はコネクテッドと深く関連する自動運転においても大き

な問題として捉えることが出来る。なぜなら，近年の自動運転の用途の一つに過疎地域での利用が挙げられている。これは過疎地域の問題である高齢化と人口減少による人手不足，厳しい財政状況での運用コスト削減を期待できる切り札として期待されているためである。しかし，自動運転を導入する場合，ITS 設備を整備する事は必須事項になる。これは厳しい財政状況のコスト削減策と相反する点であり，補助するにしても全国の過疎地域を補助するのは金額的に現実的ではない。そこでこの問題を解決する事は自動運転の普及に大きく貢献できる。

### ITS を活用した航続距離延長

著者らのグループでは，電気自動車を対象に勾配などの道路情報や信号機情報を考慮した速度軌道生成である航続距離延長自動運転 (Range Extension Autonomous Driving: READ)[28, 29, 30, 31, 32] を提案してきた。この READ では，モータの銅損，鉄損やスリップ率を含む消費電力モデルに基づき，ITS 情報を制約として速度を数値的に最適化しており，文献[31]では，信号情報を考慮した最適化が行われている。Fig. 4はこのシミュレーション結果を示す。事前に信号情報が与えられていることから無駄な加減速を抑え，運動エネルギーを保持できており，銅損を大幅に減らすことに成功している。その結果，消費エネルギーを28.1%削減することに成功している。

### 車両速度データを用いた信号情報推定 [26]

信号情報の推定は消費エネルギー量の大量の車両データを用いて信号情報を推定する研究を紹介する。Fig. 5に信号機のパラメータを示す。信号機のパラメータはサイクル長，オフセット，赤信号または青信号の長さが決定する必要がある。提案されている手法では，まず車両の速度データから信号灯の状態を推定する。信号機のある交差点で赤信号で停止する車両は速度が0になることから，信号灯状態を速度情報から推定できる。次に，この推定結果から，信号機のサイクル長，オフセットを導出する。サイクル長は信号灯の状態推定から導出され，このサイクル長を用いてオフセットは除算の剰余として計算できる。最後に青信号の長さを導出する。Fig. 6に示すように車両の速度データから推定した信号灯状態をヒストグラムのようにし，青色の状態のデータと赤色の状態のデータの間接点を青色と赤色の境界点であるとしている。

検証の結果を Fig. 7に示す。結果として，推定値と真値の誤差を0にすることが出来ており，信号情報の推定に成功している。しかし，問題点として速度データが少ない場合は推定がうまくいっておらず，誤差のない推定結果が得られるまでの時間も長い事が挙げられる。

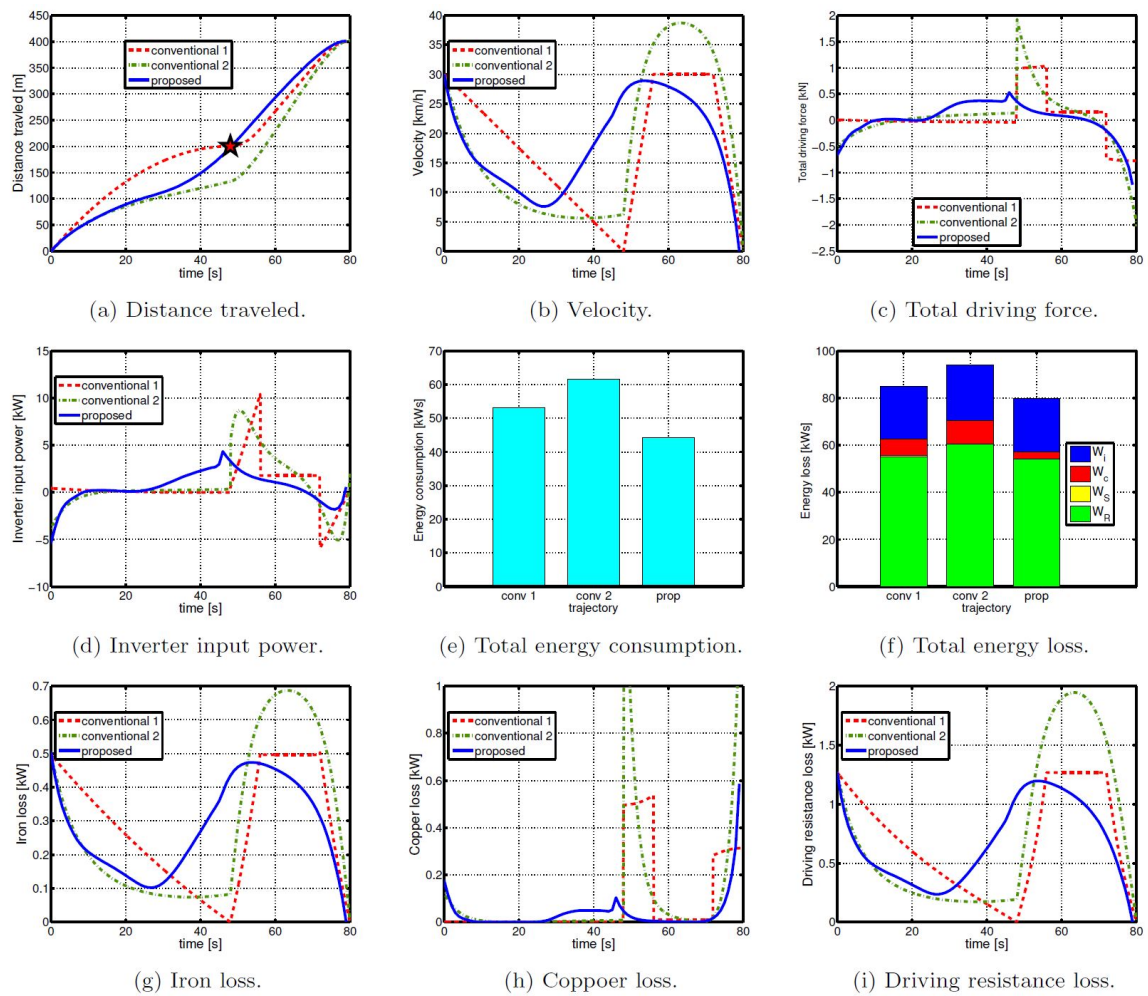


Fig. 4: 信号情報を考慮した READ のシミュレーション結果 [31]

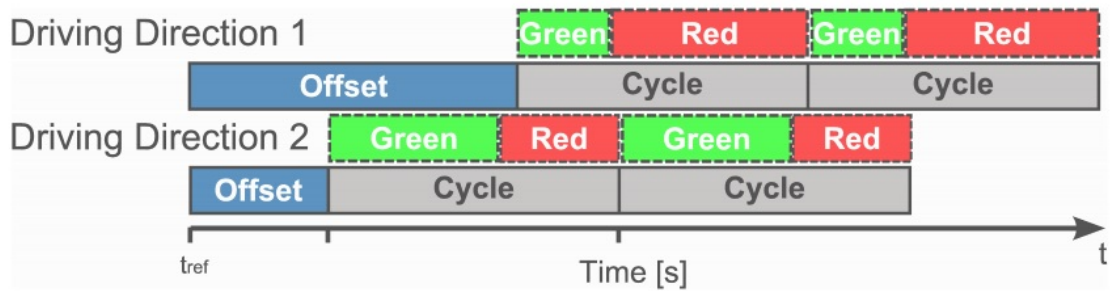


Fig. 5: 信号機のパラメータ [26]

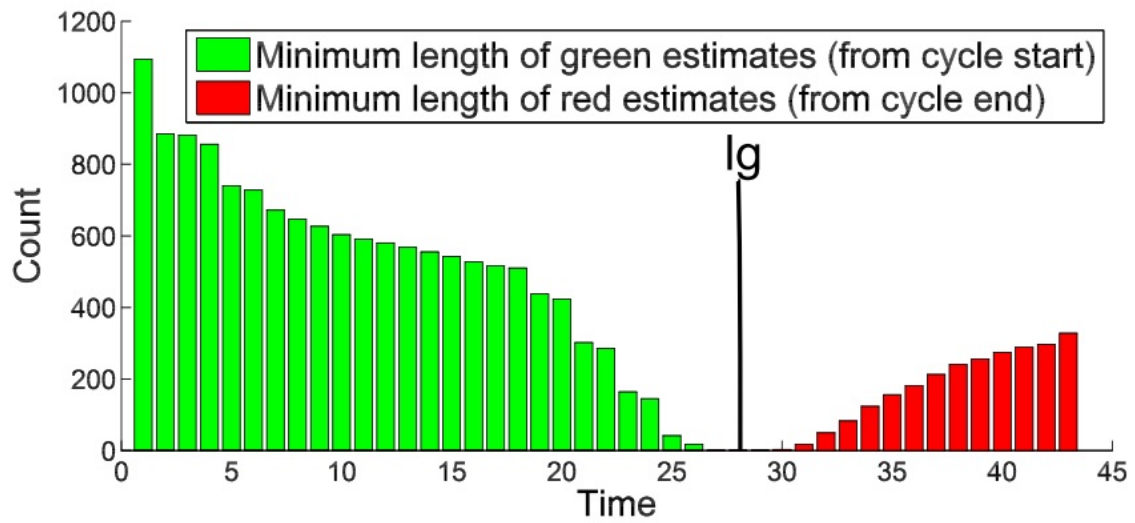


Fig. 6: 青信号時間の長さの推定に用いられたヒストグラム [26]

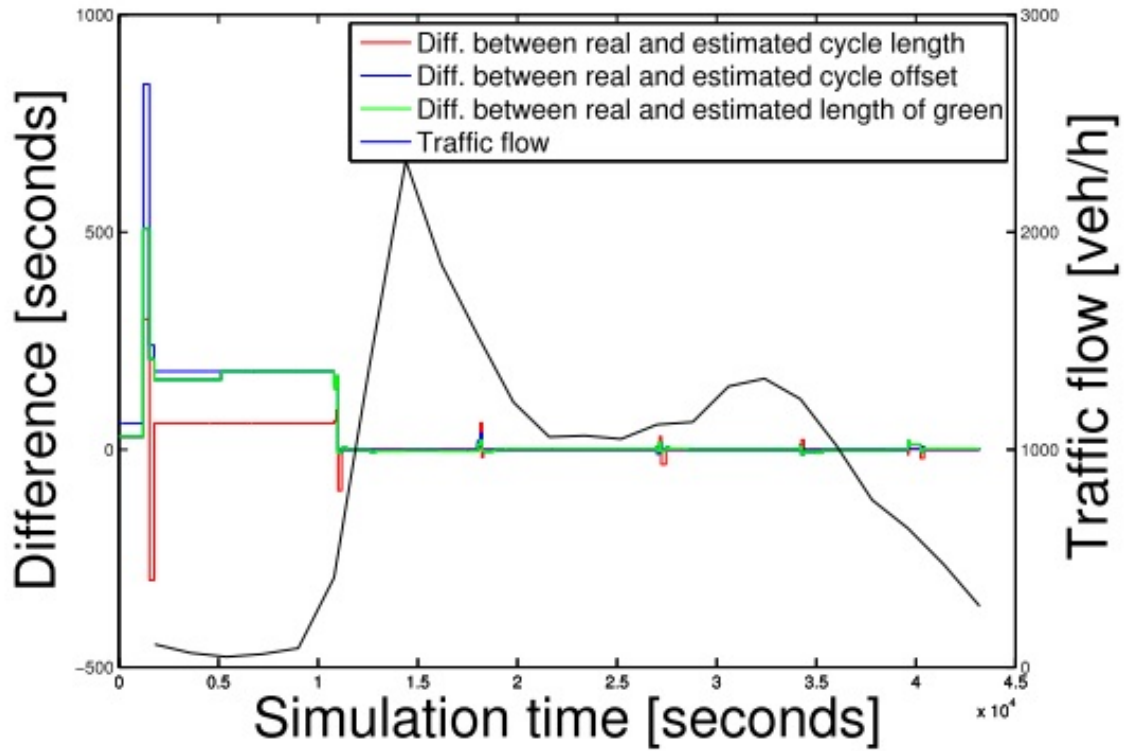


Fig. 7: 推定値と真値の誤差と交通流量 [26]

### 1.3 研究目的

従来の航続距離延長自動運転の課題として、実環境で使用されるような問題設定を十分に考慮がされておらず、実際に適用できる場面が制限されていたことが挙げられる。航続距離延長自動運転を普及するためには、より多く場面で使用できることは非常に重要である。そこで、本論文では消費エネルギーが増加する一般的な場面として信号機のある直線路に着目し、消費エネルギーを低減する速度軌道の導出を行う。従来は単一の信号機のみが考慮されていたため、この理論を拡張し、信号情報が外部から得られるという仮定の下、複数の信号機の存在する直線路においても適用できるように拡張し、消費エネルギーが最小となる速度軌道導出手法を提案する。さらにその発展として、外部から信号情報が得られない環境を想定し、信号情報の代わりに信号通過確率を用いた速度軌道導出手法を提案する。また、これらの手法の有効性をシミュレーション及び実験にて検証する。

### 1.4 本稿の構成

本稿ではまず、第2章に本稿で用いた勾配法、動的計画法についての説明を行う。第3章で実験車両とそのモデル化について述べる。次に、第4章では、信号機のある道路において停止をすることによる消費エネルギー量の増加について検証する。第5章では、信号情報を用いた複数の信号機を考慮した速度軌道設計手法について提案し、有効性を検証する。第6章では信号情報の代わりに信号通過確率を用いた速度軌道設計法について提案し、有効性を検証する。最後に、第7章でまとめを示す。

## 第 2 章

# 最適化手法

### 2.1 最適化とは

最適化とは、解決したい目的に対し、最も望ましい結果を達成するような自由変数を導き出すことを言う。この解決したい目的は評価関数として表され、この評価関数の最大化もしくは最小化を達成することを目指す。また、現実的な最適化問題ではこの自由変数に対し、ある種の制限が課されることが多く、この制限のことを拘束条件という。

最適化問題は評価関数と拘束条件によって線形計画問題(評価関数と拘束条件が1次式)、2次計画問題(評価関数と拘束条件が2次式)、非線形計画問題(上記以外)のように分類される。電気自動車を対象とした最適化問題は非線形計画問題に分類される。非線形計画問題は複雑な問題になると最小値を見つけ出すことが難しくなることもあり、他の問題に比べ難易度が高い。

### 2.2 最適化問題の数値解法

非線形系計画問題において、最適解を数値計算によって見つける様々な方法が提案されている。本節では、オイラーラグランジュ方程式及び本稿で用いる最適化手法である勾配法と動的計画法について述べる。

#### 2.2.1 オイラー・ラグランジュ方程式 [33]

制御対象である連続時間システムが状態方程式

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \tag{2-1}$$

で表されるとする。ここで、 $x(t)$  は状態ベクトル、 $u(t)$  は制御入力のベクトルである。基本的な問題設定として、初期時刻  $t_0$ 、終端時刻  $t_f$  及び初期状態  $x(t_0) = x_0$  が与えられ、状態方程式のみが等式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

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

で与えられているとする。 $[t_0, t_f]$  を評価区間、 $L(x(t), u(t), t)$  をステージコスト、 $\varphi(x(t_f))$  を終端ペナルティという。ここで考える最適制御問題は、関数  $x(t)$  と  $u(t)$  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  $f(x, u, t) - \dot{x} = 0$  に対応するラグランジュ乗数のベクトルを  $\lambda(t)$  として、拘束条件の下で停留条件を求めるための汎関数  $\bar{J}$  を構成すると、

$$\bar{J} = \varphi(x(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} \{L(x(t), u(t), t) + \lambda(t)^T (f - \dot{x})\} dt \quad (2-3)$$

となる。 $\lambda$  は随伴変数と呼ばれる。ここで、ハミルトニアン  $H$  を次のように定義する。

$$H(x, u, \lambda, t) = L(x, u, t) + \lambda^T f(x, u, t) \quad (2-4)$$

ハミルトニアン  $H$  を用い、 $\bar{J}$  の第一変分を計算すると、次のようになる。

$$\delta \bar{J} = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x}(x(t_f)) - \lambda^T(t_f) \right) \delta x(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} \left\{ \left( \frac{\partial H}{\partial x} + \lambda^T \right) \delta x + \frac{\partial H}{\partial u} \delta u \right\} dt \quad (2-5)$$

ここで、 $\delta x$  は制御入力を  $\delta u$  だけ変化した場合の  $x$  の変化である。この時、 $\bar{J} = 0$  であるため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。

$$\dot{x} = f(x, u, t), \quad (2-6)$$

$$x(t_0) = x_0, \quad (2-7)$$

$$\dot{\lambda} = - \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)^T (x, u, \lambda, t), \quad (2-8)$$

$$\lambda(t_f) = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^T (x(t_f)), \quad (2-9)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u}(x, u, \lambda, t) = 0. \quad (2-10)$$

### 2.2.2 勾配法 [33]

本節では本論文で用いた最適化手法の一つであり、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一つである勾配法について述べる。勾配法とは



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 (2-6) が成り立っているならば、式 (2-3) 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。式 (2-5) において、 $\lambda(t)$  が式 (2-8), (2-9) を満たすならば、

$$\delta\bar{J} = \int_{t_0}^{t_f} \frac{\partial H}{\partial u} \delta u dt \quad (2-11)$$

となり、評価関数地の微小変化  $\delta\bar{J}$  が制御入力の微小変化  $\delta u$  で簡潔に表せる。そして、

$$\int_{t_0}^{t_f} \frac{\partial H}{\partial u} s(t) dt < 0 \quad (2-12)$$

を満たす関数  $s(t)$  が効果方向に相当する。勾配を用いて探索方向を決定する反復解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げられる。以下では本稿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

$$s = - \left( \frac{\partial H}{\partial u} \right)^T \quad (2-13)$$

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ー  $\alpha > 0$  に対して、

$$\delta u = -\alpha \left( \frac{\partial H}{\partial u} \right)^T \quad (2-14)$$

とすれば、 $-\left(\frac{\partial H}{\partial u}\right) \neq 0$  である限り、

$$\bar{J} = -\alpha \int_{t_0}^{t_f} \left\| \frac{\partial H}{\partial u} \right\|^2 dt < 0 \quad (2-15)$$

となり、 $\bar{J}$  は減少し、 $\bar{J}$  が減少しなくなるのは  $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$  となったときである。以上をまとめると、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  $u(t)$  ( $t_0 \leq t \leq t_f$ ) を制御入力の初期推定解として与える。
2. 初期条件 (2-7) から状態方程式 (2-6) を終端時刻  $t_f$  まで数値的に解き、状態  $x(t)$  ( $t_0 \leq t \leq t_f$ ) を求める。
3. 終端条件 (2-9) から随伴方程式 (2-8) 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  $\lambda(t)$  ( $t_0 \leq t \leq t_f$ ) を求める。

4. 以上で求めた  $x, u, \lambda$  から各時刻  $t$  ( $t_0 \leq t \leq t_f$ ) における勾配  $\frac{\partial H}{\partial u}$  を計算する。勾配のノルム  $\left( \int_{t_0}^{t_f} \|\partial H / \partial u\|^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}$  が十分 0 に近ければ停止し、そうでなければ次のステップへいく。
5.  $s = -(\partial H / \partial u)^T$  と置く。
6. 制御入力を  $u + \alpha s$  としたときの評価関数  $J[u + \alpha s]$  が最小になるスカラー  $\alpha$  を求め、それを  $\alpha^*$  とする。
7.  $u := u + \alpha^* s$  として、ステップ 2 へ戻る。

### 2.2.3 動的計画法 [33]

本節では本論文で用いた最適化手法の一つである動的計画法について述べる。動的計画法とは対象となる問題を複数の部分問題に分割し、部分問題の計算結果を記録しながら解いていく手法である。その特性上、問題を離散化する必要がある。以下に動的計画法について述べる。

制御対象の離散時間システムが

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), k) \quad (2-16)$$

という状態方程式であらわされるとする。ここで、 $k$  は離散的な時刻を表し、 $x(k)$  は時刻  $k$  におけるシステムの状態ベクトル、 $u(k)$  は時刻  $k$  における入力ベクトルをそれぞれ表す。最小化すべき評価関数は

$$J = \varphi(x(N)) + \sum_{k=0}^{N-1} L(x(k), u(k), k) \quad (2-17)$$

であり、これを最小にする制御入力の系列  $u(0), \dots, u(N-1)$  を求める。ここで  $N$  は正の整数であり、 $\{0, \dots, N\}$  を評価区間と呼び、関数  $L(x(k), u(k), k)$  をステージコスト、関数  $\varphi(x(N))$  を終端コストという。

この時間軸方向へ離散化された問題に対し、どのような初期状態に対しても最適制御が存在するならば、評価関数の最小値が初期状態の関数とみなせる。時刻  $k$  ( $0 \leq k \leq N$ ) で状態  $x(k) = x$  から出発した時の評価関数の最小値を達成する入力系列  $\{u(l)\}_{l=k}^{N-1}$  が存在すると仮定し、評価関数の最小値を  $V(x, k)$  と表すことにする。つまり、

$$V(x, k) = \min_{\{u(l)\}_{l=k}^{N-1}} \left( \varphi(x(N)) + \sum_{l=k}^{N-1} L(x(l), u(l), l) \right) \quad (2-18)$$

と定義する．これを値関数という．評価区間全体での評価関数  $J$  の最小値は  $V(x(0), 0)$  で与えられる．時刻  $k$  における値関数を時刻  $k + 1$  における値関数で表すことを考える．時刻  $k$  におけるコスト  $L(x(k), u(k), k)$  はそれ以降の時刻における入力  $u(k + 1), \dots, u(N - 1)$  とまったく無関係であることを利用すると，以下のように式変形できる．

$$V(x, k) = \min_{\{u(l)_{l=k}^{N-1}\}} \left( L(x(k), u(k), k) + \varphi(x(N)) + \sum_{l=k+1}^{N-1} L(x(l), u(l), l) \right), \quad (2-19)$$

$$\begin{aligned} &= \min_{u(k)} \left\{ L(x(k), u(k), k) + \min_{\{u(l)_{l=k+1}^{N-1}\}} \left( \varphi(x(N)) + \sum_{l=k+1}^{N-1} L(x(l), u(l), l) \right) \right\} \\ &= \min_{u(k)} (L(x(k), u(k), k) + V(f(x(k), u(k), k), k + 1)). \end{aligned} \quad (2-20)$$

ただし， $x(k) = x$  である時刻  $k + 1$  における状態は入力  $u(k)$  に依存して  $x(k + 1) = f(x(k), u(k), k)$  となっていることに注意する．上の式において  $x(k), u(k)$  が時刻  $k$  に依存することは使っていないので，値関数  $V(x, 0), \dots, V(x, N)$  を  $k = N$  から  $k = 0$  まで再帰的に決定する条件として

$$V(x, k) = \min_u (L(x, u, k) + V(f(x, u, k), k + 1)) \quad (2-22)$$

$$V(x, N) = \varphi(x) \quad (2-23)$$

が得られる．このように，評価関数の最小値を再帰的に表す手法を動的計画法という．実際に数値解法として動的計画法を使用する場合は，状態空間の離散化も必要になる．よって，本論文では時間軸の離散化だけではなく，状態変数として速度，距離も合わせてを離散化した3次元の動的計画法を使用する．動的計画法のアルゴリズムを以下に示す [?].

3次元の動的計画法においては，時間，速度，距離の3つを離散化する際にその刻みを以下のようにとる．

$$\Delta t = \text{constant}, \quad (2-24)$$

$$\Delta V = \text{constant}, \quad (2-25)$$

$$\Delta X = \frac{1}{2} \Delta V \Delta t. \quad (2-26)$$

このような刻みを取ることで，最適軌道が常に格子点上に存在するように計算することができる．ただし制御入力は加速度  $a_x$  とし，次の式で離散化する．

$$a_x = \frac{n \Delta V}{\Delta t}. \quad (2-27)$$

ここで， $n$  は0以上の整数である．

1. 位置  $X$ , 速度  $V$  からなる状態空間を格子状に分割し, 各格子点を計算対象点として定める.
2. 終端条件を合わせるために, ステージ  $N$  における終端条件を満たす格子点には  $0$  を, それ以外には  $\infty$  を与える.
3. ステージを  $k = N - 1$  へと遡る.
4. ステージ  $k$  の状態空間上の各格子点に対し,  $k + 1$  段階における評価値をもとに探索を行い, 評価値を最小化する最適な部分制御入力を決定する. また, その時の評価値を該当する格子点の評価値として保存する.
5. ステージを  $k = k - 1$  へと遡り,  $k \neq 1$  であればアルゴリズムの4へと戻る.
6. 始点  $k = 1$  から  $k = N$  へ向かって時間順に, 各時間における最適制御入力をたどれば最適速度軌道が得られる.

## 第 3 章

# 実験車両と車両モデル

### 3.1 実験車両

本節では実験車両について述べる．Fig. 8 に示す車両は当研究室で作成した FPEV2-Kanon である．本実験車両の車両諸元は Tab. 3 に示す．この車両は 4 輪全てに東洋電機製造製ダイレクトドライブ方式のアウトロータ型インホイールモータを搭載している．そのため，各輪独立駆動が可能である．また，このモータはダイレクトドライブ方式であるため，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．前後輪のモータの仕様を Tab. 4 を示す．



Fig. 8: FPEV2-Kanon.

Tab. 3: 車両諸元

Vehicle mass $M$	854 kg
Front wheel inertia $J_{\omega_f}$	1.24 kg·m <sup>2</sup>
Rear wheel inertia $J_{\omega_r}$	1.26 kg·m <sup>2</sup>
Wheelbase $l$	1.715 m
Rolling radius $r$	0.302 m
Distance from the center of gravity to the front and rear axles $l_f, l_r$	$l_f$ :1.013 m $l_r$ :0.702 m
Height of the center of gravity $h_g$	0.51 m

Tab. 4: インホイールモータ諸元

	Front	Rear
Manufacturer	TOYO DENKI SEIZO K.K.	
Type	Direct drive system Outer rotor type	
Rated torque	110 Nm	127 Nm
Maximum torque	500 Nm	530 Nm
Rated power	6.00 kW	6.00 kW
Maximum power	20.0 kW	25.0 kW
Rated speed	382 rpm	450 rpm
Maximum speed	1110 rpm	1200 rpm

## 3.2 車両モデル

本節では車両モデルについて述べる．本論文では走行時の勾配がない場合の直進モデルのみを扱う．1輪あたりの回転方程式は式(3-1)で表される．本稿では各輪にトルクを均等に配分する直進運動を取り扱うため，車両の運動方程式は式(3-2),(3-3)で表される．

$$J_{w_j} \dot{\omega}_j = T_j - r F_j, \quad (3-1)$$

$$M \dot{V} = F_{\text{all}} - \text{sgn}(V) F_{\text{DR}}, \quad (3-2)$$

$$F_j = \frac{1}{4} F_{\text{all}}, \quad (3-3)$$

ここで、 $j$ は各ホイールを表す添え字であり、前輪であれば $f$ 、後輪であれば $r$ が対応する。 $J_{w_j}$ は車輪回転部慣性モーメント、 $w_j$ は車輪角速度、 $T_j$ はモータトルク、 $r$ は車輪半径、 $F_j$ は各輪の制駆動力、 $M$ は車体重量、 $V$ は車体速度、 $\text{sgn}(V)$ は符号関数である。走行抵抗 $F_{\text{DR}}$ は式(3-4)のように表される。

$$F_{\text{DR}}(V) = \mu_0 M g + b|V| + \frac{1}{2}\rho C_d A V^2, \quad (3-4)$$

ここで、 $\mu_0$ は転がり摩擦係数、 $b$ は $V$ の一次に比例する抵抗係数、 $\rho$ は空気密度、 $C_d$ は抗力係数、 $A$ は前方投影面積である。

次にスリップ率 $\lambda_j$ を車輪速 $V_{w_j} = r\omega_j$ と車体速 $V$ により式(3-5)で定義する。

$$\lambda_j = \frac{V_{w_j} - V}{\max(V_{w_j}, V, \epsilon)}, \quad (3-5)$$

ここで、 $\epsilon$ は零割防止のための微小定数である。 $\lambda \ll 1$ の領域では、Fig. 9のように $\mu$ はほぼ $\lambda$ に比例する。この傾きを $D_s'$ とすると、タイヤが発生する駆動力は、前後一輪当たりの垂直抗力 $N_j$ を用いて式(3-6)で表される。

$$F_j = \mu_j N_j \simeq D_s' N_j \lambda_j, \quad (3-6)$$

このとき、 $N_j$ は(3-7)–(3-8)で表される。

$$N_f = \frac{1}{2} \left[ \frac{l_r}{l} M g - \frac{h_g}{l} \{ F_{\text{all}} - \text{sgn}(V) F_{\text{DR}}(V) \} \right], \quad (3-7)$$

$$N_r = \frac{1}{2} \left[ \frac{l_f}{l} M g + \frac{h_g}{l} \{ F_{\text{all}} - \text{sgn}(V) F_{\text{DR}}(V) \} \right], \quad (3-8)$$

ここで、 $l_f$ 、 $l_r$ は車両重心点から前後駆動点までの距離、 $h_g$ は重心高である。また本稿では、速度軌道の変動について考察するため、前後輪の駆動力は等しいとする。

$$F_f = F_r = \frac{1}{4} F_{\text{all}} \quad (3-9)$$

### 3.3 インバータ入力電力モデル [28]

本節では、インバータ入力電力 $P_{\text{in}}$ をモデル化する。機械損失、インバータ損失を無視すると、 $P_{\text{in}}$ は式(3-10)で表される。

$$P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + P_c + P_i, \quad (3-10)$$

ここで、 $P_{\text{out}}$ 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。

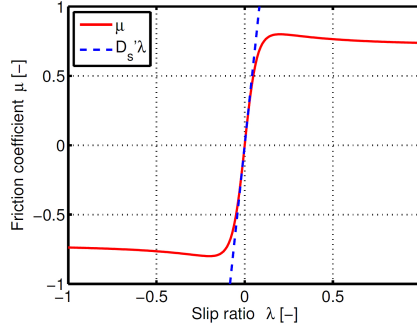


Fig. 9:  $\mu$ - $\lambda$  曲線.

