

3102 瞬間低 μ 路での駆動力維持を目的とした インホイールモータ搭載電気自動車の前後輪駆動力配分法

Front/Rear Driving Force Distribution for Retaining Driving Force
on Instantaneous Slippery Roads for Electric Vehicle with In-wheel Motors

○ 前田 健太 (東京大学) 藤本 博志 (東京大学) 堀 洋一 (東京大学)

Kenta Maeda, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori
The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba

In this paper, front and rear driving force distribution method based on driving force control is proposed. Driving force control is proposed by authors' research group for a traction control which can generate desired driving force commanded by driver's acceleration pedal. However, this control method can not completely prevent from reducing driving force when a vehicle runs on an extremely slippery road. If the distance of a slippery road is shorter than vehicle's wheel base, total driving force is retained by distributing the shortage of driving force to gripped wheels. Therefore, front and rear driving force distribution method is proposed for retaining driving force on instantaneous slippery roads. Effectiveness of proposed distribution method is verified by experiments.

Key Words: driving force control, electric vehicle, front/rear driving force distribution, instantaneous slippery road

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、各輪を独立に制御することができる。
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。

著者らの研究グループは、新たなトラクション制御として、インホイールモータを搭載した EV の駆動力制御法を提案した^[5]。駆動力制御法とは、大駆動力を発生させられるが実際に生じる駆動力が未知数であるスリップ率制御^[6, 7]の外側に、駆動力オブザーバに基づく駆動力制御ループを設けて直接駆動力を制御する手法である。したがって、駆動力が飽和しない領域では任意の駆動力を発生し、駆動力が飽和する領域ではスリップ率制御と同様のトラクション効果を発揮する。また、アクセル指令によって駆動力指令値を生成することで、ドライバの求める駆動力を発生することが可能である。

文献 [5] で提案されている駆動力制御法は前輪駆動を想定しており、低 μ 路においては駆動力を飽和させるため総駆動力が減少する。しかしながら、低 μ 路への突入時における突然の駆動力低下は、ドライバの運転感覚に違和感を与えられられるため、総駆動力を保つ制御法が求められる。そこで本稿では、インホイールモータを搭載した四輪駆動 EV における、瞬間低 μ 路での合計駆動力維持を目的とした前後輪駆動力配分法を提案する。本稿における瞬間低 μ 路とは、所々に残る雪、雨に濡れたマンホールや橋のつなぎ目など、瞬間的に低 μ 状態になるような路面を指す。すでに述べたように、EV は小型モータを各輪に搭載することで四輪独立駆動を容易に実現できることが利点の一つである。加速中にホイールベースより短い瞬間低 μ 路にさしかかった際、前輪駆動力の減少量を粘着している後輪で瞬時に補うことで、合計駆動力が維持される。同様に、後輪が低 μ 路に乗った時は、低 μ 路を抜けた前輪で不足分を補うことも可能である。総駆動力がアクセルによる駆動力指令値に維持されるため、ドライバは高 μ 路と同じ感覚で運転することが可能になると考えられる。実車を



Fig.1 FPEV2-Kanon

Table.1 FPEV2-Kanon の各パラメータ

車両の空車重量 (m)	803 [kg]
ホイールベース (l)	1.7 [m]
前輪イナーシャ (J_f)	1.24 [kg · m ²]
後輪イナーシャ (J_r)	1.26 [kg · m ²]
タイヤ半径 (r)	0.302 [m]

を用いた実験により、提案手法の有効性を確認する。

なお、提案する駆動力配分法では急峻な駆動力指令値に対する素早い応答が求められる。本稿では従来の駆動力制御法にフィードフォワードを付加して応答速度の向上も試みている。

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。このモータはダイレクトドライブ方式であり、ギアを介さないためバックラッシュの影響がない。したがって、路面からの反力情報を直にモータに伝えることが可能である。1 輪あたりに発生可能な最大トルクは前輪が 500 [Nm]、後輪が 340 [Nm] である。また、車速を計測する光学式センサが取り付けられている。

