

横すべりを有する車両のファジィロバスト追従制御

柴山 恵司・クルモフ バレリー*・込山 将貴**・太田垣 博一*
成久 洋之***

岡山理科大学大学院工学研究科システム科学専攻

*岡山理科大学工学部電子工学科

**矢崎総業株式会社

***岡山理科大学工学部情報工学科

(2006年10月2日受付、2006年11月6日受理)

1 緒言

本論文では車輪に横すべりを有する前輪操舵自動車に制御対象として、ファジィ制御によって目標軌道追従性を向上させる一手法を提案する。以下ではその背景について述べる。

自動車をはじめとした車両制御技術は社会の要求を背景に高度化・複雑化が進んでいる。ドライバの操作をアシストするシステムや自動運転の実用化¹⁾はそのひとつであり、数多くの研究者や企業が開発を進めている。車両運動制御においてはX-by-wire²⁾や自車位置推定の技術開発にともない、アクティブ操舵や自動操舵支援システムの研究も進められている。特に車両が横すべりしない非ホロノミック拘束条件下での車両運動制御技術においては、切りかえしを含む車庫入れ³⁾まで進んでいる。

一方で、車両がすべりやすい路面上にあたり高速走行状態にある場合は車輪の横すべりが生じるため、無視できない非線形特性や横風等の外乱、環境の変化なども考慮しなければならない。それら非線形特性や外乱に対処できる制御手法もいくつか提案されており、横すべり零化制御⁴⁾やスライディングモード制御⁵⁾などが知られている。しかし、すべての車輪を独立して制御する必要があったり、一定の車速時に限定されていたり、厳密な車両モデルが必要であるなどの問題がある。他方では、ファジィ理論を用いた運動制御⁶⁾⁷⁾も近年では研究されており、非線形要素や外乱が多い車両制御において有効な制御手法であるが、ファジィルールを決定するために経験と試行錯誤が必要である。また画像認識⁸⁾やGPS⁹⁾により車両の位置検出は可能であるものの、すべり角や回転モーメントなどの現段階で直接計測できない状態量が、他の手法と同様に必要であることも難点である。

そこで、位置のみ計測可能な車両における目標軌道追従制御器を提案する。車両の動特性は速度、タイヤの発生する力、空気抵抗など多くの非線形要因がかかわっていて複雑であるので、コントローラに非線形制御の実現に有効なファジィ制御を用いる。これまでファジィコントローラの設計は経験や知識、試行錯誤からルールを模索しているもので、シミュレーションや実験でしか有効性を判断できなかった。それに対して本稿ではLyapunov関数を用いてルールを体系的に導くため、ロバスト性の評価と安定性の証明が期待できる。車両の状態量は位置のみ計測可能であると仮定し、目標軌道と現在地との差がなくなるように操舵角を制御する。提案する制御則はLyapunov関数としての評価関数があれば一般的な制御対象に対して適用できるので、軌道追従制御とは別に速度制御も行い同じ構成のファジィコントローラを用いる。目標軌道は自動運転を想定して直接経路を設定する場合と、ドライバの操舵アシストを想定して理想的な線形モデルから経路を導出する場合を検証する。提案するコントローラの有効性の確認は線形モデルと非線形モデルの両方を用いたシミュレーションを行い、動特性が変わる車両に対する汎用性と実際の車両に近い環境下での有効性も検証する。

2 制御対象の記述

2.1 車両モデル

本稿では図1に示す2自由度の前輪操舵車両モデルを用いる。主な記号は次のとおりである。

δ	操舵角	M	車体質量	θ	ヨー回転の角度
v	車体速度	I	車体重心回りの慣性モーメント	(x_0, y_0)	絶対座標
β	車体横すべり角	l_f, l_r	重心から前・後輪軸までの距離	(x, y)	車体の相対座標
γ	ヨー回転の角速度	d_f, d_r	前輪軸・後輪軸のトレッド長	(X, Y)	車輪の相対座標

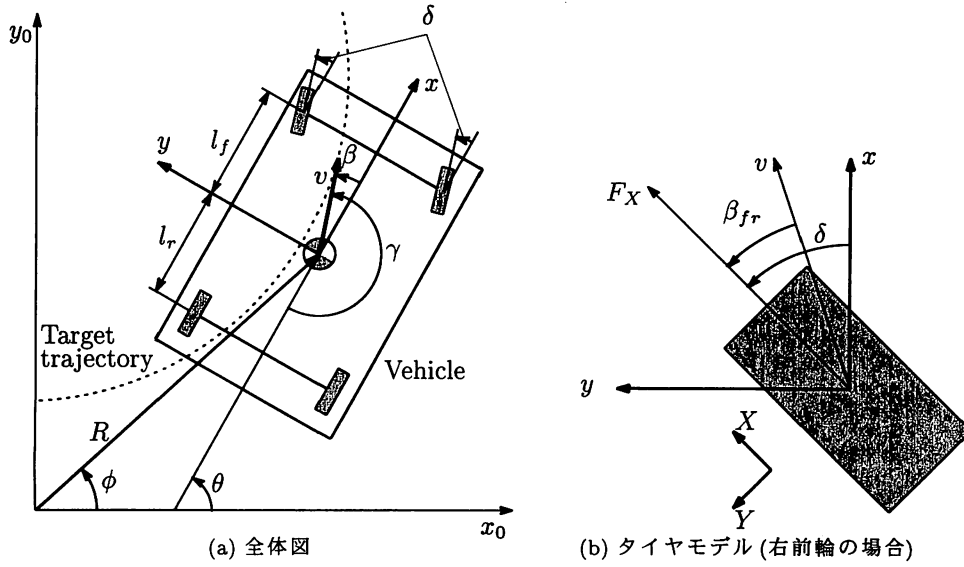


図 1: 2自由度車両モデル

$F_{Xfr}, F_{Xfl}, F_{Xrr}, F_{Xrl}$ 右前輪、左前輪、右後輪、左後輪の駆動・制動力
 $F_{Yfr}, F_{Yfl}, F_{Yrr}, F_{Yrl}$ 右前輪、左前輪、右後輪、左後輪のコーナリングフォース
 F_{zd}, F_{yd}, N_d 外乱の x, y 軸、回転モーメント成分

