

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02008/029524

発行日 平成22年1月21日 (2010.1.21)

(43) 国際公開日 平成20年3月13日 (2008.3.13)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
B60L 15/20 (2006.01)	B60L 15/20 Y	5H115
B60W 40/10 (2006.01)	B60R 16/02 661Z	

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 57 頁)

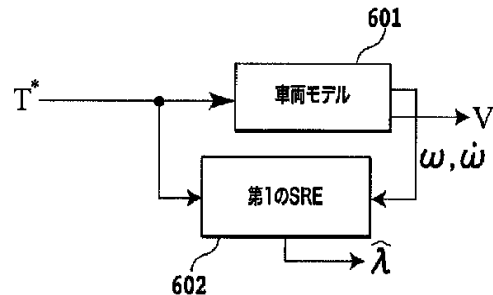
出願番号 特願2008-533050 (P2008-533050)	(71) 出願人 504182255 国立大学法人横浜国立大学 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号
(21) 国際出願番号 PCT/JP2007/054220	
(22) 国際出願日 平成19年3月5日 (2007.3.5)	
(31) 優先権主張番号 特願2006-243454 (P2006-243454)	(74) 代理人 100077481 弁理士 谷 義一
(32) 優先日 平成18年9月7日 (2006.9.7)	(74) 代理人 100088915 弁理士 阿部 和夫
(33) 優先権主張国 日本国 (JP)	(72) 発明者 藤本 博志 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
	(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) 【要約】

車体速を用いることなくスリップ率を測定するスリップ率推定装置およびそれを用いたスリップ率制御装置を提供する。トルク測定器で測定したモータトルクを、車両モデル(601)、スリップ率の時間微分も含めて計算するSRE(602)にそれぞれ入力する。車両モデル(601)は、車輪の回転速度、車輪の回転加速度、車体速度を導出し、その車輪の回転速度、車輪の回転加速度をSRE(602)に出力する。SRE(602)は、モータトルク、車輪の回転速度、車輪の回転加速度からスリップ率を出力する。



601 VEHICLE MODEL
602 FIRST SRE

【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おいて、当該モータのトルクを測定するモータトルク測定手段を有したスリップ率推定装置において、

駆動輪の回転速度 () および回転加速度

【数 1】

($\dot{\omega}$)

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

10

【数 2】

($\hat{\lambda}$)

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 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。

20

【数 3】

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

(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 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。

30

【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。

【数 4】

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

40

(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】

モータのトルク (T) で駆動輪を駆動する自動車において、当該モータのトルクを測定するモータトルク測定手段と、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とを有したスリップ率推定装置において、

駆動輪の回転速度 () および回転加速度

50

【数 5】

(a)

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

10

【数 6】

(b)

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。

【数 7】

20

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

(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。

【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 (B) 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。

30

【数 8】

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

(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)

【請求項 10】

モータのトルクで駆動輪を駆動する自動車において、当該モータに対するトルク指令を演算する手段と、当該モータのトルクを当該トルク指令に基づき制御する手段とを有したスリップ率制御装置において、

40

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】

(c)

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

50

リップ率

【数 1 0】

($\hat{\lambda}$)

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おいて、指定された駆動輪の回転速度から当該モータに対するトルク指令を演算する手段と、当該モータのトルクを当該トルク指令に基づき制御する手段とを有したスリップ率制御装置において、

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 1 3】

($\dot{\omega}$)

を算出する車両も出る演算手段と、

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、

前記スリップ率推定装置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

10

20

30

40

50

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を特徴とするスリップ率制御装置。

【請求項 15】

前記目標トルク演算手段は、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】

$$\omega = \frac{1}{(J_{\omega} + r^2 M(1 - \lambda))s} T \quad \dots (G) \quad 10$$

(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】

$$\dot{\lambda} = -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \quad \dots (A) \quad 20$$

(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)

【請求項 17】

前記スリップ率推定手段は、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】

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} = & -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \hat{\lambda} + \left(1 + \frac{J_{\omega}}{r^2 M}\right) \frac{\dot{\omega}}{\omega} - \frac{T}{r^2 M \omega} \\ & + k(\hat{\lambda}) \left(a_x(t) - \frac{N}{M} \mu(\hat{\lambda})\right) \quad \dots (B) \end{aligned} \quad 30$$

(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おいて、当該モータに対するトルク指令を演算する手段と、当該モータのトルクを当該トルク指令に基づき制御する手段と、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とを有したスリップ率制御装置において、

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】

 (\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

【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】

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

(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】

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

(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おいて、当該モータに対するトルク指令を演算する手段と、当該モータのトルクを当該トルク指令に基づき制御する手段と、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とを有したスリップ率制御装置において、

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

10

20

30

40

50

速度とから走行抵抗の推定値

【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】

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

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 2 5】

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

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、前記スリップ率推定装置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】

前記目標トルク演算手段は、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。

【数 2 6】

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

(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。

【数 2 7】

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

(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。

【請求項 2 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 (B) を計算することを特徴とする請求項 2 7 に記載のスリップ率制御装置。

10

20

30

40

【数 28】

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

(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)

【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。 10

【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】

【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。 20

【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)。

【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った。 30

【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】

【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 50

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おいて、当該モータのトルクを測定するモータトルク測定手段を有したスリップ率推定装置において、駆動輪の回転速度(ω)および回転加速度

【0008】

【数1】

($\dot{\omega}$)

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2】

($\hat{\lambda}$)

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3】

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

(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)

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。

【0014】

10

20

30

40

【数 4】

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

(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おいて、当該モータのトルクを測定するモータトルク測定手段と、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とを有したスリップ率推定装置において、駆動輪の回転速度 () および回転加速度

10

【0015】

【数 5】

 $(\dot{\omega})$

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

【0016】

【数 6】

 $(\hat{\lambda})$

を算出するスリップ率演算手段とを備えている。

【0017】

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

【0018】

【数 7】

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

(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。

【0019】

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 (B) を計算することができる。

40

【0020】

【数 8】

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

(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)

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、当該モータ

50

に対するトルク指令を演算する手段と、当該モータのトルクを当該トルク指令に基づき制御する手段とを有したスリップ率制御装置において、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

【 0 0 2 1 】

【 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

10

【 0 0 2 2 】

【 数 1 0 】

($\hat{\lambda}$)

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。

【 0 0 2 3 】

20

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 2 4 】

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。

【 0 0 2 5 】

【 数 1 1 】

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

(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)

30

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。

【 0 0 2 6 】

【 数 1 2 】

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

(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)

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、指定された駆動輪の回転速度から当該モータに対するトルク指令を演算する手段と、当該モータのトルクを当該トルク指令に基づき制御する手段とを有したスリップ率制御装置において、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

40

【 0 0 2 7 】

【 数 1 3 】

($\dot{\omega}$)

を算出する車両も出る演算手段と、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

50

る常微分方程式を計算して推定スリップ率

【 0 0 2 8 】

【 数 1 4 】

($\hat{\lambda}$)

を算出するスリップ率演算手段と、前記スリップ率推定装置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 】

前記目標トルク演算手段は、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 1 5 】

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

(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)

20

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 1 6 】

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

(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)

前記スリップ率推定手段は、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。

30

【 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た式 (B) を計算することができる。

【 0 0 3 4 】

【 数 1 7 】

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

40

(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おいて、当該モータに対するトルク指令を演算する手段と、当該モータのトルクを当該トルク指令に基づき制御する手段と、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とを有したスリップ率制御装置において、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、

50

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 1 8 】

(\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

【 0 0 3 6 】

【 数 1 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 2 0 】

$(\hat{\lambda})$

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。

【 0 0 4 0 】

【 数 2 1 】

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

(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。

【 0 0 4 1 】

【 数 2 2 】

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

(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おいて、当該モータに対するトルク指令を演算する手段と、当該モータのトルクを当該トルク指令に基づき制御する手段と、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とを有したスリップ率制御装置において、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

【 0 0 4 2 】

【 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

【 0 0 4 3 】

【 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 2 5 】

 $(\hat{\lambda})$

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、前記スリップ率推定装置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 】

前記目標トルク演算手段は、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 4 6 】

【 数 2 6 】

30

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

(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 2 7 】

40

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

(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)

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 (B) を計算することができる。

【 0 0 4 9 】

【数 2 8】

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

(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)

【0050】

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

【0051】

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。

【0052】

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】

【0053】

【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 に係る推定器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。

【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。 30

【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 の推定器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 y_i 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

