

- 卒業論文 -

電気自動車のためのドライバ指令変更を
考慮したリアルタイム速度パターン生成法

平成16年2月12日提出

指導教官: 堀 洋一 教授

東京大学工学部電気工学科

20333 齊藤 知行

内容梗概

電気自動車は優れた制御性を持つ。これはエンジンより 100 倍近く速いトルク応答性を持つ電気モータを使用することによる。本論文では、この利点を活かして速度パターンを適用した電気自動車の運動制御を行い、滑らかな走行を実現することで内燃機関車と乗り心地の面で差別化を図る。乗り心地を向上するため、自動車の走行特性に即した新しい速度パターン生成法を提案する。生成される速度・加速度・ジャークパターンは時間を変数とした多項式で表される。3つのパラメータを自由にかつ別々に決定できることにより、乗り心地を向上しドライバの意図に沿った自由度の高いパターンが生成されることを示す。つづいて実際に電気自動車を速度パターンを用いて運動制御し、その有効性を実証する。

目次

| | | |
|-------|------------------------------------|----|
| 第1章 | 序論 | 3 |
| 1.1 | はじめに | 3 |
| 1.2 | 研究背景と目的 | 3 |
| 第2章 | 乗り心地と速度パターン | 5 |
| 2.1 | 乗物の乗り心地と定量的評価 | 5 |
| 2.2 | 速度パターンを適用した乗物の運動制御 | 5 |
| 第3章 | 電気自動車の運動制御における速度パターンの適用と乗り心地の向上 | 7 |
| 3.1 | 自動車走行における乗り心地 | 7 |
| 3.2 | 電気自動車における速度パターンの適用 | 7 |
| 3.3 | スムーズな走行 | 9 |
| 3.4 | ドライバの意思推定 | 9 |
| 第4章 | 電気自動車のための速度パターン生成法 | 10 |
| 4.1 | 速度パターンの変更とリアルタイム生成 | 10 |
| 4.2 | 最適制御理論を用いた速度パターン生成法とその問題点 | 10 |
| 4.3 | リアルタイム変更を前提とした新しい速度パターン生成法 | 12 |
| 4.3.1 | ドライバによる指令 | 12 |
| 4.3.2 | 速度パターン終了時刻 t_f によらない新しい速度パターン生成法 | 13 |
| 4.3.3 | 加速度・ジャークの最大値に到達しない場合 | 14 |
| 4.4 | パラメータの決定 | 15 |
| 第5章 | 速度パターンを適用した電気自動車の運動制御実験 | 17 |
| 5.1 | 速度パターンを実現するための制御システム | 17 |
| 5.2 | 東大三月号IIによる実験 | 18 |
| 5.2.1 | 車両諸元等 | 18 |
| 5.2.2 | 実験手法 | 18 |
| 5.2.3 | 実験結果 | 18 |
| 第6章 | 実験結果の検討 | 21 |
| 6.1 | 速度パターンを実現する運動制御 | 21 |
| 6.2 | 速度パターンによる乗り心地の向上 | 22 |
| 第7章 | 結論と今後の課題 | 23 |
| 7.1 | まとめ | 23 |
| 7.2 | 今後の課題 | 23 |

| | | |
|-------|--------------------------------|----|
| 7.2.1 | 低速時における制御 | 23 |
| 7.2.2 | ドライバの意図に沿ったパラメータの決定法 | 24 |
| 7.2.3 | 乗り心地の評価 | 24 |
| 参考文献 | | 26 |

第1章 序論

1.1 はじめに

近年、環境に対する一般の人々の意識は非常に高まっている。公害のみならず、動植物などの自然保護、公共事業などによる環境破壊、人類に直接影響を与える大気汚染や温室効果・酸性雨など、地球環境問題についての問題はメディアにも大きく取り上げられ、関心も大きい。自動車における環境問題についても、内燃機関車の排出する排気ガスによる大気汚染や温室効果が課題となっており、排気ガス削減に向けて国際会議での議論や各国での取り組みも進められている。

純電気自動車やハイブリッド電気自動車は、一般的に地球環境問題の有力な解決策の一つという観点から注目を集めている。従来の内燃機関車に比べて環境に対して優しいという点も電気自動車の大きなメリットである。しかし、電気自動車はエネルギー効率の面でも制御性の面でも内燃機関車を大きく上回る利点がある。

現代社会において、電車や自動車、バス、エレベータ、飛行機などの乗物は必要不可欠である。しかし、人間生活を快適に過ごす上で、これら乗物は単なる移動手段としてだけではなく、その速度や安全性、快適性も求められる。乗物の評価をする上で、乗り心地を考慮に入れることは不可欠である。

1.2 研究背景と目的

電気自動車はエレベータや電車と同様に電気モータによって駆動される。電気モータの特長として

1. トルク応答が早く、正確に把握できる。
2. モデル化しやすい
3. 分散配置が可能

などがあげられる。電気自動車は電気モータを使用するため、速度制御に適している。速度パターンの生成法はこれらの電気モータの特性を活かした手法であると言える。

電気自動車の高い制御性を活かすことによって、従来の内燃機関車では考えられなかった高度な運動制御が可能になる。速度パターンを用いることによる運動制御 [1] や、4輪すべてのタイヤにモータを組み込むことによる制駆動力配分法 [2]、4輪独立の増粘着制御 [3] など、電気自動車の利点を活かした様々な運動制御手法が試みられている。

本論文では、電気自動車のための速度パターン生成法 [1] の問題点を解決するために、新しい自由度の高い生成法を提案する。提案手法を用いて生成された速度パターンを電気自動車に適用することによって、自動車の全走行区間においてスムーズな走行の実現を目指

し、通常時や非常時における乗り心地の向上を図った。また、実際に研究室で所有する純電気自動車 ”東大三月号 II” (図 1.1) に速度パターンを適用して運動制御を行い、乗り心地が向上したことを実証する。

そもそも乗り心地という言葉は曖昧で多義的な概念である。車両の走行に伴って生じる振動や加速度に起因する感覚を指すのが普通であるが、人間の感覚をどのように定量化して評価するかという大きな問題もある [4]。



図 1.1: Photo of UOT March II

第2章 乗り心地と速度パターン

2.1 乗物の乗り心地と定量的評価

乗り心地に影響を与える要因は数多く存在する。騒音や温度・湿度も乗り心地に影響するほか、乗り心地の評価の基準が個人によって異なり、主観的な評価が避けられない。実際、電車の減速度の許容範囲は人によりまちまちで、普段の電車利用頻度などにも関係してくる [5]。現状としては熟練者の官能評価に依存せざるをえない [6]。[7] では乗り心地の検討に際して振動・曲線通過時・加減速時の3つに分類している。上下方向の振動は乗り心地に強く影響するため、従来から振動と乗り心地に関する研究は長い間なされており、自動車においてもバネやダンパーによる受動的な振動抑制に加え、積極的に振動抑制を加えるアクティブサスペンションも採用されている。

乗り心地を定量的に評価することは非常に難しく、以前から様々な試みがなされている。乗り心地の定量的な評価方法において、加減速度とその変化率であるジャークが乗り心地に大きく影響することは古くから注目されてきた。[5] では実験によって測定された乗客の許容できない減速度とジャーク値の組合せを明らかにした。このほかにも乗車姿勢と減速度、ジャークの関係などによる評価の試み [7] や体感乗り心地試験を実施した評価 [8] がある。また、[9][10] では実験における被験者の評価をもとに、重回帰分析によって乗り心地の推定を行っている。ここでは、ある時刻 t 秒の乗り心地評価は t に先行する 3 秒間における符号を含む加速度のピーク値とジャークの実効値であるとし、加速度の代表値 $a_1(t), a_2(t)$ とジャークの代表値 $j_1(t), j_2(t)$ 、実験データから得られた最適な偏回帰係数 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ を用いて、乗り心地指数 (RDI) を

$$RDI(t) = \alpha_0 + \alpha_1 a_1(t) + \alpha_2 a_2(t) + \alpha_3 j_1(t) + \alpha_4 j_2(t) \tag{2.1}$$

と定義している。

表 2.1: 10%の乗客が許容できないとする組合せ

| 組合せ | 減速度 | 加加速度 | 記事 |
|-----|---------------------|---------------------|------|
| 1 | 1.0m/s ² | 2.0m/s ³ | |
| 2 | 1.2m/s ² | 1.0m/s ³ | |
| 3 | 1.5m/s ² | 0.0m/s ³ | 非現実的 |

2.2 速度パターンを適用した乗物の運動制御

速度パターンとは加速度・速度・位置・時間・乗り心地・エネルギー効率などの要求や制限に基づいて乗物の速度を計画し、実現するものである。速度パターンを生成し制御を行う

