

乗り心地の向上を目指しジャークと加速度限界を考慮した速度パターンのリアルタイム生成

齊藤 知行*, 堀 洋一 (東京大学)

Realtime Generation of Speed Pattern for EVs to Improve Ride Comfort taking Limit of Acceleration and Jerk into Account

Tomoyuki Saitoh, and Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

This paper attempts to draw a general framework of motion control of EVs based on the scheduled speed patterns. To improve ride comfort, it is necessary that smooth travelling which is in accordance with driver's intention are realized by the speed pattern. The desired speed, acceleration and jerk patterns are given by the form of polynomials of time. Under some constraints, such as acceleration and jerk should be always continuous at any points, the optimal patterns can be generated. It is interesting that three parameters to determine the pattern can be chosen arbitrarily, which enables us to design the pattern in a real-time manner, even when the driver changes his command. Some experimental results using the actual test EV "UOT (University of Tokyo) March II" show that the difference in speed pattern considerably affects the ride comfort.

キーワード: 速度パターン, 電気自動車, 乗り心地
(Keywords: speed pattern, electric vehicles (EVs), ride comfort)

1. 序 論

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。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。

本論文では、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る。まず2章では、自動車への速度パターン適用の可能性と方法について、自動車の走行特性に基づいて検討を行う。次に、3章で電気自動車のための速度パターン生成法について検討する。過去に提案された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リアルタイム生成法を提案する。4章では、実際に研究室で所有する純電気自動車 "東大三月号 II" に、提案手法によって生成された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。

2. 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。騒音や温湿度も乗り心地に影響するほか、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。乗り心地の検討に際して、上下振動・曲線通過時・加減速時の3つに分類して考える。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⁽²⁾。乗り心地を定量的に評価することは非常に難しく、様々な試みがなされているが、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⁽³⁾。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や、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た試みもある。

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、正確に把握できること、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。電気自動車も同様に電気モータによって駆動されるため、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。

自動車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⁽⁴⁾。自動車の加減速時における乗り心地を向上することは、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、乗客の快適性だけでなく安全性からも有効である。

2.3 . 電気自動車における速度パターンの適用

電気自動車における速度パターンの生成はブレーキ・アクセルの踏み具合によるドライバの意思推定、速度パターンの生成、生成された速度パターンを用いた車両運動制御、の3つの部分からなる⁽¹⁾。速度パターンを適用した運動制御により、次の2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 Fig. 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は、Fig. 2 のように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、乗り心地の向上を実現する。速度パターンの生成に際して、加減速の切り替え時に加速度・ジャークの変動を抑制することで、滑らかな走行が実現できる。同時に、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。また、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によってこれを実現する。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い、ドライバにかかる運転負荷を軽減する。

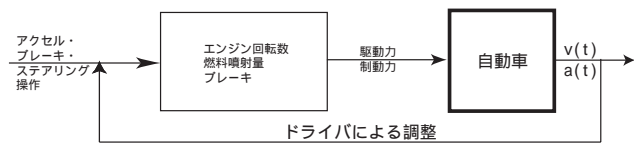


図1 ドライバによる自動車の運動制御

Fig. 1. Motion control of vehicles by driver

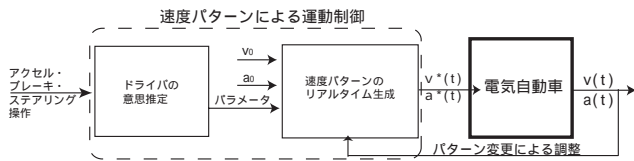


図2 速度パターンによる電気自動車の運動制御

Fig. 2. Motion control of EVs using speed pattern

2.3.1 . スムーズな走行

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

よい走行になるか検討する。加速度は自動車に乗っている乗客の体に直接かかる力となる。走行中に加速度が非連続になると、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。また、加速度は連続であっても、ジャークが非連続であると、スムーズな加速ができない。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。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り、このような速度パターンを生成する必要がある。

2.3.2 . 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律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⁽²⁾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。

3. 電気自動車のための速度パターン生成法

3.1 . リアルタイム速度パターン生成・変更

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し、指令値は常に変化する。速度パターンの実行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。このとき加速度が連続であってもジャークが非連続になると、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パターンをリアルタイムで生成しなければならない。

3.2 . 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

$$J = \int_0^{t_f} \left(\frac{da}{dt} \right)^2 dt \dots\dots\dots (1)$$

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 $\dot{x} = Ax + Bu$ をたてると、 v および a の解は下のようになる。