【0054】

【数 2 9】

の

の

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。

【図 11 A】図 11 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 50

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 の推定器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 の推定器による推定における

10

【0 0 5 5】

【数 3 0】

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

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

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。

20

【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。

30

【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 のスリップ率推定器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 のスリップ率推定器を用いたスリップ率推定のブロック線図である。

40

【図 2 5】図 2 5 は、第 4 のスリップ率推定器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結果を示す図である。

50

【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）にインバータ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インバータによって制御される。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インバータを介して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 3 1 】

$$J_w \dot{\omega} = T - r F_d \quad \dots (1)$$

【 0 0 6 1 】

【 数 3 2 】

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

【 0 0 6 2 】

【 数 3 3 】

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

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 、モータトルク 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。 $\dot{}$ 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 3 4 】

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

20

【 0 0 6 6 】

但し、駆動時には $\max(V_w, V) = V$ となり、制動時には $\max(V_w, V) = V_w$ 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 3 5 】

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

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な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 3 6 】

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

【 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 λ 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 $\dot{\omega}$ 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 λ 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。

【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($F_{dr} = 0$)すると、以下の式を得ることができる。

【0073】

【数37】

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

【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_{ω} を足し合わせた値になる。

【0075】

1.2 第1のスリップ率推定器

本発明に係るスリップ率推定器(SRE)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38】

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

【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

【0078】

【数39】

$\hat{\lambda}$

とする。

【0079】

【数40】

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

【0080】

図4に、実施形態1に係る第1の推定器を用いたスリップ率推定のブロック線図を示す。トルク測定器で測定したモータトルク T^* を、上述の車両モデル601、(9)式に基づく第1のSRE602にそれぞれ入力する。車両モデル601は、車輪の回転速度 $\dot{\omega}$ 、車輪の回転加速度 $\ddot{\omega}$

10

20

30

40

50

【 0 0 8 1 】

【 数 4 1 】

 $\dot{\omega}$ 、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 0 8 2 】

【 数 4 2 】

 $\dot{\omega}$

を第 1 の SRE 6 0 2 に出力する。第 1 の SRE 6 0 2 は、モータトルク T^* 、車輪の回転速度 10
、車輪の回転加速度

【 0 0 8 3 】

【 数 4 3 】

 $\dot{\omega}$

からスリップ率

【 0 0 8 4 】

【 数 4 4 】

 $\hat{\lambda}$

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 4 5 】

 $\hat{\lambda}$ 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 4 6 】

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

(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 4 7 】

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

この式から

【 0 0 8 9 】

【 数 4 8 】

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

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、

【 0 0 9 0 】

20

30

40

【数 4 9】

$$\omega < 0$$

であれば

【 0 0 9 1】

【数 5 0】

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

となつて推定誤差は拡大していくので、

10

【 0 0 9 2】

【数 5 1】

$$\omega > 0$$

であるときのみ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、

【 0 0 9 3】

【数 5 2】

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

20

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SREでは常に(9)式に基づく推定を行うものとする。

【 0 0 9 4】

1.3 第1のSRE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。

【 0 0 9 5】

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。

30

【 0 0 9 6】

【数 5 3】

$$\Delta\lambda = -\frac{1}{V_{w0}}\Delta V + \frac{V_0}{V_{w0}^2}\Delta V_w \dots (12)$$

但し、V_{w0}、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。

【 0 0 9 7】

【数 5 4】

40

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

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、

【 0 0 9 8】

【数 5 5】

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

50

となる。但し、

【 0 0 9 9 】

【 数 5 6 】

$$\tau_a = \frac{J_n V \omega_0}{a N_e} \quad \dots (15)$$

【 0 1 0 0 】

【 数 5 7 】

$$\frac{1}{N_e} = \frac{1}{N} \frac{M}{J_n + M(1 - \lambda_0)} \quad \dots (16) \quad 10$$

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。* は目標スリップ率であって、ブロック 1 2 0 2 から出力される 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 をこの目標スリップ率 * に収束させることができる。目標スリップ率 * 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 を導出して第 1 の S R E 5 0 3 にそれらを入力する。第 1 の S R E 5 0 3 は (9) 式に基づいてスリップ率

【 0 1 0 1 】

【 数 5 8 】

$\hat{\Delta \lambda}$

を導出して加減算器に出力する。加減算器は、* から

【 0 1 0 2 】

【 数 5 9 】

$\hat{\Delta \lambda}$

を引いた値をブロック 5 0 1 に入力する。

【 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 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 6 0 】

$\dot{\lambda}$

を零として以下の式を得る。

【 0 1 0 7 】

20

30

40

【数 6 1】

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

【0 1 0 8】

(17)式において、車輪速、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 6 2】

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

【0 1 1 1】

(18)式左辺をy(k)、右辺第1項をξ(k)、右辺第2項をΓ(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

20

【0 1 1 2】

【数 6 3】

λ̂を導出する。κは忘却係数とする。

【0 1 1 3】

【数 6 4】

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

30

【0 1 1 4】

【数 6 5】

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

【0 1 1 5】

【数 6 6】

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

40

【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SRE702を組み合わせたものである。

【0 1 1 7】

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

50

2M とおき、さらにスリップ率 λ の変動をモデル化誤差 Δ とみなす。すなわち、

【 0 1 1 8 】

【 数 6 7 】

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

(22) 式を書き換えると、 Δ は以下の式より得られる。

【 0 1 1 9 】

【 数 6 8 】

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

また、(17) 式より、次式が得られる。

【 0 1 2 0 】

【 数 6 9 】

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

これより、スリップ率変動に伴う外乱は

【 0 1 2 1 】

【 数 7 0 】

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

となり、この外乱 d よりスリップ率 λ を算出する。ここでは

【 0 1 2 2 】

【 数 7 1 】

$$\hat{d}$$

は外乱オブザーバにより推定された外乱とし、(24) 式より

【 0 1 2 3 】

【 数 7 2 】

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

となる。ここで、

【 0 1 2 4 】

【 数 7 3 】

$$\hat{\omega}$$

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 8 0 1 では(25) 式の処理が行われる。

【 0 1 2 5 】

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。

【 0 1 2 6 】

10

20

30

40

50

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74】

①

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75】

②

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76】

③

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77】

④

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の推定による推定

本第1のSRE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78】

⑤

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】

他の2つの方法と異なり、本実施形態に係る第1のSREではスリップ率の時間微分値

【0136】

【数79】

⑥

10

20

30

40

50

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80】

①

①

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ている。

【0138】

10

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SRE、および他の2つのSREを実際に電気自動車に実装して実験を行った。

【0139】

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 路をプラスチックすのこを用いてその上に洗剤をまくことで実現した。

20

【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。

【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 \hat{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、

30

【0142】

【数81】

①

に脈動が生じる。これが、 \hat{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】

40

【数82】

①

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、正しい推定が行えなくなっている。また、

【0144】

【数83】

①

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

50

が遅くなっている。

【0145】

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11B、11Eに、外乱オブザーバによって推定されたスリップ率および

【0146】

【数84】

\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。

10

【0147】

1.6.3 第1のSREによる推定

図11C、11Fに、第1のSREによって推定されたスリップ率および

【0148】

【数85】

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

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

の時間変化を示す。第1のSREは、他の手法とは異なり、積分を行ってスリップ率を求めているので、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

20

【0149】

【数86】

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

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。

【0150】

30

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。

【0151】

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)式より以下の式を得る。

【0152】

【数87】

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

40

【0153】

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 $\omega_{lpf} = 1/0.03 = 30$ [rad/sec]であ

50

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。

【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。

10

【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SRE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。

【0157】

20

(実施形態2)

上述の実施形態1に係る第1のSRE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88】

ω

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SREを用いたスリップ率制御を行う。

30

【0159】

2.1 第2のSRE

上述のように、(10)式で定義した推定誤差 $e(t)$ は

【0160】

【数89】

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

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。

40

【0161】

【数90】

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

... (27)