車輪の慣性力に起因するトルクは十分小さいとして無視し，スリップ率が十分小さいものとする，モータトルク  $T_j$  と車輪角速度  $\omega_j$  は式 (3-11), (3-12) で表される。

$$T_j \simeq rF_j, \quad (3-11)$$

$$\omega_j \simeq \frac{V}{r}(1 + \lambda_j). \quad (3-12)$$

したがって， $P_{\text{out}}$  は式 (3-13) のように表される。

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= 2 \sum_{j=f,r} \omega_j T_j \\ &\simeq \frac{1}{2} V F_{\text{all}} \sum_{j=f,r} \left( 1 + \frac{F_{\text{all}}}{4D_s' N_j(V, F_{\text{all}})} \right). \end{aligned} \quad (3-13)$$

次に，モータ銅損のモデル化を行う。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，モータの銅損は式 (3-16) で表される。

$$P_c = 2 \sum_{j=f,r} R_j i_{qj}^2 \quad (3-14)$$

ここで， $R_j$  はモータの電機子巻線抵抗， $i_{qj}$  はモータの  $q$  軸電流である。上記の条件のもとでは， $q$  軸電流とトルク  $T_j$  について次式が成り立つ。

$$i_{qj} = \frac{T_j}{K_{tj}} = \frac{T_j}{P_{nj} \Psi_j} \quad (3-15)$$

$K_{tj}$  はモータのトルク定数， $P_{nj}$  は極対数， $\Psi_j$  は永久磁石による鎖交磁束である。したがって，モータ銅損  $P_c$  は式 (3-11) を適用することで式 (3-16) のように書ける。

$$P_c = \frac{r^2}{8} F_{\text{all}}^2 \sum_{j=f,r} \frac{R_j}{K_{tj}^2}, \quad (3-16)$$



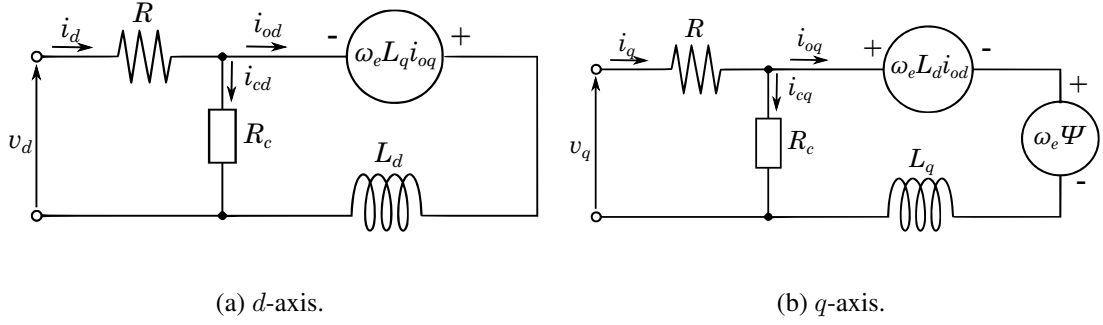


Fig. 10: PMSM の等価回路

ここで、 $R_j$  はモータの電機子巻線抵抗、 $i_{qj}$  は  $q$  軸電流、 $K_{tj}$  はモータのトルク定数である。

次に等価回路モデルに基づいてモータの鉄損  $P_i$  をモデル化する。Fig. 10 は PMSM の  $d$  軸および  $q$  軸等価回路を示す。これより、 $P_i$  は式 (3-17) のように表される。

$$\begin{aligned}
 P_i &= 2 \sum_{j=f,r} \frac{v_{odj}^2 + v_{oqj}^2}{R_{cj}} \\
 &= 2 \sum_{j=f,r} \frac{\omega_{ej}^2}{R_{cj}} \left\{ (L_{dj} i_{odj} + \Psi_j)^2 + (L_{qj} i_{oqj})^2 \right\} \\
 &\simeq 2 \frac{V^2}{r^2} \sum_{j=f,r} \frac{P_{nj}^2}{R_{cj}} \left\{ \left( \frac{r L_{qj} F_{\text{all}}}{4 K_{tj}} \right)^2 + \Psi_j^2 \right\}, \tag{3-17}
 \end{aligned}$$

ここで、 $v_{odj}$  および  $v_{oqj}$  はそれぞれ  $d$  軸および  $q$  軸の誘起電圧、 $R_{cj}$  は等価鉄損抵抗、 $\omega_{ej}$  は各モータの電気角速度、 $L_{dj}$  は  $d$  軸インダクタンス、 $L_{qj}$  は  $q$  軸インダクタンス、 $i_{odj}$  および  $i_{oqj}$  はそれぞれ軸電流  $i_{dj}$ 、 $i_{qj}$  と鉄損電流の  $dq$  軸成分  $i_{cdj}$ 、 $i_{cqj}$  の差である。 $P_{nj}$  は極対数の数であり、 $\Psi_j$  は永久磁石による鎖交磁束である。等価鉄損抵抗  $R_{cj}$  は式 (3-18) で表される。

$$\frac{1}{R_{cj}(\omega_{ej})} = \frac{1}{R_{c0j}} + \frac{1}{R_{c1j}' |\omega_{ej}|}. \tag{3-18}$$

式 (3-18) において、右辺の第一項と第二項はそれぞれ渦電流損とヒステリシス損である。以上より、インバータ入力電力  $P_{\text{out}}$  は  $V, F_{\text{all}}$  の関数として表される。

$$P_{\text{in}}(V, F_{\text{all}}) = P_{\text{out}}(V, F_{\text{all}}) + P_c(F_{\text{all}}) + P_i(V, F_{\text{all}}) \tag{3-19}$$

### 3.4 損失分離

シミュレーションにおいて走行速度の変化がエネルギーに与える影響を詳細に分析するために、機械出力  $P_{\text{out}}$  をEVの運動エネルギーによる仕事率  $P_M$ 、車輪が持つ回転エネルギーによる仕事率  $P_J$ 、走行抵抗による仕事率  $P_{\text{DR}}$ 、タイヤのスリップによる仕事率  $P_S$  に分離する。これらは式(3-21)–(3-24)で表される。

$$P_{\text{out}} = P_M + P_J + P_{\text{DR}} + P_S \quad (3-20)$$

$$P_M = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} MV^2 \right) \quad (3-21)$$

$$P_J = 2 \frac{d}{dt} \sum_{j=f,r} \left( \frac{1}{2} J \omega_j^2 \right) \quad (3-22)$$

$$P_{\text{DR}} = F_{\text{DR}} V, \quad (3-23)$$

$$P_S = \frac{1}{2} F_{\text{all}} V \sum_{j=f,r} \lambda_j \quad (3-24)$$

これらの仕事  $W_x$  は仕事率  $P_x$  の積分で与えられる。

$$W_M = \int_{t_0}^{t_f} P_M dt \quad (3-25)$$

$$W_J = \int_{t_0}^{t_f} P_J dt \quad (3-26)$$

$$W_{\text{DR}} = \int_{t_0}^{t_f} P_{\text{DR}} dt \quad (3-27)$$

$$W_S = \int_{t_0}^{t_f} P_S dt \quad (3-28)$$

$$W_c = \int_{t_0}^{t_f} P_c dt \quad (3-29)$$

$$W_i = \int_{t_0}^{t_f} P_i dt \quad (3-30)$$

初期速度  $V_0$  および終端速度  $V_f$  は変化しないため、 $W_M$  および  $W_J$  は速度軌道によらず同じ値をとる。よって影響を分析するためには  $W_{\text{DR}}, W_S, W_c, W_i$  の4つの損失を調べればよい。

### 3.5 信号機のモデル

本稿では次式より信号機をモデル化する.

$$s_i(t, X_i) = \begin{cases} 0 & (0 \leq t \leq (1 - q_{s_i})T_s) \\ 1 & ((1 - q_{s_i})T_s < t \leq T_s) \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (3-31)$$

$X_i$  はスタート地点から  $i$  番目の信号機が設置されている位置を示す.  $s_i(t, X_i)$  は時刻  $t$ , 位置  $X_i$  の信号機の信号情報である. 青信号の時は 1, 赤信号の時は 0 を出力する関数である.  $T_s$  はサイクルであり, 信号灯が青から赤と一巡する時間を示す.  $q_{s_i}$  はスプリットであり, 1 サイクルの時間のうち, 青に割り当てられる時間の割合を示す. Start 地点  $X_0$ , Goal 地点  $X_f$  は車載カメラによって取得できるものとする.

## 第4章

# 信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証

一般的に、赤信号により交差点で一時停止した場合、消費エネルギー量は増加すると言われている。しかし、実際に消費エネルギー量が増加するのか、またはどの程度増加するのかを示した研究はない。そこで、本節では実際に赤信号で一時停止した場合の消費エネルギー量を計算し、検証する。

### 4.1 消費エネルギー最小化問題の定式化

本稿では自動運転車を想定し、通勤通学などで何度も同じルートを通ることによって事前に信号が変わるタイミングを推定し、その時刻で信号が青に変わるとしてスタート地点からゴール地点までの最適速度軌道で走行する。この車両が推定した信号が変わる時刻を $t_v$ とする。また、実際に信号が変わる時刻を $t_c$ とする。初期時刻 $t_0$ から終端時刻 $t_f$ までの総エネルギー消費量を最小化するため、速度軌道を最適化する評価関数及び拘束条件は以下の式となる。

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

$$s.t. \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (4-2)$$

$$\chi(\mathbf{x}(t_0)) = \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 = \mathbf{0} \quad (4-3)$$

$$\psi(\mathbf{x}(t_f)) = \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f = \mathbf{0} \quad (4-4)$$

$$0 \leq V(t) \leq V_{\text{lim}} \quad (4-5)$$

$$F_{\text{min}} \leq F_{\text{all}}(t) \leq F_{\text{max}} \quad (4-6)$$

$$X(t_0) \leq X_1 \quad (4-7)$$

$$X_1 \leq X(t) \quad (t \leq (1 - q_s)T_s) \quad (4-8)$$

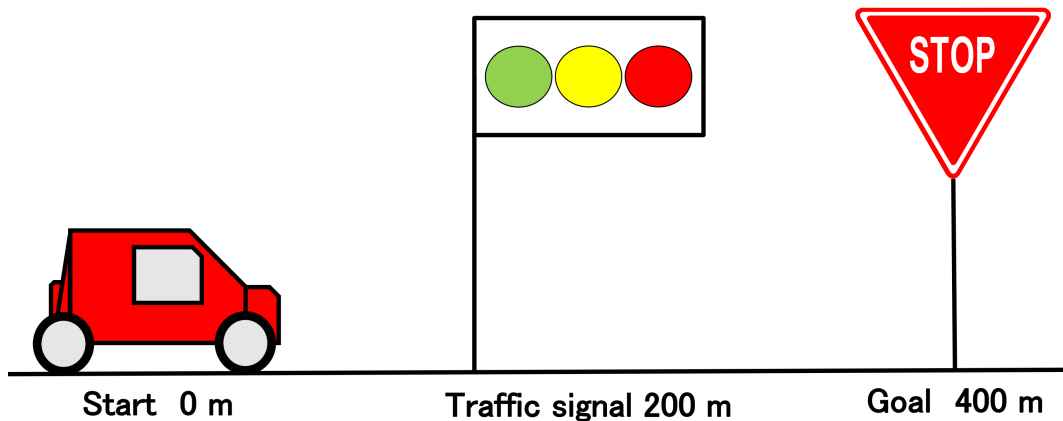


Fig. 11: 一時停止による消費エネルギー量の検証における走行経路

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \end{bmatrix}, \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} F_{\text{all}}(t) \\ k(t) \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

ここで、 $X(t)$  は走行距離、 $\mathbf{x}_0$  は初期条件  $\mathbf{x}_f$  は終端条件である。オイラー・ラグランジュ方程式を満たすように最急降下法を用いて評価関数が最小となる最適解を導出する。

## 4.2 信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証の問題設定

初期時刻に Start 地点で 30.0 km/h で走行していた電気自動車は信号機は 200 m 地点に設置してある直線道路を走行し、ゴール地点 400 m で目標時間  $t_f = 80.0$  s 以内に車両が停止する場合について考える。ここで、信号機の設置位置  $X_1$ 、Start 地点  $X_0$ 、Goal 地点  $X_f$  は車載カメラによって取得できるものとする。

### 4.2.1 車両速度軌道導出法

本節では、車両がスタート地点において信号が切り替わる時刻  $t_v$  を推定し、この時刻で信号機が赤から青に変化する際の最適速度軌道でゴール地点まで走行する。しかし、実際に信号機が切り替わる時刻  $t_c$  は  $t_v$  と異なることも多くあると考えられる。異なる場合の車両の挙動を以下に示す。

$t_v > t_c$  の場合

この場合、車両が信号切り替わりタイミングと仮定している時刻  $t_v$  よりも実際に信号が切り替わるタイミング  $t_c$  の方が早い。よって実際に信号機が赤から青に変わる時刻  $t_c$  まで時刻  $t_v$  で赤から青になると仮定して走行する。その後、目標時間内にゴール地点まで速度軌道を総消費エネルギー量が最小となるように最適化した速度軌道で走行する。

$t_v \leq t_c$  の場合

この場合、車両が信号切り替わりタイミングと仮定している時刻  $t_v$  よりも実際に信号が切り替わるタイミング  $t_c$  の方が遅い。よって、まず信号機が時刻  $t_v$  で赤から青になると仮定して走行する。予め決められた条件で減速、停止し、時刻  $t_c$  を過ぎると、目標時間内にゴール地点まで速度軌道を総エネルギーが最小となるように最適化した速度軌道で走行する。減速停止の条件を以下に示す。

減速停止モデル

車両が信号機手前で安全に減速、停止するために、Deceleration and Stop model(DSM)を定めた。DSMを適用する距離つまり減速を開始する距離を  $X_{\text{DSM}}$ 、その位置での車両速度を  $V_{\text{DSM}}$  とする。本稿では、 $X_{\text{DSM}} = 10 \text{ m}$  とする。車両の位置  $X \leq X_1 - X_{\text{DSM}}$  の場合、それまで走行する予定であった軌道を走行する。その後、 $X_1 - X_{\text{DSM}} = 190 \text{ m}$  地点に到達した場合は信号手前で止まれるように、一定加速度  $a_{\text{DSM}}$  で減速する。

$$a_{\text{DSM}} = -\frac{V_{\text{DSM}}^2}{2(X_1 - X_{\text{DSM}})} \quad (4-10)$$

### 4.3 信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の の検証のシミュレーション

本節ではシミュレーションについて述べる。

#### 4.3.1 信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証のシミュレーション条件

初期時刻  $t_0=0.00 \text{ s}$ 、初期速度  $V_0=30.0 \text{ km/h}$ 、初期位置  $X_0=0.00 \text{ m}$ 、終端時刻  $t_f=80.0 \text{ s}$ 、終端速度  $V_f=0.00 \text{ km/h}$ 、終端位置  $X_f=400 \text{ m}$ 、スプ

リット  $q_s = 0.4$ , サイクル  $T_s = 48$  s とした.  $t_v$  と  $t_c$  を様々な値に変化させたときの消費エネルギー量を導出し, その結果を考察する事で信号機で減速停止による消費エネルギー量の変化について検証する.

### 4.3.2 信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証のシミュレーション結果

様々な  $t_v$  と  $t_c$  の場合の消費エネルギーを計算した結果を Tab. 5 に示す.  $t_v$  毎に消費エネルギーの平均値を導出した. 平均値が一番低くなったのは  $t_v \leq 32$  s であった.

最適減速軌道 (trajectory1),  $t_v = 40$  s,  $t_c = 16$  s の場合 (trajectory2),  $t_v = 40$  s,  $t_c = 48$  s の場合 (trajectory3) の3つの速度軌道について, Fig. 12 に速度軌道, 走行距離, 総駆動力, インバータ入力電力, 総消費エネルギー量, エネルギー損失, 鉄損, 銅損, 走行抵抗損失を示す. Fig. 12(b) の星印は同じ色の軌道における信号機が赤から青に切り替わるタイミングを示す.

Fig. 12(e) の全走行区間における総エネルギー消費量は, trajectory1, trajectory2, trajectory3 はそれぞれ 36.7 kW<sub>s</sub>, 50.3 kW<sub>s</sub>, 63.5 kW<sub>s</sub> である. trajectory1 は, trajectory2, trajectory3 と比較すると 27.2 %, 42.3 % 低い.

Fig. 12(f) の全走行区間におけるエネルギー損失において, trajectory1 は, trajectory2, trajectory3 と比較すると銅損が 55.2 %, 92.7 % 低い. また, 鉄損が trajectory1 は, trajectory2, trajectory3 と比較すると 6.8 %, 11.35 % 低い. 走行抵抗による損失は trajectory1 は, trajectory2, trajectory3 と比較すると 6.4 %, 13.6 % 低い.

## 4.4 信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証の実験

### 4.4.1 信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証の台上試験

株式会社小野測器の保有する RC-S[35] を用いて, シミュレーションと同じ条件で台上試験を行った. その結果を Tab. 6 に示す. それぞれ3回ずつの走行を行い, 消費エネルギーの平均値と標準偏差を示している. シミュレーション結果と比較すると全体的に低い数値となったが, 傾向としてはシミュレーションと全く同じ傾向の結果が得られた. 値が低くなった原因としてはモデル化誤差や走行によ

Tab. 5: 総消費エネルギー量 [kWs](一時停止による消費エネルギー量の検証におけるシミュレーション結果)

$t_c(s)$ \ $t_v(s)$	8	16	24	32	40	48
8	36.65	36.65	36.65	36.65	50.19	50.87
16	36.65	36.65	36.65	36.65	50.34	51.25
24	36.65	36.65	36.65	36.65	50.99	52.29
32	51.06	51.06	51.06	51.06	51.01	53.52
40	56.37	56.37	56.37	56.37	51.23	54.55
48	64.05	64.05	64.05	64.05	63.5	56.73
ave.	46.91	46.91	46.91	46.91	52.88	53.2

Tab. 6: 総消費エネルギー量 [kWs](一時停止による消費エネルギー量の検証における RC-S 台上試験による実証実験)

$t_c(s)$ \ $t_v(s)$	8	16	24	32	40	48
8	25.5±1.15	25.5±1.15	25.5±1.15	25.5±1.15	27.67±2.35	27.93±2.98
16	25.5±1.15	25.5±1.15	25.5±1.15	25.5±1.15	27.91±2.34	28.47±1.4
24	25.5±1.15	25.5±1.15	25.5±1.15	25.5±1.15	28.77±1.88	29.42±3.93
32	29.66±2.91	29.66±2.91	29.66±2.91	29.66±2.91	28.82±1.3	31.25±1.68
40	34.49±0.98	34.49±0.98	34.49±0.98	34.49±0.98	32.47±1.84	32.93±1.42
48	43.02±2.36	43.02±2.36	43.02±2.36	43.02±2.36	42.19±1.84	40.96±1.81
ave.	30.61	30.61	30.61	30.61	31.31	31.83

て電流プローブのずれが生じオフセットがのったことなどが考えられる。

次に、最適減速軌道 (trajectory1),  $t_v = 40$  s,  $t_c = 16$  s の場合 (trajectory2),  $t_v = 40$  s,  $t_c = 48$  s の場合 (trajectory3) の3つの速度軌道についてシミュレーション値と比較した。この3つにおいて Fig. 13 に速度軌道, 走行距離, 総駆動力, インバータ入力電力を示す。また, Tab. 7 にシミュレーションとの比較を示す。シミュレーションでは trajectory1 は, trajectory2 と比べて 27.2 %, trajectory3 と比べて 42.3 % 消費エネルギーが減少している。台上実験の結果では, trajectory1 は, trajectory2 と比較して 8.6 %, trajectory3 と比べて 39.6 % 消費エネルギーが減少している。



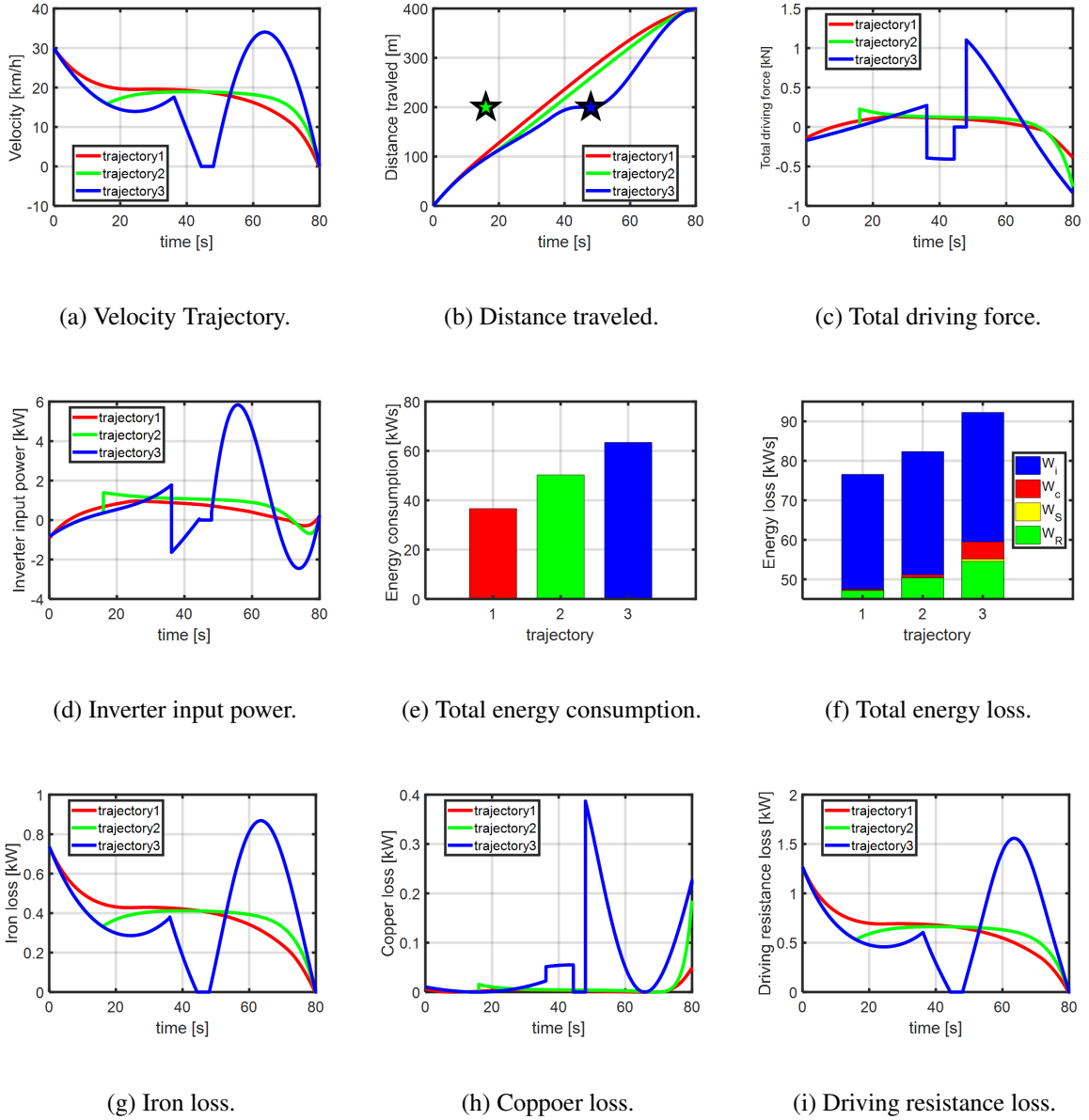
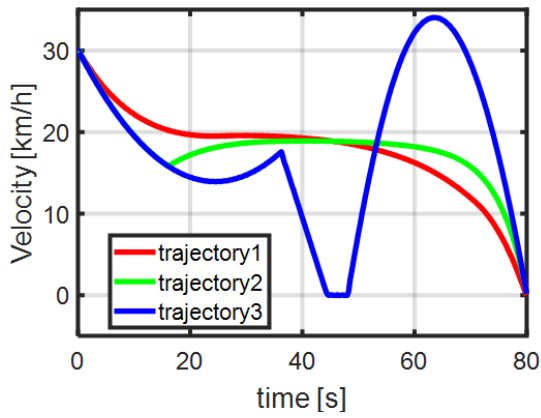


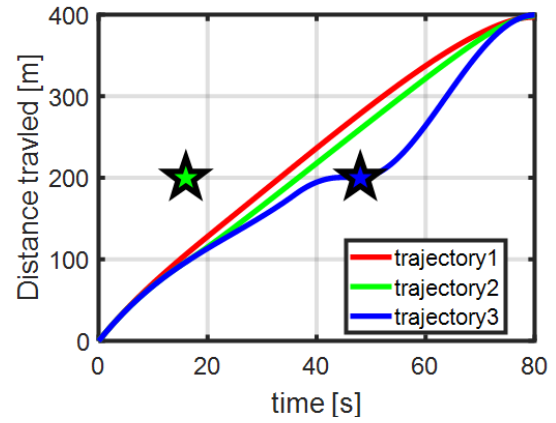
Fig. 12: 一時停止による消費エネルギー量の検証におけるシミュレーション結果

#### 4.4.2 信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証の実走実験

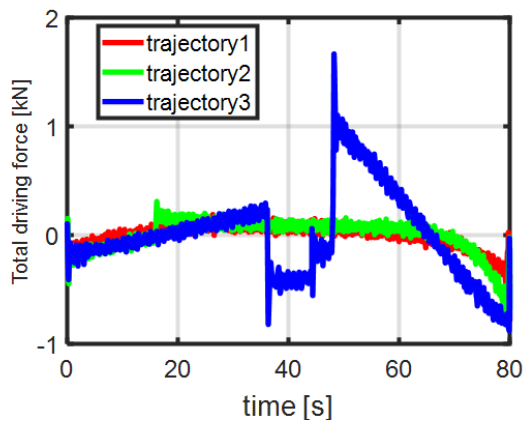
交通安全環境研究所の実験場にて、走行実験を行った。実験場の走行コースの大きさを考慮し、初期時刻  $t_0=0.00$  s, 初期速度  $V_0=30.0$  km/h, 初期位置  $X_0=0.00$  m, 終端時刻  $t_f=80.0$  s, 終端速度  $V_f=0.00$  km/h, 終端位置  $X_f=200$  m, 信号位置  $X_1=100$  m, スプリット  $q_s = 0.4$ , サイクル  $T_s = 24$  s とし、最適減速軌道 (trajectory1'),  $t_v = 20$  s,  $t_c = 8$  s の場合 (trajectory2'),  $t_v = 20$  s,  $t_c = 24$  s の場合 (trajectory3') の3つの速度軌道について実験を行った。この3つにおいて Fig. 14 に速度軌道, 走行距離, 総駆動力, インバータ入力



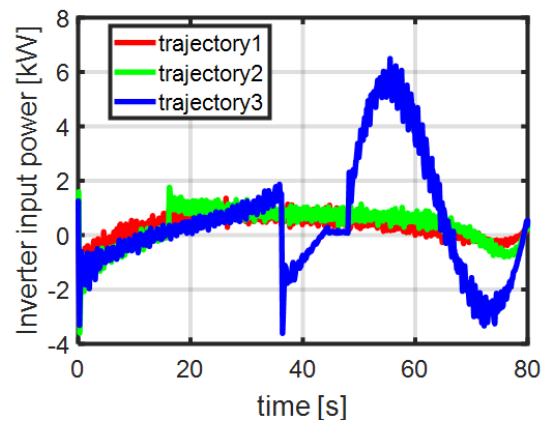
(a) Velocity Trajectory.



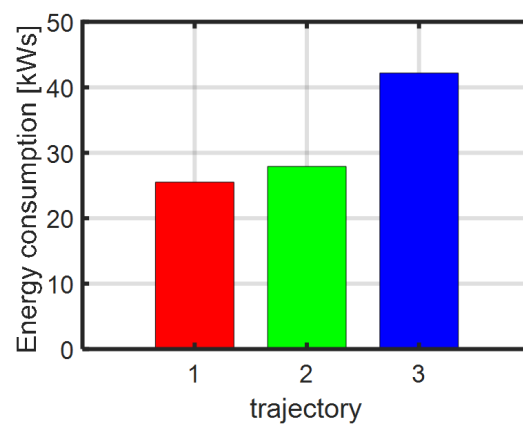
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.



(d) Inverter input power.



(e) Total energy consumption.

Fig. 13: 一時停止による消費エネルギー量の検証における RC-S 台上試験による実証実験結果

Tab. 7: 総消費エネルギー量 [kWs](一時停止による消費エネルギー量の検証におけるシミュレーション結果と RC-S 台上試験による実証実験結果の比較)

	trajectory1	trajectory2	trajectory3
Simulation	36.65	50.34	63.5
Experiment	25.5±1.15	27.91±2.34	42.19±1.84

Tab. 8: 総消費エネルギー量 [kWs](一時停止による消費エネルギー量の検証におけるシミュレーション結果と実走実験結果の比較)

	trajectory1'	trajectory2'	trajectory3'
Simulation	20.79	21.33	32.34
Experiment	16.49±2.27	16.97±1.98	36.69±2.32

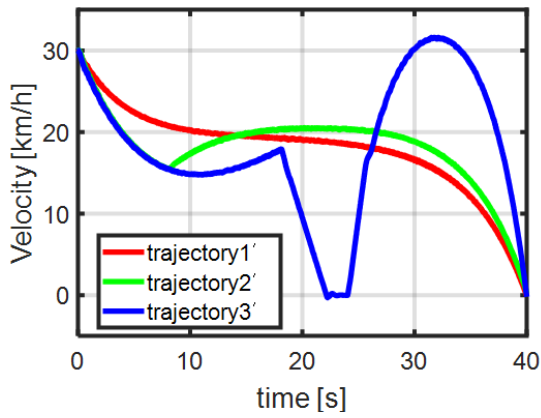
を示す。また、Tab. 8はシミュレーションとの比較を示す。シミュレーションでは trajectory1' は、2' と比べて 2.5 %、3' と比べて 35.7 % 消費エネルギーが減少している。実走実験の結果では、trajectory1' は、2' と比べて 2.8 %、3' と比べて 55.1 % 消費エネルギーが減少している。

#### 4.5 一時停止による消費エネルギー量の考察

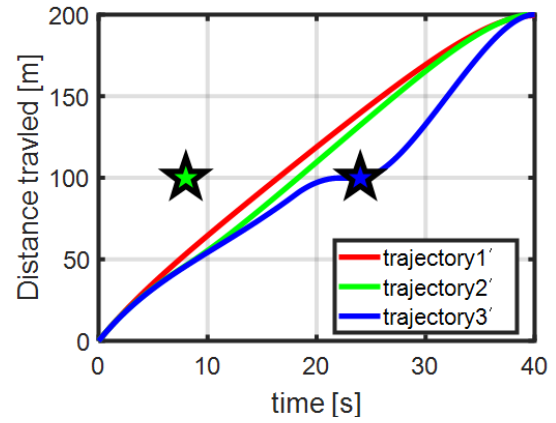
信号機による減速、停止を考慮した結果、3つの走行パターンに分類できた。

1つ目は Tab. 5 の赤色の線で囲まれた部分の走行パターンである。このパターンは、初期時刻  $t_0 = 0.00$  s, 初期速度  $V_0 = 30.0$  km/h, 初期位置  $X_0 = 0.00$  m, 終端時刻  $t_f = 80.0$  s, 終端速度  $V_f = 0.00$  km/h, 終端位置  $X_f = 400$  m の場合の最適減速軌道である。信号機の切り替わるタイミングが車両の Distance traveled より左側にある場合、車両はこの軌道で走行する事が最も消費エネルギーが低い。最適減速軌道は 200 m を通過するのは、33.27 s である。よって  $0 \leq t_v \leq 33.27$  の時  $0 \leq t_c \leq 33.27$  であるならば、最適減速軌道が消費エネルギーが最も低い。この最も消費エネルギーが低い軌道をとる可能性が最も多い  $t_v \leq 33.27$  s が最も平均消費エネルギーが低くなる。

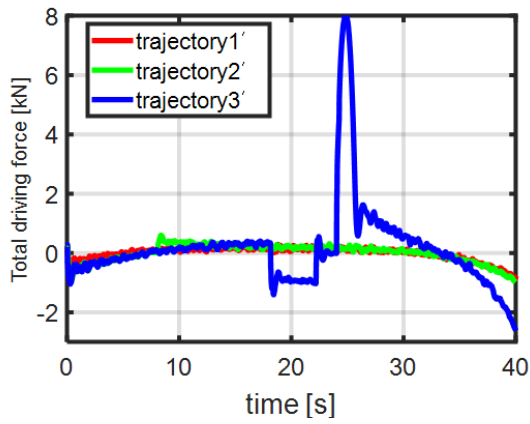
2つ目は Tab. 5 の緑色の線で囲まれた部分の走行パターンである。このパターンの速度軌道は、 $t_v > t_c$  の領域であり、車両が推定していた時刻よりも早く信号



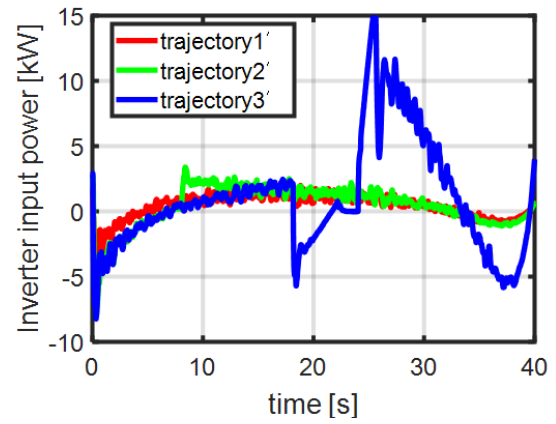
(a) Velocity Trajectory.



