

# ヒューマンアクティブフィードバックによる電気自動車の環境認知型運転支援制御 Environmental Cognition Based Driving Assist Control for Electric Vehicle by Human Active Feedback

80815531 小倉啓 (Hiraku Ogura) Supervisor 村上俊之 (Toshiyuki Murakami)

## 1 序論

自動車が身近な乗り物となり、さらに高齢化が進展する現代においては、経験や身体的能力の違いに依らず誰でも安全に運転できるような運転支援システムが必要である。そこで、本研究では次の二点を達成する運転支援システムの実現を目的とする。

- 認知支援：車両状態、路面状態の伝達
- 操作支援：ペダルとハンドルの適切な操作バランス

これを実現する方法として、本研究ではペダルとハンドルの反力を制御し、運転者を支援する。ペダルとハンドルの反力を変更することで、運転者は車両状態、路面状態を知ることができる。さらに運転者の操作が改善するように反力を制御することで、適切な操作が促される。アクセルペダルとハンドルの反力制御を実現するために、本研究では「ハプティックペダルシステム」と「ステアバイワイヤシステム」を用いる。

## 2 モデリング

### 2.1 ペダル、ハンドル

図1に本研究で提案するペダルシステムのモデルを表す。アクセルペダルは回転軸に設置されたモータのトルクを制御することで、自由にそのステイフネスを変更することができる。運転者はペダルのステイフネス変化もしくはその反力を感じることで路面状態を認知し、適切な操作へと移行することができる。このように触覚(力覚)として運転者に情報提示できるペダルを、本研究ではハプティックペダルと呼ぶ。この図よりハプティックペダルの運動方程式は式のように表すことができる。

$$J_p \ddot{\theta}_p = \tau_p^{hum} + \tau_p - \tau_p^{dis} \quad (1)$$

ステアバイワイヤ (SbW) システムでは、ハンドルとステアリングギヤを接続するステアリングシャフトの機械的な連結がなされていない。図2にSbWシステムの概略図を示す。図2より、SbWにおける上位モータの運動方程式は式のように表すことができる。

$$J_u \ddot{\theta}_u = \tau_u^{hum} + \tau_u - \tau_u^{dis} \quad (2)$$

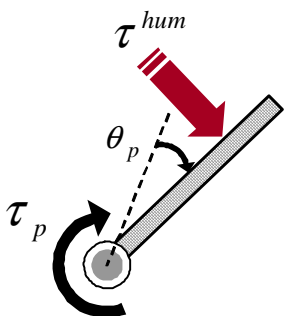


図1 ハプティックペダル

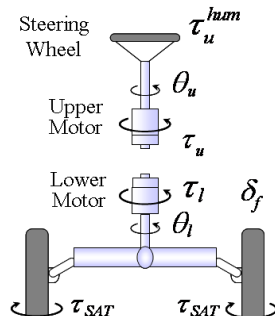


図2 ステアバイワイヤ

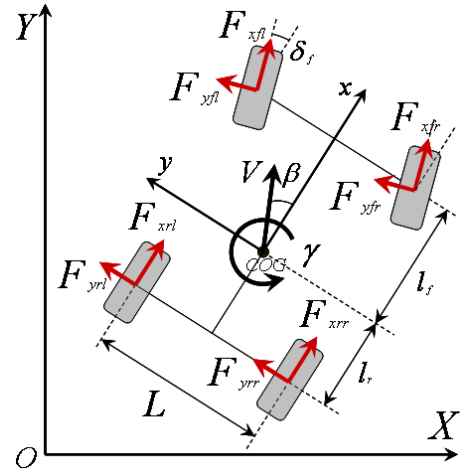


図3 車両モデル

SbW システムでは、その機構ゆえに下位モータに何らかの制御を適用しなければ、ハンドルを切っても車両を動かすことができない。そこで、本研究では次のような PD 制御を外乱推定オブザーバと組み合わせ下位モータに適用する。

$$\theta_l^{cmd} = \theta_u^{res} \quad (3)$$

$$\tau_l = K(\theta_l^{cmd} - \theta_l^{res}) + D(\dot{\theta}_l^{cmd} - \dot{\theta}_l^{res}) \quad (4)$$