【0162】

50

(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。

【0163】

【数91】

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

10

【0164】

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

【0165】

【数92】

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

但し、

【0166】

【数93】

$a(\hat{\lambda})$

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

【0167】

【数94】

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

30

となる。従って、次式が成立すれば安定が補償される。

【0168】

【数95】

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

(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

【0169】

【数96】

$k(\hat{\lambda})$

を選ぶ必要がある。

【0170】

【数97】

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

40

【0171】

実際に(27)式のオブザーバを利用する際には

50

【 0 1 7 2 】

【 数 9 8 】

 \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 9 9 】

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

とする。また、

【 0 1 7 4 】

【 数 1 0 0 】

 \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 0 1 】

 $\hat{\lambda}$

の陽関数にして以下のように書き換える。

【 0 1 7 6 】

【 数 1 0 2 】

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

【 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 0 3 】

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

この(33)、(34)式から次式が得られる。

【 0 1 7 9 】

【 数 1 0 4 】

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

【 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。

【 0 1 8 1 】

【 数 1 0 5 】

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

【 0 1 8 2 】

10

20

30

40

50

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SREを第2のSREとする。図22に、実施形態2に係る第2のスリップ率推定器を用いたスリップ率推定のブロック線図を示す。トルク測定器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2201、(36)式に基づく第2のSRE2202にそれぞれ入力する。車両モデル2201は、車輪の回転速度、車輪の回転加速度

【0183】
【数106】

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

【0184】
【数107】

ω

を第2のSRE2202に出力する。第2のSRE2202は、モータトルク T^* 、車輪の回転速度、車輪の回転加速度

【0185】
【数108】

ω

からスリップ率

【0186】
【数109】

$\hat{\lambda}$

を出力する。

【0187】

2.2 第2のSRE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SREを第2の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。

【0188】

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

【0189】
【数110】

$\omega > 0$

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、最適スリップ率以下でのみオブザーバゲイン

【0190】
【数111】

$k(\hat{\lambda})$

を与える。また、オブザーバゲイン

【0191】
【数112】

$k(\hat{\lambda})$

10

20

30

40

50

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 1 3 】

$k(\hat{\lambda})$

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。

【 0 1 9 3 】
【 数 1 1 4 】

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

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 1 5 】

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

であるから、摩擦係数モデル

【 0 1 9 5 】
【 数 1 1 6 】

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

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 1 7 】

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

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 SRE を用いることによって、

【 0 1 9 8 】
【 数 1 1 8 】

$\frac{\partial}{\partial}$

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 SRE では、第 1 の 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 $J = 1.0$ [Nms²]、 $M = 420$ [kg]、 $r = 0.22$ [m] とする。開始後 0.5 [sec] からトルク目標スリップ率 $T^* = 100$ [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 】

10

20

30

40

50

【数 1 1 9】

$\hat{\lambda}$

$\hat{\lambda}$

が十分小さくなった0.05[sec]より推定を始める。図 1 7 に、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。SREでは、5[sec]で推定誤差が拡大し、その後

【 0 2 0 1】

【数 1 2 0】

$\hat{\lambda}$

$\hat{\lambda}$

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（COMOTORS製 Qi(QUNO)）を改造したものを用いた。（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 路をプラスチックす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 $T^* = 80$ [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 $\mu -$ 曲線を(37)式に基づき仮定する。

【 0 2 0 3】

図 1 8 に、第 1 および第 2 のSRE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 2 1】

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

が第 1 のSREによる推定値であり、

【 0 2 0 5】

【数 1 2 2】

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

が第 2 のSREによる推定値である。第1のSREでは、誤差が拡大した後、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。

【 0 2 0 6】

2. 5 まとめ

このように、本実施形態に係る第 2 のSRE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。

【 0 2 0 7】

(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

10

20

30

40

50

基づき非線形制御を行ってスリップ率の制御を行う。

【 0 2 0 8 】

(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

【 0 2 0 9 】

【 数 1 2 3 】

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

に線形化できる。

【 0 2 1 0 】

【 数 1 2 4 】

10

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

... (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。

【 0 2 1 1 】

【 数 1 2 5 】

20

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

... (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。

【 0 2 1 2 】

【 数 1 2 6 】

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

... (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 λ 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1903、第2のSRE1904に入力する。車両モデル1903は導出した車輪の回転速度 ω 、車輪の回転加速度

30

【 0 2 1 3 】

【 数 1 2 7 】

$$\dot{\omega}$$

を非線形補償器1902、第2のSRE1904にそれぞれ入力する。第2のSRE1904は、モータトルク T^* 、車輪の回転速度 ω 、車輪の回転加速度

40

【 0 2 1 4 】

【 数 1 2 8 】

$$\dot{\omega}$$

からスリップ率

【 0 2 1 5 】

【 数 1 2 9 】

$$\hat{\lambda}$$

を導出してブロック1901、非線形補償器1902にそれぞれ入力する。非線形補償器

50

1902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 λ^* に収束させることができる。本実施形態では、スリップ率 λ の推定に第2のSREを用いるが、第1のSREを用いてもよい。

【0216】

3.2 シミュレーション

図20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 $T^* = 100$ [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 $\lambda^* = 0.1, 0.2, 0.3$ の3パターンとした。図20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。

10

【0217】

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。

【0218】

(実施形態4)

4.1 第3のSRE (DRE-SRE : Driving Resistance Estimator-Slip Ratio Estimator)

第1、第2の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SREに対し補償を行うことで、SREの精度をさらに向上させることができる。

20

【0219】

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23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

【0220】

【数130】

\hat{F}_{dr}

30

を用いてスリップ率推定を行う。

【0221】

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。

【0222】

【数131】

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

40

この(41)式をさらに書き換えると次式を得る。

【0223】

【数132】

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

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。

【0224】

【数 1 3 3】

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

図 2 4 に、第 3 のスリップ率推定器を用いたスリップ率推定のブロック線図を示す。第 3 の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。

【0 2 2 5】

4.2 第 4 のSRE (DRE-SRO)

10

上記第 3 のSREを用いたスリップ率推定の推定誤差は、(8)式と(43)式より以下のようになる。

【0 2 2 6】

【数 1 3 4】

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

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SREと同様に

20

【0 2 2 7】

【数 1 3 5】

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

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。

【0 2 2 8】

【数 1 3 6】

30

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

但し、

【0 2 2 9】

【数 1 3 7】

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

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。

40

【0 2 3 0】

【数 1 3 8】

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

(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 3 9】

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

走行抵抗の真値と推定値との差

【0 2 3 2】

【数 1 4 0】

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

10

は、図 2 4 の LPF 2 3 0 3、2 3 0 6 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 4 1】

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

20

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 4 2】

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

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】

【数 1 4 3】

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

この式(49)をスリップ率オブザーバとする。尚、第2のSREと同様に(37)式を用い、 $C_s = 1$ とする。図 2 5 に、第4の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SREであるDRE-SRO 2 5 0 1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SREと同様に演算を行う。

40

【0 2 3 7】

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。

【0 2 3 8】

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

50

、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。

【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_{dr} 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_{dr} の影響が無視できなくなるためだと考えられる。

【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144】

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

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。

【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。

【0244】

図29A~29C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30に、DRE-SREおよびDRE-SROで用いる走行抵抗推定結果を示す。

【0245】

図29A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。

【0246】

走行抵抗を考慮したDRE-SRE(図29B)およびDRE-SRO(図29C)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。

【0247】

さらに、図31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。

【0248】

(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32に、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。

【0249】

制御器において

10

20

30

40

50

【 0 2 5 0 】

【 数 1 4 5 】

ω

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[rad/s]とする。路面状況は常に低μ路 (μmax=0.2) を走行する。また、Kp = 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[Nm]を与える。0.03秒以降、スリップ率指令値 λ* =0.2をステップ状に入力した。

【 0 2 5 1 】

図 3 3 に、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。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。 10

【 0 2 5 2 】

図 3 4 に、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。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[Nm]を与え、2.2秒以降、スリップ率指令値 λ* =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 20

【 0 2 5 4 】

【 数 1 4 6 】

ω

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[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、 λ = λ* としてスリップ率は変動しないものとした。これにより、式 (4 1) から以下の式を得る。

【 0 2 5 6 】

【 数 1 4 7 】

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

上式を式 (2 4) に代入し、フィードフォワードで

【 0 2 5 7 】

【 数 1 4 8 】

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 3 5 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。HPF 3 2 0 6 に代えて、フィードフォワードで 40

【 0 2 5 8 】

【 数 1 4 9 】

ω

を与えるように式 (5 0) が組み込まれている。

【 0 2 5 9 】

5 . 2 シミュレーション

図 3 6 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 50

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150】

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

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】

【数151】

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

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。

【0264】

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。

【0265】

【数152】

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

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。比例積分制御器3701は、SRE3703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。