手法は主に電車やエレベータに用いられてきた。電車やエレベータは電気モータによって駆動されている。電気モータの特長としてトルク応答が早く、モデル化しやすいこと、分散配置が可能なことなどがあげられるが、速度パターンによる制御はこれら電気モータの特性を活かした手法であると言える。

電車やエレベータは専用の線路上を走行し、発着地点があらかじめ決められている。また、線路は定期的に管理・補修され、状態をある程度保つことが可能である。消費エネルギー効率の面から考えた場合、電車やエレベータでは走行環境が管理されており、最適な走行パターンを得やすい。また、乗り心地に影響する加速度や発進・停止時のショック、振動などを考えても、ダイヤや発着場所などが正確にわかっておりパターンの生成がやりやすい。

第3章 電気自動車の運動制御における速度パターンの適用と乗り心地の向上

3.1 自動車走行における乗り心地

近年、車間距離自動制御システムを搭載した自動車が市場に登場し、注目を集めている。このシステムは、主に高速道路などでドライバのアクセル・ブレーキ操作をサポートすることで、運転操作負荷を軽減し快適性を向上させるものである。購入者に対するアンケートでは、利便性 ”楽に運転できる”、快適性 ”スムーズに走れる” についての期待が大きい [11]。自動車のユーザにおける乗り心地の期待度は非常に高いと言える。

自動車では鉄道と異なり軌道や目的地が定まっていないことが多く、一般道路走行時には頻繁な加減速が要求される。信号に伴う発進・停止や右左折、車線変更、周りの車に合わせた走行など、自動車の走行は加減速から成り立っているといっても過言ではない。よって、加減速に伴う振動は乗り心地に大きな影響を与える [10]。自動車の加減速時における乗り心地を向上することは、すなわち自動車走行全体での乗り心地を向上することと同義であり、非常に望ましいことである。

3.2 電気自動車における速度パターンの適用

自動車走行中の乗り心地、特に加減速時により滑らかにかつすみやかに加減速することで乗り心地を向上することが出来れば、乗客の快適性だけでなく安全性からも有効である。電気自動車であれば電気モータを使用することで速度制御が容易であり、速度パターンを適用することで乗り心地・安全性の面で内燃機関車に対する優位を確立することができれば、電気自動車の普及につながると思われる。進行方法の速度変動による乗り心地は運転者の運転技能への依存度が強い。鉄道では専門の技量を持つ運転者がいるが、自動車ではドライバーの技能も運転の好みも千差万別である。

電気自動車における速度パターンの生成は次の3つの部分からなる [1]。

1. ブレーキ・アクセルの踏み具合によるドライバーの意思推定・トルク指令値の計算
2. 速度パターンの生成
3. 生成された速度パターンを用いた車両運動制御

速度パターンを適用した運動制御により、次の二点を達成することで乗り心地は向上すると考える。

- 滑らかかつ速やかな加減速
- ドライバの意図に沿った速度パターンの生成と走行の実現

従来の自動車運動制御は図 3.1 のようにドライバによるアクセル・ブレーキ・ステアリング操作などによって主に行われている。すなわち、実際の自動車の運動による調整とドライバによる運動予測により乗客の乗り心地は左右される。よってドライバの運転技能は乗り心地に直結することになる。

電気自動車において速度パターンを適用した運動制御を行うことで、ドライバの運転技能の差を埋めることになる。図 3.2 のようにドライバの走行イメージを推定し、スムーズな走行パターンを生成する。また、実際の自動車の運動をフィードバックし、パターンの再生成やパターンにより追従する制御を行っていき、ドライバにかかる運転負荷を軽減する。

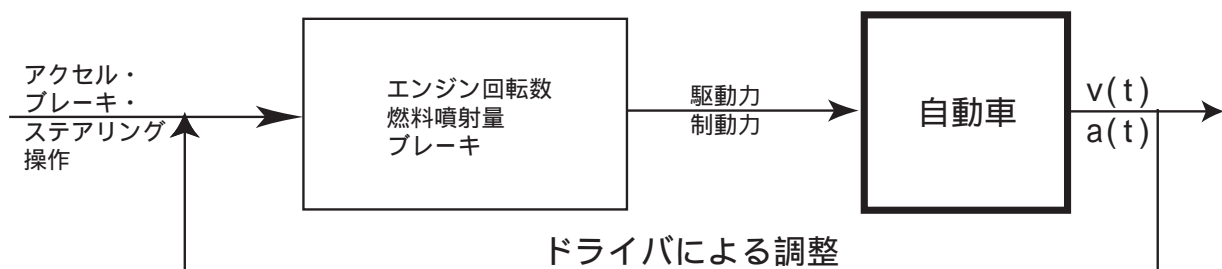


図 3.1: ドライバによる自動車の運動制御

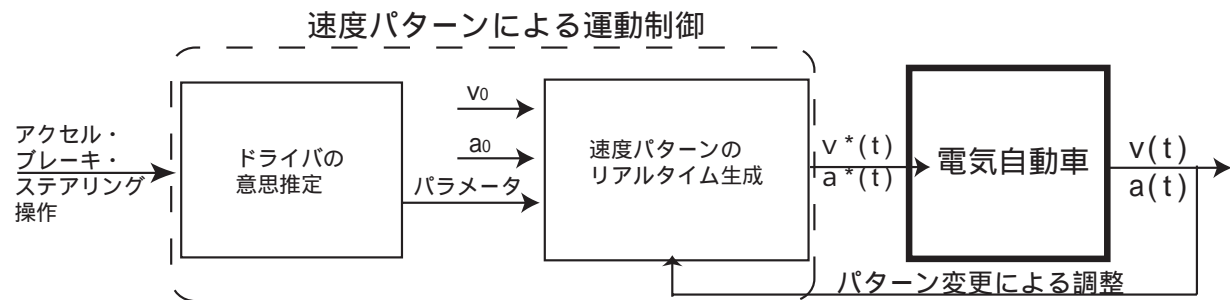


図 3.2: 速度パターンによる電気自動車の運動制御

提案手法では速度パターンの適用によって二つの面から乗り心地 (ride comfort) の向上を図る。快適性 (comfort) の定義については様々なものが存在する [12]。工学的な研究対象として考える場合、不快な刺激が無い状態を「適」、積極的に好ましい状態を「快」として捉えることが多い。速度パターンによってスムーズな走行を行い、望ましくない振動を抑制し「適」環境を向上する。同時にドライバの走行イメージを推定し実現することで、積極的に運転負荷を軽減して容易な運転操作を可能にし、「快」環境を向上する。自動車が人間の操作によって、基本性能に加えて快適に、意のままに操ることができるという感性的な性能も乗り心地の向上には重要であると考えられる [13]。

3.3 スムーズな走行

加減速の切り替え時に、加速度の変動を抑制することで滑らかな走行が実現できる。また、乗り心地を損なわない範囲で加速度を大きくとることで速やかな加減速が行える。図 3.3 の点線から先のパターンを生成する際に、どのようなパターンが乗り心地のよい走行になるか考え、スムーズな走行の乗り心地に与える影響について検討する。

(a) では加速度が連続でないことにより、乗客の体にかかる力に飛びが生じ、衝撃を感じるようになる。これは乗り心地の向上を図る速度パターンの生成時にもっとも避けるべきことである。(b) は加速度は連続であるが、ジャークが連続でないことで、スムーズな加速ができていない。乗車している人の体には加速度により力が加わるが、これがスムーズな変化をしないことにより乗り心地に悪影響を及ぼす。(c) のように加速度・ジャークの連続性を持つパターンがもっとも乗り心地がよくなるのは、直感的にも経験的にも明らかである。

