

確定外乱を考慮したモデル追従型非線形予測制御と その車両運動制御への応用*

堀内 伸一郎^{*1}, 岡田 一行^{*2}, 納富 信也^{*3}

Model Following Nonlinear Predictive Control Considering Deterministic Disturbance and its Application to Vehicle Control

Shinichiro HORIUCHI^{*4}, Kazuyuki OKADA and Shinya NOHTOMI

^{*4} Department of Mechanical Engineering, College of Science and Technology, Nihon University,
1-8 Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo, 101 8308 Japan

The nonlinear Predictive Control theory proposed by Lu is extended to provide a framework of model following control and to take into account the effects of deterministic disturbances. The response of nonlinear, continuous system at one-step ahead is predicted by series expansion of the state equation. Control inputs are determined by continuous minimization of predicted tracking errors. The proposed approach is applied to the rear-wheel steering control of motor vehicles. The effectiveness of this control method is examined through a series of computer simulations.

Key Words: Nonlinear Control, Predictive Control, Deterministic Disturbance, Vehicle Control

1. はじめに

近年, 非線形システムに対する有力な制御法としてモデル予測制御が注目を集めている⁽¹⁾. 一般に, モデル予測制御は以下の手順で実行される.

- 1) 制御対象のモデルを用いて, 現在時刻以降の入力に対する有限時間先までの応答を予測する
- 2) 制御対象の将来の挙動を適当な評価関数によって評価する
- 3) 評価関数の最小化条件から, 現在以降の制御入力を決定する
- 4) 各時刻において, 上記の操作を繰り返す

このようなモデル予測制御は線形・非線形を問わず適応可能であるが, 有限ステップ先までの予測値を用いて評価関数を計算するため, 非線形システムに対してはその計算量が膨大となる.

Lu⁽²⁾によって提案された非線形予測制御は, 予測を1ステップに限定することで計算量の問題を回避している. この方法は, 1) 制御系の構成が簡単である, 2) 制御対象に特別の条件を必要としない, 3) ロバスト性に優れる, 4) 入力の飽和を取り扱うことができる, などの特徴をもつ. この非線形予測制御では, あらかじめオフラインで計算された規範トラジェクトリが既知

であるとの仮定の下に, 制御対象の状態量がこの規範トラジェクトリに追従するように設計される. しかし, 実際的な問題を考えると, 規範トラジェクトリが全時間にわたって与えられることは少なく, 任意に変化する目標トラジェクトリに追従するように制御系を構成することが望ましい. また, Luの非線形制御では外乱の影響は考慮されていないが, もし外乱が確定的で観測可能であれば, これをフィードフォワード的に用いることにより制御性能の向上が期待できる.

そこで本研究では, 以下の2点に関してLuの非線形予測制御を拡張する.

- 1) 観測可能な確定外乱の影響を考慮
- 2) モデル追従型制御系としての定式化

1)により, 入力の一部を観測可能な確定外乱と見なし, 制御可能な入力に対するフィードバック制御系を設計できる. また, 2)によって, 制御対象の状態量を設計者が任意に指定した規範モデルの応答に追従させるような非線形制御系が実現できる.

このように拡張された非線形予測制御の有効性を検討するため, 提案する方法を車両の後輪操舵制御系設計に応用する. この設計においては, まずドライバのハンドル操作・ブレーキ操作に対し, 理想的な前後速度応答, ヨーレイト応答, 横すべり応答を表す規範モデルを設定する. 次に, 車両の応答がこの規範モデルの出力に追従するように後輪の操舵制御系を構成する. このとき, ドライバによる前輪操舵とブレーキ入力に

* 原稿受付 2004年1月19日.

^{*1} 正員, 日本大学理工学部機械工学科(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8).

^{*2} 正員, 本田技術研究所栃木研究所(〒321-3393 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢4630).

^{*3} 本田技術研究所栃木研究所.