【0266】

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追従している事が分かる。

【0267】

10

20

30

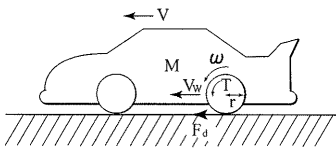
40

50

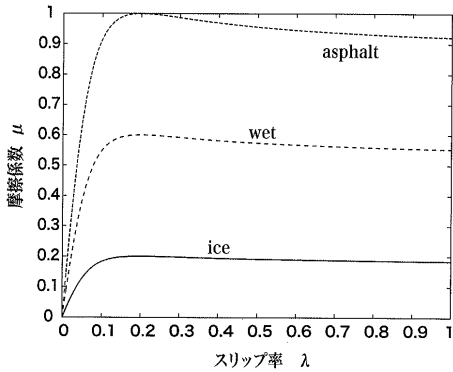
6.3 オフライン実験

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。

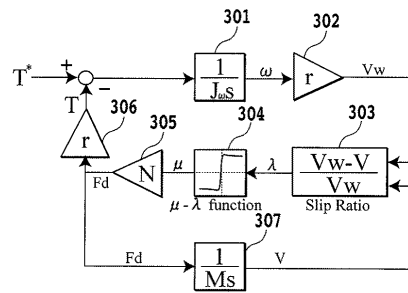
【図1】



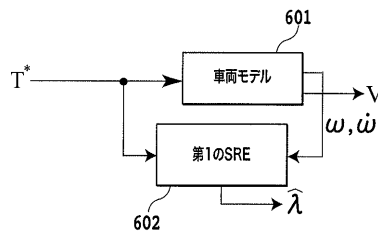
【図2】



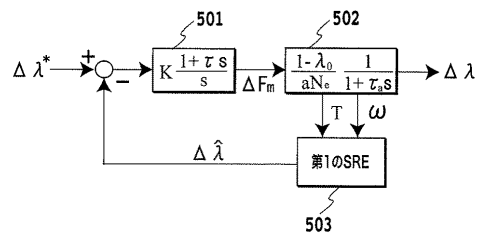
【図3】



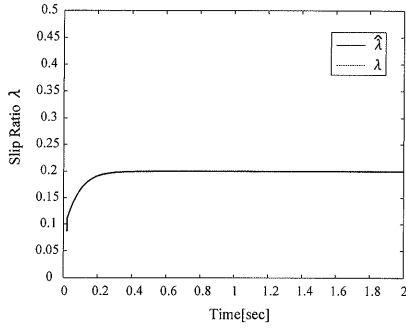
【図4】



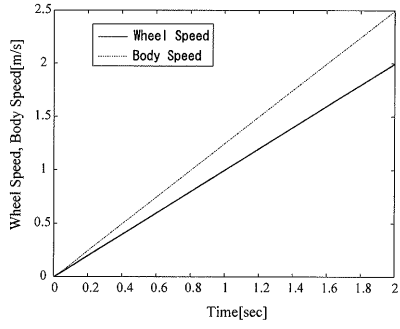
【図5】



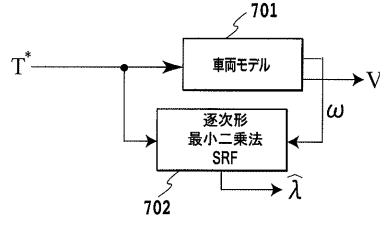
【 図 6 A 】



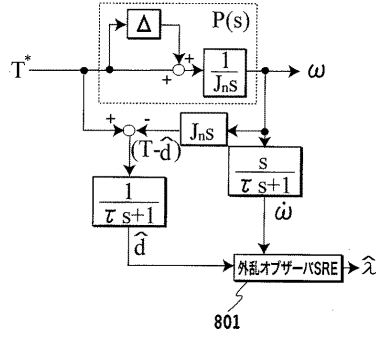
【 図 6 B 】



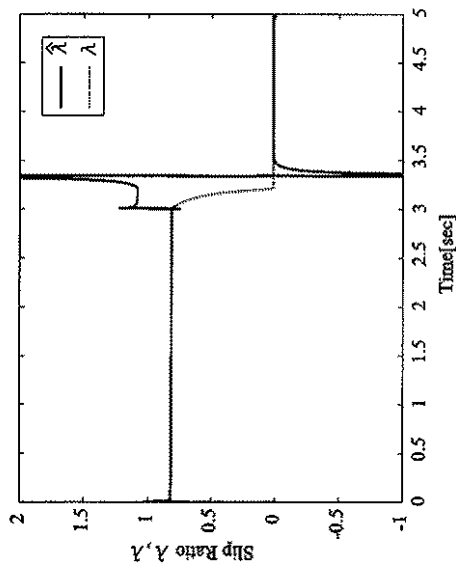
【 図 7 】



【 図 8 】

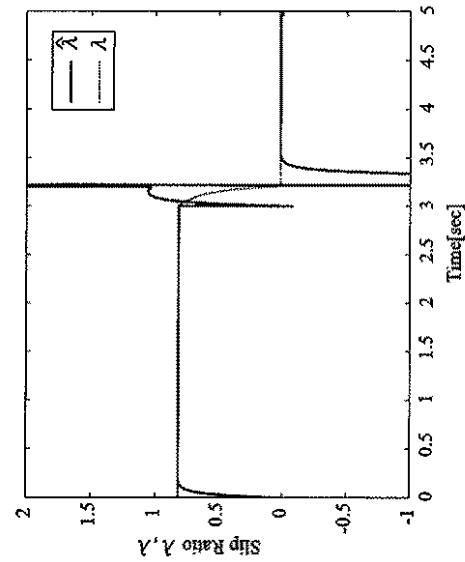


【 図 9 A 】



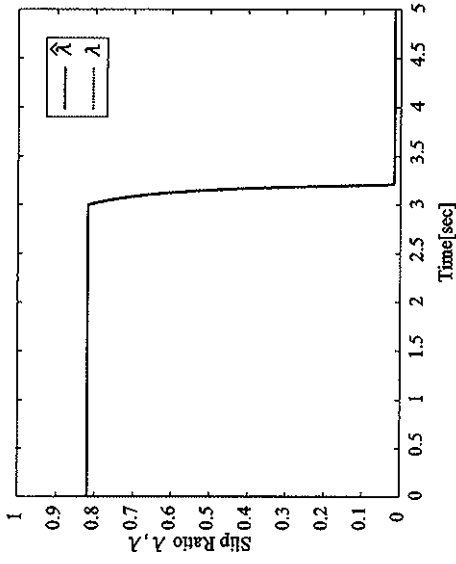
逐次形最小二乗法による推定

【 図 9 B 】



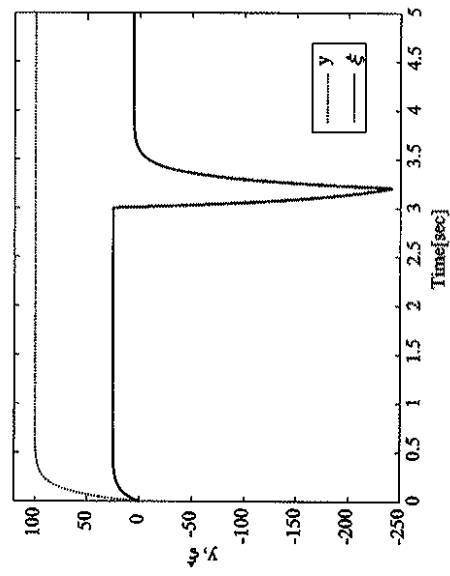
外乱オブザーバによる推定

【図 9 C】



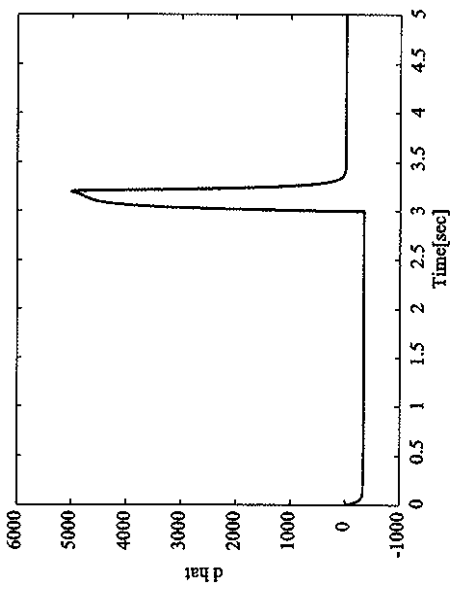
提案する推定器による推定

【図 9 D】



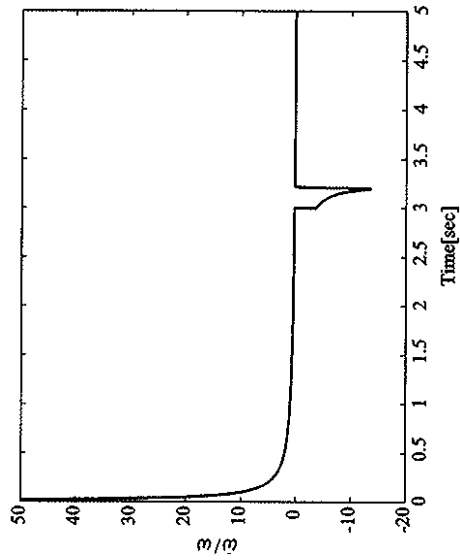
逐次形最小二乗法おける y と ξ

【図 9 E】

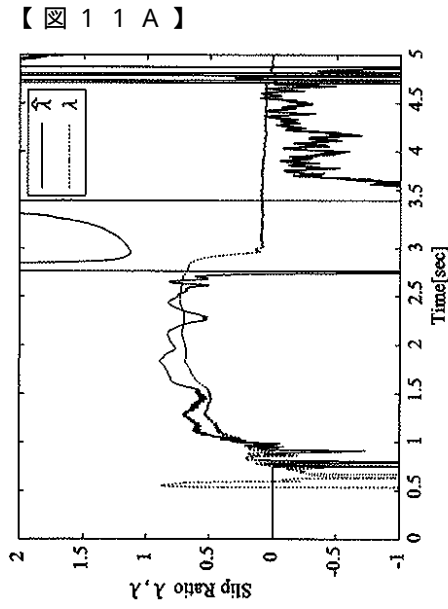
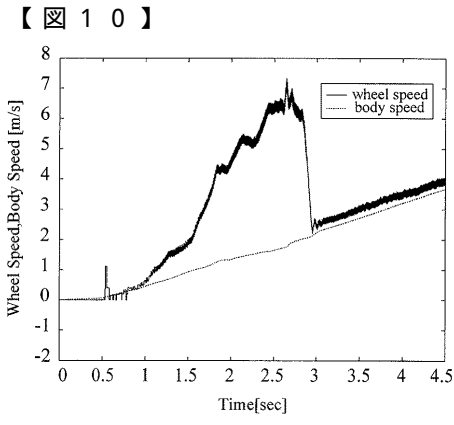