### 2.2 車両動力学、タイヤ路面間の摩擦力

図3は車両の運動モデルを示す。ここで、車両の横滑りやステアリング角の変化が微小だと仮定すると、車両の運動は自転車のように2輪で扱うことができる。この仮定の下、車両前後方向、横方向、回転の運動方程式は次のように導かれる。

$$M\dot{u} = 2F_{xf} + 2F_{xr} + M\gamma v \quad (5)$$

$$M\dot{v} = 2F_{yf} + 2F_{yr} - M\gamma u \quad (6)$$

$$J\dot{\gamma} = 2l_f F_{yf} - 2l_r F_{yr} \quad (7)$$

$F_x, F_y$  はタイヤと路面の間に働く縦方向、横方向の摩擦力であり、それぞれ駆動力(制動力)・横力と呼ばれる。この摩擦力が車両の加速や減速、旋回を可能にしている。

タイヤに働く駆動力(または制動力)と横力は、図4に示すように、どのような場合にも次式を満足しなければならない。

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq \mu^{max} F_z \quad (8)$$

つまり、タイヤ路面間に働く水平面内のあらゆる方面の力の合力は、そのときの垂直荷重にその路面の最大摩擦係数を掛けた値以上になることはできず、合力のベクトルは半径  $\mu^{max} F_z$  の円内にとどまる。この円は摩擦円と呼ばれる。もし駆動力(または制動力)と横力のどちらかがその最大値に達してしまった場合、タイヤの摩擦力は飽和してしまいそれ以上の摩擦力を発生することができない。したがって、そのような状況では運転者がどのような操作をしても車両の運動に反映させることはできなくなってしまう。

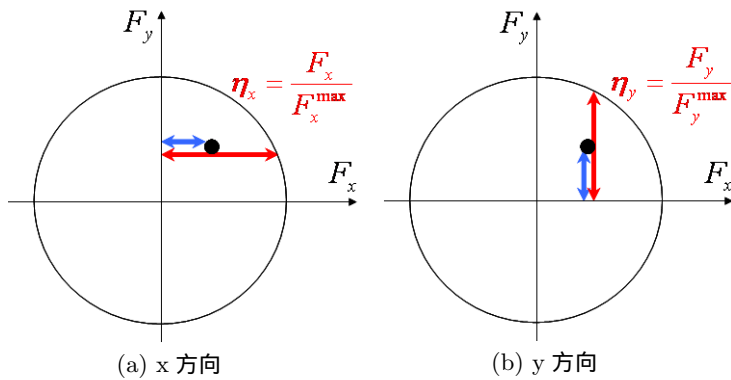


図4 摩擦円と粘着利用率



図5 ドライビングシミュレータ

### 3 反力制御によるヒューマンアクティブフィードバック

本研究では、車両状態と環境状態を運転者へ伝達し、運転者がペダルとハンドルを適切に操作できるように支援するシステムを提案する。そこで、車両のスリップ率や横滑り角、路面の最大摩擦係数によって変化するタイヤ路面間の摩擦力に着目する。タイヤ路面間の摩擦力が飽和してしまった場合、運転者がどのような操作をしたとしても車両の挙動を変えることはできなくなる。したがって、タイヤ路面間の摩擦力は車両安定性を判断する指標になりうる。また、運転者がこの車両安定性に関する情報を認知することができれば、危険な操作を予防するのに有効だと考えられる。

以上の考察に基づいて、粘着利用率と呼ばれるパラメータを次式で定義する。

$$\eta_x = \frac{F_x}{F_x^{max}}, \quad \eta_y = \frac{F_y}{F_y^{max}} \quad (9)$$