E-mail: horiuchi@mech.cst.nihon-u.ac.jp

よる各輪へのトルクは、後輪操舵制御系に対する確定的な外乱と見なすことができ、これらの影響を考慮して制御系を設計する。線形化された車両モデルに基づいて設計された後輪操舵系と、提案する方法によって設計した非線形後輪操舵系との比較から、提案する非線形制御の有効性を検証する。

2. モデル追従型非線形予測制御

2.1 確定外乱を含む非線形プラントの記述 非線形プラントはつぎのような状態方程式で記述されるものと仮定する。

$$\dot{x}_1 = f_1(x) \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x) + B_1(x)u_1 + B_2(x)u_2 \quad (2)$$

ここで、 $x_1 \in R^{n_1}$ 、 $x_2 \in R^{n_2}$ 、 $n_1 + n_2 = n$ で、 $x = [x_1^T \ x_2^T]^T$ はプラントの状態変数、 $u_1 \in R^{m_1}$ はコントローラによって決定される入力、 $u_2 \in R^{m_2}$ は既知の確定外乱である。また、 f_1 は2階導関数が、 f_2 は1階導関数が存在するものと仮定する。

2.2 規範モデル 非線形プラントの状態変数が追従すべき規範トラジェクトリ s は、次のような線形規範モデルの出力として与えられるものとする。

$$\dot{s} = A_m s + B_m r \quad (3)$$

ここで、 r は規範入力である。 s を x に対応させ

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}, \quad s_1 \in R^{n_1}, \quad s_2 \in R^{n_2} \quad (4)$$

のように分割する。

制御系設計の目的は、任意の初期状態 $x(0)$ に対して、状態変数 $x(t)$ が規範トラジェクトリ $s(t)$ に追従するようなフィードバック制御則 $u_1 = g(x, s, r, u_2)$ を求めることである。

2.3 制御系設計 任意の時刻 t において、状態量 $x(t)$ は既知であるとする。このとき、時刻 $t + \tau$ における状態トラッキング誤差 e_1 、 e_2 を考える。

$$e_1(t + \tau) = x_1(t + \tau) - s_1(t + \tau) \quad (5)$$

$$e_2(t + \tau) = x_2(t + \tau) - s_2(t + \tau) \quad (6)$$

x を s に追従させるためには、つぎのような評価関数 J を最小にするような制御入力を求めればよい。

$$J = \frac{1}{2} e_1^T(t + \tau) Q_1 e_1(t + \tau) + \frac{1}{2} e_2^T(t + \tau) Q_2 e_2(t + \tau) + \frac{1}{2} u_1^T(t) R u_1(t) \quad (7)$$

ここで、 Q_1 、 Q_2 、 R は適当な次元をもつ半正定マトリクスである。

時刻 $t + \tau$ における状態量 $x_1(t + \tau)$ は、テイラー展開によりつぎのように近似できる。

$$x_1(t + \tau) \approx x_1(t) + \tau f_1\{x(t)\} + \frac{\tau^2}{2} \left[F_{11}(t) f_1\{x(t)\} + F_{12}(t) [f_2\{x(t)\} + B_1\{x(t)\} u_1(t) + B_2\{x(t)\} u_2(t)] \right] \quad (8)$$

ここで、

$$F_{11}(t) = \frac{\partial f_1\{x(t)\}}{\partial x_1(t)}, \quad F_{12}(t) = \frac{\partial f_1\{x(t)\}}{\partial x_2(t)} \quad (9)$$

である。同様に $x_2(t + \tau)$ も展開すると

$$x_2(t + \tau) \approx x_2(t) + \tau \dot{x}_2(t) = x_2(t) + \tau [f_2\{x(t)\} + B_1\{x(t)\} u_1(t) + B_2\{x(t)\} u_2(t)] \quad (10)$$

となる。また、時刻 $t + \tau$ における規範トラジェクトリもつぎのように展開できる。

$$s_1(t + \tau) \approx s_1(t) + \tau \dot{s}_1(t) + \frac{\tau^2}{2} \ddot{s}_1(t) \quad (11)$$

$$s_2(t + \tau) \approx s_2(t) + \tau \dot{s}_2(t) \quad (12)$$

これらの予測値を式 (5)、(6) に代入して整理するとつぎようになる。

$$e_1(t + \tau) = P_1(t) + \frac{\tau^2}{2} G_1(t) u_1(t) \quad (13)$$

$$e_2(t + \tau) = P_2(t) + \tau B_1(t) u_1(t) \quad (14)$$

ここで

$$P_1(t) = e_1(t) + \tau \dot{e}_1(t) + \frac{\tau^2}{2} \left[F_{11}(t) f_1(t) + F_{12}(t) [f_2(t) + B_2(t) u_2(t)] - \ddot{s}_1(t) \right] \quad (15)$$

$$P_2(t) = e_2(t) + \tau [f_2(t) + B_2(t) u_2 - \dot{s}_2(t)] \quad (16)$$

$$G_1(t) = F_{12}(t) B_1(t) \quad (17)$$

である。

最適性の条件は

$$\frac{\partial J}{\partial u_1(t)} = \left[\frac{\partial e_1(t + \tau)}{\partial u_1(t)} \right]^T \frac{\partial J}{\partial e_1(t + \tau)} + \left[\frac{\partial e_2(t + \tau)}{\partial u_1(t)} \right]^T \frac{\partial J}{\partial e_2(t + \tau)} + R u_1(t) = 0 \quad (18)$$