外乱オブザーバにおける \hat{d}

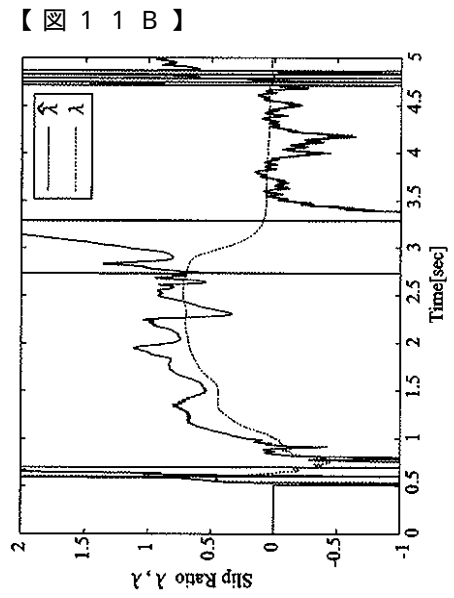
【図 9 F】



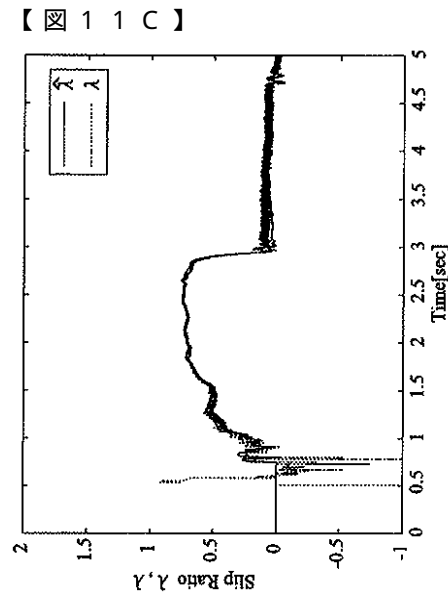
推定器における $\hat{\omega}/\omega$



逐次形最小二乗法による推定

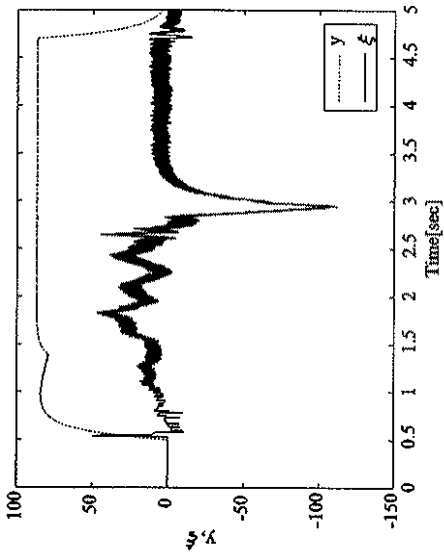


外乱オブザーバによる推定



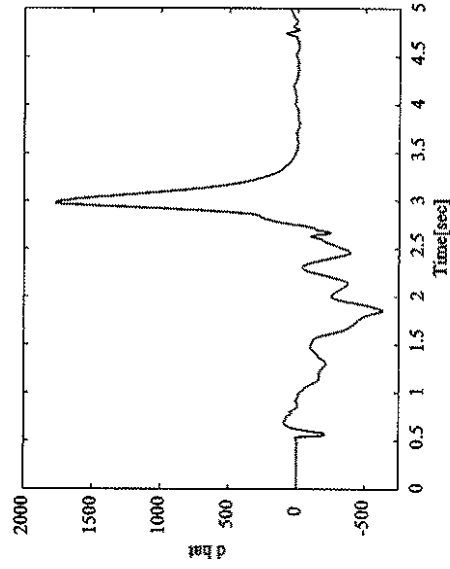
提案する推定器による推定

【図 1 1 D】



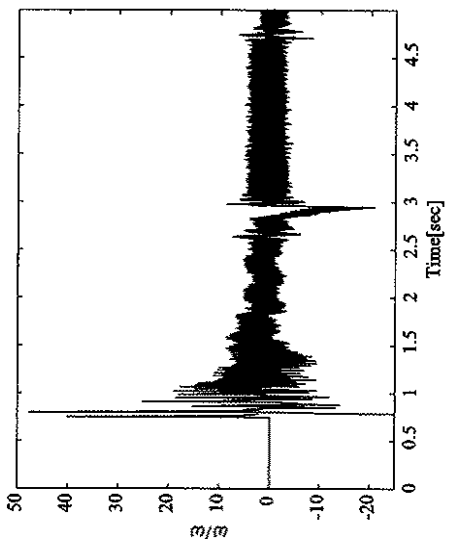
逐次形最小二乗法における y と ξ

【図 1 1 E】



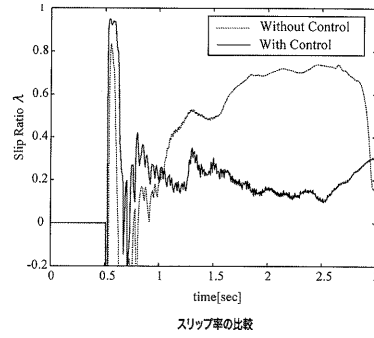
外乱オブザーバにおける \hat{d}

【図 1 1 F】



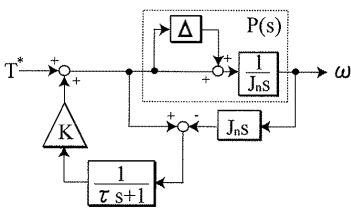
推定器における \hat{m}/m

【図 1 3 A】

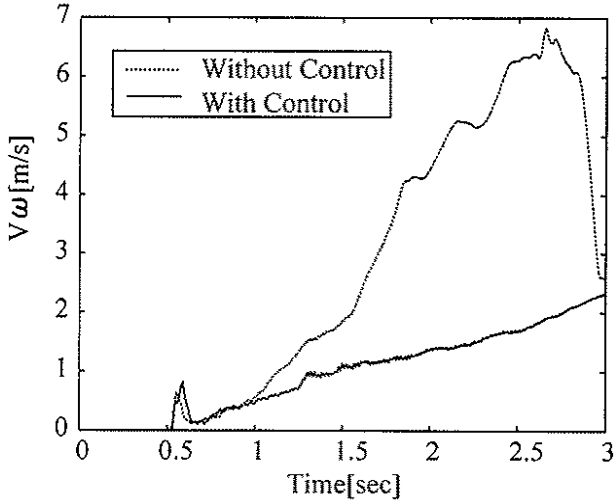


スリップ率の比較

【図 1 2】

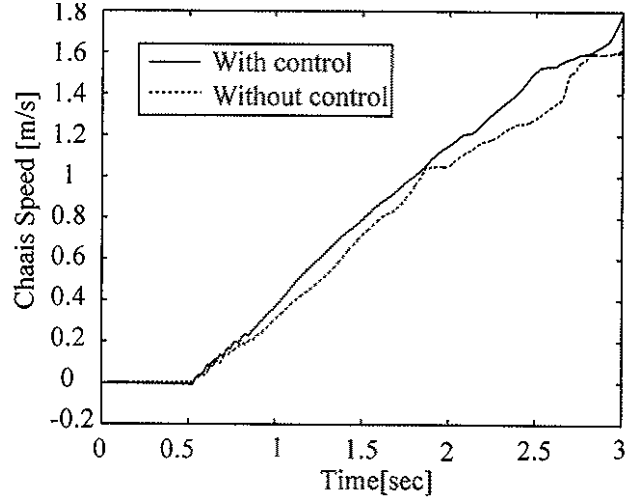


【 図 1 3 B 】



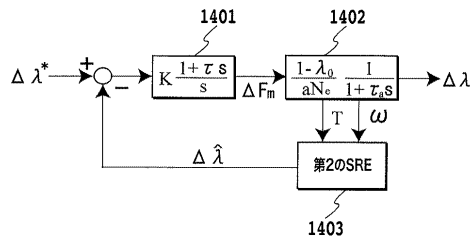
車輪速の比較

【 図 1 3 C 】

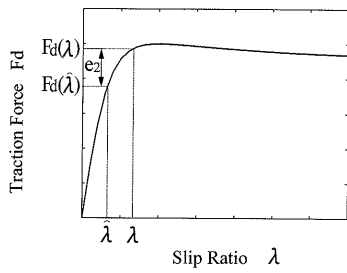


車体速の比較

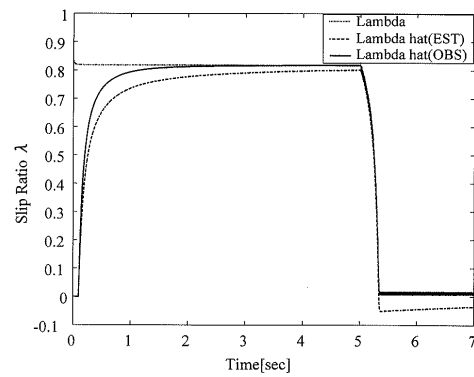
【 図 1 4 】



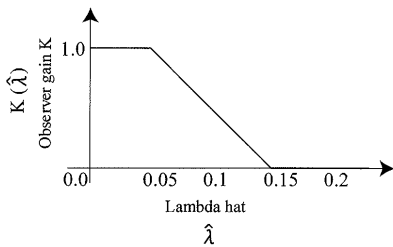
【 図 1 5 】



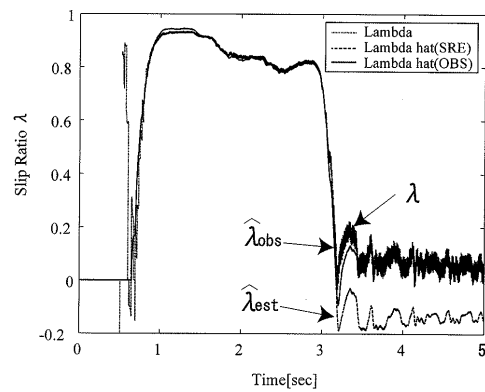
【 図 1 7 】



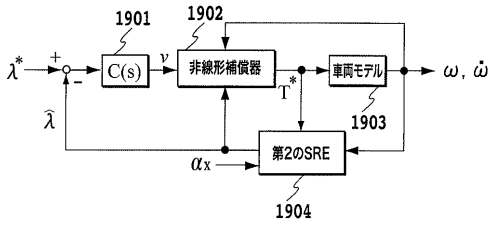
【 図 1 6 】



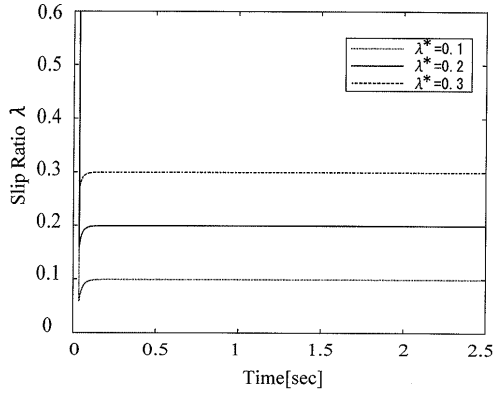
【 図 1 8 】



【 図 1 9 】

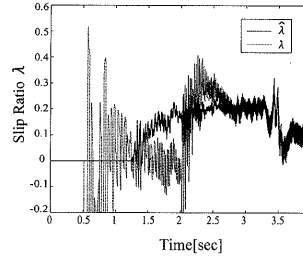


【 図 2 0 】

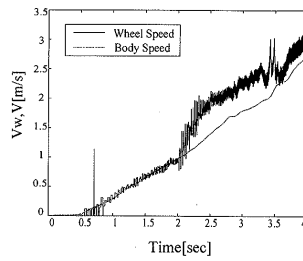


シミュレーション結果

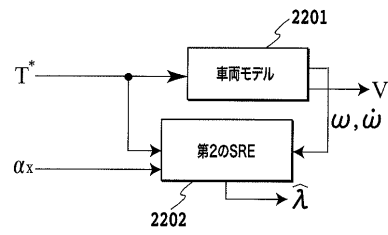
【 図 2 1 A 】



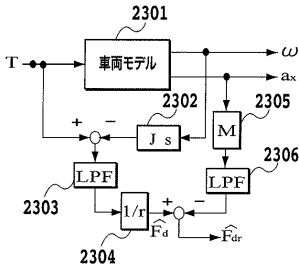
【 図 2 1 B 】



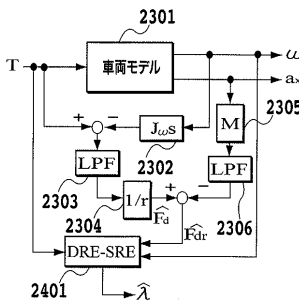
【 図 2 2 】



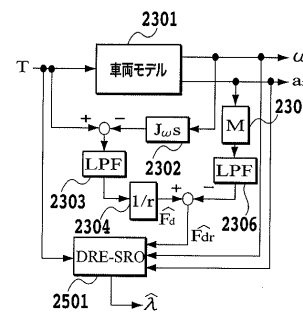
【 図 2 3 】



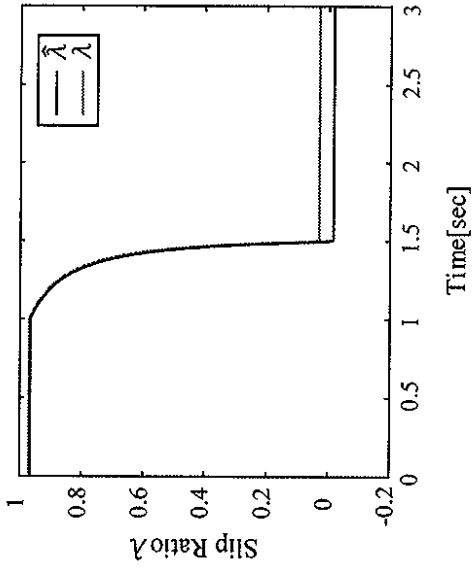
【 図 2 4 】



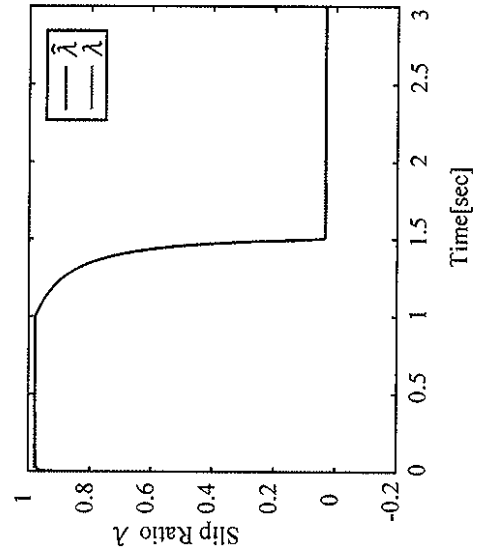
【 図 2 5 】



