

モデル誤差抑制補償器に基づくロバスト経路追従制御*

岡島 寛[†]・松永 信智[†]

Robust Path Following Control Based on Model Error Compensator*

Hiroshi OKAJIMA[†] and Nobutomo MATSUNAGA[†]

1. はじめに

乗用車などの移動手段は必要不可欠なものであり、その安全性や快適性の確保は重要な課題である。これに伴い、さまざまな運転支援システムが研究開発され、衝突防止ブレーキシステムなどは販売車両に導入されて浸透しつつある。また、運転支援のみでなく自動運転の実用化に向けた研究も近年飛躍的に進んでいる。

自動運転に関して、加減速の制御、経路追従制御、障害物回避などさまざまな必要不可欠な要素技術のうち、本速報では経路追従問題について考える。従来の経路追従の研究においては、タイヤのすべり角がないモデルに対する追従制御系[1,2]や車両の運動モデル[3]に対する追従制御系[4]などが構築されている。これらの研究においては、フィードバック線形化などの非線形制御理論に基づいて経路に漸近的に追従するための基本的な追従制御系が構成されており、良好な追従結果を得ている。その際、車両の非線形モデルは、すべり角およびヨー角速度、車速を状態量として導出されており、質量や慣性モーメント、タイヤコーナリングパワなどは既知のものとして制御則が設計される。

しかし、コーナリングパワの値は雨天時や路面状態、タイヤ空気圧などにより大きく変化するパラメータであることから、モデル化誤差が生じやすい。車体の質量は搭乗者数や積荷などにより変化し慣性モーメントも変化する。さらには、坂道走行時には平面モデル化時における重心位置が変化するなど、これらのパラメータ群を乗車ごと走行ごとに精度よく知ることは難しい。よって、実用性の観点からロバスト性を考慮した設計が必要不可欠である。

そこで本速報では、自動車のロバスト経路追従制御系を構築する。先行研究[5,6]において、モデルと制御対象

の動特性の差を考え、その差の抑制に特化した補償器を提案している。この方法は非線形系にも適用しやすい構造[7]となっており、ロバスト性の確保と同時にフィードバック線形化にも対応できるため経路追従と親和性が高い。本速報では先行研究のモデル誤差抑制補償器に基づいてロバストな経路追従制御系を提案し、その有効性を数値例により示す。

2. モデリング

2.1 自動車の運動モデル

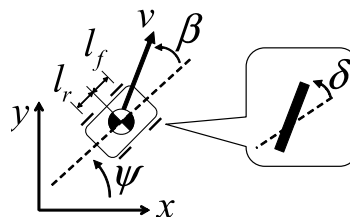


Fig. 1 Vehicle model

まず、自動車の運動方程式について考える。自動車のダイナミクスは簡易二輪モデル化に基づいて導出されるものとする[3]。Fig.1において、ヨー角速度 $\dot{\psi}$ 、車体すべり角 β を状態とし、前輪操舵角 δ を制御入力とすると自動車の運動方程式は次式で与えられる。

$$\dot{\beta} = \frac{a_{11}}{v} \beta + (-1 + \frac{a_{12}}{v^2}) \dot{\psi} + \frac{a_{13}}{v} \delta \quad (1)$$

$$\ddot{\psi} = a_{21} \beta + \frac{a_{22}}{v} \dot{\psi} + a_{23} \delta \quad (2)$$

ただし、 a_{ij} は定数係数であり、ここでは、各係数は以下のように与えられる。

$$a_{11} = -\frac{K_f + K_r}{m}, \quad a_{12} = \frac{-l_f K_f + l_r K_r}{m}, \quad (3)$$

$$a_{13} = \frac{K_f}{m}, \quad a_{21} = \frac{-l_f K_f + l_r K_r}{I}, \quad (4)$$

$$a_{22} = -\frac{l_f^2 K_f + l_r^2 K_r}{I}, \quad a_{23} = \frac{l_f K_f}{I} \quad (5)$$