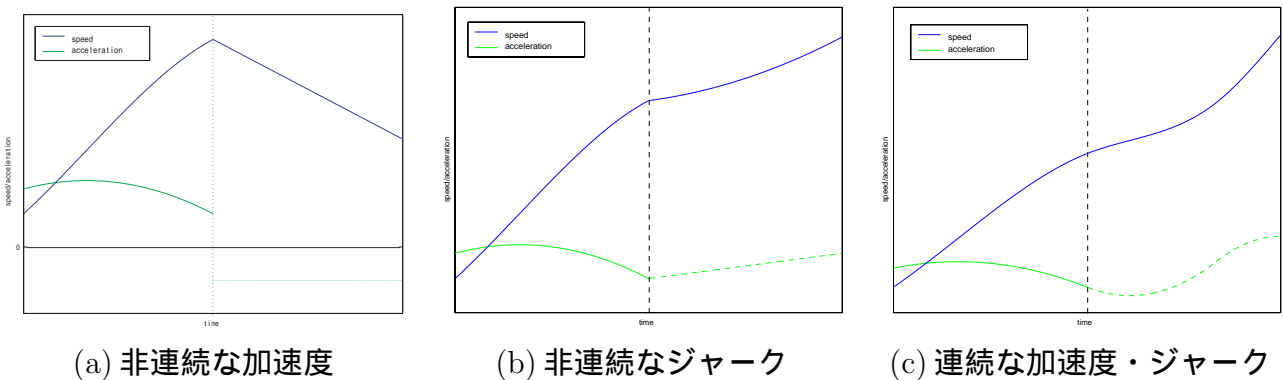


図 3.3: スムーズな走行と乗り心地

3.4 ドライバの意思推定

ドライバによる乗り心地の評価は、ドライバの走行イメージに沿った速度パターンが生成され、その通りの走行が実現されることで向上すると考える。

実際の運転においてドライバは一様な加減速を行ってはいない。周囲の状況や天候・路面の状況、ドライバ自身の嗜好に応じてアクセル・ブレーキ操作を加減し、微妙な操作によって滑らかな走行を実現している。加えて、ドライバの運転技能も大きく異なり、必ずしもドライバによる操作がドライバのイメージに沿った操作であるとは限らない。近年、ヒューマンエラーによる事故を未然に防ぐための運転支援システムも研究されている [14] が、速度パターンを適用した運動制御によってドライバによる操作を支援することで、ステアリング操作や周囲状況により注意を傾けることができる。よって、速度パターンを生成するにあたってドライバの走行イメージに沿ったパターンを生成することができれば、乗り心地の向上だけでなく操作性や安全性の向上にもつながると考えられる。

第4章 電気自動車のための速度パターン生成法

4.1 速度パターンの変更とリアルタイム生成

自動車の運転に際してドライバはアクセルやブレーキを頻繁に操作する。すなわち、周囲の状況に応じてドライバによる指令値は常に変化する。また、線路の品質をある程度保つことのできる鉄道と異なり、自動車の走行中には路面状態の変化する頻度も非常に高い。速度パターンが実行されている最中に指令値が変更された場合、新たな速度パターンを生成する必要がある。このとき速度と加速度が連続であってもジャークが非連続になってしまうと、乗り心地に大きな影響を及ぼす。このため、非連続なジャークを避ける速度パターンをリアルタイムで新たに生成しなければならない。

4.2 最適制御理論を用いた速度パターン生成法とその問題点

[1] は最適制御理論により速度パターンを生成している。加速度を a とおき評価関数 J を

$$J = \int_0^{t_f} \left(\frac{da}{dt} \right)^2 dt \quad (4.1)$$

とする。また車体の速度 v と加速度 a を状態変数として状態方程式 $\dot{x} = Ax + Bu$ をたて、最適制御理論によりハミルトニアン H を作ると、 λ をラグランジュ乗数として

$$H = \frac{1}{2}u^2 + \lambda^T(Ax + Bu) \quad (4.2)$$

これと、停留条件 $\frac{\delta H}{\delta \lambda} = 0$ 、この場合は

$$u = -B^T \lambda \quad (4.3)$$

より、 v および a の解は下のようになる。

$$v(t) = c_0 t^3 + c_1 t^2 + c_2 t + c_3 \quad (4.4)$$

$$a(t) = 3c_0 t^2 + 2c_1 t + c_2 \quad (4.5)$$

ここで境界条件

$$t = 0 : v = v_0, a = a_0 \quad (4.6)$$

$$t = t_f : v = v_f, a = a_f \quad (4.7)$$

より、各係数は以下ようになる。

$$c_0 = \frac{1}{t_f}(a_0 + a_f) - \frac{2}{t_f^3}(v_f - v_0) \quad (4.8)$$

$$c_1 = \frac{3}{t_f^2}(v_f - v_0) - \frac{1}{t_f}(2a_0 + a_f) \quad (4.9)$$

$$c_2 = a_0 \quad (4.10)$$

$$c_3 = v_0 \quad (4.11)$$

また、式 (4.5) を微分すれば、加速度の微分であるジャーク α は

$$\alpha(t) = 6c_0t + 2c_1 \quad (4.12)$$

となる。

前節で述べたように、ドライバからの指令が変化したとき、新しい速度パターンをリアルタイムに生成する必要がある。このとき

$$t = 0 : v = v_0, a = a_0, \alpha = \alpha_0 \quad (4.13)$$

$$t = t_f : v = v_f, a = 0, \alpha = 0 \quad (4.14)$$

とし、 $v_\Delta = v_f - v_0$ とおくと、ジャークの連続性を保つという条件より、式 (4.8), (4.9), (4.12) に代入すると、

$$\alpha(t) = \left(\frac{6}{t_f^2}a_0 - \frac{12}{t_f^3}v_\Delta\right)t + \left(\frac{6}{t_f^2}v_\Delta - \frac{4}{t_f}a_0\right) \quad (4.15)$$

となるから、 $t = 0$ のときを考えれば、

$$\alpha_0 = \frac{6}{t_f^2}v_\Delta - \frac{4}{t_f}a_0 \quad (4.16)$$

が成り立つことが条件となる。

式 (4.16) に t_f^2 をかけると、

$$\alpha_0 t_f^2 + 4a_0 t_f - 6v_\Delta = 0 \quad (4.17)$$

という t_f の 2 次方程式が得られる。よって t_f は、

$$t_f = \frac{-2a_0 \pm \sqrt{4a_0^2 + 6\alpha_0 v_\Delta}}{\alpha_0} \quad (4.18)$$

と求められる。

このとき変更後の速度パターン終了時刻である解 t_f が存在しなければ、パターンの変更はできなくなる。すなわち、 α_0, a_0, v_Δ の符号によって $\sqrt{4a_0^2 + 6\alpha_0 v_\Delta} < 0$ となったとき、解 t_f は存在せず、パターン生成の計算が不可能になる。特定の条件下において走行中に速度パターンの変更ができなくなってしまう可能性があることは、最適制御理論を用いて速度・加速度・ジャークパターンを生成する際の大きな問題である。 α_0, a_0, v_Δ の符号の組合せによっては、ジャークの連続性の維持とパターン終了時刻に加速度を 0 にすることが両立できないことが原因である。

この問題を解決するには、パターン変更点での条件による場合分けと、それぞれについての速度パターン生成法を別につくらなければならない。しかし、頻りに速度パターンの変更があるという実際の自動車走行の特性を考えると、パターン変更毎に α_0, a_0, v_Δ の符号による場合分けと速度パターン生成法の使い分けを行うのは非常に非効率である。もっと単純なパターンをもとに運動制御することが望まれる。

4.3 リアルタイム変更を前提とした新しい速度パターン生成法

4.3.1 ドライバによる指令

ドライバによるアクセル操作は、内燃機関車ではエンジンへの、電気自動車であればモータへのトルク指令となる。自動車の速度と走行抵抗の関係を考えれば、速度とドライバからのトルク指令がわかるとき、アクセルは本質的にはドライバからの加速度指令であると考えることが出来る。

自動車を運転するとき、ドライバーは微妙なアクセル・ブレーキ操作を行っている。

- 減速停止時
ゆっくりブレーキを踏み込む。停止直前にブレーキを緩めて停止時の衝撃を抑える。
- 発進時
ゆっくりと徐々にアクセルを踏み込んでいく
- 急加速時
最初はゆっくりだが徐々に早く、大きくアクセルを踏み込んでいく
- 急減速時
一気に大きくブレーキを踏み込む

これらからわかるように、ドライバーがアクセル・ブレーキを踏み込む量は加減速度の、踏み込む速度はジャークの指令に関係してくると考えられる。

速度パターンの適用によって乗り心地を向上させるために、滑らかかつ速やかな加減速を実現し、ドライバのイメージに沿ったパターンを生成する必要がある。パターンを生成するにあたって加速度の最大値 a_{max} とジャークの最大値 α_{max} を考えれば、ドライバの要求する加速度・ジャーク・目標速度をアクセルの踏み量と踏み速度から推定し、 a_{max} と α_{max} に結びつけることが可能である。

4.3.2 速度パターン終了時刻 t_f によらない新しい速度パターン生成法

最適制御理論を用いた速度パターンの生成法の問題点は、あらかじめパターンの終了点における時刻 t_f を決めることにより、特定の初期条件下でしかパターンの生成を行えないということである。そこで本論文では、新たな速度パターンの生成法を提案する。

まず、速度パターンを適用する目的は乗り心地の向上であるから、

- 加速度とジャークの連続性を保つ
- 目標速度 v_f に到達したとき加速度 $a_f = 0$ ジャーク $\alpha_f = 0$

以上の二点を絶対条件とする。このとき、次のようなアルゴリズムによって速度・加速度・ジャークパターンを生成する。ここでは、停止状態から加速するパターンをもとに考える。