となる。ここで、

$$\frac{\partial e_1(t + \tau)}{\partial u_1(t)} = \frac{\tau^2}{2} G_1(t) \quad (19)$$

$$\frac{\partial e_2(t + \tau)}{\partial u_1(t)} = \tau B_1\{x(t)\} \quad (20)$$

であり,

$$\begin{aligned}\frac{\partial J}{\partial e_1(t+\tau)} &= Q_1 e_1(t+\tau) \\ &= Q_1 \left[P_1(t) + \frac{\tau^2}{2} G_1(t) u_1(t) \right] \quad (21)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial J}{\partial e_2(t+\tau)} &= Q_2 e_2(t+\tau) \\ &= Q_2 [P_2(t) + \tau B_1 \{x(t)\} u_1(t)] \quad (22)\end{aligned}$$

となるから、最適性の条件はつぎのように書ける。

$$\begin{aligned}\frac{\tau^2}{2} G_1^T(t) Q_1 \left[P_1(t) + \frac{\tau^2}{2} G_1(t) u_1(t) \right] \\ + \tau B_1^T \{x(t)\} Q_2 [P_2(t) + \tau B_1 \{x(t)\} u_1(t)] \\ + R u_1(t) = 0 \quad (23)\end{aligned}$$

$u_1(t)$ についてまとめると

$$\begin{aligned}\left[\frac{\tau^4}{4} G_1^T(t) Q_1 G_1(t) + \tau^2 B_1^T \{x(t)\} Q_2 B_1 \{x(t)\} + R \right] u_1(t) \\ = -\frac{\tau^2}{2} G_1^T(t) Q_1 P_1(t) - \tau B_1^T \{x(t)\} Q_2 P_2(t) \quad (24)\end{aligned}$$

となる。ここで

$$W(t) = \frac{\tau^4}{4} G_1^T(t) Q_1 G_1(t) + \tau^2 B_1^T \{x(t)\} Q_2 B_1 \{x(t)\} + R \quad (25)$$

とおくと、最適制御入力 $u_1(t)$ はつぎようになる。

$$u_1(t) = -W^{-1} \left[\frac{\tau^2}{2} G_1^T(t) Q_1 P_1(t) + \tau B_1^T \{x(t)\} Q_2 P_2(t) \right] \quad (26)$$

この制御系では $P_1(t)$, $P_2(t)$ の中で、観測可能な外乱 $u_2(t)$ の影響および規範モデルから得られる規範トラジェクトリ s_1 , s_2 が考慮されている。

x_1 の s_1 への追従を考えない場合、 $Q_1 = 0$ となり、 $W(t)$, $u_1(t)$ は

$$W(t) = \tau^2 B_1^T \{x(t)\} Q_2 B_1 \{x(t)\} + R \quad (27)$$

$$u_1(t) = -W^{-1} [\tau B_1^T \{x(t)\} Q_2 P_2(t)] \quad (28)$$

となる。また、 x_2 の s_2 への追従を考えない場合、 $Q_2 = 0$ となり、 $W(t)$, $u_1(t)$ は

$$W(t) = \frac{\tau^4}{4} G_1^T(t) Q_1 G_1(t) + R \quad (29)$$

$$u_1(t) = -W^{-1} \left[\frac{\tau^2}{2} G_1^T(t) Q_1 P_1(t) \right] \quad (30)$$

となる。

この制御系の漸近的トラッキング性能、モデル化誤差に対するロバスト性などは文献⁽²⁾と同様に証明できる。また、このコントローラが実現可能であるために

は、 \dot{s}_1 , \dot{s}_2 に r の微分を含まないように規範モデルを設定する必要がある。すなわち、 x_1 に対する規範モデルは 2 次以上、 x_2 に対する規範モデルは 1 次以上でなければならない。制御系の構成は図 1 のようになる。

