

– 修士論文 –

速度パターンを導入した電気自動車の
新しい運動制御手法の提案

Proposal of a Novel Method of Motion Control for Electric
Vehicles Introducing Implementation of Speed Pattern

2003年1月31日

指導教官： 堀 洋一教授

東京大学大学院
工学系研究科電気工学専攻

タイチェンファ

内容梗概

電気自動車の長所はエネルギー効率の良さであると一般的に認識されているが、厳密に比較すれば、エネルギー効率の面で内燃機関自動車に対して絶対的な優位性を持っているとはいえない。電気自動車の大きな特長は優れた制御性にあり、エンジンの10～100倍速いトルク応答性を有する電気モータの特性を利用すれば、電気自動車の操作性および乗り心地の向上が期待できる。本論文では、最適制御理論を応用して計算したなめらかな速度パターンによる電気自動車の運動制御を提案し、乗客の不快感につながるジャークが抑えられることをまずシミュレーションで示している。つづいて苦勞を重ねて開発してきた実験車両「東大三月号II」を用い、日本有数のテストコースでの走行実験によってその有効性を確認している。

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	電気自動車の歴史	1
1.3	研究背景・目的	2
1.4	論文の構成	2
第2章	乗物における速度パターンを用いた運動制御および電気自動車へ適用する可能性	3
2.1	はじめに	3
2.1.1	速度パターン生成法とは	3
2.1.2	乗り心地	4
2.1.3	消費エネルギーの効率	5
2.2	エレベータ	5
2.2.1	加速度および加加速度の制限	7
2.2.2	ブレーキ制御	8
2.2.3	加速度フィードバックによる振動抑圧	9
2.3	電車	11
2.3.1	ポントリャーギンの最大値原理を用いた最適化手法	12
2.3.2	ファジー制御方式による自動列車運転	14
2.4	ITS (Intelligent Transportation System)	16
2.4.1	ニューラルネットワークを用いた車両追従制御	17
2.4.2	AICC (Autonomous Intelligent Cruise Control)	18
2.5	電気自動車へ適用する可能性	18
2.6	まとめ	19
第3章	電気自動車のための速度パターン設計	21
3.1	電気自動車における速度パターンの適用	21
3.2	最適制御理論を用いた速度パターン生成	22

3.3	パラメータの決め方	24
3.3.1	最大加速度を制限したパターン	25
3.3.2	最大ジャークを制限したパターン	26
3.3.3	タイヤ摩擦係数の飽和を考慮したパターン	26
3.4	リアルタイム速度パターン変更	27
3.5	速度パターンを実現する制御システム	33
3.6	まとめ	34
第4章	シミュレーションおよび実験による速度パターンの有効性の検証	37
4.1	シミュレーションによる提案手法の検証	37
4.1.1	シミュレーションモデル	37
4.1.2	シミュレーション結果	38
4.2	実験車両「東大3月号II」を用いた実験による検証	40
4.2.1	実験車両「東大3月号II」について	40
4.2.2	実験手法	40
4.2.3	実験結果	44
4.3	まとめ	47
第5章	シミュレーションおよび実験結果の検討による速度パターンの改良	49
5.1	シミュレーションおよび実験結果の検討	49
5.2	ジャークの変化率を最小にしたパターン	49
5.2.1	パターンの設計手法	50
5.2.2	スマートブレーキへの適用	50
5.3	設計手法の比較	53
5.4	まとめ	53
第6章	結論	55
6.1	本論文のまとめ	55
6.2	今後の課題	55
6.2.1	実験電気自動車「東大3月号II」の改良	55
6.2.2	制御アルゴリズムの改善	56
6.2.3	乗り心地についての検討	56
謝辞		57
参考文献		59

発表文献

65

第1章 序論

1.1 はじめに

近年、環境問題が年につれてひどくなり、専門家のみならず、一般の人々でも大気汚染、騒音、温室効果といった公害の認識が高まった。ガソリン自動車はそれらの公害の一因であることから、電気自動車への興味が再び湧いてきた。電気自動車は、環境に優しいと一般的に認識されている。その反面、走行距離などにおいてガソリンに劣る。しかし、電気自動車はこれ以上メリットがある。

1.2 電気自動車の歴史

20世紀の初期は新たな交通手段である自動車の誕生の時期であり、そのころは3種類の自動車があった。鉄道汽車から改造された蒸気機関車、ガソリンを燃料とした内燃機関車、電気モータを積んだ電気自動車であった。そして速度や駆動力において、内燃機関車が他よりはるかに勝るため、現在に至って、内燃機関自動車が主流となった。しかし、21世紀に入ろうとしている現在では、内燃機関車による環境問題が大きくとり挙げられ、人類の大きな課題の一つとなっている。

内燃機関自動車の問題は主に二つある。一つは、エンジンのエネルギー変換効率が悪いこと。もう一つは、排気ガスの中に大気汚染の原因となる酸化窒素や一酸化炭素が含まれていることである。それに対して、電気自動車のエネルギー源となる電気は発電所で作られているため、有害な排気ガスへの対策がより簡単かつ経済的に実施できる。また、その効率もエンジンの倍である。

日本では、1976年電気自動車の開発プロジェクトがあったが、価格、性能などの評価がよくなかったため、結局商品として普及しなかった。一方、近年アメリカのカリフォルニア州では革新的な法律が立てられた。それは、1990年のカリフォルニア ZEV (Zero Emission Vehicle) 規制である。この規制は、2003年までに、カリフォルニア州で販売される自動車の販売台数の一割をゼロ公害車とするものである。さらに、1991年にアメリカの他の10州もこの規制を行なったため、電気自動車の研究が復活してきている。

現在世界規模の国際会議 FISITA や EVS などでも電気自動車の研究が積極的にとり挙げ

られており、電気自動車の技術的な進歩などが表面化している。また、近年トヨタのプリウスやホンダのインサイトなど、ハイブリッド電気自動車が一般の消費者に受け入れられ始めたということもあり、今後技術の進歩によって純電気自動車 (PEV) や燃料電池電気自動車 (FCEV) も商品として受け入れられることが期待される。

1.3 研究背景・目的

本研究は電気自動車の良い制御特性に注目する。走行距離、パワーなどでガソリン自動車と競争しようとする、まさに電気自動車の弱点をもってガソリンに喧嘩を売ろうとしている行為になる。それより、電気自動車の長所を活かし、ニッチをまず見つけて、基盤を固めてから、ガソリン車に挑戦状を出すことが賢明であろう。

そのため、本研究では電気自動車の良い制御性を活かして、車体の運動制御性能を高めることを目的とする。具体的に、電車やエレベータなどで従来より用いられた速度パターンによる運動制御を電気自動車の特徴にあった形で電気自動車に実現する。このようなことにより、消費者は電気モータの優れた制御性に目覚めることになれば、電気自動車の普及も期待できると思われる。

1.4 論文の構成

本章では研究の背景および目的について述べた。第 2 章は速度パターンを用いた運動制御の実例を挙げて、電気自動車への適用の可能性を探る。第 3 章は最適制御理論に基づいた速度パターンの生成法を提案し、実際の適用の場合に考慮すべき点の考察を行う。第 4 章では、シミュレーションおよび実験仕方を説明し、結果を示す。その結果より明らかになった問題点を改善するため、第 5 章で新たな速度パターンの生成法を提案する。最後に、第 6 章では本論文のまとめおよび今後の課題について述べる。

第2章 乗物における速度パターンを用いた運動制御および電気自動車へ適用する可能性

2.1 はじめに

石油枯渇や環境破壊への意識が高まる現在、電気自動車の研究が盛んに行われている。最近、電気自動車のもう一つの良いところが注目されて来た。それは、電気自動車の駆動源であるモータの優れた制御性である [33]。電気モータの特性をまとめると、

1. トルク応答が速い
2. モデル化しやすい
3. 分散配置が可能

本論文では、特にモデル化しやすいという点を利用して、速度パターンフィードフォワードを用いた電気自動車の新しい制御手法を提案する。

2.1.1 速度パターン生成法とは

速度パターン生成法は加速度、速度、位置、時間、乗り心地、エネルギー効率などの要求および制限に基づいて、乗物の時々刻々の速度を計画し、制御アクチュエータを用いて実現すると定義することができる。

乗り物の速度パターンの生成は、主に次の二つの要素を考慮しながら行われる。

- 乗り心地
- 消費エネルギーの効率

この二つの要素の性質がかなり異なり、一方「乗り心地」は割りと抽象的で主観的な部分があるのに対して、「消費エネルギーの効率」は客観的かつ数学式を基に厳密に論じることができる。ここで、「乗り心地」および「消費エネルギーの効率」の考え方を簡単に紹介する。

2.1.2 乗り心地

乗り心地という言葉はいろいろな意味を持っていて、また曖昧なところもある。電車で旅行に出かけるという例を考えてみれば、乗り心地に影響するのは、生理的なレベルでは、車両の振動、加速度などが挙げられる。しかし、それだけでなく、車内の混雑の具合、温湿度、雑音などもその快適さに影響する。ここで、運動制御に関わるのは振動や加速度など運動量であるが、問題は個人によって快適さの基準が違い、また一人に限定しても場合によってその基準が変わっていく。

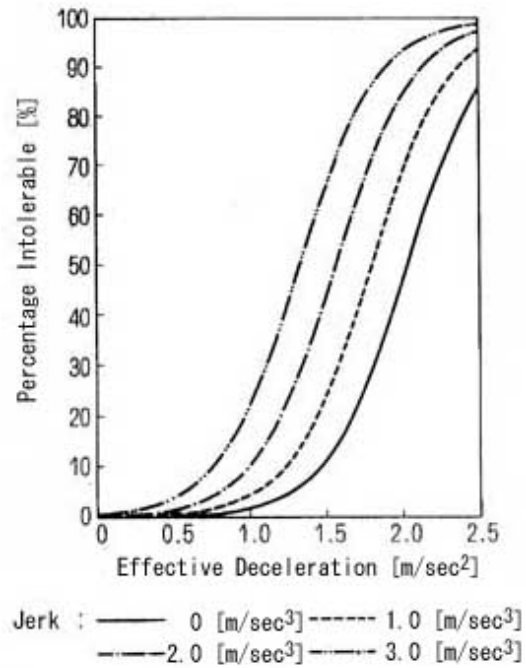
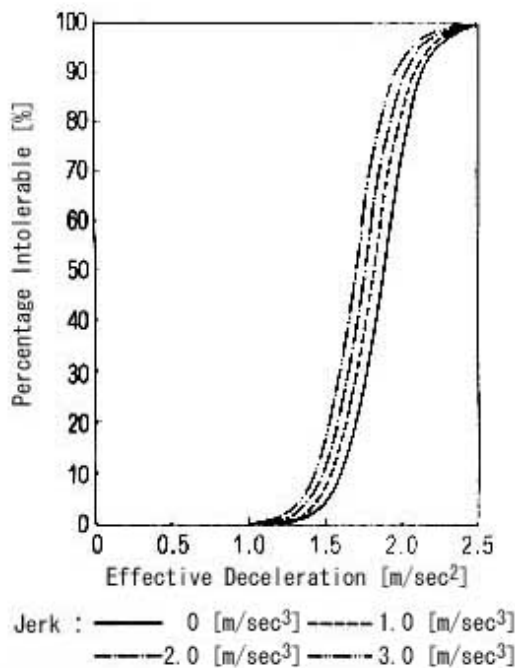


図 2.1: 利用頻度が低い被験者による減速度の評価

図 2.2: 利用頻度が高い被験者による減速度の評価

例えば、図 2.1、2.2 は電車の減速度の許容範囲を示している。この二つの図はいくつかの加加速度の下で減速するときの減速度と不快感を感じた乗客の割合の関係を示している。また、図 2.1 は電車利用頻度の低い被験者、図 2.2 は電車利用頻度の高い被験者からの試験データである。図 2.1 と図 2.2 を比較してみれば、電車利用頻度の低い被験者たちは割りと低い加加速度の下での減速でもすぐ不快感を感じるが、逆に高い加加速度でも同じような反応をする。これに対して、利用頻度の高い被験者たちは低い加加速度をある程度許すが、高い加加速度に非常に敏感であることがわかる。

国際標準化機構 (ISO) の振動評価基準やヨーロッパで古くから使われてきたスパーリン

グ (Sperlling) の乗り心地指数などがあるが、普通はそのまま適用することができないし、その個々の基準の相互関係もはっきりしていない。そのため、実際の環境を再現して人間に実験を行ったほうが確実な結果が得られる。図 2.3 は電車の乗り心地を評価するための実験風景を示している。普通の電車の中で、立っている乗客と座っている乗客に様々な運転状況を経験させ、アンケートに答えてもらう方式である。また、図 2.4 は曲線乗り心地模擬試験に使われた 4 軸振動台を示している。このような実験から集められたデータは鉄道線路、車両の設計に役立つ。また、許容範囲以内の最大加速度、減速度などもこれらのデータを基に設定される。



図 2.3: 列車における乗り心地試験



図 2.4: 4 軸振動実験装置

以上をまとめると、乗り心地は非常に主観的な評価値であるが、交通システムを設計するには、とても重要な概念である。また、より定量的な値を得るには実験結果などに基づく統計的な手段が有効である。

2.1.3 消費エネルギーの効率

消費エネルギーは交通手段の経済性と直接に関係している。これは特に電車などの公共交通手段に重要なポイントとなる。各種の交通手段は一般的に消費エネルギー効率が一番高い走行速度がある (図 2.5 参照)。しかし、走行環境によってはいつもこの最適領域で走るとは限らない。しかし、電車など比較的走行環境が管理できる交通手段では、場合によっては数値最適化によって最適な走行パターンが得られる。これから、環境意識が高まる中、消費エネルギー効率を上げることはますます重要になっていくであろう。

2.2 エレベータ

近年、建築技術の進歩に伴い、高層ビルの高さが急速に延びている。例えば、マレーシャのペトロナスタワーズは全高450[m]であり、上海世界金融センタは完成されると460[m]と

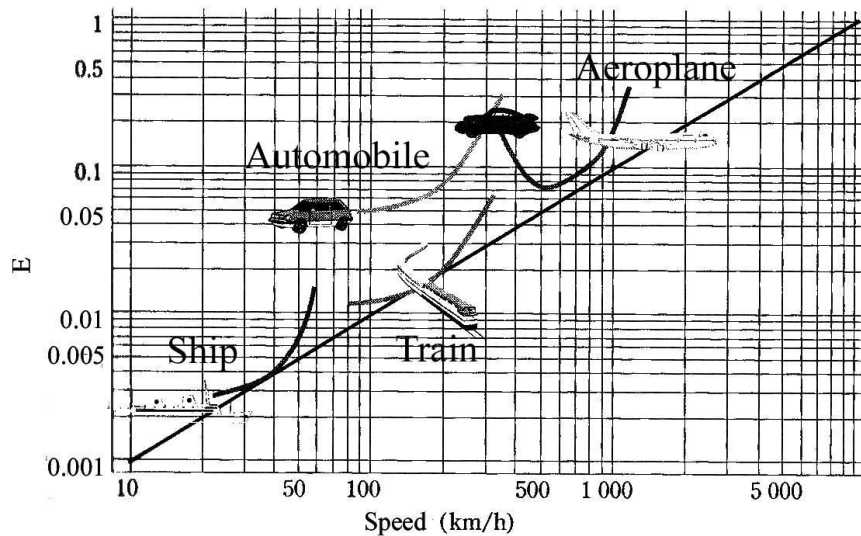


図 2.5: エネルギー消費と速度の関係

なる。高層ビルが高くなるにつれて、エレベータへの要求も厳しくなっている。

図 2.6 はロープ式エレベータの構造を示している。この図で示されたエレベータはトラクション式という駆動方式を採用している。エレベータの直上に巻上電動機が設置されており、巻上電動機の綱車にロープが載せられて、ロープの一端がかごに、もう一端がつり合いおもりに取り付けられている。巻上電動機が回ると、綱車とロープの間に摩擦力が生じ、かごとつり合いおもりが駆動される。エレベータのかごは昇降運動のみをし、横方向のずれはガイドレールによって防止される。また、停止するときに、ブレーキが掛けられ、ロープが固定される。

エレベータにおいては、エネルギー消費の問題は速度パターンで解決するよりも、エレベータの分配アルゴリズムなどの効果が大きい。速度パターンに関係しているのは乗り心地である。エレベータの運動制御において、乗り心地に影響する要素として以下が挙げられる。

- 加速度 (大きさおよび加減速に要する時間)
- 起動・停止ショック
- 振動 (上下・左右)

ここでは、この三つの問題およびその解決方法を説明する。

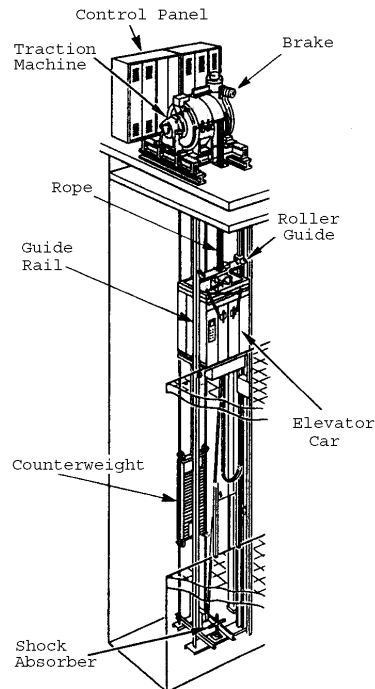


図 2.6: 一般的なロープ式エレベータの構造

2.2.1 加速度および加加速度の制限

エレベータは昇降運動をするので、重力による加速度がかかっている。そのため、平面上で運動する乗物より、乗客が加速度に敏感である。よって、加速度に上限を設定する必要がある。また、加加速度も人間に不快感を与えるため、加加速度にも制限が必要である。しかし、加速度を制限すると、最高速に着くまでの加速時間が長くなり、これは特に高層ビルの場合では問題となる。

そこで、設計の経験則によって、加速度が $0.8 \sim 0.9[m/s^2]$ 位で、加加速度が $1[m/s^3]$ 以下であれば、乗客が不快感をあまり感じないで、加速の能率も許容範囲以内になる。この加速度および加加速度の制限に基づき、速度パターンを設計することができる。例えば、エレベータが起動するとき、加速度の変化率を許容される最大値にし、加速度が徐々に上がる。加速度が許容される最大値に達したとき、その加速度を維持する。減速時も最大減速度に達するまで、許容される最大減速度変化率で減速度を上げる。この過程で設計された速度曲線は図 2.7 に示されている。短距離の走行において、速度は零から滑らかに上がり、最大加速度に達したら、直線に増える。そして、全走行時間の半分位から速度が滑らかに下がり、最大減速度に達したら直線に減速し、最後滑らかに零まで落ちる。なお、長距離