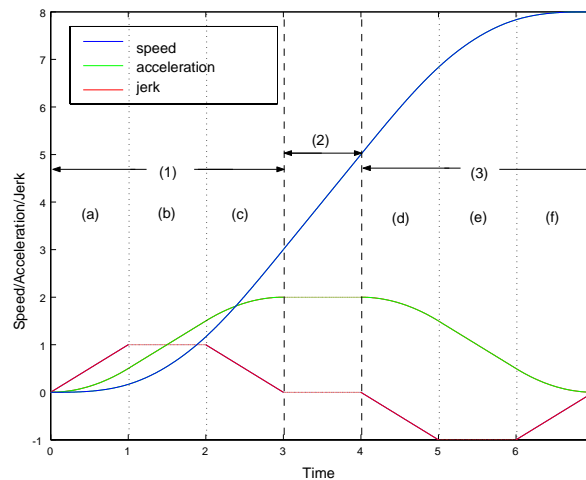


図 4.1: パターン生成の例

図 4.1 において、

(1) では、速やかな加速を実現するために加速度を最大値 a_{max} に到達させる。しかしスムーズな走行のためにジャークの連続性は絶対条件であるから、(a)~(c) のようにジャークを増減させることによりこれを達成する。このとき最大ジャーク α_{max} を保つことにより、加速度を迅速に a_{max} まで増加させる。

(2) では最大加速度 a_{max} を保ち、より速やかに目標速度 v_f に到達することを目指す。

(3) では、 v_f に到達したとき加速度とジャークを 0 にするというもう一つの条件を満たすため、加速度を徐々に下げていく。ここでもより速やかに加速度をさげるため、(d)~(f) のようにジャークを増減させ、 $-\alpha_{max}$ を保つことで迅速に加速度を減少させる。

加速度は速度の変化率であり、ジャークは加速度の変化率である。すなわち、ジャークと加速度を連続的に変化させつつ速やかに速度を変化させるためには、ジャークの最大値・加速度の最大値に速く到達し、これを維持すればよい。このアルゴリズムは非常に単純なものである。だが、初期条件によらずにあらゆる場合でパターンの生成が可能になる。

前節で述べたように、速度・加速度・ジャークパターンはそれぞれ

$$v(t) = C_0 t^3 + C_1 t^2 + C_2 t + C_3 \quad (4.19)$$

$$a(t) = 3C_0t^2 + 2C_1t + C_2 \quad (4.20)$$

$$\alpha(t) = 6C_0t + 2C_1 \quad (4.21)$$

と表すことができる。パターン開始時 ($t = 0$) における初期条件を $v(t) = 0, a(t) = 0, \alpha(t) = 0$ とすると、これらより

$$C_1 = \frac{\alpha_0}{2} \quad (4.22)$$

$$C_2 = a_0 \quad (4.23)$$

$$C_3 = v_0 \quad (4.24)$$

となる。

ここで C_0 について考える。図 4.1 のようにジャークを連続的に増減させるためには、 C_0 は時間 t の関数とする必要がある。 C_0 が定数 C を用いて 3 つの値 $+C, 0, -C$ の値を取れるものとし、 α の増減によって変化させることで図 4.2 のようになる。以上のような新しい速度パターン生成法による加速のパターンの例を図 4.3 に示す。

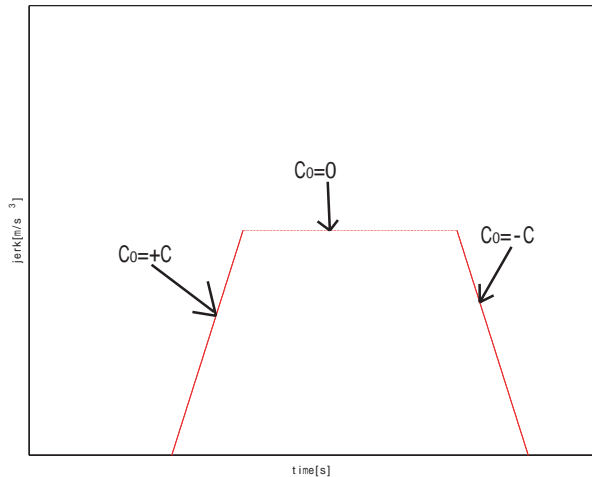


図 4.2: ジャークの変化と C_0 の値の関係

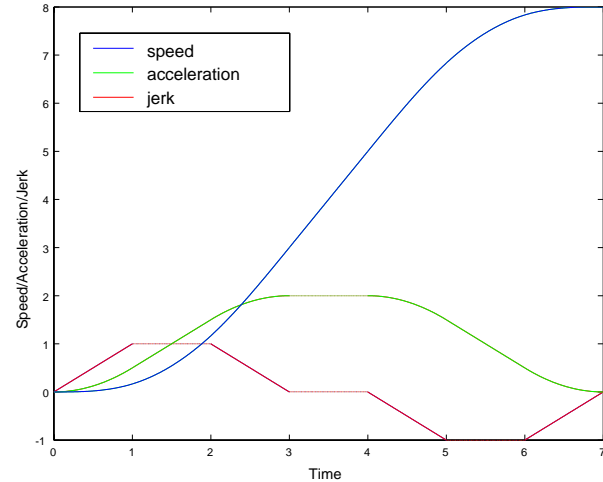


図 4.3: 加速パターンの例

4.3.3 加速度・ジャークの最大値に到達しない場合

提案手法を用いたとき、図 4.4 のように加速度・ジャークの最大値に到達しない場合があり得る。ジャークの連続性を保ち、かつ速度が目標値に達したときジャークと加速度を 0 とするためには、 $C, a_{max}, \alpha_{max}, v_{\Delta}$ の数値関係によって場合分けが必要となる。この結果図 4.3 4 つのパターンのどれかが生成されることになる。場合分けの際の条件式は以下のようになる。

$$\frac{\alpha_{max}^2}{6C} \leq a_{max} \quad (4.25)$$

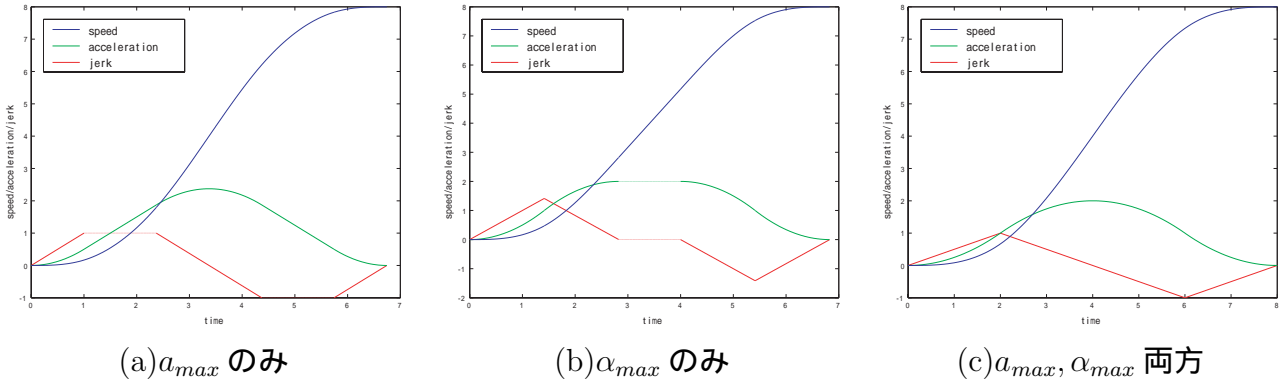


図 4.4: a_{max}, α_{max} への到達可否によるパターン生成時の場合分け

$$\frac{6Ca_{max}^2 + a_{max}\alpha_{max}^2}{12C\alpha_{max}} \leq \frac{v_{\Delta}}{2} \quad (4.26)$$

$$a_{max} \sqrt{\frac{a_{max}}{6C}} \leq \frac{v_{\Delta}}{2} \quad (4.27)$$

4.4 パラメータの決定

この手法によるよい点は、 $C_0, a_{max}, \alpha_{max}$ という3つのパラメータを自由に決定できることである。図 4.3 の停止状態から加速する際のパターンをもとに考える。 C の値を増加した場合、図 4.5 のようにジャークの増加速度が増し、加速度が a_{max} に早く達する結果パターンの終了時刻は早くなる。また、図 4.6 のように C だけでなく C, α_{max} の値も増加すれば、