車両の動力学モデルは次のようになる¹⁰⁾。

$$\dot{v} = \frac{1}{M} \{ (F_{Xfr} + F_{Xfl}) \cos(\beta - \delta) + (F_{Yfr} + F_{Yfl}) \sin(\beta - \delta) + (F_{Xrr} + F_{Xrl} + F_{zd}) \cos \beta + (F_{Yrr} + F_{Yrl} + F_{yd}) \sin \beta \} \quad (1)$$

$$\dot{\beta} = \frac{1}{Mv} \{ (F_{Xfr} + F_{Xfl}) \sin(\beta + \delta) + (F_{Yfr} + F_{Yfl}) \cos(\beta + \delta) + (F_{Xrr} + F_{Xrl} + F_{zd}) \sin \beta + (F_{Yrr} + F_{Yrl} + F_{yd}) \cos \beta \} - \gamma \quad (2)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{l_f}{I} \{ (F_{Xfr} + F_{Xfl}) \sin \delta + (F_{Yfr} + F_{Yfl}) \cos \delta \} - \frac{l_r}{I} (F_{Yrr} + F_{Yrl}) + \frac{d_f}{2I} \{ (F_{Xfr} - F_{Xfl}) \cos \delta - (F_{Yfr} + F_{Yfl}) \sin \delta \} + \frac{d_r}{2I} (F_{Xrr} - F_{Xrl}) + \frac{N_d}{I} \quad (3)$$

$$\dot{x}_0 = v \cos(\beta + \theta) \quad (4)$$

$$\dot{y}_0 = v \sin(\beta + \theta) \quad (5)$$

$$\dot{\theta} = \gamma \quad (6)$$

2.2 タイヤ特性

2.2.1 非線形コーナリングフォース

コーナリングフォースはすべり角を用いた関数で表すことができるが、特性が非常に複雑であるので現在も数学モデルの研究が進められている。実験から得られたデータを用いる Magic Formula¹¹⁾ がよく使われているタイヤモデルのひとつであるが、未知パラメータが非常に多く数値シミュレーションには適さない。そこで、本稿ではタイヤの構成原理から求める Fiala モデル¹⁵⁾ で表す。

$$F_Y(\beta_{fr}) = \frac{C_1 l^2}{2} \tan \beta_{fr} - \frac{1}{8} \frac{C_1^2 l^3}{\mu p b} \tan^2 \beta_{fr} + \frac{1}{96} \frac{C_1^3 l^4}{\mu^2 p^2 b^2} \tan^3 \beta_{fr} \quad (7)$$

$$C_1 = \frac{C_0}{1 + \frac{(4\sqrt{\frac{4}{E} T})^2 l^3 C_0}{12k}} \quad (8)$$

$$C_0 = \frac{b}{T} G \quad (9)$$

上式は右前輪のコーナリングフォースの場合であり、 β_{fr} は右前輪タイヤのすべり角、 μ はタイヤ路面の摩擦係数、 p は接地圧力の最大値、 T はトレッドの厚み、 b はトレッドの幅、 l は接地長さ、 k は弾性基礎の係数、 E はトレッドベース材料の弾性係数、 J はトレッドベースの半径まわりの弾性慣性モーメント、 G はトレッド横せん断係数、 C_0 はトレッド横弾性係数を表している。左前輪、右後輪、左後輪のタイヤすべり角 β_{fl} 、 β_{rr} 、 β_{rl} についても同じ式を用いる。それぞれのタイヤすべり角は車両の速度ベクトルとタイヤの操舵角、ヨー回転の角速度による影響から次のように導かれる。

$$\begin{aligned}\beta_{fr} &= \arctan\left(\frac{v \sin \beta + l_f \gamma}{v \cos \beta + \gamma \frac{d_f}{2}}\right) - \delta & \beta_{rr} &= \arctan\left(\frac{v \sin \beta - l_r \gamma}{v \cos \beta + \gamma \frac{d_r}{2}}\right) \\ \beta_{fl} &= \arctan\left(\frac{v \sin \beta + l_f \gamma}{v \cos \beta - \gamma \frac{d_f}{2}}\right) - \delta & \beta_{rl} &= \arctan\left(\frac{v \sin \beta - l_r \gamma}{v \cos \beta - \gamma \frac{d_r}{2}}\right)\end{aligned}\quad (10)$$

2.2.2 線形コーナリングフォース

(10) は非線形であるので β 、 $d_f/(2v)$ 、 $d_r/(2v)$ が十分に小さく、横力がすべり角に対して係数 C_f 、 C_r で比例すると仮定して、コーナリングフォースを次式のように線形化する。

$$\begin{aligned}F_{Yfr} &= F_{Yfl} \cong -C_f \left(\beta + \frac{l_f \gamma}{v} - \delta \right) \\ F_{Yrr} &= F_{Yrl} \cong -C_r \left(\beta - \frac{l_r \gamma}{v} \right)\end{aligned}\quad (11)$$

