ハプティックアクセルペダルを用いた電気自動車の 環境適応型走行支援制御

学生員 井莉 佳秀* 上級会員 村上 俊之*

Driving Support Control of Electric Vehicle
Adapting to Environment with a Haptic Accelerator Pedal
Yoshihide Igari*, Student Member, Toshiyuki Murakami*, Senior Member

(2010年11月7日受付, 2011年4月26日再受付)

With the increase in the number of drivers, traffic accidents have increased in number. The process of driving includes acknowledgment, judgment, and operation. Among these, acknowledgment is the most important because mistakes in acknowledgment accounts for 70% of the human factors causing accidents. This paper proposes the co-operation between a haptic pedal system and the driver, which gives the driver information about the road condition. It is confirmed that the proposed method helps in accurate acquisition of road condition information and transmission of this information to drivers; then, the driver's response is analyzed to check whether the information transmission is efficient and the support provided to the driver is adequate. Simulation and experiments were carried out to verify the validity of the proposed approach.

キーワード: 電気自動車, ハプティックペダル, 触覚フィードバック, スリップ抑制制御

Keywords: electric vehicle, haptic pedal, torque feedback, slip control

1. 序 論

自動車は現在身近な乗り物として社会に広く普及している。しかし自動車の普及に伴い、交通事故が社会問題となっているのもまた事実である。

自動車の運転は認知, 判断・予測, 操作の3段階に大別でき, 交通事故の原因も同様に3段階に大別できる。これらのプロセスのうち, 認知ミスは交通事故の人的要因の70%を占めている。従って, この認知ミスを減らすことができれば交通事故の多くは予防できると考えられる。現在ではこのような調査に基づき, 走行環境の認知に関して主な手段となっている視覚からの情報以外に, 別の手段で認知を支援するシステムが研究されている。

新しい情報伝達技術として注目されているものの1つとしてハプティクスがある。ハプティクスとは力覚や触覚といった感覚の再現と伝達に関する技術である。本論文では走行環境の認知支援のためにハプティクスを用いる。具体的にはアクセルペダルにアクチュエータを設置し, 力伝達が可能なペダルとして「ハプティックペダル」を構築し, 走行環境の中でも特に認知しにくい走行路面状態をペダルに

生じる力(トルク)を通じて運転手に伝達する。これにより運転手は走行路面状態を認知できるだけでなく, 従来の自動制御では困難であった危険走行状態の自覚および運転教示も達成できる。

従来のハプティックペダルを用いた研究においては, 多くが走行状態として車間距離を運転手に伝達する研究であり^①, 走行環境を運転手に伝達する研究は少ない。推定した路面状態をハプティックペダルを介して運転手に伝達している研究もわずかにあるが, 運転手への伝達具合や運転手の応答の考察まで行われているものはない。

そこで本論文ではハプティックペダルと運転手の協調に着目し, 車両自身による走行路面状態の取得および取得情報を運転手に伝達することによる運転支援法に加え, その後の運転手の応答を解析することで, 運転手にとって望ましい情報伝達と運転支援が行われているかを考察する。運転手の応答を解析するにあたり, ハプティックペダルと OpenGL による描画を併せた走行シミュレータを作成した。ハプティックペダルを介して運転手に路面状態を適切に伝えることで, 本来視覚による認識が困難であった路面状態を運転手に把握させ, 過大なスリップの抑制や車両に適切な走行状態を保たせることが本論文の目的である。

2. モデリング

本章では, 電気自動車およびハプティックペダルのモデ

* 慶應義塾大学
〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1
Keio University
3-14-1, Hi-yoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522, Japan

Fig. 1. Vehicle and wheel model

Table 1. Vehicle parameter

M	Mass of electric vehicle
V	Velocity of electric vehicle
F_d	Driving Force
J_{tr}	Inertia of wheel
θ_{tr}	Rotational angle of wheel
τ_{tr}^{mot}	Output torque of traction motor
r	Radius of wheel
N	Normal force
μ	Dynamic friction coefficient of wheel

