

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4538642号
(P4538642)

(45) 発行日 平成22年9月8日(2010.9.8)

(24) 登録日 平成22年7月2日(2010.7.2)

(51) Int.Cl.		F I			
B60L 15/20	(2006.01)	B60L 15/20			Y
H02P 29/00	(2006.01)	H02P 5/00			R
B60W 40/10	(2006.01)	B60R 16/02		661Z	

請求項の数 30 (全 52 頁)

(21) 出願番号	特願2008-533050 (P2008-533050)	(73) 特許権者	504182255
(86) (22) 出願日	平成19年3月5日(2007.3.5)		国立大学法人横浜国立大学
(86) 国際出願番号	PCT/JP2007/054220		神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号
(87) 国際公開番号	W02008/029524	(74) 代理人	100077481
(87) 国際公開日	平成20年3月13日(2008.3.13)		弁理士 谷 義一
審査請求日	平成22年2月9日(2010.2.9)	(74) 代理人	100088915
(31) 優先権主張番号	特願2006-243454 (P2006-243454)		弁理士 阿部 和夫
(32) 優先日	平成18年9月7日(2006.9.7)	(72) 発明者	藤本 博志
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号 国立大学法人横浜国立大学内
特許法第30条第1項適用 「學術講演会前刷集 No. 12-06 2006年春季大会」(社団法人自動車技術会 主催)の刊行物において、「インホイールモータを有する電気自動車の路面状態推定と運動制御」(2006年5月24日開催)と題して掲載		(72) 発明者	藤井 淳
			神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号 国立大学法人横浜国立大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 スリップ率推定装置およびスリップ率制御装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

モータのトルク(T)で駆動輪を駆動する自動車に用いるスリップ率推定装置において

前記モータのトルクを測定するモータトルク測定手段と、

駆動輪の回転速度()および回転加速度

【数1】

$$(\dot{\omega})$$

10

を算出する車両モデル演算手段と、

前記モータトルク測定手段が測定したトルクと前記車両モデル演算手段が算出した回転速度および回転加速度を用いて、スリップ率に関する常微分方程式を計算することにより推定スリップ率

【数2】

$$(\hat{\lambda})$$

を算出するスリップ率演算手段と

20

を備えたことを特徴とするスリップ率推定装置。

【請求項 2】

前記スリップ率演算手段は、スリップ率の前記常微分方程式として式 (A) を計算することにより、前記推定スリップ率を算出することを特徴とする請求項 1 に記載のスリップ率推定装置。

【数 3】

$$\dot{\lambda} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega}\lambda + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \quad \dots (A)$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

10

【請求項 3】

前記スリップ率演算手段は、前記式 (A) の右辺に車体加速度の推定誤差に基づくスリップ率オブザーバを加えて計算することを特徴とする請求項 2 に記載のスリップ率推定装置。

【請求項 4】

当該自動車の車体加速度 (a_x) を測定する加速度測定手段をさらに有し、前記スリップ率演算手段は、前記式 (A) の右辺に前記スリップ率オブザーバを加えて計算することを特徴とする請求項 3 に記載のスリップ率推定装置。

【請求項 5】

前記スリップ率演算手段は、前記式 (A) の右辺に前記スリップ率オブザーバを加えた式 (B) を計算することを特徴とする請求項 4 に記載のスリップ率推定装置。

20

【数 4】

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} = & -\frac{\dot{\omega}}{\omega}\lambda + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \\ & + k(\lambda) \left(a_x(t) - \frac{N}{M} \mu(\lambda) \right) \quad \dots (B) \end{aligned}$$

(k : オブザーバゲイン、N : タイヤ 1 輪にかかる垂直抗力、μ : 摩擦係数)

【請求項 6】

30

モータのトルク (T) で駆動輪を駆動する自動車に用いるスリップ率推定装置において、

前記モータのトルクを測定するモータトルク測定手段と、

前記自動車の車体加速度 (a_x) を測定する加速度測定手段と、

駆動輪の回転速度 () および回転加速度

【数 5】

$$(\dot{\omega})$$

を算出する車両モデル演算手段と、

40

前記自動車の駆動力の推定値を算出する駆動力演算手段と、

前記駆動力演算手段が算出した推定駆動力と前記加速度測定手段が測定した前記車体加速度から走行抵抗 (F_{d,r}) の推定値を算出する走行抵抗演算手段と、

前記モータトルク測定手段が測定したトルクと、前記車両モデル演算手段が算出した回転速度および回転加速度と、前記走行抵抗演算手段が算出した推定走行抵抗を用いて、スリップ率に関する常微分方程式を計算することにより推定スリップ率

【数 6】

$$(\hat{\lambda})$$

を算出するスリップ率演算手段と
を備えたことを特徴とするスリップ率推定装置。

【請求項 7】

前記スリップ率演算手段は、スリップ率の前記常微分方程式として式 (C) を計算することにより、推定スリップ率を算出することを特徴とする請求項 6 に記載のスリップ率推定装置。 10

【数 7】

$$\dot{\lambda} - \frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} + \frac{\dot{F}_{dr}}{r M \omega} \quad \dots (C)$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

【請求項 8】

前記スリップ率演算手段は、前記式 (C) の右辺に車体加速度の推定誤差に基づくスリップ率オブザーバを加えて計算することを特徴とする請求項 7 に記載のスリップ率推定装置。 20

【請求項 9】

前記スリップ率演算手段は、前記式 (C) の右辺に前記スリップ率オブザーバを加えた式 (D) を計算することを特徴とする請求項 8 に記載のスリップ率推定装置。

【数 8】

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} = & -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} + \frac{\dot{F}_{dr}}{r M \omega} \\ & + k(\hat{\lambda}) \left(a_r(t) - \frac{N}{M} \mu(\hat{\lambda}) + \frac{\dot{F}_{dr}}{M} \right) \quad \dots (D) \end{aligned}$$

(k : オブザーバゲイン、N : タイヤ 1 輪にかかる垂直抗力、μ : 摩擦係数) 30

【請求項 10】

モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車に用いるスリップ率制御装置において、
前記モータに対するトルク指令を演算する手段と、
前記モータのトルクを前記トルク指令に基づき制御する手段と、
入力されるスリップ率から目標トルク (T) を算出する比例積分制御手段と、
前記目標トルクから前記駆動輪の回転速度 () 及び回転加速度

【数 9】

$$(\dot{\omega})$$

を算出する車両モデル演算手段と、

前記比例積分制御手段が算出した目標トルク、前記車両モデル演算手段が算出した駆動輪の回転速度及び回転加速度を用いてスリップ率に関する常微分方程式を計算して推定スリップ率

【数 10】

$$(\hat{\lambda})$$

を算出するスリップ率演算手段と、

40

50

を備え、

前記比例積分制御手段は、所望の目標スリップ率（ λ^* ）から前記推定スリップ率を引いたスリップ率を入力され、前記トルク指令を演算する手段は、当該比例積分制御手段から算出された前記目標トルクに基づいて演算することを特徴とするスリップ率制御装置。

【請求項 1 1】

前記比例積分制御手段は、非線形補償を行うことを特徴とする請求項 1 0 に記載のスリップ率制御装置。

【請求項 1 2】

前記比例積分制御手段は、式（E）に基づく非線形補償を行うことを特徴とする請求項 1 1 に記載のスリップ率制御装置。

【数 1 1】

$$T = r^2 M \omega \left(-\frac{\dot{\omega}}{\omega} \lambda + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M} \right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} + K_p (\lambda^* - \lambda) \right) \quad \dots (E)$$

（ r ：駆動輪のタイヤ半径、 M ：車両重量、 J ：駆動輪回転部慣性モーメント、 K_p ：比例定数）

【請求項 1 3】

前記比例積分制御手段は、目標スリップ率と目標トルクから式（F）に基づいて算出された前記駆動輪の回転加速度を式（E）において用いることを特徴とする請求項 1 2 に記載のスリップ率制御装置。

【数 1 2】

$$\dot{\omega} = \frac{T}{J_{\omega} + r^2 M (1 - \lambda^*)} \quad \dots (F)$$

（ r ：駆動輪のタイヤ半径、 M ：車両重量、 J ：駆動輪回転部慣性モーメント）

【請求項 1 4】

モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車に用いるスリップ率制御装置において、指定された駆動輪の回転速度から前記モータに対するトルク指令を演算する手段と、前記モータのトルクを前記トルク指令に基づき制御する手段と、入力される駆動輪の回転速度から目標トルク（ T ）を算出する比例積分制御手段と、前記目標トルクから前記駆動輪の回転速度（ ω ）及び回転加速度

【数 1 3】

$$(\dot{\omega})$$

を算出する車両モデル演算手段と、

前記比例積分制御手段が算出した目標トルク、前記車両モデル演算手段が算出した駆動輪の回転速度及び回転加速度を用いてスリップ率に関する常微分方程式を計算して推定スリップ率

【数 1 4】

$$(\hat{\lambda})$$

を算出するスリップ率演算手段と、

前記スリップ率演算手段が算出した推定スリップ率から車体速度を算出し、当該車体速度から目標スリップ率に対する駆動輪の目標回転速度を算出する車輪速度演算手段とを備え、

前記比例積分制御手段は、前記スリップ率演算手段が算出した推定スリップ率に応じて当該制御ゲインを変化させ、前記トルク指令を演算する手段は、当該比例積分制御手段か

10

20

30

40

50

ら算出された前記目標トルクに基づいて演算することを特徴とするスリップ率制御装置。

【請求項 15】

前記比例積分制御手段は、式 (G) に基づき極配置法により前記制御ゲインを決定することを特徴とする請求項 14 に記載のスリップ率制御装置。

【数 15】

$$\omega = \frac{1}{(J_\omega + r^2 M(1 - \lambda))s} T \quad \dots (G)$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

【請求項 16】

前記スリップ率演算手段は、スリップ率の前記常微分方程式として式 (A) を計算することにより、前記推定スリップ率を算出することを特徴とする請求項 10 乃至 15 のいずれかに記載のスリップ率制御装置。

【数 16】

$$\dot{\lambda} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \lambda + \left(1 + \frac{J_\omega}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \quad \dots (A)$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

【請求項 17】

前記スリップ率演算手段は、前記式 (A) の右辺に車体加速度の推定誤差に基づくスリップ率オブザーバを加えて計算することを特徴とする請求項 16 に記載のスリップ率制御装置。

【請求項 18】

前記自動車は、当該自動車の車体加速度 (a_x) を測定する加速度測定手段をさらに有し、前記スリップ率推定手段は、前記式 (A) の右辺に前記スリップ率オブザーバを加えて計算することを特徴とする請求項 17 に記載のスリップ率制御装置。

【請求項 19】

前記スリップ率演算手段は、前記式 (A) の右辺に前記スリップ率オブザーバを加えた式 (B) を計算することを特徴とする請求項 18 に記載のスリップ率制御装置。

【数 17】

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} = & -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \lambda + \left(1 + \frac{J_\omega}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \\ & + k(\lambda) \left(a_x(t) - \frac{N}{M} \mu(\lambda)\right) \quad \dots (B) \end{aligned}$$

(k : オブザーバゲイン、N : タイヤ 1 輪にかかる垂直抗力、 μ : 摩擦係数)

【請求項 20】

モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車に用いるスリップ率制御装置において、
前記モータに対するトルク指令を演算する手段と、
前記モータのトルクを前記トルク指令に基づき制御する手段と、
前記自動車の車体加速度 (a_x) を測定する加速度測定手段と、
前記自動車の駆動力の推定値を算出する駆動力演算手段と、
前記駆動力演算手段が算出した推定駆動力と前記加速度測定手段が測定した前記車体加速度とから走行抵抗の推定値

【数 18】

$$\left(\hat{F}_{dr}\right)$$

10

20

30

40

50

を算出する走行抵抗演算手段と、

入力されるスリップ率から前記トルク (T) を算出する比例積分制御手段と、

前記駆動輪の回転速度 () 及び回転加速度

【数 19】

$$(\dot{\omega})$$

を算出する車両モデル演算手段と、

前記比例積分制御手段が算出したトルクと、前記車両モデル演算手段が算出した駆動輪

の回転速度および回転加速度と、前記走行抵抗演算手段が算出した推定走行抵抗を用いて

、スリップ率に関する常微分方程式を計算することにより推定スリップ率

【数 20】

$$(\hat{\lambda})$$

を算出するスリップ率演算手段と

を備え、

前記比例積分制御手段は、所望の目標スリップ率 (*) から前記推定スリップ率を引いたスリップ率を入力され、前記トルク指令を演算する手段は、当該比例積分制御手段から算出された前記トルクに基づいて演算することを特徴とするスリップ率制御装置。

【請求項 21】

前記比例積分制御手段は、非線形補償を行うことを特徴とする請求項 20 に記載のスリップ率制御装置。

【請求項 22】

前記比例積分制御手段は、式 (E) に基づく非線形補償を行うことを特徴とする請求項 21 に記載のスリップ率制御装置。

【数 21】

$$T = r^2 M \omega \left(-\frac{\dot{\omega}}{\omega} \lambda + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M} \right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} + K_p (\lambda^* - \lambda) \right) \quad \dots (E) \quad 30$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント、K_p : 比例定数)

【請求項 23】

前記比例積分制御手段は、目標スリップ率と目標トルクから式 (F) に基づいて算出された前記駆動輪の回転加速度を式 (E) において用いることを特徴とする請求項 22 に記載のスリップ率制御装置。

【数 22】

$$\dot{\omega} = \frac{T}{J_{\omega} + r^2 M (1 - \lambda^*)} \quad \dots (F) \quad 40$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

【請求項 24】

モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車に用いるスリップ率制御装置において、

前記モータに対するトルク指令を演算する手段と、

前記モータのトルクを前記トルク指令に基づき制御する手段と、

前記自動車の車体加速度 (a_x) を測定する加速度測定手段と、

前記自動車の駆動力の推定値を算出する駆動力演算手段と、

前記駆動力演算手段が算出した推定駆動力と前記加速度測定手段が測定した前記車体加速度とから走行抵抗の推定値

10

20

30

40

50

【数 2 3】

$$(\hat{F}_{dr})$$

を算出する走行抵抗演算手段と、
 入力される駆動輪の回転速度から目標トルク (T) を算出する比例積分制御手段と、
 前記目標トルクから前記駆動輪の回転速度 () 及び回転加速度

【数 2 4】

$$(\dot{\omega})$$

10

を算出する車両モデル演算手段と、
 前記比例積分制御手段が算出した目標トルクと、前記車両モデル演算手段が算出した駆動輪の回転速度および回転加速度と、前記走行抵抗演算手段が算出した推定走行抵抗を用いて、スリップ率に関する常微分方程式を計算することにより推定スリップ率

【数 2 5】

$$(\hat{\lambda})$$

20

を算出するスリップ率演算手段と、
 前記スリップ率演算手段が算出した推定スリップ率から車体速度を算出し、当該車体速度から所望の目標スリップ率 (*) に対する駆動輪の目標回転速度を算出する車輪速度演算手段とを備え、
 前記比例積分制御手段は、前記スリップ率演算手段が算出した推定スリップ率に応じて当該制御ゲインを変化させ、前記トルク指令を演算する手段は、当該比例積分制御手段から算出された前記トルクに基づいて演算することを特徴とするスリップ率制御装置。

【請求項 2 5】

前記比例積分制御手段は、式 (G) に基づき極配置法により前記制御ゲインを決定することを特徴とする請求項 2 4 に記載のスリップ率制御装置。

30

【数 2 6】

$$\omega = \frac{1}{(J_{\omega} + r^2 M(1 - \lambda))s} T \quad \dots (G)$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

【請求項 2 6】

前記スリップ率演算手段は、スリップ率の前記常微分方程式として式 (C) を計算することにより、前記推定スリップ率を算出することを特徴とする請求項 2 0 乃至 2 5 に記載のスリップ率制御装置。

40

【数 2 7】

$$\dot{\lambda} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} + \frac{\hat{F}_{dr}}{r M \omega} \quad \dots (C)$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

【請求項 2 7】

前記スリップ率演算手段は、前記式 (C) の右辺に車体加速度の推定誤差に基づくスリップ率オブザーバを加えて計算することを特徴とする請求項 2 6 に記載のスリップ率制御装置。

50

【請求項 28】

前記スリップ率演算手段は、前記式(C)の右辺に前記スリップ率オブザーバを加えた式(D)を計算することを特徴とする請求項27に記載のスリップ率制御装置。

【数 28】

$$\dot{\lambda} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega}\lambda + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} + \frac{\dot{F}_{dr}}{r M \omega} + k(\hat{\lambda}) \left(\alpha_r(t) - \frac{N}{M} \mu(\hat{\lambda}) + \frac{\dot{F}_{dr}}{M} \right) \dots (D)$$

(k:オブザーバゲイン、N:タイヤ1輪にかかる垂直抗力、μ:摩擦係数)