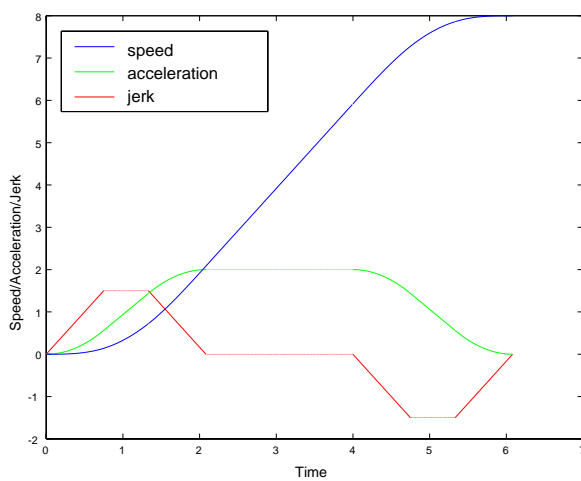


図 4.5: C を増加した速度パターン

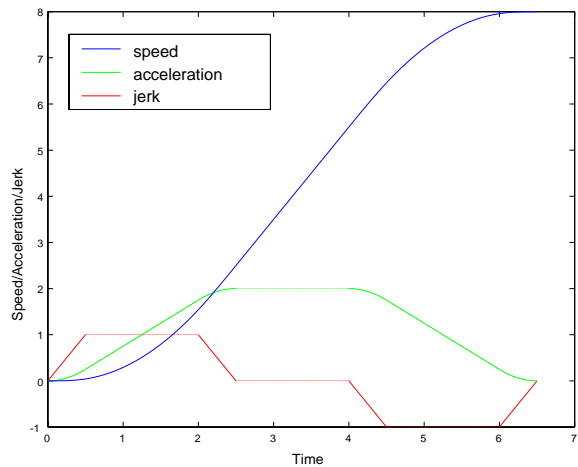


図 4.6: C, α_{max} を増加した速度パターン

加速度はより早く a_{max} に達し、パターンの終了時刻をさらに早くすることができる。これらは a_{max} が一定の場合であり、実際には C, a_{max}, α_{max} の値の取り方によって様々な速度・

加速度・ジャークパターンが存在し得ることになる。
この利点は次のような柔軟な速度パターンの生成を可能にする。

- ドライバや乗客の走行の好みに対応することができる。
- 路面状況の変化にもすばやく対応することができる。
- 緊急ブレーキや急な周囲環境の変化にも対応できる。

C, a_{max}, α_{max} の値を自由に決定することで加速感を求める人やゆっくりとした加速が欲しい人など、加速・減速に応じて人の嗜好に合わせたパターンを生成することが可能である。また、前節ではドライバの意図に即したパターンを生成するために、 a_{max}, α_{max} をドライバからの指令値をもとに決定することを提案した。しかし路面状況や乗り心地の向上を考えた場合、必ずしもドライバの指令を a_{max}, α_{max} に直結させる必要は無い。すなわち、滑りやすい路面に自動車が入った際には、最大路面摩擦係数を用いて $a_{max} = \mu_{max}g$ とすることで、ドライバがこの値より大きい a_{max} を要求していたとしても車輪の空転を防ぎ安定領域で運動を制御することができる。また、ドライバの指令がある一定値を超えた場合は緊急ブレーキと判断するような推定システムを用いれば、同様に最大制動力を用いて最短距離で停止することができる。

上述したとおり、自動車では速度パターンを適用して運動制御を行う際に頻繁な速度パターンの変更が必要になる。[1]での最適制御理論を用いた速度パターン設計ではパターン変更が可能な場合と不可能な場合にわかれた。これに対し、速度パターン終了時刻 t_f を用いない提案手法では C_0 を時間の関数とすることで変更時点での a, α, v_{Δ} などの符号や、変更後のパターンにおける指令値 a_{max}, α_{max} との符号関係に依らずになめらかな速度パターンを生成できる。図 4.7 にこのような速度パターン変更の際の速度・加速度およびジャークパターンの一例をあげる。

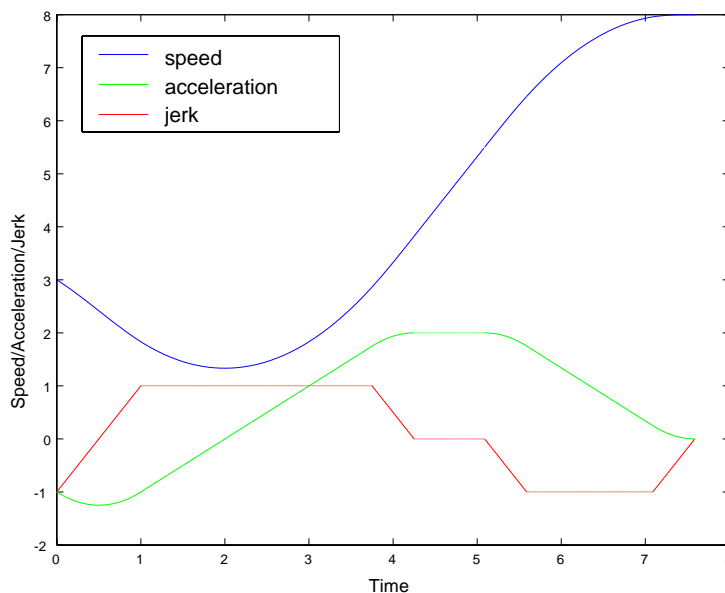


図 4.7: 速度パターンのリアルタイム変更

第5章 速度パターンを適用した電気自動車の運動制御実験

5.1 速度パターンを実現するための制御システム

前章で提案した速度パターン生成法を用い、自動車の運動制御を行う際のブロック図を図5.1に示す。提案手法では速度パターンとともに加速度パターン・ジャークパターンも得られる。パターンに対する追従性と外乱に対するロバスト性の双方を向上するために、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。 M を車体の質量、 P と P_n をそれぞれ制御対象プラントとノミナルプラントとおけば、

$$P = \frac{1}{Ms} \tag{5.1}$$

$$P_n = \frac{1}{M_n s} \tag{5.2}$$

と書くことができる。本研究では速度パターンの適用による運動制御の改善と乗り心地の向上が目的であるため、ゲインのみのフィードバック制御器を用いる。このとき速度指令 v^* から速度 v までの伝達関数は

$$\frac{v}{v^*} = \frac{M_n s + K_p}{M s + K_p} \tag{5.3}$$

と表される。

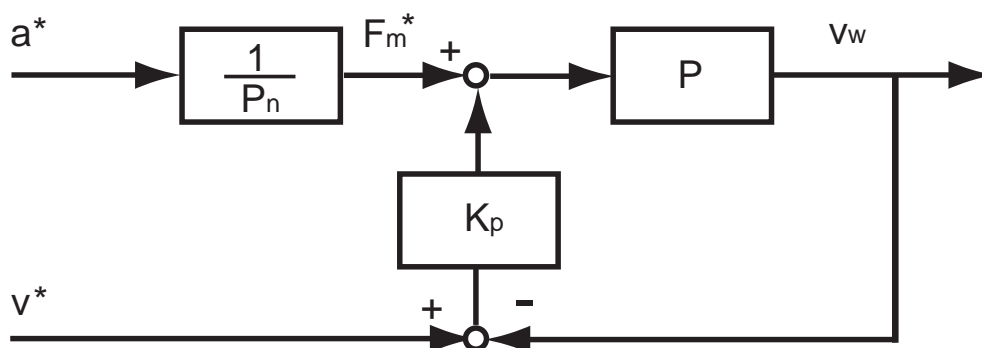


図 5.1: Block diagram of control system

5.2 東大三月号 II による実験

5.2.1 車両諸元等

東大三月号 II は日産マーチを改造した実験用の電気自動車であり、4基の電気モータが各車輪に搭載され独立制御が可能となっている。本研究の性質上、乗り心地の評価を行うためには実際の自動車での走行実験がモータに取り付けられたエンコーダによって精度の高い速度情報を得ることができる。

5.2.2 実験手法

速度パターンを適用した運動制御によってなめらかな走行が実現し、乗り心地が向上することを実証することが目的である。実験は平らな鉄板が多数敷き詰められた直線路において、あらかじめ設定した目標速度、パラメータと制御開始時の初速度をもとに加速パターンを生成し、これをもとに運動制御を行った。比較のために初速と目標速度を直線的に結ぶランプ入力による制御も行った。この際、ランプ入力と速度パターンの中で条件を同一にするために、加速開始前に 2m/s で2秒間一定速走行する区間を設けた。

