

3306 前後輪アクティブステアを有する電気自動車における 航続距離延長のための最適姿勢の設計法の提案

Proposal of Method of Designing Optimum Attitude for Range Extension Control for Electrical Vehicle that poses Front and Rear Active Steering

○ 米 俊宏（東京大学） 藤本 博志（東京大学）

Toshihiro Yone, Hiroshi Fujimoto
The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba

In this paper, a method of designing front and rear steering pattern is proposed. Front and Rear active steering enable vehicle to be controlled by lateral force and side slip angle independently. Thus, researches have been done to decrease cornering resistance for each seconds. However, those methods can not completely realise the minimum energy consumption y in total. Therefore, a method of designing the optimal heading angle pattern under trajectory patterns and a control to realise the optimal heading pattern sre proposed. The effectiveness of proposed method is verified by simulations and experiments.

Key Words: electric vehicle, front/rear active steer, range extension control system

1 はじめに

地球温暖化問題や化石燃料枯渇問題への対策として、電気自動車 (Electric Vehicle : EV) が国内外で大きく注目されている。環境面以外にも、モータを駆動力に利用する EV は既存の内燃機関自動車と比べ以下の点で優位性を持つ^[1]。

1. エンジンと比べてトルク応答が2桁速い。
2. 小型高出力なインホイールモータを用いれば分散配置ができ、各輪を独立に制御できる。
3. モータに流れる電流から、モータに生じているトルクが正確に測定可能である。

これらのような利点を生かして、トラクション制御^[2]や姿勢・走行安定化制御^[3, 4]などの研究が数多く発表されている。

一方、電気自動車の短所として一充電走行距離の短さが挙げられ、電気自動車の普及を妨げている。そこで、直進時の加速を含む車両の走行パターンを制御によって変更することにより、車両の走行におけるエネルギー消費を抑える手法が複数提案されている^[5, 6]。また、複数のモータを搭載した車両において、旋回中のエネルギー消費を抑える手法が複数提案されている^[7, 8]。

特に著者らの研究グループでは一充電走行距離の問題に対し航続距離延長制御システム (Range Extension Control System: RECS) を提案した^[9, 10]。このシステムはソフトウェアのみによって成り立ちハードウェアの改造を必要としない。特に、文献^[10]では定常旋回時において、左右のモータ出力に差をつけることで消費エネルギーを抑える手法を提案している。しかし、定常ではない旋回を含む経路では経路全体での消費エネルギーの低減に関する研究は行われてこなかった。

また、近年自動車の自動運転技術の開発が盛んに行われている。電気自動車はその制御性の高さから自動運転に適しており、今後の自動運転技術の適用が期待される。このことから特に危険回避の分野では最短回避時間を実現する経路設計および制御の研究が多く行われている^[11]。

そこで本稿でも、危険回避と同様に車両の姿勢設計について提案する。ただし、回避時間ではなく消費エネルギーを最小化する。前後輪アクティブステアを有する車両においては、車体横滑り角とヨーレートが独立に制御できる。そのため、同一の軌跡上の走行でも向首角に自由度を持つ。このことを利用して定常ではない旋回を含む軌跡において、走行時の消費エネルギーが最小となる車両姿勢を設計し、実車を用いた実験により提案手法の有効性を確認する。



Fig.1 FPEV2-Kanon

Table.1 Parametres of FPEV2-Kanon

Vehicle Mass (m)	803 kg
Yaw Moment of Inertia (I)	$617.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Wheelbase (l)	1.7 m
Distance from CG (l_f) to Front/Rear Axle (l_r)	0.999 m 0.701 m
Front Cornering Stiffness (C_f)	12500 N/rad
Rear Cornering Stiffness (C_r)	29200 N/rad