2.3 横風外乱

横風は (1)(2)(3) の F_{x_d} 、 F_{y_d} 、 N_d にあたるが、車両の進行方向の空力学モデルについては考慮しないことと、純粹に車両に対しての横風のみ考慮するため $F_{x_d} \cong 0$ とする。横風により車両に加わる力 F_{y_d} と N_d を次のようにする¹³⁾。

$$F_{y_d} = W_y \rho S \frac{(v \cos \beta)^2 + (v \sin \beta + w)^2}{2} \quad (12)$$

$$N_d = W_n \rho S (l_f + l_r) \frac{(v \cos \beta)^2 + (v \sin \beta + w)^2}{2} \quad (13)$$

ここで W_y は応力係数、 W_n はヨーイングモーメント係数、 ρ は空気密度、 S は車両の代表投影面積、 w は横風の風速である。本稿では W_y と W_n を空力横すべり角 β_w の線形関数と見なし、 β_w は風が常に車両に対して直角に吹くと仮定して次のように表す。

$$\begin{aligned}W_y &= C_y \beta_w \\ W_n &= C_n \beta_w \\ \beta_w &= \arctan \frac{v \sin \beta + w}{v \cos \beta}\end{aligned}\quad (14)$$

2.4 線形モデル

2.1 は非線形な車両モデルであるが、 β が十分に小さいと仮定し、コーナリングフォースに (11) を使い、 v は常に一定で F_{Xfr} 、 F_{Xfl} 、 F_{Xrr} 、 F_{Xrl} 、 F_{x_d} 、 F_{y_d} 、 N_d を無視すれば車両モデルは次の線形モデルになる。

$$\mathbf{x}^T = [\beta \quad \gamma] \quad (15)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\delta$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-2(C_f + C_r)}{I} & \frac{-2(C_f l_f - C_r l_r)}{I} - 1 \\ \frac{Mv}{I} & \frac{Mv^2}{I} - 2(C_f l_f^2 + C_r l_r^2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{C_f}{I} \\ \frac{Mv}{I} \\ \frac{C_f l_f}{I} \end{bmatrix} \quad (16)$$

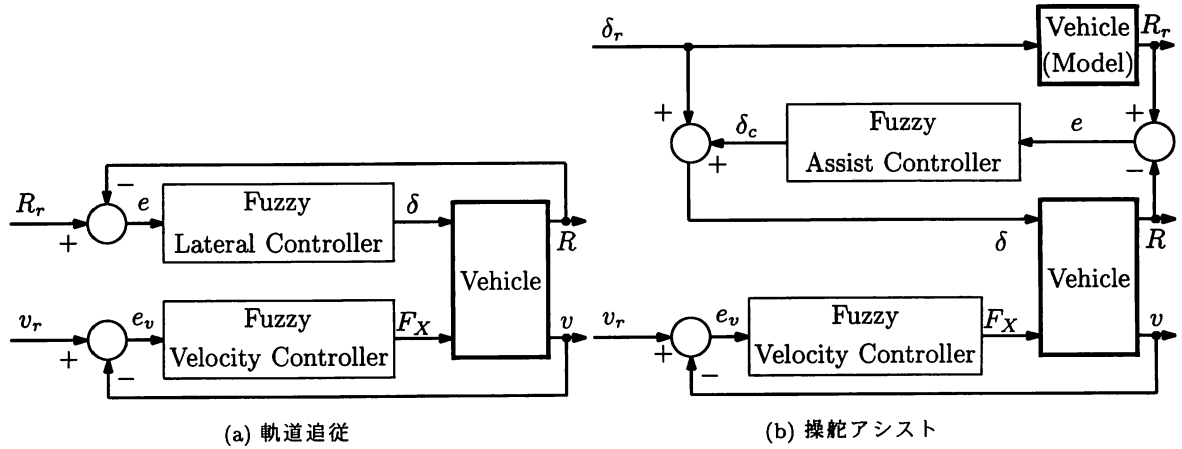


図 2: ファジィコントローラのブロック線図

3 ファジィコントローラ

本稿では軌跡追従用のコントローラと速度安定用コントローラを独立して設計する。コントローラ的设计において車両の動特性は未知、車両の位置 R と速度 v のみ計測可能であると仮定する。 R は車両モデルから絶対座標を導出し $\sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ より求める。

3.1 ファジィ軌跡追従コントローラ

提案する軌跡追従制御システムを図 2(a) に示す。 R 延長上の目標軌道を R_r とし、 $e = R_r - R \rightarrow 0$ とすることが目的である。直線 R は誤差ベクトル $e \equiv [e \ \dot{e}]$ と制御入力 δ に依存し、次のように記述することができる。

$$R(t) = f(e, \delta) \quad (17)$$

$f(e, \delta)$ には自動車の力学モデルも含まれており、車両全体の動特性を考慮して上式の Lyapunov 関数を次のように選定する。

$$V(e) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\int_0^t e(\tau) d\tau \right)^2 + e^2 + \dot{e}^2 \right\} \quad (18)$$