5.2.3 実験結果

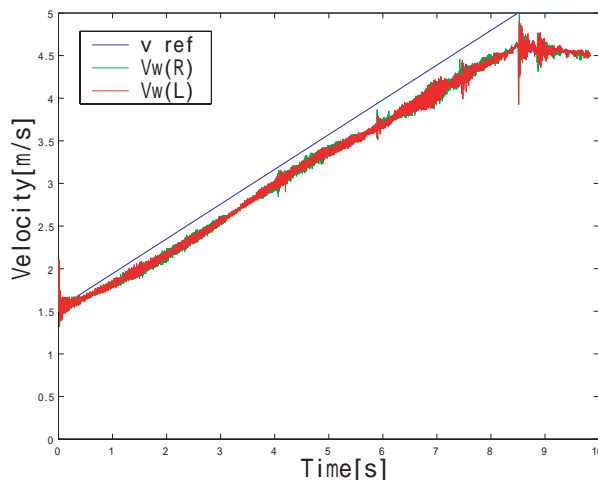


図 5.2: Vehicle velocity by ramp input

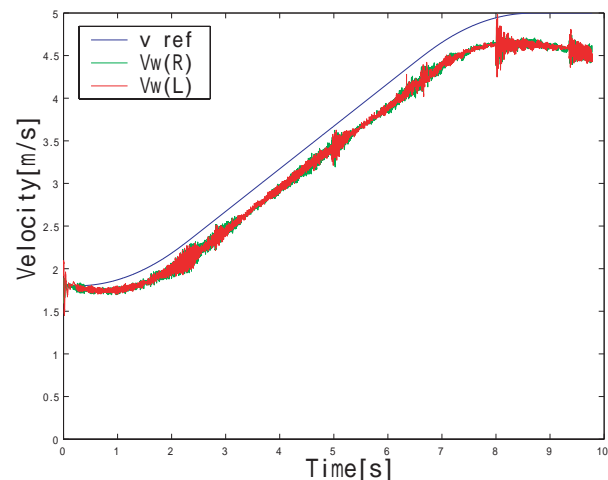


図 5.3: Vehicle velocity by speed pattern

実験の結果、図 5.3, 5.2 にあるようにランプ入力も速度パターンも加速時・加速終了前後の一定速時ともに追従エラーが生じ、目標速度に達することができなかった。特に速度指令が一定な加速前後では大きな誤差が生じ、自動車は減速した。加速度の図 5.5, 5.4 からわかるように、加速中は自動車はほぼ生成した加速度パターンの指令値を達成して加速を行っている。しかし一定速走行の際には指令値を下回る加速度しか得られていない。これは摩擦抵抗と空気抵抗からなる走行抵抗の影響であると考えられる。追従性の向上を達成するためにノミナルプラントの質量の調整とフィードバックゲインの増加を試みた結果、ある程度追従性をあげることはできたが、正確にパターンを追従させることはできなかった。一定速走行のための速度パターンでは、加速度の指令値は0となり、加速度フィード

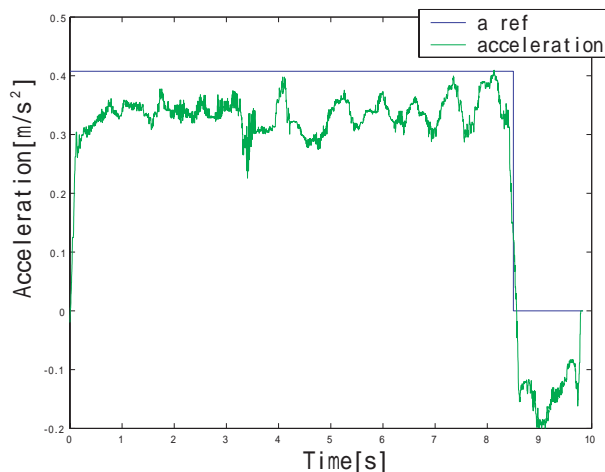


図 5.4: Acceleration by ramp input

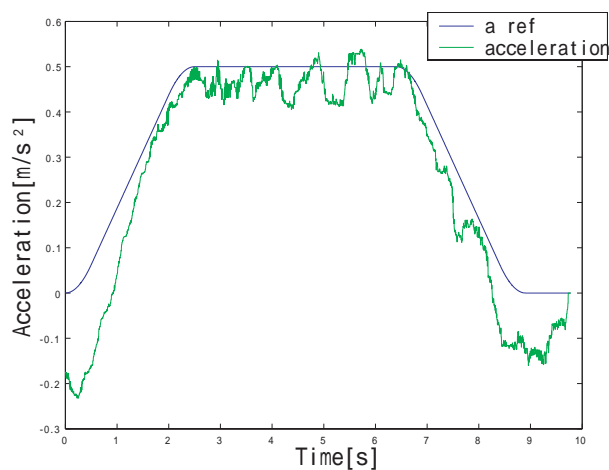


図 5.5: Acceleration by speed pattern

フォワードによるトルク指令値も 0 となる。ノミナルプラントの調整の結果加速時には余分なモータトルクによって走行抵抗を打ち消すことができたが、一定速走行では走行抵抗をフィードバックのみでは完全に補償できなかったと考えられる。

また、たとえば速度パターン適用の際の 5 秒付近など、図 5.3, 5.2 のところどころで速度の振動が生じている。これは両図ともに約 6m 走行ごとにおきている現象であり、一枚の鉄板の長さも約 6m であったことから、鉄板と鉄板の継ぎ目を自動車が通過したときに生じた振動で、制御手法によるものではないと考えられる。

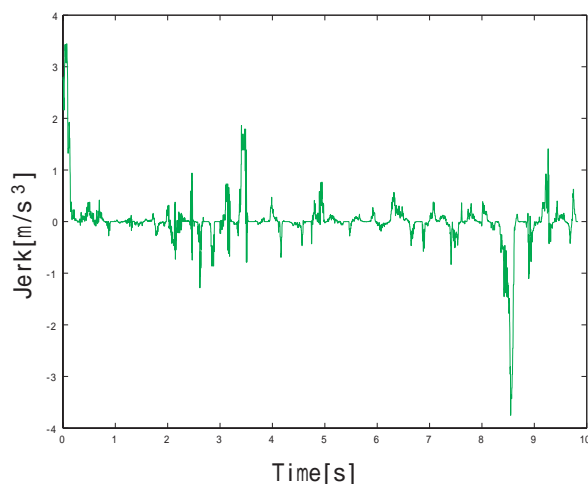


図 5.6: Jerk by ramp input

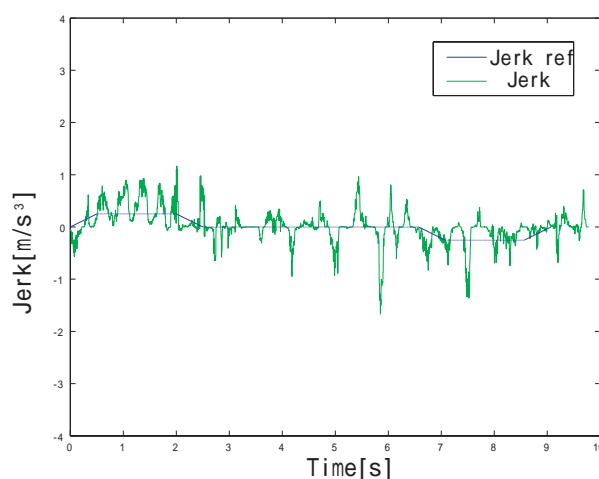


図 5.7: Jerk by speed pattern

パターン追従は完全には達成できなかったが、図 5.2 ~ 5.5 からわかるように速度パターンを適用した場合にはランプ入力に比べスムーズに速度・加速度を変化させることができた。この結果、図 5.7, 5.6 にあるようにジャークの変化の抑制が達成されている。ランプ入力の場合は加速度の立ち上がり、立ち下がり時においてジャークのスパイクが生じているが、速度パターンの場合では滑らかなジャークの増減に成功している。変動幅はランプ入力に比べて速度パターンでは大きく減少し、速度パターンによる運動制御によって乗り心地の向上が達成されたことが示された。

また、図 5.8, 5.9 では、パラメータの変動によって異なる速度パターンを生成し乗り心地の評価も変化させ得ることを示す。二つの加速パターンでは加速度の最大値 a_{max} 、ジャークの最大値 α_{max} は同じ値を用い、ジャークの変化率である C の値のみを変化させて実験を行った。この結果、速度・加速度の立ち上がりにはあきらかな差が生じている。パラメータの決定によって様々なパターンの生成が可能になり、乗り心地や人それぞれの嗜好、周囲状況、緊急性などにあわせて速度パターンを生成・適用できることが示された。