ル化を行う。また自動車のスリップの程度を表すパラメータであるスリップ率も定義する。

〈2・1〉電気自動車のモデル化 本論文では車両の運動に関しては並進方向の運動のみを考慮する。またブレーキ動作はないものとしてモデル化を行う。車両は後輪のみで駆動されるものとする。車両と車輪のモデルを Fig. 1 に示す。車輪と地面の間に発生する路面摩擦力は (1) 式となる。また、車両の運動方程式は (2) 式、車輪の運動方程式は (3) 式となる。

$$F_d = \mu N \quad (1)$$

$$M\dot{V} = F_d \quad (2)$$

$$J_{tr}\ddot{\theta}_{tr} = \tau_{tr}^{mot} + \tau_{tr}^{fric} - rF_d \quad (3)$$

$$\tau_{tr}^{fric} = -D_{tr}\dot{\theta}_{tr} - F_{tr} \quad (4)$$

これらの運動方程式に車輪の空転状態を表すスリップ率 λ を導入する。スリップ率は車輪速度と車体速度より算出され、(5) 式となる。スリップ率 λ と動摩擦係数 μ は一般的に Fig. 2 のような関係がある⁽²⁾。

$$\lambda = \frac{r\dot{\theta}_{tr} - V}{\max(r\dot{\theta}_{tr}, V)} \quad (5)$$

スリップ率 λ を用いて車両モデルとタイヤモデルを統合すると、車両全体のモデルは (6) 式で表すことができる。

$$\{J_{tr} + r^2 M(1 - \lambda)\}\ddot{\theta}_{tr} = \tau_{tr}^{mot} + r^2 M\dot{\theta}_{tr}\lambda \quad (6)$$

〈2・2〉ハプティックペダルのモデル化 ハプティックペダルのモデルを Fig. 3 に示す。ハプティックペダルの運動方程式は (7) 式となる。また、ペダルからのトラクションモータへの入力 (8) 式のように定め、ペダル角度より PC に搭載された DA ボードからトラクションモータへの入力生成されるようにした。

$$J_p\ddot{\theta}_p = \tau_p^{hum} + \tau_p^{mot} + \tau_p^{dis} \quad (7)$$

$$\tau_{tr}^{mot} = K_{tr}(\theta_p - \theta_p^{allow}) \quad (8)$$

 Fig. 2. Relationship between μ and λ

Fig. 3. Pedal model

Table 2. Pedal parameter

J_p	Inertia of pedal
θ_p	Rotational angle of pedal
τ_p^{mot}	Output torque of pedal motor
τ_p^{hum}	Driver Input
τ_p^{dis}	Disturbance to pedal motor
K_{tr}	Traction Gain
θ_p^{allow}	Allowance of pedal angle

3. 制御系設計

本章では、ハプティックペダルの実現および路面状態のフィードバック法について説明する。

〈3・1〉ペダルの実現 通常のペダルは運転手の入力がない状態ではペダルが初期位置に戻るような反力が加わる。ハプティックペダルにおいても、同様の反力を返す。(7) 式において外乱がないと仮定すると、運転手の入力によりペダルは動作するが、モータからトルクを出力しなければ運転手はペダル反力を感じることはできない。そこでモータ出力によりペダル反力を (9) 式のように生成する。ここで K_p, D_p はそれぞれ、反力生成のためのばね、ダンパゲインである。このときのハプティックペダルの運動方程式は (11) 式となる。

$$\tau_p^{re} = -K_p\theta_p - D_p\dot{\theta}_p \quad (9)$$

$$\tau_p^{mot} = \tau_p^{re} \quad (10)$$

$$J_p\ddot{\theta}_p + D_p\dot{\theta}_p + K_p\theta_p = \tau_p^{hum} \quad (11)$$