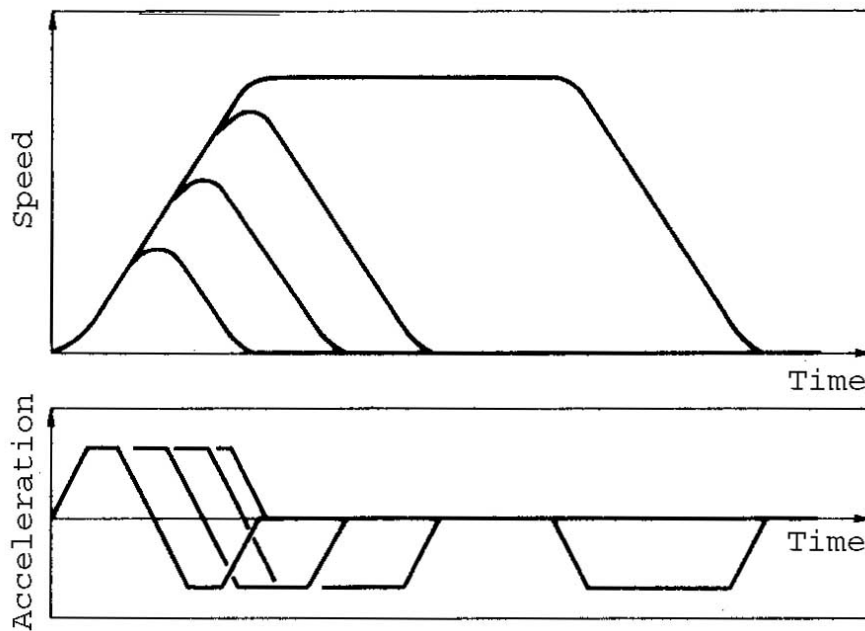


図 2.7: エレベータの運転曲線 (速度および加速度)

の走行では加速と減速の間に定速度走行の区間もある。

2.2.2 ブレーキ制御

エレベータが静止しているときはブレーキがロープにかけている。一般的に、かごの重量とかごの負荷はつり合いおもりと一致してないので、エレベータが動く前に不注意にブレーキを開放すると、ショックが与えられる。同様に、エレベータが停止する前にブレーキをかけるとショックが与えられる。このショックは加加速度として、大きければ大きいほど人間に不快感を与える。

この問題を解決するには、起動時と停止時を分けて考える。起動時に、かごの床下につけられている秤装置でかごとつり合いおもりの重量差を測り、その差分の力を先に巻上電動機で発生してからブレーキを開放することでショックをなくすことができる。また、停止時に、巻上電動機を制御して、エレベータが完全に停止してからブレーキをかけることでショックがなくなる。

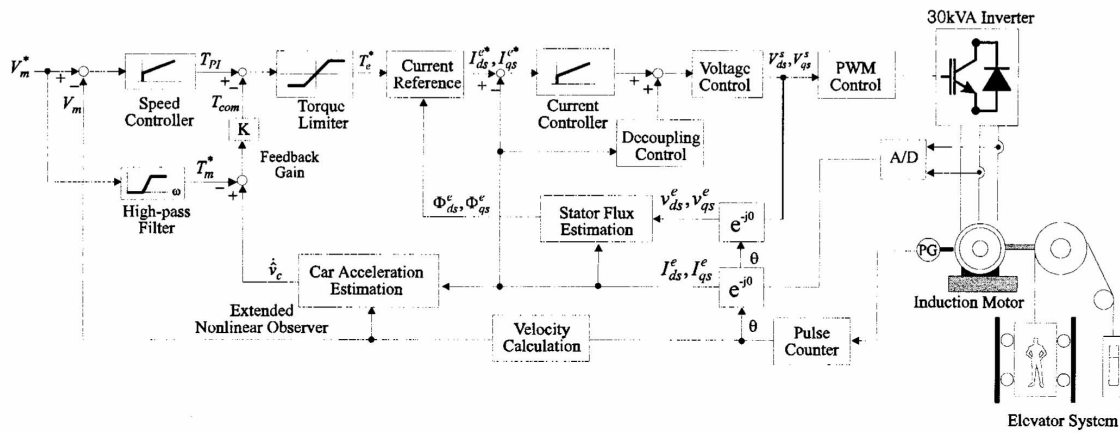


図 2.8: 加速度フィードバックによる振動抑制制御系のブロック線図

2.2.3 加速度フィードバックによる振動抑圧

ロープ式エレベータでは、かごの運動がロープを介して行われている。しかし、ロープは剛体ではなく、ばねやダンパーの要素を含んでいる。そのため、かごの上下運動により、振動などが生じてしまう。他に、巻上電動機のトルクリップルや負荷の変動などもこの振動の原因となる。[10]は、インバータを高性能化してトルクリップルを最小に抑えるとともに、速度信号からかごの振動成分を抽出して振動を少なくするような制御によって問題を解決した。また、[13]はより高層ビルのモデルをより正確に同定することで、エレベータの特性を解明して運動特性を向上させている。そして、[12]はエレベータの加速度を推定し、その推定した値を制御ループにフィードバックすることによって振動を抑圧する手法を提案した。図 2.8 はこの制御系を示している。この制御系には1[ms] 周期の PI 速度制御ループと、150[μs] 周期の加速度補償フィードバックループがある。エレベータの負荷は乗客の数によって変わるので、この手法ではエレベータかごの質量を含めた拡張系の非線形オブザーバを構成する。構成されたオブザーバから、かごの加速度の推定値 \hat{v}_c は

$$\hat{v}_c = M_c^{-1}[k_c \hat{v}_c - b_c(\hat{v}_m - \hat{v}_c)] \quad (2.1)$$

である。ただし、 M_c^{-1} は拡張系オブザーバによるかご質量の推定値、 k_c と b_c はそれぞれかご側のロープのバネ定数と減衰定数、 \hat{v}_c と \hat{v}_m はそれぞれかごと綱車の速度の推定値である。 \hat{v}_c から加速度の指令値 T_m^* を引けば、補償加速度

$$T_{com} = K_a(\hat{v}_c - T_m^*) \quad (2.2)$$

が得られる。ただし、 K_a はフィードバック補償ゲインである。また、 T_m^* は(2.3)式に示されたように、速度指令値 V_m^* にハイパスフィルタをかけて得られた値である。

$$T_m^* = \frac{s}{1 + \tau_c s} V_m^* \quad (2.3)$$

最終的にPI速度制御器の出力 T_{PI} から T_{com} を引いた値が綱車のトルク指令値 T_e^* になる。

$$T_e^* = T_{PI} - T_{com} \quad (2.4)$$

図 2.8 に示された制御系の加速度補償フィードバックループは以上のように構成される。図 2.9 はその制御系を用いた実験の結果を示し、振動が少なくなったことが実証された。

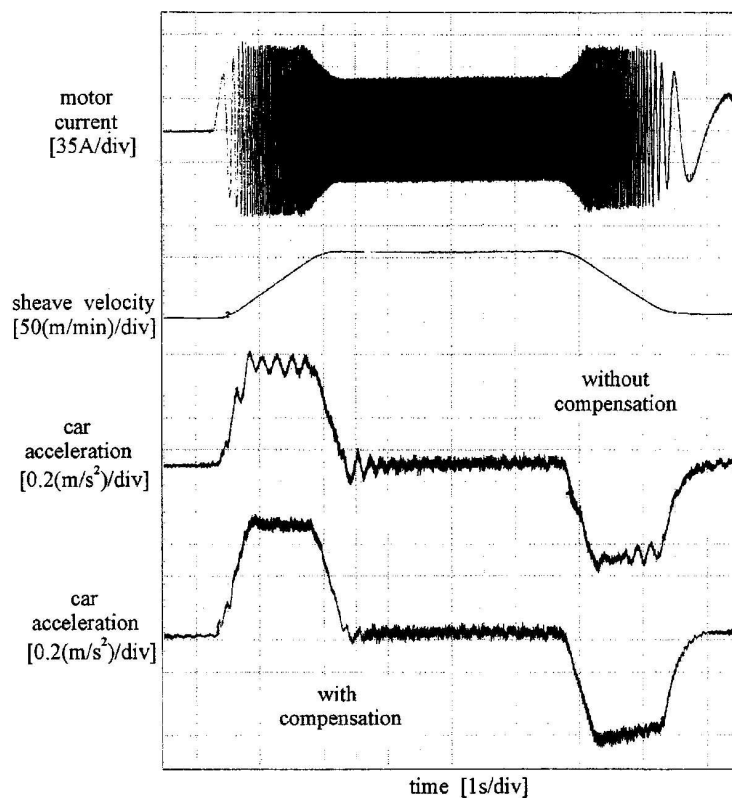


図 2.9: 加速度推定を用いた振動抑制制御の実験結果

エレベータの制御技術はかなり成熟しており、特に新しい高層ビルのエレベータに乗ると、その速さおよび乗り心地のよさに感心する。図 2.10 は横浜ランドマークタワーのエレベータの運行時の速度および加速度を示している。1993 年当時世界最高運行速度の750[m/min]を誇るランドマークタワーのエレベータは2階から69階まで40[s]しかかからない。

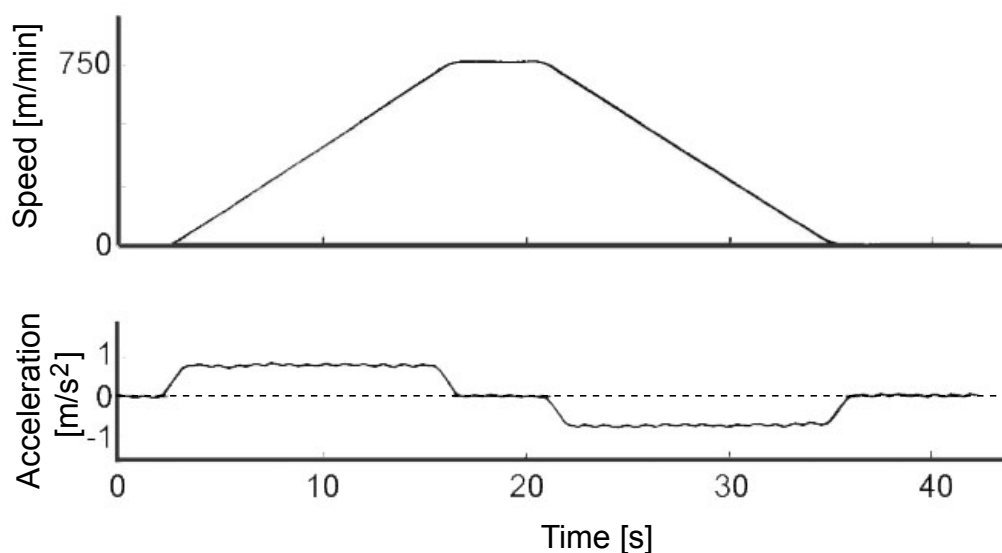


図 2.10: 横浜ランドマークタワーのエレベータ運転曲線

2.3 電車

電車は前述のエレベータと異なり、平面上で二次元運動をする。また、電車の特徴として次の項目が挙げられる。まず、電車の車両が専用の線路を走るため、ある意味エレベータと似ている。この線路は鉄道会社が管理および補修しているため、線路の状態をある程度一定に保つことができる。次に、浮上およびゴムタイヤ式を除く一般の鉄道では、鉄の車輪が鉄レールの上を走るため、摩擦定数が非常に低く、弾力も小さいので乗り心地に影響する。最後に、電車は乗客ではなく専門のドライバーが運転している。そのため、ドライバーが熟練の技術を持っていて上手に運転できる反面、乗客は線路などの状態を知らないため、一般的にブレーキがかけられることや電車が急カーブに入ることを予め知ることが期待できないので乗り心地に影響される。

電車は人間が作り出した様々な交通手段のひとつにすぎず、他の交通手段と競争している。特に、電車の行動範囲が線路に限られていることやダイヤに制限されていることで、自動車と比べて不利な立場にある。そのため、経済性の面で勝負することが大事であるため、エネルギー効率を上げることが一つの重要な課題であった。ただし、最近電気回生ブレーキが普及し、エネルギーを回収することによって消費エネルギーを大幅に節約することができるようになった。しかし、この動向でこれまで厳密に得られた消費エネルギーに対して最適化された走行パターンが適用できなくなってしまった[24]。今は、純電気ブレーキを用いた定電力ブレーキパターン[25]や動的計画法による最適化[26]など新しい最適化手法

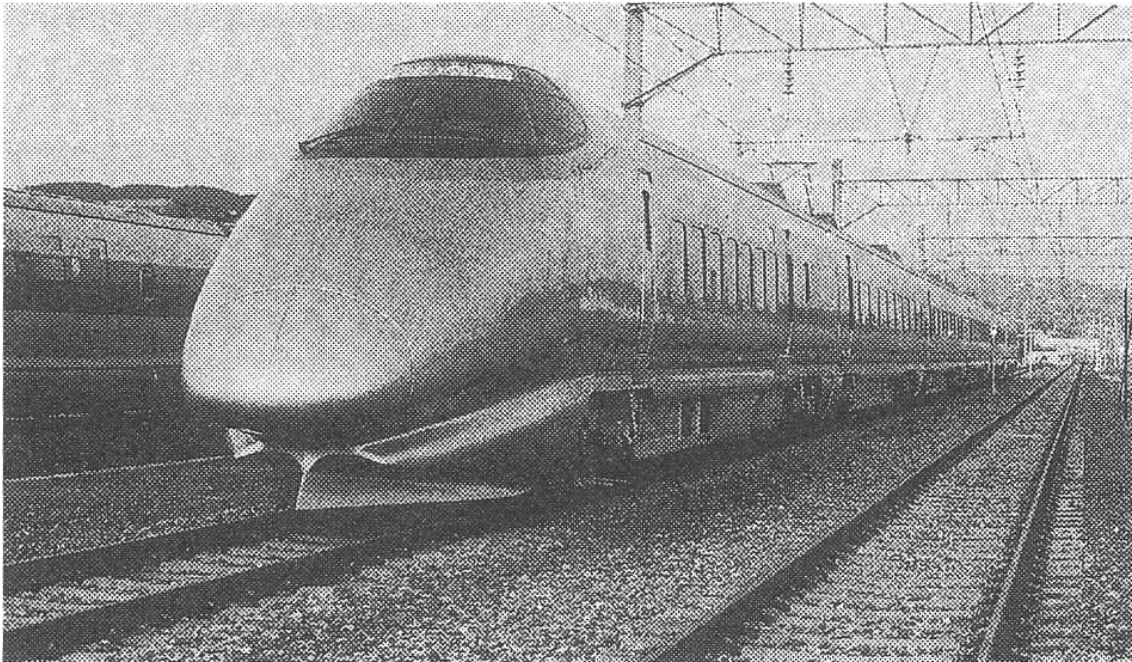


図 2.11: JR「つばさ」号

の研究が行われている。これらの最新動向を踏まえて、ここで非回生時代に開発された速度パターンの最適化手法を紹介する。

2.3.1 ポントリャーギンの最大値原理を用いた最適化手法

電車の走行時に消費されるエネルギーをできるだけ低く抑えることは最適化問題の一種である。[17] はポントリャーギンの最大値原理を用いて消費エネルギーを最小にする電車の走行パターンを解いた。この手法で得られた最適解を用いて、Metromiser という時々刻々運転士に最適な運転方法を教えるシステムが作られた。Metromiser はオーストラリアやカナダの鉄道に採用され、その結果 10 ~ 30% のエネルギー節約が達成された。

この最適化問題は以下のように設定できる。

$$J(u, v) = \int_0^T u_+(t)v(t)dt \quad (2.5)$$

で表されるエネルギー消費関数を最小にする。ただし、 u_+ は加速指令、 v は電車の速度、 t は時間である。

$$\dot{v}(t) = u(t) - r[v(t)] \quad (2.6)$$

ただし、(2.6) 式という前提の下である。ここで、 $u(t)$ は加減速指令、 r は摩擦による抵抗

力である。そして、境界条件は

$$v(0) = v(T) = 0 \quad (2.7)$$

ただし、 T は移動の制限時間である。最後に制約条件は

$$\int_0^T v(t)dt = X \quad (2.8)$$

$$|u(t)| \leq 1 \quad (2.9)$$

である。ただし、 X は駅間の距離である。(2.5)、(2.6)式、また、 $\dot{x} = v$ という関係を用いて、ハミルトニアンを以下のように表すことができる。

$$H(x, v, u) = -u_+ + z_1 u + z_2 [u - r(v)] \quad (2.10)$$

ただし、 z_1 と z_2 は以下の微分方程式を満たすものとする。

$$\dot{z}_1(t) = 0 \quad (2.11)$$

$$\dot{z}_2(t) = u_+ - z_1(t) + z_2(t)r[v(t)] \quad (2.12)$$

最適解を求めることは、 H を最大にする u を求めることになる。そこで、 H に関する方程式を以下のように書き換えると

$$H(v, u) = \begin{cases} (z_2 - v)u + \dots & 0 < u \leq 1 \\ z_2 u + \dots & -1 \leq u < 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

H を最大にする u は z_2 に依存することがわかる。ここで、五つのケースに分けて考えてみる。

1. $z_2 > v \Rightarrow u = 1$
2. $z_2 = v \Rightarrow u \in [0, 1]$
3. $0 < z_2 < v \Rightarrow u = 0$
4. $z_2 = 0 \Rightarrow u \in [-1, 0]$
5. $z_2 < 0 \Rightarrow u = -1$

1, 3, 5はそれぞれ、最大加速度の加速、惰行、最大減速度の減速である。2は一定の速度追従であり、4はブレーキによる速度追従(例えば下り坂などで)。ここで説明を簡単にするためにモデルを簡略化した。一般の場合でも路面の傾斜度など鉄道軌道の環境変数を考慮した上で、この五つの組み合わせから最適解が得られる。

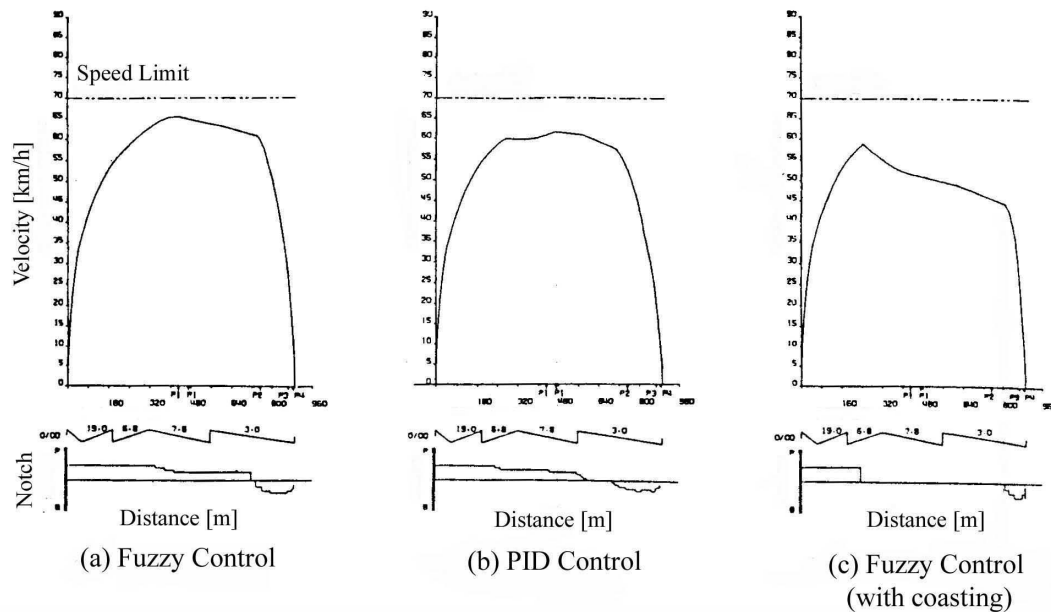


図 2.12: 列車ファジー制御のシミュレーション結果

2.3.2 ファジー制御方式による自動列車運転

上述のエネルギー最適化手法を踏まえて、[15]、[16] は予見ファジー制御による電車の自動運転を提案した。この提案では、安全性、乗り心地、目標速度への追従性、停止精度、消費電力量、を評価指標とするシステムが構築された。そのシステムは熟練した運転士の経験をアルゴリズム化することを目的とした。実施される制御は、駅間定速走行制御 (CSC: Constant Speed Control) と定位置停止制御 (TASC: Train Automatic Stop Control) である。