従来 Lyapunov 設計法と同時に、 $V(e)$ が閉ループ系に対して Lyapunov の意味で漸近安定となる条件を導く。具体的には閉ループ系が $V(e)$ の原点近傍において次の条件を満たせば漸近安定である。

$$V(0) = 0 \quad (19)$$

$$V(e) > 0 \quad (20)$$

$$\dot{V}(e) < 0 \quad (21)$$

もし漸近安定を実現できる補償器が存在するならば (21) の条件を満たすので、

$$\dot{V}(e) = e \int_0^t e(\tau) d\tau + e\dot{e} + \dot{e}\dot{e} < 0 \quad (22)$$

をファジィルールで表現する。なお (17) があいまいな情報であっても Lyapunov アプローチによる補償器を設計することができる。その場合も Lyapunov 関数を選び (21) を満たすように δ に対する条件を決めればよいが、制御対象の知識が明確でないため条件が言語的な表現となる。

ファジィルールの表現としては Mamdani 型のルール

$$\text{IF } e \text{ IS } \langle fh \rangle \text{ AND/OR } \int_0^t e(\tau) d\tau \text{ IS } \langle fh \rangle \text{ AND/OR } \dot{e} \text{ IS } \langle fh \rangle \text{ THEN } \delta \text{ IS } \langle fh \rangle$$

または Takagi-sugeno 型のルール

$$\text{IF } e \text{ IS } \langle fh \rangle \text{ AND/OR } \int_0^t e(\tau)d\tau \text{ IS } \langle fh \rangle \text{ AND/OR } \dot{e} \text{ IS } \langle fh \rangle \text{ THEN } \delta \text{ IS } g(e)$$

を用いることができる。 $\langle fh \rangle$ はファジィ変数である。

制御対象の Lyapunov 関数の微分を (22) のように定義したので次の条件が成り立つ。

$$\begin{aligned} \text{IF } e > 0 \text{ AND } \int_0^t e(\tau)d\tau > 0 \text{ AND } \dot{e} > 0 \text{ THEN } \ddot{e} < 0 \\ \text{IF } e > 0 \text{ AND } \int_0^t e(\tau)d\tau > 0 \text{ AND } \dot{e} < 0 \text{ THEN } \ddot{e} > 0 \\ \text{IF } e > 0 \text{ AND } \int_0^t e(\tau)d\tau < 0 \text{ AND } \dot{e} > 0 \text{ THEN } \ddot{e} < 0 \\ \text{IF } e > 0 \text{ AND } \int_0^t e(\tau)d\tau < 0 \text{ AND } \dot{e} < 0 \text{ THEN } \ddot{e} = 0 \\ \text{IF } e < 0 \text{ AND } \int_0^t e(\tau)d\tau > 0 \text{ AND } \dot{e} > 0 \text{ THEN } \ddot{e} = 0 \\ \text{IF } e < 0 \text{ AND } \int_0^t e(\tau)d\tau > 0 \text{ AND } \dot{e} < 0 \text{ THEN } \ddot{e} > 0 \\ \text{IF } e < 0 \text{ AND } \int_0^t e(\tau)d\tau < 0 \text{ AND } \dot{e} > 0 \text{ THEN } \ddot{e} < 0 \\ \text{IF } e < 0 \text{ AND } \int_0^t e(\tau)d\tau < 0 \text{ AND } \dot{e} < 0 \text{ THEN } \ddot{e} > 0 \end{aligned} \quad (23)$$

ここで δ が \ddot{e} と比例するので (22) を次のように改めて表現する。

$$\dot{V}(e) \cong e \int_0^t e(\tau)d\tau + e\dot{e} + \dot{e}\delta \quad (24)$$

δ 、 e 、 $\int_0^t e(\tau)d\tau$ 、 \dot{e} を次に示すファジィ集合で表現する。

$$\begin{aligned} \delta &\equiv \mu_\delta \in \{\mu_{+3}, \mu_{+2}, \mu_{+1}, \mu_0, \mu_{-1}, \mu_{-2}, \mu_{-3}\} \\ e &\equiv \mu_p \in \{\mu_{p+}, \mu_{p-}\} \\ \int_0^t e(\tau)d\tau &\equiv \mu_i \in \{\mu_{i+}, \mu_{i-}\} \\ \dot{e} &\equiv \mu_d \in \{\mu_{d+}, \mu_{d-}\} \end{aligned} \quad (25)$$