FPEV2-Kanon の各パラメータの値を表 1 に示す。

3 車両の運動方程式

本章では車両において成立する運動方程式について述べる。

各輪の回転運動に関する運動方程式は、走行抵抗を無視すると図 2 より次式のように表される。

$$J_{ij}\dot{\omega}_{ij} = T_{ij} - rF_{dij} \quad (1)$$

ここで、 J は車輪回転部のイナーシャ、 ω は車輪角速度、 T は

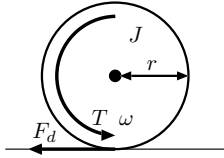


Fig.2 車輪の回転運動モデル

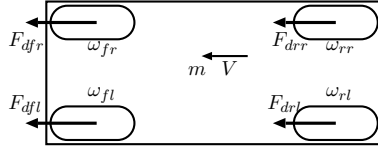


Fig.3 車両運動モデル

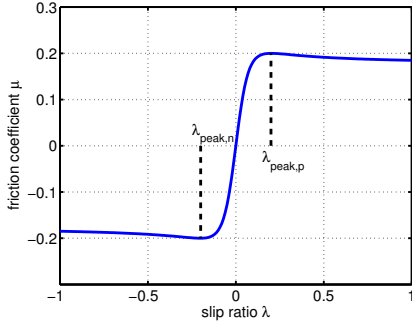


Fig.4 μ - λ 曲線 (λ_{peak} で $\mu = 0.2$ となる場合)

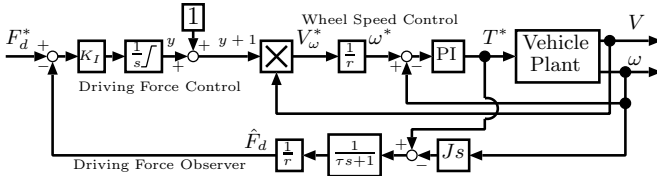


Fig.5 駆動力制御法 (従来法) のブロック図

モータトルク, r は車輪半径, F_d は接地面でタイヤに働く駆動力であり, i, j はそれぞれ f, r (前後), l, r (左右) を表す。また, 車両の運動方程式は図 3 より以下ようになる。

$$m\dot{V} = F_{dfl} + F_{dfr} + F_{drl} + F_{drr} \quad (2)$$

ここで m は車両質量, V は車両速度を表す。

駆動および制動時には車輪速 $V_\omega = r\omega$ と車体速 V の間に差が生じているため, スリップ率 λ が次式で定義される。

$$\lambda = \frac{V_\omega - V}{\max(V_\omega, V, \epsilon)} \quad (3)$$

ここで ϵ は零割を防ぐための微小な定数である。

各輪に発生する駆動力 F_d およびドライビングステイフネス D_s は, タイヤのスリップ率 λ , 垂直抗力 N および摩擦係数 μ より (4), (5) 式で得られる。

$$F_{dij} = \mu_{ij} N_{ij} \quad (4)$$

$$D_{sij} = \left. \frac{dF_{dij}}{d\lambda_{ij}} \right|_{\lambda_{ij}=0} \quad (5)$$

ここで i, j は (1) 式と同様に定義され, 各輪で成立することを表す。 μ と λ の関係は路面状況によって変化するが, 図 4 で示すような関係があることが知られている^[8]。 μ が最大, 最小となるスリップ率 $\lambda_{\text{peak,p}}$, $\lambda_{\text{peak,n}}$ がそれぞれ存在し, $\lambda_{\text{peak,n}} \leq \lambda \leq \lambda_{\text{peak,p}}$ の領域では μ は λ の単調増加関数となり, それ以外の領域では単調減少する。

4 駆動力制御法 (従来法)

本章では駆動力制御法について述べる^[5]。駆動力制御法のブロック図を図 5 に示す。アウトーループが駆動力ループとなっており, インナーループにスリップ率制御として車輪速制御ループが存在する。本稿ではトルク制御系が十分速いと仮定し, 各輪に

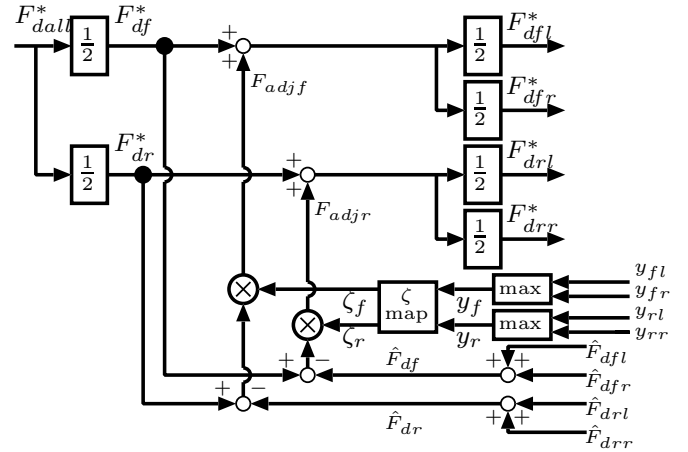


Fig.8 駆動力配分法のブロック図

生じる駆動力 F_d はモータトルク指令値 T^* と車輪速 ω から駆動力オブザーバにより推定される。 F_d^* は駆動力指令値, \hat{F}_d は駆動力オブザーバによる推定値である。