2 実験車両

実験車両として著者らの研究グループが製作し、本稿で使用した電気自動車「FPEV2-Kanon」を図1に示す。本車両には東洋電機製造製アウターロータ型インホイールモータを4輪全てに搭載している。また、前後輪アクティブ操舵が可能である。この車両の電気回路はバッテリー、チョップパ、インバータ及びモータからなり、チョップパの出力電圧を V_{dc} 、インバータの入力電流を I_{dc} として消費電力の測定が可能である。FPEV2-Kanon の各パラメータの値を表1に示す。

3 車両の運動と消費エネルギー

本稿において車両速度 V は一定とする。走行中の消費電力 P は駆動用モータの出力 P_m 、前後輪のアクティブステアの消費電力 P_{sf}, P_{sr} の和によって表される。

$$P = P_m + P_{sf} + P_{sr} \quad (1)$$

ただし、ここで駆動用モータおよびインバータにおける損失は無視している。

駆動用モータの出力 P_m を求める。走行中の2輪車両モデルより、以下の式が成り立つ。ただし、 F_y は横力、 m は車両質量、 β は車体横滑り角、 C_f, C_r は前後輪コーナリングスティフネス、 l_f, l_r は車両重心点と前後車軸間の距離、 α_f, α_r は前後輪車輪横滑り角、 M_z はヨーモーメント、 I は車両慣性モーメント、 θ は

向首角である.

$$F_y = mV(\dot{\beta} + \dot{\theta}) = -2C_f\alpha_f - 2C_r\alpha_r \quad (2)$$

$$M_z = I\ddot{\theta} = -2C_f l_f \alpha_f + 2C_r l_r \alpha_r \quad (3)$$

本稿においては, 駆動用モータ出力およびステアリングの消費電力のみを考慮する. 駆動用モータ出力 P_m は走行抵抗 F_r および車両速度 V によって以下のように表される.

$$P_m = F_r V \quad (4)$$

走行抵抗 F_r は転がり摩擦, 空気抵抗, コーナリング抵抗などにより発生するが, 本稿ではコーナリング抵抗のみを考慮する. 走行抵抗は以下の式で表せる.

$$F_r = 2C_f\alpha_f^2 + 2C_r\alpha_r^2 \quad (5)$$

これに式 (2) と式 (3) から α_f, α_r を求めて代入すると以下の式となる.

$$\begin{bmatrix} \alpha_f \\ \alpha_r \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -C_f & -C_r \\ -C_f l_f & C_r l_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

これを式 (4) に代入するとモータ出力 P_m は以下ようになる. ただし, l はホイールベースであり, $l = l_f + l_r$ をみす.

$$P_m = F_r V = \frac{V}{2l^2} \left\{ \left(\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_r} \right) (I\ddot{\theta})^2 + 2 \left(\frac{l_f}{C_r} - \frac{l_r}{C_f} \right) I\ddot{\theta} F_y + \left(\frac{l_r^2}{C_f} + \frac{l_f^2}{C_r} \right) F_y^2 \right\} \quad (7)$$

次にアクティブステアにおける消費電力 P_{sf}, P_{sr} を求める. 前後輪のアクティブステアはモータ駆動である. ステアリングの駆動に必要なトルク T_{si} は, 舵角速度が十分に小さいためセルフアライニングトルクと一致し, ニューマチックトレール ξ_i とタイヤに発生する横力 F_{yi} によって下記のように表される. 添字 i は f または r であり, それぞれ前輪, 後輪の意である.

$$T_{si} = 2\xi_i F_{yi} \quad (8)$$

ステアリングに働く摩擦, ステアリングのインバータ損失およびモータの銅損を無視すると, ステアリングの駆動の消費電力 P_{si} は舵角速度 $\dot{\delta}_i$ を用いて以下のように表される.

$$\begin{aligned} P_{si} &= T_{si} \dot{\delta}_i = -2\xi_i C_i \alpha_i \cos \delta_i \cdot \dot{\delta}_i \\ &\simeq -2\xi_i C_i \alpha_i \dot{\delta}_i \end{aligned} \quad (9)$$