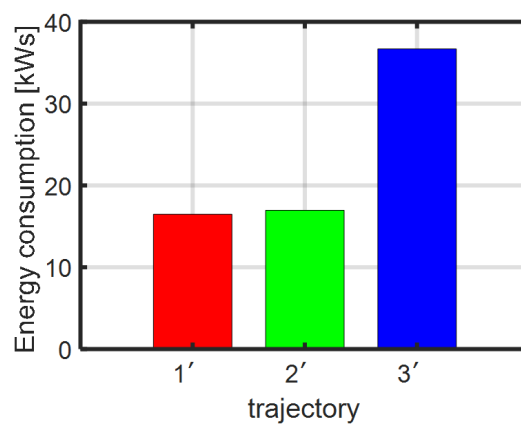
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.



(d) Inverter input power.



(e) Total energy consumption.

Fig. 14: 一時停止による消費エネルギー量の検証における実走実験結果

灯が青色に変化する。しかし、 $t_c$ までに最適減速軌道よりも減速しすぎてしまい、その後加速をする必要が出てきている。この軌道の例は、Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14のtrajectory2とtrajectory2'である。

3つ目はTab. 5の青色の線で囲まれた部分の走行パターンである。このパターンは、 $t_v \leq t_c$ の領域であり、車両が推定していた時刻になっても信号は赤のままである。そのため、減速停止モデルに従った軌道を走行する。信号が青に変わるまでに大きく減速、または停止するため、残りの経路を走行するために大きなエネルギーを必要とする。そのため、このパターンの消費エネルギーは他のパターンよりも大きくなっている。この軌道の例は、Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14のtrajectory3とtrajectory3'である。

以上のように信号機によって減速、停止が発生する場合、消費エネルギー量は大きく増加する結果が得られた。

## 4.6 本章のまとめ

本章では、信号機のある道路における一時停止による消費エネルギー量の検証を行った。実際に消費エネルギー量を計算し、信号機のある交差点で減速、一時停止することなく走行する場合と減速、一時停止する場合では消費エネルギー量にどのような違いが生じるかをシミュレーション、台上試験、フィールド試験にて比較を行った。結果として、信号機のある交差点で減速、一時停止する場合、しない場合に比べて消費エネルギー量は大きく増加する事を示した。経路上に信号機が一ヶ所のみ設置されている場合で消費エネルギー量は大きく増加するため、複数の信号機が設置されている経路ではさらに大きな消費エネルギー量の差が生じると考えられ、EVの航続距離を延長するためには信号機手前の減速、停止を少なくすることが非常に重要であると言える。

## 第 5 章

# 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動 運転

前章で示したように，信号機での減速，停止は消費エネルギーの増加の要因となるため，航続距離延長の妨げとなる．信号機のある交差点で停止しないような速度軌道は一般的にグリーンウェーブと呼ばれている．本章では，ITS から信号情報（信号機のサイクル長，切り替わり時間など）が取得できると仮定して，複数の信号機が設置されている直線路においてグリーンウェーブ軌道を導出し，航続距離を最大化する手法を提案する．また，本手法の有効性をシミュレーション，実証実験結果によって示す．

### 5.1 複数の信号機を考慮した消費エネルギー最小化問題の定式化

本節では自動運転を想定し，複数の信号機を考慮し，消費エネルギーを最小化する速度軌道を導出する問題を定式化する．初期時刻  $t_0$  から終端時刻  $t_f$  までの総エネルギー消費量を最小化するため，速度軌道を最適化する評価関数及び拘束条件は以下の式となる．

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

$$\text{s.t. } \dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \quad (5-2)$$

$$\chi(\mathbf{x}(t_0)) = \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 = \mathbf{0}, \quad (5-3)$$

$$\psi(\mathbf{x}(t_f)) = \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f = \mathbf{0}, \quad (5-4)$$

$$0 \leq V(t) \leq V_{\text{lim}}, \quad (5-5)$$

$$F_{\text{min}} \leq F_{\text{all}}(t) \leq F_{\text{max}}, \quad (5-6)$$

$$X(t) \leq X_i(t \leq t_{s_i}) (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (5-7)$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} F_{\text{all}}(t) \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

$$f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) = \begin{bmatrix} \frac{1}{M}(F_{\text{all}}(t) - \text{sgn}(V)F_{\text{DR}}(V)) \\ V(t) \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

ここで、 $W_{\text{in}}$  は車両の消費電力量、 $P_{\text{in}}$  はインバータ入力電力、 $\mathbf{x}$  は状態変数、 $\mathbf{u}$  は制御入力、 $t_0$  は初期時間、 $t_f$  は終端時間、 $V(t)$  は車両の速度、 $V_{\text{lim}}$  は車両の制限速度、 $X(t)$  は車両の位置、 $F_{\text{all}}(t)$  は総駆動力、 $F_{\text{min}}$  は総駆動力の最小値、 $F_{\text{max}}$  は総駆動力の最大値である。添え字  $i$  は各々の信号機に割り振られた番号であり、初期位置から順番に割り振られる。 $X_i$  は信号機の位置であり、 $t_{s_i}$  は信号機が赤信号から青信号に切り替わる時間である。式(5-7)は車両が各々の信号機を赤信号で通過しないようにするための制約条件である。上記の最適化問題に対し、動的計画法を用いて最適速度軌道を求める。

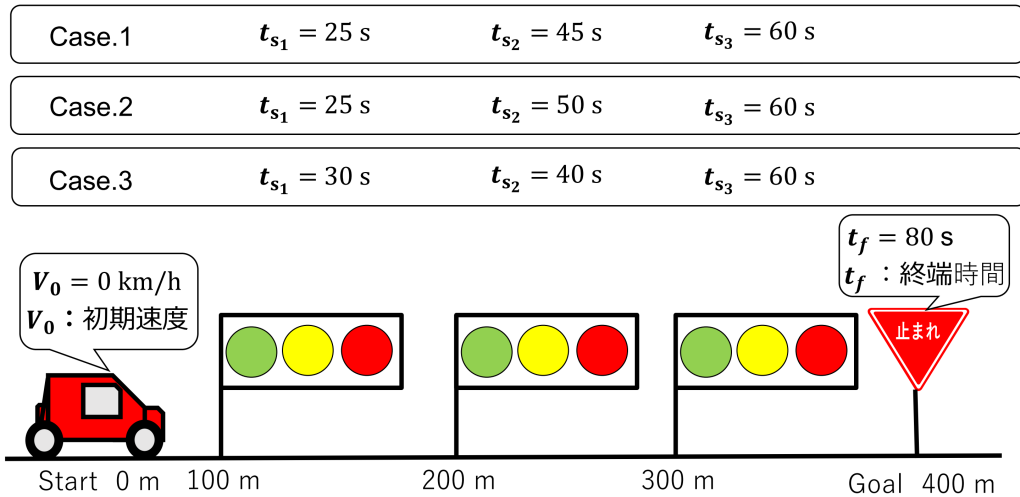
## 5.2 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転の問題設定

本節では問題設定について述べる。本稿では、2つの問題設定で検証する Fig. ?? に2つの問題設定を示す。

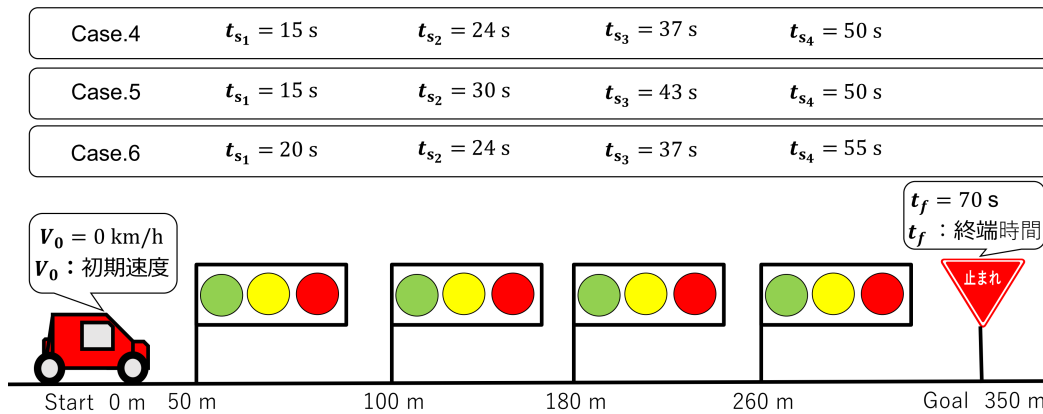
問題設定 I は初期時刻に Start 地点で 0.0 km/h で停止していた電気自動車が最初の信号機 100 m 地点、2 番目の信号機 200 m 地点、3 番目の信号機 300 m 地点に設置してある直線道路を走行し、ゴール地点 400 m で目標時間  $t_f = 80.0$  s で車両が停止する場合について考える。

問題設定 II は初期時刻に Start 地点で 0.0 km/h で停止していた電気自動車が最初の信号機 50 m 地点、2 番目の信号機 100 m 地点、3 番目の信号機 180 m 地点、4 番目の信号機 260 m 地点に設置してある直線道路を走行し、ゴール地点 350 m で目標時間  $t_f = 70.0$  s で車両が停止する場合について考える。

ここで、信号機の設置位置  $X_i$ 、Start 地点  $X_0$ 、Goal 地点  $X_f$  は車載カメラによって取得できるものとする。



(a) 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における問題設定 I



(b) 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における問題設定 II

Fig. 15: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における問題設定

### 5.3 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転のシミュレーション

本節ではシミュレーションについて述べる。経路上の3つの信号機が切り替わる時間,  $t_{s_1}$ ,  $t_{s_2}$ ,  $t_{s_3}$ ,  $t_{s_4}$  を様々な値に設定し, シミュレーションを行う。

本稿では, 問題設定 I で Case.1:  $t_{c_1} = 25 \text{ s}$ ,  $t_{c_2} = 45 \text{ s}$ ,  $t_{c_3} = 60 \text{ s}$ , Case.2:  $t_{c_1} = 25 \text{ s}$ ,  $t_{c_2} = 50 \text{ s}$ ,  $t_{c_3} = 60 \text{ s}$ , Case.3:  $t_{c_1} = 30 \text{ s}$ ,  $t_{c_2} = 40 \text{ s}$ ,  $t_{c_3} = 60 \text{ s}$  の場合の3パターン, 問題設定 II で Case.4:  $t_{c_1} = 15 \text{ s}$ ,  $t_{c_2} = 24 \text{ s}$ ,  $t_{c_3} = 37 \text{ s}$ ,  $t_{c_4} = 50 \text{ s}$ , Case.5:  $t_{c_1} = 15 \text{ s}$ ,  $t_{c_2} = 30 \text{ s}$ ,  $t_{c_3} = 43 \text{ s}$ ,  $t_{c_4} = 50 \text{ s}$ , Case.6:  $t_{c_1} = 20 \text{ s}$ ,  $t_{c_2} = 24 \text{ s}$ ,  $t_{c_3} = 37 \text{ s}$ ,  $t_{c_4} = 55 \text{ s}$  の場合の3パターンの計6パターンについて



シミュレーションを行った。

### 5.3.1 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転の比較条件

本稿では3つの速度軌道を比較する。

#### 従来法.1(Conventional.1)

従来法.1として、信号情報がない場合の速度軌道を作成した。

問題設定Iの場合、全長400 mを80 sで走行する事、信号機が100 m間隔に設置されていることを考慮し、100 mを20 sで走行する台形速度軌道で走行する。つまり、20 sの時に100 m、40 sの時に200 m、60 sの時に300 m、80 sの時に400 mに到着する軌道である。各信号機が青色に変わった時点で車両は次の信号機に目的地を変更する。

問題設定IIの場合、全長350 mを70 sで走行する事を考慮し、次の信号機まで14 sで走行する最適速度軌道で走行する。つまり、14 sの時に50 m、28 sの時に100 m、42 sの時に180 m、56 sの時に260 m、70 sの時に350 mに到着する軌道である。ただし、制限速度を大きく越えなければいけない場合や各信号機が青色に変わった時点で車両は次の信号機に目的地を変更する。

#### 従来法.2(Conventional.2)

従来法.2として、信号情報を用いた場合の一定加減速速度軌道を作成した。信号機の切り替わる時刻 $t_{s_i}$ は既知として、各信号機をどのタイミングで通過すればいいかはわかっているとす。車両が目的地まで走行する際の加速度 $a_d$ は式(5-11)を用いて導出する。

$$a_d = \frac{2(X_d - V_c t_d)}{t_d^2}. \quad (5-11)$$

ここで、 $X_d$ は目的地までの距離、 $V_c$ は車両の現在の速度、 $t_d$ は目的地までの時間である。

最後の信号機を通過した後は、問題設定Iの場合、消費エネルギー量が最小となり、終端条件を満たすような台形速度軌道、問題設定IIの場合、消費エネルギー量が最小となるような最適速度軌道で走行する。また、この最適速度軌道は勾配法により導出した。

#### 提案法 (Proposed)

信号情報を用いた最適速度軌道を作成した。動的計画法を用いて消費エネルギー量を最小化するような速度軌道で走行する。

## 5.3.2 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転のシミュレーション結果

### 問題設定 I

シミュレーション結果を Fig. 16, 17, 18 に示す.

#### case.1

Case.1 は全ての信号機の赤から青に切り替わるタイミングで走行する場合である. 従来法.1 の速度軌道は信号情報がなく, 信号機がいつ切り替わるかが把握できていないため, 2つの信号機で一時停車している. 停止後の加速により消費エネルギー量が増加している.

従来法.2 は, 信号情報を用いて信号機で停止しないように一定加減速を繰り返している. しかし, 速度が一定加減速であるため, 全ての信号機の切り替わりタイミングで通過するこのパターンでは, 提案法よりも加減速のし過ぎが生じており, 提案法よりも消費エネルギー量が増加している.

提案法は, 最適な加減速を行い, 信号が切り替わるタイミングで信号を通過し, 消費エネルギー量を抑制している.

総エネルギー消費量において従来法.1, 従来法.2, 提案手法は107.17 kW<sub>s</sub>, 91.55 kW<sub>s</sub>, 85.54 kW<sub>s</sub> であり, 提案手法は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 25.28 %, 7.02 % 削減している.

#### case.2

Case.2 は2番目の信号機が切り替わるタイミングが遅い場合である. 従来法.1 の速度軌道は信号情報がなく, 信号機がいつ切り替わるかが把握できていないため, 2つの信号機で5s 停車してしまっている. 停止後の加速により消費エネルギー量が増加している.

従来法.2 は, 信号情報を用いて信号機で停止しないように一定加減速を繰り返している. しかし, 速度が一定加減速であるため, 速度を最適化している提案法よりも消費エネルギー量が増加している.

提案法は, 信号情報を用いて, 最適な加減速を行い, 信号が切り替わるタイミングで信号を通過し, 消費エネルギー量を抑制している.

注目すべき点は, 2番目の信号機の切り替わりが遅いため, 1番目, 3番目の信号機が切り替わった後に通過している点である. 単一の信号機のみを考慮する場合は信号機が切り替わるタイミングに通過する事で消費エネルギー量を最小にすることが可能であるが, 複数の場合, 各信号機の切り替わりタイミングによっては青色に変化してから通過した方が消費エネルギー量が削減できることを示している.

総消費エネルギー量において従来法.1, 従来法.2, 提案手法は110.36 kW<sub>s</sub>, 90.38 kW<sub>s</sub>, 88.16 kW<sub>s</sub> であり, 提案手法は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 25.18 %, 2.52 % 削減している.

### case.3

Case.3は2番目の信号機が切り替わるタイミングが早い場合である。従来法.1の速度軌道は信号情報がなく、信号機がいつ切り替わるかが把握できていないため、1番目の信号機で5s停車してしまっている。停止後の加速により消費エネルギー量が増加している。

従来法.2は、信号情報を用いて信号機で停止しないように一定加減速を繰り返している。しかし、速度が一定加減速であるため、速度を最適化している提案法よりも消費エネルギー量が増加している。

提案法は、信号情報を用いて、最適な加減速を行い、信号が切り替わるタイミングで信号を通過し、消費エネルギー量を抑制している。この場合では、2番目の信号機の切り替わりが早いため、2番目の信号機が切り替わった後に通過している。全ての結果も踏まえると、様々な信号機の切り替わるタイミングにおいて提案法が適用できると言える。

総消費エネルギー量において従来法.1, 従来法.2, 提案手法は104.96 kW<sub>s</sub>, 87.19 kW<sub>s</sub>, 86.48 kW<sub>s</sub>であり、提案手法は従来法.1, 従来法.2と比較すると21.37%, 0.82%削減している。

これらのすべてのケースで最適速度軌道が導出できており、提案法はそれぞれの信号機のスプリットに関わらず、最適速度軌道が導出することが出来ると言える。

### 問題設定 II

シミュレーション結果を Fig. 19, 20, 21 に示す。

### case.4

Case.4は全ての信号機の赤から青に切り替わるタイミングで走行する場合である。従来法.1の速度軌道は信号情報がなく、信号機がいつ切り替わるかが把握できていないため、1番目の信号機で1s停車してしまっている。停止後の加速や信号切り替わりタイミングがわからないことによる加減速の繰り返しにより消費エネルギー量が増加している。

従来法.2は、信号情報を用いて信号機で停止しないように一定加減速を繰り返している。しかし、速度が一定加減速であるため、全ての信号機の切り替わりタイミングで通過するこのパターンでは、提案法よりも加減速のし過ぎが生じており、提案法よりも消費エネルギー量が増加している。

提案法は、最適な加減速を行い、信号が切り替わるタイミングで信号を通過し、消費エネルギー量を抑制している。

総消費エネルギー量において従来法.1, 従来法.2, 提案手法は81.36 kW<sub>s</sub>, 76.47 kW<sub>s</sub>, 74.78 kW<sub>s</sub>であり、提案手法は従来法.1, 従来法.2と比較すると8.8%, 2.26%削減している。

### case.5

Case.5は2番目, 3番目の信号機が切り替わるタイミングが遅い場合である。従

来法.1 の速度軌道は信号情報がなく、信号機がいつ切り替わるかが把握できていないため、1 番目の信号機で 1 s、2 番目の信号機で 2 s 停車してしまっている。停止後の加速や信号切り替わりタイミングがわからないことによる加減速の繰り返しにより消費エネルギー量が増加している。

従来法.2 は、信号情報を用いて信号機で停止しないように一定加減速を繰り返している。しかし、速度が一定加減速であるため、速度を最適化している提案法よりも消費エネルギー量が増加している。

提案法は、信号情報を用いて、最適な加減速を行い、信号が切り替わるタイミングで信号を通過し、消費エネルギー量を抑制している。

注目すべき点は、2 番目、3 番目の信号機の切り替わりが遅いため、1 番目、4 番目の信号機が切り替わった後に通過している点である。単一の信号機のみを考慮する場合は信号機が切り替わるタイミングに通過する事で消費エネルギー量を最小にすることが可能であるが、複数の場合、各信号機の切り替わりタイミングによっては青色に変化してから通過した方が消費エネルギー量が削減できることを示している。

総エネルギー消費量において従来法 1、従来法 2、提案手法は 88.38 kW<sub>s</sub>、77.72 kW<sub>s</sub>、77.11 kW<sub>s</sub> であり、提案手法は従来法 1、従来法 2 と比較すると 14.61 %、0.79 % 削減している。

#### **case.6**

Case.6 は 2 番目、3 番目の信号機が切り替わるタイミングが早い場合である。従来法 1 の速度軌道は信号情報がなく、信号機がいつ切り替わるかが把握できていないため、1 番目の信号機で 5 s、4 番目の信号機で 3 s 停車してしまっている。停止後の加速により消費エネルギー量が増加している。

従来法 2 は、信号情報を用いて信号機で停止しないように一定加減速を繰り返している。しかし、速度が一定加減速であるため、速度を最適化している提案法よりもエネルギー消費量が増加している。提案法は、信号情報を用いて、最適な加減速を行い、信号が切り替わるタイミングで信号を通過し、消費エネルギー量を抑制している。この場合では、2 番目の信号機の切り替わりが早いため、2 番目の信号機が切り替わった後に通過している。全ての結果も踏まえると、様々な信号機の切り替わるタイミングにおいて提案法が適用できると言える。総消費エネルギー量において従来法 1、従来法 2、提案手法は 96.70 kW<sub>s</sub>、77.60 kW<sub>s</sub>、77.52 kW<sub>s</sub> であり、提案手法は従来法 1、従来法 2 と比較すると 24.76 %、0.11 % 削減している。

これらのすべてのケースで最適速度軌道が導出できており、提案法はそれぞれの信号機のスプリットに関わらず、最適速度軌道が導出することが出来ると言える。

### 5.3.3 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転のシミュレーション結果 における損失分離

各手法の主な損失について比較を行う。Fig. 16(f), 17(f), 18(f), 19(f), 20(f), 21(f) は損失分離の結果を示す。

#### case.1

鉄損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 38.84 kW<sub>s</sub>, 32.74 kW<sub>s</sub>, 31.78 kW<sub>s</sub> であり, 提案法は従来法.1, 従来法.2, と比較すると 6.49 %, 3.03 % 削減している。これは, 全走行区間において提案法の総駆動力が従来法.1, 従来法.2 よりも小さく走行しており, 速度も全体的に低速で走行しているためである。

銅損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 16.16 kW<sub>s</sub>, 4.27 kW<sub>s</sub>, 2.01 kW<sub>s</sub> であり, 提案法は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 702.15 %, 112.00 % 削減している。

走行抵抗損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 55.70 kW<sub>s</sub>, 54.14 kW<sub>s</sub>, 51.63 kW<sub>s</sub> であり, 提案法.2 は従来法.1, 提案法.1, と比較すると 7.87 %, 4.86 % 削減している。これは, 提案法は従来法.1, 従来法.2 よりも速度が全体的に低速で走行しているためである。

総エネルギー損失は従来法.1, 従来法.2 提案法はそれぞれ 106.23 kW<sub>s</sub>, 91.30 kW<sub>s</sub>, 85.46 kW<sub>s</sub> であり, 提案法は従来法.1, 従来法.2, と比較すると 24.30 %, 6.83 % 削減している。

#### case.2

鉄損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 34.34 kW<sub>s</sub>, 32.88 kW<sub>s</sub>, 32.25 kW<sub>s</sub> であり, 提案法は従来法.1, 従来法.2, と比較すると 6.49 %, 1.98 % 削減している。これは, 全走行区間において提案法の総駆動力が従来法.1, 従来法.2 よりも小さく走行しており, 速度も全体的に低速で走行しているためである。

銅損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 17.55 kW<sub>s</sub>, 2.56 kW<sub>s</sub>, 2.63 kW<sub>s</sub> であり, 提案法は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 566.25 %, -2.65 % 削減している。

走行抵抗損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 56.96 kW<sub>s</sub>, 54.72 kW<sub>s</sub>, 53.10 kW<sub>s</sub> であり, 提案法.2 は従来法.1, 提案法.1, と比較すると 7.28 %, 3.06 % 削減している。これは, 提案法は従来法.1, 従来法.2 よりも速度が全体的に低速で走行しているためである。

総エネルギー損失は従来法.1, 従来法.2 提案法はそれぞれ 109.39 kW<sub>s</sub>, 90.25 kW<sub>s</sub>, 88.04 kW<sub>s</sub> であり, 提案法は従来法.1, 従来法.2, と比較すると 24.25 %, 2.51 % 削減している。

#### case.3

鉄損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 34.04 kW<sub>s</sub>, 32.22 kW<sub>s</sub>, 32.05 kW<sub>s</sub>

であり、提案法は従来法.1, 従来法.2, と比較すると 6.20 %, 0.53 % 削減している。これは、全走行区間において提案法の総駆動力が従来法.1, 従来法.2 よりも小さく走行しており、速度も全体的に低速で走行しているためである。

銅損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 13.20 kW<sub>s</sub>, 2.06 kW<sub>s</sub>, 1.91 kW<sub>s</sub> であり、提案法は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 590.77 %, 7.87 % 削減している。

走行抵抗損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 56.51 kW<sub>s</sub>, 52.75 kW<sub>s</sub>, 52.39 kW<sub>s</sub> であり、提案法.2 は従来法.1, 提案法.1, と比較すると 7.85 %, 0.68 % 削減している。これは、提案法は従来法.1, 従来法.2 よりも速度が全体的に低速で走行しているためである。

総エネルギー損失は従来法.1, 従来法.2 提案法はそれぞれ 104.19 kW<sub>s</sub>, 87.09 kW<sub>s</sub>, 86.40 kW<sub>s</sub> であり、提案法は従来法.1, 従来法.2, と比較すると 20.59 %, 0.80 % 削減している。

#### **case.4**

鉄損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 27.95 kW<sub>s</sub>, 27.90 kW<sub>s</sub>, 27.77 kW<sub>s</sub> であり、提案法は従来法.1, 従来法.2, と比較すると 0.65 %, 0.47 % 削減している。これは、全走行区間において提案法の総駆動力が従来法.1, 従来法.2 よりも小さく走行しており、速度も全体的に低速で走行しているためである。

銅損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 7.81 kW<sub>s</sub>, 3.04 kW<sub>s</sub>, 1.88 kW<sub>s</sub> であり、提案法は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 315.03 %, 61.49 % 削減している。

走行抵抗損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 45.14 kW<sub>s</sub>, 45.31 kW<sub>s</sub>, 45.02 kW<sub>s</sub> であり、提案法.2 は従来法.1, 提案法.1, と比較すると 0.26 %, 0.62 % 削減している。これは、提案法は従来法.1, 従来法.2 よりも速度が全体的に低速で走行しているためである。

総エネルギー損失は従来法.1, 従来法.2 提案法はそれぞれ 81.05 kW<sub>s</sub>, 76.32 kW<sub>s</sub>, 74.71 kW<sub>s</sub> であり、提案法は従来法.1, 従来法.2, と比較すると 8.48 %, 2.16 % 削減している。

#### **case.5**

鉄損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 28.68 kW<sub>s</sub>, 28.28 kW<sub>s</sub>, 28.23 kW<sub>s</sub> であり、提案法は従来法.1, 従来法.2, と比較すると 1.60 %, 0.20 % 削減している。これは、全走行区間において提案法の総駆動力が従来法.1, 従来法.2 よりも小さく走行しており、速度も全体的に低速で走行しているためである。

銅損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 11.99 kW<sub>s</sub>, 2.84 kW<sub>s</sub>, 2.82 kW<sub>s</sub> であり、提案法は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 411.06 %, 20.83 % 削減している。

走行抵抗損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ 47.01 kW<sub>s</sub>, 46.41 kW<sub>s</sub>,

Tab. 9: 総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.1))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed
107.17	91.55	85.54

Tab. 10: 総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.2))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed
110.36	90.38	88.16

46.38 kWsであり、提案法.2は従来法.1, 提案法.1, と比較すると1.36%, 0.05%削減している。これは、提案法は従来法.1, 従来法.2よりも速度が全体的に低速で走行しているためである。

総エネルギー損失は従来法.1, 従来法.2提案法はそれぞれ87.90 kWs, 77.60 kWs, 77.01 kWsであり、提案法は従来法.1, 従来法.2, と比較すると14.15%, 0.76%削減している。

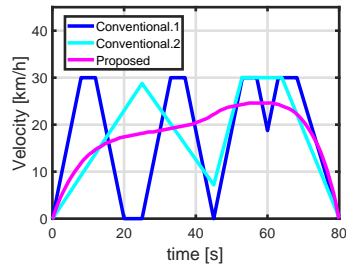
#### case.6

鉄損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ29.60 kWs, 28.19 kWs, 28.20 kWsであり、提案法は従来法.1, 従来法.2, と比較すると4.99%, -0.03%削減している。

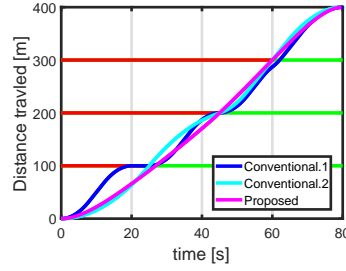
銅損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ16.97 kWs, 3.15 kWs, 2.96 kWsであり、提案法は従来法.1, 従来法.2と比較すると472.89%, 6.42%削減している。

走行抵抗損は従来法.1, 従来法.2, 提案法はそれぞれ49.00 kWs, 46.05 kWs, 46.15 kWsであり、提案法.2は従来法.1, 提案法.1, と比較すると6.18%, -0.22%削減している。

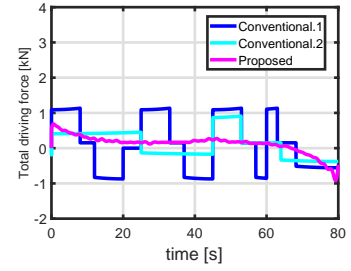
総エネルギー損失は従来法.1, 従来法.2提案法はそれぞれ95.95 kWs, 77.46 kWs, 77.38 kWsであり、提案法は従来法.1, 従来法.2, と比較すると24.00%, 0.10%削減している。



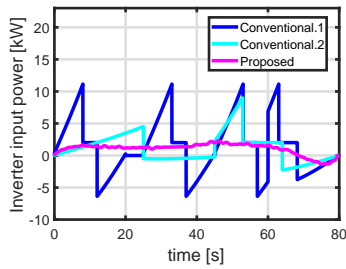
(a) Velocity Trajectory.