スリップ率 λ は駆動時 ($V_\omega \geq V$) と制動時 ($V_\omega < V$) で定義が異なり, 制御の上では不都合である。そこでスリップ率の代わりに次式で定義される操作量 y を使用する。

$$y = \frac{V_\omega}{V} - 1 \quad (6)$$

これは制動時のスリップ率と同じ定義であり, 駆動時の y と λ の関係は以下ようになる。

$$y = \frac{\lambda}{1 - \lambda} \quad (7)$$

すなわち, $\lambda = 0$ 近傍では y は λ とほぼ等しく, それ以外の領域においても両者は一対一対応の関係にある。

(6) 式より, 車輪速制御の指令値 V_ω^* は (8) 式で表される。

$$V_\omega^* = (1 + y)V \quad (8)$$

このことから, 停車時 ($V = 0$) は y を 0 以上の値にしても常に $V_\omega^* = 0$ となって発進することができない。そこで, V がある値 σ より小さい領域では (9) 式のように指令値を変更することで, 常に $V_\omega^* = 0$ となるのを防ぐ。

$$\begin{cases} V_\omega^* = V + y\sigma & (V < \sigma) \\ V_\omega^* = V + yV & (V \geq \sigma) \end{cases} \quad (9)$$

(5) 式より, $|\lambda|$ が十分小さい領域では $F_d = D_s\lambda$ とおける。また, 車輪速制御が十分速く, 常に $y \simeq \lambda$ が成立すると仮定すると, y から F_d へは下式のように 0 次となる。

$$F_d = D_s\lambda \simeq D_sy \quad (10)$$

よって, 駆動力制御コントローラは I 制御とし, 初期値は非駆動状態を想定して $y_0 = 0$ とする。 K_I は積分器のゲインである。この積分器に積分値の上限 y_{max} と下限 y_{min} を設け, y の値を $y_{\text{min}} \leq y \leq y_{\text{max}}$ に制限する。これにより μ が λ の単調増加関数となる領域にスリップ率を制限することができ, トラクション効果を生み出すことができる。

5 前後輪駆動力配分法 (提案法)

5.1 前後輪駆動力配分法 本節では, 提案する前後輪駆動力配分法について述べる。加速中に前輪が低 μ 路にさしかかって駆動力が飽和した際, 車両全体としての総駆動力が維持されるよう, まだ高 μ 路に乗っている後輪にただちに駆動力の不足分を配分する。

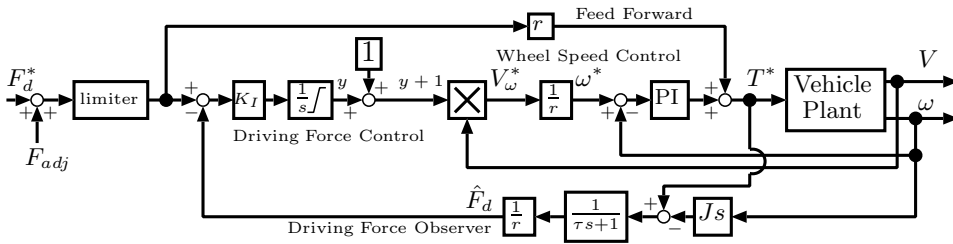


Fig.6 FFを含む駆動力制御法および駆動力配分法のブロック図

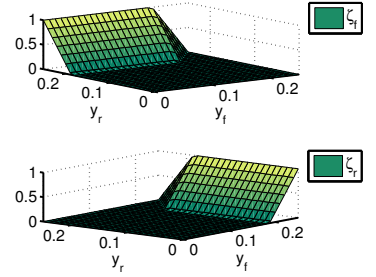


Fig.7 ζ 決定マップ

図6に駆動力配分量 F_{adj} を含んだ駆動力制御法のブロック図を示す。前輪への駆動力配分量 F_{adjf} 、後輪への駆動力配分量 F_{adjr} はそれぞれ後輪、前輪の駆動力指令値に対する駆動力推定値との差である。すなわち (11), (12) 式のように表せる。