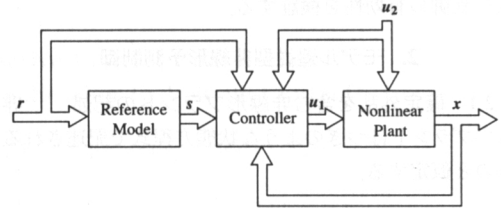


Fig. 1 Structure of the control system

3. 車両運動制御への応用

前節で提案したモデル追従型非線形制御系を車両の後輪操舵制御に適用し、その有効性を検討する。

3.1 非線形車両モデル 制御系設計におけるノミナル車両モデルとして、図 2 のように前後、横、ヨーの平面 3 自由度とタイヤ回転 4 自由度を考慮した 7 自由度モデルを用いる。

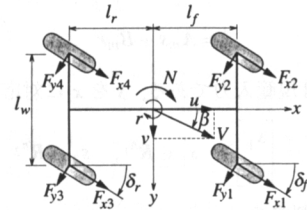


Fig. 2 Vehicle model

基本的な運動方程式はつぎようになる。

$$\text{前後: } m(\dot{u} - vr) = F_x \quad (31)$$

$$\text{横: } m(\dot{v} + ur) = F_y \quad (32)$$

$$\text{ヨー: } I_z \dot{r} = N \quad (33)$$

$$\text{タイヤ回転: } I_w \dot{\omega}_i = -R_i F_{xi} + T_i \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (34)$$

ピッチ、ロール運動は考えていないが、これらに伴うタイヤ鉛直荷重の移動は、前後加速度、横加速度の関数として静的に考慮している。また、前後輪の操舵系ダイナミクスを 1 次系で考慮している。

タイヤモデルとして簡単化した Dugoff のモデル⁽³⁾を用いる。このモデルでは前後力 F_{xi} 、横力 F_{yi} を、各タイヤの横すべり角 β_i 、スリップ率 s_i 、鉛直荷重 F_{zi} 、摩擦係数 μ_i の関数として次のように計算する。

$$F_{xi} = f_i C_{xi} s_i \quad (35)$$

$$F_{yi} = f_i C_{yi} \beta_i \quad (36)$$

ここで

$$f_i = \begin{cases} 1 & , F_{Ri} \leq \frac{\mu_i F_{zi}}{2} \\ \left(2 - \frac{\mu_i F_{zi}}{2F_{Ri}}\right) \frac{\mu_i F_{zi}}{2F_{Ri}} & , F_{Ri} > \frac{\mu_i F_{zi}}{2} \end{cases} \quad (37)$$

$$F_{Ri} = \sqrt{(C_{xi} s_i)^2 + (C_{yi} \beta_i)^2} \quad (38)$$

である。このタイヤモデルの特性を図3に示す。このモデルは、タイヤが発生できる力の1/2までは前後力、横力とも線形、これを超える範囲では非線形特性を示す。

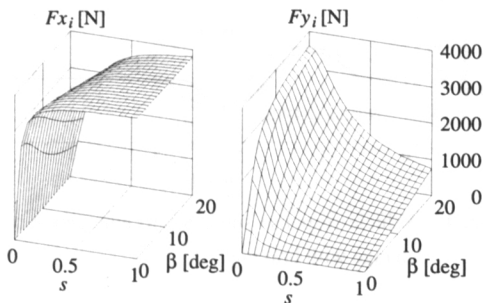


Fig. 3 Tire model

3.2 制御系設計 上記の車両モデルに対する入力、前輪舵角コマンド u_f 、後輪舵角コマンド u_r 、および各タイヤに働くトルク T_i である。ここでは、後輪操舵制御のためのコントローラを提案する方法によって設計する。このとき、前輪舵角と各タイヤに働くトルクはコントローラによって計算される入力とは別の既知外乱とみなすことができる。したがって、式(2)の u_1, u_2 は次のようにとることができる。

$$u_1 = [u_r]^T, \quad u_2 = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ u_f]^T \quad (39)$$

また、 x_1, x_2 は

$$x_1 = [u \ v \ r]^T, \quad x_2 = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4 \ \delta_f]^T \quad (40)$$

