

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

学生員 戴 建華 (東京大学)
正員 坂 井 真一郎 (宇宙科学研究所)
正員 堀 洋一 (東京大学)

Proposal of a Novel Method of Motion Control of Electric Vehicles Utilizing Speed Trajectory Shaping

Tai Chien Hwa, Student Member (The University of Tokyo), Shin-ichiro Sakai, Member (The Institute of Space and Astronautical Science), Yoichi Hori, Member (The University of Tokyo)

Electric motors, which provide the driving force in electric vehicles (EV), have excellent control characteristics that make possible advanced motion control methods. In this paper, the authors propose a novel method of motion control of EVs utilizing speed trajectory feedforward control. This is possible in EVs because the plant can be nominalized by using a disturbance observer. This paper examines the issues unique to Speed Trajectory Shaping in EVs and proposes the use of optimal control to generate speed trajectories for EVs. Effectiveness of the proposed method is verified through computer simulation.

キーワード：電気自動車, 速度パターン, 最適制御, 外乱オブザーバ

Keywords: Electric vehicle, speed pattern, optimal control, disturbance observer

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⁽¹⁾。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 [2] 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. 提案する速度パターン生成を用いた車体運動制御

本節では、まず、EV における速度パターン制御にあたって考慮すべき点を取り上げる。次に、最適制御理論を用いた速度パターンの生成を説明する。最後に、制御パラメータの決め方について述べる。

2.1 EV における速度パターン生成 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イケない。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、EV 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。しかし電気自動車においては、電気モータの出力トルクおよび回転速度が正確に把握できるという長所を生かし、外乱オブザーバ⁽²⁾を用いたフィードバック系を利用して、EV システムをノミナル化することが考えられる (図 1)。ノミナル

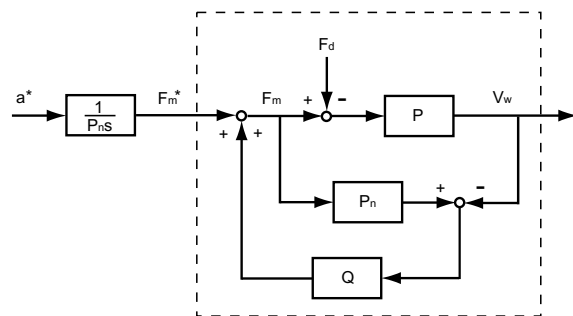


図 1 速度パターン FF と外乱オブザーバ FB を併用した制御系の概念図

Fig. 1. Block diagram of speed trajectory feedforward input with disturbance observer feedback

化されたプラントを含めた制御系の等価ブロック線図を図 2 に示す。これによって、フィードフォワードとフィードバッ

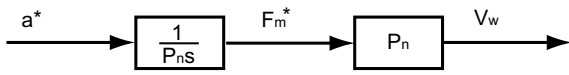


図2 提案手法の等価ブロック線図

Fig.2. Equivalent block diagram of proposed method

クの組み合わせでロバストな制御ができると考えられる。

2.2 最適制御 最適制御⁽³⁾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。ここでは、ハードディスクで用いられる SMART 制御手法⁽⁵⁾の考え方を適用する。乗り心地を良くすることを考慮し、評価関数 J は (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。

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

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 $\dot{x} = Ax + Bu$ を図 2 のように書くことができる。

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u \dots\dots\dots (2)$$

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) 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。

$$H = \frac{1}{2}u^2 + \lambda^T(Ax + Bu) \dots\dots\dots (3)$$

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 (4) 式で示される。

$$u = -B^T \lambda \dots\dots\dots (4)$$

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 (5) 式が得られる。

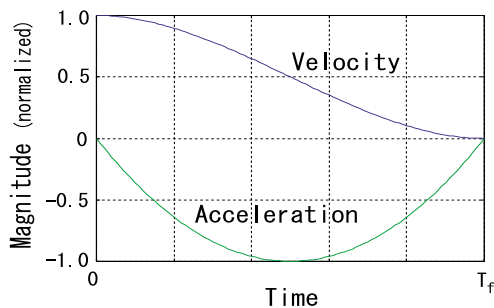


図3 正規化された最適速度および加速度パターン

Fig.3. Normalized optimal speed and acceleration trajectory

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & -BB^T \\ 0 & -A^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \lambda \end{pmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