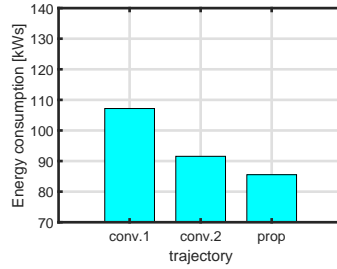
(b) Distance traveled.



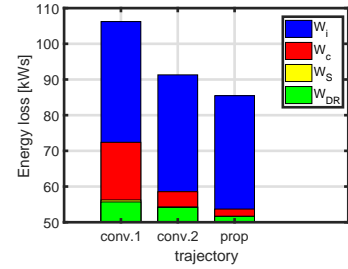
(c) Total driving force.



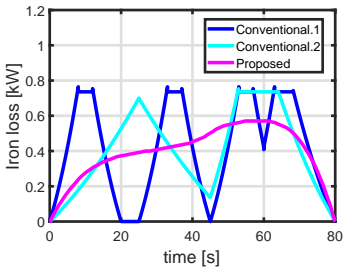
(d) Inverter input power.



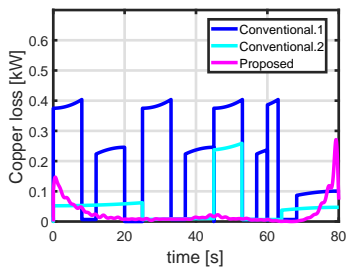
(e) Total energy consumption.



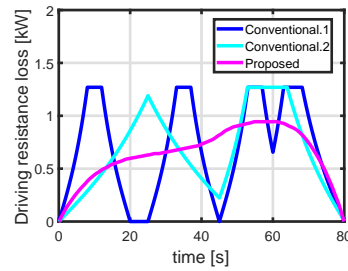
(f) Total energy loss.



(g) Iron loss.



(h) Copper loss.



(i) Driving resistance loss.

Fig. 16: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.1)

## 5.4 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転の実験

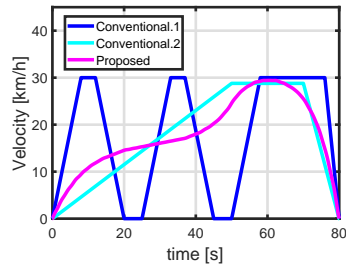
### 5.4.1 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転の台上試験

シミュレーションと同じ条件のもと RC-S[35] で実験を行った。それぞれ6回走行した実験データを纏めた。Fig. 22, 23, 24, 25, 26, 27 にその結果を示す。

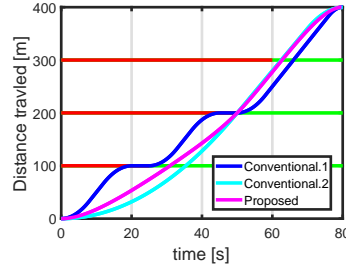
#### case.1

Case.1 は、総エネルギー消費量において従来法.1, 従来法.2, 提案法は  $132.75 \pm 3.63$  kW<sub>s</sub>,  $97.71 \pm 1.38$  kW<sub>s</sub>,  $88.00 \pm 1.35$  kW<sub>s</sub> であり、提案法は従来法 1, 従来法.2 と比較すると 50.85 %, 11.03 % 削減している。

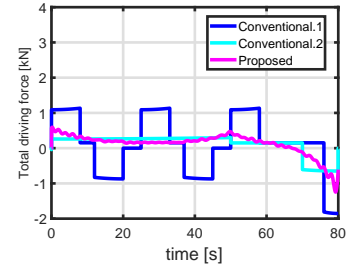




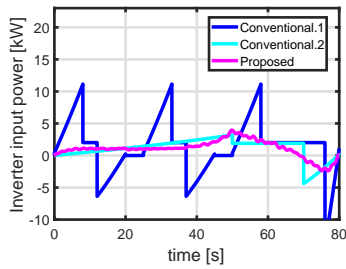
(a) Velocity Trajectory.



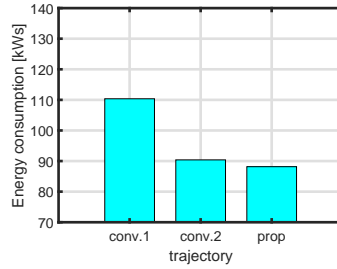
(b) Distance traveled.



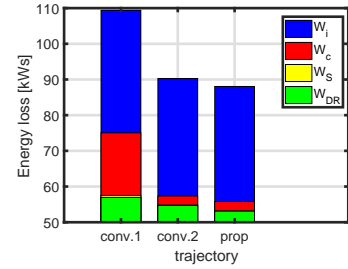
(c) Total driving force.



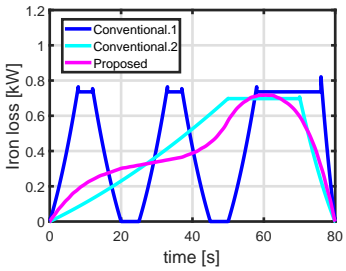
(d) Inverter input power.



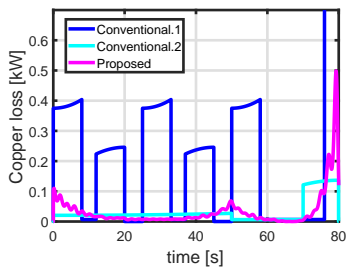
(e) Total energy consumption.



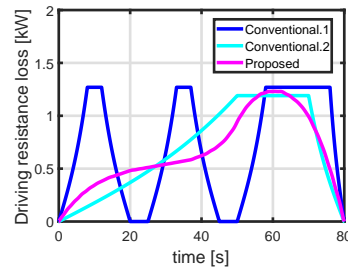
(f) Total energy loss.



(g) Iron loss.



(h) Copper loss.



(i) Driving resistance loss.

Fig. 17: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.2)

### case.2

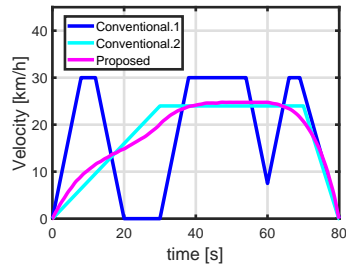
Case.2 は、総エネルギー消費量において従来法.1, 従来法.2, 提案法は  $147.10 \pm 2.68$  kW<sub>s</sub>,  $110.50 \pm 2.42$  kW<sub>s</sub>,  $108.70 \pm 2.14$  kW<sub>s</sub> であり、提案法は従来法 1, 従来法.2 と比較すると 35.33%, 1.66% 削減している。

### case.3

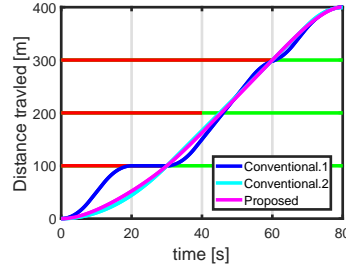
Case.3 は、総エネルギー消費量において従来法.1, 従来法.2, 提案法は  $129.71 \pm 0.53$  kW<sub>s</sub>,  $98.99 \pm 1.97$  kW<sub>s</sub>,  $98.36 \pm 2.55$  kW<sub>s</sub> であり、提案法は従来法 1, 従来法.2 と比較すると 31.87%, 0.64% 削減している。

### case.4

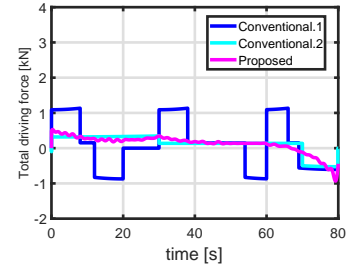
Case.4 は、総エネルギー消費量において従来法.1, 従来法.2, 提案法は  $97.30 \pm$



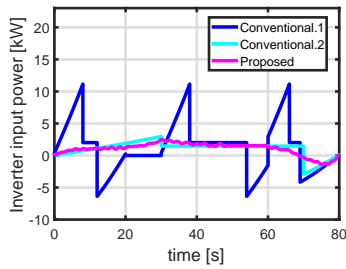
(a) Velocity Trajectory.



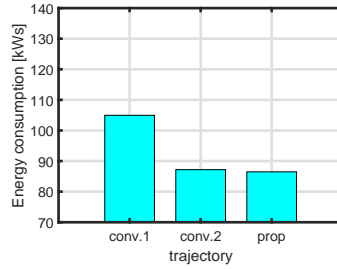
(b) Distance traveled.



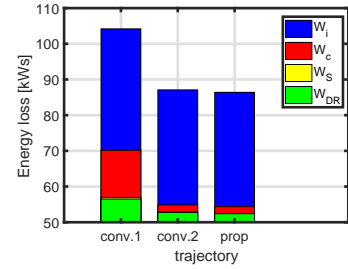
(c) Total driving force.



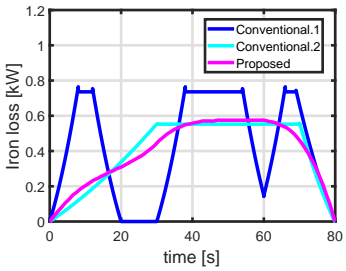
(d) Inverter input power.



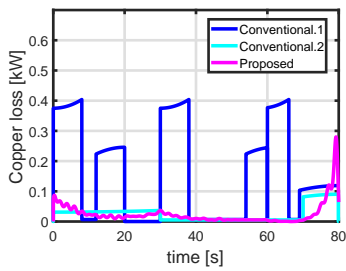
(e) Total energy consumption.



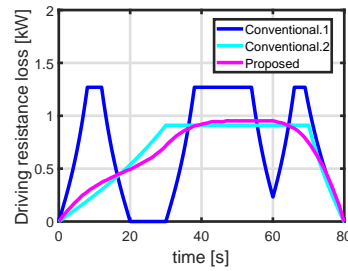
(f) Total energy loss.



(g) Iron loss.



(h) Copper loss.



(i) Driving resistance loss.

Fig. 18: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.3)

0.76 kW,  $86.57 \pm 1.04$  kW,  $83.06 \pm 0.72$  kW であり、提案法は従来法 1, 従来法.2 と比較すると 17.15 %, 4.23 % 削減している。

### case.5

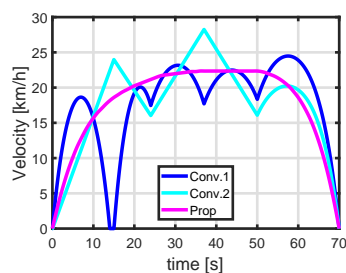
Case.5 は、総エネルギー消費量において従来法.1, 従来法.2, 提案法は  $109.95 \pm 0.67$  kW,  $95.82 \pm 5.40$  kW,  $84.61 \pm 0.52$  kW であり、提案法は従来法 1, 従来法.2 と比較すると 29.95 %, 13.25 % 削減している。

### case.6

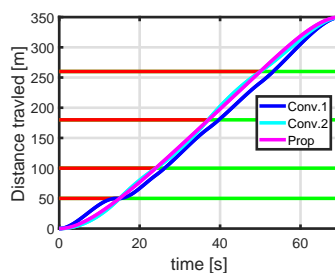
Case.6 は、総エネルギー消費量において従来法.1, 従来法.2, 提案法は  $120.84 \pm 0.52$  kW,  $88.41 \pm 0.43$  kW,  $88.32 \pm 0.56$  kW であり、提案法は従来法 1, 従来法.2 と比較すると 36.82 %, 0.11 % 削減している。

Tab. 11: 総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.3))

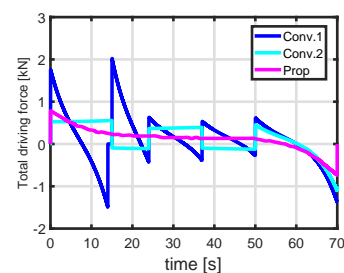
Conventional.1	Conventional.2	Proposed
104.96	87.19	86.48



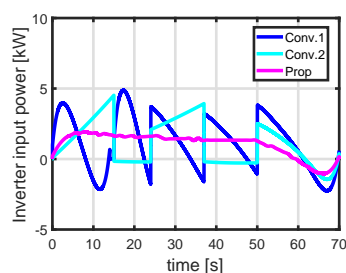
(a) Velocity Trajectory.



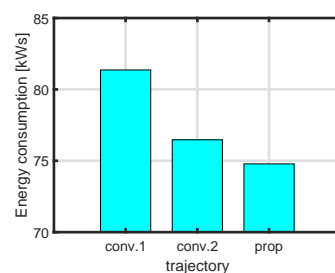
(b) Distance traveled.



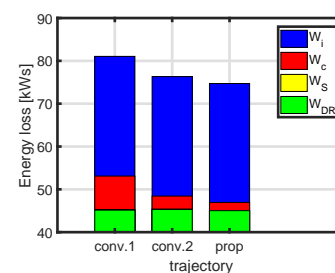
(c) Total driving force.



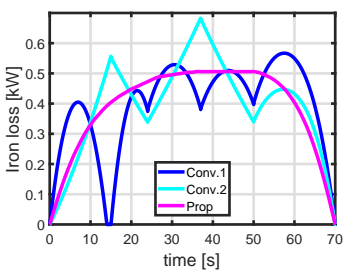
(d) Inverter input power.



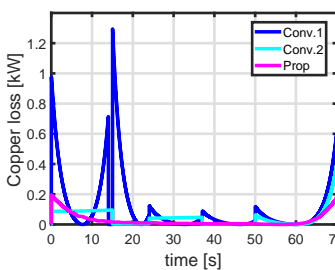
(e) Total energy consumption.



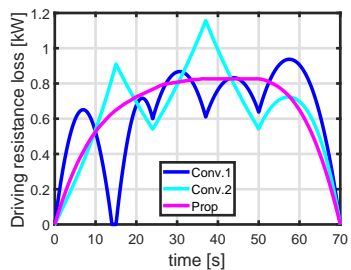
(f) Total energy loss.



(g) Iron loss.



(h) Copper loss.



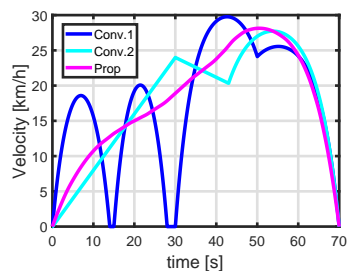
(i) Driving resistance loss.

Fig. 19: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.4)

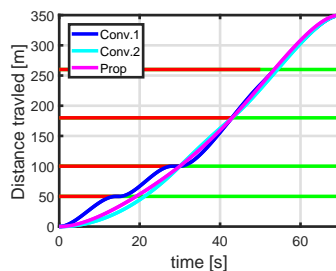
シミュレーション比較して、総エネルギー消費量は全手法で増加したもののシミュレーションと同様の傾向が得られている。この増加の原因は、モデル化誤差によるものと考えられる。従来法.1は、これに加えて加速度がステップ上に変化している付近においてシミュレーションよりも大きな制駆動力が発生し、インバー

Tab. 12: 総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.4))

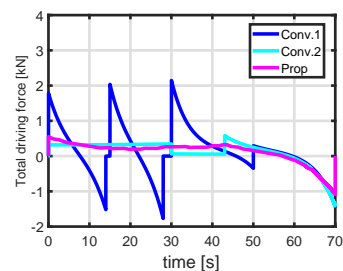
Conventional.1	Conventional.2	Proposed
81.36	76.47	74.78



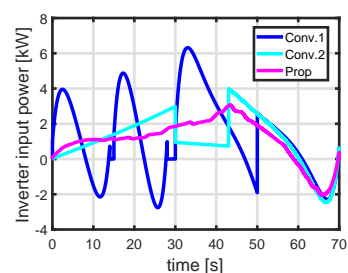
(a) Velocity Trajectory.



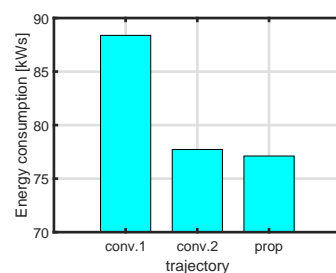
(b) Distance traveled.



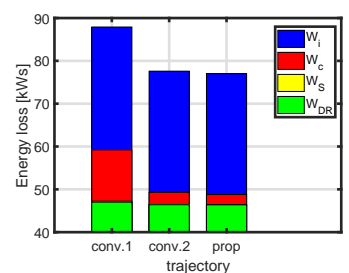
(c) Total driving force.



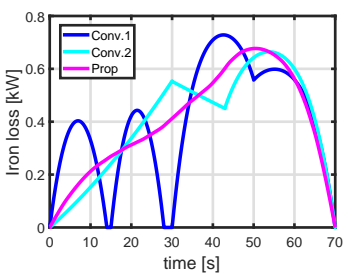
(d) Inverter input power.



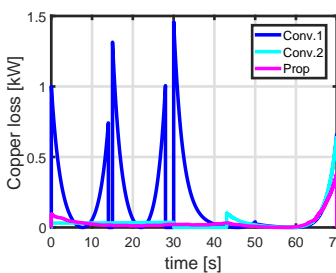
(e) Total energy consumption.



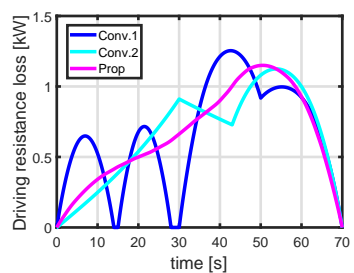
(f) Total energy loss.



(g) Iron loss.



(h) Copper loss.



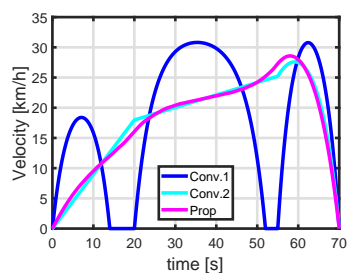
(i) Driving resistance loss.

Fig. 20: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.5)

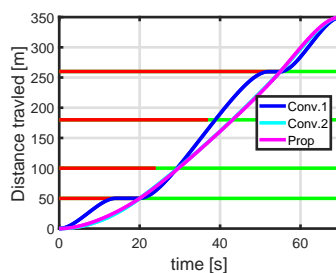
タ入力電力が跳ね、シミュレーション結果より大きく増加したと考えられる。

Tab. 13: 総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.5))

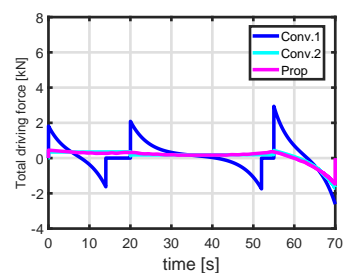
Conventional.1	Conventional.2	Proposed
88.38	77.72	77.11



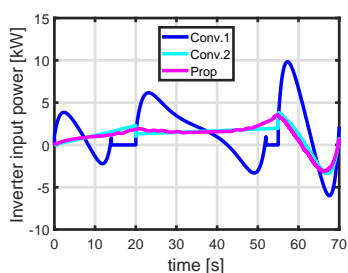
(a) Velocity Trajectory.



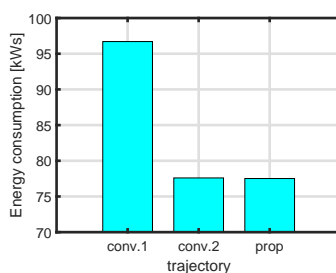
(b) Distance traveled.



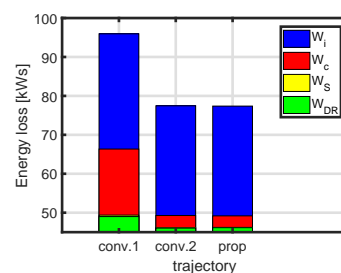
(c) Total driving force.



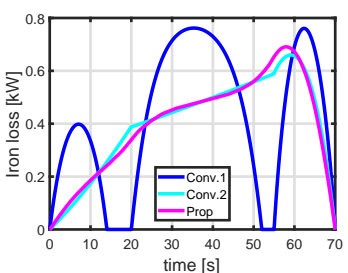
(d) Inverter input power.



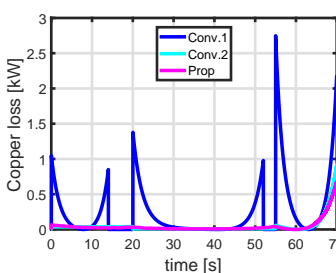
(e) Total energy consumption.



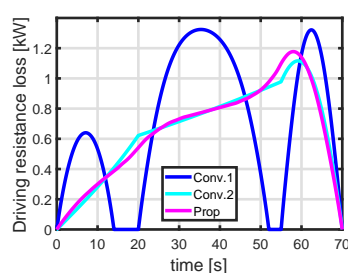
(f) Total energy loss.



(g) Iron loss.



(h) Copper loss.



(i) Driving resistance loss.

Fig. 21: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.6)

### 5.4.2 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転の実走試験

シミュレーションと同じ条件のもと日本自動車研究所 (JARI) の V2X 市街地にて、走行実験を行った。それぞれ6回走行した実験データを纏めた。Fig. 28, 29, 30, 31, 32, 33にその結果を示す。

Tab. 14: 総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.6))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed
96.70	77.60	77.52

Tab. 15: 総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転におけるRC-S 台上試験による実証実験結果 (case.1))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed
132.75 ± 3.63	97.71 ± 1.38	88.00 ± 1.35

### case.1

Case.1 は，総エネルギー消費量において従来法.1，従来法.2，提案法は 113.53 ± 4.07 kWs，84.78 ± 5.66 kWs，70.22 ± 3.86 kWs であり，提案法は従来法 1，従来法.2 と比較すると 61.67%，20.74% 削減している。

### case.2

Case.2 は，総エネルギー消費量において従来法.1，従来法.2，提案法は 114.55 ± 7.50 kWs，72.15 ± 2.53 kWs，68.98 ± 5.56 kWs であり，提案法は従来法 1，従来法.2 と比較すると 66.06%，4.60% 削減している。

### case.3

Case.3 は，総エネルギー消費量において従来法.1，従来法.2，提案法は 108.91 ± 12.57 kWs，83.25 ± 6.86 kWs，72.43 ± 6.05 kWs であり，提案法は従来法 1，従来法.2 と比較すると 50.35%，14.94% 削減している。

### case.4

Case.4 は，総エネルギー消費量において従来法.1，従来法.2，提案法は 85.24 ± 4.16 kWs，73.34 ± 4.41 kWs，72.71 ± 5.83 kWs であり，提案法は従来法 1，従来法.2 と比較すると 17.24%，0.87% 削減している。

### case.5

Case.5 は，総エネルギー消費量において従来法.1，従来法.2，提案法は 92.12 ± 4.07 kWs，75.71 ± 3.62 kWs，70.79 ± 7.23 kWs であり，提案法は従来法 1，従来法.2 と比較すると 30.13%，6.96% 削減している。

### case.6

Case.6 は，総エネルギー消費量において従来法.1，従来法.2，提案法は 114.56 ± 4.38 kWs，69.03 ± 1.81 kWs，63.84 ± 2.17 kWs であり，提案法は従来法 1，従来法.2 と比較すると 79.48%，8.13% 削減している。

全体的にシミュレーション結果と同様の傾向が得られた。台上実験に比べて実

Tab. 16: 総消費エネルギー量 [ kW<sub>s</sub>](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.2))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed
147.10 ± 2.68	110.50 ± 2.42	108.70 ± 2.14

Tab. 17: 総消費エネルギー量 [ kW<sub>s</sub>](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.3))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed
129.71 ± 0.53	98.99 ± 1.97	98.36 ± 2.55

験結果にばらつきがみられたため、標準偏差の値が大きくなっている。この原因は、走行した実験経路に傾きがあった点と実験時の風の影響が考えられる。

## 5.5 本章のまとめ

本章では、信号情報を用いた速度軌道導出法を提案した。その結果、信号機で停止しないグリーンウェーブ速度軌道の導出に成功し、一定加減速軌道と比べても消費エネルギー量の削減できた。また、本手法の利点として評価関数で消費エネルギー量のみを考慮しているため、本手法を用いると信号機のある経路での理論上消費エネルギーが最小となる速度軌道の導出が可能となる。これは評価関数に消費エネルギー以外の項や重みなどが含まれる他のグリーンウェーブ軌道を導出手法にはない大きな特徴である。

Tab. 18: 総消費エネルギー量 [ kW<sub>s</sub>](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.4))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed
97.30 ± 0.76	86.57 ± 1.04	83.06 ± 0.72

Tab. 19: 総消費エネルギー量 [ kW<sub>s</sub>](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.5))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed
109.95 ± 0.67	95.82 ± 5.40	84.61 ± 0.52

Tab. 20: 総消費エネルギー量 [ kW<sub>s</sub>](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.6))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed
120.84 ± 0.52	88.41 ± 0.43	88.32 ± 0.56

Tab. 21: 総消費エネルギー量 [ kW<sub>s</sub>](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.1))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed
113.53 ± 4.07	84.78 ± 5.66	70.22 ± 3.86

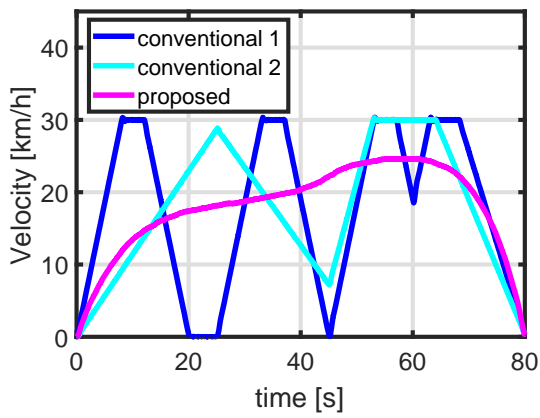
Tab. 22: 総消費エネルギー量 [ kW<sub>s</sub>](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.2))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed
114.55 ± 7.50	72.15 ± 2.53	68.98 ± 5.56

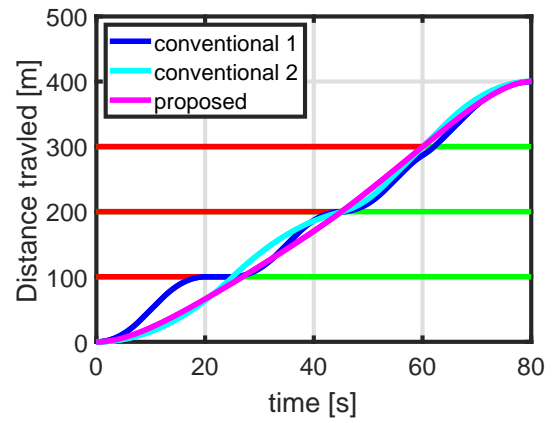
Tab. 23: 総消費エネルギー量 [ kW<sub>s</sub>](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.3))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed
108.91 ± 12.57	83.25 ± 6.86	72.43 ± 6.05

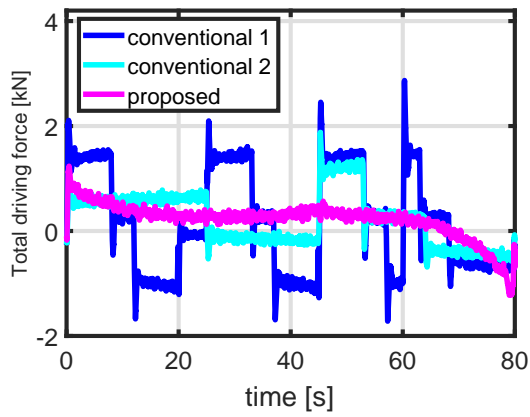




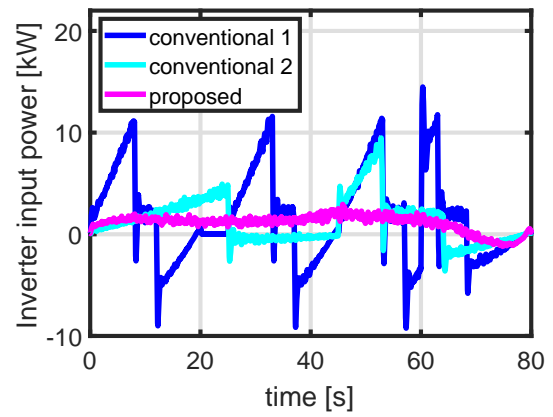
(a) Velocity Trajectory.



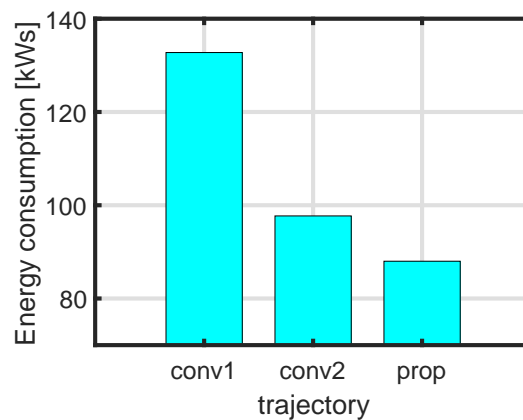
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

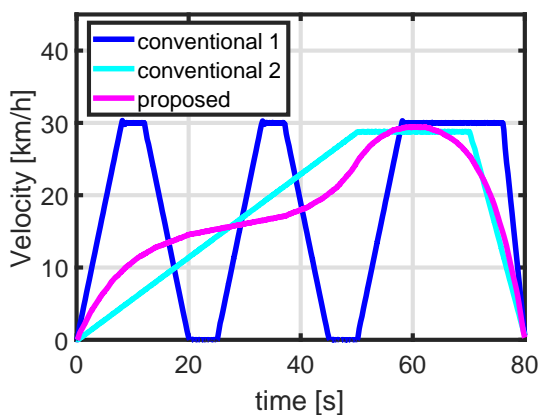


(d) Inverter input power.

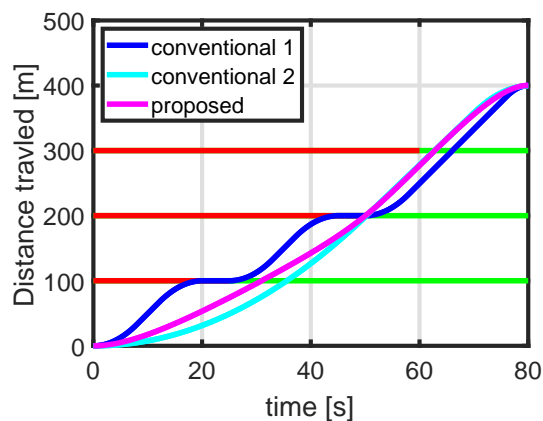


(e) Total energy consumption.