ここで、 K_f, K_r は前後輪のコーナリングパワであり、タイヤ滑り角に比例したコーナリングフォースが発生する。

* 原稿受付 2016年2月24日

[†] 熊本大学 大学院 自然科学研究科 Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University; 2-39-1 Kurokami, Chuo-ku, Kumamoto city, Kumamoto

Key Words: robust control, feedback linearization, path following control.

l_f, l_r はそれぞれ重心から前輪、後輪までの距離、 m は車体重量、 I は慣性モーメントである。(1) 式、(2) 式の状態方程式は、タイヤの滑りと発生力の関係に基づいて導かれるものであり、車速 v を一定とすると線形時不変系として表される。さらに、制御対象の軌道が描く曲率 κ が次式で与えられる。

$$\kappa = \frac{a_{11}}{v(t)^2} \beta(t) + \frac{a_{12}}{v(t)^3} \dot{\psi}(t) + \frac{a_{13}}{v(t)^2} \delta(t) \quad (6)$$

κ は、入力 δ に関してアファインな構造となっている。また、(6) 式より、車速 v が大きいほど操舵角 $\delta(t)$ が $\kappa(t)$ に与える影響は小さくなり、旋回がより困難になるモデルである。

目標経路は、経路長さの関数として与えられるものとする [4]。経路長さ s に沿った曲率関数 $\kappa_r(s)$ および基準位置 s_0 における姿勢角 $\phi(s_0)$ 、位置 $x(s_0), y(s_0)$ が与えられるものとする。さらに、目標経路追従のための経路上の参照点を考える。参照点は、制御対象から一番近い目標経路上の点であり、参照点および自動車を結ぶ線と参照点での接線とが直交する。自動車が移動すると参照点もそれに伴って常に直交関係を保つよう移動する。各時刻の参照点位置は経路長さ s_r によって特徴付けられる。また、 z は自動車と参照点との符号付き距離であり、 θ は自動車速度ベクトルと参照点の接線との偏角を表しており、 $\theta = \beta + \psi - \phi(s_r)$ と与えられる。

以上より、参照点の運動は自動車の曲率 κ および速度 v を用いることで次の状態方程式に従う [4]。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{s}_r \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa v - \kappa_r \frac{v \cos \theta}{1 - \kappa_r z} \\ \frac{v \cos \theta}{1 - \kappa_r z} \\ v \sin \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

自動車の曲率 κ を適切に制御することによって $z=0, \forall t$ とできれば、車両が描く軌道は目標経路に厳密に一致する。

2.2 自動車のモデル化誤差

経路追従制御則のロバスト性を評価するために、本速報で扱うモデル化誤差の要因を示す。車体重量は搭乗者の有無や荷物によって変動し、その変動は 10 % 程度とする。 $m' = m + \Delta m, I' = I + \Delta I$ として変動を表記する。さらに、コーナリングパワについて考える。コーナリングパワ K_f, K_r は、走行路面および車重により $K'_f = K_f(1 - \alpha)m'/m, K'_r = K_r(1 - \alpha)m'/m$ と与えられるものとする。 $\alpha=0$ がモデルに対応しており、たとえば、晴天時には $\alpha=0$ 、雨天時には $\alpha=0.2$ が与えられるものとするれば雨天時にモデルと実対象の差が生じる。このとき、乗員が多いほどコーナリングパワが大きくなる。

これらの結果から、実対象の運動方程式は、 m, I, K_f, K_r の代わりに m', I', K'_f, K'_r を (3) 式～(5) 式に用いることで $a'_{11} \sim a'_{23}$ を求めることにより導出することができる。

3. 従来法による追従制御系の基本構成

もし、 $z=0$ を常に満足するように走行できれば、目標経路に沿った走行が期待できる。そこでここでは、次式を満足するための制御則について考える。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z = 0 \quad (8)$$

$s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0$ がフルビッツ多項式となるような係数 α_0, α_1 に対して次式

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \alpha_1 \frac{dz}{dt} + \alpha_0 z = 0 \quad (9)$$

が成立すれば (8) 式を満足する。ただし、 $d^2 z / dt^2$ は次式で表される。

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{d(v \sin \theta)}{dt} = v \cos \theta \left(\kappa v - \kappa_r \frac{v \cos \theta}{1 - \kappa_r z} \right) \quad (10)$$