ただし, 舵角 δ_i は小さいとして近似した. 舵角 δ_f, δ_r は以下の関係を満たすため, 舵角速度は以下の式の時間微分で求めた.

$$\delta_f = \beta + \frac{l_f}{V} \dot{\theta} - \alpha_f \quad (10)$$

$$\delta_r = \beta - \frac{l_r}{V} \dot{\theta} - \alpha_r \quad (11)$$

ここで, 式 (9) に式 (6), 式 (10), 式 (11) を代入すると, ステアリング消費電力 P_{si} が横力 F_y と向首角 θ によって表現される.

$$P_{sf} = \xi_f \left(\frac{l_r}{l} F_y + \frac{I}{l} \ddot{\theta} \right) \cdot \left(\frac{1}{mV} F_y + \frac{l_r}{2C_f l} \dot{F}_y - \dot{\theta} + \frac{l_f}{V} \ddot{\theta} + \frac{I}{2C_f l} \ddot{\ddot{\theta}} \right) \quad (12)$$

$$P_{sr} = \xi_r \left(\frac{l_f}{l} F_y - \frac{I}{l} \ddot{\theta} \right) \cdot \left(\frac{1}{mV} F_y + \frac{l_r}{2C_r l} \dot{F}_y - \dot{\theta} - \frac{l_f}{V} \ddot{\theta} - \frac{I}{2C_r l} \ddot{\ddot{\theta}} \right) \quad (13)$$

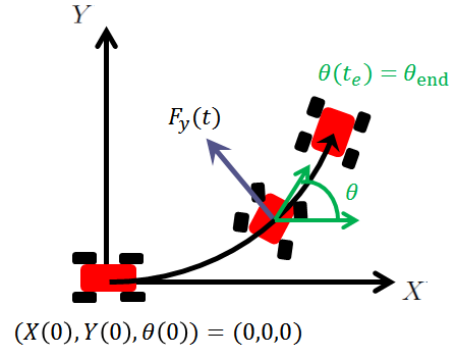


Fig.2 Target Trajectory

4 目標軌跡

車両の目標軌跡は車両横滑り角 β が十分に小さいと仮定したうえで, 横力の時間関数 $F_y(t)$, 初期条件および車両速度によって与える. この車両の時刻 t における座標及び向首角を $(X(t), Y(t), \theta(t))$ と表現する. 車両は, 時刻 $t = 0$ において, 地上に固定した座標平面上の原点に向首角 $\theta(0) = 0$, 速度 $V = \text{const.}$ で走行しているものとする. 時刻 t_e における終端条件として向首角 $\theta(t_e)$ を以下のように定める. これらの条件を図2に表す.

$$(X(0), Y(0), \theta(0)) = (0, 0, 0) \quad (14)$$

$$\theta(t_e) = \theta_{\text{end}} \quad (15)$$

また, 旋回開始前及び終了後に車両は直進するものとし, 下記の条件を定める.

$$\dot{\theta}(0) = 0, \dot{\theta}(t_e) = 0 \quad (16)$$

$$\beta(0) = 0, \beta(t_e) = 0 \quad (17)$$

これらの条件を満たす, 横力の時間関数 $F_y(t)$ を時刻 t から t_e において以下のように与えた.

$$F_y(t) = mVA t(t_e - t) \quad (18)$$

ただし, A は横力 $F_y(t)$ の平均値が速度 V でヨーレートが $\frac{\theta_{\text{end}}}{t_e}$ の定常円旋回を行う際の横力と一致するよう以下のように定めた.

$$A := 6 \frac{\theta_{\text{end}}}{t_e^3} \quad (19)$$

5 消費エネルギーの最小化

時刻 $t = 0$ から $t = t_e$ における消費エネルギーの最小化を行う. 式 (1) で表現される消費電力 P に式 (7) で示した駆動用モータ出力 P_m と式 (12), (13) で示したアクティブステアの消費電力 P_{sf}, P_{sr} を代入すると消費電力 P は横力 $F_y(t)$ と向首角 $\theta(t)$ の関数となる. よって, 消費エネルギー E は以下の積分によって表される.