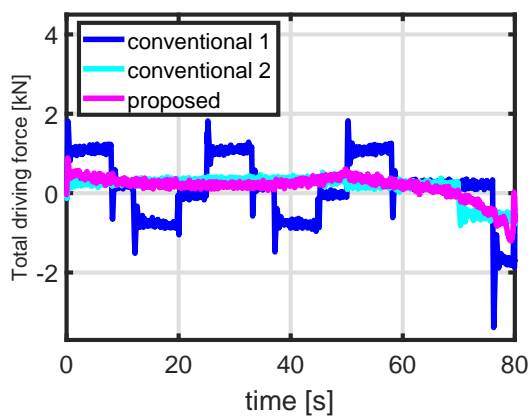
Fig. 22: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.1)



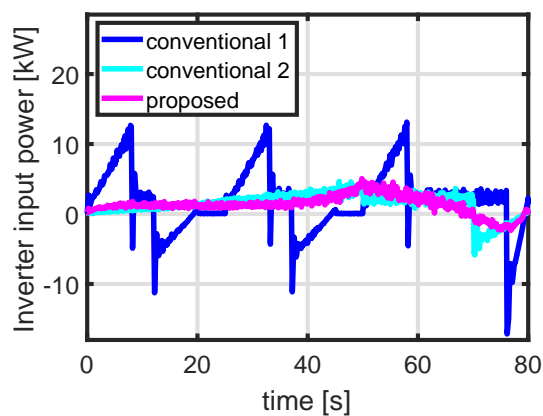
(a) Velocity Trajectory.



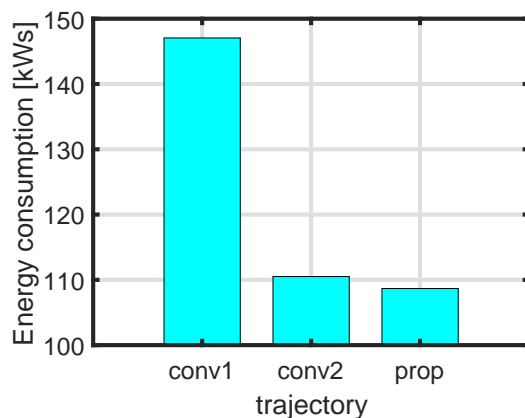
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

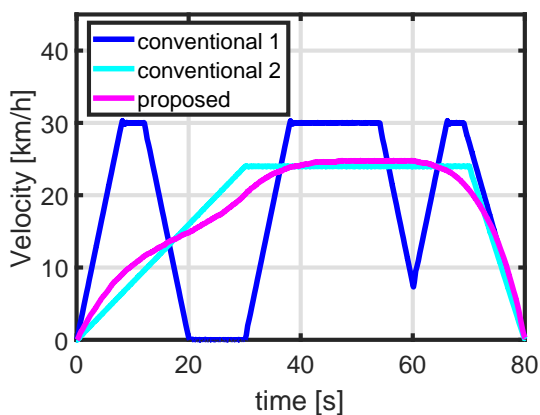


(d) Inverter input power.

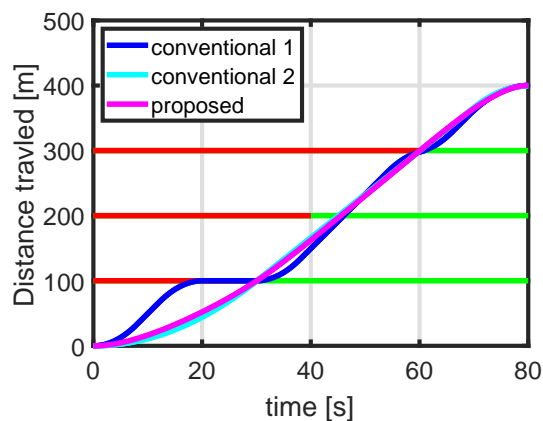


(e) Total energy consumption.

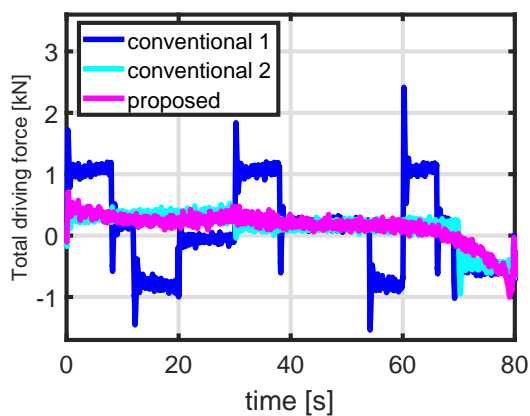
Fig. 23: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.2)



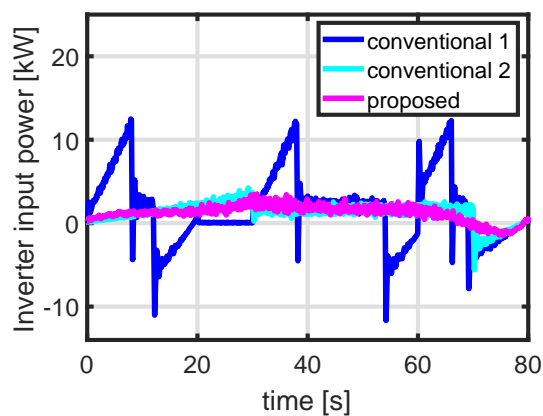
(a) Velocity Trajectory.



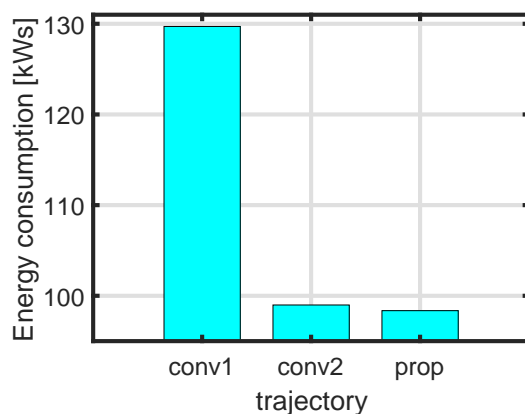
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

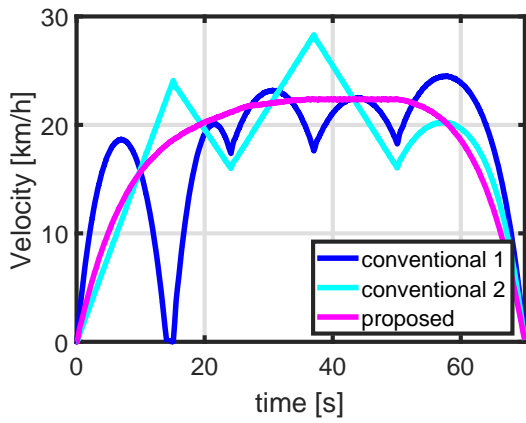


(d) Inverter input power.

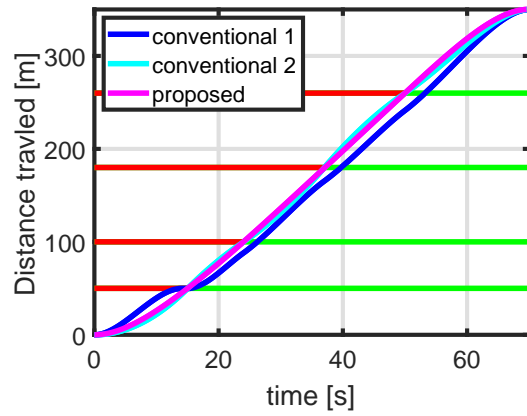


(e) Total energy consumption.

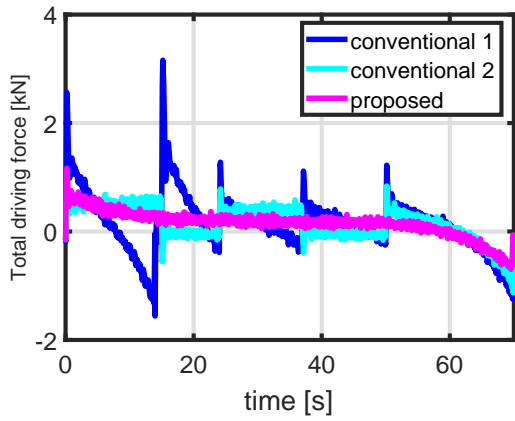
Fig. 24: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.3)



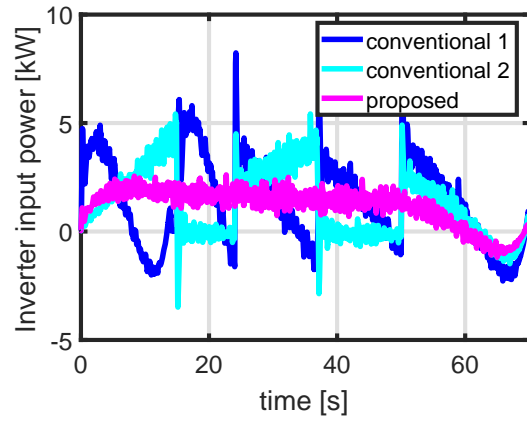
(a) Velocity Trajectory.



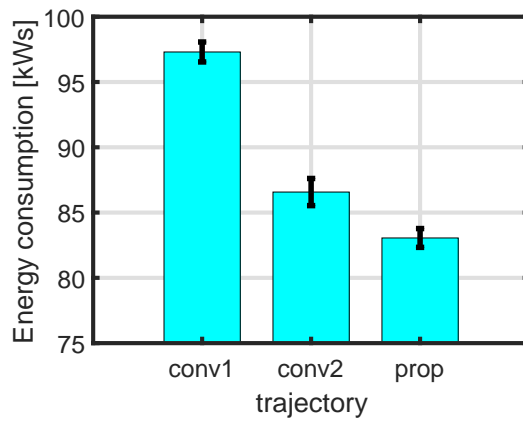
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

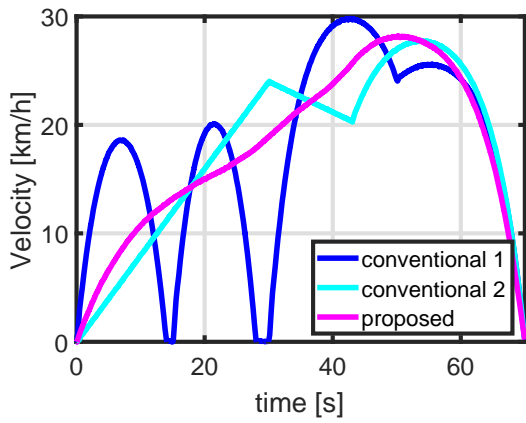


(d) Inverter input power.

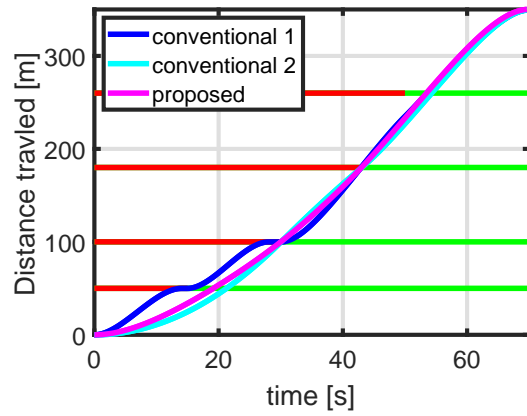


(e) Total energy consumption.

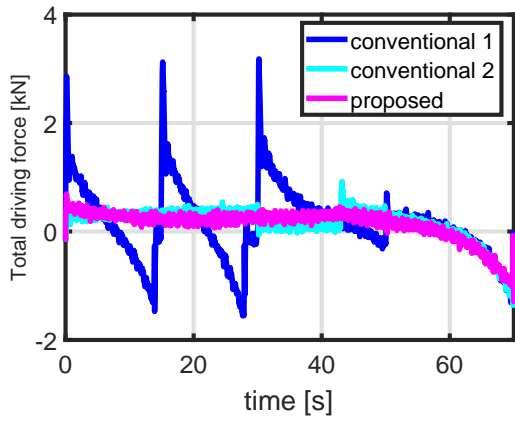
Fig. 25: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.4)



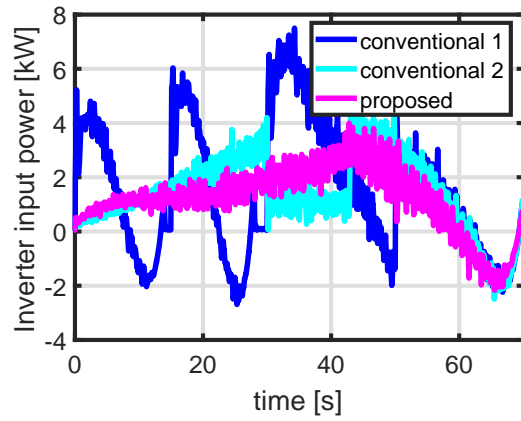
(a) Velocity Trajectory.



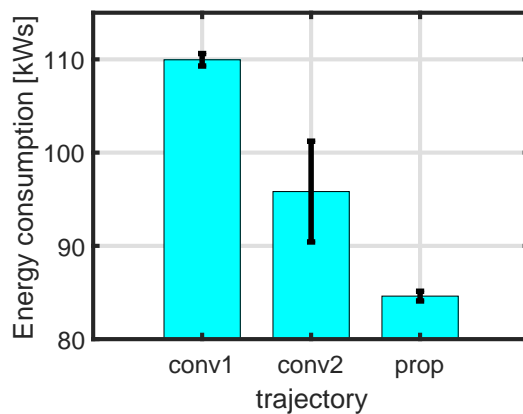
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

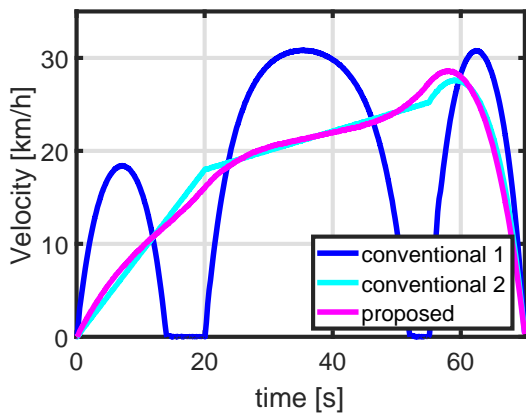


(d) Inverter input power.

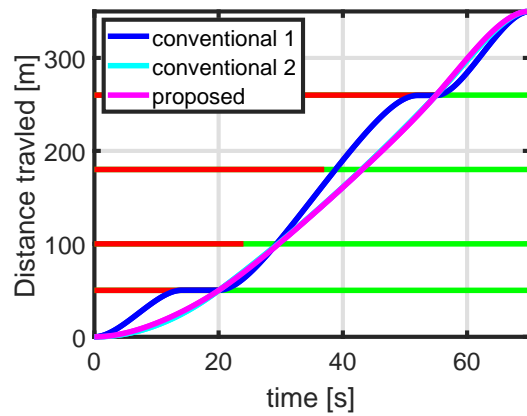


(e) Total energy consumption.

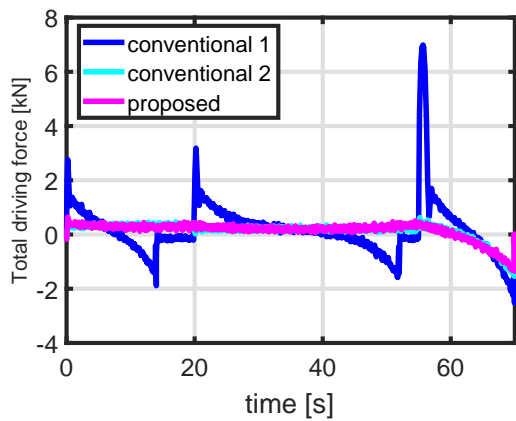
Fig. 26: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.5)



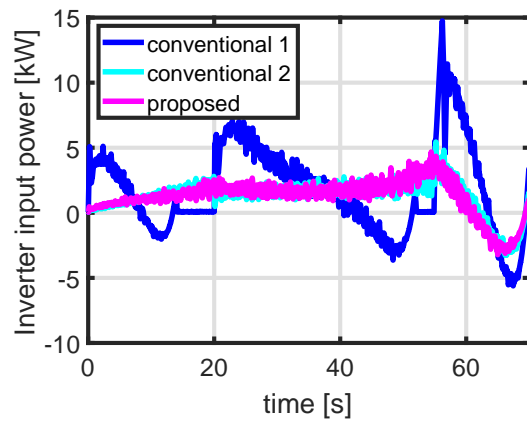
(a) Velocity Trajectory.



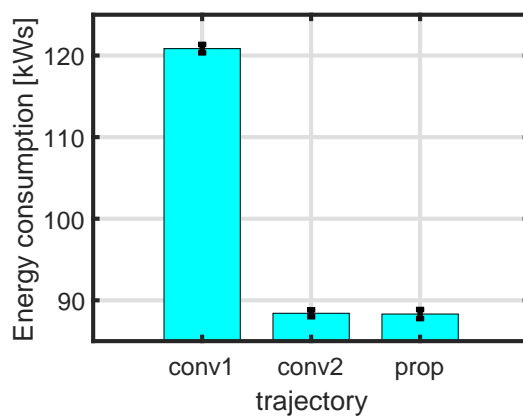
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

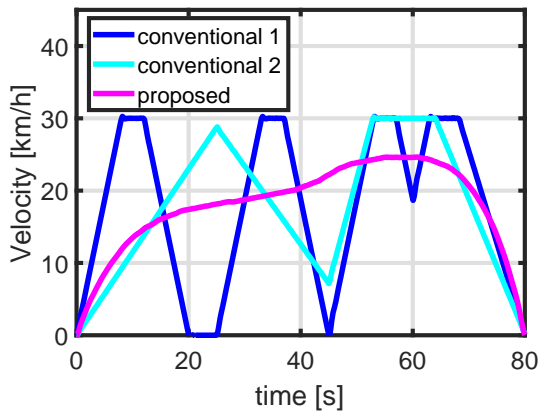


(d) Inverter input power.

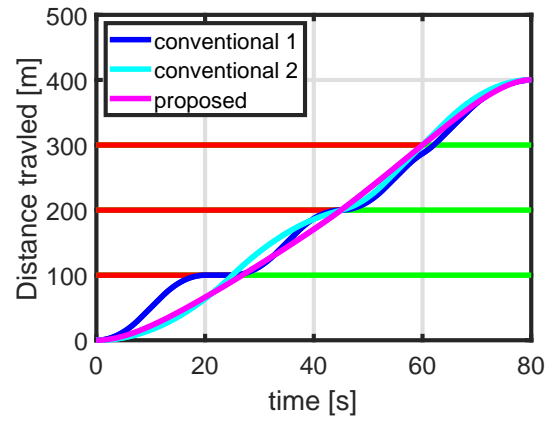


(e) Total energy consumption.

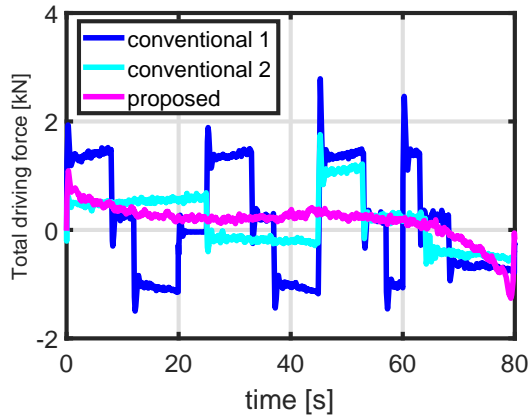
Fig. 27: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.6)



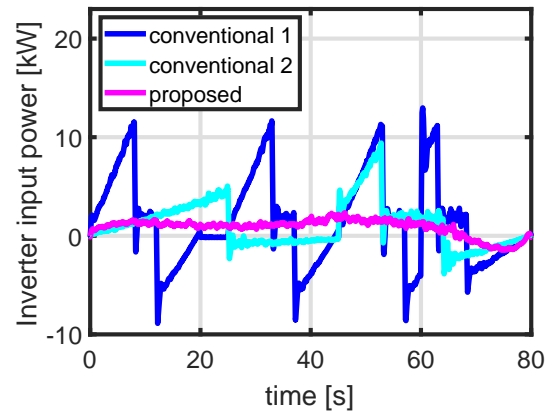
(a) Velocity Trajectory.



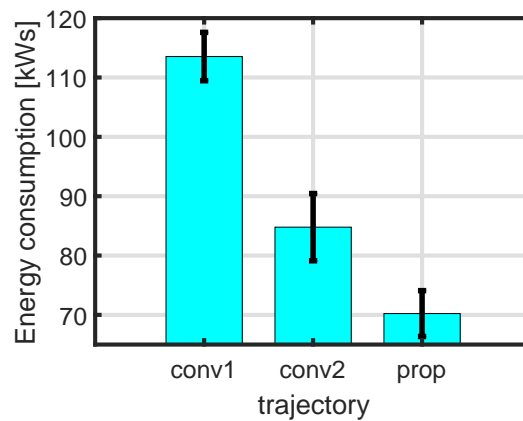
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

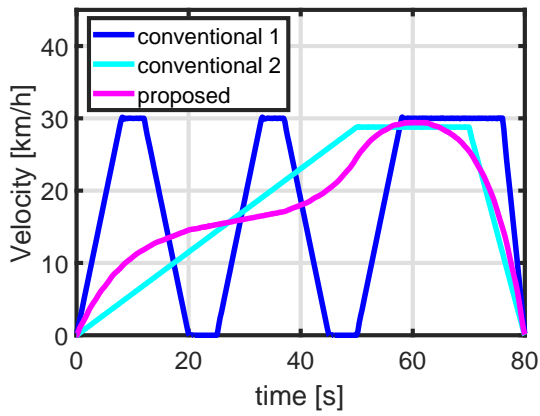


(d) Inverter input power.

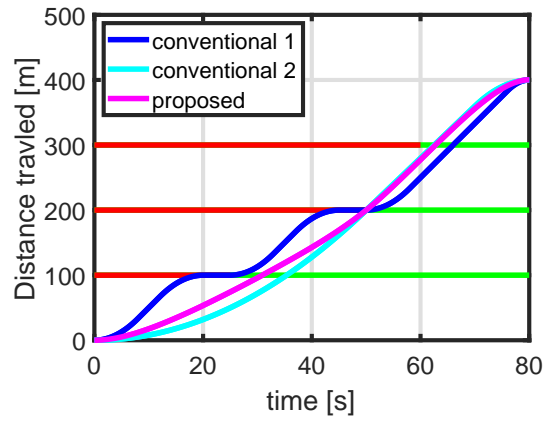


(e) Total energy consumption.

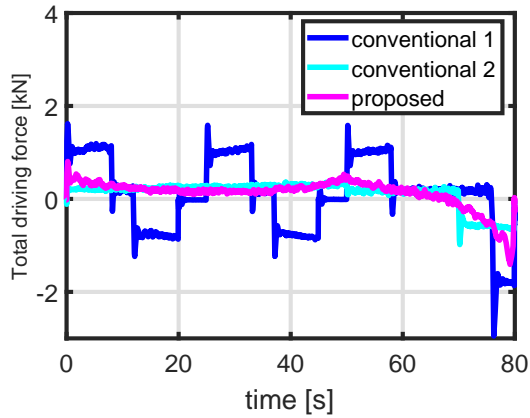
Fig. 28: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.1)



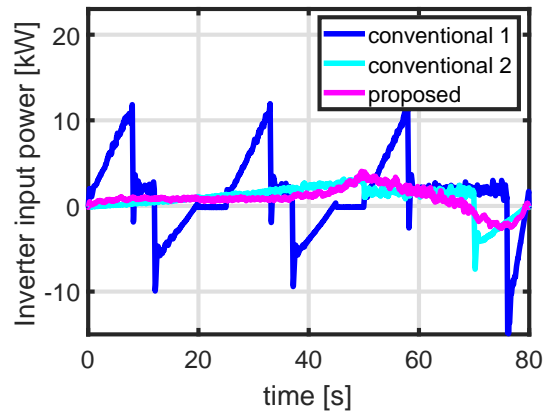
(a) Velocity Trajectory.



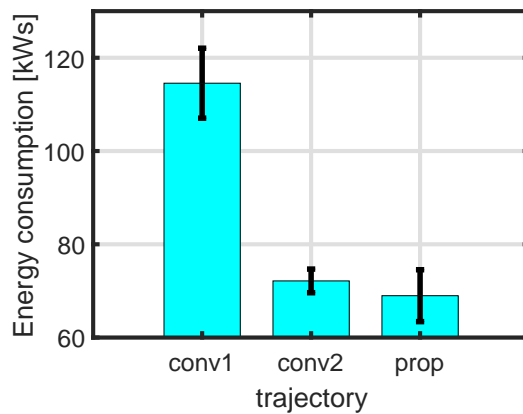
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.



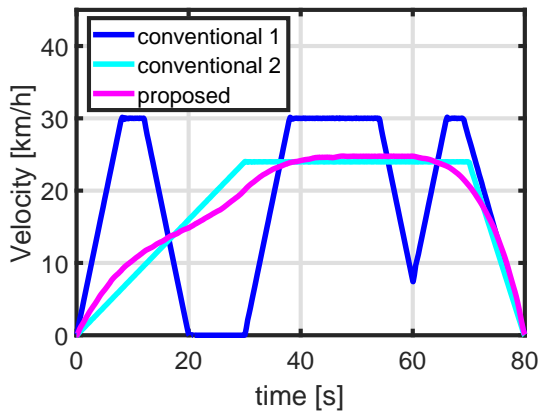
(d) Inverter input power.



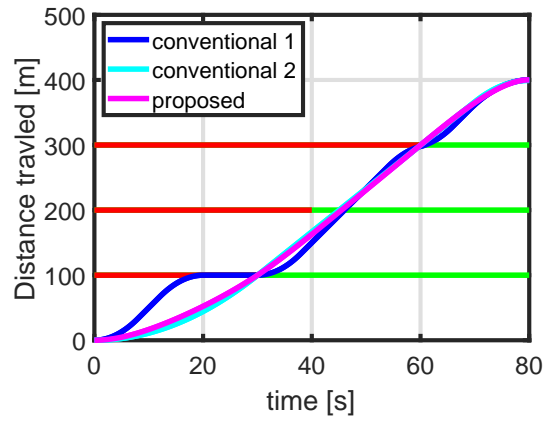
(e) Total energy consumption.

Fig. 29: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.2)

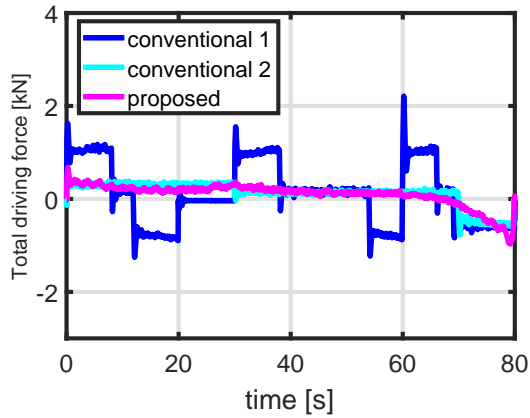




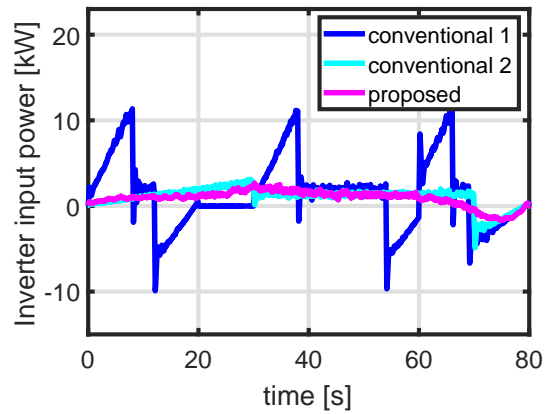
(a) Velocity Trajectory.



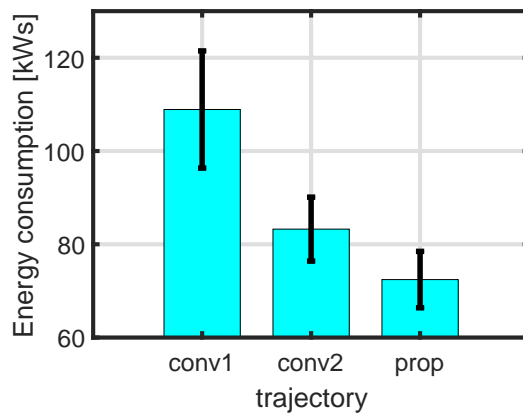
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

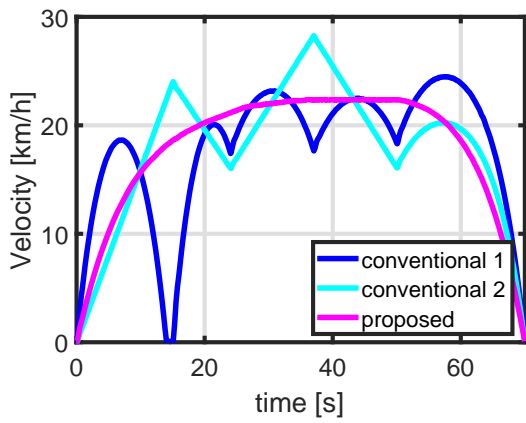


(d) Inverter input power.

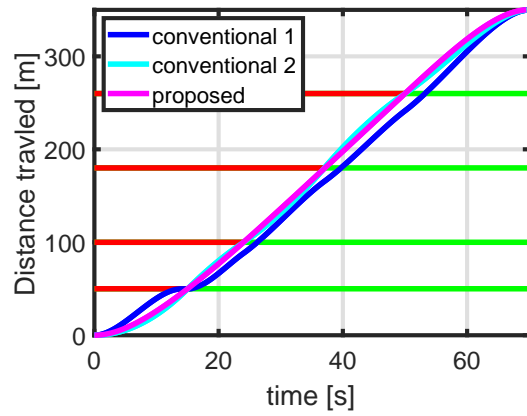


(e) Total energy consumption.