10

【請求項 29】

モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車において、請求項1乃至9のいずれかに記載のスリップ率推定装置を備え、当該スリップ率推定装置が算出する推定スリップ率が所望の値をとるようにモータの前記トルクを制御することを特徴とする自動車。

【請求項 30】

モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車において、モータの当該トルクを制御する請求項10乃至28のいずれかに記載のスリップ率制御装置を備えたことを特徴とする自動車。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

20

【0001】

本発明は、スリップ率推定装置およびスリップ率制御装置に関し、より詳細には、車体速を用いないスリップ率推定装置およびスリップ率制御装置に関する。

【背景技術】

【0002】

現行の内燃機関自動車(ICEV:Internal Combustion Engine Vehicle)に対し、電気自動車(EV:Electric Vehicle)はエネルギー・環境問題の他に、トルク応答が数百倍速く、正確に発生トルクを把握することが可能であるという利点がある。これらの優位性はモータに由来するものであり、駆動力としてモータを利用する電気自動車特有の利点である。これらの利点に注目することによって、ICEVには不可能であった車両制御が可能になり、トラクションコントロールについても、これらモータの優位性を生かした制御が行われるようになった(非特許文献1、2参照)。

30

【0003】

トラクションコントロールを実現する上で重要な変数であるスリップ率を測定するには、車体速の測定は不可欠であった。車体速の測定には、第5輪を装着する、または非駆動輪にセンサを取り付けて車輪の回転速度を測定する、もしくは加速度センサにより得られた値を積分する必要がある。

【0004】

しかしながら、第5輪の装着は非常に困難であり、加速度センサを用いる場合にはノイズや積分を行なう際にオフセットが生じて精密な測定が困難であるという課題があった。また、非駆動輪にセンサを取り付けて車輪の回転速度から車体速を測定する方法も、制動時には車体速を測定できない、車両の前輪が非駆動輪である場合には舵角を切ることで正確な車体速が得られなくなる、非駆動輪を持たない全輪駆動車には適用できない等の課題があった。また、非駆動輪にセンサを取り付けることでコストアップやシステムの複雑化が生じるという課題があった。

40

【0005】

本発明は、このような課題に鑑みてなされたもので、その目的とするところは、車体速を用いることなくスリップ率を推定するスリップ率推定装置およびそれを用いて目標スリップ率に素早く追従することが可能なスリップ率制御装置を提供することにある。

【0006】

50

【非特許文献1】吉本貫太郎、河村篤男、「電気自動車の車輪スリップ率推定方法」、電気学会産業応用部門大会、平成12年、Vol.2、pp.561-564

【非特許文献2】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、1998年、Vol.118-D、No.1、pp.44-50

【非特許文献3】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

【非特許文献4】齋藤健夫、藤本博志、野口季彦、「スリップ率及びヨーモーメントオブザーバを用いた電気自動車の操縦安定化制御方法」、電気学会産業計測制御研究会、2003年、IIC-03-52、pp.41-46

【非特許文献5】Y.Hori, "Traction Control of Electric Vehicle -Basic Experimental Results using the Test EV "UOT Electric March II" ", IEEE Trans. on Industry Applications, 1998, Vol.34, No.5, pp.1131-1138

【非特許文献6】坂井真一郎、堀洋一、「電気自動車の新しい車両運動制御に関する研究」、東京大学学位論文、1999

【発明の開示】

【0007】

本発明の一実施形態は、モータのトルク(T)で駆動輪を駆動する自動車に用いるスリップ率推定装置において、おいて、前記モータのトルクを測定するモータトルク測定手段と、駆動輪の回転速度()および回転加速度

【0008】

【数29】

$(\dot{\omega})$

を算出する車両モデル演算手段と、前記モータトルク測定手段が測定したトルクと前記車両モデル演算手段が算出した回転速度および回転加速度を用いて、スリップ率に関する常微分方程式を計算することにより推定スリップ率

【0009】

【数30】

$(\hat{\lambda})$

を算出するスリップ率演算手段とを備えている。

【0010】

前記スリップ率演算手段は、スリップ率の前記常微分方程式として式(A)を計算することにより、前記推定スリップ率を算出することができる。

【0011】

【数31】

$$\dot{\lambda} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \dots (A)$$

(r: 駆動輪のタイヤ半径、M: 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

前記スリップ率演算手段は、前記式(A)の右辺に車体加速度の推定誤差に基づくスリップ率オブザーバを加えて計算することの特徴とすることができる。

【0012】

当該自動車の車体加速度(a_x)を測定する加速度測定手段をさらに有し、前記スリップ率演算手段は、前記式(A)の右辺に前記スリップ率オブザーバを加えて計算することができる。

【0013】

前記スリップ率演算手段は、前記式(A)の右辺に前記スリップ率オブザーバを加えた式(B)を計算することができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 4 】

【 数 3 2 】

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\lambda}} = & -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \\ & + k(\hat{\lambda}) \left(a_x(t) - \frac{N}{M} \mu(\hat{\lambda})\right) \end{aligned} \quad \dots (B)$$

(k : オブザーバゲイン、N : タイヤ 1 輪にかかる垂直抗力、μ : 摩擦係数)

また、別の実施形態は、モータのトルク (T) で駆動輪を駆動する自動車に用いるスリップ率推定装置において、前記モータのトルクを測定するモータトルク測定手段と、前記自動車の車体加速度 (a_x) を測定する加速度測定手段と、駆動輪の回転速度 () および回転加速度

10

【 0 0 1 5 】

【 数 3 3 】

 $(\dot{\omega})$

を算出する車両モデル演算手段と、前記自動車の駆動力の推定値を算出する駆動力演算手段と、前記駆動力演算手段が算出した推定駆動力と前記加速度測定手段が測定した前記車体加速度から走行抵抗 (F_{dr}) の推定値を算出する走行抵抗演算手段と、前記モータトルク測定手段が測定したトルクと、前記車両モデル演算手段が算出した回転速度および回転加速度と、前記走行抵抗演算手段が算出した推定走行抵抗を用いて、スリップ率に関する常微分方程式を計算することにより推定スリップ率

20

【 0 0 1 6 】

【 数 3 4 】

 $(\hat{\lambda})$

を算出するスリップ率演算手段とを備えている。

【 0 0 1 7 】

前記スリップ率演算手段は、スリップ率の前記常微分方程式として式 (C) を計算することにより、推定スリップ率を算出することができる。

30

【 0 0 1 8 】

【 数 3 5 】

$$\dot{\hat{\lambda}} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} + \frac{\hat{F}_{dr}}{r M \omega} \quad \dots (C)$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

前記スリップ率演算手段は、前記式 (C) の右辺に車体加速度の推定誤差に基づくスリップ率オブザーバを加えて計算することができる。

40

【 0 0 1 9 】

前記スリップ率演算手段は、前記式 (C) の右辺に前記スリップ率オブザーバを加えた式 (D) を計算することができる。

【 0 0 2 0 】

【 数 3 6 】

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\lambda}} = & -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} + \frac{\hat{F}_{dr}}{r M \omega} \\ & + k(\hat{\lambda}) \left(a_x(t) - \frac{N}{M} \mu(\hat{\lambda}) + \frac{\hat{F}_{dr}}{M}\right) \end{aligned} \quad \dots (D)$$

(k : オブザーバゲイン、N : タイヤ 1 輪にかかる垂直抗力、μ : 摩擦係数)

50

また別の実施形態は、モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車に用いるスリップ率制御装置において、前記モータに対するトルク指令を演算する手段と、前記モータのトルクを前記トルク指令に基づき制御する手段と、入力されるスリップ率から目標トルク(T)を算出する比例積分制御手段と、前記目標トルクから前記駆動輪の回転速度()及び回転加速度

【0021】

【数37】

($\dot{\omega}$)

を算出する車両モデル演算手段と、前記比例積分制御手段が算出した目標トルク、前記車両モデル演算手段が算出した駆動輪の回転速度及び回転加速度を用いてスリップ率に関する常微分方程式を計算して推定スリップ率

10

【0022】

【数38】

($\hat{\lambda}$)

を算出するスリップ率演算手段とを備え、前記比例積分制御手段は、所望の目標スリップ率(λ^*)から前記推定スリップ率を引いたスリップ率を入力され、前記トルク指令を演算する手段は、当該比例積分制御手段から算出された前記目標トルクに基づいて演算することができる。

20

【0023】

前記比例積分制御手段は、非線形補償を行うことができる。

【0024】

前記比例積分制御手段は、式(E)に基づく非線形補償を行うことができる。

【0025】

【数39】

$$T = r^2 M \omega \left(-\frac{\dot{\omega}}{\omega} \lambda + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M} \right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} + K_p (\lambda^* - \lambda) \right) \dots (E)$$

30

(r: 駆動輪のタイヤ半径、M: 車両重量、J: 駆動輪回転部慣性モーメント、K_p: 比例定数)

前記比例積分制御手段は、目標スリップ率と目標トルクから式(F)に基づいて算出された前記駆動輪の回転加速度を式(E)において用いることができる。

【0026】

【数40】

$$\dot{\omega} = \frac{T}{J_{\omega} + r^2 M (1 - \lambda^*)} \dots (F)$$

40

(r: 駆動輪のタイヤ半径、M: 車両重量、J: 駆動輪回転部慣性モーメント)

また別の実施形態は、モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車に用いるスリップ率制御装置において、指定された駆動輪の回転速度から前記モータに対するトルク指令を演算する手段と、前記モータのトルクを前記トルク指令に基づき制御する手段と、入力される駆動輪の回転速度から目標トルク(T)を算出する比例積分制御手段と、前記目標トルクから前記駆動輪の回転速度()及び回転加速度

【0027】

【数41】

($\dot{\omega}$)

50

を算出する車両モデル演算手段と、前記比例積分制御手段が算出した目標トルク、前記車両モデル演算手段が算出した駆動輪の回転速度及び回転加速度を用いてスリップ率に関する常微分方程式を計算して推定スリップ率

【 0 0 2 8 】

【数 4 2】

($\hat{\lambda}$)

を算出するスリップ率演算手段と、前記スリップ率演算手段が算出した推定スリップ率から車体速度を算出し、当該車体速度から目標スリップ率に対する駆動輪の目標回転速度を算出する車輪速度演算手段とを備え、前記比例積分制御手段は、前記スリップ率演算手段が算出した推定スリップ率に応じて当該制御ゲインを変化させ、前記トルク指令を演算する手段は、当該比例積分制御手段から算出された前記目標トルクに基づいて演算することができる。

10

【 0 0 2 9 】

前記比例積分制御手段は、式 (G) に基づき極配置法により前記制御ゲインを決定することができる。

【 0 0 3 0 】

【数 4 3】

$$\omega = \frac{1}{(J_{\omega} + r^2 M(1 - \lambda))s} T \quad \dots (G)$$

20

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

前記スリップ率演算手段は、スリップ率の前記常微分方程式として式 (A) を計算することにより、前記推定スリップ率を算出することができる。

【 0 0 3 1 】

【数 4 4】

$$\dot{\lambda} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \quad \dots (A)$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

30

前記スリップ率演算手段は、前記式 (A) の右辺に車体加速度の推定誤差に基づくスリップ率オブザーバを加えて計算することができる。

【 0 0 3 2 】

前記自動車は、当該自動車の車体加速度 (a_x) を測定する加速度測定手段をさらに有し、前記スリップ率推定手段は、前記式 (A) の右辺に前記スリップ率オブザーバを加えて計算することができる。

【 0 0 3 3 】

前記スリップ率演算手段は、前記式 (A) の右辺に前記スリップ率オブザーバを加えた式 (B) を計算することができる。

【 0 0 3 4 】

【数 4 5】

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} = & -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \\ & + k(\hat{\lambda}) \left(a_x(t) - \frac{N}{M} \mu(\hat{\lambda})\right) \quad \dots (B) \end{aligned}$$

(k : オブザーバゲイン、N : タイヤ 1 輪にかかる垂直抗力、 μ : 摩擦係数)

また別の実施形態は、モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車に用いるスリップ率制御装置において、前記モータに対するトルク指令を演算する手段と、前記モータのトルク

40

を前記トルク指令に基づき制御する手段と、前記自動車の車体加速度 (a_x) を測定する
加速度測定手段と、前記自動車の駆動力の推定値を算出する駆動力演算手段と、前記駆動
力演算手段が算出した推定駆動力と前記加速度測定手段が測定した前記車体加速度とから
 走行抵抗の推定値

【 0 0 3 5 】

【数 4 6】

(\hat{F}_{dr})

を算出する走行抵抗演算手段と、入力されるスリップ率から前記トルク (T) を算出する
 比例積分制御手段と、前記駆動輪の回転速度 () 及び回転加速度

10

【 0 0 3 6 】

【数 4 7】

$(\dot{\omega})$

を算出する車両モデル演算手段と、前記比例積分制御手段が算出したトルクと、前記車両
 モデル演算手段が算出した駆動輪の回転速度および回転加速度と、前記走行抵抗演算手段
 が算出した推定走行抵抗を用いて、スリップ率に関する常微分方程式を計算することによ
 り推定スリップ率

【 0 0 3 7 】

【数 4 8】

20

$(\hat{\lambda})$

を算出するスリップ率演算手段とを備え、前記比例積分制御手段は、所望の目標スリップ
 率 (λ^*) から前記推定スリップ率を引いたスリップ率を入力され、前記トルク指令を演
 算する手段は、当該比例積分制御手段から算出された前記トルクに基づいて演算すること
 ができる。

【 0 0 3 8 】

前記比例積分制御手段は、非線形補償を行うことができる。

【 0 0 3 9 】

前記比例積分制御手段は、式 (E) に基づく非線形補償を行うことができる。

30

【 0 0 4 0 】

【数 4 9】

$$T = r^2 M \omega \left(-\frac{\dot{\omega}}{\omega} \lambda + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M} \right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} + K_p (\lambda^* - \lambda) \right) \quad \dots (E)$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、 M : 車両重量、 J : 駆動輪回転部慣性モーメント、 K_p : 比例
 定数)

前記比例積分制御手段は、目標スリップ率と目標トルクから式 (F) に基づいて算出さ
 れた前記駆動輪の回転加速度を式 (E) において用いることができる。

40

【 0 0 4 1 】

【数 5 0】

$$\dot{\omega} = \frac{T}{J_{\omega} + r^2 M (1 - \lambda^*)} \quad \dots (F)$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、 M : 車両重量、 J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車に用いたスリップ率制御装置において、前記
 モータに対するトルク指令を演算する手段と、前記モータのトルクを前記トルク指令に基
 づき制御する手段と、前記自動車の車体加速度 (a_x) を測定する加速度測定手段とを有

50

した前記自動車の駆動力の推定値を算出する駆動力演算手段と、前記駆動力演算手段が算出した推定駆動力と前記加速度測定手段が測定した前記車体加速度とから走行抵抗の推定値

【 0 0 4 2 】

【数 5 1】

(\hat{F}_{dr})

を算出する走行抵抗演算手段と、入力される駆動輪の回転速度から目標トルク (T) を算出する比例積分制御手段と、前記目標トルクから前記駆動輪の回転速度 () 及び回転加速度

10

【 0 0 4 3 】

【数 5 2】

$(\dot{\omega})$

を算出する車両モデル演算手段と、前記比例積分制御手段が算出した目標トルクと、前記車両モデル演算手段が算出した駆動輪の回転速度および回転加速度と、前記走行抵抗演算手段が算出した推定走行抵抗を用いて、スリップ率に関する常微分方程式を計算することにより推定スリップ率

【 0 0 4 4 】

【数 5 3】

$(\hat{\lambda})$

を算出するスリップ率演算手段と、前記スリップ率演算手段が算出した推定スリップ率から車体速度を算出し、当該車体速度から所望の目標スリップ率 (*) に対する駆動輪の目標回転速度を算出する車輪速度演算手段とを備え、前記比例積分制御手段は、前記スリップ率演算手段が算出した推定スリップ率に応じて当該制御ゲインを変化させ、前記トルク指令を演算する手段は、当該比例積分制御手段から算出された前記トルクに基づいて演算することができる。

20

【 0 0 4 5 】

前記比例積分制御手段は、式 (G) に基づき極配置法により前記制御ゲインを決定することができる。

30

【 0 0 4 6 】

【数 5 4】

$$\omega = \frac{1}{(J_{\omega} + r^2 M(1 - \lambda))s} T \quad \dots (G)$$

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

前記スリップ率演算手段は、スリップ率の前記常微分方程式として式 (C) を計算することにより、前記推定スリップ率を算出することができる。

【 0 0 4 7 】

【数 5 5】

$$\dot{\lambda} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} + \frac{\hat{F}_{dr}}{r M \omega} \quad \dots (C)$$

40

(r : 駆動輪のタイヤ半径、M : 車両重量、J : 駆動輪回転部慣性モーメント)