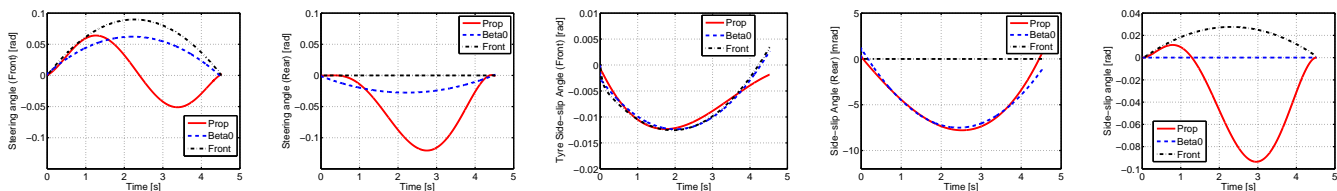
$$E = \int_0^{t_e} P(\theta(t), F_y(t)) dt \quad (20)$$

消費エネルギー E の最小化は上の積分の変分問題となる.

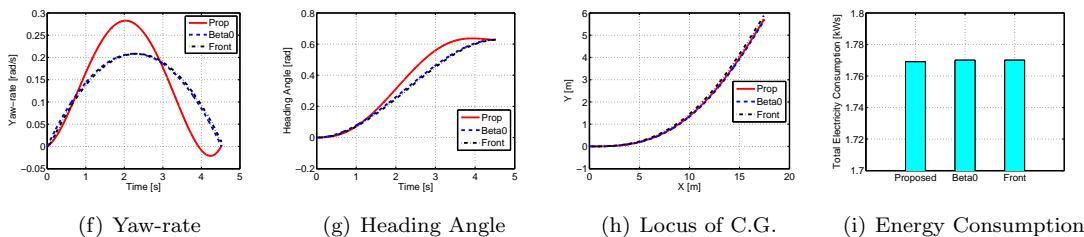
$$\frac{\partial P}{\partial \theta} - \frac{d}{dt} \frac{\partial P}{\partial \dot{\theta}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial P}{\partial \ddot{\theta}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial P}{\partial \ddot{\ddot{\theta}}} = 0 \quad (21)$$

式 (18) を代入し, 計算を行うと向首角の最適経路 $\theta_{\text{opt}}(t)$ は式 (22) を満たす多項式となる. ただし, 前後輪のニューマチックトレールは前後輪で等しいとし, $\xi_f = \xi_r = \xi$ とおいた.

$$\begin{aligned} &\left\{ \frac{2\xi I}{V} + \frac{V}{l^2} \left(\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_r} \right) \right\} \ddot{\ddot{\theta}}_{\text{opt}} \\ &+ \xi \dot{F}_y + \frac{V}{l^2} \left(\frac{l_r}{C_f} - \frac{l_f}{C_r} \right) \dot{F}_y = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

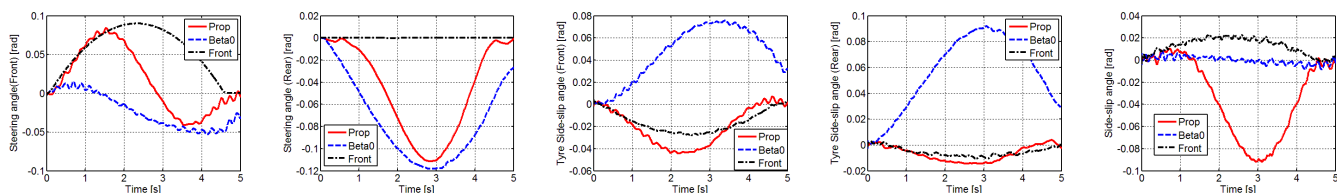


(a) Steering Angle (Front) (b) Steering Angle (Rear) (c) Tyre Side-slip Angle (Front) (d) Tyre Side-slip Angle (Rear) (e) Side-slip Angle