したがって、 e から δ を決めるファジィルールは次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{IF } \mu_p \text{ IS } \mu_{p+} \text{ AND } \mu_i \text{ IS } \mu_{i+} \text{ AND } \mu_d \text{ IS } \mu_{d+} \text{ THEN } \mu_\delta \text{ IS } \mu_{-3} \\ \text{IF } \mu_p \text{ IS } \mu_{p+} \text{ AND } \mu_i \text{ IS } \mu_{i+} \text{ AND } \mu_d \text{ IS } \mu_{d-} \text{ THEN } \mu_\delta \text{ IS } \mu_{+1} \\ \text{IF } \mu_p \text{ IS } \mu_{p+} \text{ AND } \mu_i \text{ IS } \mu_{i-} \text{ AND } \mu_d \text{ IS } \mu_{d+} \text{ THEN } \mu_\delta \text{ IS } \mu_{-2} \\ \text{IF } \mu_p \text{ IS } \mu_{p+} \text{ AND } \mu_i \text{ IS } \mu_{i-} \text{ AND } \mu_d \text{ IS } \mu_{d-} \text{ THEN } \mu_\delta \text{ IS } \mu_0 \\ \text{IF } \mu_p \text{ IS } \mu_{p-} \text{ AND } \mu_i \text{ IS } \mu_{i+} \text{ AND } \mu_d \text{ IS } \mu_{d+} \text{ THEN } \mu_\delta \text{ IS } \mu_0 \\ \text{IF } \mu_p \text{ IS } \mu_{p-} \text{ AND } \mu_i \text{ IS } \mu_{i+} \text{ AND } \mu_d \text{ IS } \mu_{d-} \text{ THEN } \mu_\delta \text{ IS } \mu_{+2} \\ \text{IF } \mu_p \text{ IS } \mu_{p-} \text{ AND } \mu_i \text{ IS } \mu_{i-} \text{ AND } \mu_d \text{ IS } \mu_{d+} \text{ THEN } \mu_\delta \text{ IS } \mu_{-1} \\ \text{IF } \mu_p \text{ IS } \mu_{p-} \text{ AND } \mu_i \text{ IS } \mu_{i-} \text{ AND } \mu_d \text{ IS } \mu_{d-} \text{ THEN } \mu_\delta \text{ IS } \mu_{+3} \end{aligned} \quad (26)$$

上記のファジィルールをコントローラで表現するため、メンバーシップ関数と非ファジィ化を行う。本稿ではファジィ集合を次のメンバーシップ関数で表す。

$$\begin{aligned}
\mu_p \text{ IS } \mu_{p+} &\rightarrow \mu_{p+} = e^{-w_1(e-c_1)^2} & \mu_\delta \text{ IS } \mu_{+3} &\rightarrow \mu_{+3} = e^{-(\delta-c_4)^2} \\
\mu_p \text{ IS } \mu_{p-} &\rightarrow \mu_{p-} = e^{-w_1(e+c_1)^2} & \mu_\delta \text{ IS } \mu_{+2} &\rightarrow \mu_{+2} = e^{-(\delta-c_5)^2} \\
\mu_i \text{ IS } \mu_{i+} &\rightarrow \mu_{i+} = e^{-w_2(\int_0^t e(\tau)d\tau-c_2)^2} & \mu_\delta \text{ IS } \mu_{+1} &\rightarrow \mu_{+1} = e^{-(\delta-c_6)^2} \\
\mu_i \text{ IS } \mu_{i-} &\rightarrow \mu_{i-} = e^{-w_2(\int_0^t e(\tau)d\tau+c_2)^2} & \mu_\delta \text{ IS } \mu_0 &\rightarrow \mu_0 = e^{-\delta^2} \\
\mu_d \text{ IS } \mu_{d+} &\rightarrow \mu_{d+} = e^{-w_3(\dot{e}-c_3)^2} & \mu_\delta \text{ IS } \mu_{-1} &\rightarrow \mu_{-1} = e^{-(\delta+c_6)^2} \\
\mu_d \text{ IS } \mu_{d-} &\rightarrow \mu_{d-} = e^{-w_3(\dot{e}+c_3)^2} & \mu_\delta \text{ IS } \mu_{-2} &\rightarrow \mu_{-2} = e^{-(\delta+c_5)^2} \\
& & \mu_\delta \text{ IS } \mu_{-3} &\rightarrow \mu_{-3} = e^{-(\delta+c_4)^2}
\end{aligned} \tag{27}$$

非ファジィ化には重心法を用い、次の式から制御入力を求める。 z は e 、 $\int_0^t e(\tau)d\tau$ 、 \dot{e} である。

$$u = \frac{\int \mu(z)\mu(\delta)dz}{\int \mu(z)dz} \tag{28}$$

3.2 ファジィ速度コントローラ

車両は旋回によってエネルギーを消費し速度が減少するので、車両速度に対して軌跡追従と同じ構成の補償器を用いる。制御則の原理は前節と同じであり、目標速度と現在の速度 v との誤差 e_v を 0 に収束するように $F_{Xfr} = F_{Xfl} = F_{Xrr} = F_{Xrl} = F_X$ を決める。

3.3 ファジィ操舵アシストコントローラ

操舵アシストシステムを図 2(b) に示す。 δ_r が操舵角の入力であり、理想とする車両モデルと擬似的に同じ操舵特性となるようにアシスト信号 δ_c を調節する。制御則の原理は前述のコントローラと同じであり、車両モデルの描く軌跡 R_r が R と同じになるようにする。

4 シミュレーション

文献⁵⁾を参考に車両のパラメータを表 1(a)、自動操縦を想定した目標軌道を $R_r(\phi) = 15 + 10 \cos(\phi/2)$ ($-4\pi < \phi \leq 4\pi$)、初期姿勢を $(x_0, y_0, \theta) = (26, 0, \pi/2)$ にした。コントローラのパラメータは表 1(b) のように決めた。

4.1 線形モデルを用いた軌跡追従シミュレーション

車両が描く運動軌跡と操舵角変化の検証を行うため、車両の線形化モデルによるシミュレーションを行った結果、図 3 のようになった。なお v は 7.5[m/s] である。シミュレーションで用いた車両が操舵系の動力学モデルを考慮していないため、過渡状態ではコントローラが敏感に反応した。一方、定常状態では -0.088 [m] から 0.022 [m] の誤差が生じるが、ほぼ目標軌跡どおりに追従した。30 秒経過時に C_f と C_r の値を入れ替え、車両の動特性をオーバーステアからアンダーステアに変化させたが、その瞬間にコントローラが敏感に反応したため軌跡追従に大きな変化はなかった。以上の結果から提案する制御則は従来の補償器と比べ、構造が簡単でありながら同等の効果を持ち、動特性が変化しても経路をうまく追従した。