となる。このとき、 $f_1(x), f_2(x)$ は次のようになる。

$$f_1(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} F_x(x) + vr \\ \frac{1}{m} F_y(x) - ur \\ \frac{1}{I_z} N(x) \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$f_2(x) = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{I_w} F_{x1}(x_1, \omega_1, \delta_f) \\ -\frac{R_f}{I_w} F_{x2}(x_1, \omega_2, \delta_f) \\ -\frac{R_f}{I_w} F_{x3}(x_1, \omega_3, \delta_f) \\ -\frac{R_f}{I_w} F_{x4}(x_1, \omega_4, \delta_f) \\ -\frac{1}{T_f} \delta_f \\ -\frac{1}{T_r} \delta_r \end{bmatrix} \quad (42)$$

B_1, B_2 は

$$B_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1/T_r]^T \quad (43)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1/I_w & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/I_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/I_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/T_f \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$

となる。ここで、 T_f, T_r は前後輪の操舵系ダイナミクスの時定数である。

規範モデルに対する入力 r はドライバによるハンドル舵角 δ_{sw} とブレーキコマンド δ_b とする。したがって

$$r = [\delta_{sw} \ \delta_b]^T \quad (45)$$

となる。制御の目的は前後速度、横速度、ヨーレイトを目標値に近づけるように後輪を操舵することである。したがって、 x_1 のみを制御することになり、規範トラジェクトリは x_1 に対する s_1 のみが必要となる。この規範トラジェクトリを

$$s_1 = [u_m \ v_m \ r_m]^T \quad (46)$$

のようにおく。

次に具体的な規範モデルを設定する。まず、前後速度については、ドライバのブレーキコマンドに対して前後加速度が比例するのが望ましいと考えられる。したがって、前後速度に関する規範モデルは1階積分系となるが、前述のように s_1 は2次微分をとることが必要であるため、

$$\frac{u_m}{\delta_b} = \frac{1}{s(T_b s + 1)} \quad (47)$$

のように設定した。ここで、 T_b は前後速度の規範モデルを2次系とするためにつけ加えた1次系の時定数であり、小さな値に設定する。

横速度については、車体横すべり角が常にゼロであることが望ましいと考え、次式のようにおく。

$$v_m = 0 \quad (48)$$

ヨーレイトに関しては、ハンドル舵角に対して1次遅れが望ましいと考えられる⁽⁴⁾。そのゲインは速度によって変化するので

$$\frac{r_m}{\delta_{sw}} = \frac{k_r}{(T_r s + 1)(T_d s + 1)} \bar{u} \quad (49)$$

とする。ここで、 T_d は規範モデルを2次系とするためにつけ加えた1次系の時定数、 \bar{u} は速度によって変化するゲイン

$$\bar{u} = \frac{u}{l(1 + Au^2)} GR \quad (50)$$

である。 l はホイールベース、 A はスタビリティファクタ、 GR はステアリングギア比である。

以上の規範モデルを状態方程式で表すと次のようになる。

$$\dot{x}_{m1} = x_{m2} \quad (51)$$

$$\dot{x}_{m2} = (-x_{m2} + \delta_b)/T_b \quad (52)$$

$$\dot{x}_{m3} = x_{m4} \quad (53)$$

$$\dot{x}_{m4} = \{-x_{m3} + (T_r + T_d)x_{m4} + \bar{u}\delta_{sw}\}/T_r T_d \quad (54)$$

4. シミュレーション

4.1 7自由度モデルによるシミュレーション 制御系設計に用いたノミナルモデルによるシミュレーションを行い、提案する制御系の性能を検討する。比較のため、ヨーレイトフィードバック後輪操舵制御系⁽⁵⁾

$$\delta_r = K_\delta \delta_f + K_r r \quad (55)$$

を用いた場合についても検討する。ここで、ゲイン K_δ 、 K_r は車両の線形2自由度モデルに基づき、車体横すべり角が常にゼロとなる条件から決定される。この制御系では操舵角に対するヨーレイトゲインが低下するので、定常ヨーレイトが通常の前輪操舵車と等しくなるようにステアリングギア比を調整している。

シミュレーションではブレーキング時の緊急レーンチェンジを想定し、初速30m/sから0.4Gに相当するブレーキをかけ、その0.5秒後に振幅50°で正弦波状に操舵を行うという条件としている。前輪と後輪のブレーキ力配分は7:3、路面の摩擦係数は0.8である。

結果を図4に示す。線形モデルに基づいて設計した4WS(Linear 4WSと表示)は、横すべり角、ヨーレイトとも規範モデルから大きく外れている。また、後輪舵角も線形4WSのほうが大きくなっている。これに対し、