ファジー制御とは人間の定性的な評価指標を定量化し、その定量化された規則に基づいて制御を行う手法である。運転士の経験から得られた運転ルールは、例えば定位置停止制御を例にとれば以下のように定性的に表記できる。

- (T-1) 乗り心地をよくするため： B 地点を過ぎて、そのままうまく停止できそうなときは、そのノッチを確保する
- (T-2) 走行時間を短縮し、乗り心地をよくするため： B 地点の手前ではブレーキをかけずに、B 地点を通過すると、少しブレーキをかける
- (T-3) 停止精度をよくするため： B 地点を過ぎると、そのままうまく停止できないと判断した場合には、 $\pm n$ ノッチ以内で正確に止まれるノッチを選択する

ただし、B 地点は定位置停止制御を開始すべき地点である。次は、乗り心地、停止精度や走行時間の評価指標を以下のように定義する。

乗り心地 (C) については、ノッチが頻繁に変化させられたら乗り心地が悪くなるとし、直前にノッチが変化させられた段数 N_C と、その後ノッチが一定に保たれている時間 t_C で評価する。

- 乗り心地が良い (CG)

$$\mu_{CG}(t_C, N_C) = F(t_C, 1 + \frac{N_C}{2}, \frac{N_C}{2})$$

- 乗り心地が悪い (CB)

$$\mu_{CB}(t_C, N_C) = 1 - \mu_{CG}(t_C, N_C)$$

停止精度 (G) については、停止目標 X_t および許容停止誤差 X_e に対してノッチ N_P を選択した場合の停止位置 X_P で評価する。

- うまく停止する (GG)

$$\mu_{GG}[X_P(N_P)] = G[X_P(N_P), X_t, X_e]$$

- 正確に停止する (GA)

$$\mu_{GA}[X_P(N_P)] = A[X_P(N_P), X_t, X_e]$$

走行時間 (R) については、列車速度に対応したブレーキ開始地点 (B 地点) より停止目標側を定位置停止制御ゾーン、出発駅側を自由ゾーンと定義し評価に用いる。評価する変数は B 地点までの余裕時間 t_z である。

- 定位置停止制御ゾーン内にいる (RT)

$$\mu_{RT}(t_z) = F(t_z, 0, 2)$$

- 自由ゾーン内にいる (RF)

$$\mu_{RF}(t_z) = 1 - \mu_{RT}(t_z)$$

最後は定性的に記述した列車運転制御の経験則を上述のファジー集合により定式化し、ファジー制御則を決定する。ここで ΔN を現在のノッチの値 N に対する変化分として、 $(T - 1)$ に述べた乗り心地をよくするための経験則の各部分は、「ノッチを保持したとき」→「 ΔN is 0」、「B 地点を過ぎている」→「R is RT」、「そのままうまく停止できる」→「G is GG」に対応している。即ち、経験則をファジー制御則に書き直すと、

(T-1) IF (ΔN is 0 \rightarrow R is RT and G is GG), THEN ΔN is 0.

(T-2.1) IF (N is 0 \rightarrow R is RF and C is CG), THEN N is 0.

(T-2.2) IF (N is 1 \rightarrow R is RT and C is CG), THEN N is 1.

(T-3) IF (ΔN is n \rightarrow R is RT and C is CG and G is GA), then ΔN is n. (n = $\pm 1, \pm 2, \pm 3$)

が得られる。駅間走行制御についても同様に制御則が決定できる。これらの制御則を例えば100[ms]ごとに評価すれば、運転士と同じような制御を行うことができる。

この制御法を用いて札幌市地下鉄東西線の路線条件(琴似・新札幌16区間、片道17.305[km])の下でシミュレーションが行われた。シミュレーションは(a)ファジー制御方式による走行、(b)PID制御方式による走行、(c)ファジー制御方式で、一定速度到達後惰行を行う走行、の三つのケースについて実行した。その結果は図2.12に示されている。図2.12より、ファジー制御は同じ停止位置の精度を保ちながら、PID制御よりノッチ変更の回数が少ないことが分かる。これは乗り心地が良いことを意味する。また、1983年に現地でシミュレーションと同じ内容の現車走行試験が実施され、この試験の設定条件およびデータの一例が表2.1に示された。ファジー制御はPID制御と比べて、同じ停止位置の正確さにおいてもより高い減速度で減速でき、走行時間を1分間近く減らすことができる。また、加速後に惰行を行えば、消費電力の減少は約13.8%である。これらの結果は自動列車制御においてファジー制御が非常に有効であることを明らかにした。

ケース	(a)	(b)	(c)
制御方式	ファジー	PID	ファジー
走行モード	N 走行	N 走行	N 走行 (惰行有)
停止減速度 (km/h/s)	3.7	2.8	3.7
走行時間	16'18" (-58")	17'16" (±0")	17'07" (+9")
消費電力 (kWh)	45.6 (104.8%)	43.5 (100%)	37.5 (86.2%)

表 2.1: 列車におけるファジー制御とPID制御の実験結果

2.4 ITS (Intelligent Transportation System)

ITSは高速道路で自動車の自動運転を目標としている。エレベータや電車など成熟した技術に比べて、斬新なアイデアである。ITSについて研究(例えば、ヨーロッパのPROMETHEUS: Program for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety、カリフォルニア州のPATH: Program on Advanced Technology for the Highway、日産のPVSなど)が進められてきたが、まだ実験の段階にとどまり、実用まで及ばない状態である。し

かし、先進国で自動車の交通量が急速に伸びていることから、ITSの技術は近い将来に投入されることであろう。

ITS技術は自動車制御、通信、土木など様々な分野を跨いでいるが、その基本的概念は高速道路で自動車は人間が操縦するのではなく、自動運転をするということである。その趣旨は人間による操縦ミスをなくし、ひいては交通事故をなくすことと、高度な自動運転技術で車間距離を減らし、ひいては高速道路の容量を増やすことである。そのため、安全性の確保は非常に重要になる。特に車間距離を正確に保つための速度調整は一つの大きな課題である。ただし、従来の内燃機関自動車は非線形な要素が多く、簡単に速度制御が実現できないため、多くの研究は自動車そのものの速度制御から始まる。ここでは、いくつかの研究を紹介する。

2.4.1 ニューラルネットワークを用いた車両追従制御

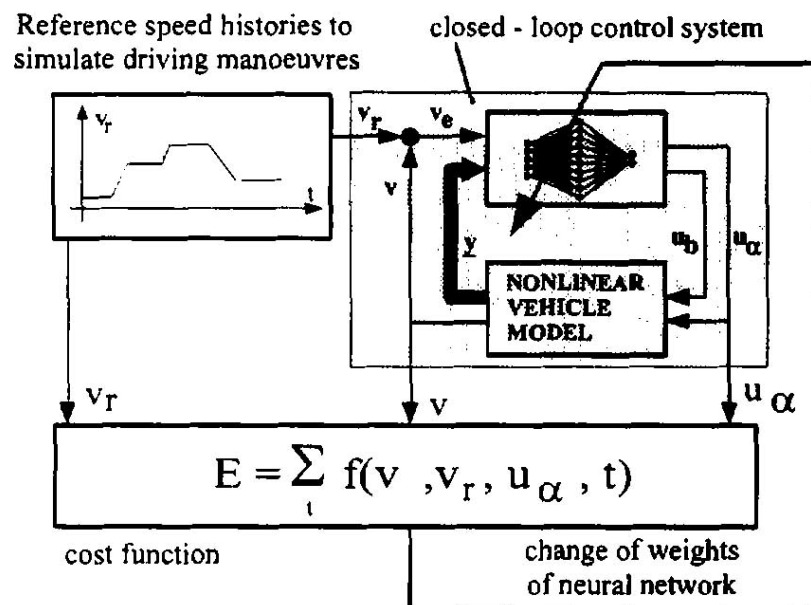


図 2.13: ニューラルネットワークにおける学習のブロック線図

ニューラルネットワークとはモデルを用いなくて、入力と出力の非線形関係を見本となる例から学習する手法である(図 2.13)。[31]は、ニューラルネットワークを用いて自動車のクルーズコントロールを設計した。Daimler-Benzの実験車 OSCAR を用いて行われた実験により設計されたコントローラは低速領域でも高速領域でも速度指令値を追従できるこ

とがわかる。しかし、実用するには学習に使われるモデルの正確さが要求される。[30] はニューラルネットワークを用いて車両の自動追従コントローラを作った。テキサス農工大が BART 実験車を用いて行った実験では、作られたコントローラで車両追従ができた。また、そのコントローラは車両のダイナミクスに依存しないため、簡単に他の車両に移転できるという。

2.4.2 AICC (Autonomous Intelligent Cruise Control)

AICC は [28] で提案された。この方法の一番大きな特徴は前の車両だけでなく後ろの車両との車間距離の情報も使って車間距離を追従することである。この制御法では個々の車両と車両群の前後方向の安定性がシミュレーションによって検証された。また、この方法は直前と直後の車両との距離のみを使うので、例えば、車両群の最前端にある車両などの情報がいらなくなる。

2.5 電気自動車へ適用する可能性

電気自動車はエレベータや電車と同じく電気モータによって駆動される。これは電気自動車が非常に速度制御に適していることを意味する。電気自動車の速度制御について以下の長所が考えられる。

- 電気モータが駆動源のため、速度制御が簡単に実現できる
- ロバストな制御の可能性がある (車輪空転などに対して)
- 一般の車両はドライバーに速度を表示するので合理的な制御方式である

しかし、エレベータや電車と違って、自動車は固定された軌道がなく、また予め目的地を知っているとは限らない。そして、自動車には人間のドライバがいて、人間が制御ループの一部となっている。電気自動車のこれらの特性を前提に、速度パターン生成法を論じると、いくつかの可能性が考えられる。

加減速時のみに最適化する 一般の自動車運転パターンは (混雑な市内を走行するときを除き) 短い加減速の部分と長い定速走行の部分からなっている。目的地を知らずに、全走行距離において最適化を行うことが難しいので、加減速時だけを最適化の対象とする。しかし、加減速時は電気自動車にとってもっとも出力が大きくなるときでもあるので、ここの改善は大きく性能を上げることが期待される。また、安全性を考えるとより速くて滑らかに減速することはとても望ましい。

ニューラルネットワークを用いた学習 人によって運転パターンが異なる。また、人には各自の特有の癖がある。そのため、ニューラルネットワークを用いて各ドライバの癖を学習すれば、最適化の可能性が現れる。

2.6 まとめ

本章では、まず「速度パターン生成」という概念とその考え方について述べた。次に、エレベータ、電車、ITS という違う特性を持っている交通システムを例として取り上げて、具体的な速度パターン生成法を紹介した。最後に、電気自動車に速度パターン生成法を適用する可能について述べた。

自動車において速度制御自体の難しさもあって、今まで速度パターン生成についてあまり議論されていなかった。しかし、電気自動車なら速度制御が簡単に実現できるので、速度パターン生成に関して大きいな性能向上の可能性を持っている。

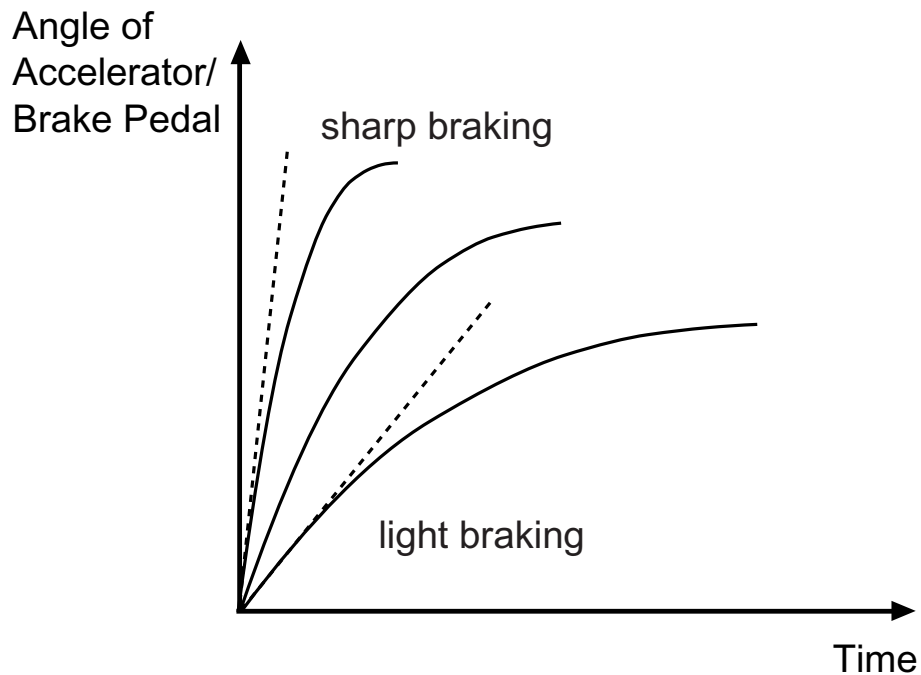


図 3.2: ブレーキ・アクセルの踏み具合よりドライバーの意思を推測

その計算された指令値と車両の状態変数（速度、加速度など）を使って、速度パターンを生成する。最後に、この生成されたパターンを使って、車両を制御する。なお、生成されたパターンはフィードフォワード指令として使用する。

一般的に、フィードフォワード制御をかけるときは、対象のモデルをきちんと把握しないといけない。電気モータは正確にモデル化することができるとはいえ、タイヤというアクチュエータを介する限り、電気自動車システムには多くの不明確な非線形性が含まれる。そのため、フィードフォワードのみでロバストな制御系を組むことは非常に難しいと思われる。しかし、電気自動車の場合は、電気モータから正確な速度情報が得られ、トルク応答も速いため、速度フィードバックループが簡単に実現でき、フィードバックループを用いて外乱を抑圧することが可能になる。速度パターンを実現するための制御系について、後により詳しく説明する。

3.2 最適制御理論を用いた速度パターン生成

最適制御 [35] は現代制御理論の成果の一つであり、基本的に状態方程式の動的条件に沿ってある評価関数を最小にする手法である。速度パターン整形にとっても有効な手法であると考えられる。ここでは、ハードディスクで用いられる SMART 制御手法 [47] の考え方を適

用する。車の乗り心地を良くすることを考慮し、評価関数 J は (3.1) 式で示された加速度の時間微分値の二乗にした。ただし a は加速度である。

$$J = \int_0^{t_f} \left(\frac{da}{dt} \right)^2 dt \quad (3.1)$$

車体の速度 v および加速度 a を状態変数とし、状態方程式 $\dot{x} = Ax + Bu$ を (3.2) 式のように書くことができる。

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u \quad (3.2)$$

ここで、最適制御理論を適用して、ハミルトニアン H を作る。(3.3) 式は H の方程式である。ただし、 λ はラグランジュ乗数である。

$$H = \frac{1}{2}u^2 + \lambda^T(Ax + Bu) \quad (3.3)$$

評価関数を最小にする軌道の解は停留条件 $\frac{\delta H}{\delta u} = 0$ を満たす。この場合の停留条件は (3.4) 式で示される。

$$u = -B^T \lambda \quad (3.4)$$

オイラーの正準方程式 $\dot{x} = \frac{\delta H}{\delta \lambda}$ 、 $\dot{\lambda} = -\frac{\delta H}{\delta x}$ をまとめて書くと (3.5) 式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & -BB^T \\ 0 & -A^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \lambda \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

(3.2) 式より、ベクトル x および行列 A 、 B を (3.5) 式に代入すると、(3.6) 式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{a} \\ \dot{\lambda}_1 \\ \dot{\lambda}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ a \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

(3.6) 式の対角成分は全て 0 なので、 v および a の解は (3.7)、(3.8) 式のように表すことができる。ただし、 c_i は定数、 t は時間である。

$$v(t) = c_0 t^3 + c_1 t^2 + c_2 t + c_3 \quad (3.7)$$

$$a(t) = 3c_0 t^2 + 2c_1 t + c_2 \quad (3.8)$$

(3.7)、(3.8) 式に (3.9) 式に示された境界条件を代入すると、解析解が得られ、その解の各係数 c_i は (3.13) 式に示す。

$$\begin{cases} t = 0: & v = v_0, & a = a_0 \\ t = t_f: & v = v_f, & a = a_f \end{cases} \quad (3.9)$$

$$c_0 = \frac{1}{t_f^2}(a_0 + a_f) - \frac{2}{t_f^3}(v_f - v_0) \quad (3.10)$$

$$c_1 = \frac{3}{t_f^2}(v_f - v_0) - \frac{1}{t_f}(2a_0 + a_f) \quad (3.11)$$

$$c_2 = a_0 \quad (3.12)$$

$$c_3 = v_0 \quad (3.13)$$

また (3.8) 式を微分すれば、

$$\alpha(t) = 6c_0t + 2c_1 \quad (3.14)$$

が得られる。このパターンを追従するように制御系を組み、電気自動車の運動制御に適用すれば、乗客の乗り心地向上に貢献できると考えられる。また、この手法の特徴の一つは、解析解が得られるため、制御時に少ない計算量で済む。

3.3 パラメータの決め方

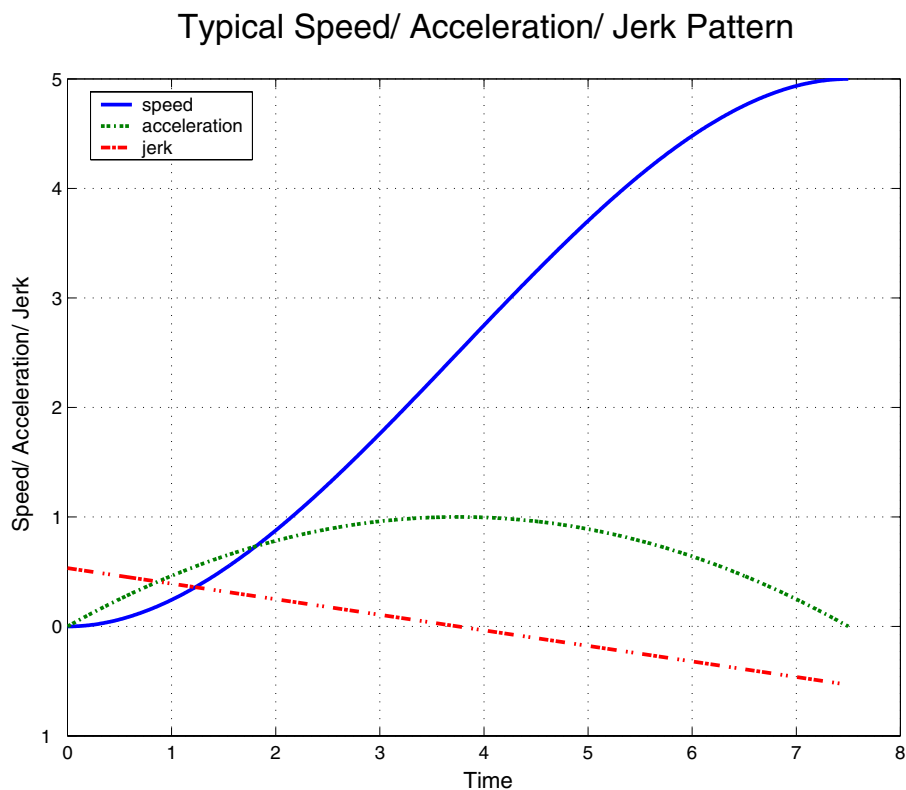


図 3.3: 提案手法によって生成された速度・加速度・ジャークパターンの一例

前節では、最適減速パターンを解析的に求めたが、次に係数 t_f を決める必要がある。 t_f は減速開始から停止までの時間であるので、理想的には短いほど良いが、物理的な制限より設定する必要がある。ここで、ブレーキの場合に限定して初期条件の設定を考える。自動車が任意の初期速度 v_0 から減速し、ある時間 t_f に速度が0になるとする。また、加速度の変化率が制御周期より遅いと仮定し、初期加速度 a_0 および $t = t_f$ のときの加速度は0とする。以上まとめると初期条件は(3.15)式で表される。

$$\begin{cases} t = 0: & v = v_0, & a = 0 \\ t = t_f: & v = v_f, & a = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