(2) 式より、ベクトル x および行列 A 、 B を (5) 式に代入すると、(6) 式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{a} \\ \dot{\lambda}_1 \\ \dot{\lambda}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ a \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式の対角成分は全て 0 なので、 v および a の解は (7)、(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。

$$v(t) = c_0 t^3 + c_1 t^2 + c_2 t + c_3 \dots\dots\dots (7)$$

$$a(t) = 3c_0 t^2 + 2c_1 t + c_2 \dots\dots\dots (8)$$

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 (9) 式で表される。

$$\begin{cases} t = 0: & v = v_0, & a = 0 \\ t = T_f: & v = 0, & a = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

(9) 式を (7)、(8) 式に代入すると、(10)、(11) 式で表される最適速度パターンおよび加速度パターンが得られる。図 3 は正規化された最適速度パターンおよび加速度パターンを示す。

$$v(t) = v_0 \left[2 \left(\frac{t}{T_f} \right)^3 - 3 \left(\frac{t}{T_f} \right)^2 + 1 \right] \dots\dots\dots (10)$$

$$a(t) = \frac{6v_0}{T_f} \left[\left(\frac{t}{T_f} \right)^2 - \left(\frac{t}{T_f} \right) \right] \dots\dots\dots (11)$$

2.3 EV における速度パターンの決め方 以上では、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。タイヤの特性⁽⁹⁾を考えると、自動車が出し得る駆動力には限界がある(図 4)。一番簡単なモデルでは、最大駆動力 F_{dmax} は最大路面摩擦係数 μ_{max} と垂直反力 N の積であり((12) 式)、ニュートンの運動方程式で表すと最大加速度 a_{max} と車両質量 M の積となる((13) 式)。

$$\begin{aligned} F_{dmax} &= \mu_{max} N \\ &= \mu_{max} g M \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

$$F_{dmax} = a_{max} M \dots\dots\dots (13)$$

$$a_{max} = \mu_{max} g \dots\dots\dots (14)$$

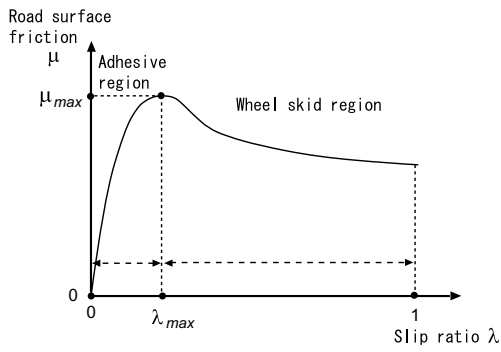


図4 μ-λ 曲線

Fig. 4. μ-λ curve

(12), (13) 式より、最大加速度は (14) 式で表される。次に、(11) 式をさらに時間 t に対して微分すると、(15), (16) 式が得られる。

$$\frac{da}{dt} = \frac{12v_0}{T_f^3}t - \frac{6v_0}{T_f^2} \dots (15)$$

$$\frac{d^2a}{dt^2} = \frac{12v_0}{T_f^3} \dots (16)$$

(15) 式より、 $t = \frac{1}{2}T_f$ のとき、停留点がある。(16) 式より、その点では最小値であるが、減速時の軌道であるため、加速度の絶対値が最大である。上述の条件に基づき、(11), (14) 式より、 T_f を (17) 式で設定することができる。このように設定すれば、車輪は空転領域に入らない。

$$T_f = \frac{3}{2} \frac{v_0}{\mu_{max}g} \dots (17)$$

また、加速度の時間微分は乗り心地の関数として見なすことができるので、生成された速度パターンにおける最大振動を α_{max} とすれば、

$$\left. \frac{da}{dt} \right|_{max} = \alpha_{max} \dots (18)$$

$$\alpha_{max} = \frac{6v_0}{T_f^2} \dots (19)$$

(18), (19) 式より、パターン設計時に乗り心地を定量的に評価することができる。

3. シミュレーションによる提案手法の検証

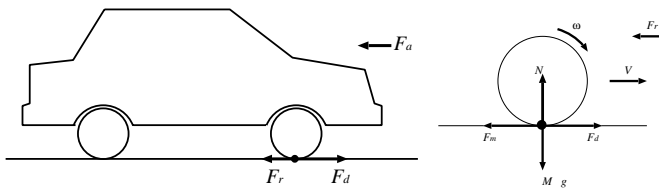


図5 1輪自動車モデル

Fig. 5. 1-wheel vehicle model

上述の提案手法の有効性を検証するため、MATLAB 上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の条件および結果をまとめて説明する。