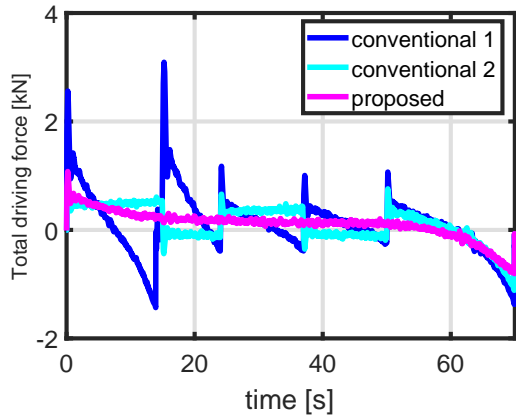
Fig. 30: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.3)



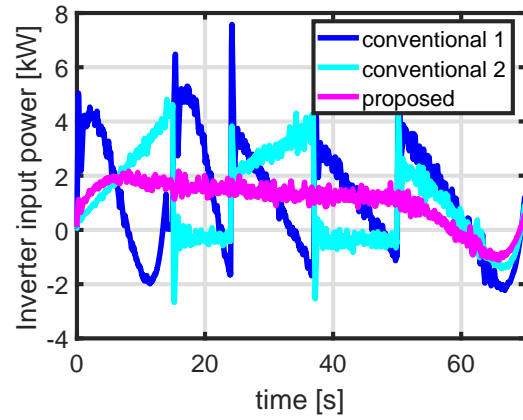
(a) Velocity Trajectory.



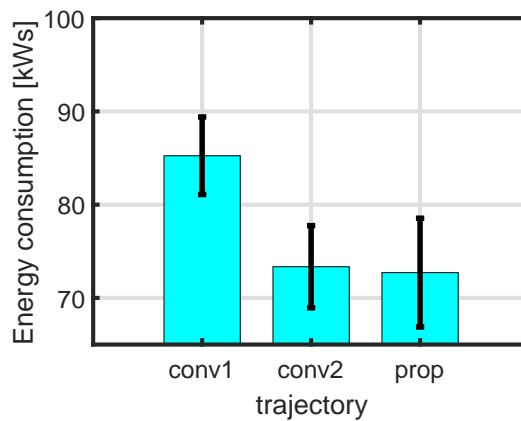
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.



(d) Inverter input power.



(e) Total energy consumption.

Fig. 31: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.4)

Tab. 24: 総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.4))

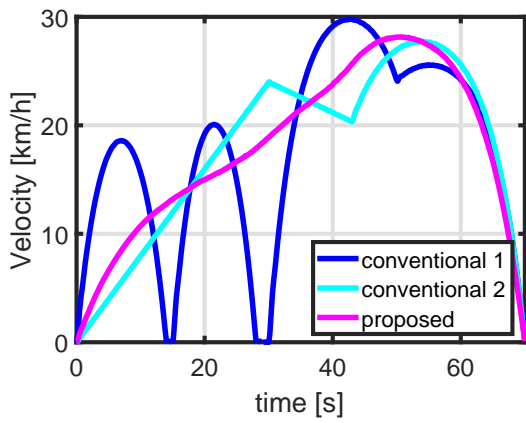
Conventional.1	Conventional.2	Proposed
85.24 ± 4.16	73.34 ± 4.41	72.71 ± 5.83

Tab. 25: 総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.5))

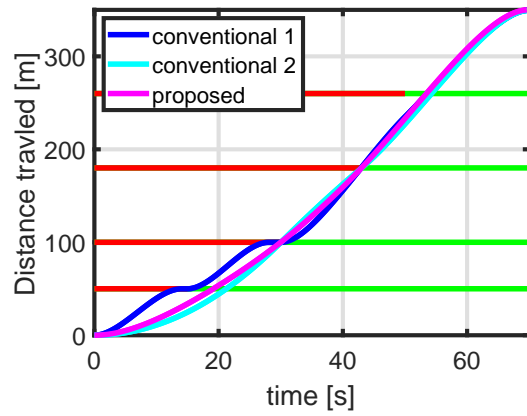
Conventional.1	Conventional.2	Proposed
92.12 ± 4.07	75.71 ± 3.62	70.79 ± 7.23

Tab. 26: 総消費エネルギー量 [kWs](複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.6))

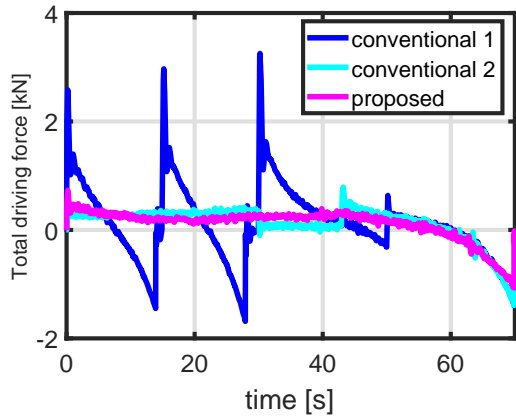
Conventional.1	Conventional.2	Proposed
114.56 ± 4.38	69.03 ± 1.81	63.84 ± 2.17



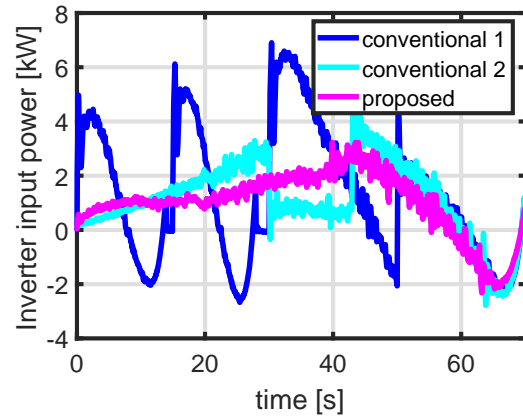
(a) Velocity Trajectory.



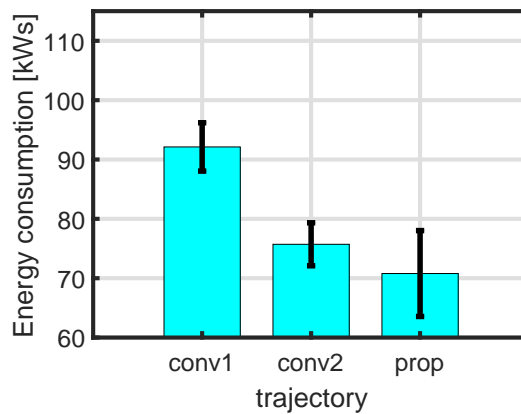
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

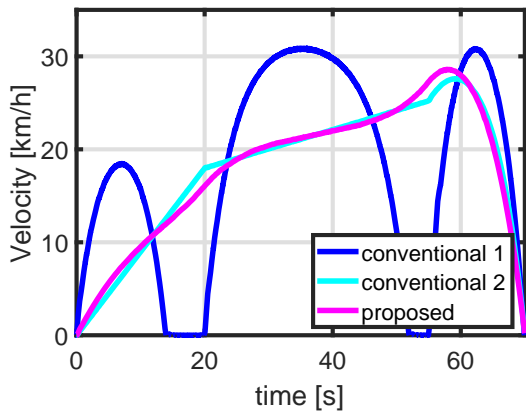


(d) Inverter input power.

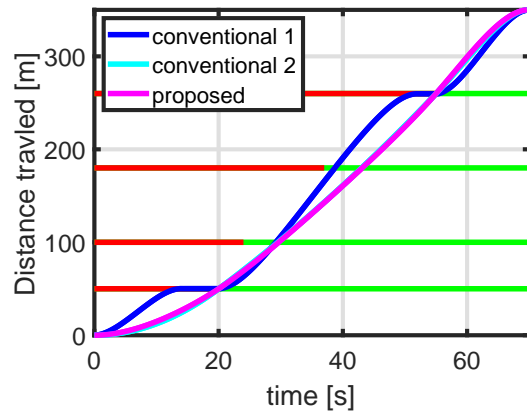


(e) Total energy consumption.

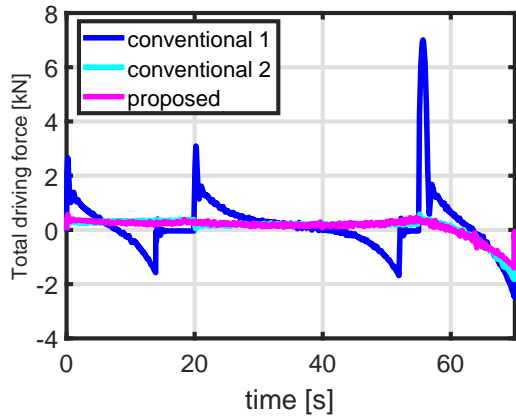
Fig. 32: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.5)



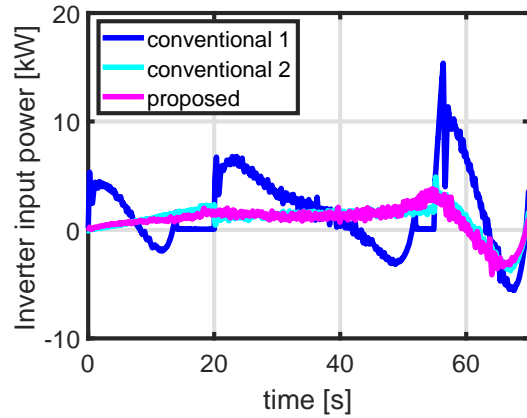
(a) Velocity Trajectory.



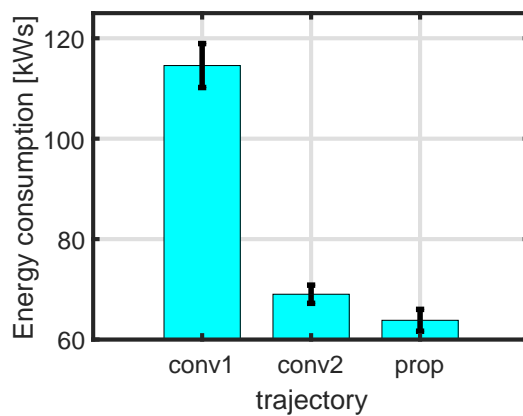
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.



(d) Inverter input power.



(e) Total energy consumption.

Fig. 33: 複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.6)

## 第 6 章

# 確率を用いた信号機推定による航続距離延長 自動運転の基礎検討

前章では，信号情報を用いたグリーンウェーブ軌道を導出手法を提案した．しかし，実際に使用される環境に信号情報を得るための ITS 設備がない環境も多く存在すると考えられる．本章では，ITS から信号情報が取得出来ない環境を想定し，信号情報の代わりに信号通過確率を用いてグリーンウェーブ軌道を導出，航続距離を延長する手法を提案する．また，本手法の有効性をシミュレーション，実証実験結果によって示す．

### 6.1 信号通過確率

本稿では，信号情報の代わりに信号通過確率を用いる．先行研究 [24] によって用いられた確率と本稿で改良を行った確率の 2 パターンの確率を用いる．以下に先行研究によって用いられた確率を示す．

$$P_{\text{signal}}[s(t + t_p, X_{\text{signal}}) = g | s(t, X_{\text{signal}}) = r] = \begin{cases} \frac{t_m}{t_r} & (t_m < t_r, t_m < t_g) \\ 1 & (t_r \leq t_m \leq t_g) \\ \frac{t_g}{t_r} & (t_g < t_m < t_r) \\ \frac{t_g + t_r - t_m}{t_r} & (t_g < t_m, t_r < t_m) \end{cases} \quad (6-1)$$

これは時刻  $t$  で信号が赤色である時，時刻  $t_p$  で信号が青色になる確率を表している． $s(t, X_{\text{signal}})$  は時刻  $t$  での信号機の状態， $r$  は赤信号の状態， $g$  は青信号の状態， $t_r$  は 1 サイクル中の信号が赤色である時間， $t_g$  は 1 サイクル中の信号が青色である時間， $t_p$  は現在の時刻からの信号通過予測時間， $t_m$  は  $t_p$  を信号サイクル  $T_s$

で割った余りである。本稿では、車両が現在の速度で走行した時に信号機に到達するまでの時間を  $t_p$  とした。

次に、上で示した確率に改良を加えた確率を示す。車載カメラで赤信号を確認できている走行時間  $t_e$  を考慮し、確率を更新していく事で精度を向上させた。

$$P_{\text{signal}}[s(t + t_p, X_{\text{signal}}) = g | s(t, X_{\text{signal}}) = r] = \begin{cases} \frac{t_p}{t_r - t_e} & (t_p < t_r - t_e, t_p < t_g) \\ 1 & (t_r - t_e \leq t_p \leq t_g) \\ \frac{t_g}{t_r - t_e} & (t_g < t_p < t_r - t_e) \\ \frac{t_g + (t_r - t_e) - t_p}{t_r - t_e} & (t_g < t_p, t_r - t_e < t_p) \end{cases} \quad (6-2)$$

ただし、 $P_{\text{signal}} > 1$  の時、 $P_{\text{signal}} = 1$ 、 $P_{\text{signal}} < 0$  の時、 $P_{\text{signal}} = 0$  とする。また、 $t_p > T_s$  の場合、式 (6-1) が適用される。

以上の2つの確率のグラフを Fig. 34, 35 に示す。先行研究で用いられた確率は情報が更新されないため、経過時間に関わらずグラフの形は変わらない。しかし、提案する確率は走行時間  $t_e$  を信号機の赤の長さ  $t_r$  から引くことで情報を更新し、 $t_e$  の値によってグラフの形を変える。

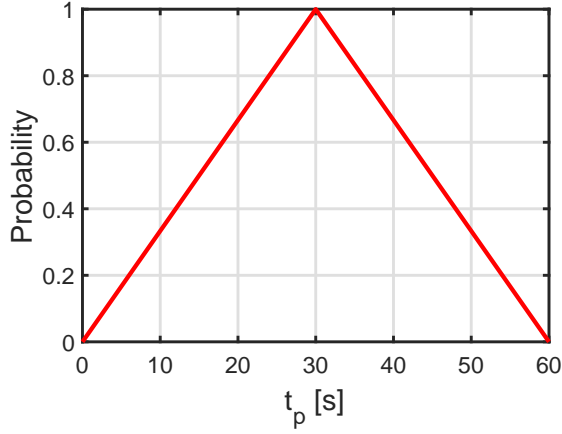
## 6.2 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の定式化

本稿では、自動運転で走行することを想定し、確率を用いた手法を2手法提案する。

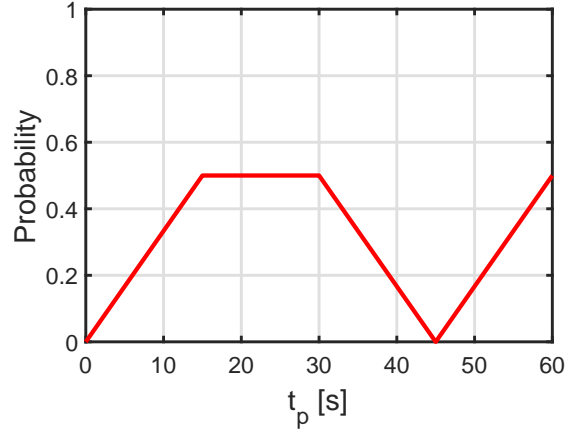
### 6.2.1 消費エネルギー量期待値を用いた手法

まず提案する手法は、信号通過確率を用いた消費エネルギー量の期待値を用いる手法である。消費エネルギー量期待値は信号通過確率、インバータ入力電力、信号停止確率、停止する場合の消費電力を用いて表現される。初期時刻  $t_0$  から終端時刻  $t_f$  までの総消費エネルギー量期待値を最小化する評価関数及び拘束条件は以下の式となる。

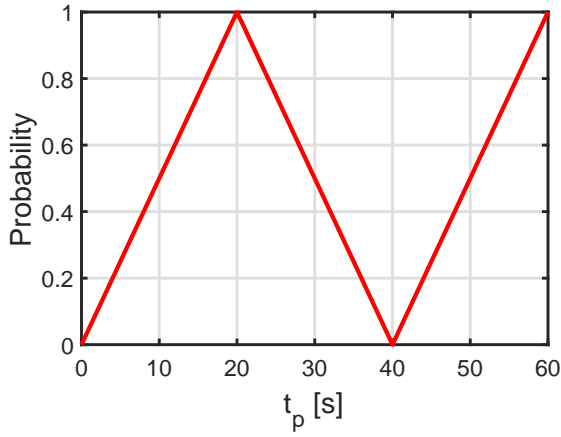
$$\min. E(W_{\text{in}}) = \int_{t_0}^{t_f} P_{\text{signal}} \cdot P_{\text{in}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) + (1 - P_{\text{signal}}) P_{\text{inSTOP}} dt \quad (6-3)$$



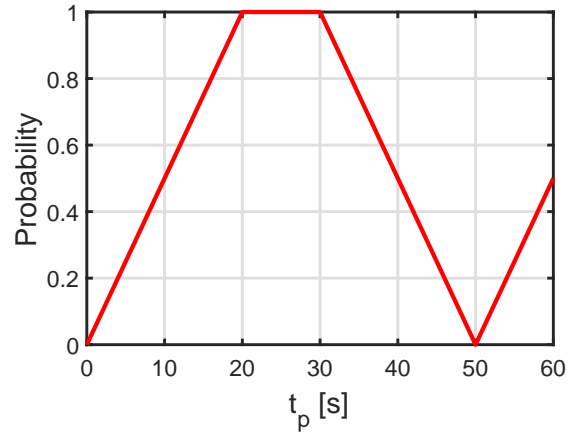
(a)  $t_r = 30$  s,  $t_g = 30$  s.



(b)  $t_r = 30$  s,  $t_g = 15$  s.



(c)  $t_r = 20$  s,  $t_g = 20$  s.



(d)  $t_r = 20$  s,  $t_g = 30$  s.

Fig. 34: 先行研究で用いられた信号通過確率

$$s.t. \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (6-4)$$

$$\chi(\mathbf{x}(t_0)) = \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 = \mathbf{0} \quad (6-5)$$

$$\psi(\mathbf{x}(t_f)) = \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f = \mathbf{0} \quad (6-6)$$

$$0 \leq V(t) \leq V_{\text{lim}} \quad (6-7)$$

$$F_{\text{min}} \leq F_{\text{all}}(t) \leq F_{\text{max}} \quad (6-8)$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \end{bmatrix}, \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} F_{\text{all}}(t) \\ k(t) \end{bmatrix} \quad (6-9)$$

ここで、 $X(t)$  は走行距離、 $\mathbf{x}_0$  は初期条件、 $\mathbf{x}_f$  は終端条件である。  $P_{\text{signal}}$  は信号通過確率、 $P_{\text{INSTOP}}$  は停止する場合の消費電力である。 本稿では、信号機で停止後、



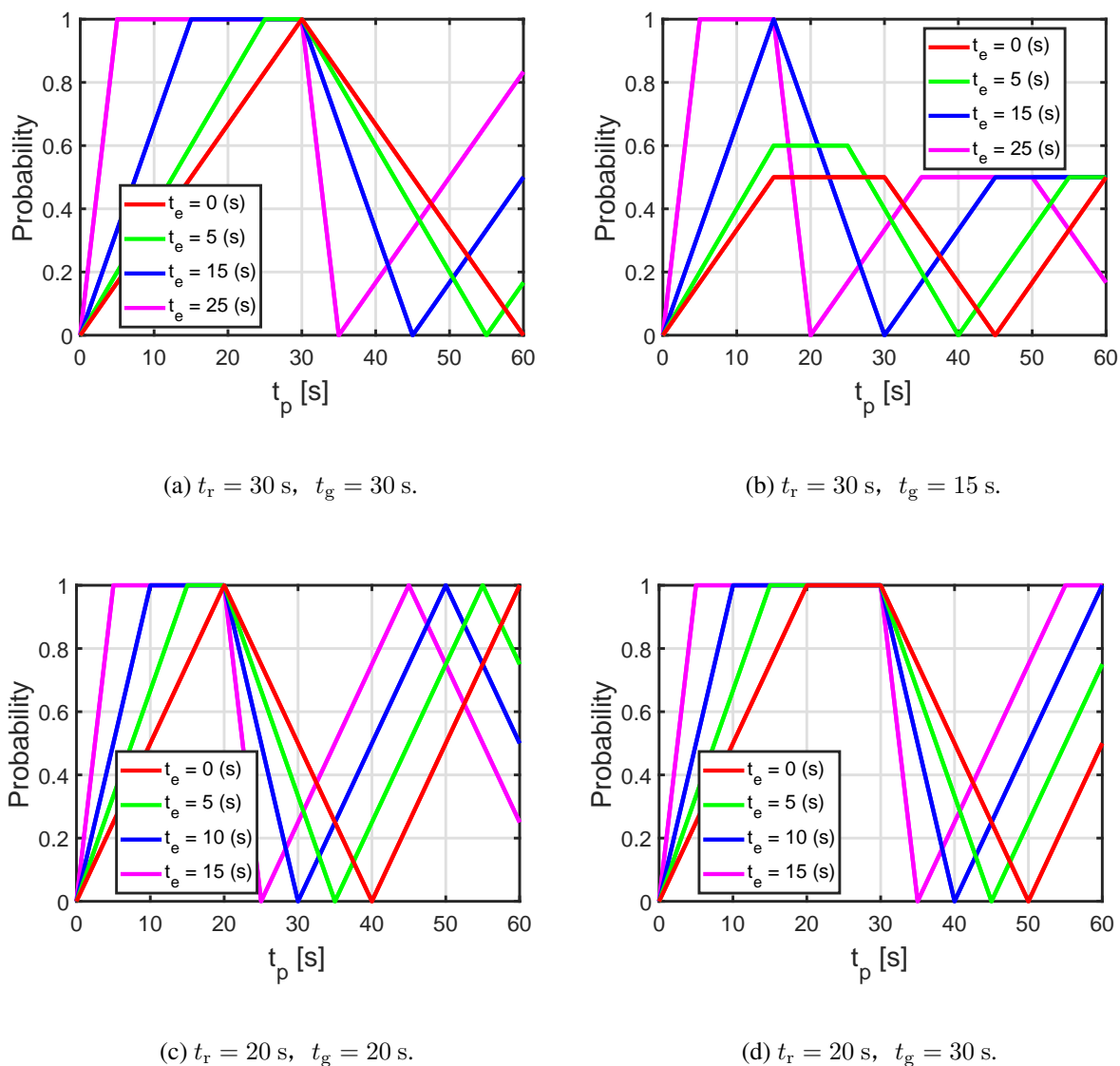


Fig. 35: 提案した信号通過確率

ゴールまで到達するまでにかかる消費エネルギーを使用している。信号通過確率が小さい場合、期待値は大きくなるため、信号通過確率が高い値になるほど期待値が小さくなる。

### 6.2.2 $t_p$ を用いた手法

次に提案する手法は、確率を導出した際の  $t_p$  を用いる手法である。本稿で用いる確率は  $t_p$  秒後の確率という形で導出される。そこで、 $t_p$  s 後に信号が青色になると仮定して消費エネルギー量が最小となるような速度軌道を導出する。 $t_p$  の決め方は、基本的に最も確率が高くなる  $t_p$  を選択する。複数の  $t_p$  が選択できる場合、どの  $t_p$  を選択するかを決めるルールを設定し、1つの  $t_p$  を選ぶ。今回は最も小さ

い  $t_p$  を選択する。ただし、確率が1に達しない場合、最も確率が高くなる場合の  $t_p$  の中で最も大きいものを選択する。本手法の利点は、 $t_p$  の決め方を変更できる点にある。今回設定した決め方以外の決め方も選べ、その選択を評価関数に重みなどの項を入れることなく導入できることは大きなメリットとなる。

初期時刻  $t_0$  から終端時刻  $t_f$  までの総消費エネルギー量を最小化する評価関数及び拘束条件は以下の式となる。

$$\min. W_{in} = \int_{t_0}^{t_f} P_{in_i}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \quad (6-10)$$

$$s.t. \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (6-11)$$

$$\chi(\mathbf{x}(t_0)) = \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 = \mathbf{0} \quad (6-12)$$

$$\psi(\mathbf{x}(t_f)) = \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f = \mathbf{0} \quad (6-13)$$

$$0 \leq V(t) \leq V_{lim} \quad (6-14)$$

$$F_{min} \leq F_{all}(t) \leq F_{max} \quad (6-15)$$

$$X(t) \leq X_i \quad (t \leq t_p)(i = 1, 2, 3, \dots) \quad (6-16)$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \end{bmatrix}, \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} F_{all}(t) \\ k(t) \end{bmatrix} \quad (6-17)$$

注目すべき点はどちらの手法においても制約条件に信号情報に関する項目がないことである。信号情報なしでもグリーンウェーブ軌道を導出可能である。

### 6.3 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の問題設定

Fig. 36 に問題設定を示す。初期時刻に Start 地点で 0.0 km/h でスタートした電気自動車が 100 m 地点に信号機が設置してある直線道路を走行し、ゴール地点 200 m で目標時間  $t_f = 50.0$  s で車両が停止する場合について考える。ここで、信号機の設置位置  $X_{signal}$ 、Start 地点  $X_0$ 、Goal 地点  $X_f$  は車載カメラによって取得できるものとする。

本稿では、case.1:  $t_r = 30$  s,  $t_g = 30$  s, case.2:  $t_r = 30$  s,  $t_g = 15$  s, case.3:  $t_r = 20$  s,  $t_g = 20$  s の3つのケースで速度軌道を導出し考察を行った。

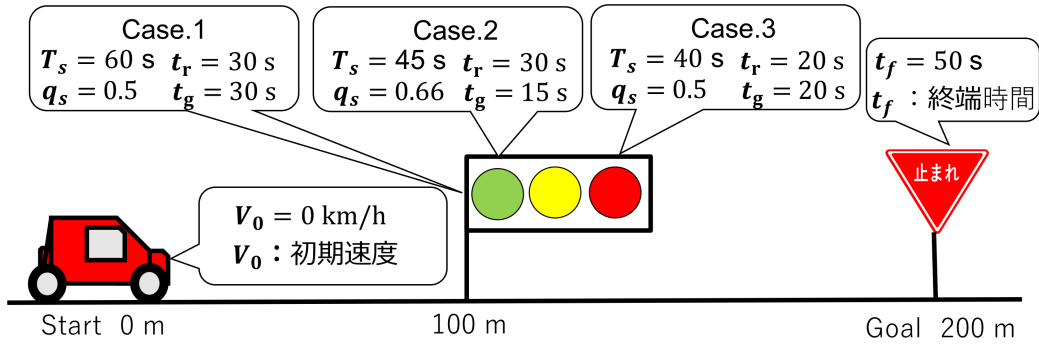


Fig. 36: 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の問題設定

## 6.4 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の比較条件

本稿では、5つの速度軌道を導出し、比較を行う。

### 従来法.1(Conventional.1)

信号情報がない場合の速度軌道を従来法.1として導出した。従来法では、信号機までの距離100 mを25 sで走行する最適速度軌道で走行する。そして、信号灯が変化後、ゴールまで最適速度軌道で走行する。つまり、25 sの時に100 m、50 sの時に200 mの地点に到着する軌道である。

### 従来法.2(Conventional.2)

先行研究で用いられた評価関数を本稿に適用出来るように変更し、最適速度軌道を従来法.2として導出した。式(6-18))に評価関数を示す。 $s$ は青信号の時は1、赤信号の時は0を出力する関数である。 $\omega$ は各項目の重みであり、 $\frac{1}{8}$ としている。 $\epsilon$ は非常に小さい定数であり、 $10^{-6}$ としている。

$$\begin{aligned} \min. J = & \int_{t_0}^{t_f} \omega_1 \left| \frac{V_{t+1} - V_t}{V_{\max}} \right| + \omega_2 \left| \frac{a_t}{a_{\max}} \right| \\ & + (1 - s) \frac{1}{\epsilon + P_{\text{signal}}} dt \end{aligned} \quad (6-18)$$

### 提案法.1(Proposed.1)

先行研究で用いられた信号通過確率による期待値を用いた最適速度軌道を提案法.1として導出した。

### 提案法.2(Proposed.2)

改良を加えた信号通過確率による期待値を用いた最適速度軌道を提案法.2として導出した。

### 提案法.3(Proposed.3)

確率によって導出される $t_p$ を信号機が青に切り替わる目標時間とする消費エネルギー

ギーが最小となるような最適速度軌道を提案法.3とする。

case.1では，従来法.1，提案法.1，提案法.2を比較することで確率の違いが速度軌道に及ぼす影響を考察する．case.2では，従来法.1，従来法.2，提案法.2，提案法.3を比較することで評価関数による違いが速度軌道に及ぼす影響を考察する．case.3では，従来法.1，提案法.2，提案法.3を比較することで異なる条件での提案法の挙動について考察する．また，すべてのケースにおいて信号切り替わり時間  $t_s = t_r$  の場合の結果を示す。

## 6.5 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転のシミュレーション

本節ではシミュレーションについて述べる。

### 6.5.1 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転のシミュレーション結果

シミュレーション結果を Fig. 37, 38, 39 に示す。

#### case.1

case.1では， $t_r = 30$  s,  $t_g = 30$  s の場合である．従来法.1の速度軌道は信号情報がないため，信号機で5 s一時停車している．信号機が切り替わってから Goal 地点まで走行している．一時停止をしてしまう事により，信号が切り替わった後の Goal 地点まで走行で加速が必要となっている．提案法.1では Start 地点から加速し，信号機に近づくとつれて減速している．減速しすぎているため，走行距離が短くなり，信号通過後に加速が必要となっている．一方，提案法.2はほぼ減速することなく信号機に近づいている．そのため，提案法.1よりも信号機が切り替わるまでの走行距離が長くなるため，信号切り替わり後の加速が従来法.1，提案法.1よりも緩やかになっている．提案法.1，提案法.2はそれぞれ信号切り替わり後 5.12 s, 1.24 s 後に通過しているため，確率を用いて赤信号を避けることに成功している．しかし，提案法.1では，確率の精度が悪く，この場合だと従来法.1よりも消費エネルギーが多くなっている．確率を用いる手法において，確率の精度は結果に大きな影響を与えられられる．全走行区間における総エネルギー消費量において従来法.1，提案法.1，提案法.2は 48.41 kW s, 50.30 kW s, 44.14 kW s である．提案法.2は従来法.1，提案法.1と比較すると 9.67 %，13.96 % 削減している．