(3.15) 式を(3.7)、(3.8)式に代入すると、(3.16)、(3.17)式で表される最適速度パターン、加速度パターンおよびジャークパターンが得られる。図3.3は正規化された最適速度パターン、加速度パターンおよびジャークパターンを示す。

$$v(t) = -\frac{2}{t_f^3}v_\Delta t^3 + \frac{3}{t_f^2}v_\Delta t^2 + v_0 \quad (3.16)$$

$$a(t) = -\frac{6}{t_f^3}v_\Delta t^2 + \frac{6}{t_f^2}v_\Delta t \quad (3.17)$$

$$\alpha(t) = -\frac{12}{t_f^3}v_\Delta t + \frac{6}{t_f^2}v_\Delta \quad (3.18)$$

3.3.1 最大加速度を制限したパターン

加速度はジャークと同様に乗り心地に影響を与えていると発表されている[49]。最大加速度を制限することをパターン設計に組み込むことは乗り心地を向上させると考えられる。

提案手法のパターンにおける最大加速度を求めるには、まず、加速度パターンの停留点を求める。最大加速度を a_{max} とすると、

$$\left. \frac{da}{dt} \right|_{a=a_{max}} = 0 \quad (3.19)$$

である。この条件を(3.18)式に代入すると、 $t = \frac{t_f}{2}$ という解が得られる。次に、(3.18)式を微分してみると、

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{6}{t_f^2}v_\Delta \quad (3.20)$$

となる。 $\frac{d\alpha}{dt}$ は定数であるため、 $a(\frac{t_f}{2})$ は極大値(または極小値)であることが分かる。上述の仮定により、パターンの両端 $a(0)$ と $a(t_f)$ は0であるため、 $a(\frac{t_f}{2})$ は最大加速度(または減速度)である。 $a(\frac{t_f}{2}) = a_{max}$ を(3.17)式に代入すると、

$$a_{max} = \frac{3v_\Delta}{2t_f} \quad (3.21)$$

が得られ、 t_f の解

$$t_f = \frac{3v_\Delta}{2a_{max}} \quad (3.22)$$

が求まる。

3.3.2 最大ジャークを制限したパターン

提案手法を用いてパターンを設計すれば、制御期間の平均ジャークが最小になるが、ジャークの最大絶対値に直接関わらない。しかし、パラメータを設定し、最大ジャークを決めることが可能である。図 3.3 より、最大ジャークは $t = 0$ と $t = t_f$ に発生するので、生成された速度パターンにおける最大ジャークを α_{max} とし、 $t = 0$ また $t = t_f$ を (3.18) 式に代入すれば、

$$|\alpha_{max}| = \frac{6v_0}{t_f^2} \quad (3.23)$$

が得られる。そのとき、 t_f の解は

$$t_f = \frac{6v_\Delta}{\sqrt{|\alpha_{max}|}} \quad (3.24)$$

3.3.3 タイヤ摩擦係数の飽和を考慮したパターン

タイヤの特性図 3.4 を考えると、自動車が出し得る駆動力には限界がある (図 3.4)。その最大駆動力は路面の摩擦係数によって決まる。 F_{dmax} を最大駆動力とれば、ニュートンの運動方程式より、

$$F_{dmax} = Ma_{max} \quad (3.25)$$

ただし、 a_{max} は最大加速度であり、 M は車両質量である。ただし、ここでは、簡略なモデルが使われ、空気抵抗、タイヤの転がり抵抗などは考慮されていない。また、最大駆動力 F_{dmax} は最大路面摩擦係数 μ_{max} と垂直反力 N の積であることから、

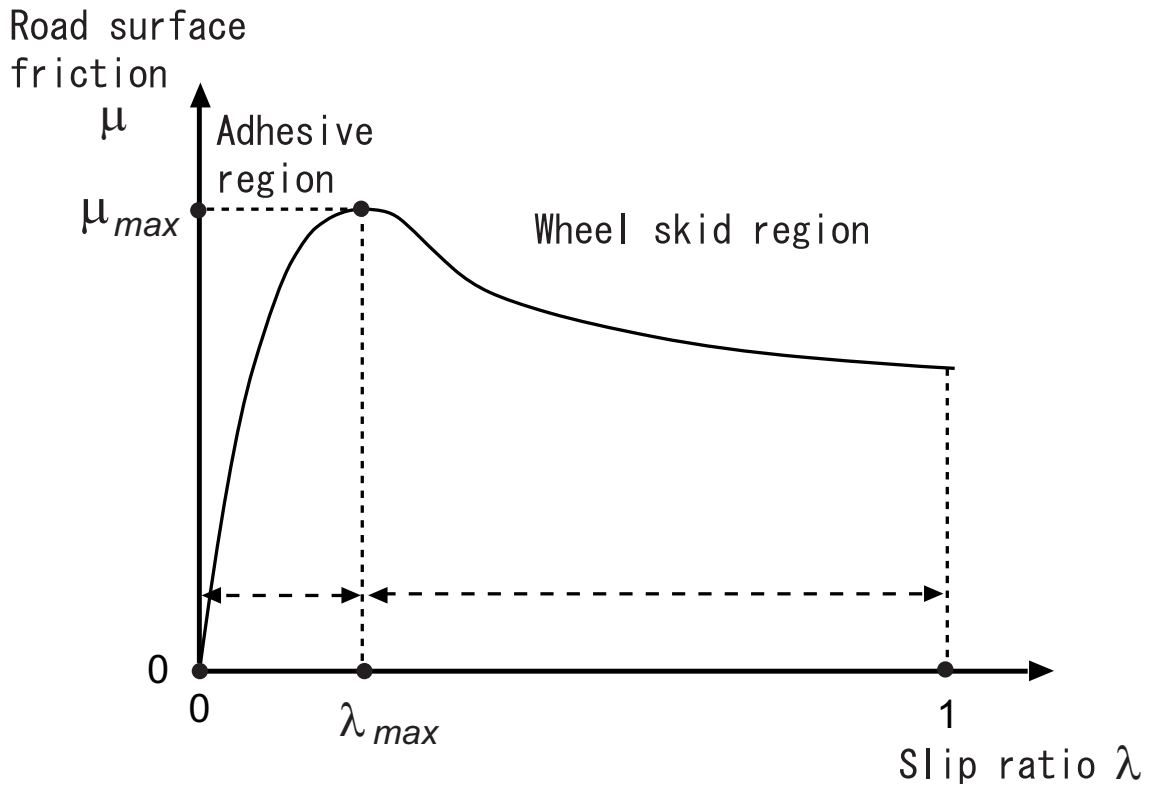
$$F_{dmax} = \mu_{max}N \quad (3.26)$$

となる。

$$N = Mg \quad (3.27)$$

より、(3.26)、(3.27) 式を (3.25) 式に代入すれば

$$a_{max} = \mu_{max}g \quad (3.28)$$

図 3.4: μ - λ 曲線

が得られる。最大加速度と路面最大摩擦係数の関係が表される。ただし、 g は重力加速度である。次に、前節より、 $t = \frac{t_f}{2}$ のとき、加速度が最大であることを利用して、

$$\frac{3v_{\Delta}}{t_f} = \mu_{max}g \quad (3.29)$$

が得られ、 t_f は

$$t_f = \frac{3v_{\Delta}}{2\mu_{max}g} \quad (3.30)$$

になる。このように t_f 設定すれば、車輪は空転領域に入らない。これは車両運動の安定性の向上につながる。

3.4 リアルタイム速度パターン変更

公道で自動車を運転している間、周りの状況の変化に応じてドライバーが指令値を変える必要は絶対に生じる。自動車は自由度が高い反面、外乱も高い。道路の形や質、周りの自動車の挙動、交通量、天気状況などは、運転に影響を与える。そのため、パターンが実

行されている間に指令値が変更される可能性もある。そのとき、一番簡単な対処の仕方は、新たな初期値と指令値を用いて、パターンを再計算することである。しかし、この場合、速度と加速度は連続であっても、ジャークが非連続になる可能性がある。乗り心地の観点から、新しいパターンでジャークが連続になることが望ましい。そのため、非連続的なジャークを避けるパターンを設計する必要がある。

速度パターン変更点において、(3.7)、(3.8)、(3.14) 式を書き直すと、

$$v(\tau) = \left(\frac{1}{\tau_f^2}a'_0 - \frac{2}{\tau_f^3}v'_\Delta\right)\tau^3 + \left(\frac{3}{\tau_f^2}v'_\Delta - \frac{2}{\tau_f}a'_0\right)\tau^2 + a'_0\tau + v'_0 \quad (3.31)$$

$$a(\tau) = \left(\frac{3}{\tau_f^2}a'_0 - \frac{6}{\tau_f^3}v'_\Delta\right)\tau^2 + \left(\frac{6}{\tau_f^2}v'_\Delta - \frac{4}{\tau_f}a'_0\right)\tau + a'_0 \quad (3.32)$$

$$\alpha(\tau) = \left(\frac{6}{\tau_f^2}a'_0 - \frac{12}{\tau_f^3}v'_\Delta\right)\tau + \frac{6}{\tau_f^2}v'_\Delta - \frac{4}{\tau_f}a'_0 \quad (3.33)$$

が得られる。ただし、(3.31)–(3.33) 式の τ は 0 から始まる新しい時間座標であり、 τ_f は新たに計算するパターンの修了時間。 a'_0 、 v'_0 、 v'_Δ はパターン変更点の初期条件および指令値。また、 α'_0 を変更点におけるジャークとすれば、(3.33) 式より、

$$\frac{6}{\tau_f^2}v'_\Delta - \frac{4}{\tau_f}a'_0 = \alpha'_0 \quad (3.34)$$

となる。この式のすべての項に τ_f^2 をかけると、

$$\alpha'_0\tau_f^2 - 4a'_0\tau_f + 6v'_\Delta = 0 \quad (3.35)$$

の τ_f の 2 次方程式が得られる。(3.35) 式を τ_f について解いたら、(3.36) 式が得られ、ジャークが連続であるパターンが得られる。しかし、解の存在について係数を調べる必要がある。

$$\tau_f = \frac{-2a'_0 \pm \sqrt{4a_0'^2 + 6\alpha_0 v'_\Delta}}{\alpha'_0} \quad (3.36)$$

係数 α'_0 について、 $\alpha'_0 < 0$ 、 $\alpha'_0 = 0$ 、 $\alpha'_0 > 0$ 、3 通りの可能性がある。同様に、 a'_0 について、 $a'_0 < 0$ 、 $a'_0 = 0$ 、 $a'_0 > 0$ 、と v'_Δ について、 $v'_\Delta < 0$ 、 $v'_\Delta = 0$ 、 $v'_\Delta > 0$ の場合がある。 a'_0 と α'_0 の各条件の領域を図 3.5 に示す。また $v'_\Delta < 0$ は新しい速度指令値がパターン変更点の速度より低い、 $v'_\Delta = 0$ はその二つの値が等しい、 $v'_\Delta > 0$ は新しい指令値が変更点速度より高いと意味している。それぞれの組合せは合計 27 通りあるが、いくつかの特殊な場合はある。

まず、 $\alpha'_0 = 0$ のとき、(3.35) 式は 2 次方程式から 1 次方程式になり、

$$4a'_0\tau_f - 6v'_\Delta = 0 \quad (3.37)$$

となる。よって、 τ_f は

$$\tau_f = \frac{3v'_\Delta}{2a'_0} \quad (3.38)$$

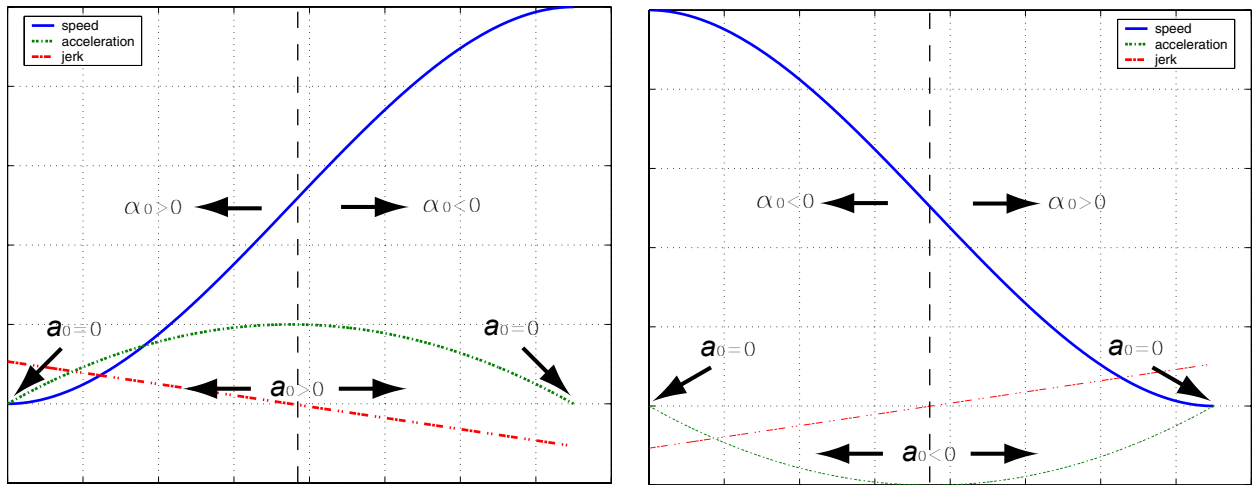


図 3.5: パターン変更点における初期条件の場合分け

となる。この場合、解が存在するための条件は $\tau_f > 0$ であるので、

$$v'_{\Delta} > 0 \quad \text{かつ} \quad a'_0 > 0 \quad (3.39)$$

または

$$v'_{\Delta} < 0 \quad \text{かつ} \quad a'_0 < 0 \quad (3.40)$$

は解が存在する条件となる。

次に、 $a'_0 = 0$ の場合について考えよう。 $a'_0 = 0$ の場合はパターンの両端に生じる。パターンの端にあることは、パターンが修了したことを意味する。提案手法の特徴の一つは端にジャークが0でないことであるので、パターンが修了して一定速度走行へ移行するときでもジャークが不連続という現象が起きる。そのため、 $a'_0 = 0$ の場合に特にジャークが不連続であっても気にする必要はないと思われる。ただし、その瞬間で新しいパターンを設計すると、ジャークの値の正負が違う可能性もあるので、ジャークを考慮した方がよい場合もあると考えられる。 $a'_0 = 0$ の場合において、(3.35)式を書き直すと、

$$\alpha'_0 \tau_f^2 - 6v'_{\Delta} = 0 \quad (3.41)$$

となるので、

$$\tau_f = \sqrt{\frac{6v'_{\Delta}}{\alpha'_0}} \quad (3.42)$$

となる。解が存在する条件は(3.39)、(3.40)式となる。

次は、 $v'_{\Delta} = 0$ の場合について考察しよう。 $v'_{\Delta} = 0$ とは、パターン変更時点の速度を保つということになる。しかし、加速や減速中で、速度を一定に保とうとすると、加速度が

一瞬に 0 にならないといけないので、ジャークのインパルスが発生してしまう。(3.35) 式にこの条件を代入すると、

$$\alpha'_0 \tau_f^2 + 4a'_0 \tau_f = 0 \quad (3.43)$$

になるので、

$$\tau_f = 0 \quad \text{または} \quad \tau_f = -\frac{4a'_0}{\alpha'_0} \quad (3.44)$$

$\tau_f = 0$ は上で述べたジャークのインパルスが生じる場合である。それを避けて、速度に少しオーバーシュートをしながら、ジャークを緩やかに変化させるのは $\tau_f = -\frac{4a'_0}{\alpha'_0}$ である。そのパターンの様子を図 3.6 に示す。この場合、解の存在条件は

$$\alpha'_0 > 0 \quad \text{かつ} \quad a'_0 < 0 \quad (3.45)$$

または

$$\alpha'_0 < 0 \quad \text{かつ} \quad a'_0 > 0 \quad (3.46)$$

ただし、 $a'_0 = 0$ かつ $v'_\Delta = 0$ の場合は、速度が指令値と等しく、加速度も 0 であるため、現

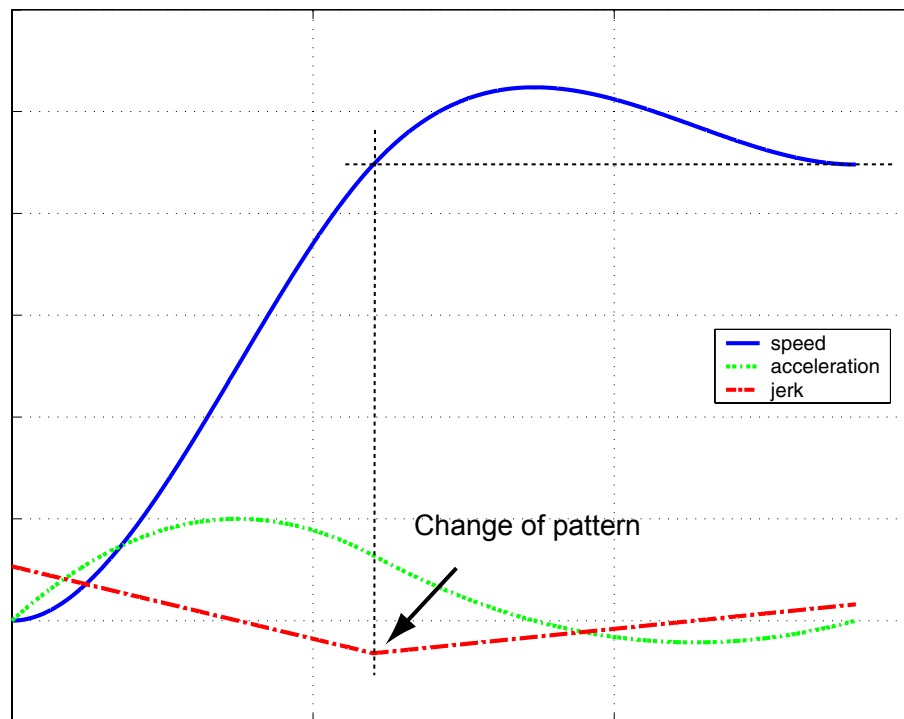


図 3.6: $v'_\Delta = 0$ 、 $a'_0 > 0$ 、 $\alpha'_0 < 0$ の場合のパターン変更

状維持で良いとなる。

$\alpha'_0 \neq 0$ かつ $a'_0 \neq 0$ かつ $v'_\Delta \neq 0$ の場合、(3.36)式を解いて τ_f の解を求めることになる。そのときの解の存在条件は $\tau_f > 0$ と $\tau_f \in R$ であり、(3.47)、(3.48)式として表すことができる。

$$\frac{-2a'_0 \pm \sqrt{4a_0'^2 + 6\alpha_0'v'_\Delta}}{\alpha_0'} > 0 \quad (3.47)$$

$$4a_0'^2 + 6\alpha_0'v'_\Delta > 0 \quad (3.48)$$

まず、(3.47)式の不等式について考察する。 $\alpha'_0 > 0$ かつ $a'_0 > 0$ の場合、

$$-2a'_0 + \sqrt{4a_0'^2 + 6\alpha_0'v'_\Delta} > 0 \quad (3.49)$$

のときのみ、正の τ_f が得られる。従って、

$$|\sqrt{4a_0'^2 + 6\alpha_0'v'_\Delta}| > 2a'_0 \quad (3.50)$$

となり、

$$6\alpha_0'v'_\Delta > 0 \quad (3.51)$$

という条件が得られる。 $\alpha'_0 > 0$ であるから、 $v'_\Delta > 0$ となる。

次に、 $\alpha'_0 > 0$ かつ $a'_0 < 0$ の場合について、

$$-2a'_0 \pm \sqrt{4a_0'^2 + 6\alpha_0'v'_\Delta} > 0 \quad (3.52)$$

であれば、解はあるが、

$$-2a'_0 - \sqrt{4a_0'^2 + 6\alpha_0'v'_\Delta} > 0 \quad (3.53)$$

の方はパターン時間が短いので、この解を選ぶ。そして、解の存在条件は $v'_\Delta < 0$ となる。

以上と同様な方法で解の存在を確かめ、結果をまとめると、初期条件と解の有無は表3.1に示される。ただし、この表では、(3.48)式を考慮していない。

$$a_0'^2 < -\frac{3\alpha_0'v'_\Delta}{2} \quad (3.54)$$

のとき、実数解がない。解がない場合、対策としてまずできるだけ早く加速度を0まで落として(または挙げて)から、新たに速度パターンを計算することができる。そのとき、目標速度に到達するまでの時間が長くなるが、乗り心地を損なうことが防げる。もし、時間短縮の方が大事であれば、直接新しい初期条件を用いてパターンを生成すれば良い。