(11) 式より、運転手の入力 τ_p^{hum} からペダルの角度 θ_p までの伝達関数は 2 次系となっており、ペダルの応答が振動的になる不足制動の状態は好ましくないと考えられる。よってペダルの反力 τ_p^{re} における K_p, D_p は、過制動もしくは臨界制動となるように (12) 式のように定める。

$$D_p \geq 2.0 \times \sqrt{J_p K_p} \quad (12)$$

またペダルをロバストに制御しつつ、運転手の入力を受け付けるために、外乱オブザーバ⁽³⁾と反力推定オブザーバ⁽⁴⁾

Fig. 4. Driving force observer

をハプティックペダルに適用した。ハプティックペダルにこれらの制御を統合させると、モータの出力トルクおよびハプティックペダル全体のモデルは (13), (15) 式となる。

$$\tau_p^{mot} = \hat{\tau}_p^{dis} + \hat{\tau}_p^{hum} + \tau_p^{re} \dots (13)$$

$$\hat{\tau}_p^{dis} = (-\tau_p^{dis}) + (-\tau_p^{hum}) \dots (14)$$

$$J_p \ddot{\theta}_p + D_p \dot{\theta}_p + K_p \theta_p = \hat{\tau}_p^{hum} \dots (15)$$

〈3・2〉 路面状態推定 走行中の路面状態，定性的には乾いたアスファルト等の路面は走行しやすい，もしくは雨で濡れている路面は滑りやすい等と表現できる路面状態を定量的に評価する場合，従来の研究においては，Fig. 2 に示すスリップ率 λ と動摩擦係数 μ の勾配 A から路面状況の情報を得ようとしてきた。勾配 A は (16) 式で定義される。

$$A = \frac{d\mu}{d\lambda} \dots (16)$$

$A > 0$ の領域は粘着領域と呼ばれ，安定走行している状態である。一方 $A < 0$ の領域は滑り領域と呼ばれ，不安定な走行状態である。そこで本論文では勾配 A を路面状態とみなし，勾配 A を推定することで路面状態の推定を行う。(16) 式より (17) 式が成り立つ。

$$A = \frac{d\mu}{d\lambda} \dots (17)$$

動摩擦係数 μ とスリップ率 λ は直接測定するのが困難なパラメータであるため，駆動力オブザーバ⁽⁵⁾とスリップ率推定オブザーバ⁽⁶⁾を用いてこれらのパラメータを推定する。駆動力推定オブザーバのブロック線図を Fig. 4 に示す。

次に車両全体の運動方程式をもとにオブザーバを構築し，スリップ率を推定する。車両全体の運動方程 (6) 式は (18) 式のように書きかえることができる。

$$\lambda = \frac{\dot{\omega}_{tr}}{\omega_{tr}}(1 - \lambda) + \frac{\tau_{tr} J_{tr} \dot{\omega}}{r^2 M \omega} \dots (18)$$

(18) 式より以下の (19) 式による車両駆動時のオブザーバを構築する。

$$\dot{\lambda} = \frac{\dot{\omega}_{tr}}{\omega_{tr}}(1 - \hat{\lambda}) + \frac{\tau_{tr} J_{tr} \dot{\omega}}{r^2 M \omega} \dots (19)$$

(19) 式中の $\hat{\lambda}$ は λ を積分することで逐次的に求める。さらに固定トレース法⁽⁷⁾を適用することで，路面状態の安定した推定が可能となる。

Fig. 5. Block diagram of whole system

〈3・3〉 路面状態フィードバック 勾配 A をハプティックペダルにフォースフィードバックすると，安定走行状態では正の方向に力が働くため，運転手から見てペダルはやわらかくなっているように感じられる。逆に不安定な走行状態では負の方向に力が働くため，運転手から見てペダルは硬くなっているように感じられる。したがって，本論文ではハプティックペダルの路面状態フィードバック方法として，(20) 式に示すように推定された勾配 $\hat{A}$ にゲインをかけた τ_{road} をフォースフィードバックする。

$$\tau_p^{road} = K_{road} \hat{A} \dots (20)$$

また，路面状態フィードバックを行う場合，(13) 式の τ_p^{mot} は (21) 式のように修正される。

$$\tau_p^{mot} = \hat{\tau}_p^{dis} + \hat{\tau}_p^{hum} + \tau_p^{re} + \tau_p^{road} \dots (21)$$