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

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

式 (3) を微分すれば、ジャーク α は次のようになる。

$$\alpha(t) = 6c_0 t + 2c_1 \dots\dots\dots (4)$$

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。 $v_\Delta = v_f - v_0$ とおくと、ジャークの連続性を保つという条件より、パターン終了時刻 t_f は

$$t_f = \frac{-2a_0 \pm \sqrt{4a_0^2 + 6\alpha_0 v_\Delta}}{\alpha_0} \dots\dots\dots (5)$$

となる。このとき α_0, a_0, v_Δ の符号によっては解 t_f が存在せず、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る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。この問題を解決するには、パターン変更点での場合分けと、それぞれ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、頻繁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、パターン変更毎に場合分けと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。

3.3 . 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

3.3.1 . ドライバによる指令

ドライバによるアクセル操作はモータへのトルク指令となるが、自動車の速度と走行抵抗の関係を考えれば、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られる。自動車を運転するとき、ドライバは微妙なアクセル・ブレーキ操作を行っている。ドライバが強い加速を要求するときはアクセルを大きく一気に踏み、またゆっくりとした加速を求めるときはアクセルを小さく徐々に踏み込むことになる。これはブレーキの場合にも同様のことが言える。すなわち、ドライバがアクセル・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すると考えられる。パターンを生成するにあたり加速度の最大値 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。

3.3.2 . 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

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。

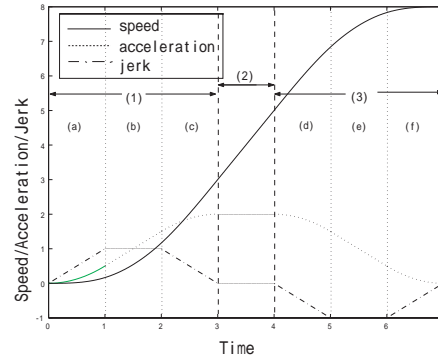


図3 速度パターン生成法
Fig. 3. Generation of speed pattern

- Fig.3 において、
- (1)(a)~(c) のようにジャークを連続的に増減させながら加速度を最大値 a_{max} に到達させる。最大ジャーク α_{max} を保ち、加速度を迅速に a_{max} まで増加させる。
 - (2) 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。
 - (3) v_f に到達したとき加速度とジャークを 0 にするため、加速度を徐々に下げる。(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、初期条件によらずあらゆる場合でパターンの生成が可能になる。

速度・加速度・ジャークパターンはそれぞれ

$$v(t) = C_0 t^3 + C_1 t^2 + C_2 t + C_3 \dots\dots\dots (6)$$

$$a(t) = 3C_0 t^2 + 2C_1 t + C_2 \dots\dots\dots (7)$$

$$\alpha(t) = 6C_0 t + 2C_1 \dots\dots\dots (8)$$

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

$C_1 = \frac{\alpha_0}{2}, C_2 = a_0, C_3 = v_0$ となる。

Fig.3 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。このため、 C_0 の決定に際して、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れば、ジャークの連続性を維持したジャークパターンを生成することができる。

3.4 . 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。 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生成を可能にする。

- ドライバや乗客の走行の好みに対応できる。
- 路面状況の変化にすばやく対応できる。
- 緊急ブレーキや急な環境の変化に対応できる。

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が、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。滑りやすい路面では、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、ドライバが過大な加速度指令を要求したときには、乗り心地が良い範囲で加速度の限界を設けることで、乗り心地の悪化を防ぐことも可能である。また、提案手法を用いたとき、 $C, a_{max}, \alpha_{max}, v_{\Delta}$ の数値関係によって加速度・ジャークの最大値に到達できない場合があり得る。しかし、パラメータは自由に設定できるために条件に合うようなパラメータを用いることで場合分けを排除し、提案した唯一通りの生成法によってパターンの計算を行うことが可能となる。

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 Fig. 4 のようにパターン変更時点での条件に依らずに滑らかな速度パターンをリアルタイムに生成できる。