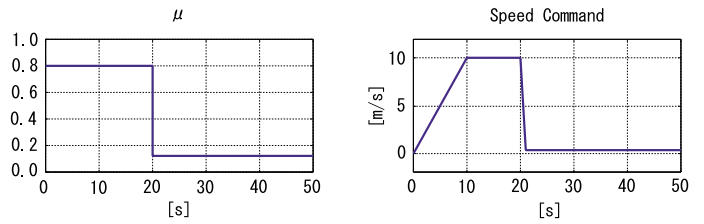


図6 シミュレーション条件

Fig. 6. Simulation conditions

3.1 シミュレーション条件 シミュレーションに使用したモデルは図5に示す1輪自動車モデルである。また、タイヤの動特性モデルには Magic Formula⁽⁶⁾ を用いた。シミュレーションの路面状態および速度指令値を図6に示した。路面の摩擦係数 μ は最初 0.8(アスファルト) であるが、20 秒経過したところで 0.12(氷) になる。速度指令値は停止状態から 10 秒間一定の加速度で加速してから、10 秒間一定速度を保つ。そして、路面 μ が 0.12 になったときに速度指

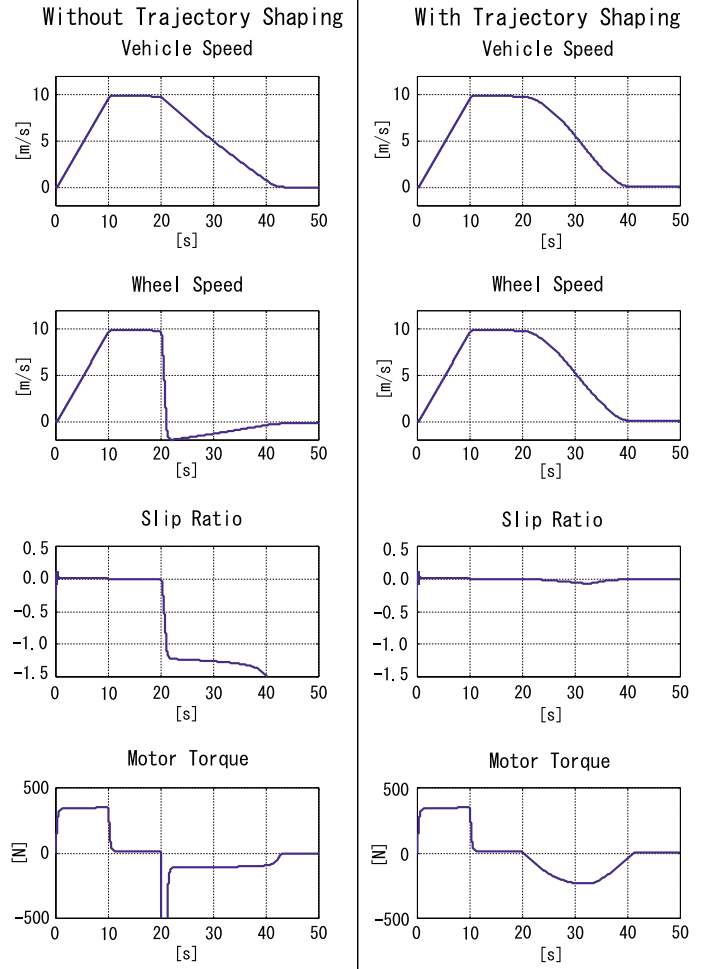


図7 シミュレーション結果

Fig. 7. Simulation results

令値が急に0付近まで落ちる(急ブレーキが踏まれる状態)。

3.2 シミュレーション結果 以上の条件の下で、二通りのシミュレーションを行った。比較対象として路面状態の急変に対してロバストであると知られているモデル追従制御(MFC)⁽⁴⁾が組み込まれたEVを使用する。まず、MFC制御だけが実施された車両とMFC制御ブロックの前に最適停車速度パターンをフィードフォワード入力とした車両のシミュレーションを行った。シミュレーション結果を図7に示した。図7を見ると、速度パターン生成を使用しない場合は、速度指令値が落ちたとき、車輪速度も急に落ち、スリップ率が上がって、車輪が空転状態に陥った。モータトルクを見ると、MFCはこの極限的な条件の下で瞬間的トルク上昇を抑えることができていない。