前記スリップ率演算手段は、前記式 (C) の右辺に車体加速度の推定誤差に基づくスリップ率オブザーバを加えて計算することができる。

【 0 0 4 8 】

前記スリップ率演算手段は、前記式 (C) の右辺に前記スリップ率オブザーバを加えた式 (D) を計算することができる。

50

【 0 0 4 9 】

【数 5 6】

$$\dot{\lambda} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega}\lambda + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} + \frac{\hat{F}_{dr}}{r M \omega} + k(\lambda) \left(a_x(t) - \frac{N}{M} \mu(\lambda) + \frac{\hat{F}_{dr}}{M} \right) \dots (D)$$

(k : オブザーバゲイン、N : タイヤ 1 輪にかかる垂直抗力、μ : 摩擦係数)

【 0 0 5 0 】

また別の実施形態は、モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車において、上記のいずれかに記載のスリップ率推定装置を備え、当該スリップ率推定装置が算出する推定スリップ率が所望の値をとるようにモータの前記トルクを制御することができる。

10

【 0 0 5 1 】

また別の実施形態は、モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車において、モータの当該トルクを制御する上記のいずれかに記載のスリップ率制御装置を備えている。

【 0 0 5 2 】

本発明によれば、車体速を用いることなくスリップ率を正確に推定し、かつ目標スリップ率に素早く追従する高精度なスリップ率制御を行うことが可能である。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 5 3 】

【図 1】図 1 は、車両に働く力を示す概略図である。

20

【図 2】図 2 は、乾いたアスファルト面、濡れた路面、凍結した路面の各状態における典型的な μ - 曲線を示す図である。

【図 3】図 3 は、車両モデルのブロック線図である。

【図 4】図 4 は、実施形態 1 に係る推定装置を用いたスリップ率推定のブロック線図である。

【図 5】図 5 は、実施形態 1 に係る第 1 のスリップ率制御のブロック線図である。

【図 6 A】図 6 A は、スリップ率に関するシミュレーション結果を示す図である。

【図 6 B】図 6 B は、車輪速に関するシミュレーション結果を示す図である。

【図 7】図 7 は、逐次形最小二乗法によるスリップ率推定のブロック線図である。

30

【図 8】図 8 は、外乱オブザーバによるスリップ率推定のブロック線図である。

【図 9 A】図 9 A は、シミュレーション結果である逐次形最小二乗法による推定におけるスリップ率の真値と推定値を示す図である。

【図 9 B】図 9 B は、シミュレーション結果である外乱オブザーバによる推定におけるスリップ率の真値と推定値を示す図である。

【図 9 C】図 9 C は、シミュレーション結果である第 1 の推定装置による推定におけるスリップ率の真値と推定値を示す図である。

【図 9 D】図 9 D は、シミュレーション結果である逐次形最小二乗法による推定におけるパラメータ、 を示す図である。

【図 9 E】図 9 E は、シミュレーション結果である外乱オブザーバによる推定における外乱推定値を示す図である。

40

【図 9 F】図 9 F は、シミュレーション結果である外乱オブザーバによる推定における

【 0 0 5 4 】

【数 5 7】

ω

ω

を示す図である。

【図 10】図 10 は、スリップ率制御を行わずに走行させた際に得られた、車体速、車輪速の実験結果を示す図である。

50

【図 1 1 A】図 1 1 A は、実車での実験結果である逐次形最小二乗法による推定におけるスリップ率の真値と推定値を示す図である。

【図 1 1 B】図 1 1 B は、実車での実験結果である外乱オブザーバによる推定におけるスリップ率の真値と推定値を示す図である。

【図 1 1 C】図 1 1 C は、実車での実験結果である第 1 の推定装置による推定におけるスリップ率の真値と推定値を示す図である。

【図 1 1 D】図 1 1 D は、実車での実験結果である実車での実験結果であって、逐次形最小二乗法による推定におけるパラメータ y 、 \hat{y} を示す図である。

【図 1 1 E】図 1 1 E は、実車での実験結果である外乱オブザーバによる推定における外乱推定値を示す図である。

【図 1 1 F】図 1 1 F は、実車での実験結果である第 1 の推定装置による推定における

【 0 0 5 5 】

【 数 5 8 】

の

の

を示す図である。

【図 1 2】図 1 2 は、アンチスリップ制御のブロック線図である。

【図 1 3 A】図 1 3 A は、アンチスリップ制御の実車での実験結果であるスリップ率を示す図である。

【図 1 3 B】図 1 3 B は、アンチスリップ制御の実車での実験結果である車輪速を示す図である。

【図 1 3 C】図 1 3 C は、アンチスリップ制御の実車での実験結果である車体速を示す図である。

【図 1 4】図 1 4 は、第 2 のスリップ率制御のブロック線図である。

【図 1 5】図 1 5 は、駆動力とスリップ率の関係を示す図である。

【図 1 6】図 1 6 は、オブザーバゲインとスリップ率の推定値との関係を示す図である。

【図 1 7】図 1 7 は、第 1 および第 2 のSREによる推定のシミュレーション結果を示す図である。

【図 1 8】図 1 8 は、第 1 および第 2 のSREによる推定の実験結果を示す図である。

【図 1 9】図 1 9 は、第 3 のスリップ率制御のブロック線図である。

【図 2 0】図 2 0 は、第 3 のスリップ率制御のシミュレーション結果を示す図である。

【図 2 1 A】図 2 1 A は、第 1 のスリップ率制御装置の実車での実験結果であるスリップ率を示す図である。

【図 2 1 B】図 2 1 B は、第 1 のスリップ率制御装置の実車での実験結果である車輪速と車体速を示す図である。

【図 2 2】図 2 2 は、実施形態 2 に係る第 2 のスリップ率推定装置を用いたスリップ率推定のブロック線図である。

【図 2 3】図 2 3 は、走行抵抗推定器のブロック線図を示す図である。

【図 2 4】図 2 4 は、第 3 のスリップ率推定装置を用いたスリップ率推定のブロック線図である。

【図 2 5】図 2 5 は、第 4 のスリップ率推定装置を用いたスリップ率推定のブロック線図である。

【図 2 6 A】図 2 6 A は、第 1 のSREを用いたスリップ率推定のシミュレーション結果を示す図である。

【図 2 6 B】図 2 6 B は、第 3 のSRE (DRE-SRE) を用いたスリップ率推定のシミュレーション結果を示す図である。

【図 2 6 C】図 2 6 C は、第 4 のSRE (DRE-SRO) を用いたスリップ率推定のシミュレーション結果を示す図である。

【図 2 7】図 2 7 は、DRE-SREおよびDRE-SROで用いる走行抵抗推定結果のシミュレーション

10

20

30

40

50

ン結果を示す図である。

【図 2 8】図 2 8 は、DRE-SREおよびDRE-SROを用いたスリップ率推定における推定誤差のシミュレーション結果を示す図である。

【図 2 9 A】図 2 9 A は、第 1 のSREを用いたスリップ率推定のオフライン実験の結果を示す図である。

【図 2 9 B】図 2 9 B は、第 3 のSRE (DRE-SRE) を用いたスリップ率推定のオフライン実験の結果を示す図である。

【図 2 9 C】図 2 9 C は、第 4 のSRE (DRE-SRO) を用いたスリップ率推定のオフライン実験の結果を示す図である。

【図 3 0】図 3 0 は、DRESREおよびDRE-SROで用いる走行抵抗推定結果のオフライン実験の結果を示す図である。

【図 3 1】図 3 1 は、DRE-SREおよびDRE-SROを用いたスリップ率推定における推定誤差のオフライン実験の結果を示す。

【図 3 2】図 3 2 は、DRE-SREまたはDRE-SROを用いたスリップ率制御のブロック線図である。

【図 3 3】図 3 3 は、DRE-SREまたはDRE-SROを用いたスリップ率制御のシミュレーションの結果を示す図である。

【図 3 4】図 3 4 は、DRE-SREまたはDRE-SROを用いたスリップ率制御の実機実験の結果を示す図である。

【図 3 5】図 3 5 は、フィードフォワード制御によるスリップ率制御のブロック線図である。

【図 3 6】図 3 6 は、フィードフォワード制御によるスリップ率制御のシミュレーション結果を示す図である。

【図 3 7】図 3 7 は、フィードフォワード制御によるスリップ率制御の実機実験の結果を示す図である。

【図 3 8】図 3 8 は、可変ゲインを備えた回転制御によるスリップ率制御のブロック線図である。

【図 3 9】図 3 9 は、可変ゲインを備えた回転制御によるスリップ率制御のシミュレーション結果を示す図である。

【図 4 0】図 4 0 は、可変ゲインを備えた回転制御によるスリップ率制御の実機実験の結果を示す図である。

【発明を実施するための最良の形態】

【0056】

以下、図面を参照しながら本発明の実施形態について詳細に説明する。

【0057】

電気自動車は、駆動輪に接続されたモータの駆動力が駆動輪に伝達されて走行する。電源から出力された電流は、インバータを介してモータに供給される。モータは、制御手段としての電子制御ユニット（以下「ECU」と称す）を介して電氣的に接続されており、モータの出力は、ECUからの指令に基づいて制御される。ECUは、CPU、ROM、RAM、入出力ポート、および記憶装置等を含むものである。またECUには、モータの発生トルクを測定するトルク測定器、モータに装備された位置センサ、車体に生じる加速度を測定する加速度センサが電氣的にそれぞれ接続されている。

【0058】

以下に、ECUに実装されるスリップ率制御装置について説明する。

【0059】

（実施形態 1）

1.1 車体の運動方程式

まず、車両の運動を支配するパラメータについて考える。図 1 に、車両に働く力を示す。これはモータの時定数が非常に小さく、走行抵抗が十分に小さいと仮定する時になりたち、この場合の車両の運動方程式は以下の 3 つの式で表される。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 0 】

【数 5 9】

$$J_{\omega}\dot{\omega} = T - rF_d \quad \dots (1)$$

【 0 0 6 1 】

【数 6 0】

$$M\dot{V} = F_d - F_{dr} \quad \dots (2)$$

【 0 0 6 2 】

【数 6 1】

$$V_w = r\omega \quad \dots (3)$$

10

【 0 0 6 3 】

各変数は、車輪の回転速度 ω 、車体速度 V 、車輪速度 V_w 、モーメント T 、駆動力 F_d 、走行抵抗 F_{dr} である。各定数は、車体重量 M 、タイヤ半径 r 、車輪回転部慣性モーメント J とする。変数の上のドットは微分を表す。

【 0 0 6 4 】

また、スリップ率 λ は、 V_w 、 V の関数として以下のように表すことができる。

【 0 0 6 5 】

【数 6 2】

$$\lambda = \frac{V_w - V}{\max(V_w, V, \epsilon)} \quad \dots (4)$$

20

【 0 0 6 6 】

但し、駆動時には $\max(V_w, V) = V_w$ となり、制動時には $\max(V_w, V) = V$ となる。また、 ϵ は 1 と選ぶ。本願明細書においては駆動時のみを考えることとし、常に $\max(V_w, V) = V$ とする。スリップ率 λ と摩擦係数 μ の間の関係に関して、今回はシミュレーション等に使用する代表的なモデルとして Magic Formula (非特許文献 3 参照) を採用する。

【 0 0 6 7 】

【数 6 3】

$$\mu(\lambda) = D \sin(C \tan^{-1} B(1 - E)\lambda) + \frac{E}{B} \tan^{-1} B\lambda \quad \dots (5)$$

30

【 0 0 6 8 】

ここで B 、 C 、 D 、 E は所定の定数である。図 2 に、乾いたアスファルト面、濡れた路面、凍結した路面の各状態における典型的な $\mu - \lambda$ 曲線を示す。タイヤと路面が接する領域は、スリップ率 λ が、摩擦係数 μ がピーク値をとるときの値よりも小さいときには粘着領域と滑走領域が混在した状態にあり、それ以外の値をとるとときには滑走領域のみが存在して全すべり状態にある。つまり、スリップ率 λ を摩擦係数 μ がピーク値をとるときの値よりも小さくするように制御すれば、車両をスリップさせずに加速させることができる。摩擦係数 μ がピーク値を示すときのスリップ率を最適スリップ率と言い、一般的には 0.05 ~ 0.2 となる。

40

【 0 0 6 9 】

路面とタイヤ間の摩擦力 F_d は、摩擦係数 μ に垂直抗力 N を乗じて得られる。

【 0 0 7 0 】

【数 6 4】

$$F_d = \mu N \quad \dots (6)$$

【 0 0 7 1 】

50

図3に、車両モデルのブロック線図を示す。これは(1)~(6)式を関連付けて示したもので、モータトルクの測定値 T^* と各定数からスリップ率を導出するための一連の処理を表している。トルク測定器で測定したモータトルク T^* をブロック301に出力する。ブロック301は(1)式に基づいて車輪の回転速度を導出してブロック302に出力する。ブロック302は(3)式に基づき車輪速度 V を導出してブロック303に出力する。ブロック303は(4)式に基づいてスリップ率を導出してブロック304に出力する。ブロック304は(5)式に基づいて摩擦係数 μ を導出してブロック305に出力する。ブロック305は(6)式に基づいて駆動力 F_d を導出してブロック306、307に出力する。ブロック306は駆動力 F_d にタイヤ半径 r を掛けて(1)式の右辺第2項の値を算出してブロック301に出力する。ブロック307は(2)式に基づいて車体速度 V を導出してブロック303に出力する。

10

尚、上記において、トルク測定器はトルク測定手段であり、ブロック301、302は車両モデル演算手段であり、ブロック303はスリップ率演算手段であり、ブロック304~307は比例積分制御手段である。

【0072】

ここで、(1)~(4)式を用いて、 V 、 V 、 F_d を消去し、走行抵抗が無視できるほど小さい($F_d r = 0$)すると、以下の式を得ることができる。

【0073】

【数65】

$$\dot{\omega} = \frac{T + r^2 M \omega \dot{\lambda}}{J_{\omega} + r^2 M (1 - \lambda)} \equiv \frac{T + r^2 M \omega \dot{\lambda}}{J} \dots (7)$$

20

【0074】

J は車輪と車体を合せた回転部分の実際の慣性モーメントであり、(7)式の分母括弧内第2項の車軸換算の車体慣性モーメントと車輪回転部分慣性モーメント J を足し合わせた値になる。

【0075】

1.2 第1のスリップ率推定装置

30

本発明に係るスリップ率推定装置では、(7)式右辺の分子第2項も考慮に入れて推定を行う。(7)式を書き換えることにより、以下の式が得られる。

【0076】

【数66】

$$\dot{\lambda} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \lambda + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \dots (8)$$

【0077】

本発明に係るSREはこの(8)式に基づき推定を行う。本SREによるスリップ率の推定値を以下のように

40

【0078】

【数67】

$$\hat{\lambda}$$

とする。

【0079】

【数68】

$$\dot{\hat{\lambda}} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \dots (9)$$

50

【 0 0 8 0 】

図 4 に、実施形態 1 に係る第 1 のスリップ率演算手段SREを用いたスリップ率推定のブロック線図を示す。トルク測定手段で測定したモータトルク T^* を、上述の車両モデル演算手段 6 0 1、(9) 式に基づく第 1 のスリップ率演算手段SRE 6 0 2 にそれぞれ入力する。車両モデル演算手段 6 0 1 は、車輪の回転速度、車輪の回転加速度

【 0 0 8 1 】

【数 6 9 】

ω

、車体速度 V を導出し、車輪の回転速度、車輪の回転加速度

10

【 0 0 8 2 】

【数 7 0 】

ω

を第 1 のスリップ率演算手段SRE 6 0 2 に出力する。第 1 のスリップ率演算手段SRE 6 0 2 は、モータトルク T^* 、車輪の回転速度、車輪の回転加速度

【 0 0 8 3 】

【数 7 1 】

ω

20

からスリップ率

【 0 0 8 4 】

【数 7 2 】

$\hat{\lambda}$

を出力する。

【 0 0 8 5 】

ここで、スリップ率の真値 と推定値

【 0 0 8 6 】

【数 7 3 】

30

$\hat{\lambda}$

との誤差を評価するため、以下のように定義される推定誤差 $e(t)$ を考える。

【 0 0 8 7 】

【数 7 4 】

$$e(t) = \lambda - \hat{\lambda} \dots (10)$$

(8) から (9) 式を引くことにより、以下の式が得られる。

【 0 0 8 8 】

【数 7 5 】

40

$$\frac{d}{dt}e(t) = -\frac{\dot{\omega}}{\omega}e(t) \dots (11)$$

この式から

【 0 0 8 9 】

【数 7 6 】

$\frac{\dot{\omega}}{\omega} > 0$

50

である場合には、時間の経過に伴って推定誤差e(t)は零に収束することが分かる。例えば、本実施形態では駆動時(0)のうち主に想定される >0の場合、

【0090】
【数77】

$$\dot{\omega} < 0$$

であれば

【0091】
【数78】

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega} < 0$$

となつて推定誤差は拡大していくので、

【0092】
【数79】

$$\dot{\omega} > 0$$

であるときのみ第1のスリップ率演算手段SREを動作させれば精度の高い推定が可能になる。但し、モデル誤差が小さく、一度推定誤差e(t)が零に収束して推定誤差e(t)が十分小さい値であれば、