$$F_{adjf} = \zeta_f(y_f, y_r) \cdot [F_{dr}^* - \hat{F}_{dr}] \quad (11)$$

$$F_{adjr} = \zeta_r(y_f, y_r) \cdot [F_{df}^* - \hat{F}_{df}] \quad (12)$$

ここで $\hat{F}_{df} = \hat{F}_{dfl} + \hat{F}_{dfr}$, $\hat{F}_{dr} = \hat{F}_{drl} + \hat{F}_{drr}$ で、いずれも駆動力オブザーバによる推定値である。 F_{df}^* , F_{dr}^* はそれぞれ配分を行う前の前後輪駆動力指令値である。また、 $\zeta_f(y_f, y_r)$, $\zeta_r(y_f, y_r)$ はそれぞれ前後輪への駆動力配分量を決める 0 以上 1 以下の係数であり、前後輪の操作量 y_f , y_r の関数とする。また、 y_f , y_r はそれぞれ左右輪のうち大きいものをとる。すなわち $y_f = \max(y_{fl}, y_{fr})$, $y_r = \max(y_{rl}, y_{rr})$ である。

駆動力制御法において、操作量 y が予め指定した上限値に当たっているとき、そのタイヤは駆動力が飽和するような低 μ 路に乗っていると考えられる。そこで、タイヤが低 μ 路にあることを駆動力制御の操作量 y より検知し、 y が上限 y_{max} に達した場合に駆動力配分を行うようにする。その際、配分にあたっては以下の条件を考慮に入れる必要がある。

- 前後輪どちらかが低 μ 路に乗った瞬間、低 μ 路側の駆動力不足分が高 μ 路側の車輪に加わる。
- 前後輪がどちらも高 μ 路または低 μ 路に乗っている時は配分を行わない。

以上を考慮に入れた ζ_f , ζ_r の決定マップを図7に示す。 ζ_f の場合、後輪が低 μ 路に乗って操作量 y_r が上限に近づくと、上限の 75% から上限に達するまでに ζ_f が 0 から 1 へと直線的に増加し、後輪の駆動力不足分が前輪に配分される。 ζ_r も同様に決定する。 y_f , y_r がどちらも高い場合は前後輪とも低 μ 路に乗っていると判断し、 ζ_f , ζ_r をともに 0 とすることで前後輪駆動力配分を停止する。

図8に駆動力配分法全体のブロック図を示す。 F_{dall}^* はアクセルにより生成する総駆動力指令値であり、そこから前後輪駆動力配分が行われた後、左右輪に駆動力指令値が均等配分される形となっている。

5.2 フィードフォワードの付加 提案する前後輪駆動力配分法は、駆動力減少量を瞬時に配分するため、急峻な駆動力指令値を生成する。したがって、駆動力指令値に対する素早い応答の実現を目的として、駆動力制御法に対してフィードフォワードの付加を行った。

図6において、駆動力指令値から r 倍のゲインがかかってモータトルク指令値に加わっている部分がフィードフォワードである。車輪が粘着していれば、(1)式において $J_{ij}\omega_{ij}$ は十分小さく、 $T_{ij} \approx rF_{dij}$ が成り立つ。したがって、フィードフォワードによって駆動力指令値にはほぼ等しい駆動力を発生させることができ、若干の誤差を駆動力制御系のフィードバックが補償する形となっている。また、低 μ 路にさしかかった際はフィードバックが機能し、従来法と同等のトラクション効果を実現する。

発生可能な駆動力はモータが出せる最大トルクによって制限される。図6の駆動力指令値にかかっているリミッタは、発生可能な最大駆動力を超える駆動力指令が与えられるのを防ぐために設けられている。

6 実験

瞬間低 μ 路における前後駆動力配分法の有効性を確認するため実験を行った。低 μ 路として、大きさ 0.9×2.0 [m²] の高分子シートを使用した。このシートは水をかけることで $\mu = 0.2$ 程度の低 μ 路を実現する。車体速は光学式センサにより取得した。