## case.2

case.2では、 $t_r = 30$  s,  $t_g = 15$  sの場合である。従来法.1の速度軌道は信号情報がないため、信号機で5 s一時停車している。信号機が切り替わってからGoal地点まで走行している。一時停止をしてしまう事により、信号が切り替わった後のGoal地点まで走行で加速が必要となっている。従来法.2はStart地点から加速後、一定速を維持し、信号機に近づくと減速する。評価関数が消費エネルギーを最小化していないため、信号機を青信号で通過する事には成功しているが、消費エネルギーを考慮した速度軌道を導出する事は出来ない。提案法.2は加速後ほぼ減速することなく、ほぼ一定速で信号機に近づいている。信号機手前まで停止する事なく運動エネルギーを保持しながら走行している。提案法.3はスタート地点から信号機まで緩やかに加速している。信号機を通過する時点での速度は最も速く、運動エネルギーを保持しながら走行している。従来法.2, 提案法.2, 提案法.3はそれぞれ信号切り替わり後0.78 s, 1.24 s, 1.01 s後に通過しているため、確率を用いて赤信号を避けることに成功している。全走行区間における総エネルギー消費量において従来法.1, 従来法.2, 提案法.2, 提案法.3は48.41 kW, 45.71 kW, 44.14 kW, 42.82 kWである。提案法.2は従来法.1, 従来法.2と比較すると9.66%, 3.55%削減している。提案法.3は従来法.1, 従来法.2と比較すると13.04%, 6.74%削減している。従来法.2, 提案法.2, 提案法.3は全て信号機が切り替わった後に信号機を通過している。しかし、これら3手法は全て評価関数が異なる。消費エネルギーを評価関数としている提案法.3, 消費エネルギー期待値を評価関数としている提案法.2は消費エネルギーと全く関係のない評価関数を用いている従来法.2よりも消費エネルギー削減に成功している。以上の結果から、評価関数をどのようにするかが結果に大きく影響し、消費エネルギーを考える場合、消費エネルギーと関係のある評価関数を使用する事が重要である。

## case.3

case.3では、 $t_r = 20$  s,  $t_g = 20$  sの場合である。従来法.1の速度軌道は信号情報がないため、加速後の減速中に信号が切り替わりGoal地点まで走行している。提案法.2は加速後ほぼ減速することなく、ほぼ一定速で信号機に近づいている。信号機手前まで減速する事なく運動エネルギーを保持しながら走行している。提案法.3はスタート地点から信号機まで緩やかに加速している。信号機を通過する時点での速度は最も速く、運動エネルギーを保持しながら走行している。そのため、従来法.1, 提案法.2よりも消費エネルギーが低減している。提案法.2, 提案法.3はそれぞれ信号切り替わり後8.77 s, 5.01 s後に通過しているため、確率を用いて赤信号を避けることに成功している。全走行区間における総エネルギー消費量において従来法.1, 提案法.2, 提案法.3は41.64 kW, 42.96 kW, 41.20 kWである。提案法.3は従来法.1, 提案法.2と比較すると1.16%, 4.27%削減している。

以上の結果から、従来法.1よりも提案法.2の方が消費エネルギーが高い。この

ように確率を用いている手法は必ずしも信号情報なしの手法より消費エネルギーが低減できるとは限らない。信号機が切り替わるタイミングがうまく合った場合、信号情報なしの場合が消費エネルギーが低くなることも起こりうる。しかし、これは今回の問題設定で単一の信号機を想定しているために起こると考えられ、複数の信号機を想定した場合、信号情報なしですべての信号機を偶然消費エネルギーが低くなるタイミングで通過するとは考えにくい。今後の研究課題として、複数信号機での提案法の検証は必要であると考えます。

## 6.5.2 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転のシミュレーション結果における損失分離

各手法の主な損失について比較を行う。Fig. 37(f), Fig. 38(f), Fig. 39(f)は損失分離の結果を示す。

### case.1

鉄損は従来法.1, 提案法.1, 提案法.2はそれぞれ15.79 kW<sub>s</sub>, 16.19 kW<sub>s</sub>, 15.43 kW<sub>s</sub>であり、提案法.2は従来法.1, 提案法.1と比較すると2.34%, 4.97%削減している。これは、全走行区間において提案法.2の総駆動力が従来法.1, 提案法.1よりも小さく走行しており、速度も全体的に低速で走行しているためである。

銅損は従来法.1, 提案法.1, 提案法.2はそれぞれ6.80 kW<sub>s</sub>, 6.85 kW<sub>s</sub>, 3.57 kW<sub>s</sub>であり、提案法.2は従来法.1, 提案法.1と比較すると90.38%, 91.73%削減している。

走行抵抗損は従来法.1, 提案法.1, 提案法.2はそれぞれ25.42 kW<sub>s</sub>, 26.77 kW<sub>s</sub>, 24.92 kW<sub>s</sub>であり、提案法.2は従来法.1, 提案法.1と比較すると2.01%, 7.42%削減している。これは、提案法.2は従来法.1, 提案法.1よりも速度が全体的に低速で走行しているためである。

総エネルギー損失は従来法.1, 提案法.1, 提案法.2はそれぞれ48.13 kW<sub>s</sub>, 49.98 kW<sub>s</sub>, 43.99 kW<sub>s</sub>であり、提案法.2は従来法.1, 提案法.1と比較すると9.42%, 13.61%削減している。

### case.2

鉄損は従来法.1 従来法.2, 提案法.2, 提案法.3はそれぞれ15.79 kW<sub>s</sub>, 15.33 kW<sub>s</sub>, 15.43 kW<sub>s</sub>, 15.51 kW<sub>s</sub>である。提案法.2は従来法.1, 従来法.2と比較すると2.34%, -0.65%削減している。提案法.3は従来法.1, 従来法.2と比較すると1.79%, -1.18%削減している。

銅損は従来法.1 従来法.2, 提案法.2, 提案法.3はそれぞれ6.80 kW<sub>s</sub>, 5.51 kW<sub>s</sub>, 3.57 kW<sub>s</sub>, 2.06 kW<sub>s</sub>である。提案法.2は従来法.1, 従来法.2と比較すると90.38%, 54.39%削減している。提案法.3は従来法.1, 従来法.2と比較すると230.14%,

Tab. 27: 総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.1))

Conventional.1	Proposed.1	Proposed.2
48.41	50.30	44.14

Tab. 28: 総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.2))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed.2	Proposed.3
48.41	45.71	44.14	42.82

167.74 % 削減している。これは、急な加減速が少ないためである。

走行抵抗損は従来法.1 従来法.2, 提案法.2, 提案法.3 はそれぞれ 25.42 kWs, 24.53 kWs, 24.92 kWs, 25.12 kWs である。提案法.2 は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 2.01 %, -1.57 % 削減している。提案法.3 は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 1.18 %, -2.37 % 削減している。

総エネルギー損失は従来法.1 従来法.2, 提案法.2, 提案法.3 はそれぞれ 48.13 kWs, 45.48 kWs, 43.99 kWs, 42.74 kWs である。提案法.2 は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 9.42 %, 3.38 % 削減している。提案法.3 は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 12.63 %, 6.41 % 削減している。

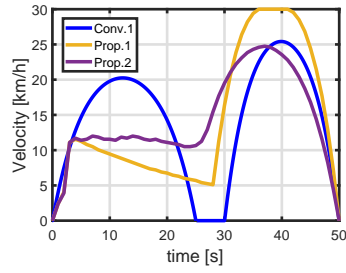
### case.3

鉄損は従来法.1, 提案法.2, 提案法.3 はそれぞれ 15.12 kWs, 15.32 kWs, 15.24 kWs であり、提案法.3 は従来法.1, 提案法.2 と比較すると -0.82 %, 0.48 % 削減している。

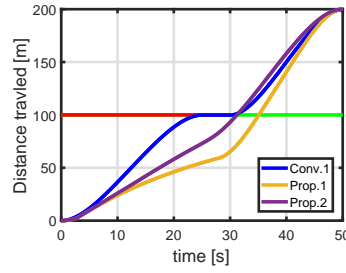
銅損は従来法.1, 提案法.2, 提案法.3 はそれぞれ 2.20 kWs, 2.83 kWs, 1.39 kWs であり、提案法.3 は従来法.1, 提案法.2 と比較すると 58.79 %, 103.56 % 削減している。これは、急な加減速が少ないためである。

走行抵抗損は従来法.1, 提案法.2, 提案法.3 はそれぞれ 24.23 kWs, 24.65 kWs, 24.50 kWs であり、提案法.3 は従来法.1, 提案法.2 と比較すると -1.08 %, 0.65 % 削減している。

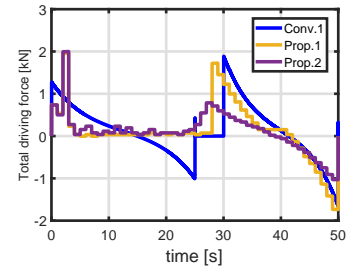
総エネルギー損失は従来法.1, 提案法.2, 提案法.3 はそれぞれ 41.60 kWs, 42.85 kWs, 41.15 kWs であり、提案法.3 は従来法.1, 提案法.2 と比較すると 1.08 %, 4.13 % 削減している。



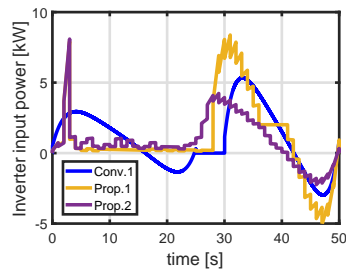
(a) Velocity Trajectory.



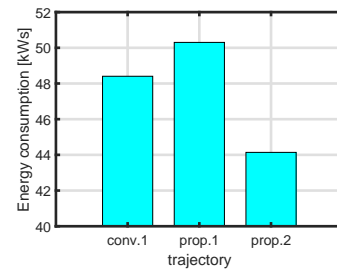
(b) Distance traveled.



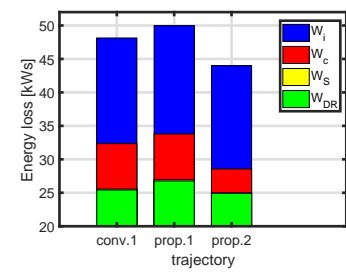
(c) Total driving force.



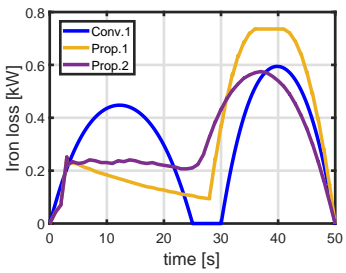
(d) Inverter input power.



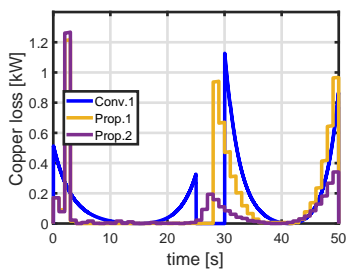
(e) Total energy consumption.



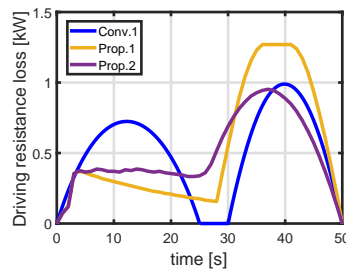
(f) Total energy loss.



(g) Iron loss.



(h) Copper loss.



(i) Driving resistance loss.

Fig. 37: 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.1)

## 6.6 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の実験

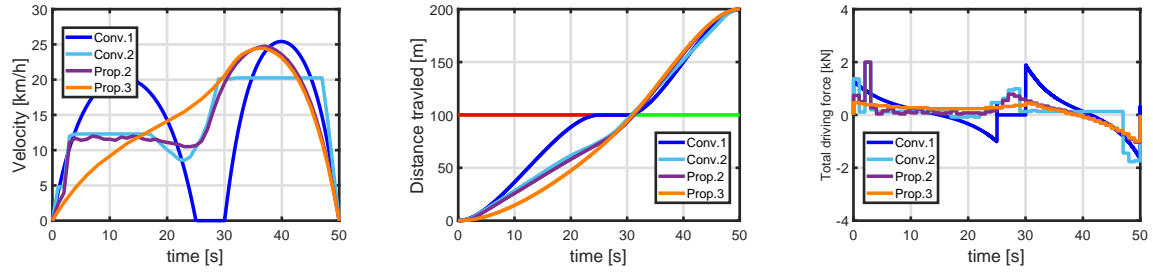
### 6.6.1 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の台上試験

シミュレーションと同じ条件のもと RC-S[35] で実験を行った。それぞれ6回走行した実験データを纏めた。Fig. 40, 41, 42 にその結果を示す。

#### case.1

Case.1 は、総エネルギー消費量において従来法.1, 提案法.1, 提案法.2 は  $59.69 \pm 0.46$  kW<sub>s</sub>,  $62.74 \pm 0.46$  kW<sub>s</sub>,  $54.86 \pm 0.29$  kW<sub>s</sub> であり、提案法.2 は従来法.1, 提

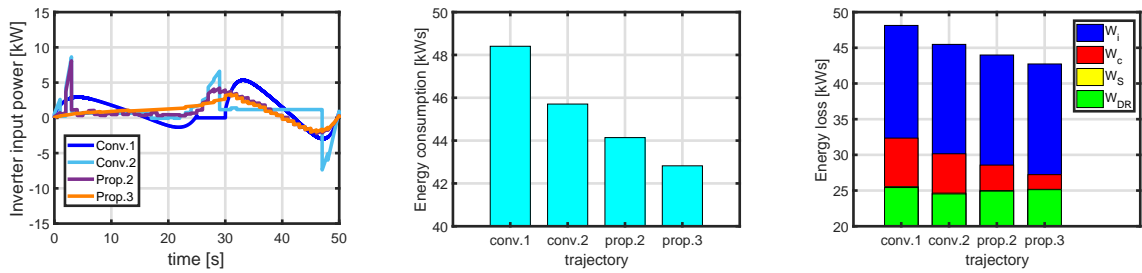




(a) Velocity Trajectory.

(b) Distance traveled.

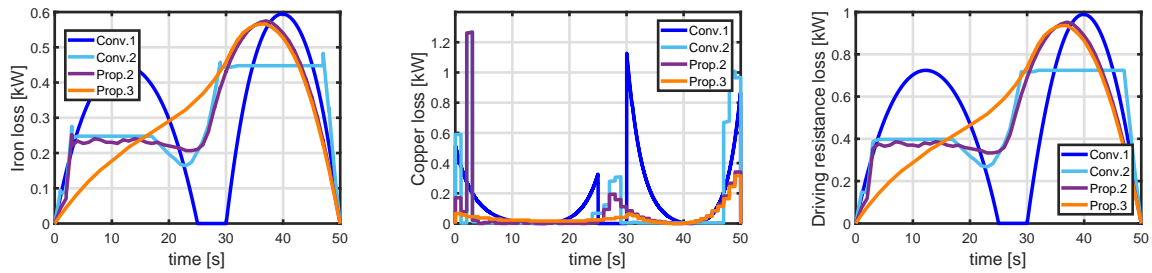
(c) Total driving force.



(d) Inverter input power.

(e) Total energy consumption.

(f) Total energy loss.



(g) Iron loss.

(h) Copper loss.

(i) Driving resistance loss.

Fig. 38: 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.2)

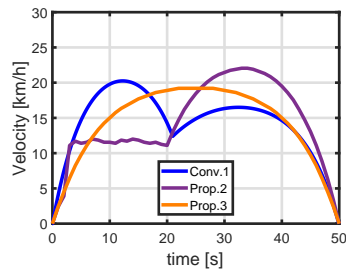
案法.1と比較すると8.80%, 14.36%削減している。

### case.2

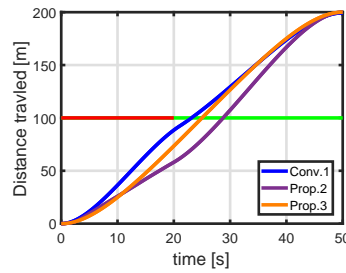
Case.2は、総エネルギー消費量において従来法1, 従来法2, 提案法.2, 提案法.3は  $59.69 \pm 0.46$  kW\*s,  $57.85 \pm 0.23$  kW\*s,  $55.17 \pm 0.19$  kW\*s,  $51.23 \pm 0.14$  kW\*sであり、提案法.2は従来法1, 従来法2と比較すると8.19%, 4.86%削減している。提案法.3は従来法1, 従来法2と比較すると16.51%, 12.92%削減している。

### case.3

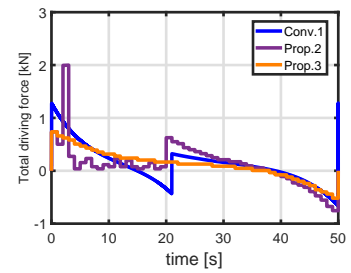
Case.3は、総エネルギー消費量において従来法.1, 提案法.2, 提案法.3は  $49.98 \pm 0.19$  kW\*s,  $52.74 \pm 0.20$  kW\*s,  $44.69 \pm 0.11$  kW\*sであり、提案法.3は従来法1, 提



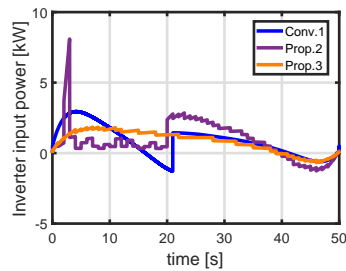
(a) Velocity Trajectory.



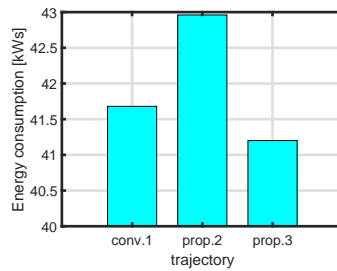
(b) Distance traveled.



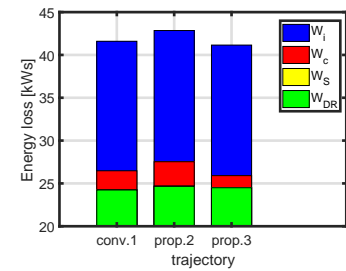
(c) Total driving force.



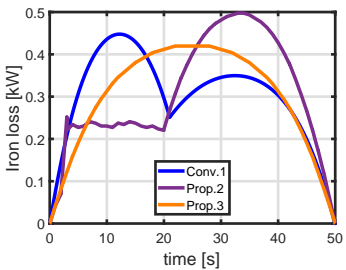
(d) Inverter input power.



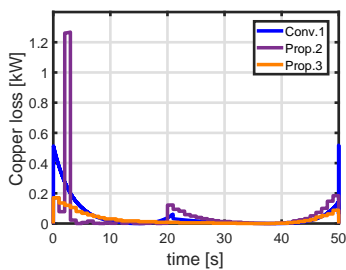
(e) Total energy consumption.



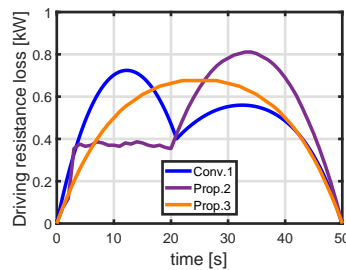
(f) Total energy loss.



(g) Iron loss.



(h) Copper loss.



(i) Driving resistance loss.

Fig. 39: 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.3)

案法.2と比較すると11.84%, 18.01%削減している.

シミュレーション比較して, 総エネルギー消費量は全手法で増加したもののシミュレーションと同様の傾向が得られている. この増加の原因は, モデル化誤差によるものと考えられる. 従来法.1は, これに加えて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, インバータ入力電力が跳ね, シミュレーション結果より大きく増加したと考えられる.

Tab. 29: 総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるシミュレーション結果 (case.3))

Conventional.1	Proposed.2	Proposed.3
41.64	42.96	41.20

Tab. 30: 総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.1))

Conventional.1	Proposed.1	Proposed.2
59.69 ± 0.46	62.74 ± 0.46	54.86 ± 0.29

## 6.6.2 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の実走試験

シミュレーションと同じ条件のもと日本自動車研究所 (JARI) の V2X 市街地にて、走行実験を行った。それぞれ6回走行した実験データを纏めた。Fig. 43, 44, 45にその結果を示す。

### case.1

Case.1 は、総エネルギー消費量において従来法.1, 提案法.1 提案法.2 は  $47.73 \pm 3.27$  kWs,  $49.79 \pm 2.47$  kWs,  $40.54 \pm 2.90$  kWs であり、提案法.2 は従来法.1, 提案法.1 と比較すると 17.75 %, 22.82 % 削減している。

### case.2

Case.2 は、総エネルギー消費量において従来法.1, 従来法.2, 提案法.2, 提案法.3 は  $47.73 \pm 3.27$  kWs,  $45.94 \pm 5.80$  kWs,  $44.00 \pm 9.15$  kWs,  $42.45 \pm 4.56$  kWs であり、提案法.2 は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 8.48 %, 4.40 % 削減している。提案法.3 は従来法.1, 従来法.2 と比較すると 12.44 %, 8.21 % 削減している。

### case.3

Case.3 は、総エネルギー消費量において従来法.1, 提案法.2, 提案法.3 は  $41.19 \pm 5.63$  kWs,  $44.80 \pm 4.94$  kWs,  $39.93 \pm 2.73$  kWs であり、提案法.3 は従来法.1, 提案法.2 と比較すると 3.14 %, 12.19 % 削減している。

全体的にシミュレーション結果と同様の傾向が得られた。台上実験に比べて実験結果にばらつきがみられたため、標準偏差の値が大きくなっている。この原因は、走行した実験経路に傾きがあった点と実験時の風の影響が考えられる。

Tab. 31: 総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.1))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed.2	Proposed.3
59.69 ± 0.46	57.85 ± 0.23	55.17 ± 0.19	51.23 ± 0.14

Tab. 32: 総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.3))

Conventional.1	Proposed.2	Proposed.3
49.98 ± 0.19	52.74 ± 0.20	44.69 ± 0.11

## 6.7 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における提案手法の比較

本章では，確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における提案手法として，消費エネルギー量期待値を用いた手法と  $t_p$  を用いた手法の2手法を提案した．本節ではこの2手法について比較を行う．

消費エネルギー量期待値を用いた手法は人が運転しているような速度軌道に近い軌道になっているのが特徴である．最初に加速し，その後ほぼ一定速または少しの減速をしながら信号機に近づいていき，信号機が変化する少し前から加速している．これは実際に適用する際に使用者が戸惑いの少ない自然な速度軌道が導出できるという利点がある．

$t_p$  を用いた手法は評価関数が消費エネルギーを最小化しているため，消費エネルギー量期待値を用いた手法よりも消費エネルギー量が少ない結果が出ている．また，この手法は  $t_p$  の決め方を自由に決めることが出来る．評価関数内に重みや消費エネルギー量に関係ない項を入れることなく調整が可能で有ることは大きなメリットとなる．

また，この手法は  $t_p$  の選択方法を変化させることによって事前情報の  $t_r$  の値が違った場合でも対応可能になる．Fig. 46 は  $t_r = 20$  s,  $t_g = 20$  s の条件で走行していたが信号切り替わり時間  $t_s = 25$  s であった場合の速度軌道と走行距離のグラフである．これは  $t_r$  を越えても赤信号であった場合， $t_p$  の選択方法を複数の  $t_p$  の中から最も小さい  $t_p$  を選択するのではなく，選択できる  $t_p$  の平均値を選択するように緩和した．その結果，20 s を越えた後，車両は減速している．走行距離を見ると，信号手前で減速し赤信号の状態を通過しないのがわかる．このように  $t_p$  の選択方法を変化させることで事前情報の多少の差異があっても安全な速度軌

Tab. 33: 総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.1))

Conventional.1	Proposed.1	Proposed.2
47.73 ± 3.27	49.79 ± 2.48	40.54 ± 2.90

Tab. 34: 総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.2))

Conventional.1	Conventional.2	Proposed.2	Proposed.3
47.73 ± 3.27	45.59 ± 5.80	44.00 ± 9.15	42.45 ± 4.56

道を導出できることは大きなメリットとなる。

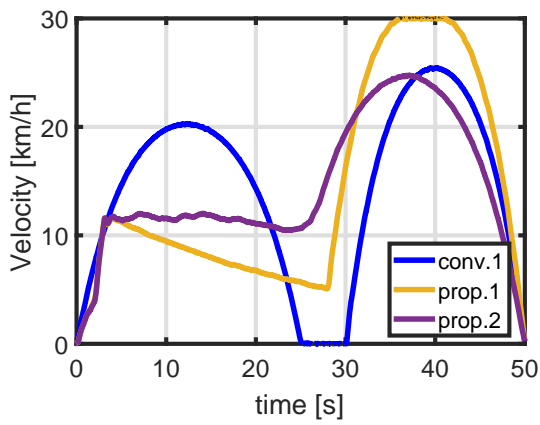
しかし、この手法は $t_p$ を用いる手法のため $t_p$ を導出できない場合はこの手法を適用できない。今回使用した確率では $t_p$ を導出できる形式であったが、全く別の形式の確率を用いた場合、 $t_p$ が導出できず適用できない。こういった場合は、消費エネルギー量期待値を用いた手法であれば確率の形式に左右されず速度軌道を導出することが出来る。

## 6.8 本章のまとめ

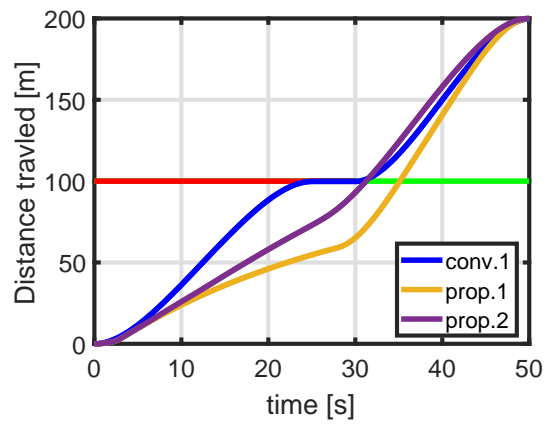
本章では、信号情報の代わりに信号通過確率を用いた速度軌道導出法として、2つの手法を提案した。その結果、信号機で停止しない速度軌道の導出に成功した。case.1では、確率の精度を高めることが重要であることを示した。case.2では、評価関数の違いによって消費エネルギーに影響が出ることを示した。消費エネルギーを削減する場合、消費エネルギーの関連した評価関数を設定する事が重要であることを示した。case.3では、確率を用いた手法は全ての場合で信号情報なしの場合より消費エネルギーを削減できるとは限らない事を示した。しかし、複数の信号機を考慮した場合は確率を用いた手法の方が消費エネルギーを削減できると考えられる。今後の課題として、実走実験による検証、複数の信号機のある問題設定へ拡張し、提案手法の有効性について議論する必要がある。

Tab. 35: 総消費エネルギー量 [kWs](確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.3))

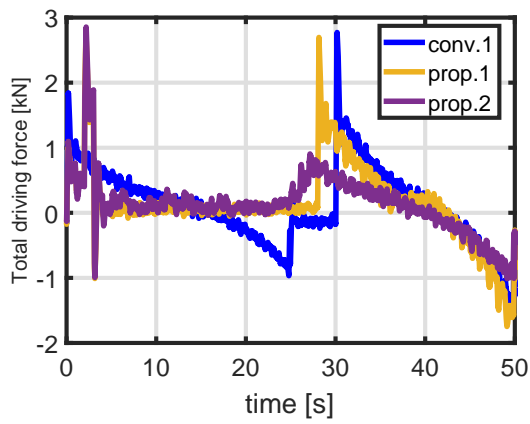
Conventional.1	Proposed.2	Proposed.3
41.19 ± 5.63	44.80 ± 4.94	39.93 ± 2.73



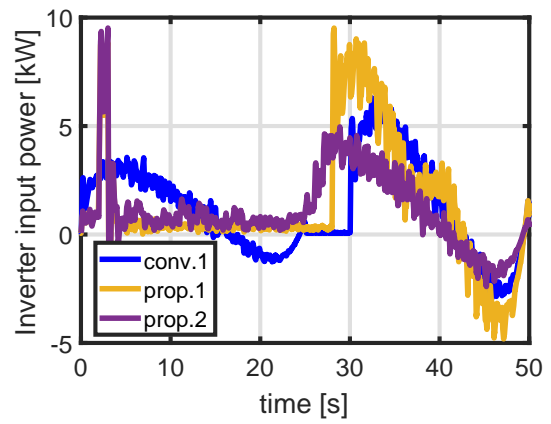
(a) Velocity Trajectory.



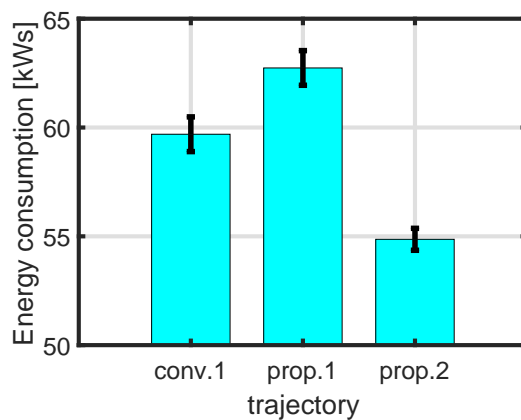
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

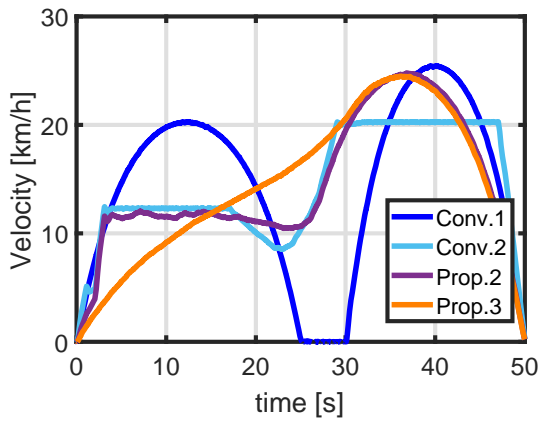


(d) Inverter input power.

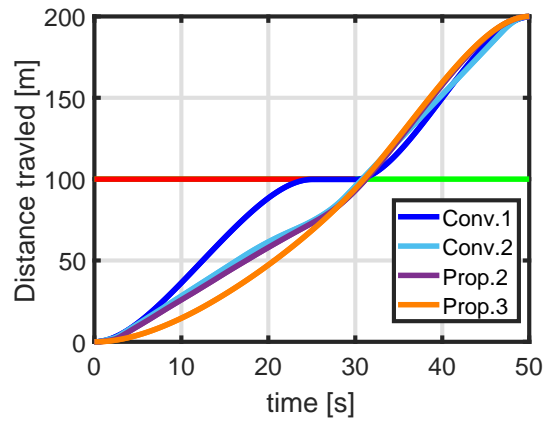


(e) Total energy consumption.