よって、(6) 式、(9) 式、(10) 式より (8) 式を満足する操舵角入力 δ は次式で与えられる。

$$\delta = -\alpha_1 \frac{v \tan \theta}{a_{13}} - \alpha_0 \frac{z}{a_{13} \cos \theta} - \frac{a_{11} \beta}{a_{13}} - \frac{a_{12} \dot{\psi}}{a_{13} v} + \frac{\kappa_r v^2 \cos \theta}{a_{13} (1 - \kappa_r z)} \quad (11)$$

このとき、目標経路追従は (11) 式のフィードバックを行えば達成される。操舵角 δ の制御則は状態フィードバック則となっており、目標経路追従を行うためには、参照点との相対情報に相当する z, θ だけでなく、計測が難しいとされている車体すべり角 β やヨー角速度 $\dot{\psi}$ を計測する必要がある。

ここで、従来の制御則による経路追従シミュレーションを以下に示す。まず、目標経路を次式のように与える。

$$\kappa_r(s) = \begin{cases} 0, & 0 \leq s < 12 \\ 0.37(\cos(0.15s - 1.8) - 1), & 12 \leq s \leq 150 \end{cases}$$

初期位置、初期角度はそれぞれ $x(0)=0, y(0)=0, \phi(0)=0$ とする。ここで与えた目標経路は反時計まわりに角の丸い四角形の軌跡を描く 150[m] の経路である。ここでは車両の各係数は文献 [8] のものを用いた。

目標経路追従を行った結果を Fig. 2 に示す。制御対象の初期状態 $[\beta, \dot{\psi}, \theta, z] = [0, 0, 0, 3]$ とし、3[m] の初期偏差

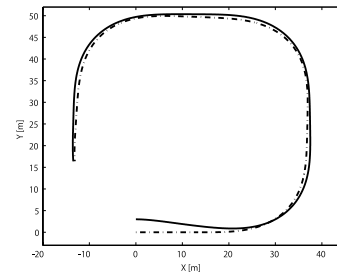


Fig. 2 Path following control by previous method

がある状態で目標経路追従を行っている。車速は一定値を与えてシミュレーションを行った。ここでは、誤差として $\alpha = 0.2$, $m'/m = 1.1$ を設定した。一点鎖線が目標経路、実線が (11) 式で操舵角 $\delta(t)$ を与えた自動車の経路である。目標経路に近い軌道を描いているものの誤差が大きいことが確認できる。

4. 提案するロバスト経路追従制御則

本節では、本速報で提案するロバスト経路追従制御則を示す。目標経路追従制御を実現することを考える。ここではまず、制御系の構成を Fig. 3 に示す。制御系は参照点における曲率を入力とした二つのフィードフォワード型の制御器と、一つのフィードバック制御器から構成されている。ここでは P の出力として、相対距離 z 、相対角度 θ 、参照点位置 s_r が計測可能なものとする。操舵入力 δ はフィードフォワード型入力 δ_{ff} と補償入力 δ_c との和で構成されている。その詳細は以下ようになる。ここでは、特に計算機上のモデルを用いて計算された値は添え字 M を用いて表している。

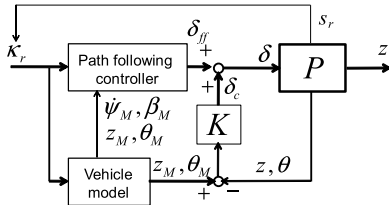


Fig. 3 Robust path following method

下側の制御器は、自動車のノミナルモデルに対して (11) 式の制御則を適用したものを表しており、 $z_M \rightarrow 0$ を満たすように設計されている。

$$\dot{\beta}_M = \frac{a_{11}}{v} \beta_M + (-1 + \frac{a_{12}}{v^2}) \dot{\psi}_M + \frac{a_{13}}{v} \delta_M \quad (12)$$

$$\ddot{\psi}_M = a_{21} \beta_M + \frac{a_{22}}{v} \dot{\psi}_M + a_{23} \delta_M \quad (13)$$