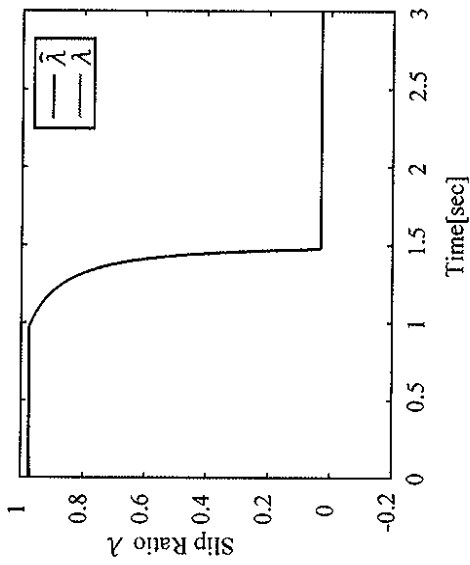
【 2 6 A 】



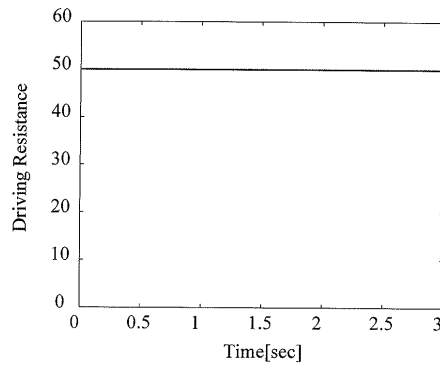
【 2 6 B 】



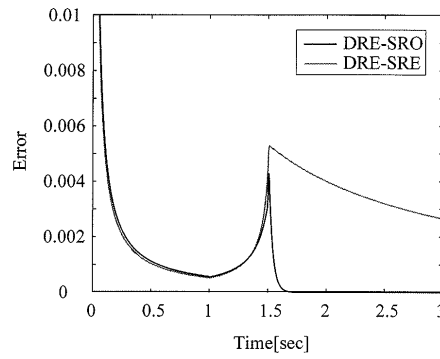
【 2 6 C 】



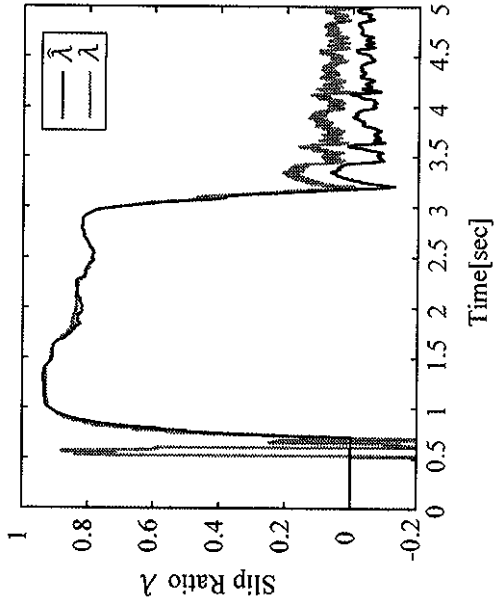
【 2 7 】



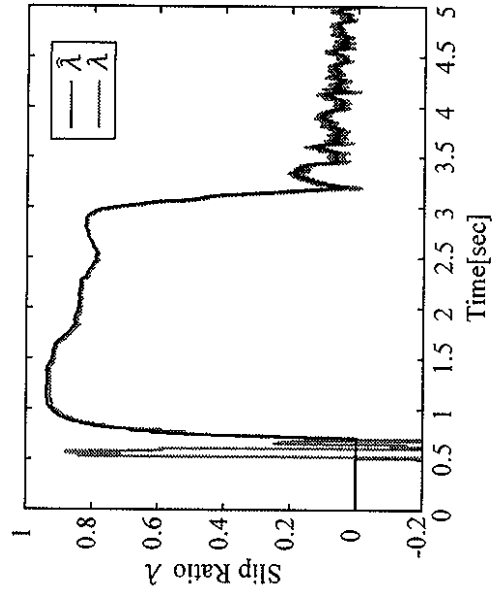
【 2 8 】



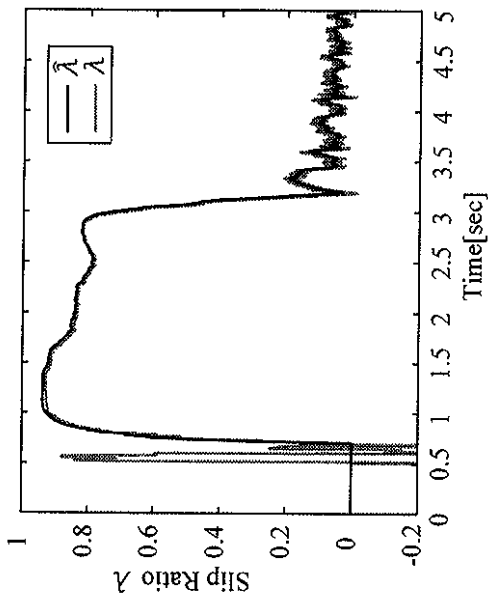
【 29 A 】



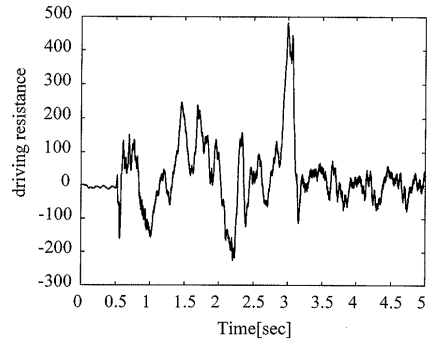
【 29 B 】



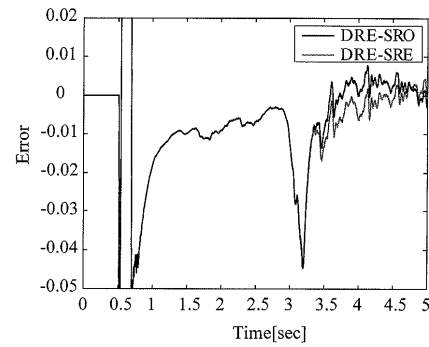
【 29 C 】



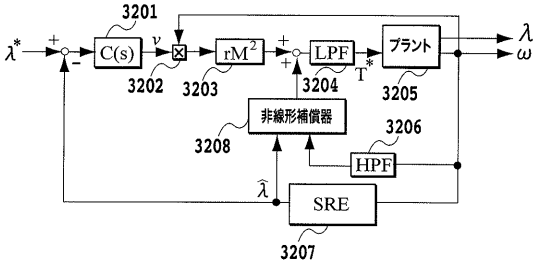
【 30 】



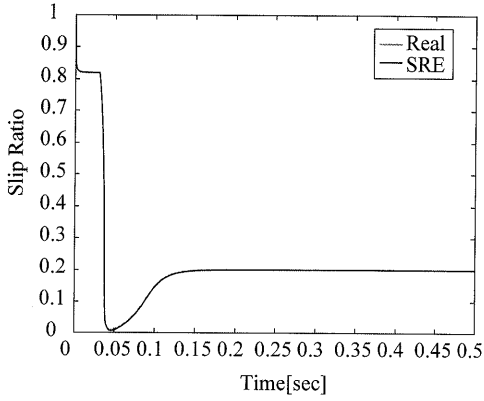
【 31 】



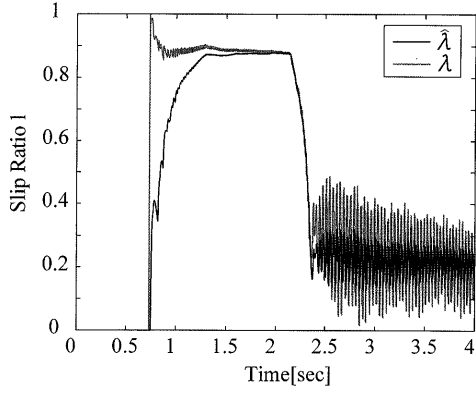
【 図 3 2 】



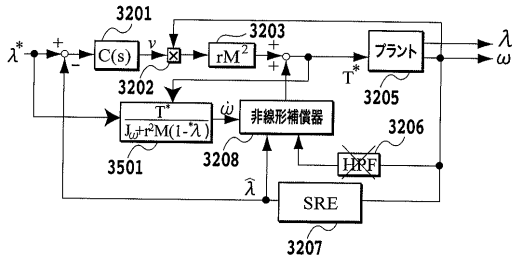
【 図 3 3 】



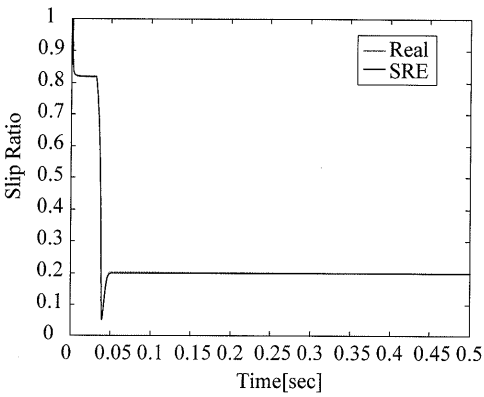
【 図 3 4 】



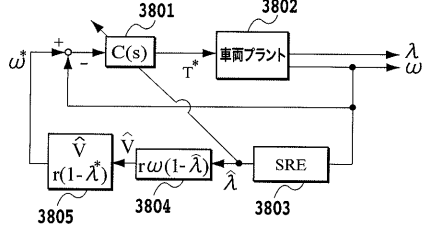
【 図 3 5 】



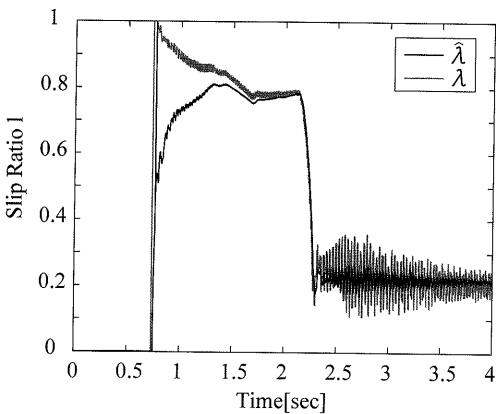
【 図 3 6 】



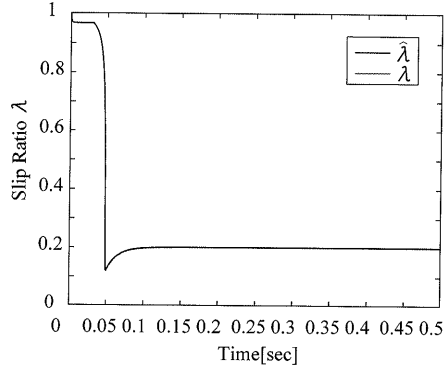
【 図 3 8 】



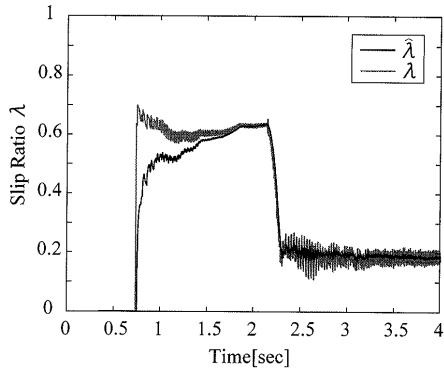
【 図 3 7 】



【 図 3 9 】



【 図 4 0 】



【 手続補正書 】

【 提出日 】平成20年4月4日(2008.4.4)

【 手続補正 1 】

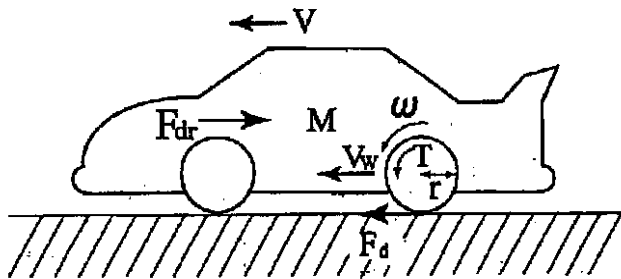
【 補正対象書類名 】図面

【 補正対象項目名 】図 1

【 補正方法 】変更

【 補正の内容 】

【 図 1 】



【 手続補正 2 】

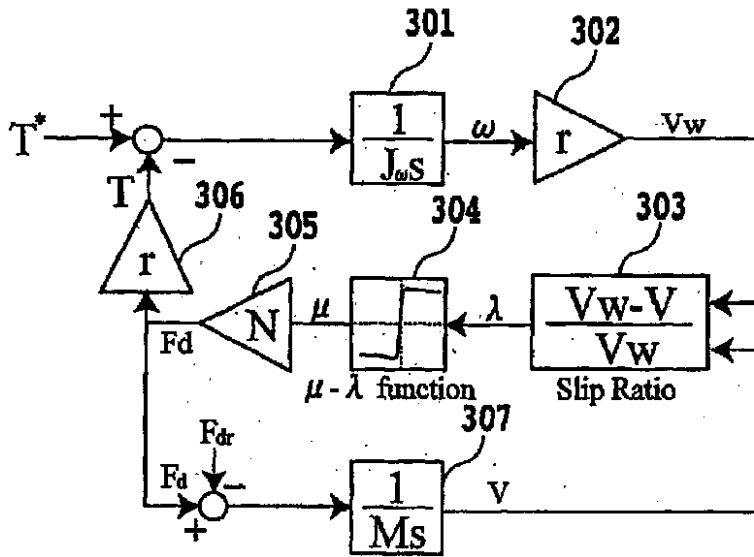
【 補正対象書類名 】図面

【 補正対象項目名 】図 3

【 補正方法 】変更

【 補正の内容 】

【 図 3 】



【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/JP2007/054220
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER B60L15/20(2006.01) i, H02P29/00(2006.01) i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B60L15/20, H02P29/00 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2007 