4.2 非線形モデルを用いた軌道追従シミュレーション

非線形特性を持つ車両モデルに対する応答性をシミュレーションにより検証する。表 1(a) より前輪に対して 5224 [N]、後輪に対して 3140 [N] の力がかかるとして、Fiala モデルの最大値が $\mu = 1.0$ で同じ値になる表 1(c) のパラメータを用いた。なお、設定速度 v_r を 5 [m/s] にした。

Parameter	Value	Parameter	Value(Lateral)	Value(Velocity)
M	1717[kg]	c_1	0.5	2.5
I	2741.9[kg·m ²]	c_2	1.5	18
l_f	1.01[m]	c_3	2.0	5.0
l_r	1.68[m]	c_4	2.0	6000
d_f	1.5[m]	c_5	1.5	3000
d_r	1.5[m]	c_6	0.02	200
C_f	34455[N/rad]	w_1	7.0	0.3
C_r	25703[N/rad]	w_2	5.0	0.03
		w_3	0.02	0.02

(a) 車両モデル

(b) ファジィコントローラ

Parameter	Value(Front Tire)	Value(Rear Tire)	Parameter	Value
C_1	27564000	27564000	ρ	1.245[mg/m ²]
l	0.1[m]	0.1[m]	S	1.92[m ²]
p	130600[N]	78500[N]	C_y	1.576
b	0.6[m]	0.6[m]	C_n	0.6446

(c) タイヤモデル

(d) 横風モデル

表 1: 設定パラメータ

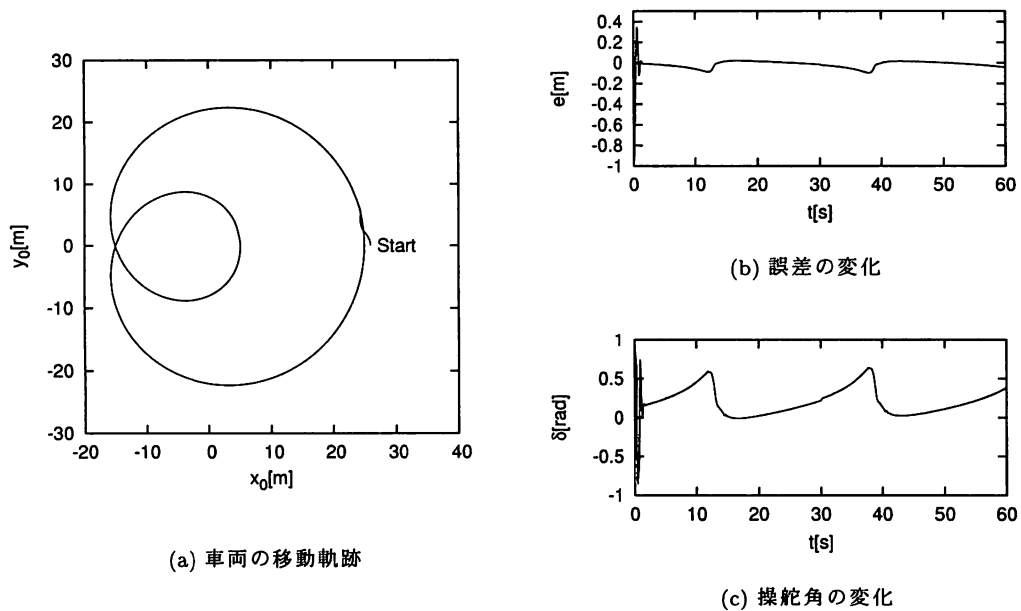


図 3: ファジィコントローラによる軌道追従制御 (線形モデル)

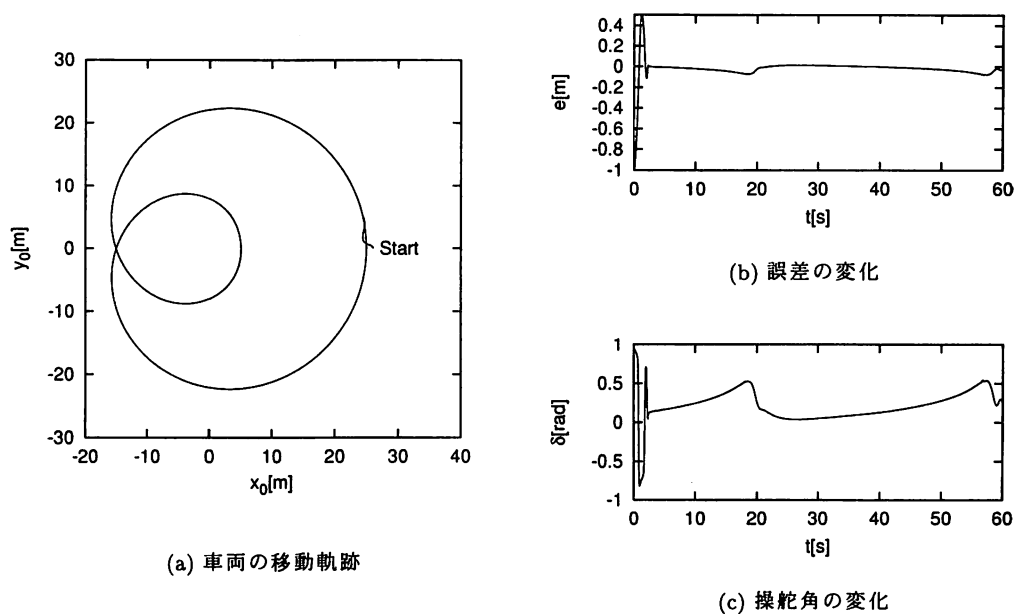


図 4: ファジィコントローラによる軌道追従制御 (非線形モデル、雨天)