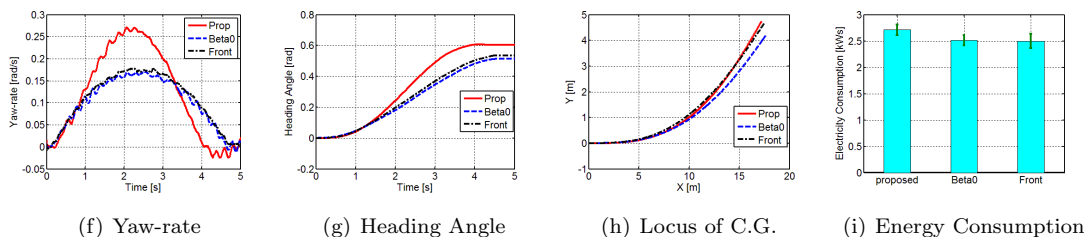


(f) Yaw-rate (g) Heading Angle (h) Locus of C.G. (i) Energy Consumption

Fig.4 Simulation Result



(a) Steering Angle (Front) (b) Steering Angle (Rear) (c) Tyre Side-slip Angle (Front) (d) Tyre Side-slip Angle (Rear) (e) Side-slip Angle



(f) Yaw-rate (g) Heading Angle (h) Locus of C.G. (i) Energy Consumption

Fig.5 Experimental Result

[3] 森淳, 芝端康二: ”四輪駆動力自在制御システムの開発”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.76-05 (2005), pp.19-24

[4] 岩野治雄, 正木信男, 平曉子, 鎌田崇義, 永井正夫: ”電気自動車のタイヤ稼働率を用いた車両運動制御の研究: 第2報, インホイールモータ用稼働率制御の車両運動性能試験的検討”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.745(2008), pp.2214-2220

[5] 井上馨, 小方健司, 加藤利次”変分法による最適トルクを用いた誘導電動機の高効率電力再生・駆動法”電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), Vol.128(9)(2009), pp.1098-1105

[6] 今啓之, 高田洋吾, 脇坂知行: ”電気モータ駆動車における消費電力を抑えた加速制御アルゴリズム”日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.669(2001),pp.1512-1517

[7] 中嶋玲二, 吉村達矢, 狩野芳郎, 安部正人: ”タイヤ力最適配分がタイヤ消費エネルギーに及ぼす効果”自動車技術会学術講演会前刷集 No.37-12(2012), pp.23-26

[8] 松本大樹, 西原修: ”操舵と制駆動力配分により旋回する電気自動車の低消費電力化”日本機械学会交通・物流部門大会 TRANSLOG 講演論文集, Vol.20, No.1315 (2011)

[9] Hiroshi Fujimoto, Sho Egami, Jun Sato and Kazuaki Handa, ”Range Extension Control System for Electric Vehicle Based on Searching Algorithm of Optimal Front and Rear Driving Force Distribution”, in Proc. 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, Canada (2012). pp.4244-4249,

[10] 角谷勇人, 藤本博志: ”前後輪横滑り角と左右トルク配分に基づく電気自動車の航続距離延長制御システム”, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), Vol.131, No.3(2012), pp308-314

[11] 大空明, 服部義和, ”障害物回避のための車両の最適軌道制御(車体合成力の最大値最小化の問題)”, 日本機械学会論文集 C 編, VOL.76, No.772(2010) pp.405-412

[12] 山内雄哉, 藤本博志, ”電気自動車におけるヨーモーメントオペレーバとラテラルフォースオペレーバを用いた車両姿勢制御法”, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), Vol.130, No.8 (2010), pp.939-944

[13] 青木良文, 堀洋一: ”電気自動車における車体すべり角オペレーバのロバスト化と実車データによる検証”, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), Vol. 125(5)(2005), pp.467-472