【0093】
【数80】

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega} < 0$$

にもなる不安定状態であっても推定誤差e(t)は緩やかに零に収束していくので、第1のスリップ率演算手段SREでは常に(9)式に基づく推定を行うものとする。

【0094】

1.3 第1のスリップ率推定装置を用いたスリップ率制御

車体速を測定し、スリップ率を制御する方法が提案されている。これまで述べたとおり、車体速の測定には困難があるので、本実施形態に係る第1のスリップ制御では第1のSREでスリップ率の推定を行い、スリップ率制御を行う。

【0095】

モータトルクTから、スリップ率までの伝達関数を求める。常に駆動輪は駆動していると仮定し、(4)式を全微分して線形化すると次式が得られる。

【0096】
【数81】

$$\Delta\lambda = -\frac{1}{V_{\omega 0}}\Delta V + \frac{V_0}{V_{\omega 0}^2}\Delta V_{\omega} \dots (12)$$

但し、V_{ω0}、V₀をそれぞれ車輪速、車体速の動作点とする。摩擦力に関しては、動作点となるスリップ率の近傍の傾きをaとすると、以下の式が成り立つ。

【0097】
【数82】

$$\Delta\mu = a\Delta\lambda \dots (13)$$

線形化を行って得られた(12)、(13)式と、式(1)、(2)、(6)より F_m から の伝達関数は、

【0098】

【数 8 3】

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta F_m} = \frac{1-\lambda_0}{aN_e} \frac{1}{1+\tau_a s} \quad \dots (14)$$

となる。但し、

【0 0 9 9】

【数 8 4】

$$\tau_a = \frac{J_n V \omega_0}{aN_e} \quad \dots (15) \quad 10$$

【0 1 0 0】

【数 8 5】

$$\frac{1}{N_e} = \frac{1}{N} \frac{M}{J_n + M(1-\lambda_0)} \quad \dots (16)$$

である。よって、時定数が車輪側に比例する一次遅れ形の伝達関数となる。図 5 に、実施形態 1 に係る第 1 のスリップ率制御のブロック線図を示す。 λ^* は目標スリップ率であって、ブロック 5 0 2 から出力される λ の値に実際の車輪の回転速度を制御することで、スリップ率 λ をこの目標スリップ率 λ^* に収束させることができる。目標スリップ率 λ^* をブロック 5 0 1 に入力する。ブロック 5 0 1 は積分制御器であって、モータトルク F_m を導出してブロック 5 0 2 に入力する。ブロック 5 0 2 はモータトルク T 、車輪の回転速度 ω を導出して第 1 の SRE 5 0 3 にそれらを入力する。第 1 の SRE 5 0 3 は (9) 式に基づいてスリップ率

【0 1 0 1】

【数 8 6】

$$\hat{\Delta\lambda}$$

を導出して加減算器に出力する。加減算器は、 λ^* から

【0 1 0 2】

【数 8 7】

$$\hat{\Delta\lambda}$$

を引いた値をブロック 5 0 1 に入力する。

尚、上記において、ブロック 5 0 2 は車両モデル演算手段とトルク指令を演算する手段を含み、ブロック 5 0 1 は比例積分制御手段であり、第 1 の SRE 5 0 3 はスリップ率演算手段である。

【0 1 0 3】

図 6 A、6 B に、低 μ 路 ($\mu_{max} = 0.2$) を走行し、目標ステップ率を 0.2 とするシミュレーションを行った結果を示す。スリップ率を目標スリップ率である 0.2 に制御することができている。

【0 1 0 4】

1. 4 他の SRE

ここでは、本発明に係る SRE の他に、比較のため、従来型の SRE である逐次形最小二乗法、外乱オブザーバを用いた SRE についても述べる。

【0 1 0 5】

1. 4. 1 逐次形最小二乗法による推定

(7) 式右辺の分子第 2 項はスリップ率 λ が時間的に変動したときのみ現れる項であり、定常状態での値は零である。そこで、以下のようにスリップ率の時間微分の項

【0 1 0 6】

【数 8 8】

 $\dot{\lambda}$

を零として以下の式を得る。

【0 1 0 7】

【数 8 9】

$$\frac{\omega}{T} = \frac{1}{(J_{\omega} + r^2 M(1 - \lambda))s} \equiv \frac{1}{Js} \quad \dots (17)$$

【0 1 0 8】

10

(17)式において、車輪速 ω 、モータトルクTは測定可能であり、J、r、Mは全て定数であって、 λ 以外は既知である。そこで、逐次形最小二乗法を用いて慣性モーメントJの同定を行い、この慣性モーメントJからスリップ率 λ を推定する。

【0 1 0 9】

以下に推定のアルゴリズムを示す。(17)式左辺に微分項があるため、両辺にローパスフィルタをかける。

【0 1 1 0】

【数 9 0】

$$\frac{s}{\tau s + 1} \omega = \frac{1}{(J_{\omega} + r^2 M(1 - \lambda))} \frac{1}{\tau s + 1} T \quad \dots (18) \quad 20$$

【0 1 1 1】

(18)式左辺をy(k)、右辺第1項を $\hat{\lambda}(k)$ 、右辺第2項を $T(k)$ と書き換え、以下の逐次形最小二乗法のアルゴリズムに基づいて慣性モーメントJの同定を行い、(21)式よりスリップ率

【0 1 1 2】

【数 9 1】

 $\hat{\lambda}$

を導出する。 κ は忘却係数とする。

30

【0 1 1 3】

【数 9 2】

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\xi(k)}{\kappa + \xi^2(k)\Gamma(k-1)} [\xi(k)\hat{\theta}(k-1) - y(k)] \quad \dots (19)$$

【0 1 1 4】

【数 9 3】

$$\Gamma(k) = \frac{1}{\kappa} \left[\Gamma(k-1) - \frac{\Gamma^2(k-1)\xi^2(k)}{\kappa + \Gamma(k-1)\xi(k)^2} \right] \quad \dots (20) \quad 40$$

【0 1 1 5】

【数 9 4】

$$\hat{\lambda} = -\frac{\hat{J} - J_{\omega}}{r^2 M} + 1 \quad \dots (21)$$

【0 1 1 6】

図7に、逐次形最小二乗法によるスリップ率推定のブロック線図を示す。この処理は、車両モデル701の処理に(19)~(21)式の逐次形最小二乗法を用いたスリップ率演算手段SRE702を組み合わせたものである。

【0 1 1 7】

50

1.4.2 外乱オブザーバによる推定

スリップ率の時間変化を零とした(17)式を用いて推定を行う。車輪空転現象が起きると、スリップ率が大きくなり、それに伴い慣性モーメントJの値が大きくなる。この値の変動を外乱とみなし、この外乱をオブザーバとして利用することによりスリップ率の推定を行う。スリップ率=0のときの慣性モーメントJの値をノミナル値 $J_n = J + r^2 M$ とおき、さらにスリップ率の変動をモデル化誤差とみなす。すなわち、

【0118】

【数95】

$$\frac{\omega}{T} = \frac{1}{J_s} \equiv \frac{1}{J_n s} (1 + \Delta) \quad \dots (22) \quad 10$$

(22)式を書き換えると、 Δ は以下の式より得られる。

【0119】

【数96】

$$\Delta = \frac{J_n - J}{J} \quad \dots (23)$$

また、(17)式より、次式が得られる。

【0120】

【数97】

$$J_n \dot{\omega} = T + r^2 M \lambda \dot{\omega} \equiv T - d \quad \dots (24) \quad 20$$

これより、スリップ率変動に伴う外乱は

【0121】

【数98】

$$d = -r^2 M \lambda \dot{\omega}$$

となり、この外乱dよりスリップ率を算出する。ここでは

【0122】

【数99】

$$\hat{d}$$

は外乱オブザーバにより推定された外乱とし、(24)式より

【0123】

【数100】

$$\hat{\lambda} = -\frac{\hat{d}}{r^2 M \dot{\omega}} \quad \dots (25) \quad 40$$

となる。ここで、

【0124】

【数101】

$$\dot{\omega}$$

の擬似微分演算のために、ハイパスフィルタをかけるものとする。図8に、外乱オブザーバによるスリップ率推定のブロック線図を示す。点線で囲まれた部分P(s)では車両モデルと同等な処理が行われ、外乱オブザーバSRE 801では(25)式の処理が行われる。

【0125】

1.5 シミュレーションによる検証

上述した3つのSREに関して、スリップ率推定のシミュレーションを行った。各定数は

、実機より得られた値である $J = 1.0[\text{Nms}^2]$ 、 $J_n = 20.3[\text{Nms}^2]$ 、 $M = 420[\text{kg}]$ 、 $r = 0.22[\text{m}]$ とする。開始から5.0[sec]経過した時点からトルク目標スリップ率 $T^* = 100[\text{Nm}]$ を与える。路面状況は発進から3[sec]まで、低 μ 路($\mu_{\max} = 0.2$)とし、3[sec]以降は乾燥路($\mu_{\max} = 1.0$)とした。また、サンプリング周波数は10[kHz]とする。

【0126】

1.5.1 逐次形最小二乗法による推定
ホールセンサの量子化誤差が大きいため、

【0127】

【数102】

の

10

の擬似微分演算のためのハイパスフィルタのカットオフ周波数 $\omega_c = 10[\text{rad/sec}]$ 、忘却係数 $\alpha = 0.99$ とにおいてシミュレーションを行った。

【0128】

推定されたスリップ率および y と λ の値を図9A、9Dに示す。スリップ率に大きな変動がない定常的な状態においては正確に推定がなされているが、スリップ率に大きな変動が起きると正しく推定することができなくなり、大きな誤差を生じさせている。このように大きな誤差が生じるのは、(7)式におけるスリップ率の微分項である。

【0129】

【数103】

20

λ

を無視したためだと考えられる。

【0130】

1.5.2 外乱オブザーバによる推定

外乱オブザーバに組み込まれている、ローパスフィルタのカットオフ周波数を $\omega_{lpf} = 30[\text{rad/sec}]$ 、 $\omega_c = 10[\text{rad/sec}]$ とした。外乱オブザーバによって推定されたスリップ率および

【0131】

【数104】

30

\hat{d}

を図9B、9Eに示す。この方法も(7)式におけるスリップ率の微分項である。

【0132】

【数105】

λ

を無視しているため、スリップ率の大きな変動が起こった場合、正しく推定することができなくなる。

【0133】

1.5.3 本発明に係る第1のスリップ率推定装置による推定

本第1のスリップ率推定装置では、積分を行う際にノイズを除去するために遅いフィルタを使用する必要がないので、

【0134】

【数106】

の

40

の擬似微分演算のためのハイパスフィルタのカットオフ周波数は $\omega_c = 500[\text{rad/sec}]$ とした。

【0135】

50

他の2つの方法と異なり、本実施形態に係る第1のスリップ率推定装置ではスリップ率の時間微分値

【0136】

【数107】

え

を考慮してスリップ率の推定を行っているため、スリップ率に大きな変動が起こっても正しく推定が行えている。このシミュレーションでは、図9C、9Fに示すように

【0137】

【数108】

10

の

の

が負の値をとる状況も存在するが、推定誤差 $e(t)$ は発散することなく零に収束していき、他の2つの方法に比べて非常に高い精度で推定を行うことができる。

【0138】

1.6 実機によるオフライン検証

本実施形態に係る第1のスリップ率推定装置、および従来技術における他の2つのスリップ率推定装置を実際に電気自動車に実装して実験を行った。

【0139】

20

実験環境

実験機は市販の小型電気自動車(CQMOTORS製 Qi(QUNO))を改造したものをを用いた。(株)Myway技研により作製されたインバータシステムを用いてモータを制御している。また、モータにはホールセンサがついているが電気角で1回転あたり6パルスと分解能が低いため、位置角は線形補完することによりベクトル制御を行っている。このときのサンプリング周波数は10[kHz]とする。また、DSPでベクトル制御だけでなく、トラクション制御や姿勢制御等も全てを行っている。本検証では車体速を測定するために加速度センサを利用した。また、低 μ 路をプラスチックのこを用いてその上に洗剤をまくことで実現した。

【0140】

実験では、トルク目標スリップ率を $T^* = 80[\text{Nm}]$ を与える。また、約3[sec]までは低 μ 路を走行し、それ以降は乾燥路を走行した。図10に、スリップ率制御を行わずに走行させた際に得られた、車体速、車輪速の実験結果を示す。車輪速が上がっていくに従い速度が伸びなくなるのは、逆起電力の影響だと考えられる。

30

【0141】

1.6.1 逐次形最小二乗法による推定

シミュレーションと同様に、ハイパスフィルタのカットオフ周波数 $\omega_c = 10[\text{rad/sec}]$ 、忘却係数 $\lambda = 0.99$ として、実験を行った。図11A、11Dに、逐次形最小二乗法によって推定されたスリップ率および y と \dot{y} の値を示す。シミュレーションとは異なり、ホールセンサの量子化誤差の影響により、 \dot{y} の値が

【0142】

40

【数109】

の

に脈動が生じる。これが、 \dot{y} の値に影響を与えており、推定誤差が生じている。また、シミュレーションと同様に、スリップ率の微分項

【0143】

【数110】

え

が考慮に入れられていないので、スリップ率の大きな変動が生じると、正しい推定が行え

50

なくなっている。また、

【 0 1 4 4 】

【 数 1 1 1 】

.

ω

の脈動を抑えるために遅いフィルタをかけているために、変動が生じた後の真値への追従が遅くなっている。

【 0 1 4 5 】

1.6.2 外乱オブザーバによる推定

シミュレーションと同様の条件で実験を行った。図 1 1 B、1 1 E に、外乱オブザーバ 10
によって推定されたスリップ率および

【 0 1 4 6 】

【 数 1 1 2 】

\hat{d}

の値を示す。この手法でも、ホールセンサの量子化誤差の影響を受けて推定誤差が生じており、また、スリップ率の大きな変動が起きると、正しい推定を行えなくなっている。

【 0 1 4 7 】

1.6.3 第 1 のスリップ率推定装置による推定

図 1 1 C、1 1 F に、第 1 のスリップ率推定装置によって推定されたスリップ率および 20

【 0 1 4 8 】

【 数 1 1 3 】

.

ω

ω

の時間変化を示す。第 1 のスリップ率推定装置は、他の手法とは異なり、積分を行ってスリップ率 $\hat{\omega}$ を求めているので、脈動が起きても遅いフィルタをかける必要がない。また、スリップ率 ω の変動が起きても、精度の高い推定が行われている。加えて、理論的には

【 0 1 4 9 】

【 数 1 1 4 】

30

.