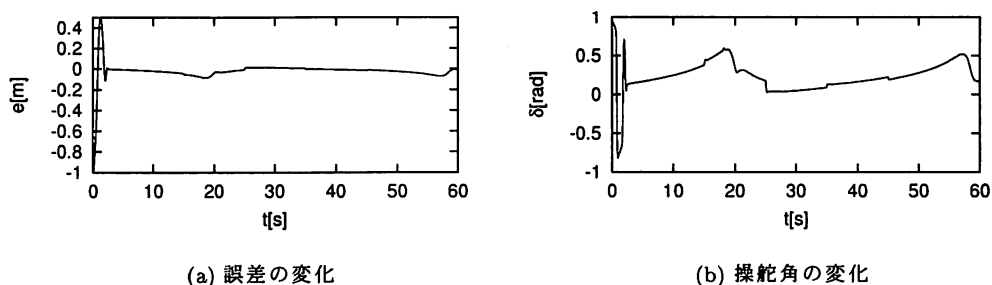


図 5: ファジィコントローラによる軌道追従制御 (非線形モデル、横風)

4.2.1 雨天時における軌道追従

図 4 は非線形モデルでのシミュレーション結果であり、30 秒までの μ を晴天時の一般的なタイヤ摩擦係数である 0.9 を、30 秒以降は雨天となりタイヤがハイドロプレーニング現象を起こしたとして 0.4 にした。本稿で設定したパラメータでは非線形モデルは δ が 0.28[rad] 程度を超えるとコーナリングフォースが飽和する。非線形モデルでは晴天時に e は -0.073 [m] から 0.013[m] の誤差が生じ、雨天になるとコーナリングフォースが半分以下になるが、ファジィコントローラのロバスト性により e は -0.076 [m] から 0.013[m] の誤差に抑えていた。

4.2.2 強風時での軌道追従

横風に関するパラメータは、参考文献¹³⁾を参考に表 1(d) のように決めた。図 5 は 4.2.1 と同じ状態でのシミュレーション結果であるが、晴天のまま 15 秒経過後と 35 秒経過後に 10 秒間原点から車に向かって $w = 15$ [m/s] の風が吹く。無風時と比べて 15 秒から 25 秒の間の e は最大 0.014[m]、35 秒時には最大 0.008[m] の差に抑えられ、横風が終わると瞬時に無風時の軌道追従に戻った。なお、図 5 の車両の移動軌跡は図 4 のものと見分けがつかないので省略した。

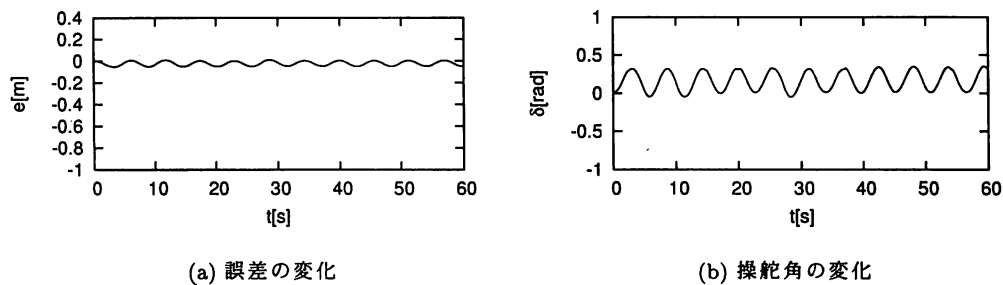


図 6: ファジィコントローラによる操舵アシスト (非線形モデル、横風)

4.3 操舵アシストシミュレーション

操舵アシストコントローラの有効性を検証するため 4.2.2 と同じ条件でシミュレーションを行った。図 6 はその結果であり、目標操舵角は自動車の一般的な操舵を想定し、 $\delta_r(t) = 0.15(1 + \cos(1.115t))$ として R_r の描く軌跡がクロソイド曲線になるようにした。規範となる車両モデルはニュートラルステアとなる $l_f = l_r = 1.345$ 、 $C_f = C_r = 30079$ にした。定常状態では約 -0.0040 [m] から 0.0042 [m] の誤差があるが、ほぼ規範車両モデルと同じ軌跡を描いている。横風が吹いても約 -0.0102 [m] から 0.0085 [m] の誤差にしかならなかった。

5 結論と今後の課題

本論文では、車輪に横すべりを有する前輪操舵車両の追従制御をファジィコントローラにより実現した。提案する方法はファジィルールの生成を Lyapunov 関数の漸近安定条件を基にして導いているため、ロバスト性の評価と安定性の証明が期待できる。他のファジィ車両制御⁶⁾と異なりファジィルールの体系的に導いているため、より効率的なルールの数、メンバーシップ関数の数で制御則を実現できる。制御対象である車両モデルを制御則の導出に直接用いておらず、同じ構成で経路追従、速度制御、操舵補償を実現でき、4 輪操舵制御⁴⁾など高度な車両に発展しても適用できるため汎用性が高いコントローラである。特に車両の運動制御においては、従来の制御則で不可欠であった車両のすべり角やヨー回転の角速度を用いないが、シミュレーションから参考文献³⁾の検証結果と遜色ない経路追従が実現できた。制御対象の非線形性、動特性の変化、外乱といった悪条件であっても良好な性能があり、提案するコントローラは効果的である。