本研究ではこの粘着利用率を用いてアクセルペダルおよびハンドルの反力を制御し、運転支援を実現する。粘着利用率を用いて次式のようにペダルおよびハンドルのトルクを設計する。

$$\tau_i = -D_i \dot{\theta}_i - K_i \theta_i - \eta_i \hat{\tau}_i^{hum} \quad (10)$$

このような反力を加えると、(1),(2)式から各モータの運動方程式は次のような2次系に書き換えることができる。

$$J_i \ddot{\theta}_i + D_i \dot{\theta}_i + K_i \theta_i = (1 - \eta_i) \hat{\tau}_i^{hum} \quad (11)$$

ただし、 $i = p, u$ とし、ペダルまたはハンドルにおけるパラメータであることを表す。この式からペダルおよびハンドルを動かす作用力を粘着利用率によって変化させられることがわかる。もし $\eta$ が0の時には、運転者の操作力が完全にペダルに伝達され、通常のペダルと同じやわらかさで操作できる。しかし $\eta$ が増加するに従い、運転者の操作力はペダルの挙動に反映されに

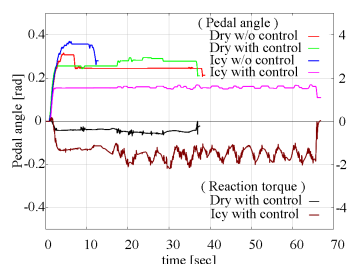


図6 ペダル角度, 反力

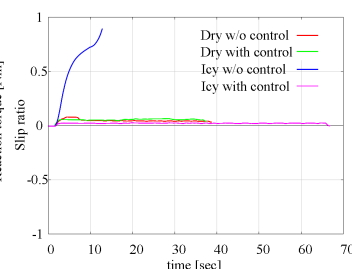


図7 スリップ率

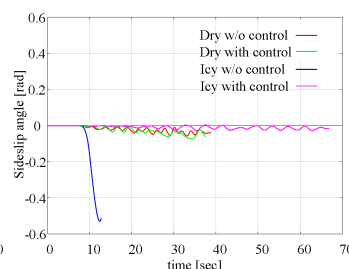


図8 横滑り角

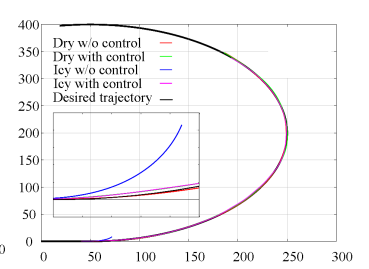


図9 走行経路

くくなり、運転者はペダルやハンドルが重く(固く)なったと感じることになる。粘着利用率は車両状態・路面状態によって変化するため、固さもそれらに依存して変化させることができ、認知アシスト・操作アシストが実現できる。

### 4 ドライビングシミュレータ

実機のペダルとハンドルを用いたドライビングシミュレータ(図5)により、提案手法の有効性を検証した。DryとIcyの路面上を走行した際の、結果を図6から図9に示す。ペダルは路面によって異なった反力を返し、その反力によって操作が変更されていることがわかる。このような操作支援の結果、スリップと横滑りが大きく抑制され、目標軌道を安定して走行できていることが確認できる。

### 5 結論

本研究では、アクセルペダルとハンドルを利用した運転支援システムを提案した。推定した車両状態と路面状態に基づいてペダルとハンドルの重さ(固さ)を変更することで、認知支援・操作支援が同時に実現できる。本論文では、粘着利用率の推定法とそれを用いた反力制御法を提案し、ドライビングシミュレータにより有効性を確認した。

### 参考文献

- [1] Y. Hori: "Future Vehicle Driven by Electricity and Control-Research on Four-Wheel-Motored "UOT Electric March II", " *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 5, October, 2004
- [2] Y. Yamaguchi and T. Murakami: "Adaptive Control for Virtual Steering Characteristics on Electric Vehicle Using Steer-by-Wire System", " *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, NO. 5, May, 2009