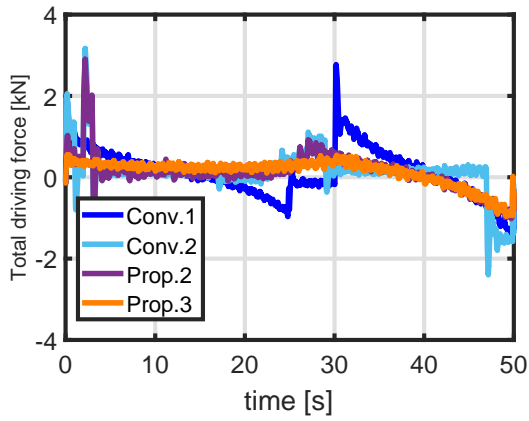
Fig. 40: 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における RC-S 台上試験による実証実験結果 (case.1)



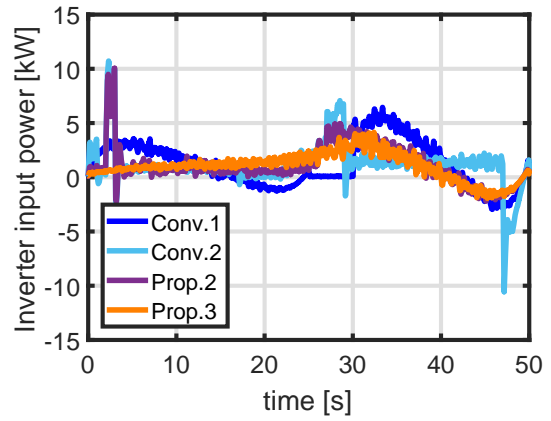
(a) Velocity Trajectory.



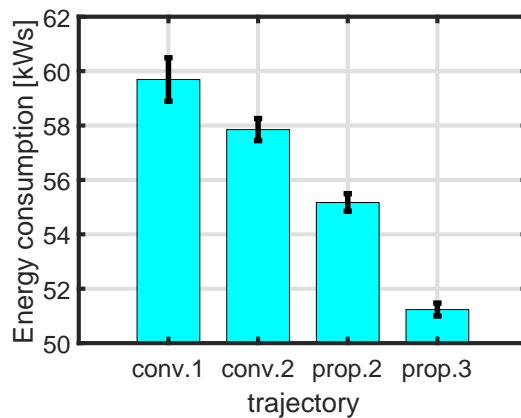
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.



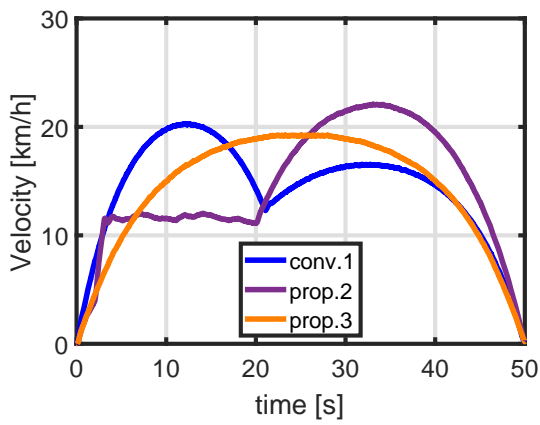
(d) Inverter input power.



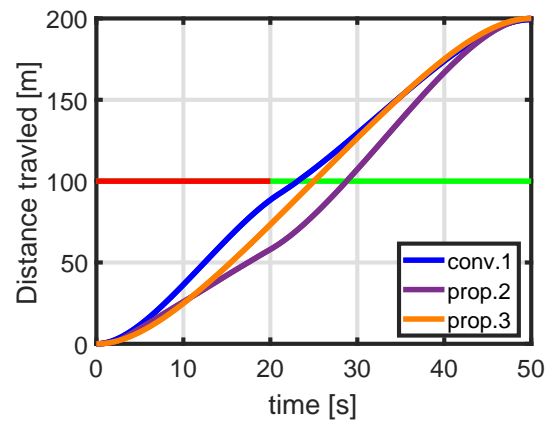
(e) Total energy consumption.

Fig. 41: 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるRC-S 台上試験による実証実験結果 (case.2)

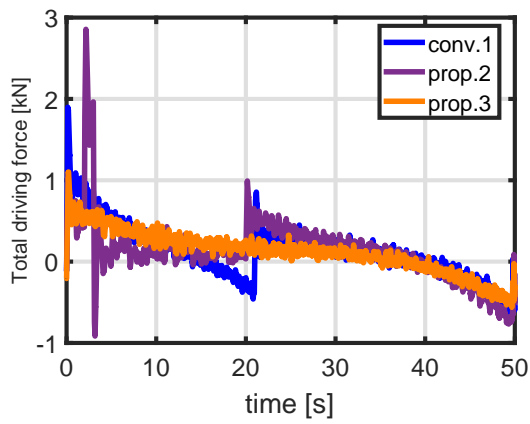




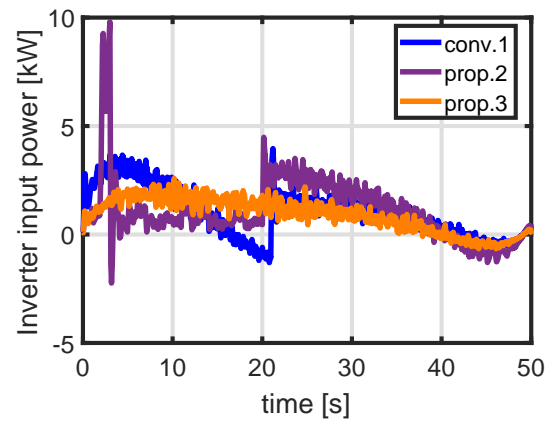
(a) Velocity Trajectory.



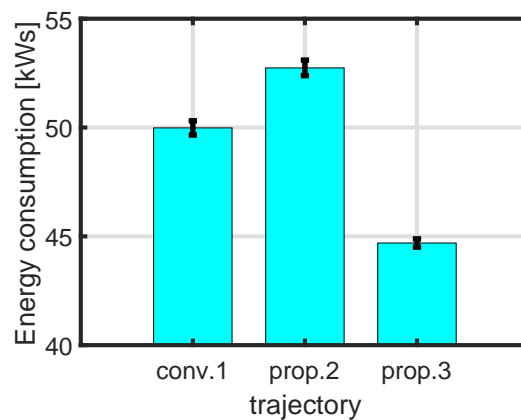
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

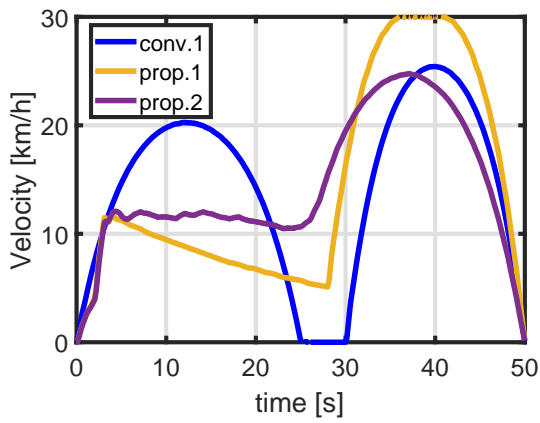


(d) Inverter input power.

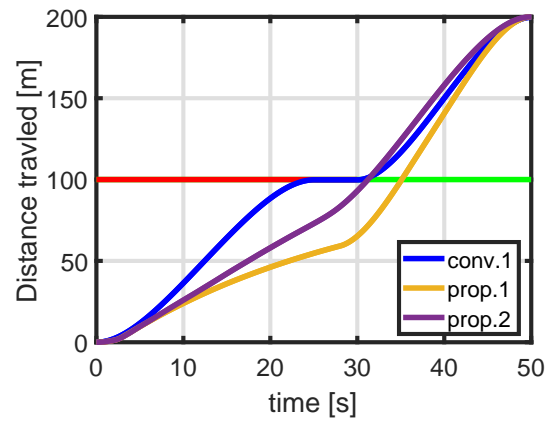


(e) Total energy consumption.

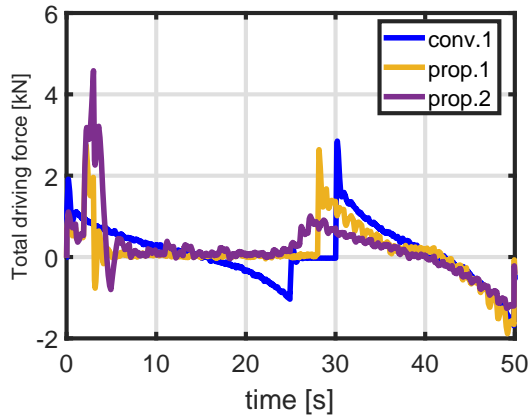
Fig. 42: 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転におけるRC-S 台上試験による実証実験結果 (case.3)



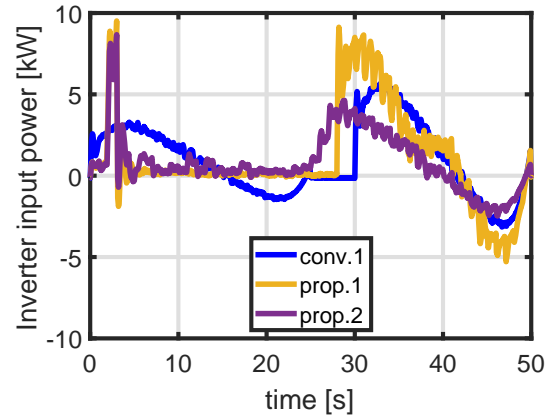
(a) Velocity Trajectory.



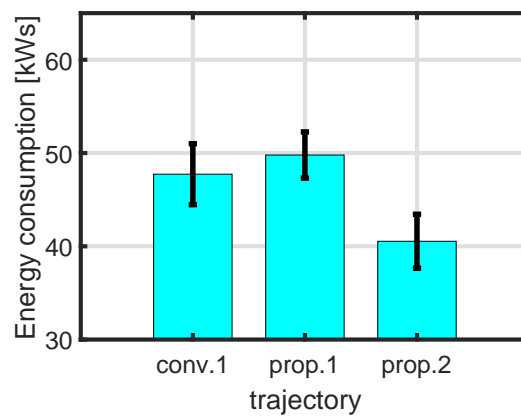
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

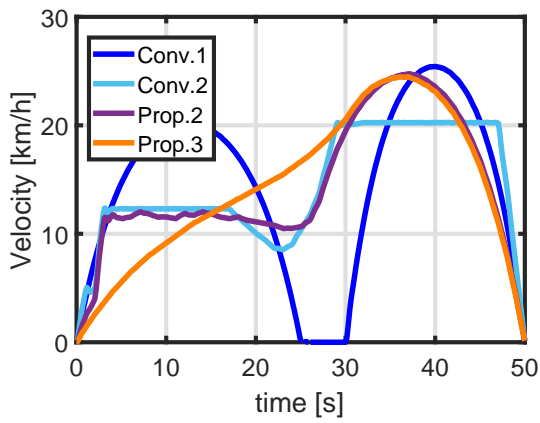


(d) Inverter input power.

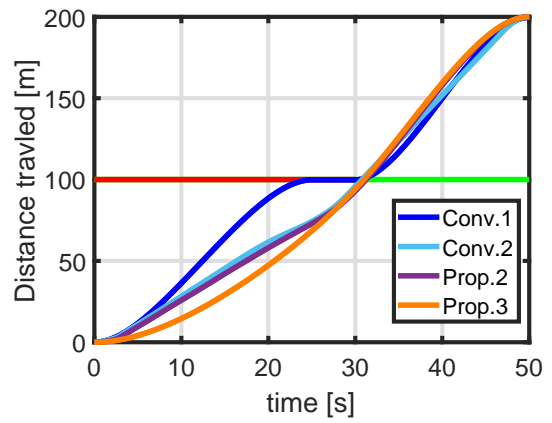


(e) Total energy consumption.

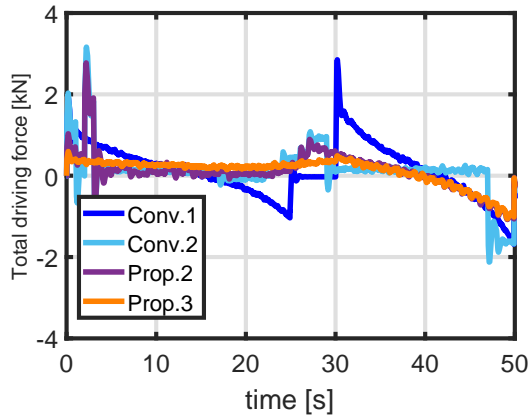
Fig. 43: 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.1)



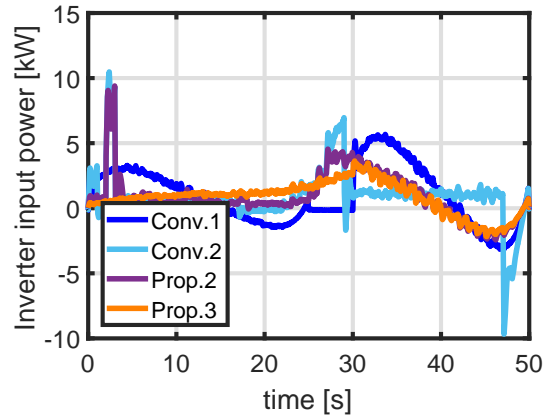
(a) Velocity Trajectory.



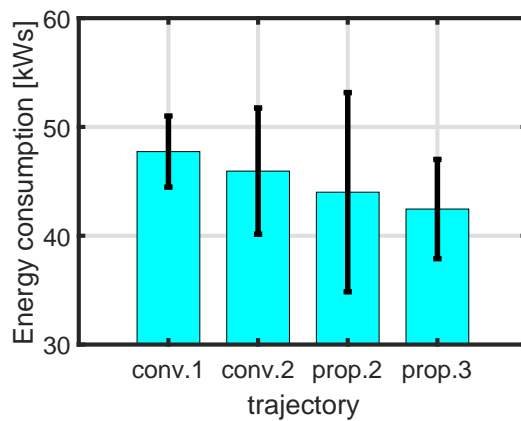
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

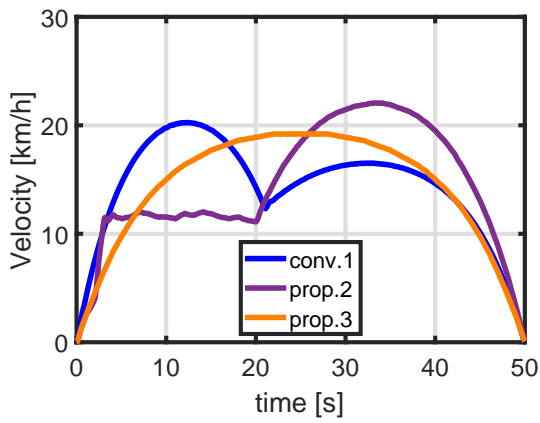


(d) Inverter input power.

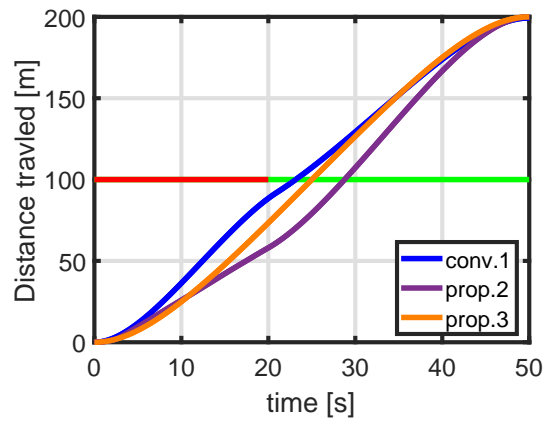


(e) Total energy consumption.

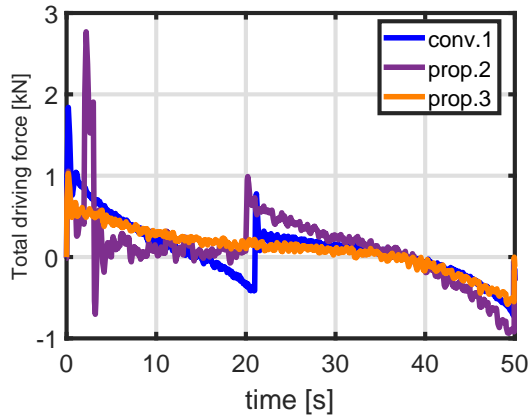
Fig. 44: 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.2)



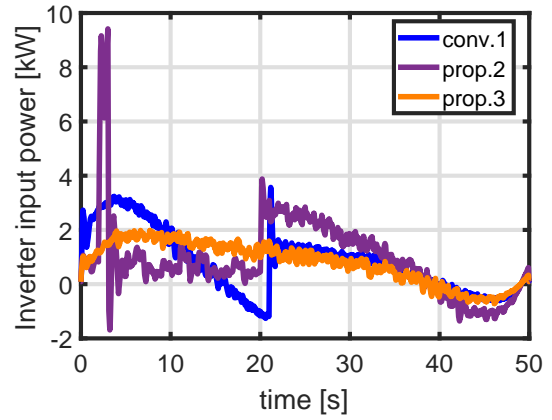
(a) Velocity Trajectory.



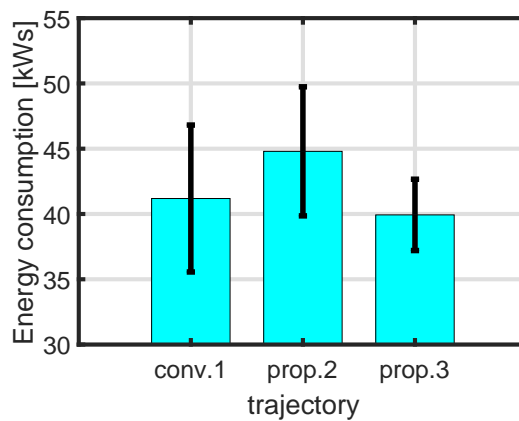
(b) Distance traveled.



(c) Total driving force.

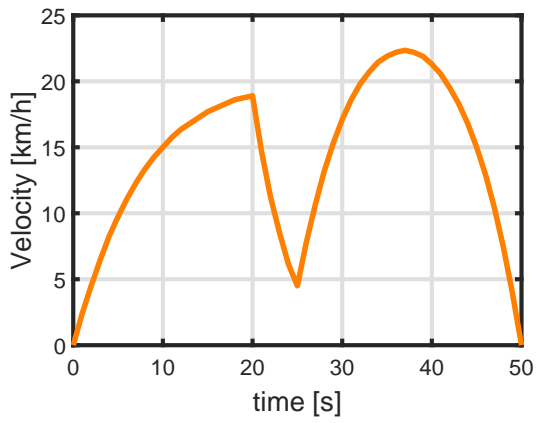


(d) Inverter input power.

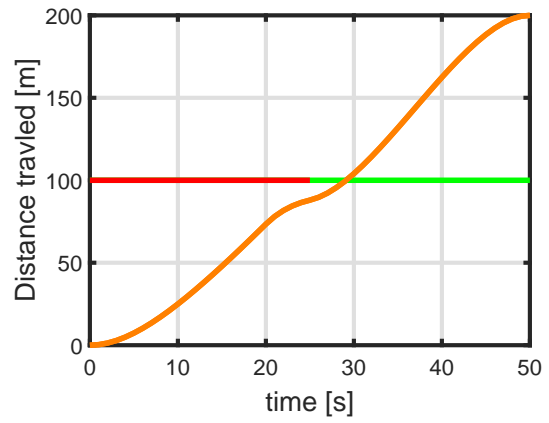


(e) Total energy consumption.

Fig. 45: 確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転における実走実験結果 (case.3)



(a) Velocity Trajectory.



(b) Distance traveled.

Fig. 46:  $t_r = 20$  s,  $t_g = 20$  s,  $t_s = 25$  s の場合の速度軌道と走行距離 ( $t_p$  を用いる手法)

# 第7章

## まとめ

### 7.1 本研究で得られた成果

本論文では、日常生活でよく現れる消費エネルギー量が多くなる場面として、信号機のある直線路に着目した。車両の運動モデルと消費電力モデルに基づき、信号機のある道路の走行を想定し、電気自動車の航続距離を最大化、延長する手法を提案した。

まず、信号機のある交差点での減速、停止によって消費エネルギー量がどの程度増加するか実際に様々な場合を想定しシミュレーションを行い、実験にて検証も行った。この結果として、信号機による減速、停止は信号灯が切り替わった後の再加速が必要となるため、消費エネルギー量の増大に大きく影響していることが分かった。

次に、ITS から信号情報が取得できると仮定して、複数の信号機が設置されている直線路においてグリーンウェーブ軌道を導出し、航続距離を最大化する航続距離延長自動運転を提案した。従来の航続距離延長自動運転の研究では単一の信号機のみを想定していたため、実際に適用できる場面が限られていることが問題であった。また、従来のグリーンウェーブ軌道導出の研究では評価関数に消費エネルギー量以外の項があり、信号機での停止は避けることが出来るものの消費エネルギー量の最小化、つまり、航続距離の最大化は出来ていないという問題があった。提案法によって、複数の信号機のある環境を想定することが出来るようになり、航続距離の最大化も可能になった。

最後に、ITS から信号情報が取得できない環境を想定し、信号情報の代わりに信号通過確率を用いた航続距離延長手法を提案した。信号情報を用いず、確率を用いることで赤信号を回避し、グリーンウェーブ軌道を導出している。本手法を用いることで信号情報がない場合でも赤信号を回避することが出来るようになるため、ITS 設備のない環境下においても航続距離を延長する事が可能になる。ま

た、ITS 設備への設備投資がいらないため、安価で導入できるというメリットもある。そのため、自動運転の普及にも大きく貢献できると考えられる。

## 7.2 今後の展望

本研究では、信号機のある道路に着目したが、消費エネルギー量が増加する問題設定はこれ以外にも考えられ、様々な環境下で適用できるように拡張していく必要があると考える。また、実用化を考える際に他車や歩行者などの影響も考慮に入れる必要はある。

また、近年この分野で注目を集めている課題はリアルタイム化である。自動運転を想定するとリアルタイムの外乱などに対して対応できるシステムを構築する必要が出てくる。近年の研究ではモデル予測制御を用いた研究や機械学習を用いた研究などがある。こうした手法を航続距離延長自動運転にも導入することも視野に入れていくべきかもしれない。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、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、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、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奥井様には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、小長谷様、岡様、越後様、秋元様、長塩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。

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、本研究室博士課程の李堯希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、論文校正やミーティングで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福田様には研究の方向性やプログラム実装の際のご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] Jrg Krings, Jan Bakker, Steffen Hoppe: “Five trends transforming the Automotive Industry “, March 29 (2017).  
<https://www.pwc.com/gx/en/industries/automotive/publications/eascy.html> (2019年1月23日参照).
- [2] 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).
- [3] J. Shin, S. Shin, Y. Kim, S. Ahn, S. Lee, G. Jung, S. Jeon, and D. Cho: “Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 3, pp. 1179–1192 (2014).
- [4] M. Sato, G. Yamamoto, D. Gunji, T. Imura. and H. Fujimoto, ”Development of Wireless In-Wheel Motor using Magnetic Resonance Coupling”, IEEE Transactions on Power Electronics, pp. 5270-5278, (2016).
- [5] O. Nishihara, and S. Higashino: ”Energy Conservation Technologies for Electric Vehicles Employing Real-time Optimizations of Lateral and Driving/Braking Force Distributions”, Dynamics and Design Conference 2012, pp. N/A (2012) (in Japanese).
- [6] Y. Chen, X. Li, C. Wiet, and J. Wang: Energy Management and Driving Strategy for In-Wheel Motor Electric Ground Vehic“les With Terrain Profile Preview”, IEEE Trans. on Industrial Informatics, Vol. 10, No. 3, pp. 1938–947 (2014).
- [7] T. Kobayashi, E. Katsuyama, H. Sugiura, E. Ono, M, Yamamoto: ”Efficient direct yaw moment control: tyre slip power loss minimisation for four-independent wheel drive vehicle”, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol.56, No. 5, pp. 719-733 (2018).

- [8] R. Abousleiman, O. Rawashdeh: "Electric vehicle modelling and energy-efficient routing using particle swarm optimisation", IET Intelligent Transport Systems, Vol.10, No. 2, pp. 6572 (2016).
- [9] T. Liu, X. Hu, S.E. Li, D. Cao: "Reinforcement learning optimized look-ahead energy management of a parallel hybrid electric vehicle", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.22, No. 4, pp. 14971507 (2017).
- [10] C. Liu, Y.L. Murphey: "Power management for Plug-in Hybrid Electric Vehicles using Reinforcement Learning with trip information", 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), pp. 14971507 (2014).
- [11] C. Dextreit, I.V. Kolmanovsky: "Game Theory Controller for Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.22, No. 2, pp. 652663 (2014).
- [12] T. Nesch, P. Elbert, M. Flankl, C. Onder, L. Guzzella: "Convex optimization for the energy management of hybrid electric vehicles considering engine start and gearshift costs", Energies, vol. 7, no. 2, pp. 834856 (2014).
- [13] 原田信吾, 藤本博志: 電気自動車におけるスリップ率とモータ損失を考慮した前後輪制駆動力配分による加減速時の航続距離延長制御, 電気学会論文誌 D, Vol.134, No.3, pp. 1-8 (2013)
- [14] 角谷勇人, 藤本博志: 前後輪横滑り角と左右トルク配分に基づく電気自動車の航続距離延長制御システム, 電気学会論文誌 D, Vol.132, No.3, pp. 1-7 (2011)
- [15] H. Fujimoto, S. Egami, J. Saito, and K. Handa: "Range Extension Control System for Electric Vehicle Based on Searching Algorithm of Optimal Front and Rear Driving Force Distribution", in Proc. 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 42444249 (2012).
- [16] H. Fujimoto, and S. Harada: "ModelBased Range Extension Control System for Electric Vehicles With Front and Rear DrivingBraking Force Distributions", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 5, pp. 32453254 (2015).
- [17] T. Yone, and H. Fujimoto: "Proposal of Method of Designing Optimum Attitude for Range Extention Control for Electrical Vehicle that poses Front and Rear Active Steering", The Transportation and Logistics Conference 2013, No. 1363, pp. 133136 (2013) (in Japanese).

- [18] Y.W. Seo, J. Lee, W. Zhang, D. Wettergreen: "Recognition of Highway Work-zones for Reliable Autonomous Driving", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, VOL. 16, NO. 2, pp.708-718 (2015).
- [19] K. Kim, B. Choi, S. Park, H. Kim, E. Kim: "Pedestrian Vehicle Detection Using a 2.5-D Multi-Layer Laser Scanner", IEEE Sensors Journal, VOL. 16, NO. 2, pp. 400-408 (2016).
- [20] A.R. Romero, P.V.K. Borges, A. Elfes, A. Pfrunder: "Environment-Aware Sensor Fusion for Obstacle Detection", 2016 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI) Kongresshaus Baden-Baden, pp. 114-121 (2016).
- [21] Q. Chen, X. Song, H. Yamada, R. Shibasaki: "Learning Deep Representation from Big and Heterogeneous Data for Traffic Accident Inference", Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence, pp. 338-344 (2016).
- [22] K.C. Chu, R. Saigal, K. Saitou: "Real-Time Traffic Prediction and Probing Strategy for Lagrangian Traffic Data", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp. 1-10 (2018).
- [23] K.C. Chu, R. Saigal, K. Saitou: "Adaptive Bidirectional Platoon Control Using a Coupled Sliding Mode Control Method", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, VOL. 15, NO. 5, pp. 2040-2048 (2014).
- [24] G. Mahler, A. Vahidi: "An Optimal Velocity-Planning Scheme for Vehicle Energy Efficiency Through Probabilistic Prediction of Traffic-Signal Timing", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 15, No. 6, pp. 2516-2523 (2014).
- [25] C. Wang, S. Jiang: "Traffic signal phases' estimation by floating car data", 12th International Conference on ITS Telecommunications, pp. 568573 (2012).
- [26] M. Kerper, C. Wewetzer, A. Sasse, and M. Mauve: "Learning traffic light phase schedules from velocity profiles in the cloud", 5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), pp. 1-5 (2012).
- [27] E. Ozatay, U. Ozguner, D. Filev, J. Michelini: "Bayesian Traffic Light Parameter Tracking Based on Semi-Hidden Markov Models", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 17, No. 11, pp. 2998-3008 (2016).

- [28] 原田信吾, 藤本博志 : 電気自動車における損失を考慮した加減速軌道および前後輪制駆動力配分最適化による航続距離延長制御, 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (2014)
- [29] 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).
- [30] 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. 47544759 (2015).
- [31] 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)
- [32] 福田卓也, 藤本博志, 堀洋一, 奥井伸宜, 武田雄資, 佐藤宏治 : 二台の電気自動車の車間距離制約を考慮した協調的な航続距離延長自動運転, 第26回交通・物流部門大会 (2017)
- [33] 大塚敏之 : 「非線形最適制御入門」, コロナ社 (2011).
- [34] 原田信吾, 藤本博志 : 電気自動車における回生エネルギーを最大化する最適減速軌道および前後輪制駆動力配分法に基づく航続距離延長制御, 平成25年電気学会産業応用部門大会, Vol.4, pp.119, 2013
- [35] D. Kawano, Y. Goto, K. Echigo, and K. Sato: "Analysis of Behavior of Fuel Consumption and Exhaust Emissions under Onroad 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

- 小川尚志, 藤本博志, 武田雄資, 佐藤宏治: 電気自動車における複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転, 日本機械学会論文集 (投稿予定).

## 査読のある国際会議

- N. Ogawa, H. Fujimoto, N. Okui, Y. Takeda, and K. Sato: “Basic Study on Range Extension Autonomous Driving of Electric Vehicles Considering Uncertainty of Signal Information”, The 4rd IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, 2018.
- N. Ogawa, H. Fujimoto, Y. Takeda, and K. Sato: “Range Extension Autonomous Driving of Electric Vehicle Considering Multiple Traffic Signals”, The 5rd IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, 2019.

## 国内学会

- 小川尚志, 藤本博志, 武田雄資, 佐藤宏治: 電気自動車における複数の信号機を考慮した航続距離延長自動運転, 第27回物流・交通部門大会 (Translog2018), 2018.
- 小川尚志, 藤本博志, 武田雄資, 佐藤宏治: 電気自動車における確率を用いた信号機推定による航続距離延長自動運転の基礎検討, 第6回制御部門マルチシンポジウム, 2019 (発表予定).

# Appendix

## 台上試験装置

台上試験では、(株)小野測器が所有する Real Car Simulation Bench (RCS) にて実証実験を行った。Fig. 47に RC-S の外観を示す。RCS はシャシダイナモ装置と異なり、駆動輪のドライブシャフトに軸受ホイールを介してダイナモを直接接続している。そのため、ローラの慣性が大きいシャシダイナモより応答速度が速い速度制御が可能となり、電気自動車の過渡解析も可能である。また、RC-S 側で車両モデルを適宜変更することで、様々な路面状況を試験することが可能である。さらに、屋内で実験を行うため、風や路面の状況の変化を受けず実験を行えるため、再現性の高い実証実験を行うことが出来る。



Fig. 47: Real Car Simulation Bench

## 交通安全環境研究所

第4章の実走実験を行った交通安全環境研究所の実験場



Fig. 48: 交通安全環境研究所の実験場

## 日本自動車研究所

第5章，第6章の実走実験を行った日本自動車研究所 (JARI) のV2X市街地



Fig. 49: 日本自動車研究所 (JARI) の V2X 市街地