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2007 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2007 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2006-115644 A (Nissan Motor Co., Ltd.), 27 April, 2006 (27.04.06), Par. Nos. [0030], [0046] to [0074]; all drawings (Family: none)	1-30
A	JP 2006-136177 A (Nissan Motor Co., Ltd.), 25 May, 2006 (25.05.06), Par. Nos. [0026] to [0059]; all drawings (Family: none)	1-30
A	JP 2006-149023 A (Nissan Motor Co., Ltd.), 08 June, 2006 (08.06.06), Par. Nos. [0030] to [0034]; full text (Family: none)	1-30
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 28 May, 2007 (28.05.07)		Date of mailing of the international search report 05 June, 2007 (05.06.07)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2007/054220

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2001-008305 A (Hitachi, Ltd.), 12 January, 2001 (12.01.01), Par. No. [0021]; Fig. 2 (Family: none)	1-30

国際調査報告		国際出願番号 PCT/JP2007/054220									
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. B60L15/20(2006.01)i, H02P29/00(2006.01)i											
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. B60L15/20, H02P29/00											
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2007年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2007年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2007年</td> </tr> </table>				日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2007年	日本国実用新案登録公報	1996-2007年	日本国登録実用新案公報	1994-2007年
日本国実用新案公報	1922-1996年										
日本国公開実用新案公報	1971-2007年										
日本国実用新案登録公報	1996-2007年										
日本国登録実用新案公報	1994-2007年										
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)											
C. 関連すると認められる文献											
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号									
A	JP 2006-115644 A (日産自動車株式会社) 2006.04.27, 段落【0030】、【0046】-【0074】、全図 ファミリーなし	1-30									
A	JP 2006-136177 A (日産自動車株式会社) 2006.05.25, 段落【0026】-【0059】、全図 ファミリーなし	1-30									
A	JP 2006-149023 A (日産自動車株式会社) 2006.06.08, 段落【0030】-【0034】、全文 ファミリーなし	1-30									
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。		<input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。									
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願		の日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献									
国際調査を完了した日 28.05.2007		国際調査報告の発送日 05.06.2007									
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/JP) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 東 勝之 電話番号 03-3581-1101 内線 3316	3H 9250								

国際調査報告		国際出願番号 PCT/JP2007/054220
C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP 2001-008305 A (株式会社日立製作所) 2001.0 1.12, 段落【0021】, 第2図 ファミリーなし	1-30

フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), EP(AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW

特許法第30条第1項適用申請有り

Fターム(参考) 5H115 PC06 PG04 PI16 PI29 PU01 QE14 QN02 QN06 QN08 QN22
QN23 QN24 QN28 SE10 T002 T004 T009 T010 TR05 TR06

(注)この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。