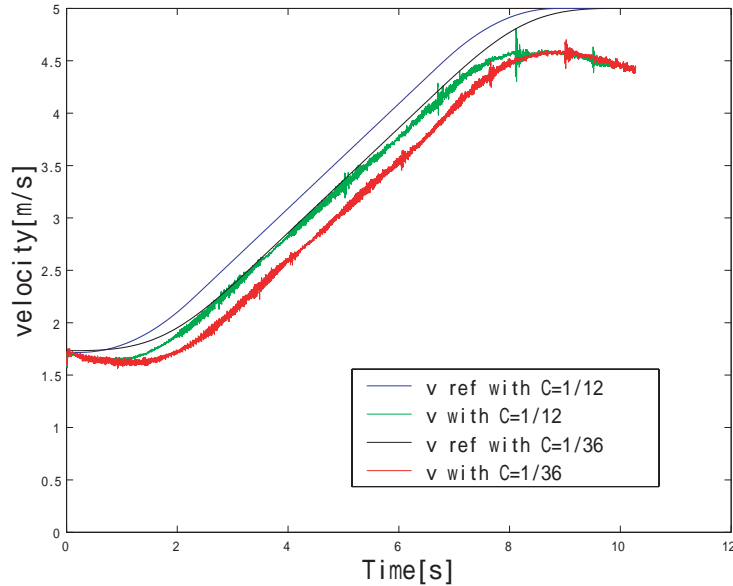


図 5.8: 異なる C を用いた速度パターン

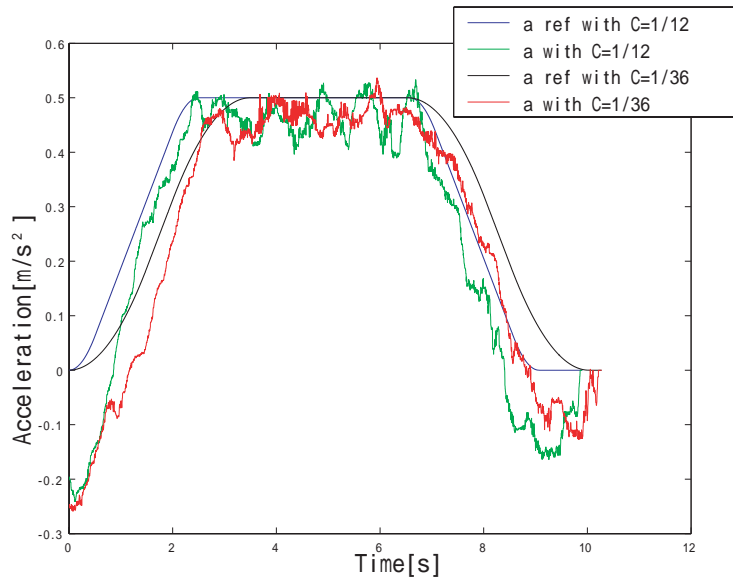


図 5.9: 異なる C を用いた加速度パターン

第6章 実験結果の検討

6.1 速度パターンを実現する運動制御

前章で述べた制御システムを用いると、加速時には指令値どおりの加速度が得られるが一定速時に減速してしまう。これは、加速度指令値が0になってしまうことにより、速度フィードバックのみでは走行抵抗の補償ができないことに原因があった。また、実験ではノミナルプラントを増加することで、加速時には走行抵抗を打ち消して指令値どおりの加速度を実現していた。しかし減速時を考えると、ノミナルプラントの増加によって加速度フィードフォワードから得られる負のトルク指令はさらに大きくなって、走行抵抗と足し合わせることにによりパターンよりはるかに急に減速してしまうことは容易に想像できる。すなわち、走行抵抗分をいかにして制御により補償しパターンの追従性を上げるかということが、速度パターンを実現する運動制御を考える上で大きな問題となる。

そこで、実験に用いたシステムを改善した新たな制御システムを考える。ノミナルプラントの調整は加速時と減速時では逆の働きをしてしまうことから、これをやめて走行抵抗分をトルク指令に直接補償する。走行抵抗は主に、一定値をとる転がり抵抗と速度の二乗に比例する空気抵抗からなるが、今回の実験ではそれほど速度を上げていないので、転がり抵抗分としてトルク指令値に一定のトルクを上乗せする手法を取った。予備実験の結果、転がり抵抗値は約240[Nm]と求められたので、これを補償分のトルクとして用いた。

この結果、図 6.1, 6.2 に示すとおり、追従性を大きくあげることができた。

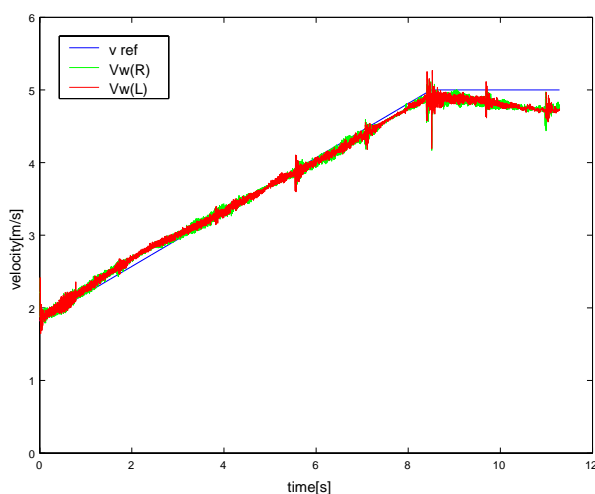


図 6.1: Vehicle velocity by ramp input

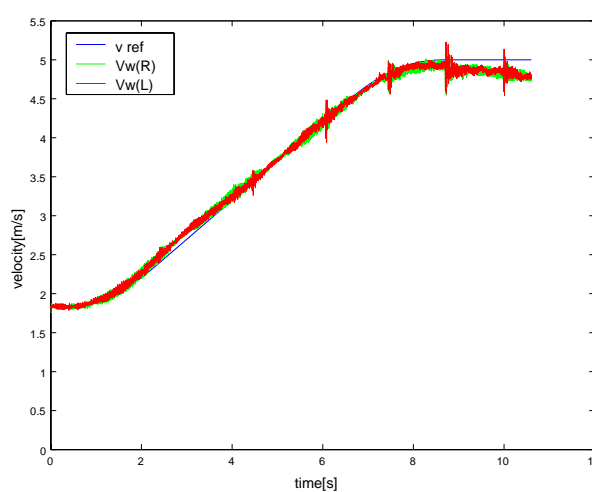


図 6.2: Vehicle velocity by speed pattern

ただし、パターン終了前後の一定速走行時にはまだ若干の減速が見られた。これは空気抵抗分を考えていないため速度維持のためには出力トルクが不足したものと考えられる。

6.2 速度パターンによる乗り心地の向上

実際の電気自動車を用いた実験をすることによって、速度パターンの生成が乗り心地に対して与える影響を実感を持って調べることができた。

- 加速度の乗り心地に与える影響は非常に大きい
実験ではパラメータの決定法が乗り心地に与える影響をわかりやすくするために、 $a_{max}C, a_{max}, \alpha_{max}$ の値を変化させることで加速度の変動の仕方をいろいろと変えてみたが、最大加速度を保つ際の乗り心地がもっとも全体の乗り心地に影響を与えた。
- C の値は加速の立ち上がりに大きく影響
 C の値を変化させながら実験を行った図 5.8, 5.9 では、速度の立ち上がり感には大きな差が出た。加速度の変化の差は乗ってはいはつきりと感じられるレベルで、乗り心地に対する影響も大きい。
- a_{max} の値が大きいときは C, α_{max} も大きくすべき
 a_{max} の値を大きくすると、より大きな加速を感じる。この際、 a_{max} の増加に応じて C, α_{max} の値も大きくすると、スムーズな加速を感じる。これに対し C, α_{max} を同じ値、あるいは逆に小さくすると、加速に違和感を感じる。

提案する速度パターン生成法を用いることで、 C, a_{max}, α_{max} を自由に設定可能なことで乗り心地を変化させることができたことがわかった。また、加速度が乗り心地に与える影響は極めて大きいこともわかった。ドライバーの指令をそのまま a_{max} の決定に用いるのではなく、乗り心地の面からも a_{max} の決定法を考えることは非常に重要である。実際の走行においては、周りを走行している車の流れに合わせたり細かく加減速を行ったりと、ドライバーによる指令値はどんどん変化する。このため実験の時よりも C, α_{max} が乗り心地に与える影響は大きくなるはずである。

第7章 結論と今後の課題

7.1 まとめ

乗物の評価として不可欠である乗り心地について、電気モータを使用する電気自動車は速度制御に適しているという強みを活かし、速度パターンを電気自動車に適用することによって、通常時や非常時における乗り心地の向上を図った。その上で、過去の電気自動車への適用をねらいとした速度パターン生成法の問題点を解決するために、新たな生成法を設計した。新しい速度パターンの生成法では、ドライバからの指令もとに加速度の最大値 a_{max} とジャークの最大値 α_{max} 、ジャークの変化率 C を考え、パターン終了時刻によらない自由度の高い速度パターンを生成できることがわかった。また、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用いて電気自動車の運動を制御することで、速度パターンの適用によって滑らかな乗り心地のよい走行が可能になることが示された。