それに比べて、速度パターン生成を導入した場合、車体速度は車輪速度とともに、ゆっくり減少し、スリップ率の上昇も抑えられ、モータトルクは滑らかな曲線を描いている。さらに、車体速度に注目すれば、速度パターン生成を使用した場合は、使用しなかった場合より車両が数秒間早く止まったことが分かる。

次に、制御手法のロバスト性を確かめるために、速度パターン生成時に用いられた路面 μ の値を変化させて、シミュレーションを行った。このシミュレーションは以上と同じ路面状態および速度指令値の条件で行った。シミュレーション結果を図8に示す。図8により、速度パターン生成に用い

ば、タイヤは飽和領域に入らず、この問題が避けられるが、その場合、滑りにくい路面で停止するのに無駄な時間がかかってしまうことになる。 μ_{max} を直接測定することは極めて難しいが、 μ_{max} を推定する研究⁽⁸⁾も発表されている。このシミュレーションの結果により、 μ_{max} の推定値を使うならば、高い精度が必要となる。

4. 結 論

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、タイヤの特性による駆動力の飽和や乗り心地を考慮した速度パターンが生成される。生成されたパターンはフィードフォワード入力として使用する。これは、電気自動車が外乱オブザーバによってノミナル化できるからこそ可能である。

シミュレーション結果により、速度パターンを使用した場合、MFCで制御されている自動車さえ空転してしまう厳しい条件の下でもスリップの上昇が抑圧され、車両を滑らかに止めることができた。ただし、速度パターンを生成するときに、最大路面摩擦係数 μ_{max} の値を正確に設定する必要があることもシミュレーションによって分かった。

5. 今後の課題

制御系を路面摩擦係数に対してロバストにする必要があるので、路面 μ の推定値をリアルタイムで使用することや、適応制御を用いて T_f を変えながら制御することなどを検討して行きたい。また、今回で速度パターン生成を急な減速の場合に限ったが、より普通の場合で運転するとき(加速時も含めて)への適応も考えられる。その場合、人間のアクセルやブレーキの操作より加減速の指令値を推測することが必要となる。そして、試験車両を用いて実験を行い、提案手法を検証する予定である。

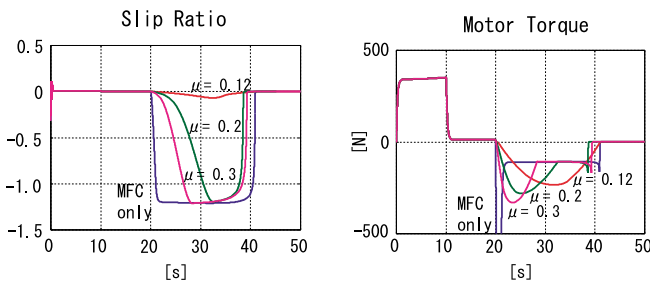


図8 設計 μ_{max} を変化させたときのシミュレーション結果

Fig. 8. Simulation results when μ_{max} is varied

た最大路面摩擦係数 μ_{max} を変化させると、MFCの場合よりは少し良いが、スリップ率が上昇し、モータトルクも滑らかではなくなる。パターン生成時に、 μ_{max} の真値が0.12に対して0.2を使ったときでも、スリップ率が大きく崩れて、ロバスト性に欠けていることが分かる。(17)式より、 μ_{max} の微小な変分 $\Delta\mu_{max}$ を考えると、

$$\frac{\Delta T_f}{\Delta\mu_{max}} = -\frac{3v_0}{2g} \frac{1}{\mu_{max}^2} \dots\dots\dots (20)$$

が得られる。 $0 \leq \mu_{max} \leq 1$ であることから、 μ_{max} の変動により T_f が大きく変わることが分かる。特に、 μ_{max} が小さければ小さいほど、 T_f の変動が大きい。もちろん、速度パターンを生成するときに、 μ_{max} をいつも小さい値にすれ

文 献

- (1) 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.
- (2) 堀洋一, 大西公平, 『応用制御工学』, 丸善, 1998.
- (3) Stengel R.F., *Optimal Control And Estimation*, Dover Publications, New York, 1994.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Bakker E., Nyborg L., Pacejka H.B., “Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies”, *SAE Technical Paper*, No. 870421, 1987.
- (7) 安部正人, 『自動車の運動と制御』, 山海堂, 1992.
- (8) 大埜健, Tai Chien Hwa, 堀洋一, “電気自動車におけるドライビング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.
- (9) 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.