制御全体のブロック線図を Fig. 5 に示す。

〈3・4〉 ゲイン決定法 ここでは制御系における2つのゲイン K_{tr} , K_{road} の決定法について説明する。制御系全体のブロック線図より，運転手の入力 τ_p^{hum} からペダル角度 θ_p までの伝達関数を導出し，その伝達関数をもとにゲインを決定する。ハプティックペダルへの路面状態フィードバックフォース τ_p^{road} は (22) 式のように表せる。

$$\begin{aligned} \tau_{road} &= K_{road} \times \hat{A} \\ &= K_{road} \frac{1}{N} \frac{dF_d}{d\lambda} \dots (22) \end{aligned}$$

ここで，運動方程式より (22) 式は (23) 式となる。

$$\tau_{road} = -K_{road} \frac{r^2 M J_{tr} K_{tr} \theta_p}{\epsilon(\lambda)} - K_{road} (r^2 M)^2 J_{tr} \frac{\omega_{tr}}{\epsilon(\lambda)} \lambda \dots (23)$$

$$\epsilon(\lambda) = N r \{ J_{tr} + r^2 M (1 - \lambda) \}^2 (> 0) \dots (24)$$

このとき，ペダルモータの運動方程式 (7) 式とペダルモータの出力 (21) 式より，運転手の入力 τ^{hum} からペダル角度 θ_p までの伝達関数は (25) 式となる。

$$\frac{\theta_p}{\tau^{hum}} = \frac{1}{J_p s^2 + D_p s + K_p'} \dots (25)$$

$$K_p' = K_p + \frac{K_{road} K_{tr} r^2 M J_{tr}}{\epsilon(\lambda)} \dots (26)$$

ペダルの応答が振動的にならないように，ゲイン K_{tr} , K_{road} は (30) 式のように決める。

Fig. 6. Simulator display

$$K_{road} > 0 \dots\dots\dots (27)$$

$$K_{tr} > 0 \dots\dots\dots (28)$$

$$K_p' > 0 \dots\dots\dots (29)$$

$$K_{road} K_{tr} \leq \left(\frac{D_p^2}{4J_p} - K_p \right) \left(\frac{\epsilon(\lambda)}{J_{tr} r^2 M} \right) \dots\dots\dots (30)$$

さらにゲイン K_{road} は本論文の提案にあるように、運転手への適切な伝達と運転手を含めたシステム全体の安定性を実現のため、運転手の応答を解析することで決定する。

4. 走行シミュレータ実験

運転手の応答を解析するにあたり、実機ハプティックペダルをアクセルペダルとする走行シミュレータを作成した。シミュレータ実験の流れを説明する。まず運転手が実機ハプティックペダルを操作することで生じるペダルの回転角 θ_p の変位を、カウンターボードを通して PC 内に取り込む。次に取り込んだ情報を使い、C 言語によって記述した制御プログラムより車両全体の運動からペダルの反力および路面状態を算出する。この指令を DA ボードおよびモータドライバを通してハプティックペダルに与え、運転者に反力を返すとともに路面状態をフォースフィードバックする。同時にペダル角度に対応して OpenGL 上で描画した小型電気自動車のモデルが動く。ここでリアルタイム制御および OpenGL のリアルタイム描画を行うために、OS に RT-Linux3.2pre (kernel20.3.10) を用いた。画面より運転手は実際に車両に乗車することなく、車両の走行感覚を知ることができる。しかし画面によって伝わるのは車両の速度感覚であり、路面状態やスリップの有無は画面から知ることはできない。つまり路面状態やスリップの有無はハプティックペダルのみにより伝達される。このため、実際に電気自動車を運転する実験を行うよりもデータの採取が容易である。またハプティックペダルと運転手との応答が実験環境に左右されにくく、比較・解析に有用な安定したデータが採取できる。走行シミュレータで使用したパラメータのうち、路面状態フィードバックフォースのゲイン以外のパラメータを Table 3 に示す。

〈4・1〉 フィードバックフォースのゲインと運転手の伝達に関する実験 本節では、路面状態フィードバックフォースのゲインの違いが、運転手への路面状態伝達にどのような影響を及ぼすかを考察する。路面状態が現在の状態よりも良くなった場合と悪くなった場合について、ゲインをさまざまに変えて走行シミュレータによる伝達実験を行った。