駆動力制御の各パラメータは以下の通りである。インナーの車輪速制御のPIコントローラは、(1)式において駆動力 F_d を無視したプラント $\frac{1}{Js}$ に対して極が -20 [rad/s] となるよう極配置法により決定した。駆動力オブザーバの時定数は $\tau = 30$ [ms] とした。また、アウトーループである駆動力制御の積分器ゲインは前後輪ともに $K_I = 0.01$ とした。操作量 y のリミッタは、それぞれスリップ率 -0.2 および 0.2 に相当する $y_{min} = -0.2$, $y_{max} = 0.25$ とした。発進時の対策である σ の値は $\sigma = 1.0$ [m/s] とした。

実験車両の発進点から 2.0 [m] 前方に高分子シートを横に置き、ホイールベースより短い長さ 0.9 [m] の低 μ 路を設けた。そしてモータトルク 200 [Nm] に相当する駆動力指令 $\frac{200}{r} = 662$ [N] を時定数 0.2 [s] のローパスフィルタを介して前後輪に加えた。実験においては、トルク制御による走行、従来法である駆動力制御法のみによる走行、さらに提案する駆動力配分法を適用した駆動力制御法による走行の3通りを行った。ここでトルク制御とは、モータトルク指令 200 [Nm] を駆動力制御法による走行と同様に加えることを指す。

実験結果を図9~11に示す。グラフはすべて左前後輪の車輪速、駆動力推定値および左輪の総駆動力を示している。また、トルク制御による走行を除き、前後輪の操作量 y_f , y_r のグラフも掲載している。

トルク制御のみを行っている図9(a)では、前輪、後輪の順に低 μ 路に乗って車輪が空転しており、図9(b), 9(c)より空転時の駆動力低下が見られる。一方、従来法である駆動力制御法を適用した図10(a)では車輪の空転は抑えられている。図10(d)を参照すると、低 μ 路において y_f , y_r の順に上限 y_{max} に達しており、スリップ率が 0.2 になるよう車輪速制御がかかることでトラクション効果を発揮している。だが、図10(b), 10(c)よりトルク制御同様の駆動力低下が見られる。さらに、発進時には(9)式に示す対策を講じているため、指令値に対して遅れが生じている。操作量 y が発進時に y_{max} に達しているのはこれが主因である。

それらに対して、提案法である前後輪駆動力配分法では、図11(a)に示すように車輪の空転が抑えられているとともに、図11(b)のように前後輪が不足分を補い合うような駆動力を発生させている。その結果、図11(c)に示すように総駆動力の低下が抑えられている。操作量 y に関しては図11(d)に示すように、従来の駆動力制御法による走行と同様、 y_f , y_r の順に上限 y_{max} に達