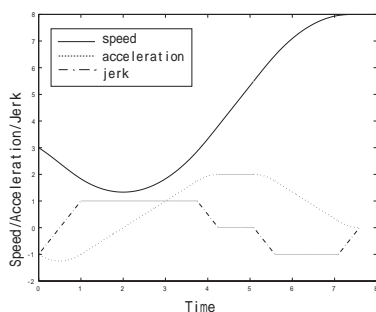


図4 速度パターンのリアルタイム変更

Fig. 4. Realtime change in pattern

4. 速度パターンを適用した電気自動車の運動制御実験

4.1 . 速度パターンを実現するための制御システム

生成された速度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、Fig. 5 のような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。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 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、速度指令 v^* から速度 v までの伝達関数は

$$\frac{v}{v^*} = \frac{M_n s + K_p}{M s + K_p} \dots\dots\dots (9)$$

と表される。

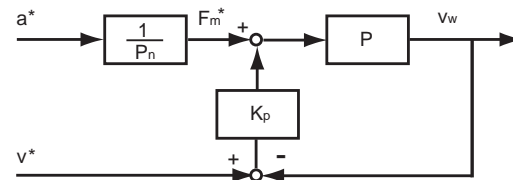


図5 速度パターンによる制御システム

Fig. 5. Block diagram of control system

4.2 . 東大三月号 II による実験

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リアルタイム生成し、これをもとに運動制御を行った。比較のため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。

実験の結果、Fig. 6 の (a), (b) にあるようにランプ入力も速度パターンも追従エラーが生じ、目標速度に達することができなかった。加速度の Fig. 6 (c), (d) からわかるように、加速中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。追従性を向上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、正確なパターン追従は実現できなかった。一定速走行では加速度の指令値は 0 となり、加速度フィード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

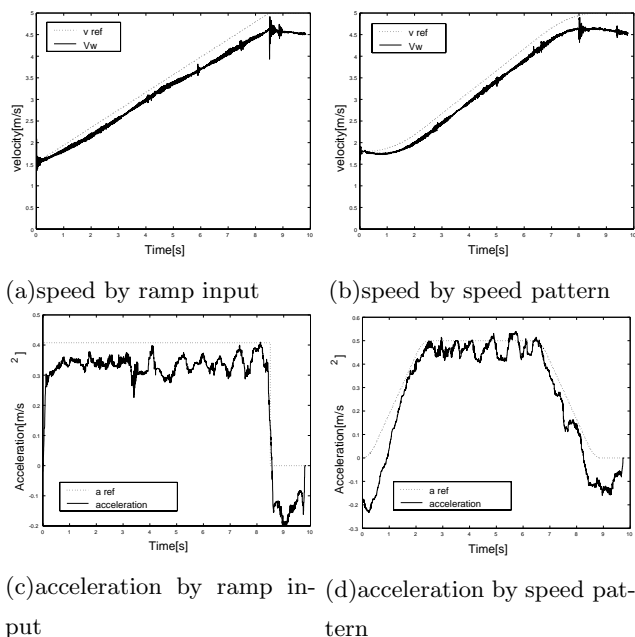


図6 ランプ速度指令と速度パターン適用による速度・加速度

Fig. 6. Velocity and acceleration by ramp input and speed pattern

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。

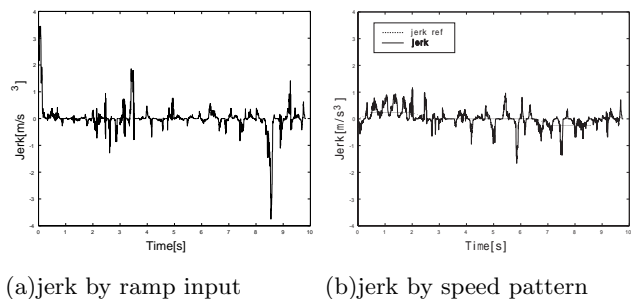


図7 ランプ速度指令と速度パターン適用によるジャーク

Fig. 7. Jerk by ramp input and speed pattern

追従性には問題があったが、Fig. 6 (a) ~ (d) より速度パターン適用の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、Fig. 7 (a), (b) にあるようにジャーク変動の抑制が達成された。ランプ入力の場合には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、Fig. 8, 9 では、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。速度・加速度の立ち上がりにはあきらかな差が生じた。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。