Table 3. Simulation parameter

M	450.0	[kg]
r	0.18	[m]
J_{tr}	10.2	[kg m ²]
J_p	0.019	[kg m ²]
K_p	2.0	
D_p	0.7	
K_{tr}	150.0	
θ_p^{allow}	0.09	[rad]
g_{dob}	10.0	[rad / s]
g_{rtob}	10.0	[rad / s]
g_{dfob}	20.0	[rad / s]

本論文では電気自動車の並進方向のみを考えているので、運転手はアクセルペダルのみを使用するものとしハンドル操作は行わない。また本実験では、実機ハプティックペダルを通じて運転手に路面状態が伝達されたかを知るためにプッシュスイッチを設けた。路面状態フォースフィードバックによってペダルの硬さが変化しているのを認知している間、運転者はスイッチを押し続けるようにした。スイッチが押されていない時は 0 を、押している時は 1 を値として返すようになっている。Fig. 7, Fig. 8 はそれぞれの伝達実験結果を示す。実験の結果、次のことがわかった。

- ゲインが小さすぎるとペダルの硬さ変化が運転手に伝達されない。
- ゲインが大きすぎると運転手の入力トルクの応答が振動的になる（ペダルの操作性が悪くなった）。
- ペダルがやわらかくなる場合のほうがペダルが硬くなる場合に比べ運転手に伝達されやすい。

このためゲイン一定に設定すると、ペダルの硬さ変化が伝達されなかったり、システムが不安定になってしまうことが考えられる。ペダルが柔らかくなる場合は勾配 A が正の値を取り、ペダルが硬くなる場合は負の値を取ることから、勾配 A の正負によってゲインを切り替える必要があるということがわかった。

〈4・2〉 走行シミュレータを用いた運転支援実験 本節では、前節で解析した路面状態フィードバックフォースのゲインの考察を基にゲインを決定し、ハプティックペダルの硬さ変化によって運転支援がなされているか確認する。また、この実験は 3 名の被験者に協力して頂いた。

乾いたアスファルトの路面から凍結した路面に急変し、その後再び乾いたアスファルトの路面に戻るという路面状態において、走行シミュレータによる運転支援実験を行った。前項の実験結果および考察より、路面状態フィードバックフォースのゲインは次のように決定した。

$$K_{road} = \begin{cases} 0.5 & (\hat{A} \geq 0.0) \\ 3.0 W & (\hat{A} < 0.0) \end{cases} \dots\dots\dots (31)$$

ここで (31) 式中の W は λ の関数であり、(32) 式のように設計した。勾配 A は、滑り領域内ではスリップ率の変化に伴う値の変化が小さいため、車両のスリップの度合いを情報として運転手に伝達するには不十分である。そのためゲインをスリップ率 λ の関数にすることで、フォースフィー

 (a) $K_{road} = 0.1$

 (b) $K_{road} = 0.5$

 (c) $K_{road} = 1.0$

 Fig. 7. Driver input and response (Icy $\Rightarrow$ Dry)

ドバックの強さによって運転手にスリップの度合いを伝達することができる。

$$W = \frac{1}{1 + \exp^{-300(\hat{\lambda} - 0.1)}} \dots\dots\dots (32)$$

また、スリップ率が0.1を超えた場合は、この(32)式の値はほぼ1となり、スリップ率が0.1未満の場合は値がほぼ0となる。ここでスリップ率が0.1を超える場合とは、車両が安定な走行状態から不安定な走行状態に遷移しそうな状態と言い換えることができる。

続いてシミュレーション状況について説明する。同様に、運転手はアクセルペダルのみを使用するものとしハンドル操作は行わない。また運転手は一定の力でペダルを踏み続けるが、ハプティックペダルの硬さが変わった場合にはペダルに従い自然に力を調節するよう被験者に指示をした。この動作によりアクセルペダルの踏み具合が変化し、運転支援の評価指標の一つであるスリップ率が変化する。ゆえにペダルに従った結果スリップ率が改善されれば、運転支援できたといえることができる。また同時に路面状態フォースフィードバックの大きさと、運転手の入力についても観察する。ここで結果を示す図12,13において背景色が異なる区間は、凍結した路面を走行中であることを表す。

 (a) $K_{road} = 1.0$

 (b) $K_{road} = 2.0$

 (c) $K_{road} = 4.0$

 Fig. 8. Driver input and response (Dry $\Rightarrow$ Icy)