α'_0	a'_0	v'_Δ	解
$\alpha'_0 > 0$	$a'_0 > 0$	$v'_\Delta > 0$	$\tau_f = \frac{-2a'_0 + \sqrt{4a'^2_0 + 6\alpha_0 v'_\Delta}}{\alpha'_0}$
		$v'_\Delta = 0$	解無し
		$v'_\Delta < 0$	解無し
	$a'_0 = 0$	$v'_\Delta > 0$	$\tau_f = \sqrt{\frac{6v'_\Delta}{\alpha'_0}}$
		$v'_\Delta = 0$	何もしない
		$v'_\Delta < 0$	解無し
	$a'_0 < 0$	$v'_\Delta > 0$	解無し
		$v'_\Delta = 0$	$\tau_f = -\frac{4a'_0}{\alpha'_0}$
		$v'_\Delta < 0$	$\tau_f = \frac{-2a'_0 \pm \sqrt{4a'^2_0 + 6\alpha_0 v'_\Delta}}{\alpha'_0}$
$\alpha'_0 = 0$	$a'_0 > 0$	$v'_\Delta > 0$	$\tau_f = \frac{3v'_\Delta}{2a'_0}$
		$v'_\Delta = 0$	解無し
		$v'_\Delta < 0$	解無し
	$a'_0 = 0$	$v'_\Delta > 0$	普通のパターン設計
		$v'_\Delta = 0$	何もしない
		$v'_\Delta < 0$	普通のパターン設計
	$a'_0 < 0$	$v'_\Delta > 0$	解無し
		$v'_\Delta = 0$	解無し
		$v'_\Delta < 0$	$\tau_f = \frac{3v'_\Delta}{2a'_0}$
$\alpha'_0 < 0$	$a'_0 > 0$	$v'_\Delta > 0$	$\tau_f = \frac{-2a'_0 \pm \sqrt{4a'^2_0 + 6\alpha_0 v'_\Delta}}{\alpha'_0}$
		$v'_\Delta = 0$	$\tau_f = -\frac{4a'_0}{\alpha'_0}$
		$v'_\Delta < 0$	解無し
	$a'_0 = 0$	$v'_\Delta > 0$	解無し
		$v'_\Delta = 0$	何もしない
		$v'_\Delta < 0$	$\tau_f = \sqrt{\frac{6v'_\Delta}{\alpha'_0}}$
	$a'_0 < 0$	$v'_\Delta > 0$	解無し
		$v'_\Delta = 0$	解無し
		$v'_\Delta < 0$	$\tau_f = \frac{-2a'_0 - \sqrt{4a'^2_0 + 6\alpha_0 v'_\Delta}}{\alpha'_0}$

表 3.1: パターン変更時の場合分け

3.5 速度パターンを実現する制御システム

以上で、速度パターンの設計手法について説明した。次は、そのパターンを電気自動車を実現するとき用いる制御系について述べる。

提案手法に従ってパターンを設計すれば、速度パターンだけでなく、加速度パターンも得られる。サーボモータの運動制御では、位置、速度、加速度の各次元に制御ループが組まれることが多い。一般的に、ループが多ければ多いほど制御系の安定性および性能が向上される。提案手法より、速度パターンおよび加速度パターンは得られるが、制御に有効的に使用できる信号は速度のみである。大抵の場合、電気モータにエンコーダが取り付けられており、精度高い速度情報が得られる。しかし、加速度に関しては、特別に付けないといけない。そして、高価なものを使わない限り、ノイズおよび路面勾配などによるバイアスが重大な問題となる。そのため、本研究では、図3.8に示す、加速度フィードフォワードと速度フィードバックからなる制御系を使用する。

図3.8の P と P_n は、それぞれ制御対象プラント（この場合は電気自動車）とノミナルプラントである。また、 Q はフィードバックループの制御器である。ノミナルプラントは図3.7に示す一輪自動車モデルと呼ばれる簡単なモデルを使用する。

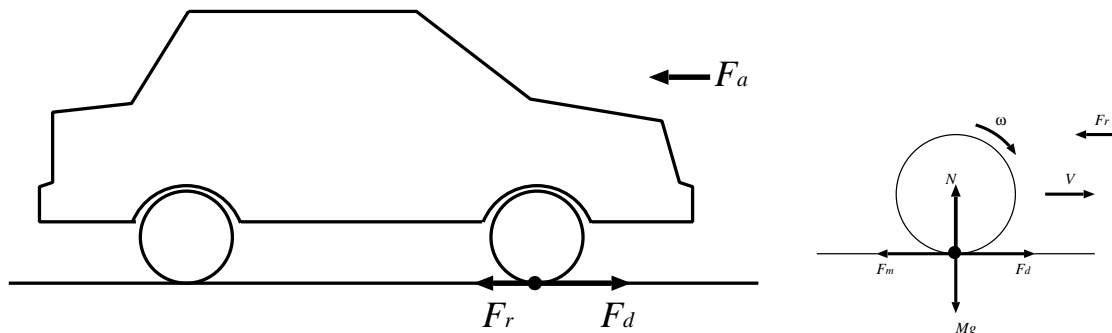


図 3.7: 一輪自動車モデル

このモデルを式で表すと、

$$M\dot{V} = F_d(\lambda) - F_a - F_r \quad (3.55)$$

$$M_w\dot{V}_w = F_m - F_d\lambda - F_r \quad (3.56)$$

になる。ただし、 M は車両の質量、 M_w は車輪の換算質量、 F_d は車体に対する駆動力、 F_m はモータの出力、 F_a は空気抵抗、 F_r は転がり抵抗、 λ はスリップ率である。本来、このモデルは(3.55)、(3.56)式に示されるように、空気抵抗や転がり抵抗などが含まれているが、さらに簡単にするため、これらの項を無視する。以上を踏まえ、 M_n を車両のノミナル

質量とすれば、制御プラントおよびノミナルプラントは次式で表される。

$$P = \frac{1}{M_s} \quad (3.57)$$

$$P_n = \frac{1}{M_n s} \quad (3.58)$$

フィードバック制御器をゲインのみにすると、速度指令 v^* から速度出力 v までの伝達関数は

$$\frac{v}{v^*} = \frac{M_n s + K_p}{M_s + K_p} \quad (3.59)$$

となる。ただし、 K_p はフィードバックゲインである。この制御系は広い周波数領域において、良い応答性を示している。例えば、(3.60)式で表せる速度フィードのみの制御系と比較すると、ゲイン応答および位相応答が非常に優れていることが図 3.9 に示すボーデ線図から分かる。

$$\frac{v}{v^*} = \frac{K_p}{M_s + K_p} \quad (3.60)$$

速度および加速度パターンを入力として、フィードフォワードとフィードバックの組合せからなる制御系は、パターンに対する追従性と外乱に対するロバスト性両方面の要求に答えられると期待される。また図 3.9 の位相応答より、複雑な入力でも良い位相特性を保つことが予想される。本研究では、速度パターンに重みが置かれ、フィードバック制御器を工夫するよりも、速度パターン適用による運動制御の改善を視察したいため、以降のシミュレーションおよび実験では、ゲインのみのフィードバック制御器を使用する。

3.6 まとめ

本章では、最適制御理論に基づいた電気自動車における運動制御のための速度パターン設計法を提案した。まず、電気自動車の特性を考慮した上、乗り心地の向上を速度パターン生成の目的とした。次に、自動車の運転時の状況に対応したパターンのパラメータ設計法および運転状況に応じてパターン変更が必要となるときの対策方法を提案した。最後に、生成されたパターンを実際に適用する際に用いる制御系を提案した。

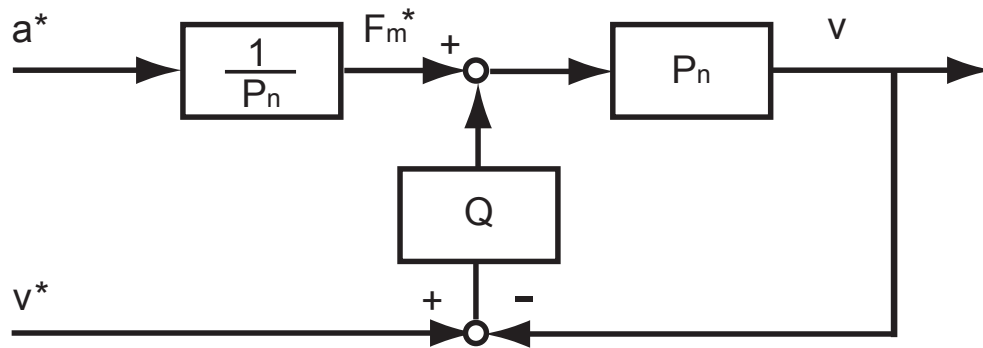


図 3.8: 加速度フィードフォワードと速度フィードバックを用いた制御系のブロック線図

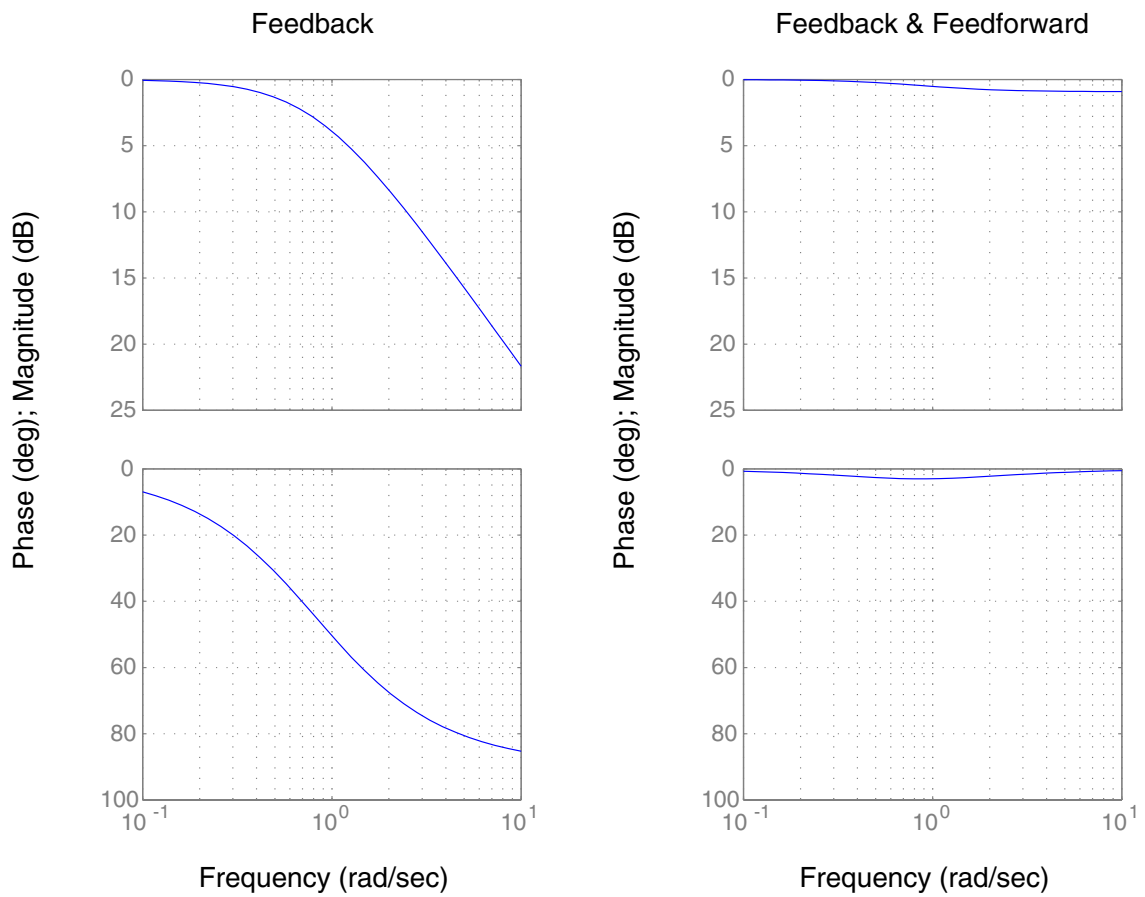


図 3.9: 速度フィードバックのみおよび速度フィードバックと加速度フィードフォワード併用のボーデ線図

第4章 シミュレーションおよび実験による速度パターンの有効性の検証

4.1 シミュレーションによる提案手法の検証

提案手法の有効性を検証するため、MATLAB 上の Simulink 環境でシミュレーションを行った。本節で、そのシミュレーションに使われたモデル、シミュレーションの条件および結果をまとめて説明する。

4.1.1 シミュレーションモデル

シミュレーションに使用した車両モデルは図 4.1 に示す 1 輪自動車モデルである。このモデルでは、できるだけ実際の電気自動車を再現するため、モータには 2 慣性系およびバックラッシュが含まれ、タイヤの動特性モデルには Magic Formula[40] を用いた。

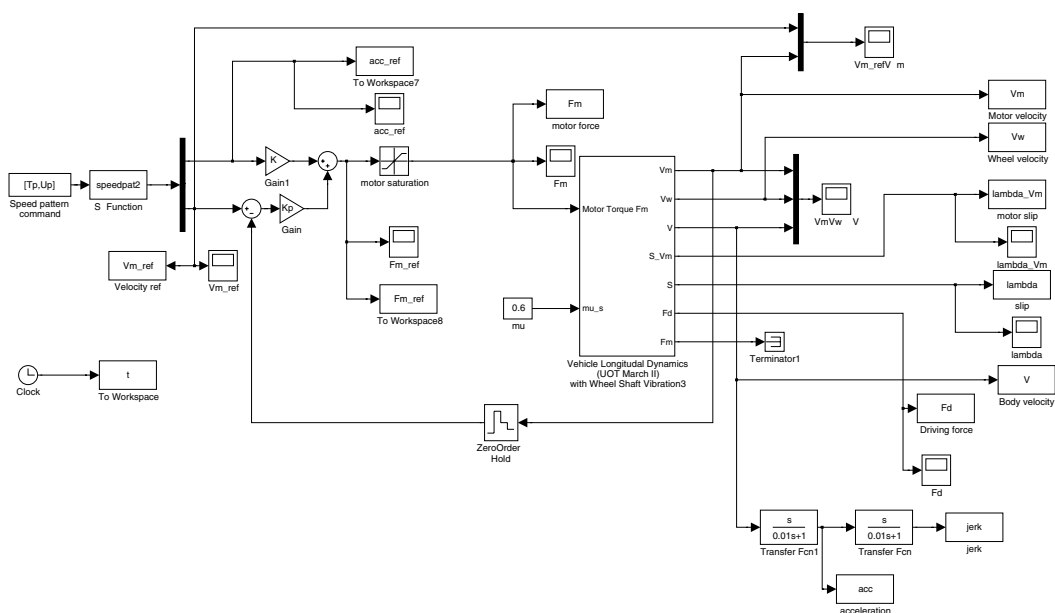


図 4.1: SIMULINK のシミュレーションモデル

4.1.2 シミュレーション結果

まず、制御系の性能を確かめるため、フィードバックゲインを変えながら、速度パターンの追従を調べた。その結果を図 4.2 に示す。同図にフィードバック制御のみの結果を並んでみた。ゲインが時定数 $0.5[s]$ 、 $1.0[s]$ 、 $1.35[s]$ に相当する結果が図 4.2 に示される。結果より、フィードバックのみの場合では、フィードバックゲインが低くなれば、追従性が