$\frac{\omega}{\omega} < 0$

ω

である不安定な状態が存在するが、シミュレーションの結果と同様に推定誤差は非常に小さい。

【 0 1 5 0 】

1.7 スリップ制御

スリップ率制御についても、比較のため、従来のスリップ率制御について述べる。

【 0 1 5 1 】

1.7.1 アンチスリップ制御

上述の外乱オブザーバをスリップ制御に用いた従来 of 制御方法を説明する。(24)式 40
より以下の式を得る。

【 0 1 5 2 】

【 数 1 1 5 】

$$J_n \dot{\omega} = T + \Delta J \dot{\omega} \quad \dots (26)$$

【 0 1 5 3 】

プラントの変動である右辺第 2 項を外乱とみなす。ここでは、外乱抑圧のために外乱オブザーバを利用し、アンチスリップ制御を行う。しかし、ICEV に比べればかなり小さな値ではあるが、エンコーダによる角速度検出時やトルク指令を与えてから実際にトルクが発 50

生するまでEVにも数[ms]のむだ時間がある。よって、不確かな値にむだ時間を考慮するためにオブザーバゲインKを調節する必要がある。図12に、このアンチスリップ制御のブロック線図を示す。

【0154】

むだ時間を考慮して、実験によりチューニングして得られた最大の値であるオブザーバゲイン $K=0.7$ 、ローパスフィルタのカットオフ周波数を $\omega_{lpf} = 1/\tau = 30[\text{rad/sec}]$ であった。これは、むだ時間を考慮した非特許文献4での解析の値と一致する。実験では低 μ 路を走行した。図13A、B、Cに、アンチスリップ制御の実車での実験結果である、スリップ率、車輪速、車体速の時間変化を示す。アンチスリップ制御をすることにより、スリップ率が抑えられているが、むだ時間を考慮に入れた影響で最適スリップ率には至らなかった。

10

【0155】

1.7.2 第1のスリップ率制御

図21A、21Bに、第1のスリップ率制御装置を実際に電気自動車に実装して実験を行って得られたスリップ率および車輪速と車体速を示す。発進後0.5[sec]から2[sec]まで、低いトルク指令値を与えてスリップ率を推定させ、2[sec]以降に目標スリップ率を $\mu^* = 0.2$ をステップ状に入力した。これにより、多少の脈動があるものの、目標ステップ率を $\mu^* = 0.2$ に制御できている。

【0156】

1.8 まとめ

逐次形最小二乗法や外乱オブザーバによる推定は、スリップ率の大きな変動や、車輪角加速度のノイズに大きな影響を受ける。それに対し、実施形態1に係る第1のスリップ率推定装置は、これらから影響を受けずにより正確なスリップ率の推定を行うことが可能である。また、従来の車体速を用いないスリップ制御では、最適スリップ率に制御することが困難であったが、本実施形態ではスリップ率を最適な値に制御することが可能である。

20

【0157】

(実施形態2)

上述の実施形態1に係る第1のスリップ率推定装置では、車輪の回転速度 ω が正である駆動時のみを仮定する場合、車輪の回転加速度

【0158】

【数116】

$\dot{\omega}$

が負になった際に推定誤差が拡大していく課題があった。車輪の回転速度 ω が大きい状態で不安定になり誤差が拡大すると、安定状態になったとしても、誤差が収束するまで時間が掛かってしまう。本実施形態では、この不安定な領域を補償するために第2のスリップ率推定装置を用いたスリップ率制御を行う。

【0159】

2.1 第2のスリップ率推定装置

上述のように、(10)式で定義した推定誤差 $e(t)$ は

【0160】

【数117】

$\frac{\dot{\omega}}{\omega} < 0$

を含む領域では単調に収束しない。この不安定な領域を補償するために、以下のように(9)式に補償項としてスリップ率オブザーバ(SRO: Slip Ratio Observer)を加える。

【0161】

30

40

【数 1 1 8】

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\lambda}} = & -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \\ & + k(\hat{\lambda})(\dot{V} - \dot{\hat{V}}) \end{aligned} \quad \dots (27)$$

【0 1 6 2】

(8)式と(27)式より、推定誤差 $e(t)$ について以下の式が得られる。

【0 1 6 3】

10

【数 1 1 9】

$$\begin{aligned} \dot{e} = & \dot{\hat{\lambda}} - \dot{\lambda} \\ = & -\frac{\dot{\omega}}{\omega} e - k(\hat{\lambda})(\dot{V} - \dot{\hat{V}}) \\ = & -\frac{\dot{\omega}}{\omega} e - \frac{k(\hat{\lambda})}{M}(F_d(\lambda) - F_d(\hat{\lambda})) \end{aligned} \quad \dots (28)$$

【0 1 6 4】

図 15 に示すように、駆動力 F_d とスリップ率 λ の関係より以下の式が得られる。

20

【0 1 6 5】

【数 1 2 0】

$$\frac{F_d(\lambda) - F_d(\hat{\lambda})}{\lambda - \hat{\lambda}} \simeq a(\hat{\lambda}) \quad \dots (29)$$

但し、

【0 1 6 6】

【数 1 2 1】

 $a(\hat{\lambda})$

30

は μ - 曲線の傾きである。(28)、(29)式より推定誤差 $e(t)$ は、

【0 1 6 7】

【数 1 2 2】

$$\dot{e} = - \left(\frac{\dot{\omega}}{\omega} + \frac{k(\hat{\lambda})}{M} a(\hat{\lambda}) \right) e \quad \dots (30)$$

となる。従って、次式が成立すれば安定が補償される。

【0 1 6 8】

40

【数 1 2 3】

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega} + \frac{k(\hat{\lambda})}{M} a(\hat{\lambda}) > 0 \quad \dots (31)$$

(31)式を整理すると次式がえられ、これを満たすようなオブザーバゲイン

【0 1 6 9】

【数 1 2 4】

 $k(\hat{\lambda})$

を選ぶ必要がある。

50

【 0 1 7 0 】

【 数 1 2 5 】

$$k(\hat{\lambda}) > \frac{M}{a(\hat{\lambda})} \left(-\frac{\dot{\omega}}{\omega} \right) \quad \dots (32)$$

【 0 1 7 1 】

実際に (2 7) 式のオブザーバを利用するには

【 0 1 7 2 】

【 数 1 2 6 】

10

 \dot{V} の真値は明らかではないので、加速度センサの値 $a_x(t)$ を利用し、

【 0 1 7 3 】

【 数 1 2 7 】

$$\dot{V} = a_x(t)$$

とする。また、

【 0 1 7 4 】

【 数 1 2 8 】

20

 \hat{V} は低 μ 路の μ - 曲線のモデルを仮定する。そこで、まず (6) 式を、摩擦係数 μ を

【 0 1 7 5 】

【 数 1 2 9 】

 $\hat{\lambda}$

の陽関数にして以下のように書き換える。

【 0 1 7 6 】

【 数 1 3 0 】

$$F_d(\hat{\lambda}) = N\mu(\hat{\lambda}) \quad \dots (33)$$

【 0 1 7 7 】

また、(2) 式と等価である次式を用意する。

【 0 1 7 8 】

【 数 1 3 1 】

$$M\dot{V} = F_d \quad \dots (34)$$

40

この (3 3)、(3 4) 式から次式が得られる。

【 0 1 7 9 】

【 数 1 3 2 】

$$\dot{V} = \frac{F_d(\hat{\lambda})}{M} = \frac{N}{M}\mu(\hat{\lambda}) \quad \dots (35)$$

【 0 1 8 0 】

但し、 N はタイヤ1輪当たりにかかる垂直抗力とする。これらの式をまとめると以下の式を得ることができる。

50

【 0 1 8 1 】

【 数 1 3 3 】

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\lambda}} = & -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \\ & + k(\hat{\lambda}) \left(a_x(t) - \frac{N}{M} \mu(\hat{\lambda})\right) \end{aligned} \quad \dots (36)$$

【 0 1 8 2 】

この(36)式の左辺第4項をスリップ率オブザーバと呼び、このスリップ率オブザーバを含むスリップ率推定装置を第2のスリップ率推定装置とする。図22に、実施形態2に係る第2のスリップ率推定装置を用いたスリップ率推定のブロック線図を示す。トルク測定手段で測定したモータトルク T^* および加速度センサで測定された車体の加速度 a_x を、車両モデル演算手段2201、(36)式に基づく第2のスリップ率演算手段SRE2202にそれぞれ入力する。車両モデル演算手段2201は、車輪の回転速度、車輪の回転加速度

10

【 0 1 8 3 】

【 数 1 3 4 】

$$\dot{\omega}$$

20

、車体速度 V を導出し、車輪の回転速度、車輪の回転加速度

【 0 1 8 4 】

【 数 1 3 5 】

$$\dot{\omega}$$

を第2のスリップ率演算手段SRE2202に出力する。第2のスリップ率演算手段SRE2202は、モータトルク T^* 、車輪の回転速度、車輪の回転加速度

【 0 1 8 5 】

【 数 1 3 6 】

$$\dot{\omega}$$

30

からスリップ率

【 0 1 8 6 】

【 数 1 3 7 】

$$\hat{\lambda}$$

を出力する。

【 0 1 8 7 】

2.2 第2のスリップ率推定装置を用いたスリップ率制御

図14に、実施形態2に係る第2のスリップ率制御のブロック線図を示す。これは実施形態1に係るスリップ率制御の第1のスリップ率演算手段SREを第2のスリップ率演算手段SREに置き換えたものであって、第2のSREとPI制御器を用いてスリップ率制御を行う。

40

【 0 1 8 8 】

ここで、上述したように $\lambda > 0$ である場合について考える。スリップ率が最適スリップ率以上では車輪は空転するため

【 0 1 8 9 】

【 数 1 3 8 】

$$\dot{\omega} > 0$$

と考えられるので、実施形態1と同様の(9)式に基づく推定のみで十分である。よって

50

、最適スリップ率以下でのみオブザーバゲイン

【 0 1 9 0 】

【 数 1 3 9 】

$$k(\hat{\lambda})$$

を与える。また、オブザーバゲイン

【 0 1 9 1 】

【 数 1 4 0 】

$$k(\hat{\lambda})$$

10

を大きくすれば真値への収束が早くなるが、 μ 曲線のモデル化誤差により不安定になる可能性がある。従って、収束性とロバスト性のトレードオフを取りながらオブザーバゲイン

【 0 1 9 2 】

【 数 1 4 1 】

$$k(\hat{\lambda})$$

を決定する必要がある。図 1 6 に、オブザーバゲインとスリップ率の推定値との関係を示す。以下に示すシミュレーションにおいては $k(0) = 1$ とし、図 1 6 のように与える。傾きを持たせてあるのはチャタリングを防止するためである。

20

【 0 1 9 3 】

【 数 1 4 2 】

$$\hat{\lambda} > \lambda_{opt}$$

のとき、すなわちスリップ率が最適スリップ率よりも大きいとき

【 0 1 9 4 】

【 数 1 4 3 】

$$k(\hat{\lambda}) = 0$$

であるから、摩擦係数モデル

30

【 0 1 9 5 】

【 数 1 4 4 】

$$\mu(\hat{\lambda})$$

は最適スリップ率以下の領域のみが必要である。従って、 μ 曲線の零近傍付近の傾きであるドライビングステイフネス C_s を用いて次式のモデルを用いた。

【 0 1 9 6 】

【 数 1 4 5 】

$$\mu(\hat{\lambda}) = C_s \hat{\lambda} \quad \dots (37)$$

40

C_s は、低 μ 路にあわせても十分な傾きを持つように、本実施形態では低 μ 路の値である 1.0 とする。

【 0 1 9 7 】

この第 2 の スリップ率演算手段 SRE を用いることによって、

【 0 1 9 8 】

【 数 1 4 6 】

$$\frac{\omega}{\omega} < 0$$

50

の状況であっても速やかに真値に収束させることが可能である。すなわち、この第2のスリップ率演算手段SREでは、第1のスリップ率演算手段SREにおいて不安定になってしまう領域を補償し、路面状況の大きな変化に対しても正確なスリップ率の推定が可能である。

【 0 1 9 9 】

2.3 シミュレーション

シミュレーション条件として、各定数は実機から得られた値である $J = 1.0[\text{Nms}^2]$ 、 $M = 420[\text{kg}]$ 、 $r=0.22[\text{m}]$ とする。開始後0.5[sec]からトルク目標スリップ率 $T^* = 100[\text{Nm}]$ を与える。路面状況は発進から5[sec]以降は乾燥路 ($\mu_{\max} = 1.0$) とした。本シミュレーションでは、オブザーバ検証を行うにあたり推定誤差を持たせるため、

【 0 2 0 0 】

【 数 1 4 7 】

$\frac{\omega}{\omega}$

$\frac{\omega}{\omega}$

が十分小さくなった0.05[sec]より推定を始める。図17に、第1および第2のスリップ率推定装置による推定のシミュレーション結果を示す。第1のスリップ率推定装置では、5[sec]で推定誤差が拡大し、その後

【 0 2 0 1 】

【 数 1 4 8 】

$\frac{\omega}{\omega}$

$\frac{\omega}{\omega}$

が小さな値となっているため収束が遅いが、提案したスリップ率オブザーバを含む第2のスリップ率推定装置では真値に収束していることが分かる。また、路面変化後は $C_s = 5$ 程度であり、値が5倍ほど異なるにもかかわらず、真値に収束している。

【 0 2 0 2 】

2.4 オフライン実験

実験機は市販の小型電気自動車 (CQMOTORS製 Qi(QUNO)) を改造したものをを用いた。(株) Myway技研により作製されたインバータシステムを用いてモータを制御している。また、モータにはホールセンサがついているが電気角で1回転あたり6パルスと分解能が低いいため、位置角は線形補完することによりベクトル制御を行っている。このときのサンプリング周波数は10[kHz]とする。また、DSPでベクトル制御だけでなく、トラクション制御や姿勢制御等も全てを行っている。本検証では車体速を測定するために加速度センサを利用した。また、低 μ 路をプラスチックのこを用いてその上に洗剤をまくことで実現した。実験では、トルク目標スリップ率を $T^* = 80[\text{Nm}]$ を与える。また、約3[sec]までは低 μ 路を走行し、それ以降は乾燥路を走行した。シミュレーションと同様に低 μ 路の μ - 曲線を(37)式に基づき仮定する。

【 0 2 0 3 】

図18に、第1および第2のスリップ率推定装置による推定の実験結果を示す。 $\hat{\lambda}$ がスリップ率の真値であり、

【 0 2 0 4 】

【 数 1 4 9 】

$\hat{\lambda}_{est}$

が第1のスリップ率推定装置による推定値であり、

【 0 2 0 5 】

【 数 1 5 0 】

$\hat{\lambda}_{obs}$

が第2のスリップ率推定装置による推定値である。第1のスリップ率推定装置では、誤差が

10

20

30

40

50

拡大した後、補償を加えていないため真値への収束が遅い。それに比べ、本実施形態に係る第2のスリップ率制御では速やかに真値に収束させることができている。

【0206】

2.5 まとめ

このように、本実施形態に係る第2のスリップ率推定装置は、車体速を用いることなく高精度のスリップ率推定が可能である。

【0207】

(実施形態3)

3.1 フィードバック線形化に基づく非線形制御

実施形態1、2において用いたスリップ率制御は、(12)式で行う線形化により誤差が生じてしまう。そこで、本実施形態に係るスリップ率制御は、フィードバック線形化に基づき非線形制御を行ってスリップ率の制御を行う。

10

【0208】

(8)式より、マイナーループに以下の式を組み込むことにより非線形補償を行うことで、スリップ率 から までの特性を

【0209】

【数151】

$$\dot{\lambda} = \nu$$

に線形化できる。

20

【0210】

【数152】

$$T^* = r^2 M \omega \left(-\frac{\dot{\omega}}{\omega} \lambda + \left(1 + \frac{J_\omega}{r^2 M} \right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} + \nu \right)$$

... (38)

この(38)式の処理を非線形補償器とする。また、本実施形態では比例制御器を利用するので以下の式となる。

【0211】

【数153】

30

$$\dot{\lambda} = \nu \equiv K_p (\lambda^* - \lambda)$$

... (39)

よって、(39)式を変形して得られる次式のような1次遅れ系となる。

【0212】

【数154】

$$\lambda = \frac{K_p}{s + K_p} \lambda^*$$

... (40)

40

図19に、実施形態3に係る第3のスリップ率制御のブロック線図を示す。目標スリップ率 λ^* をブロック1901に入力する。ブロック1901は(39)式に基づいて $\dot{\lambda}$ を導出して非線形補償器1902に入力する。非線形補償器1902は(38)式に基づいてモータトルク T^* を導出して車両モデル演算手段1903、第2のスリップ率演算手段SRE1904に入力する。車両モデル演算手段1903は導出した車輪の回転速度 ω 、車輪の回転加速度 $\dot{\omega}$

【0213】

【数155】

$$\dot{\omega}$$

50

を非線形補償器 1 9 0 2、第 2 のスリップ率演算手段 SRE 1 9 0 4 にそれぞれ入力する。
第 2 のスリップ率演算手段 SRE 1 9 0 4 は、モータトルク T^* 、車輪の回転速度、車輪の
回転加速度

【 0 2 1 4 】

【 数 1 5 6 】

の

からスリップ率

【 0 2 1 5 】

【 数 1 5 7 】

10

$\hat{\epsilon}$

を導出してブロック 1 9 0 1、非線形補償器 1 9 0 2 にそれぞれ入力する。非線形補償器
1 9 0 2 から出力される T^* の値に基づいてトルク指令を生成することで、スリップ率
を目標スリップ率 ϵ^* に収束させることができる。本実施形態では、スリップ率の推定
に第 2 のスリップ率演算手段 SRE を用いるが、第 1 のスリップ率演算手段 SRE を用いてもよ
い。

【 0 2 1 6 】

3.2 シミュレーション

図 2 0 に、第 3 のスリップ率制御のシミュレーション結果を示す。シミュレーション条
件として、0.05[sec]まで、スリップ率推定を行うため $T^* = 100[\text{Nm}]$ とした。推定が行わ
れた 0.05[sec]以降、スリップ率制御を行った。また、目標スリップ率を $\epsilon^* = 0.1, 0.2$
、0.3 の 3 パターンとした。図 2 0 より、全ての目標スリップ率に対し、スリップ率が追
従していることが分かる。

20

【 0 2 1 7 】

3.3 まとめ

このように、本実施形態に係るスリップ率制御装置は、車体速を用いることなく非常に
精度の高いスリップ率の制御が可能である。

【 0 2 1 8 】

(実施形態 4)

30

4.1 第 3 のスリップ率推定装置

第 1、第 2 のスリップ率演算手段 SRE では走行抵抗を零とみなして推定を行うが、走行
抵抗はスリップ率推定に影響を及ぼすことが分かっている。そこで、走行抵抗を推定して
スリップ率演算手段 SRE に対し補償を行うことで、スリップ率演算手段 SRE の精度をさらに
向上させることができる。