まず路面状態フォースフィードバックがない場合について考察する。Fig. 9(a)をみると、ペダルの硬さが一定なため路面状態が変わっても運転手の入力に変化していないことがわかる。ペダルの角度も変化していない。またFig. 9(b)をみると、スリップ率が急激に増大し、路面状態が良くなるまで大きい値を保持したままであることがわかる。つまり運転手は現在スリップしやすい危険な路面を走っているということに気づいておらず、車両が不安定な状態のまま走行してしまっているといえる。

次に路面状態フォースフィードバックを行った場合について考察する。Fig. 10(a)をみると、路面状態が急変しスリップ率が増加することで勾配Aが負の値となると共にペダルが硬くなり、運転手がそれを感じてペダルを緩めていることがわかる。この動作により車両とタイヤの速度の変化が緩やかになり、それにつれてFig. 10(b)にあるようにスリップ率が路面状態フォースフィードバックをしない場合よりも改善されていることがわかる。また運転手の入力が大きくなっても、フォースフィードバックが行われているためにペダルが硬く、ペダル角度がほとんど変化していないこともわかる。ペダル角度の微小な変化は車両、タイヤ速度を若干上げるが、スリップ率が0.1を超えて大きくな

Fig. 9. Experimental result (no Assist)

Fig. 10. Experimental result (with Assist)

ること関数 W の値が大きくなり、運転手がそれ以上ペダルを踏み込まないようにペダルが再び硬くなっている。そして路面状態が乾いたアスファルトの路面に戻ると、路面状態フォースフィードバックは正の値を取りペダルが柔ら

かくなっていることがわかる。それに伴いペダルの角度が再びスリップ以前の角度に戻っている。

提案手法はペダルの硬さを変えることで、スリップ率が改善されるような走行を運転手に促しており、路面状態伝達および走行支援が達成できたといえる。

5. 結 論

本論文では、ハプティックペダルと運転手の協調に着目し、車両自身による走行路面情報の取得および取得情報の伝達による運転支援法を提案した。さらに運転手の応答を解析し、運転手にとって望ましい情報伝達と運転支援が行われているかを考察した。実機ハプティックペダルを用いた走行シミュレータ、およびシミュレータを用いた運転手の応答解析により、提案手法の有効性を確認した。

文 献

- (1) M. Mulder, M. Mulder, M.M. van Paassen, S. Kitazaki, S. Hijikata, and E.R. Boer: "Reaction-Time Task During Car-Following with an Active Gas Pedal", 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol.3, 10-13 Oct. pp.2465-2470 (2004)
- (2) H.B. Pacejka and E. Bakker: "The Magic Formula Tyre Model", Proc. 1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis (held in Delft, The Netherlands, Oct 21-22, 1991)
- (3) K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami: "Motion control for Advanced Mechatronics", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.1, No.1, pp.56-57 (1996)
- (4) T. Murakami, N. Oda, Y. Miyazawa, and K. Ohnishi: "A Motion Control Strategy Based on Equivalent Mass Matrix in Multidegree-of-Freedom Manipulator", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.42, No.2, pp.123-130 (1995)
- (5) H. Sado, S. Sakai, and Y. Hori: "Road Condition Estimation for Traction Control in Electric Vehicle", *IEEE Proc. on Industrial Electronics*, Vol.2, pp.973-978 (July 1999)
- (6) K. Fujii and H. Fujimoto: "Slip ratio estimation and control without detection of vehicle speed for electric vehicle (in Japanese)", Proc. IEE of Japan, Technical Meeting Record, IIC-06-01, pp.1-6 (2006)
- (7) 新中新二：適応アルゴリズム—離散と連続，真髄へのアプローチ，産業図書，東京 (1990)

井 莉 佳 秀（学生員） 1986 年 9 月 4 日生。2009 年 3 月慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。同年 4 月同大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修士課程入学。

村 上 俊 之（上級会員） 1965 年 10 月 5 日生。1993 年 3 月慶應義塾大学大学院電気工学専攻博士課程修了。現在、同大学理工学部システムデザイン工学科教授。工学博士。