提案する制御則は経路追従に操舵角のみを用いているが、車両の駆動・制動力を組みあわせることによってさらに的確な目標軌道追従が期待できる。また筆者らが提案した¹⁴⁾ようにメンバーシップ関数を工夫したり Takagi-Sugeno 型ルールの後件部をうまく用いれば、より実用的なファジィコントローラの実現が期待できる。本稿で用いた車両モデルにおいては空力、サスペンション、X-by-wire、ドライバーなどのモデルを盛り込めば、さらに実機に近いシミュレーションが得られコントローラの実現がしやすくなるであろう。これらも含めて本手法の実験による検証を今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 川邊 武俊: 自動車制御展望, 計測と制御, Vol.45, No.3, pp.161-166 (2006)
- 2) Se-Wook Oh, Ho-Chol Chae, Seok-Chan Yun, Chang-Soo Han: The Design of a Controller for the Steer-by Wire System, JSME International Journal, Series C, Vol.47, No.3 (2004)
- 3) 小林 啓吾, 潮 俊光: 大域的な座標変換による非ホロノミック車両システムのハイブリット制御, システム制御情報学会論文誌, Vol.17, No.1, pp.1-9 (2004)
- 4) 平岡 敏洋, 西原 修, 熊本 博光: タイヤ負荷の Minimax 最適化による制駆動動力配分 (四輪アクティブ操舵による横すべり零化制御の場合), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.71, No.704, pp.1238-1246 (2005)
- 5) 野中 謙一郎, 中山 元: 車輪に横滑りを有する車両の厳密な線形化によるロバスト軌道追従制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.6, pp.603-610 (2006)
- 6) T.Hessburg, M.Tomizuka: Fuzzy Logic Control for Lateral Vehicle Guidance, IEEE Control Systems Magazine, Vol.14, Issue 4, pp.55-63 (1994)
- 7) Q.Zhou, F.Wang: Driver Assisted Fuzzy Control for Yaw Dynamics for 4WD Vehicles, 2004 IEEE intelligent Vehicles Symposium, pp.425-430 (2004)

- 8) 金平 実, 定野 温: 運転操作補助に関する車両制御技術, 計測と制御, Vol.40, No.3, pp.214-219 (2001)
- 9) 大前 学, 橋本 尚久, 藤岡 建彦, 清水 浩: RTK-GPS を用いた自動車の自動運転, 計測と制御, Vol.44, No.4, pp.266-269 (2005)
- 10) T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, (Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc.) pp.195-236 (1992)
- 11) 水野 雅彦, 高橋 俊道, 羽田 昌敏: 実走行時タイヤデータを用いたモデル化手法, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.34, No.3, pp.39-46 (1999)
- 12) E.Fiala: Lateral forces on rolling pneumatic tires, *Zeitschrift, V.D.I.*, Vol.96, No.29, pp.973-979 (1954)
- 13) 丸山 喜久, 山崎 文雄: 横風時の車両走行安定性に関する数値解析とシミュレータ実験, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp.129-140 (2004)
- 14) クルモフ バレリー, 柴山 恵司, 成久 洋之: Lyapunov 設計法を用いたファジィ制御系の設計, 第 4 回制御部門大会資料, pp.19-22 (2004)
- 15) 社団法人 自動車技術会: 新編・自動車工学ハンドブック (1989)
- 16) 安部 正人: 自動車の運動と制御, 山海堂 (1992)

Fuzzy Robust Tracking Control for Lateral Vehicle Guidance

Keishi SHIBAYAMA, Valeri KROUMOV*, Masataka KOMIYAMA**,
Hirokazu OHTAGAKI* and Hiroyuki NARIHISA***

Graduate School of Engineering,

** Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering,
Okayama University of Science,*

1-1 Ridai-cho, Okayama 700-0005, Japan,

*** Yazaki Resources Co., Ltd.,*

17th Floor, Mita-Kokusai Building, 4-28 Mita 1-chome, Minato-ku, Tokyo, 108-8333 Japan,

**** Department of Information and Computer Engineering, Faculty of Engineering,
Okayama University of Science,*

1-1 Ridai-cho, Okayama 700-0005, Japan

(Received October 2, 2006; accepted November 6, 2006)

In this paper a fuzzy robust tracking controller for lateral vehicle guidance is proposed. It is assumed that the vehicle model is unknown. The proposed controller consists of separate longitudinal (speed) and lateral (steer angle) controllers which significantly reduces complexity of the system, compared to single fuzzy controller designs. The controller design is based on the Lyapunov stability approach and guarantees the overall system stability and robustness. The methodology for choosing and adjusting the fuzzy rules is very simple and effective and can be employed for fuzzy controller designs in other fields. It assures robustness with respect to uncertainties in cornering forces and externally applied disturbances. The proposed controller can be applied to vehicles with neutral, under- or oversteered behavior. Several simulation examples compare the proposed control scheme to some existing controllers and illustrate its effectiveness.

Keywords: lateral vehicle control; fuzzy control; tracking control; nonholonomic systems.