【 0 2 1 9 】

まず、駆動力オブザーバを利用し、(1)式から駆動力 F_d の推定を行う(非特許文献 5
参照)。(2)式から、推定された駆動力と加速度センサの値 a_x を用いて、走行抵抗 F_{dr}
の推定を行う。図 2 3 に、走行抵抗推定器(DRE: Driving Resistance Estimator)のブ
ロック線図を示す。ここで得られた推定走行抵抗

40

【 0 2 2 0 】

【 数 1 5 8 】

\hat{F}_{dr}

を用いてスリップ率推定を行う。

【 0 2 2 1 】

走行抵抗を残したまま、(4)式を両辺時間微分し、(1)式から(3)式を代入し、
 V 、 \dot{V} 、 F_d を消去すると次式を得ることができる。

【 0 2 2 2 】

【数 1 5 9】

$$\dot{\omega} = \frac{T - rF_{dr} + r^2M\omega\dot{\lambda}}{J_{\omega} + r^2M(1 - \lambda)} \quad \dots (41)$$

この(41)式をさらに書き換えると次式を得る。

【0 2 2 3】

【数 1 6 0】

$$\dot{\lambda} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega}\lambda + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2M}\right)\frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2M\omega} + \frac{rF_{dr}}{r^2M\omega} \quad \dots (42) \quad 10$$

よって、スリップ率の推定値は、走行抵抗推定器の推定値を用いて次式から得られる。

【0 2 2 4】

【数 1 6 1】

$$\dot{\hat{\lambda}} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega}\hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2M}\right)\frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2M\omega} + \frac{\hat{F}_{dr}}{rM\omega} \quad \dots (43)$$

図 2 4 に、第 3 のスリップ率演算手段SREを用いたスリップ率推定のブロック線図を示す。第 3 のスリップ率演算手段SREであるDRE-SRE 2 4 0 1 は、走行抵抗の推定値を取り込んだ後は、(43)式に基づき他のSREと同様に演算を行う。 20

【0 2 2 5】

4 . 2 第 4 のスリップ率推定装置

上記第 3 のスリップ率演算手段SREを用いたスリップ率推定の推定誤差は、(8)式と(43)式より以下のようなになる。

【0 2 2 6】

【数 1 6 2】

$$\frac{d}{dt}e(t) = -\frac{\dot{\omega}}{\omega}e(t) + \frac{1}{rM\omega}(F_{dr} - \hat{F}_{dr}) \quad \dots (44) \quad 30$$

すなわち、走行抵抗の真値と推定値が完全に一致すれば、走行抵抗による推定誤差はなくなり、正確な推定が可能となる。しかし、第 1 のスリップ率演算手段SREと同様に

【0 2 2 7】

【数 1 6 3】

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega} < 0$$

の領域では推定が不安定になる。そこで第 4 のスリップ率演算手段SREを用いたスリップ率推定では、走行抵抗の補償に加え、第 2 のスリップ率演算手段SREで用いたSROによる補償を行う。すなわち、(43)式に以下のように補償項を加える。 40

【0 2 2 8】

【数 1 6 4】

$$\dot{\hat{\lambda}} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega}\hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2M}\right)\frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2M\omega} + \frac{\hat{F}_{dr}}{rM\omega} + k(\hat{\lambda})(\dot{V} - \hat{V}) \quad \dots (45)$$

但し、

【0 2 2 9】

【数 1 6 5】

$$k(\hat{\lambda})$$

はオブザーバゲインである。(8)式と(45)式から以下の式が得られる。

【0 2 3 0】

【数 1 6 6】

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}e &= -\frac{\dot{\omega}}{\omega}e - k(\hat{\lambda})(\dot{V} - \dot{\hat{V}}) + \frac{F_{dr} - \hat{F}_{dr}}{rM\omega} \\ &= -\frac{\dot{\omega}}{\omega}e - \frac{k(\hat{\lambda})(F_d(\lambda) - F_d(\hat{\lambda}) - (F_{dr} - \hat{F}_{dr}))}{M} + \frac{F_{dr} - \hat{F}_{dr}}{rM\omega} \end{aligned} \quad \dots (46)$$

(46)式と(29)式より推定誤差は次式のようになる。

【0 2 3 1】

【数 1 6 7】

$$\frac{d}{dt}e = -\left(\frac{\dot{\omega}}{\omega} + \frac{k(\hat{\lambda})}{M}a(\hat{\lambda})\right)e + \frac{F_{dr} - \hat{F}_{dr}}{rM\omega} \quad \dots (47)$$

走行抵抗の真値と推定値との差

【0 2 3 2】

【数 1 6 8】

$$F_{dr} - \hat{F}_{dr}$$

は、図24のLPF2303、2306の時定数が十分小さければ、十分速く零に収束する。従って、(31)式が成立すれば推定の安定性が保証される。よって、(31)式を整理して得られる(32)式を満たすオブザーバゲインを選ぶ。

【0 2 3 3】

実際に(45)式のオブザーバを利用する際には、車体加速度の真値と推定値を以下のように置くことができる。加速度センサの値 $a_x(t)$ を利用し、

【0 2 3 4】

【数 1 6 9】

$$\dot{\hat{V}} = a_x(t)$$

とする。また、車体加速度の推定値は、(2)式、(6)式、(33)式およびDREより、次式が得られる。

【0 2 3 5】

【数 1 7 0】

$$\dot{\hat{V}} = \frac{F_d(\hat{\lambda}) - \hat{F}_{dr}}{M} = \frac{N}{M}\mu(\hat{\lambda}) - \frac{\hat{F}_{dr}}{M} \quad \dots (48)$$

これらの式をまとめると以下の式を得ることができる。

【0 2 3 6】

10

20

30

40

【数 1 7 1】

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} = & -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \lambda + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} + \frac{\hat{F}_{dr}}{r M \omega} \\ & + k(\lambda) \left(a_x(t) - \frac{N}{M} \mu(\lambda) + \frac{\hat{F}_{dr}}{M} \right) \end{aligned} \quad \dots (49)$$

この式(49)をスリップ率オブザーバとする。尚、第2のスリップ率推定装置と同様に(37)式を用い、 $C_s = 1$ とする。図25に、第4のスリップ率演算手段SREを用いたスリップ率推定のブロック線図を示す。第4のスリップ率演算手段SREであるDRE-SRO 2501は、走行抵抗の推定値、加速度を取り込んだ後は、(49)式に基づき他のスリップ率演算手段SREと同様に演算を行う。

10

【0237】

4.3 シミュレーション

シミュレーション条件として、 $T^* = 80$ [Nm]一定としてトルク指令値を与える。また発進から1秒まで低 μ 路($\mu_{\max} = 0.2$)を、1秒以降は高 μ 路($\mu_{\max} = 1.0$)を走行するものとする。

【0238】

また、走行抵抗に関して、通常発進時など低速域では転がり抵抗が支配的であり、駆動力の約10%程度だと言われている(非特許文献6参照)。本実験車両において乾燥路走行時の駆動力 F_d は約500[N]であるので、約10%の50[N]の走行抵抗を常に与えた。さらに、故意に推定に初期誤差を持たせるために発進時は推定せずに、発進から0.01[sec]後より推定を始めた。

20

【0239】

図26A~26Cに、SRE、DRE-SRE、DRE-SROを用いたスリップ率推定のシミュレーション結果を示す。また、図27に、DRE-SREおよびDRE-SROで用いる走行抵抗推定の結果を示す。

【0240】

図26Aに示すように、SREは低 μ 路走行時には大きな推定誤差は見られない。しかし、高 μ 路走行時には大きな推定誤差が生じている。これは式(43)より、低 μ 路走行時には車輪角速度が増大することにより走行抵抗 $F_{d,r}$ の影響が小さくなるが、高 μ 路に進入した際に車輪角速度が減少することにより走行抵抗 $F_{d,r}$ の影響が無視できなくなるためだと考えられる。

30

【0241】

走行抵抗を考慮したDRE-SRE(図26B)およびDRE-SRO(図26C)は、全領域において高い精度で推定できていることが分かる。この2つの手法に関して詳しく見るため、図28に、DRE-SREおよびDRE-SROを用いたスリップ率推定における推定誤差を示す。これより、

【0242】

【数 1 7 2】

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega} < 0$$

となり推定誤差を拡大する領域において、不安定な領域の補償を行っているDRE-SROはDRE-SREに比べ推定誤差の拡大を抑えていることが分かる。

40

【0243】

4.4 オフライン実験

SRE、DRE-SRE、DRE-SROに関して、オフライン実験による比較を行った。オフライン実験条件として、シミュレーションと同様に、 $T^* = 80$ [Nm]一定としてトルク指令値を与える。発進から約3秒まで低 μ 路を、3秒以降は高 μ 路を走行するものとする。

50

【 0 2 4 4 】

図 2 9 A ~ 2 9 C に、SRE、DRE-SRE、DRE-SRO を用いたスリップ率推定のオフライン実験結果を示す。さらに図 3 0 に、DRESRE および DRE-SRO で用いる走行抵抗推定結果を示す。

【 0 2 4 5 】

図 2 9 A に示すように SRE は、シミュレーションと同様に、低 μ 路走行時には大きな推定誤差は見られないが、高 μ 路走行時には推定誤差が生じている。

【 0 2 4 6 】

走行抵抗を考慮した DRE-SRE (図 2 9 B) および DRE-SRO (図 2 9 C) に関しても、シミュレーションと同様に、全領域において精度よく推定できていることが分かる。

【 0 2 4 7 】

さらに、図 3 1 に、DRE-SRE および DRE-SRO を用いたスリップ率推定における推定誤差のオフライン実験の結果を示す。これより、DRE-SRO は再粘着時に推定誤差が拡大した後、収束が速いことが分かる。

【 0 2 4 8 】

(実施形態 5)

5.1 フィードフォワード制御によるスリップ率制御

図 3 2 に、スリップ率演算手段 DRE-SRE または スリップ率演算手段 DRE-SRO を用いたスリップ率制御のブロック線図を示す。これは、実施形態 3 と同様に、式 (38)、(39) に基づいて非線形補償を行ったスリップ率制御である。

【 0 2 4 9 】

制御器において

【 0 2 5 0 】

【数 1 7 3】

の

の擬似微分演算のためのハイパスフィルタ (HPF) 3 2 0 6 のカットオフ周波数は $10[\text{rad/s}]$ とする。路面状況は常に低 μ 路 ($\mu_{\max}=0.2$) を走行する。また、 $K_p = 70$ とする。発進から 0.03 秒までは推定を行わせるため一定トルク指令値 $T^* = 80[\text{Nm}]$ を与える。0.03 秒以降、スリップ率指令値 $\mu^* = 0.2$ をステップ状に入力した。

【 0 2 5 1 】

図 3 3 に、スリップ率演算手段 DRE-SRE または スリップ率演算手段 DRE-SRO を用いたスリップ率制御のシミュレーションの結果を示す。大きなアンダーシュートがあるものの、約 0.13 秒で指令値に収束している。

【 0 2 5 2 】

図 3 4 に、スリップ率演算手段 DRE-SRE または スリップ率演算手段 DRE-SRO を用いたスリップ率制御の実機実験の結果を示す。シミュレーションと同様、路面状況は常に低 μ 路を走行する。そして、推定を行わせるために発進より約 2 秒までトルク指令値 $T^* = 80[\text{Nm}]$ を与え、2.2 秒以降、スリップ率指令値 $\mu^* = 0.2$ をステップ状に入力した。これより、シミュレーションと同様、指令値に追従している。

【 0 2 5 3 】

しかしながら、指令値に収束はしているものの、大きな脈動が存在する。この脈動の原因としては、モータセンサの低分解能による

【 0 2 5 4 】

【数 1 7 4】

の

のノイズの影響、および HPF 3 2 0 6 のカットオフ周波数が $10[\text{rad/s}]$ と非常に遅いためだと考えられる。

【 0 2 5 5 】

そこで、走行抵抗が無視できるくらい小さいと仮定し、 $\mu = \mu^*$ としてスリップ率は変

10

20

30

40

50

動しないものとした。これにより、式(41)から以下の式を得る。

【0256】

【数175】

$$\dot{\omega} = \frac{T}{J_{\omega} + r^2 M(1 - \lambda^*)} \quad \dots (50)$$

上式を式(24)に代入し、フィードフォワードで

【0257】

【数176】

.

ω

を与えることにより、ノイズの影響を小さく抑えることができる。図35に、フィードフォワード制御によるスリップ率制御のブロック線図を示す。HPF3206に代えて、フィードフォワードで

【0258】

【数177】

.

ω

を与えるように式(50)が組み込まれている。

【0259】

5.2 シミュレーション

図36に、フィードフォワード制御によるスリップ率制御のシミュレーション結果を示す。尚、図33のシミュレーションと同様の条件でシミュレーションを行った。これより、非線形項を正確に打ち消せてはいないが不安定になることなく、指令値に対し追従していることが分かる。

【0260】

5.3 オフライン実験

さらに、図37に、フィードフォワード制御によるスリップ率制御の実機実験の結果を示す。尚、シミュレーションと同じ条件下において実験を行った。これより、指令値に対し追従し、さらにHPFを用いたスリップ率制御の結果(図34)に比べ脈動が小さくなっていることが分かる。

【0261】

(実施形態6)

6.1 可変ゲインを備えた回転速度制御によるスリップ率制御

スリップ率の推定は車輪速が既知であるため、車体速の推定と等価である。スリップ率推定が正確に行われれば、式(4)より以下の次式で車体速が得られる。尚、 $V = r$ である。

【0262】

【数178】

$$\hat{V} = r\omega(1 - \hat{\lambda}) \quad \dots (51)$$

そして、車体速が分かれば目標スリップ率に対する目標車輪速が分かる。

【0263】

10

20

30

40

【数 1 7 9】

$$\omega^* = \frac{\hat{V}}{r(1-\lambda^*)} \quad \dots (52)$$

これより、一般的に使用されている、モータの電流制御ループの外側に速度制御ループを組んだ回転速度制御を用いることで、スリップ率制御を実現する。しかし、慣性モーメントは式(41)よりスリップ率に応じて変化する。よって、制御ゲインを固定にするとスリップ率の変動に応じて、極が相対的に変動してしまう。

【0 2 6 4】

そこで、スリップ率に応じて変動する慣性モーメントを考慮した以下の式に基づき、スリップ率に応じて極配置法により制御ゲインを変化させ、極の変動を抑制する。

【0 2 6 5】

【数 1 8 0】

$$\omega = \frac{1}{(J_{\omega} + r^2 M(1-\lambda))s} T \quad \dots (53)$$

図38に、可変ゲインを備えた回転制御によるスリップ率制御のブロック線図を示す。比例積分制御手段3801は、スリップ率演算手段SRE3803で算出された推定スリップ率を取り込み、式(53)に基づいて目標トルク T^* を算出する。

【0 2 6 6】

6.2 シミュレーション

速度制御系の極は70[rad/s]とする。図39に、可変ゲインを備えた回転制御によるスリップ率制御のシミュレーション結果を示す。尚、前述した条件と同様の条件下でシミュレーションを行った。これより、実施形態5の図36に比べ、追従は遅いが目標値に対して追従している事が分かる。

【0 2 6 7】

6.3 オフライン実験

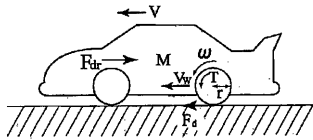
さらに、図40に、可変ゲインを備えた回転制御によるスリップ率制御の実機実験の結果を示す。尚、前述した条件と同様の条件下でシミュレーションを行った。これより、指令値に対し追従し、上述のスリップ率制御の中で脈動が一番小さいことが分かる。