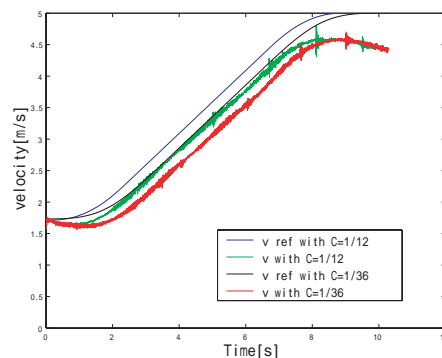


図8 異なる C を用いた速度

Fig. 8. Velocity with different C

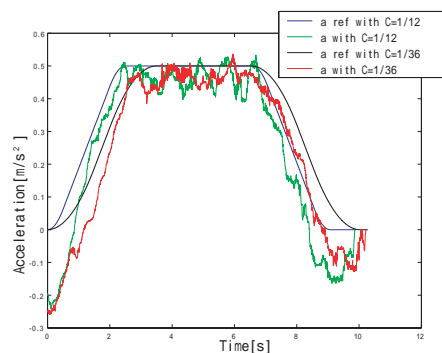


図9 異なる C を用いた加速度

Fig. 9. Acceleration with different C

4.3 速度パターンを実現する運動制御

前節で述べた制御系では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、フィードバックのみでは走行抵抗の補償ができないためであった。また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り、走行抵抗と足し合わさってパターンよりはるかに急に減速することは容易に想像できる。走行抵抗分をいかに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で大きな問題となる。

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ようため、走行抵抗分をトルク指令に直接補償する新たな制御システムを考える。走行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。この結果、Fig. 10, 11に示すとおり、追従性を大きくあげることができた。パターン終

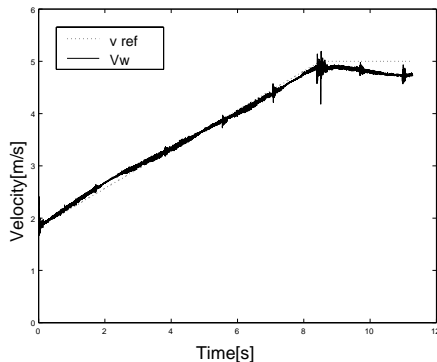


図 10 ランプ速度指令による速度

Fig. 10. Velocity by ramp input

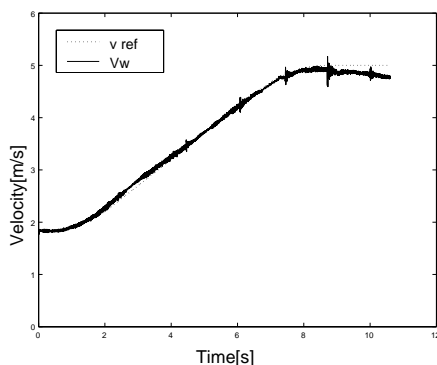


図 11 速度パターン適用による速度

Fig. 11. Velocity by speed pattern

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。

4.4 . 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調べることができた。特に、

- 最大加速度の影響は非常に大きい
- C の値は加速の立ち上がりに大きく影響する

などが感じられ、パラメータの決定により乗り心地を変化させることがわかった。実験ではパラメータの与える影響をわかりやすくするために、 C, a_{max}, α_{max} の値を変化させることで加速度の変動の仕方を変えてみたが、最大加速度を保つ際の乗り心地が全体の乗り心地に最も影響を与えた。異なる C の値で

実験を行った Fig. 8, 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けてははっ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。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。

5. 結 論

5.1 . 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。加速度・ジャークの連続性を維持しスムーズな走行を実現すると同時に、ドライバの意図を推定しイメージどおりの走行パターンを生成することにより乗り心地を向上させる新しい速度パターン生成法を提案した。提案手法では、ドライバの指令を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。

5.2 . 今後の課題

今後の課題としては以下のようなことがあげられる。

- ドライバの意図に沿ったパラメータの決定法
- 乗り心地の評価

ドライバの操作と他の条件からいかにパラメータを決定するかが速度パターンによる運動制御を行う上で課題である。また、内燃機関車と差別化を図るために定量的な評価による乗り心地向上の証明は欠かせないと思われる。

文 献

- (1) C.H.Tai, S.Sakai, Y.Hori: "Proposal of a Novel Method of Motion Control of Electric Vehicles Utilizing Speed Trajectory Shaping", *Proc. JIASC 2002*, Vol.3, pp.1289-1292, 2002. (in Japanese)
- (2) H.Takai: "Changes in Evaluation Methods for Riding Comfort", *RTRI REPORT*, Vol.9, No.8, pp.61-66, 1995. (in Japanese)
- (3) H.Shiroto, K.Fujinami, K.Omino: "Appropriate Assessment of Deceleration Practice in the Train Operation", *RTRI REPORT*, Vol.8, No.12, pp.43-46, 1994. (in Japanese)
- (4) F.Wang, K.Sagawa, H.Inooka: "A Study of the Relationship between the Longitudinal Acceleration/Deceleration of Automobiles and Ride Comfort", *The Japanese Journal of Ergonomics*, Vol.36, No.4, pp.191-200, 2000. (in Japanese)