一方で、以下のような問題があることも明らかになった。

- パターン追従性に走行抵抗が大きく影響を及ぼす
- フィードバックゲインを大きくすると追従性が上がるが、ある程度からは振動が生じ追従性の向上には限界がある。

提案手法による運動制御はこれから先広い適用の可能性が考えられる。近年高速道路での自動運転システムやドライブバイワイヤシステムなどが広く検討されているが、本手法を用いることによって乗り心地のよい走行が可能になる。

7.2 今後の課題

7.2.1 低速時における制御

自動車の走行に際して、どんなにきれいに整備された道路であっても車輪の回転速度には振動が生じる。実験車両ではモータのエンコーダによって精度の高い車輪速度情報が得られ、高い制御性を発揮することが可能となっている。しかし、速度フィードバックループを持つ制御システムでは振動が生じると大きな影響を受ける。特に低速では、車輪速度には正負の領域にまたがって大きな振動が生じることがある。このとき、フィードバックによってモータの出力トルクも正負にまたがって大きく振動してしまい、乗り心地に悪影響を及ぼすばかりか、モータの破損につながる恐れもある。このため今回の実験では一定速度で走行しているところから加速するというパターンを用いている。

実際の走行、特に都市部での走行では、発進・停止の機会が極めて多く、低速時の制御は非常に重要である。車輪速度に大きな振動が生じるような低速時において、どのように自動車の運動を制御するかは今後の課題である。

7.2.2 ドライバの意図に沿ったパラメータの決定法

ドライバのアクセル・ブレーキ操作からいかにしてドライバの走行イメージを推定し、速度パターン生成に用いるパラメータを決定するかという点が速度パターンによる運動制御を行う際の最大の問題となる。ドライバによる指令をもとにした $C_0, a_{max}, \alpha_{max}$ の決定法によって様々な状況に対応できるようにする必要があると考えられる。また、これらパラメータの組み合わせをどのようにしたら乗り心地が向上するかについてはまだ調査していない。様々な初期条件とパラメータの組み合わせを用い、乗客の感じた乗り心地をアンケート調査することで、通常走行時に最も効果的に乗り心地を向上できるパラメータの決定法について調べる必要がある。

また、乗り心地を損なわないためには、必ずしも a_{max} と α_{max} がドライバの要求する加速度・ジャークの値に一致する必要はない。3つのパラメータは自由に設定可能であるが、第4章でも書いたとおり何らかの関係式を満たすことでより自然な走行が可能になると思われる。

一般的には減速時のほうが加速時よりも加減速度の乗り心地の影響は強いと言われている[7][15]。このため減速時の減速パターン生成の際には特にパラメータの決定を注意する必要がある。ドライバの意向に沿い、かつ乗り心地や自動車の運動状況を考慮した $C_0, a_{max}, \alpha_{max}$ の決定法が今後の課題である。

7.2.3 乗り心地の評価

今回の実験では、乗り心地の評価をジャークの変動から考えている。内燃機関車に比べ乗り心地の向上を証明するためには定量的評価が欠かせない。実験結果からわかるように速度パターンを用いることによってジャークの変動は明らかに抑えることができた。様々な走行パターンにおいて、異なるドライバによる内燃機関車の走行データと速度パターン適用時を比較し、定量的に乗り心地の違いについて調査する必要がある。

提案手法では、速度パターンの適用によりスムーズな走行を達成することで受動的に乗客の乗り心地への悪影響を防ぎ、同時にドライバの意図を推定しパターンによって実現することで積極的にドライバの乗り心地評価向上を図っている。よって乗り心地の評価をする上で、前後方向の速度変化による振動抑制の効果だけではなく、ドライバの思い通りの走行の実現性や運転のしやすさ、容易さなども調べる必要がある。これらは定量的な評価をするのは非常に難しいが、速度パターン適用による運動制御を現実化する際に非常に重要な要素であり、アンケート調査などで評価してよりよいドライバの意思推定を模索していく必要があると思われる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教官である堀洋一教授には、ご多忙にも関わらず、熱心なご指導と的確なご助言を頂きました。専門的な指導はもとより、人間としての在り方・考え方など一生涯財産となる理念・信念まで多くのことを御指導いただきました。また、ときには厳しくときには親身になって御指導して頂き、教育とは如何なるものか学ばせて頂きました。研究室に配属されてから一年の間、堀教授のもとで学ぶことができたことを誇りに思います。ここに深く感謝申し上げます。

内田利之技官には、普段から電気自動車の作業を通して本当にたくさんのことを教えていただき、いろいろなアドバイスも伺うことができました。教科書やマニュアルには載っていないノウハウや知識、またモノ作りの大変さ、面白さ等を親切にご指導頂きました。心より感謝申し上げます。また、崎山秀子秘書には手続き等の文書作成や事務的な用務、日頃から研究室の雰囲気などに気を配って頂きました。心より感謝申し上げます。

坂東信尚さん、畠直輝さん、呉世訓さんには日頃の生活や研究上の問題点まで多くのことについて相談にのって頂き、面倒を見て頂きました。コンピュータのことや研究の進め方、論文や発表についてのアドバイスなど非常にたくさんのことを教えていただくことができました。親身になって御指導御助言を頂きましたことを心から感謝しております。

張炳勳さん、馬澄斌さん、呉俊徳さん、福井龍さん、アルバートカウソさん、李練兵さんにはいつもやさしく話し相手になっていただき、研究の進め方についてのアドバイスや他愛も無い話などたくさんの楽しい思い出をいただきました。よく食事にも一緒に行き、様々なお話を聞くことができました。どうもありがとうございました。

電気自動車を研究されている古川公久さん、青木健一郎さん、小玉晋也さんには日頃から研究上問題があると相談に乗っていただきました。古川さんはいつもやさしく接していただき、いやな顔もせず実験を手伝ってくださいました。青木さんは研究の理論・実験に至る全ての過程で問題が生じると夜中でも相談してしまう私のわがままにいつもつきあってくださいました。小玉さんは自分の研究の手を休めていつも快く実験を手伝ってくださいました。私が卒業論文を書くことができたのは古川さん、青木さん、小玉さんのおかげであり、この場を借りて深く感謝いたします。

同じ卒論生として一年をすごした青木良文君と渡邊信哉君には日々の生活から研究に至るまで多くの場面をともに過ごすことができ、楽しい研究生活を送るとともに、お互いの研究について有意義な議論を交わすことができました。ありがとうございました。

皆様と過ごせた一年間の学生生活は私にとって大変有意義な、忘れ得ぬものになりました。生涯にわたってのかけがいのない財産をいただけたことに心より感謝致します。

参考文献

- [1] タイチェンファ: ”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”, 2003.
- [2] 坂井真一郎, 佐渡秀夫, 堀洋一: ”4輪独立駆動電気自動車における動的な制駆動力配分法”, 電気学会産業応用部門誌, Vol.120-D, No.6, pp761-768, 2000.
- [3] 北川健太郎, 坂井真一郎, 内田利之, 堀洋一: ”4輪独立の増粘着制御によるEV車両の2次元運動の安定化”, 電気学会産業計測制御研究会, ICC-00-13, 2000.
- [4] 鈴木浩明: ”各種交通システムにおける乗り心地評価法”, 鉄道総研報告, Vol.10, No.10, pp53-58, 1996.
- [5] 白戸宏明, 藤浪浩平, 小美濃幸司: ”列車減速度の適正レベルに関する検討”, 鉄道総研報告, Vol.8, No.12, pp.43-46, 1994.
- [6] 武井一剛, 石黒陸雄: ”乗員の官能評価にもとづく乗り心地評価”, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.30, No.3, pp47-56, 1995.
- [7] 高井秀之: ”乗り心地評価方法の変遷”, 鉄道総研報告, Vol.9, No.8, pp.61-66, 1995.
- [8] 鈴木浩明, 白戸宏明: ”体感による乗り心地評価試験の実施法”, 鉄道総研報告, Vol.17, No.1, pp7-10, 2003.
- [9] 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.
- [10] 王鋒, 佐川貢一, 猪岡光: ”自動車の加減速と乗り心地の関係に関する研究”, 人間工学, Vol.36, No.4, pp.191-200, 2000.
- [11] 矢作悟, 谷内陽子: ”車間自動制御システムの市場反響”, 自動車技術, Vol.57, No.12, pp81-84, 2003.
- [12] 鈴木浩明: ”鉄道車両の快適性とその評価”, 自動車技術, Vol.57, No.10, pp37-42, 2003.
- [13] 土居俊一: ”ヒューマンダイナミックスを考慮した車両評価”, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.30, No.3, pp3-15, 1995.
- [14] 名切末晴, 天野也寸志, 福井勝彦, 土居俊一: ”ドライバの運動行動解析に基づく運転支援法の検討”, 自動車技術, Vol.57, No.12, pp102-107, 2003.
- [15] 南京政信: ”乗り心地向上を目指すブレーキ制御”, Railway Research Review, Vol.57, No.9, pp16-19, 2000.