10

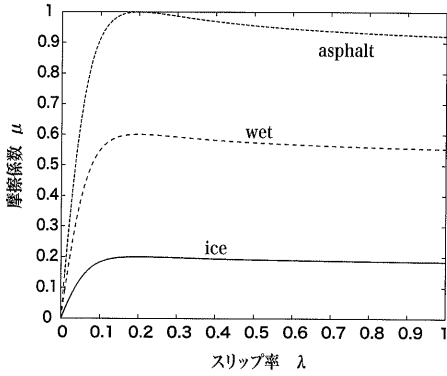
20

30

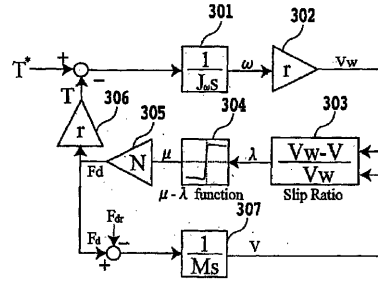
【図1】



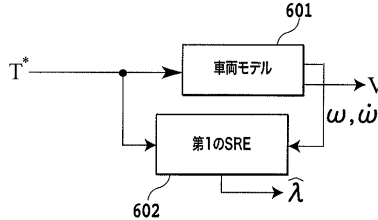
【図2】



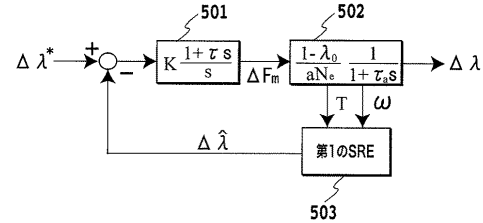
【図3】



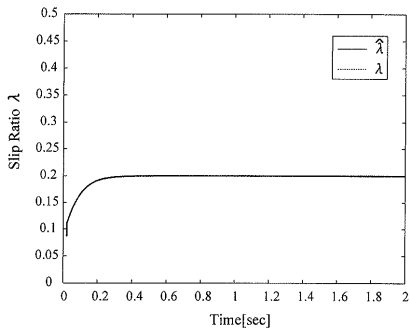
【図4】



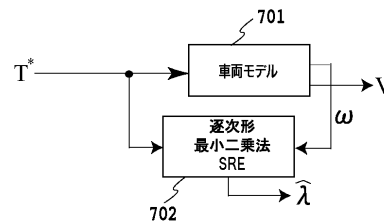
【図5】



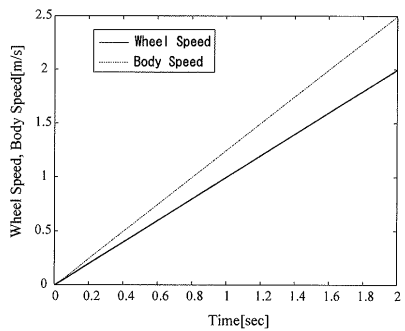
【図6A】



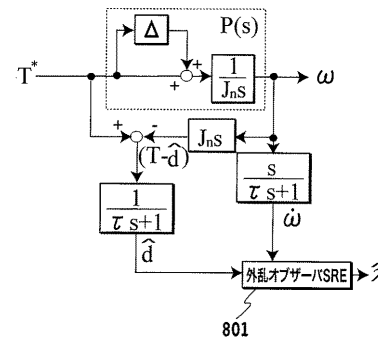
【図7】



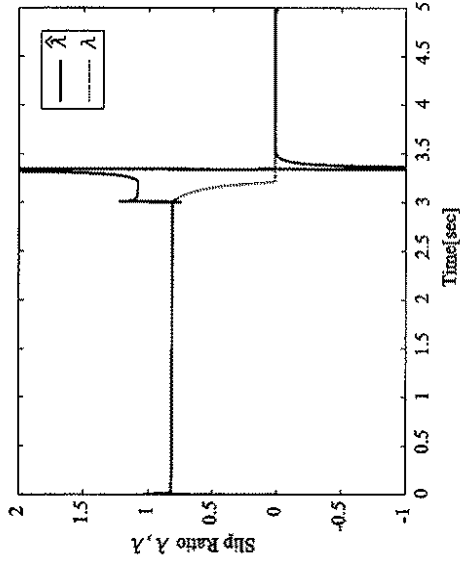
【図6B】



【図8】

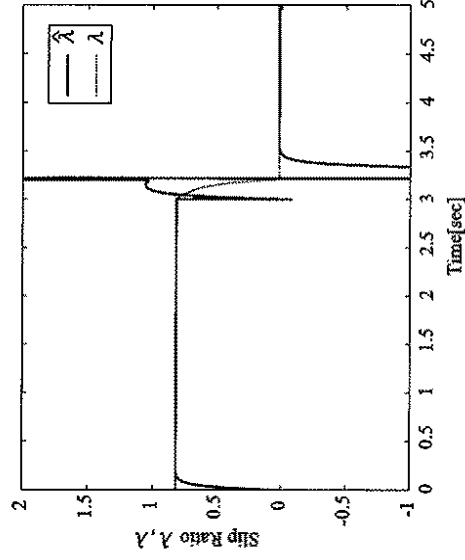


【図9A】



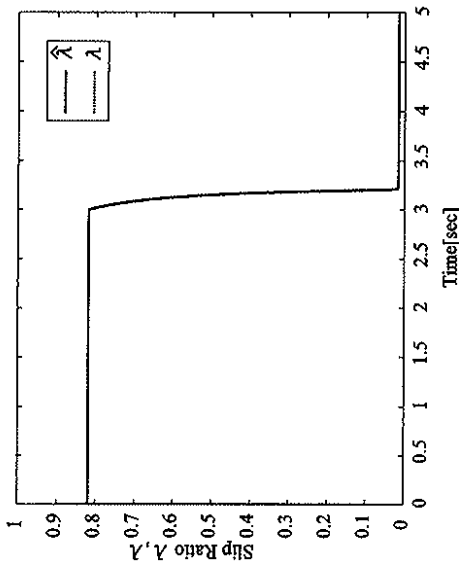
逐次形最小二乗法による推定

【図9B】



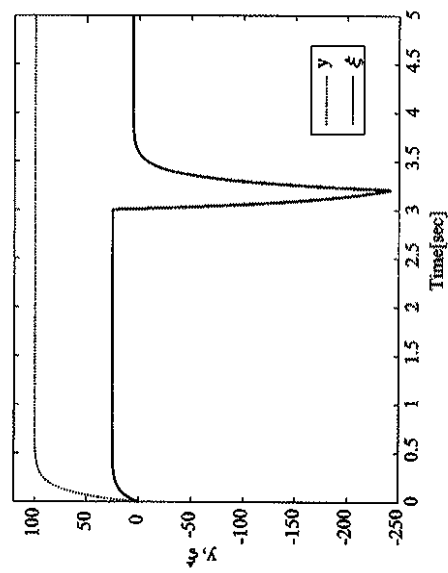
外乱オブザーバによる推定

【図9C】



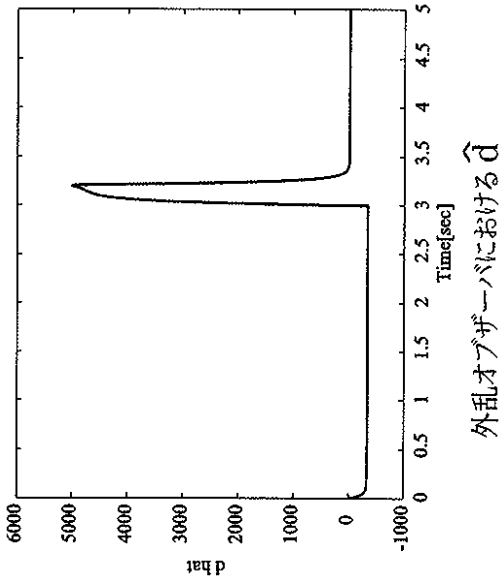
提案する推定器による推定

【図9D】

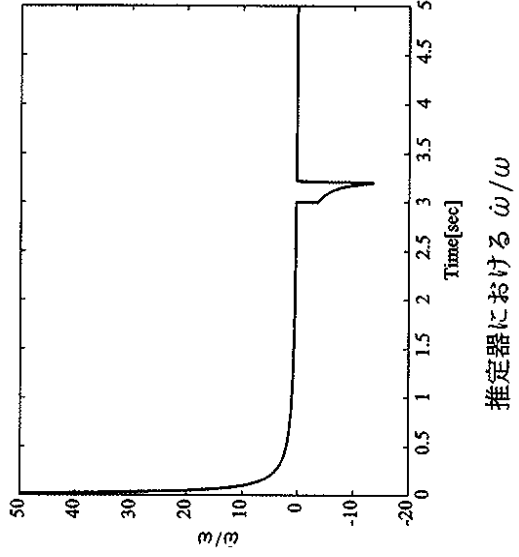


逐次形最小二乗法おける y と z

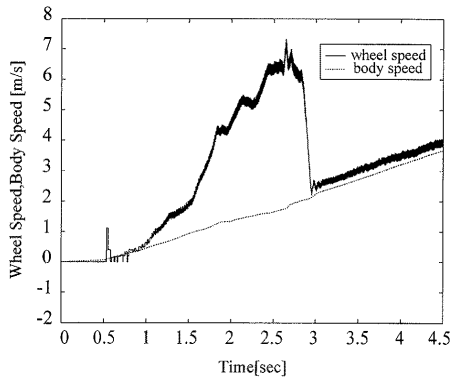
【 9 E 】



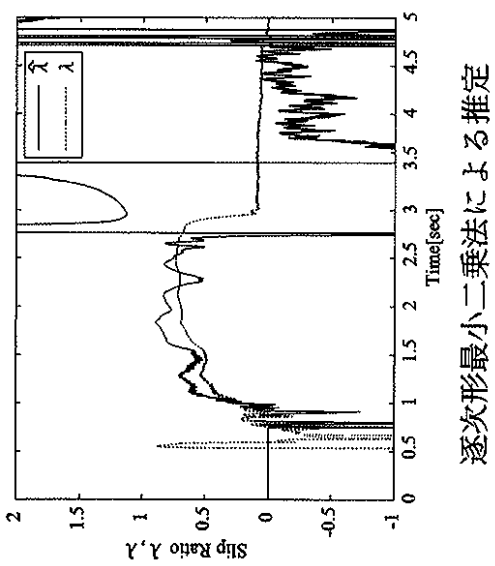
【 9 F 】



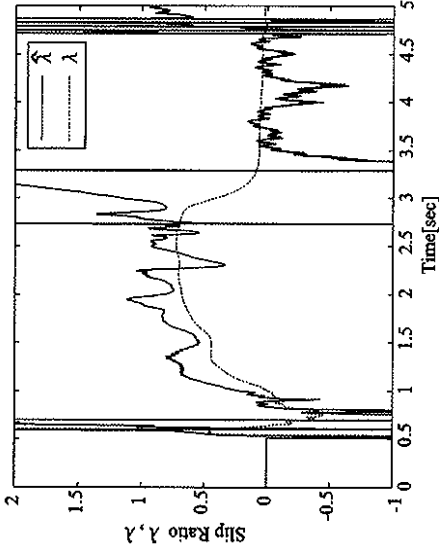
【 10 】



【 11 A 】

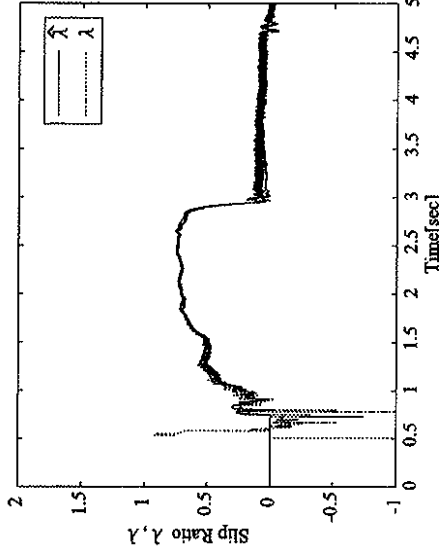


【図11B】



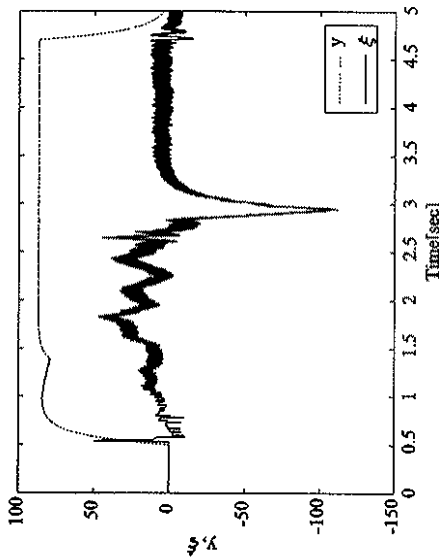
外乱オブザーバによる推定

【図11C】



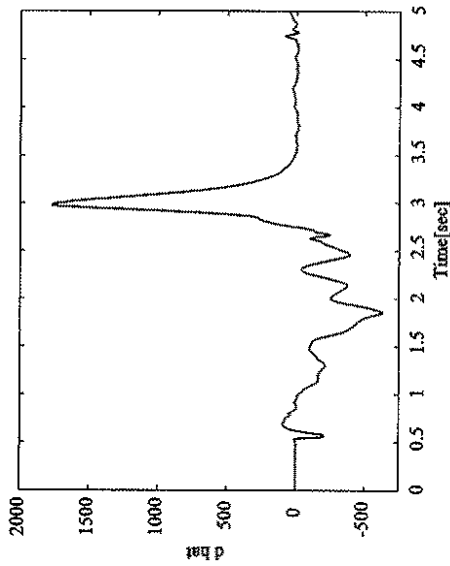
提案する推定器による推定

【図11D】



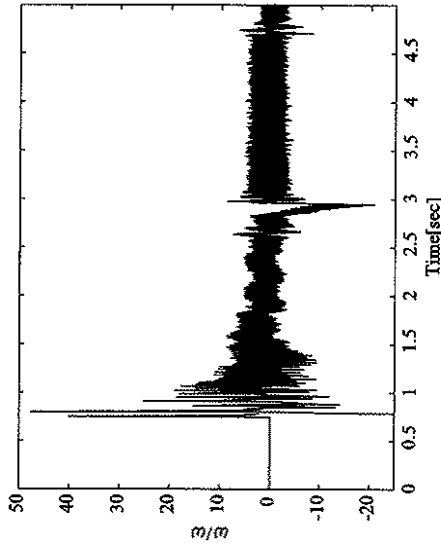
逐次形最小二乗法における y と ξ

【図11E】



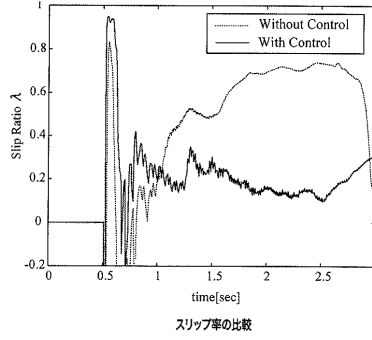
外乱オブザーバにおける d-hat

【図11F】

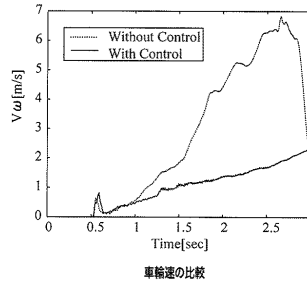


推定器おける $\hat{\omega}/\omega$

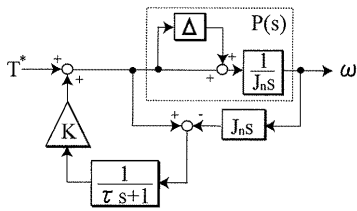
【図13A】



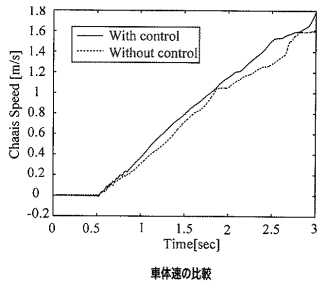
【図13B】



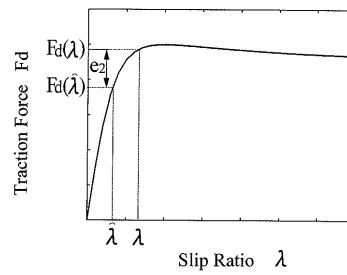
【図12】



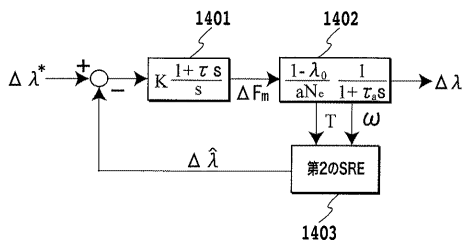
【図13C】



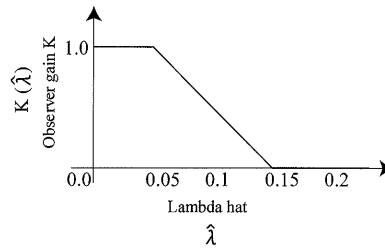
【図15】



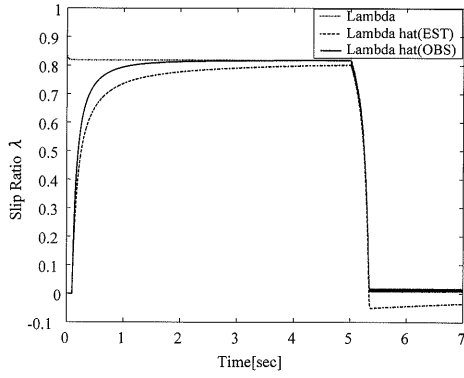
【図14】



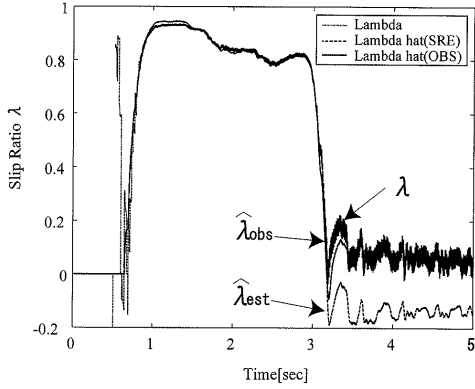
【図16】



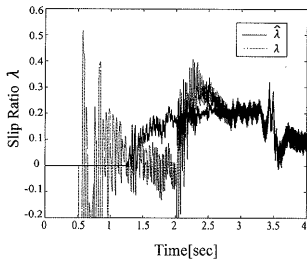