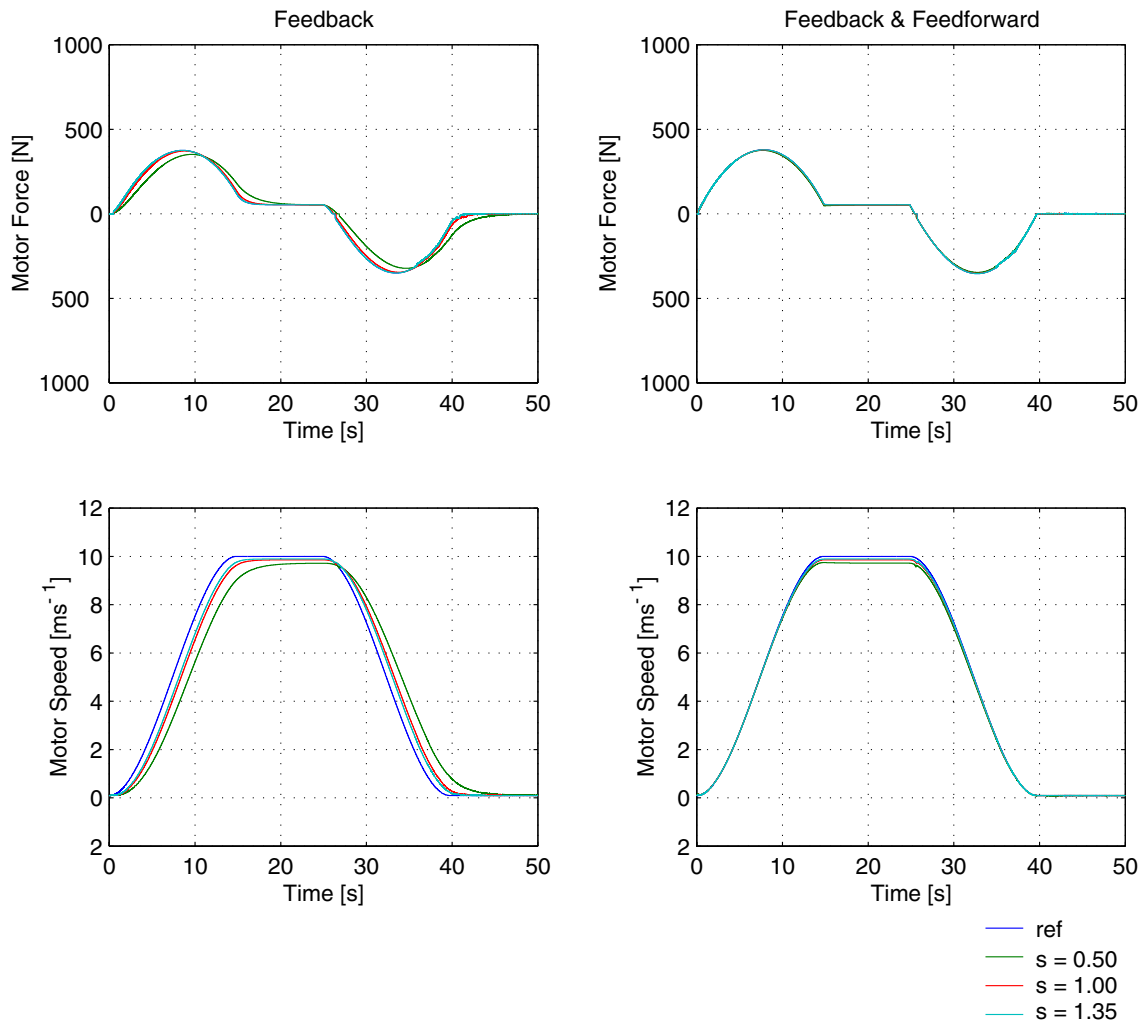


図 4.2: フィードバックのみの制御系とフィードフォワード・フィードバック制御系の比較

悪化するのに対して、フィードフォワードとフィードバックの併用の場合、フィードバックゲインが低くなっても、追従性は著しく悪化することがなく、良い制御性能が見られる。

図 4.3 は速度パターンを用いた運動制御とランプ入力を用いた運動制御 (実質上バンバン制御と同じ) のシミュレーション結果を示す。

速度指令の入力として、停止状態から目標速度まで加速してから、一定速度で走行し、最

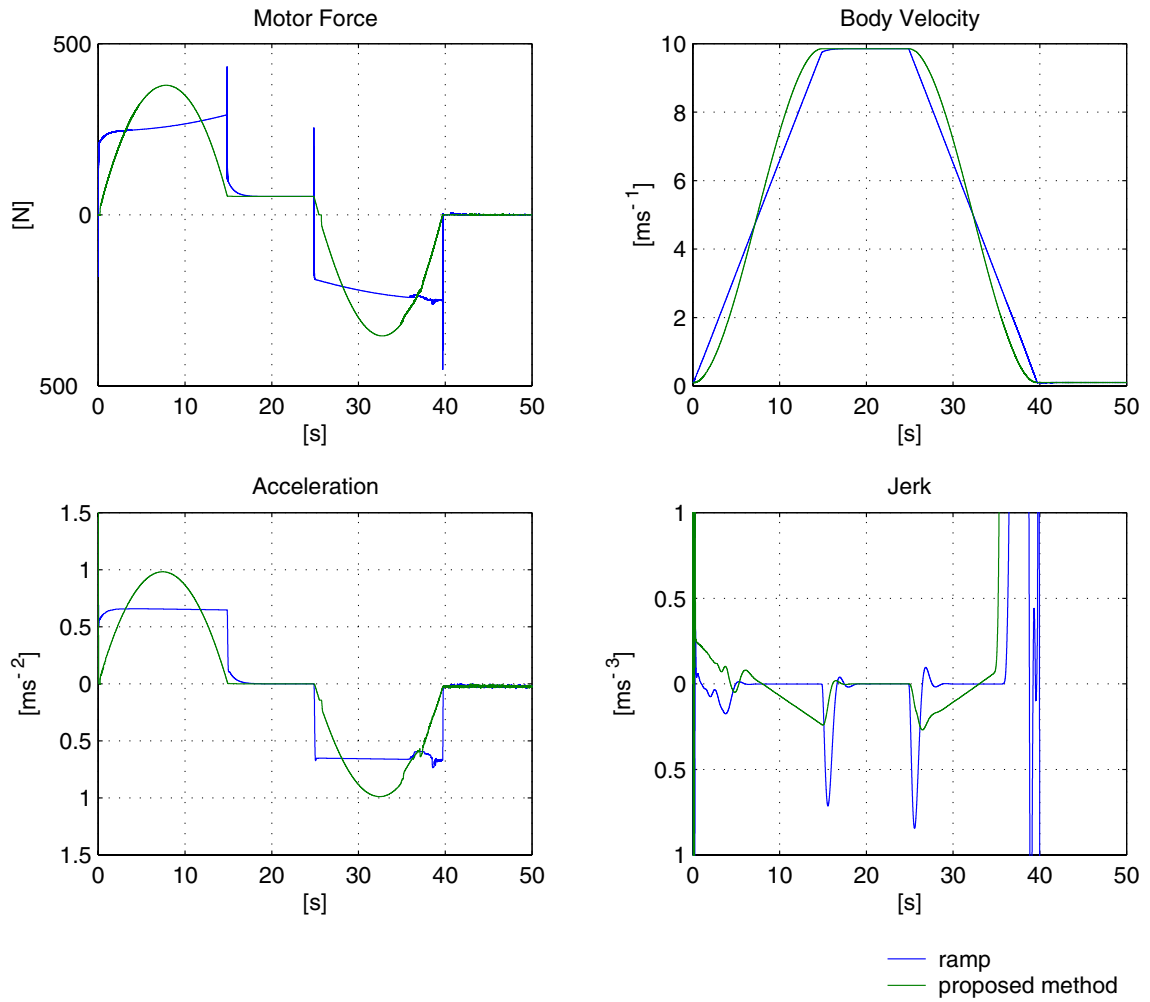


図 4.3: 速度パターンとランプ入力の比較

後に減速して停止状態に戻るといった速度軌道を与えた。結果により、バンバン制御時に加速度がステップ状で変化することに対して、速度パターンを用いた制御のとき、加速度が滑らかに変化することが分かる。また、ジャークを見ると、バンバン制御時に急なスパイクが見られるのに対して、速度パターン制御時にジャークが緩やかに増減し、その絶対値も小さく抑えられている。

4.2 実験車両「東大3月号II」を用いた実験による検証

シミュレーションによって、速度パターンの有効性の初期的な検証ができたため、実験用電気自動車「東大3月号II」を用いて、実走行試験を行った。

4.2.1 実験車両「東大3月号II」について

実験車両「東大3月号II」は3年間をかけて、日産マーチ(K11型)を改造した実験用電気自動車である。4基の電気モータは各車輪に搭載されており、完全に独立に制御できるようになっている。後輪はインホイールモータになっているが、前輪はエンジンルームの空間的な制限により、モータがシャフトによって車輪につながっている。「東大3月号II」はパソコン2台によって制御されている。OSはSlackware Linux 3.5にRTLinux rel. 9Kを取り込んだリアルタイムOSを使用している。その他の諸元は表4.1に示される。

4.2.2 実験手法

この実験車両の実走行時に、いくつか特殊な行動がある。その一つは、モータと車輪が2慣性系となっており、共振および反共振という特徴的な応答を示す。もう一つは、搭載されているモータに遊星歯車の減速器があるため、加速度が反転するときおよび加速度0点付近では、バックラッシュ現象が起きる。また、2慣性系の共振によってバックラッシュが励起されることも考えられる。その振動のFFT周波数解析結果の一例を図4.6に示す。結果より、60[Hz]辺りに共振周波数があることが分かる。

この振動を避けるために、速度パターンをより緩やかにしたり、フィードバックゲインを下げたりしてみた。また、フィードフォワードに使われるプラントの逆モデルの誤差が制御性能に悪影響をもたらす可能性があるため、プラントの簡単なモデル同定も行った。以上の予備実験を完了させてから、「東大3月号II」を栃木県黒磯に位置しているブリヂストン社のテストコースで走行実験を行った。

実験の目的は速度パターンによる乗り心地の改善効果を確認することであった。モータ



図 4.4: 「東大3月号II」の実験風景



図 4.5: 乗り心地評価のためのビデオ撮影

駆動系諸元	
モータ	ブラシレス DC モータ (8 極)
重量	25.3[kg]
定格出力	4[kW](1 hour) / 36[kW](20 sec.) 2.98[HP](1 hour) / 28.3[HP](20 sec.)
最高回転速度	8700[rpm] / 170[km/h]
最大トルク	77[N] at 4400[rpm] 1480[N] (駆動力換算値)
減速比	1/5 (固定)
コントロールユニット仕様	
回路方式	PWM インバータ (第 3 世代 IGBT 素子使用)
冷却方式	強制空冷
質量	約 31[kg]
電源系統仕様	
主電池	Panasonic EC-EV1238
容量	12[V], 38[Ah] (1 個につき)
重量	14.0[kg] (1 個につき)
総電圧	228[V] (12[V] × 19 個)
DC/DC コンバータ	14[V] 出力
最大出力電流	90[A]
冷却方式	強制空冷
計装系諸元	
制御用 CPU	Pentium MMX 233[MHz]
	AMD K6-233[MHz]
OS	Slackware Linux 3.5 / RTLinux rel. 9K
エンコーダパルス数	3600[ppr] (車輪速度測定)
加速度センサ	ANALOG DEVICES ADXL202
ヨーレートセンサ	日立電線株式会社製 光ファイバジャイロ HOFG-CLI(A)

表 4.1: 実験電気自動車“東大 3 月号 II”の諸元

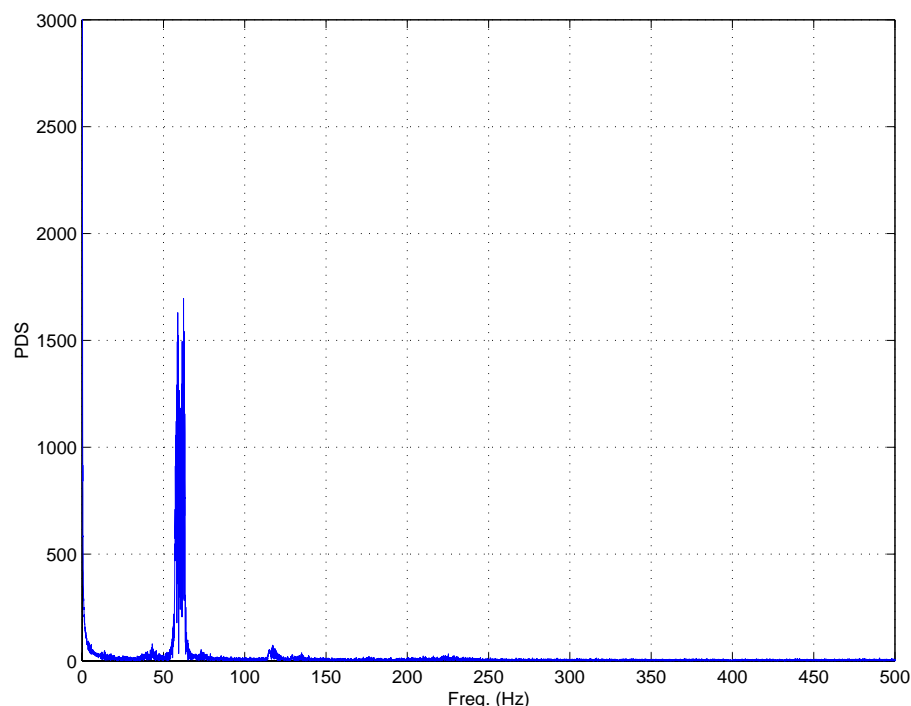


図 4.6: 「東大3月号II」で起きた振動のFFT周波数解析

のエンコーダおよび車体に取り付けた加速度センサより、貴重なデータが取れたが、より分かりやすく評価するため、実験風景のビデオ撮影を試みた。最初は実験中に、動いている車両の外見をビデオで撮ったが、乗り心地の良いときと悪いときの差ははっきり見れなかったため、新しい撮影方法を考えた。外から見たとき差が分からなくても、乗っている人は乗り心地の違いをよく感じられることからヒントを得て、水が入った器を車体に取り付け、水面の変動をビデオカメラで撮るというアイデアが生まれた図4.5。

以上の方法で測定機器のデータを記録しながら、ビデオを撮るという方式の実験を行った。比較対象として、制御開始時の速度と目標速度を直線につなぐランプ制御入力を採用した。制御入力の違い以外、全く同様な制御系を使った。速度パターンのパラメータはいくつか違うものを用意し、同じ制御時間を比較対象のランプ入力に適用し、比較を行った。なお、実験内容は、停止状態からある目標速度まで加速し、その後、しばらく一定速度走行をしてから停止状態に戻るという操作であった。この一連の動作を実現するための指令値はすべて制御用パソコンから出された。

4.2.3 実験結果

図 4.7 はランプ入力と速度パターン指令それぞれのモータトルクおよびモータ速度の指令値と実測値を示す。

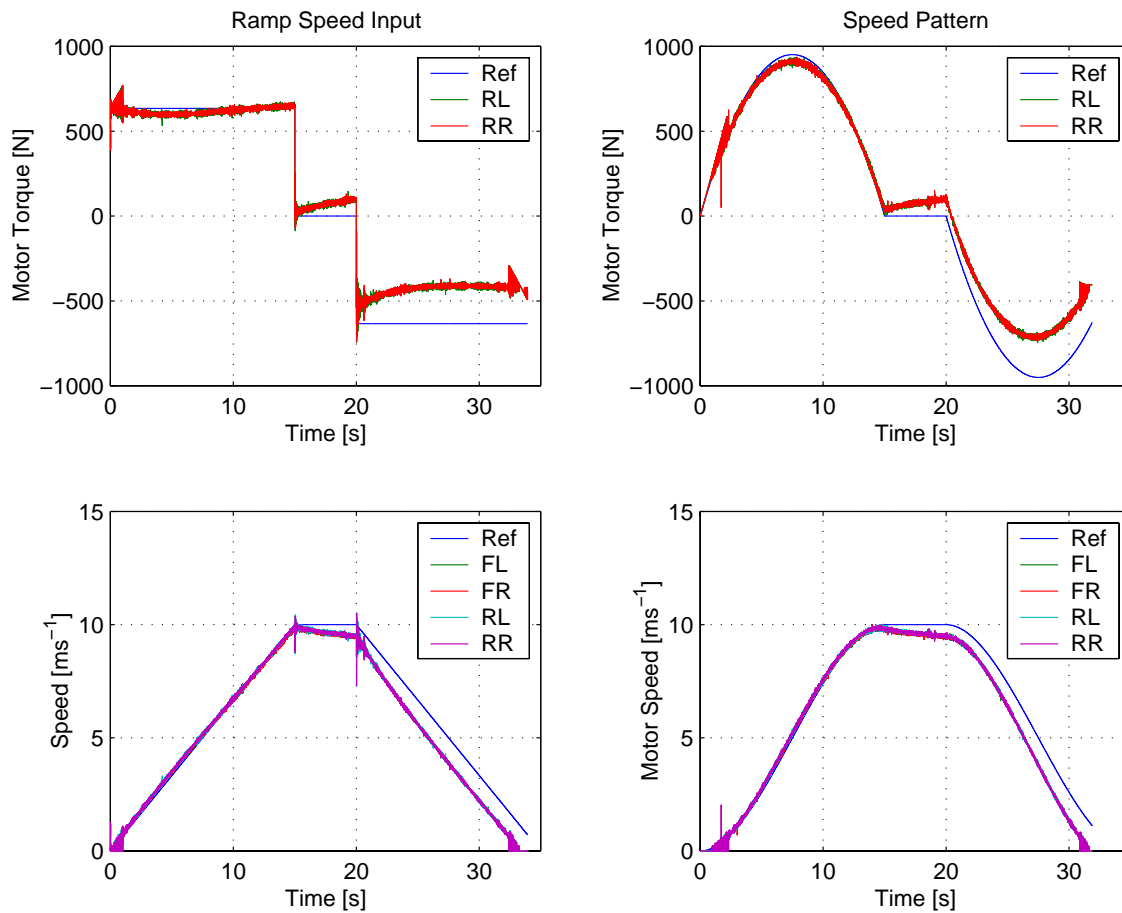


図 4.7: モータトルクおよびモータ速度の指令値と実測値

ランプ入力も速度パターンも、加速時にパターン追従ができたが、一定速度走行時および減速時に追従エラーが生じた。この現象の原因はノミナルプラントの質量の誤差および摩擦抵抗を考慮していないことにあると考えられる。予備実験では、実プラントとノミナルプラントの質量差によって制御性能が落ちたことが確認されたため、本番の実験では、ノミナルプラントの質量を調整してみた。しかし、結果より、ノミナルプラントの質量が過大に推定されたと考えられる。その場合、加速時に余ったトルク出力が摩擦抵抗を打ち消すが、減速時に摩擦が逆に働き、モータは指令値より速く減速してしまう。これがまさに図 4.7 に現れる現象である。