ただし、モデルの状態は β_M , $\dot{\psi}_M$, z_M , θ_M である。図中の [Vehicle model] に対して、モデルの状態量を用いて操舵角を以下のように与えるものとする。

$$\begin{aligned} \delta_M = & -\alpha_1 \frac{v \tan \theta_M}{a_{13}} - \alpha_0 \frac{z_M}{a_{13} \cos \theta_M} - \frac{a_{11} \beta_M}{a_{13}} \\ & - \frac{a_{12} \dot{\psi}_M}{a_{13} v} + \frac{\kappa_r v^2 \cos \theta_M}{a_{13} (1 - \kappa_r z_M)} \end{aligned} \quad (14)$$

このとき、[Vehicle model] の出力は z_M, θ_M とする。さらに、上側のフィードフォワード型入力下側のモデルの状態を利用することで $\delta_{ff} = \delta_M$ とする。さらに、フィードバック制御器では、モデル誤差に起因する $|z - z_M|$ を小さくしたいことから、 z に関する PD 型フィードバック制御器として δ_c を次式で与える。

$$\delta_c = \alpha_1 \left(\frac{v \tan \theta_M}{a_{13}} - \frac{v \tan \theta}{a_{13}} \right) + \alpha_0 \left(\frac{z_M}{a_{13} \cos \theta_M} - \frac{z}{a_{13} \cos \theta} \right) \quad (15)$$

この結果、操舵制御則 δ は (14) 式および (15) 式より $\delta = \delta_M + \delta_c$ と与えられる。制御則は z , θ , v , κ_r に関する非線形出力フィードバック則となっている。ここで、フィードバック部 K においては、偏差 $z - z_M$ および $\theta - \theta_M$ に関するフィードバックを行う。 K の設定に関する制約はなく、フィードバック部が安定となるような補償器 K さえ設定されればよい。また、入力 δ はすべり角 β 、ヨー角速度 $\dot{\psi}$ の計測値が必要ないことがわかる。

3. と同じシミュレーション条件での経路追従制御の結果を Fig. 4 に示す。目標経路との誤差がないことが確認でき、経路への追従特性に関するロバスト性が大幅に向上している。また、車体すべり角 β 、ヨー角速度 $\dot{\psi}$ のフィードバックなしで経路追従できているため、より実装しやすい経路追従手法である。

【謝辞】 本研究はスズキ財団の助成を受けたものである。

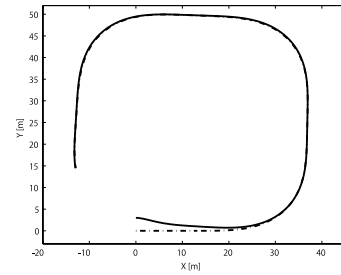


Fig. 4 Path following control by proposed method

参考文献

- [1] 三平：厳密な線形化とそのけん引車両の軌道制御への応用；計測と制御，Vol. 31, No. 8, pp. 851–858 (1992)
- [2] 小山，関口，野中：走行距離を時間軸とする時間軸状態制御形による車両の経路追従制御 - モデル予測車庫入れ制御への適用 -；計測自動制御学会論文集，Vol. 50, No. 10, pp. 746–754 (2014)
- [3] 安部：自動車の運動と制御，山海堂 (1992)
- [4] 岡島，浅井，川路：経路追従問題における最適速度制御；計測自動制御学会論文集，Vol. 44, No. 7, pp. 566–574 (2008)
- [5] H. Okajima, H. Umei, N. Matsunaga and T. Asai: A design method of compensator to minimize model error; *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 6, No. 4, pp. 267–275 (2013)
- [6] 梅井，岡島，松永，浅井：モデル誤差抑制補償器の多入出力システムに対する設計；システム制御情報学会論文誌，Vol. 27, No. 2, pp. 67–72 (2014)
- [7] 岡島，西村，松永：モデル誤差抑制補償に基づく非線形システムのフィードバック線形化；計測自動制御学会論文集，Vol. 50, No. 12, pp. 869–874 (2014)
- [8] 金井，越智，川邊：ビークル制御，槇書店 (2003)