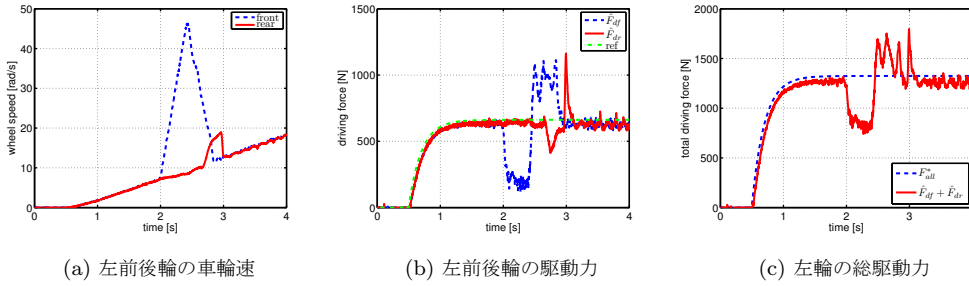


Fig.9 実験結果：トルク制御（駆動力制御無し）

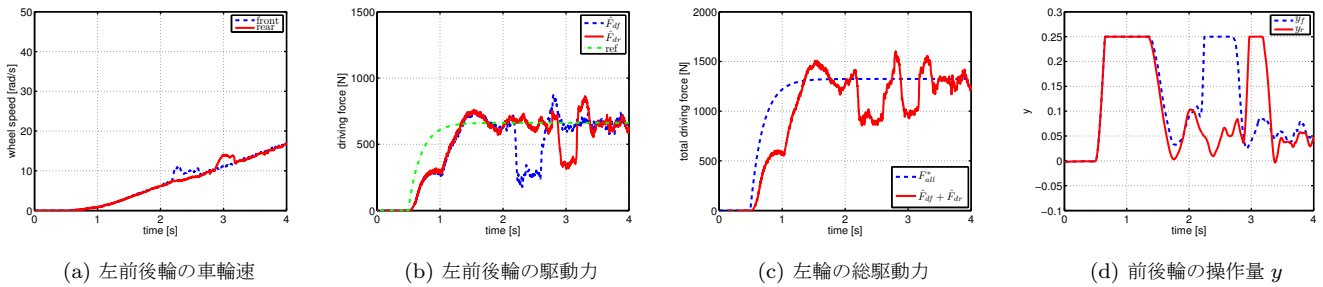


Fig.10 実験結果：駆動力制御（従来法）

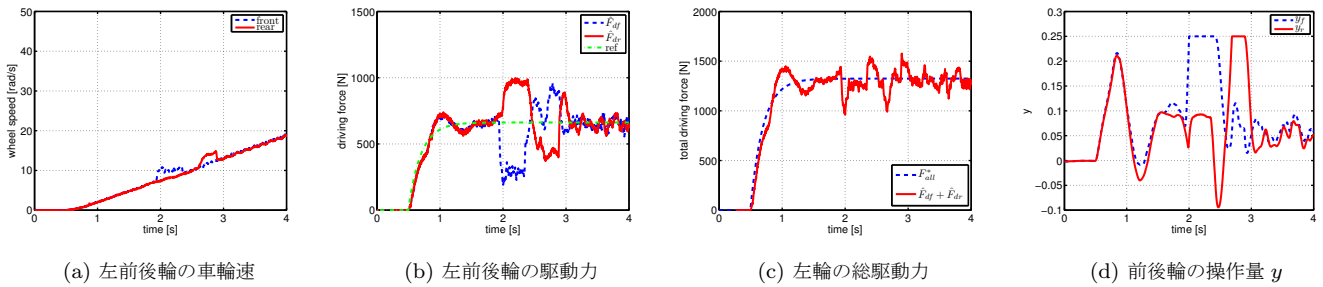


Fig.11 実験結果：前後輪駆動力配分法（提案法）

している。さらに、フィードフォワードの効果として、発進時の指令値への遅れが低減されている。総駆動力が指令値に追従していることから、ドライバは低 μ 路に乗ったことに気づかず、高 μ 路と同じ感覚で運転できると考えられる。

7 まとめ

本稿では、駆動力制御法を用いた前後輪駆動力配分法を提案した。この配分法によって、前後輪いずれかの駆動力が飽和した際、減少した駆動力を粘着している動輪に配分することで総駆動力が維持されることを実験で示した。総駆動力が維持されるため、ドライバは瞬間的に低 μ となる路面状況下でも高 μ 路と同じ感覚で運転することができると考えられる。なお、本手法を左右輪に適用することで、左右の駆動力を均等化する配分を行って、スプリット μ 路におけるヨーレートの発生を防ぐことも可能である。

今後の課題としては、今回は検討を行わなかった制動時および旋回時における検討、スプリット μ 路にも対応した4輪統合駆動力配分法などが挙げられる。

謝辞

最後に本研究の一部は NEDO 産業技術研究助成（プロジェクト ID:05A48701d）、および文部科学省科学研究費補助金（基盤研究 A 課題番号：22246057）によって行われたことを付記する。

参考文献

[1] Y.Hori: "Future vehicle driven by electricity and control — research on four-wheel-motored "UOT Electric March II"”,

IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.51, No.5, pp.954–962 (2004)

[2] 小竹元基, 大島紀明, 永井正夫: 「駆動性向上を目指した超小型電気自動車の車輪速度制御」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.694, pp.1680–1686 (2004)

[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, pp.19–24 (2005)

[4] 岩野治雄, 正木信男, 平暁子, 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, pp.2214–2220 (2008)

[5] 藤本博志, 吉村雅貴: 「電気自動車におけるスリップ率制御に基づく駆動力制御法」, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.3-11, pp.11–14 (2011)

[6] K.Fujii, H.Fujimoto, N.Takahashi: "Vehicle stability control of electric vehicle with slip-ratio and cornering stiffness estimation", IEEE/ASME international conference on Advanced intelligent mechatronics, pp.27–32 (2007)

[7] T.Suzuki, H.Fujimoto: "Slip ratio estimation and regenerative brake control without detection of vehicle velocity and acceleration for electric vehicle at urgent brake-turning", The 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp.273–278 (2010)

[8] H.B.Pacejka, E.Bakker: "The magic formula tyre model", Tyre models for vehicle dynamic analysis: proceedings of the 1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, held in Delft, The Netherlands (1991)