追従は思った通りにうまく行かなかったが、肝心な乗り心地にどのような影響をもたら

したかが興味深いところである。図4.8はランプ入力と加速度パターン実験の速度、加速度およびジャークを示す。

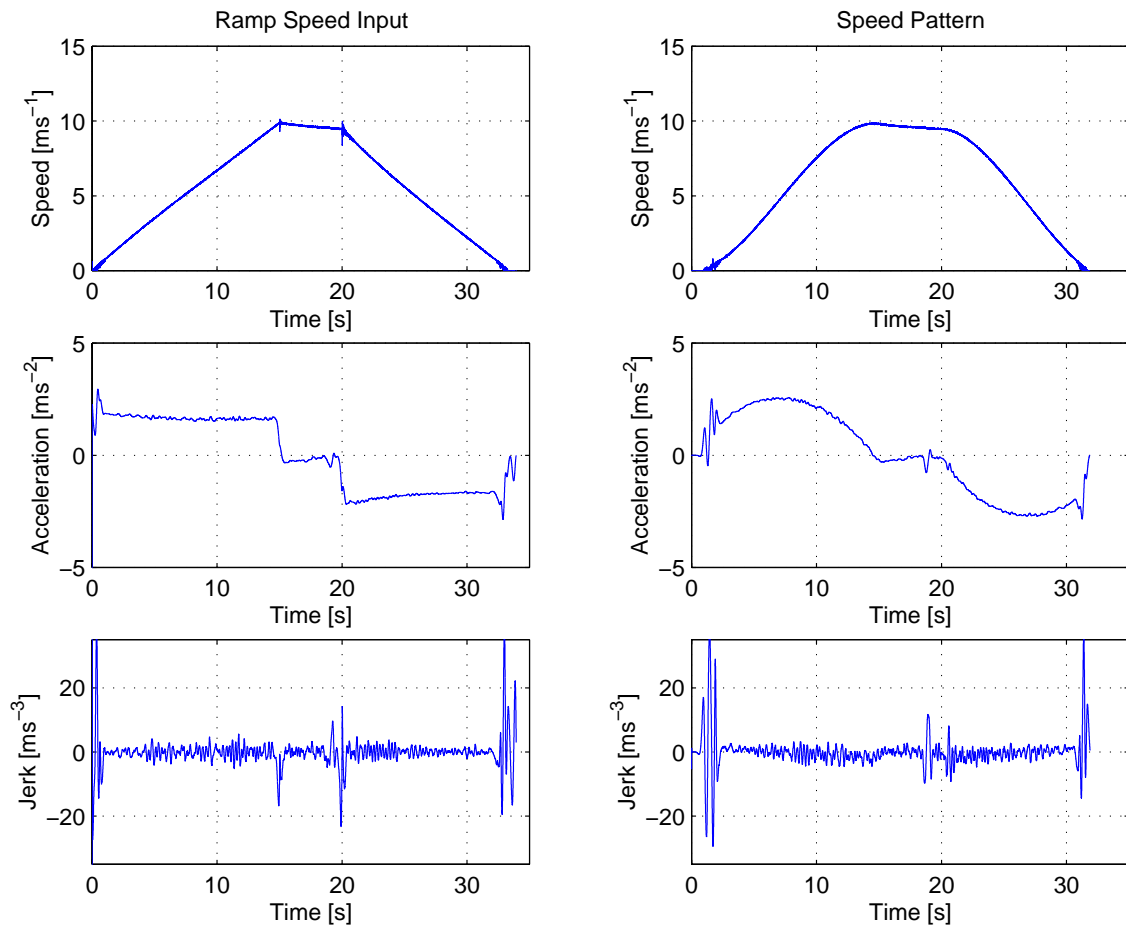


図 4.8: ランプ速度指令および速度パターン適用時の速度・加速度・ジャーク実測値

加速度の実験結果はシミュレーション結果と良く合い、ランプ入力の場合は加速度がステップ状に変化するのに対して、速度パターンの場合、加速度が滑らかに変化する。ジャークの結果をみると、ランプ入力の場合のジャークのスパイクはシミュレーション結果とほぼ一致していることが分かる。なお、ランプ入力と速度パターン両方の結果に起きる 19[s] 辺りのジャークのスパイクは路面の凹凸によるものと考えられる。両方の実験が同じ場所で行われたため、実験車両は同じ路面を通過した。そのため、同じ時点で路面の影響を受けたと考えられる。

図 4.9 は速度パターン実験のモータトルクおよび速度の指令値と実測値を示す。この図より、モータトルクが飽和したことが分かる。モータトルクの飽和によって、速度追従が悪くなったことも結果から分かる。

速度パターンを設計するとき、最大加速度を制限することはできるが、実際に実行す

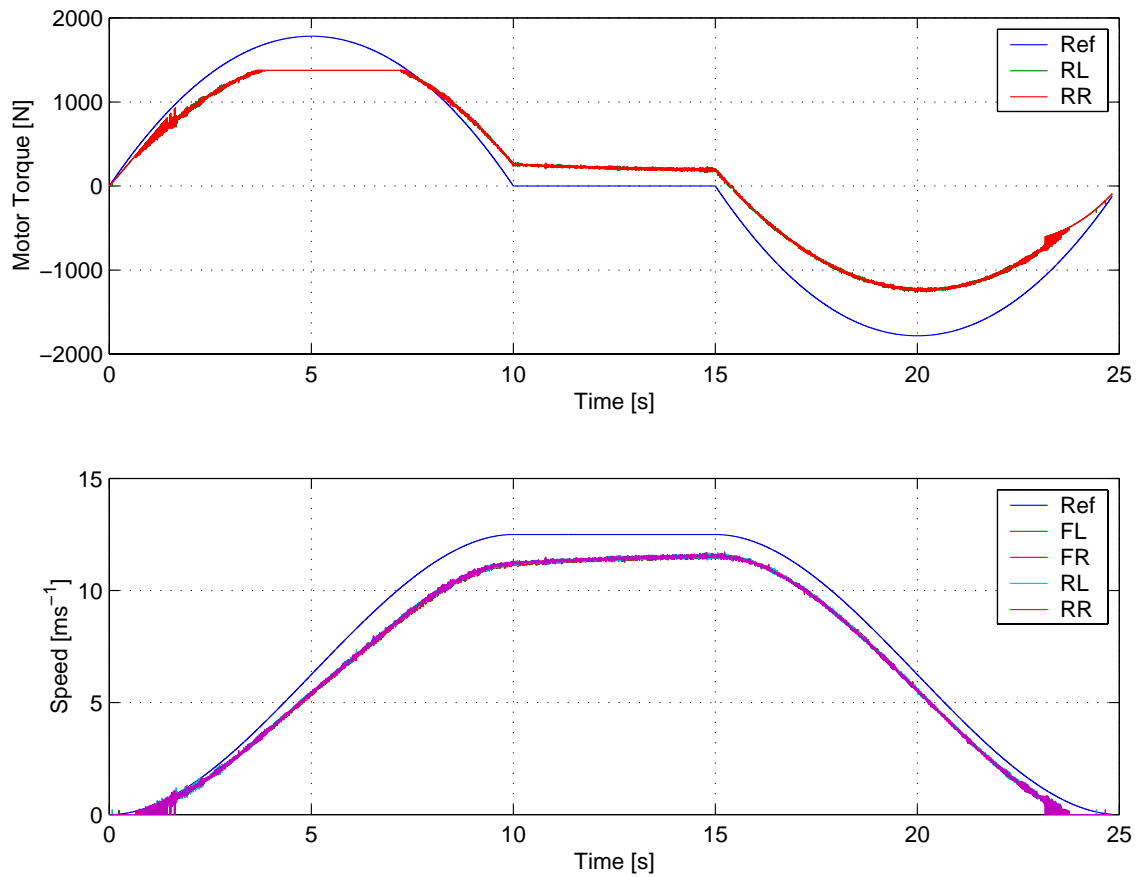


図 4.9: モータ出力飽和による追従誤差

ると、外乱を打ち消すためにフィードバックループが働き、パターン指令値より高い出力をモータに要求する可能性がある。これは、最大加速度を決定するときに、余裕をもって決める必要があると示唆する。

4.3 まとめ

本章では、シミュレーションおよび実験用電気自動車「東大3月号II」を用いた走行実験を通じて提案手法によって生成された速度パターンの有効性を検証した。シミュレーション結果より、提案手法の速度パターンを用いることによって、ジャークが抑えられることが分かった。しかし、同じ時間で目標速度まで加減速しようとする、速度パターンを用いた場合では、最大加速度の絶対値がバンバン制御の場合と比べて、大きくなる。

また、実験結果より、摩擦抵抗の影響は思ったより強く、速度パターンの追従が悪くなった。また、パラメータの選定によって、モータ出力の飽和が起きる場合もあった。しかし、加速度およびジャークの実験結果はシミュレーション結果とほぼ一致したことを確認した。

実験時に、データ収集と同時にビデオ撮影が行われた。映像記録を観察したところ、車体に取り付けられたペットボトルに入った水の水面の動きより、乗り心地は速度パターンの導入によって改善されたことが確認できた。

第5章 シミュレーションおよび実験結果 の検討による速度パターンの改良

5.1 シミュレーションおよび実験結果の検討

実験結果より、純電気ブレーキでEVを止めようとするとき、モータの出力が小さくて、停止時間が長いという問題があった。また、最大出力を一定にし、スリップ現象が起こらない場合には、ジャークを最小にした速度パターンが停止するまでに必要とする時間はバンバン制御よりずっと長いとなってしまう。

図4.9から、モータの出力トルクの飽和より、制御がきちんとはできなかったことが示された。以前提案したジャークを最小にした速度パターンでは、加速度曲線の形を変えることができないため、トルク飽和を避けるため、設計時の最大トルクを小さくするしかなかった。しかし、このようにすると、停止までの時間はさらに伸びてしまう。

以上の問題を解決するために、速度パターンの新しい設計法の提案する。

5.2 ジャークの変化率を最小にしたパターン

マシンツアやエレベータの分野の論文では、振動抑圧のための速度パターン設計に、サイクロイドの曲線が用いられている [44][45]。この手法は確かにバンバン制御より滑らかな運動軌跡を描くことができる。しかし、軌跡が最適である保証はない。せっかく、最適制御理論を用いて運動パターンを設計する手法を開発したので、この手法をさらに生かしたい。以前の手法で設計した速度および加速度パターン(図3.3)を見ると速度パターンのように加速度もオーバーシュートがなく、初期値から目標値まで持って行くように設計できると以上の問題が解決する。これを実現させるには、ジャークの変化率の次元で最適化をすれば良い。

5.2.1 パターンの設計手法

パターンの設計法は基本的にジャークを最小にした速度パターンと同じである [46]。ただし、速度の代わりにジャークを状態方程式に用いる。

$$a(t) = c_0 t^3 + c_1 t^2 + c_2 t + c_3 \quad (5.1)$$

$$\alpha(t) = 3c_0 t^2 + 2c_1 t + c_2 \quad (5.2)$$

そして、(5.1) 式を積分すれば、速度 $v(t)$ の式が得られる。

$$v(t) = \frac{1}{4}c_0 t^4 + \frac{1}{3}c_1 t^3 + \frac{1}{2}c_2 t^2 + c_3 t + c_4 \quad (5.3)$$

各係数 $c_i (i = 0, 1, 2, 3, 4)$ は境界条件の代入によって決まる。ここで、パターン開始時 ($t = 0$) および終了時 ($t = t_f$) の各状態変数を以下のように定義する。

$$\begin{cases} t = 0 & : a = a_0, \quad \alpha = \alpha_0, \quad v = v_0 \\ t = t_f & : a = a_f, \quad \alpha = \alpha_f \end{cases} \quad (5.4)$$

すると、各 c_i が得られ、その値は (5.5) 式に示す。この手法ではパターン終了時の速度 $v(t_f)$ は予め設定できない。 $v(t_f) = v_f$ のように任意の速度にするために、4 次の多項方程式を解かないといけないことになる。

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{1}{t_f^2}(\alpha_0 + \alpha_f) - \frac{2}{t_f^3}(a_f - a_0) \\ c_1 &= \frac{3}{t_f^2}(a_f - a_0) - \frac{1}{t_f}(2\alpha_0 + \alpha_f) \\ c_2 &= \alpha_0 \\ c_3 &= a_0 \\ c_4 &= v_0 \end{aligned} \quad (5.5)$$

5.2.2 スマートブレーキへの適用

ブレーキの場合では、まず、減速度を最大減速度 $-a_{max}$ まで持っていく。開始時の加速度を $0[\text{ms}^{-2}]$ と仮定し、また、滑らかな減速を実現するために、両端のジャークを $0[\text{ms}^{-3}]$ とすると、境界条件が以下ようになる。

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0 \\ \alpha_f &= 0 \\ a_0 &= 0 \\ a_f &= -a_{max} \end{aligned} \quad (5.6)$$

そして、減速度が最大になる時点を $t = T_a$ とすると、

$$T_a = \frac{3a_{max}}{2\alpha_{max}} \quad (5.7)$$

となる。ここで、速度は直接設計できないが、初期速度 v_0 を (5.3) 式に代入すれば、 $t = T_a$ の時点での速度 $v(T_a)$ は

$$v(T_a) = v_0 - \frac{3a_{max}^2}{4\alpha_{max}} \quad (5.8)$$

となる。これは、 $t = T_a$ の時点で、速度が $\frac{3a_{max}^2}{4\alpha_{max}}$ だけ減ったということを意味する。ゼロ速近辺では、滑らかに止めるために、加速度を再び $0[\text{ms}^{-2}]$ まで持っていく必要があるので、今度境界条件は

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0 \\ \alpha_f &= 0 \\ a_f &= -a_{max} \\ a_0 &= 0 \end{aligned} \quad (5.9)$$

になる。加速度が $-a_{max}$ から 0 になるまでの時間は T_c とすれば、

$$\begin{aligned} T_c &= \frac{3a_{max}}{2\alpha_{max}} \\ &= T_a \end{aligned} \quad (5.10)$$

となる。よって、生成された加速度曲線は $0 < t < T_a$ の間の曲線と対称になるので、積分すれば、同じ値になる。それは、速度も $\frac{3a_{max}^2}{4\alpha_{max}}$ だけ減ったということになる。これを利用すれば、最大減速度で減速する時間 T_b が以下のように計算できる。

$$v_0 - 2 \left(\frac{3a_{max}^2}{4\alpha_{max}} \right) = a_{max} T_b \quad (5.11)$$

$$T_b = \frac{v_0}{a_{max}} - \frac{3a_{max}}{2\alpha_{max}} \quad (5.12)$$

上述のような設計によって、減速度を 0 から最大減速度まで持って、最大減速度で減速し、そして、また減速度を最大減速度から 0 まで戻す速度パターンができる。このパターンの速度曲線、加速度曲線およびジャーク曲線を図 5.1 に示す。式で書くと、速度は

$$v(0 \leq t \leq t_a) = \frac{a_{max}}{2T_a^3} t^4 - \frac{a_{max}}{T_a^2} t^3 + v_0 \quad (5.13)$$

$$v(t_a < t < t_b) = v_0 - \frac{3a_{max}^2}{4\alpha_{max}} - a_{max}(t - t_a) \quad (5.14)$$

$$v(t_b \leq t \leq t_c) = v_0 - \frac{3a_{max}^2}{4\alpha_{max}} - a_{max} T_b - \frac{a_{max}}{2T_c^3} (t - t_b)^4 + \frac{a_{max}}{T_c^2} (t - t_b)^3 \quad (5.15)$$

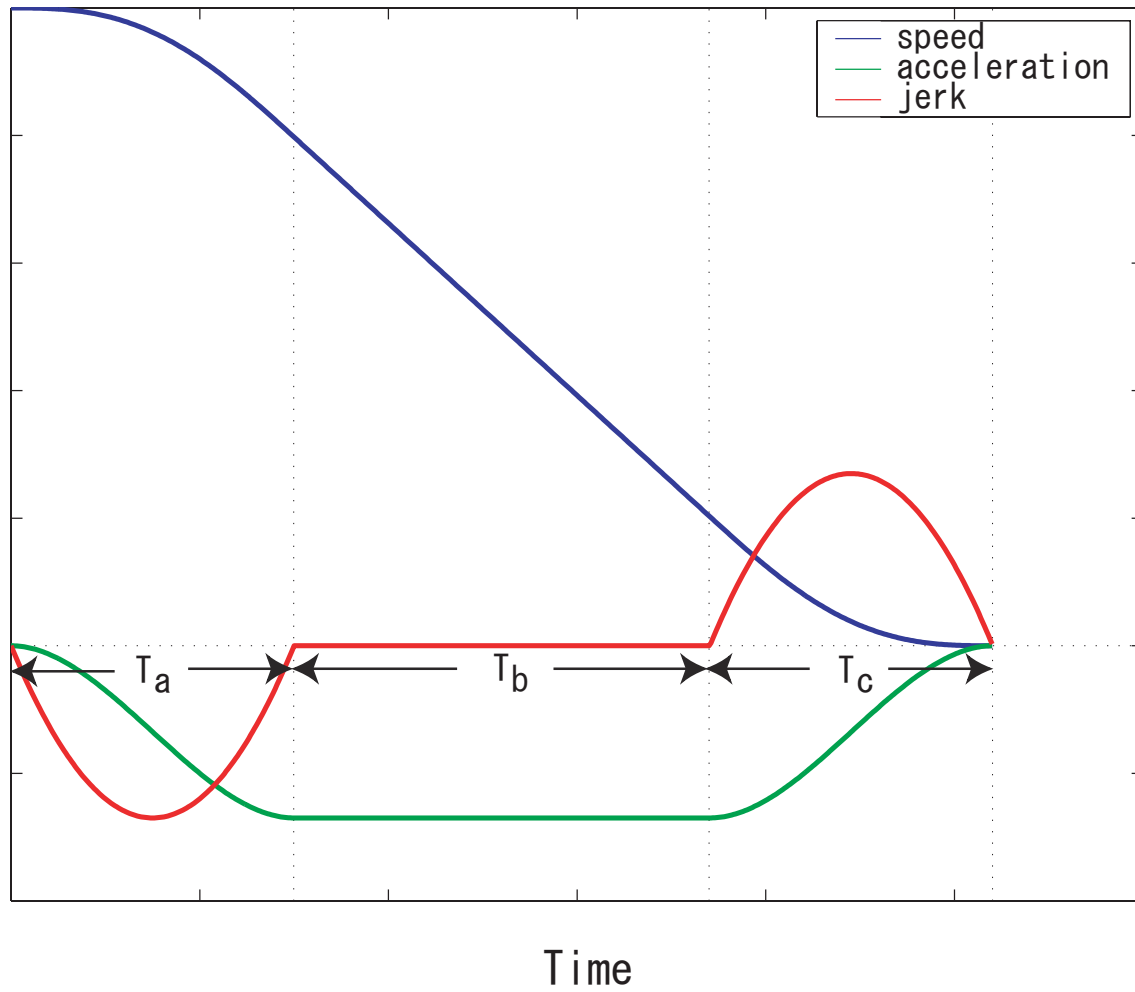


図 5.1: 新しい速度パターンの形

である。加速度は

$$a(0 \leq t \leq t_a) = a_{max} \left[3 \left(\frac{t}{T_a} \right)^2 - 2 \left(\frac{t}{T_a} \right)^3 \right] \quad (5.16)$$

$$a(t_a < t < t_b) = -a_{max} \quad (5.17)$$

$$a(t_b \leq t \leq t_c) = a_{max} \left[2 \left(\frac{t-t_b}{T_c} \right)^3 - 3 \left(\frac{t-t_b}{T_c} \right)^2 \right] \quad (5.18)$$

であり、ジャークは

$$\alpha(0 \leq t \leq t_a) = \frac{6a_{max}}{T_a} \left[\left(\frac{t}{T_a} \right)^2 - \left(\frac{t}{T_a} \right) \right] \quad (5.19)$$

$$\alpha(t_a < t < t_b) = 0 \quad (5.20)$$

$$\alpha(t_b \leq t \leq t_c) = \frac{6a_{max}}{T_c} \left[\left(\frac{t-t_b}{T_c} \right) - \left(\frac{t-t_b}{T_c} \right)^2 \right] \quad (5.21)$$

ただし、 $t_a = T_a$ 、 $t_b = T_a + T_b$ 、 $t_c = T_a + T_b + T_c$ である。

5.3 設計手法の比較

以前提案したジャークを最小にした速度パターンと今回の手法を同じ最大減速度の条件で比較した結果は図 5.2 に示す。図 5.2 より、新しい手法では車がより速く止まることが分かる。新しい手法の一つの良いところは、停止の時点で、速度と加速度だけでなく、ジャークも 0 であること。その反面、全体のジャークが最小になる保証がない。しかし、もう一つの面白いところは、加速度とジャークの最大値が同時に設定できること。

また、従来のガソリン自動車では、ドライバーはアクセル及びブレーキペダルを使用して、加速度の指令値を出す。この新しい手法では、設計時に加速度がメインになるため、速度指令値への変換などが不要になる利点がある。

5.4 まとめ

本章ではシミュレーションおよび実験からの考察を行かして、速度パターンを改良し、ジャークの時間微分を評価関数とした速度パターンの生成法を提案した。この手法を用いれば、以下のメリットがある。