【図17】



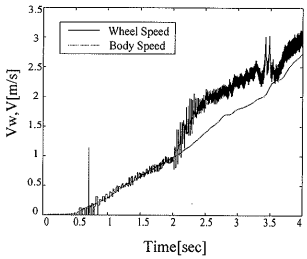
【図18】



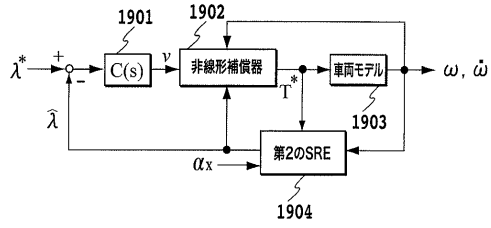
【図21A】



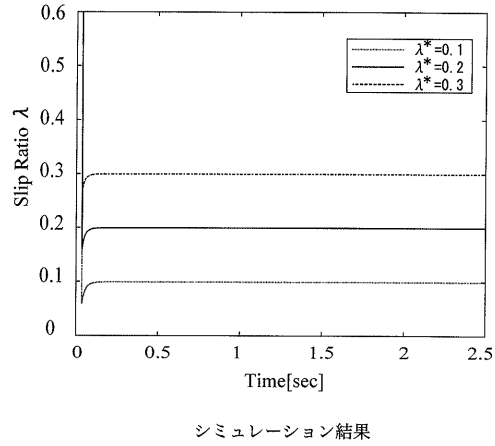
【図21B】



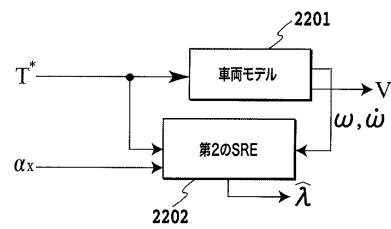
【図19】



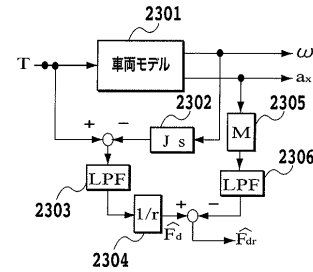
【図20】



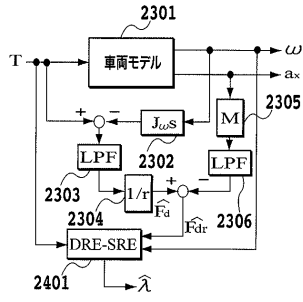
【図22】



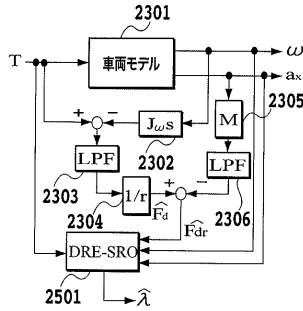
【図23】



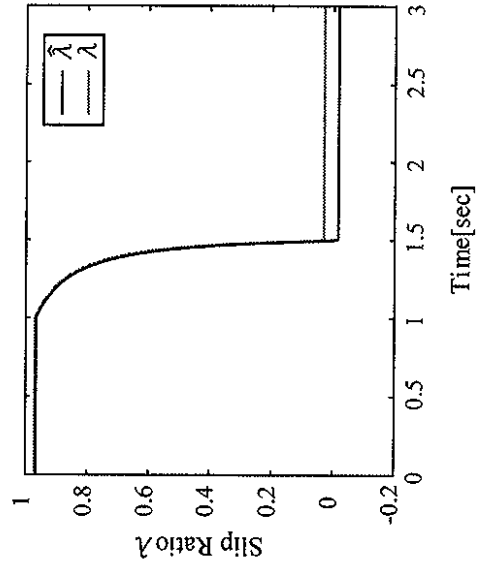
【図 2 4】



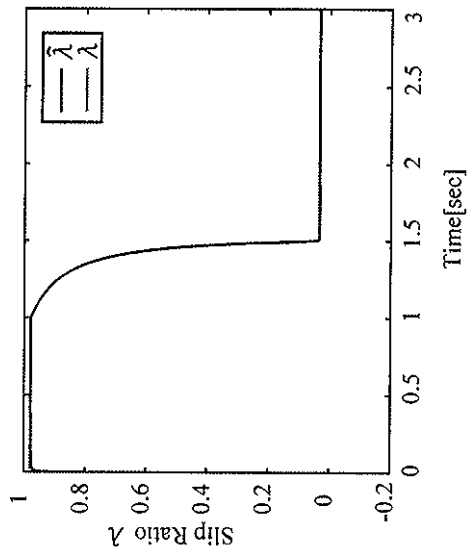
【図 2 5】



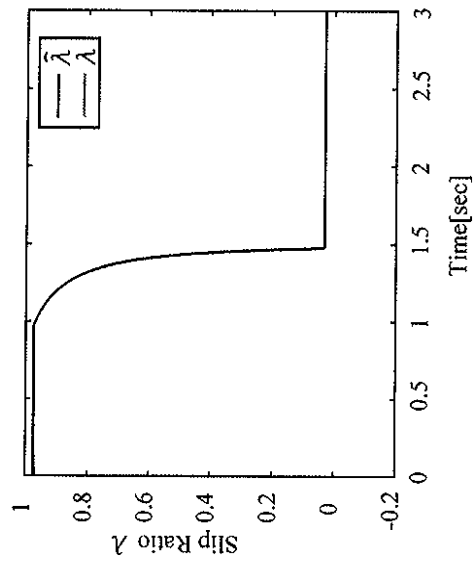
【図 2 6 A】



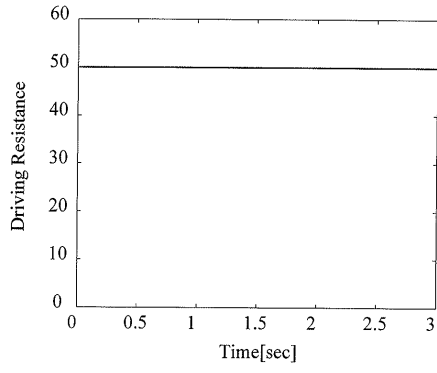
【図 2 6 B】



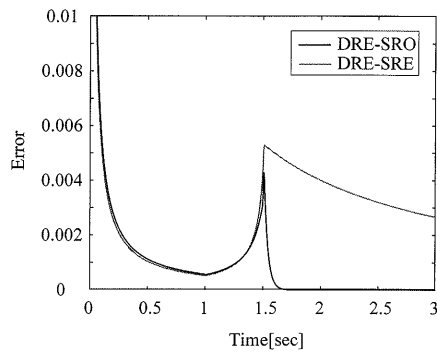
【図 2 6 C】



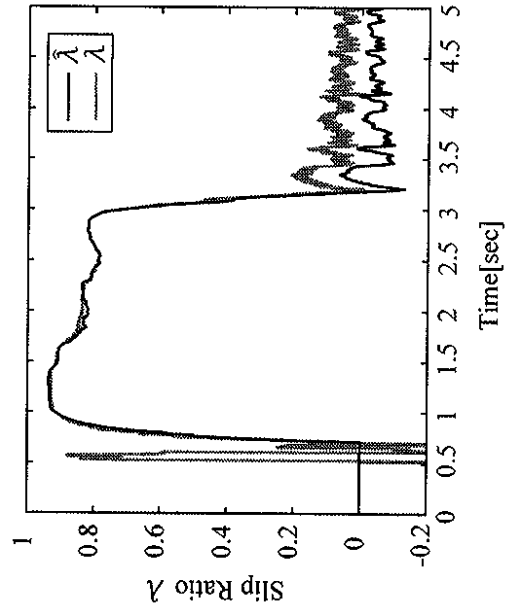
【 27 】



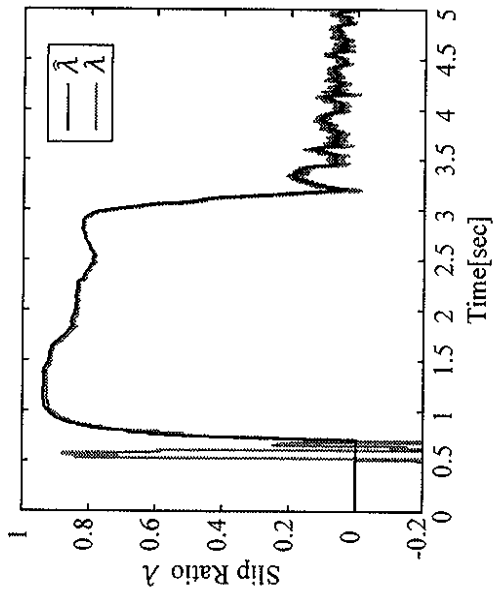
【 28 】



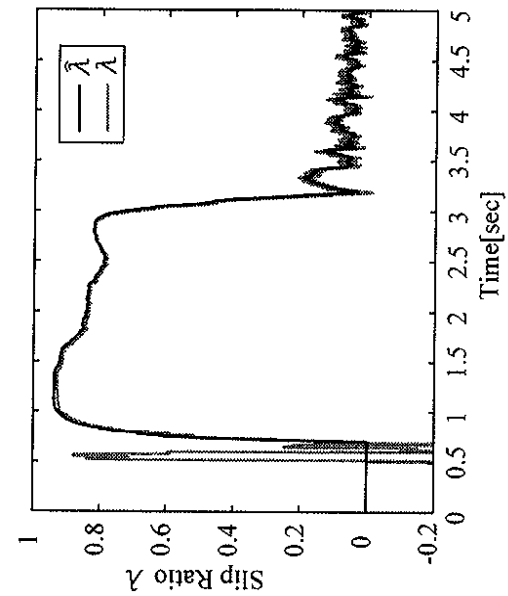
【 29 A 】



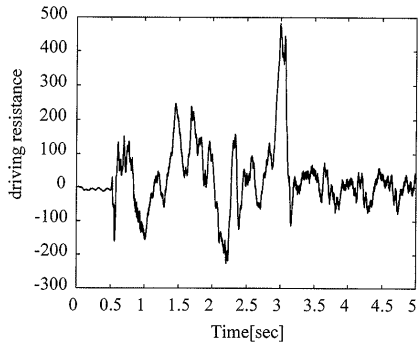
【 29 B 】



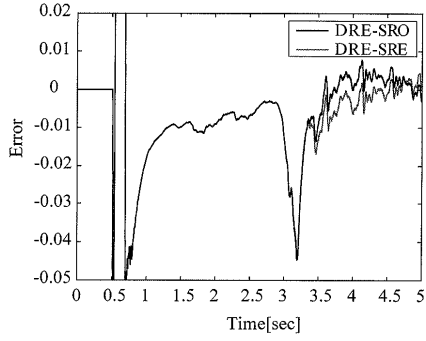
【 29 C 】



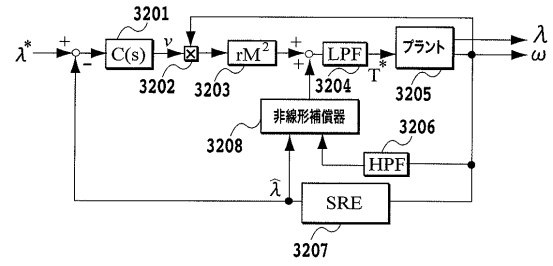
【 図 3 0 】



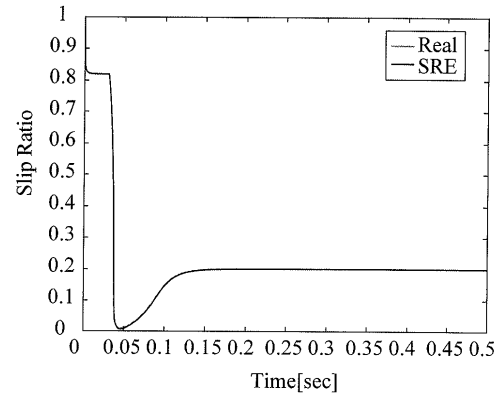
【 図 3 1 】



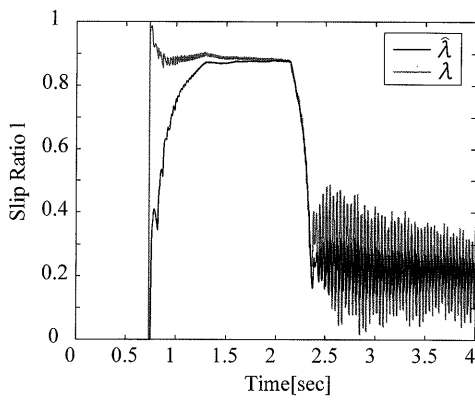
【 図 3 2 】



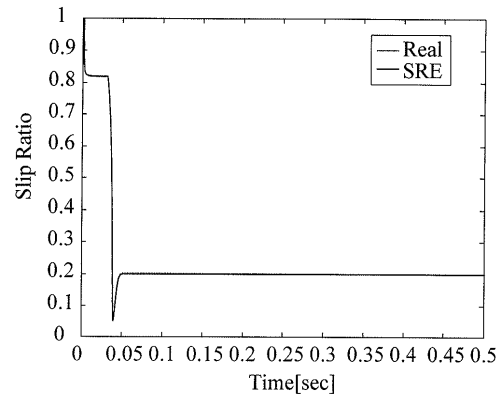
【 図 3 3 】



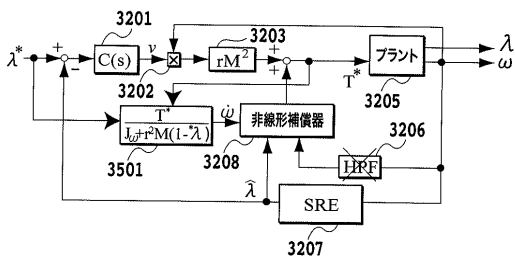
【 図 3 4 】



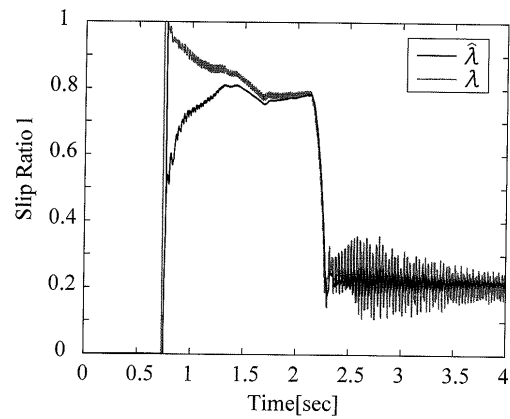
【 図 3 6 】



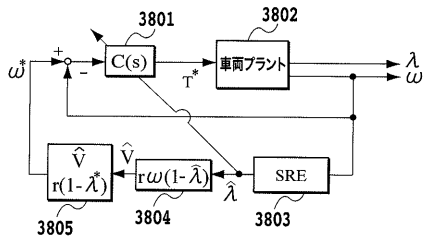
【 図 3 5 】



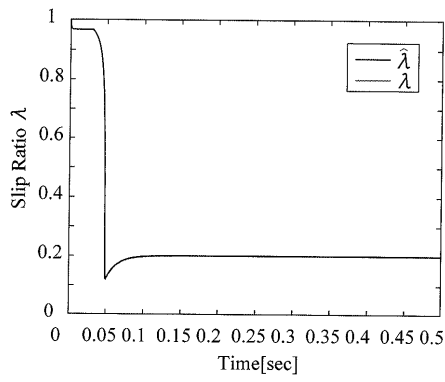
【 図 3 7 】



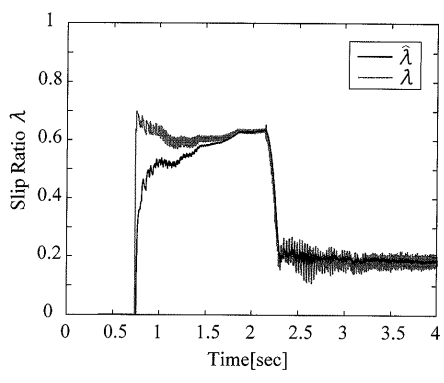
【 図 38 】



【 図 39 】



【 図 40 】



フロントページの続き

特許法第30条第1項適用 「平成18年電気学会産業応用部門大会」(社団法人電気学会 主催)の刊行物において、「路面状態に適応する電気自動車のモーションコントロール」(2006年8月21日~23日開催)と題して掲載

審査官 東 勝之

(56)参考文献 特開2006-115644(JP,A)
特開2006-136177(JP,A)
特開2006-149023(JP,A)
特開2001-008305(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B60L 15/20
H02P 29/00
B60W 40/10