- 制御時間が短縮される
- パターン始点および終点のジャークが 0 になる
- トルクが有効に利用でき、トルクの飽和問題が解決できる

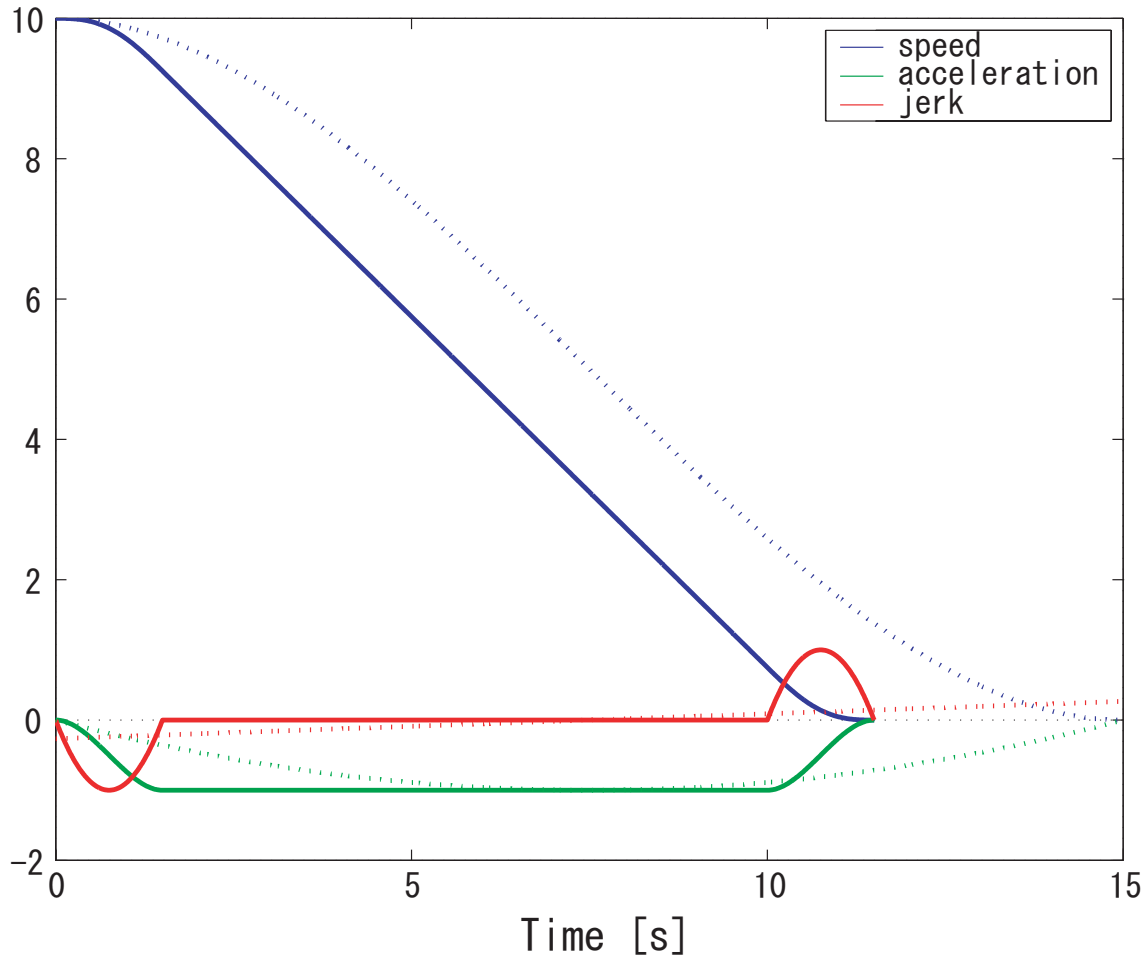


図 5.2: 設計手法の比較 (旧 : 点線、新 : 実線)

第6章 結論

6.1 本論文のまとめ

本論文では、速度パターン生成を導入した電気自動車の新しい運動制御手法を提案した。提案手法では、最適制御理論を利用して、乗り心地向上を目的にジャークを評価関数にした。生成されたパターンは加速度フィードフォワードおよび速度フィードバックコントローラからなる制御系を用いて電気自動車に実現する。

シミュレーションおよび実験結果により、提案手法によって制御された自動車の動きにジャークが抑えられたことが確認された。また、ビデオ撮影により、車体の振動が少なくなったことが分かり、乗り心地は向上されたと思われる。

しかし、以下の問題点の存在も明らかになった。

- ノミナルプラントの質量誤差がパターン追従性に悪い影響をもたらす
- 摩擦抵抗がパターン追従に影響する
- 場合によってトルク飽和が起きる
- フィードバックゲインがある値を越えると振動が起きる

以上の問題点を解決するため、新たなジャークの時間微分を評価関数とした速度パターンの生成法を提案した。

6.2 今後の課題

6.2.1 実験電気自動車「東大3月号II」の改良

現時点では、「東大3月号II」の制御パソコンにインストールされているOSはSlackware 3.5およびRTlinux rel. 9Kである。これらのソフトウェアを「東大3月号II」のデバッグと共に修正してきて、ほぼ実用に問題ないレベルに達しているが、いくつかOSの特性による不具合が残っている。その一つはmathライブラリーが完全でないことである。例えば、

sqrt() という重要な関数が使えないこと。最新番の Slackware はすでに ver. 8 になっており、RTLinux も何回か更新されたので、OS の総括的な入れ換えを行うべきと考えられる。

ハードウェアの方面では、モータに入った遊星歯車の減速ギアは大きなバックラッシュ現象を起こすことは実験より分かった。速度パターンのパラメータおよび制御アルゴリズムを変えることによって、このバックラッシュ問題をある程度改善することはできるが、本研究の本質的なところから外れている。そのため、モータをギアレスのダイレクトドライブ型にする、もしくは、より簡単な構造の歯車を減速ギアにする検討を行う必要があると思われる。

6.2.2 制御アルゴリズムの改善

実験結果により、プラントにおける摩擦抵抗が予想したより強かった。そのため、制御性能を高めるには、ノミナルプラントを次のような粘性抵抗を考慮したモデルにした方がよいと考えられる。

$$P = \frac{1}{Ms + B} \quad (6.1)$$

また、モデルの質量の誤差が速度パターンの追従性を悪化させることが実験より分かった。この問題を解決するには、プラントの同定をより厳密にする必要があると考えられる。

6.2.3 乗り心地についての検討

本論文では、乗り心地を評価するには、加速度およびジャークのデータを分析した他、車体に取り付けた容器の中に入った水の水面の動きを観察するという手法を使用した。しかし、直接に乗り心地を評価するには、実際に何人かの被験者を車に乗せて、パターンの評価をしてもらうことが必要であると考えられる。

謝 辞

My heartfelt thanks to everyone, who in countless ways (recounting of which will take up a volume far larger than this) has made my stay in Japan and Hori laboratory an unforgettable experience.

2003年1月31日 タイチェンファ

参考文献

- [1] Kirsch D.A., *The Electric Vehicle and the Burden of History*, Rutgers University Press, 2000.
- [2] 浜田基彦, 富岡恒憲, “燃料電池車～「第一歩」の意図と意義～”, *日経メカニカル*, No. 580, pp. 63-83, Jan 2003.
- [3] Burns L.D., McCormick J.B., Borroni-Bird C.E., “燃料電池が変える自動車の未来”, *日経サイエンス*, Vol. 33, No. 1, pp. 28-37, Jan 2003.
- [4] 青木慎一, “21世紀のクルマがデビュー～普及にはなお課題”, *日経サイエンス*, Vol. 33, No. 1, pp. 38-41, Jan 2003.
- [5] Stanton N.A., Marsden P., “From Fly-by-Wire to Drive-by-Wire: Safety Implications of Automation in Vehicles”, *Safety Science*, Vol. 24, No. 1, pp. 35-49, 1996.
- [6] Stanton N.A., Young M., McCaulder B., “Drive-by-Wire: The Case of Driver Workload and Reclaiming Control with Adaptive Cruise Control”, *Safety Science*, Vol. 27, No. 2/3, pp. 149-159, 1997.
- [7] 家田仁 (編), 東京大学交通ラボ (著), 「それは足からはじまった～モビリティの科学～」, 技報堂出版, 2000年6月.
- [8] 白戸宏明, “急ブレーキにどれだけ耐えられるか”, *Railway Research Review*, Vol. 52, No. 5, pp. 18-21, May 1995.
- [9] 赤津洋介, “自動車の乗り心地”, *Railway Research Review*, Vol. 52, No. 2, pp. 14-15, Feb 1995.
- [10] 米本正志, “エレベーターの乗り心地”, *Railway Research Review*, Vol. 52, No. 2, pp. 18-19, Feb 1995.

- [11] Väliiviita S., Ovaska S.J., “Delayless Acceleration Measurement Method for Elevator Control”, *IEEE Trans. Ind. Elec.*, Vol. 45, No. 2, pp. 364-366, Apr 1998.
- [12] Kang J.-K., Sul S.-K., “Vertical-Vibration Control of Elevator Using Estimated Car Acceleration Feedback Compensation”, *IEEE Trans. Ind. Elec.*, Vol. 47, No. 1, pp. 91-99, Feb 2000.
- [13] Cho Y.M., Rajamani R., “Identification and experimental validation of a scalable elevator vertical dynamical model”, *Control Engineering Practice*, Vol. 9, No. 2, pp. 181-187, Feb 2001.
- [14] 日本機械学会編, 「鉄道車両のダイナミクス～最新の台車テクノロジー～」, 電気車研究会, 1996年12月.
- [15] 安信誠二, 河野克巳, 宮本捷二, 能見 誠, 関野真一, “予見 Fuzzy 制御方式の開発と列車自動運転への適用”, 第 20 回鉄道サイバネ, pp. 267-271, 1983.
- [16] 藤原純一, 俵谷忠浩, 関野真一, 栗原四郎, 清水朝行, 安信誠二, “予見 Fuzzy 制御方式の開発と列車自動運転への適用”, 第 20 回鉄道サイバネ, pp. 271-276, 1983.
- [17] Howlett P.G., Pudney P.J., *Energy-Efficient Train Control (Advances in Industrial Control)*, Springer-Verlag London, 1995.
- [18] Khmelnitsky E., “On an Optimal Control Problem of Train Operation”, *IEEE Trans. Auto. Cont.*, Vol. 45, No. 7, pp. 1257-1266, Jul 2000.
- [19] 保川忍, 藤田信一郎, “運転時間の簡略計算法を用いた新幹線各駅停車列車省エネルギー運転制御システムの開発”, 電気学会論文誌 D, Vol. 107, No. 5, pp. 665-672, 1987.
- [20] 保川忍, “新幹線通過列車の省エネルギー運転法に関する一検討”, 電気学会論文誌 D, Vol. 108, No. 8, pp. 741-748, 1988.
- [21] 木村彰, “電気車のための加速度変化率を制限したロバスト非線形速度制御”, 電気学会論文誌 D, Vol. 122, No. 8, pp. 807-815, 2002.
- [22] 木村彰, “時刻-位置パターンを用いた電気車に「おける定時運転制御の提案”, 電気学会論文誌 D, Vol. 119, No. 7, pp. 942-949, 1999.
- [23] 木村彰, “電気車の定位置停止制御システムのための加速度変化率を制限した非線形速度制御”, 電気学会論文誌 D, Vol. 120, No. 12, pp. 1484-1491, 2000.

- [24] 曾根悟, “電力回生車の最適運転法～その1「最適」の内容”, 平成13年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol. 3, pp. 1281-1284, 2001.
- [25] 鈴木高志, 古関隆章, 曾根悟, “純電気ブレーキを前提とした定電力ブレーキパターンによる簡易型 TASC”, 平成13年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol. 3, pp. 1285-1288, 2001.
- [26] 古関隆章, 鈴木高志, “電気ブレーキ有効活用検討のための動的計画法による列車運転曲線最適化の提案”, 平成13年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol. 3, pp. 1289-1292, 2001.
- [27] Swaroop D., Hedrick J.K., Choi S.B., “Direct Adaptive Longitudinal Control of Vehicle Platoons”, *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. 50, No. 1, pp. 150-161, Jan 2001.
- [28] Zhang Y., Kosmatopoulos E.B., Ioannou P.A., Chien C.C., “Autonomous Intelligent Cruise Control Using Front and Back Information for Tight Vehicle Following Maneuvers”, *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. 48, No. 1, pp. 319-328, Jan 1999.
- [29] No T.S., Chong K.-T., Roh D.-H., “A Lyapunov Function Approach to Longitudinal Control of Vehicles in a Platoon”, *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. 50, No. 1, pp. 116-124, Jan 2001.
- [30] Kehtarnavaz N., Griswold N., Miller K., Lescoe P., “A Transportable Neural-Network Approach to Autonomous Vehicle Following”, *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. 47, No. 2, pp. 694-702, May 1999.
- [31] Fritz H., “Neural Speed Control for Autonomous Road Vehicles”, *Control Engineering Practice*, Vol. 4, No. 4, pp. 507-512, Apr 1996.
- [32] Shladover S.E., Desoer C.A., Hedrick J.K., Tomizuka M., Walrand J., Zhang W.-B., McMahan D.H., Peng H., Sheikholeslam S., McKeown N., “Automatic Vehicle Control Developments in the PATH Program”, *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. 40, No. 1, pp. 114-130, Feb 1991.
- [33] 鶴岡慶雅, 豊田靖, 堀洋一, “電気自動車のトラクションコントロールに関する基礎研究”, 電気学会論文誌 D, Vol. 118, No. 1, pp. 45-50, 1998.
- [34] 堀洋一, 大西公平, 『応用制御工学』, 丸善, 1998.
- [35] Stengel R.F., *Optimal Control And Estimation*, Dover Publications, New York, 1994.

- [36] Erkorkmaz K., Altintas Y., “High Speed CNC System Design. Part I: Jerk Limited Trajectory Generation and Quintic Spline Interpolation”, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, No. 9, pp. 1323-1345, 2001.
- [37] Rogozin V., Edan Y., Flash T., “A Real-Time Trajectory Modification Algorithm”, *Robotica*, Vol. 19, No. 4, pp. 395-405, 2001.
- [38] Ge Q.J., Srinivasan L., Rastegar J., “Low-Harmonic Rational Bézier Curves for Trajectory Generation of High-Speed Machinery”, *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 14, No. 3, pp. 251-271, 1997.
- [39] 坂井真一郎, 佐渡秀夫, 堀洋一, “電気自動車における車体速度情報不要の新しいタイヤ空転検出法”, *電気学会論文誌 D*, Vol. 120, No. 2, pp. 281-287, 2000.
- [40] Bakker E., Nyborg L., Pacejka H.B., “Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies”, *SAE Technical Paper*, No. 870421, 1987.
- [41] 安部正人, 『自動車運動と制御』, 山海堂, 1992.
- [42] 大埜健, Tai Chien Hwa, 堀洋一, “電気自動車におけるドライビングスティフネスの変化を考慮した路面 μ 推定”, 平成 14 年電気学会全国大会講演論文集, Vol. 4, No. 4-216, pp. 348-349, 2002.
- [43] 山崎俊一, 藤川達夫, 山口泉, “タイヤの制動・駆動力特性に関する研究”, *自動車技術会論文集*, Vol. 23, No. 2, pp. 97-102, 1992.
- [44] Cheng C.-C., Chen C.-Y., “A PID approach to suppressing stick-slip in the positioning of transmission mechanisms”, *Control Engineering Practice*, Vol. 6, No. 4, pp. 471-479, 1998.
- [45] 渡辺英紀, 蒲原捷行, “高速エレベータの速度制御と群管理”, *システムと制御*, Vol. 22, No. 6, pp. 316-323, 1978.
- [46] 戴建華, 坂井真一郎, 堀洋一, “速度パターン整形を導入した電気自動車の新しい運動制御法の提案”, 平成 14 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol. 3, pp. 1289-1292, 2002.
- [47] Mizoshita Y., Hasegawa S., Takaishi K., “Vibration Minimized Access Control For Disk Drives”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, No. 3, pp. 1793-1798, 1996.

-
- [48] Kovudhikulrungsri L., Koseki T., “Precise Speed and Torque Control for AC Traction Pure Electric Braking System in Low Speed Range”, 電気学会論文誌 D, Vol. 122, No. 11, pp. 1027-1033, 2002.
- [49] 王鋒, 佐川貢一, 石原正, 猪岡光, “乗り心地向上を目的とする自動車運転支援システム”, 電気学会論文誌 D, Vol. 122, No. 7, pp. 730-735, 2002.
- [50] Leonhard W., *Control of Electrical Drives*, Springer, 1996.
- [51] Åström K.J., Wittenmark B., *Adaptive Control Second Edition*, Addison-Wesley, 1995.

発表文献

- [1] Tai Chien Hwa, 内田利之, 堀洋一, “電気自動車におけるモータトルクと加速度センサを用いた車体の速度推定”, 電気学会産業計測制御研究会資料, IIC-01-7, pp. 37-42, 2001.
- [2] 戴建華, 岡野隆宏, 井上友子, 坂井真一郎, 内田利之, 堀洋一, “電気自動車ならではの運動制御の可能性 ~ 「東大三月号 II」の走行試験報告 ~”, 電気学会自動車研究会資料, VT-02-9, 2002.
- [3] 戴建華, 坂井真一郎, 堀洋一, “速度パターン整形を導入した電気自動車の新しい運動制御法の提案”, 電気学会産業応用部門大会, Vol. 3, pp. 1289-1292, 2002.
- [4] 戴建華, 張炳勳, “山川地熱発電所見学記 ~ 鹿児島で出会った自然エネルギーたち ~”, 電気学会誌, Vol. 123, No. 2, pp. 108-111, 2003.
- [5] Tai Chien Hwa, Yoichi Hori, “Novel Method of Motion Control for Electrical Vehicles Utilizing Speed Pattern For Improvement of Ride Comfort”, *4th IPEMC Xi'an*, 2003. (発表予定)
- [6] Shin-ichiro Sakai, Takahiro Okano, Tai Chien Hwa, Toshiyuki Uchida and Yoichi Hori, “Experimental Studies on Vehicle Motion Stabilization with 4 Wheel Motored EV”, *Proc. EVS 18 Berlin*, 2001.
- [7] Shin-ichiro Sakai, Takahiro Okano, Tai Chien Hwa, Toshiyuki Uchida and Yoichi Hori, “4 Wheel Motored Vehicle “The UOT Electric MarchII” -Experimental EV for Novel Motion Control Studies-”, *Proc. JTC2001 Tokyo*, 2001.
- [8] 坂井真一郎, 岡野隆宏, 戴建華, 内田利之, 堀洋一 “完全独立駆動 EV 東大三月号 II -その概要と実験報告-”, 電気学会産業応用部門大会, Vol. 2, pp. 795-796, 2001.
- [9] 大埜健, Tai Chien Hwa, 堀洋一, “電気自動車におけるドライビングスティフネスの変化を考慮した路面 μ 推定”, 年電気学会全国大会講演論文集, Vol. 4, pp. 348-349, 2002.

- [10] Takahiro Okano, Tai Chien Hwa, Tomoko Inoue, Toshiyuki, Shin-ichiro Sakai and Yoichi Hori, "Vehicle Stability Improvement Based on MFC Independently Installed on 4Wheels -Basic Experiments using 'UOT Electric MarchII' ", *Proc. PCC-Osaka 2002*, Vol. 2, pp. 582-587, 2002.