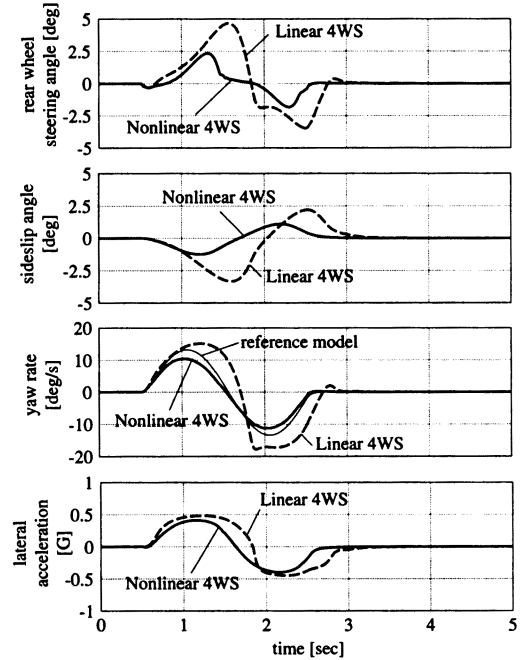


Fig. 4 Vehicle response subjected to emergency lane change with braking

本論で提案する非線形制御系を用いた4WS(Nonlinear 4WSと表示)は、小さい後輪舵角にもかかわらず、横すべり、ヨーレイト規範モデルへの追従性能がよいことがわかる。

さらに各タイヤが発生している力を比較するため、次式によって計算されるタイヤワークロード η_i を求めた。この値が小さいほど、タイヤ力の飽和に対して余裕が残っていることを示す。

$$\eta_i = \frac{\sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2}}{\mu F_{zi}} \quad (56)$$

図5は線形4WSと提案する制御系を用いた非線形4WSのタイヤワークロードを比較したものである。この図から、非線形4WSのほうがタイヤワークロードの最大値が小さくなっていることがわかる。このことは、非線形4WSがタイヤの発生する力を有効に利用し、タイヤ力に余裕を残しつつ規範モデルへの追従性を向上させていることを意味する。

4.2 18自由度モデルを用いたシミュレーション 制御系設計に用いた7自由度車両モデルとは異なる複雑な車両モデルを用いたシミュレーションにより、本制御系のモデル化誤差に対するロバスト性を示す。シミュレーションに用いた車両モデルはバネ上6自由

5. 結 論

本論文では、従来提案されている非線形予測制御を拡張し、確定外乱の影響を考慮できるモデル追従型に定式化した。提案する手法を車両の後輪操舵制御系設計に適用し、シミュレーションによってその有効性を検討した。その結果は以下のようにまとめられる。

1. 提案する制御系設計法によって、制御入力の一部が指定された場合でも、その入力を確定外乱と見なすことにより、容易にモデル追従型のフィードバック制御系が構成できる。
2. 提案する設計法を車両運動制御系の設計に適用し、前輪舵角とタイヤ制動トルクを確定外乱と見なすことにより、非線形後輪操舵系を設計した。これにより、提案する手法の有用性を示した。
3. 制御系設計時に使用したノミナルモデルと異なる18自由度車両モデルによるシミュレーションの結果、提案する制御系はモデル化誤差に対するロバスト性を有していることが明らかとなった。提案する制御系は、操舵/制動の統合制御⁽⁷⁾、四輪トルク制御、四輪操舵など種々のシャシー制御系を、制御入力と外乱の組み合わせを変えることによって同一の枠組みで取り扱うことができる。今後この特徴を生かし、従来提案されている各種シャシー制御系の性能比較を統一的な見地から行うことを計画している。

文 献

- (1) 大嶋正裕, 関 宏也, モデル予測制御-V-非線形モデル予測制御, システム/制御/情報, Vol. 47, No. 1, (2003), 52-57.
- (2) Lu, P., *Nonlinear Predictive Controlles for Continuous Systems*, Jour. of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 17, No. 3, (1994), 553-560.
- (3) Dugoff, H., Fancher, P. and Segel, L. *An Analysis of Tire Traction Properties and Their Influence on Vehicle Dynamics*, SAE paper 700377, (1970).
- (4) Weir, D. L. and DiMarco, R. D., *Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data*, SAE paper 780010, (1978).
- (5) Yamamoto, M., Harada, H. and Matsuo, Y., *A Study on Active Controlled Chassis System for Vehicle Dynamics*, Vehicle System Dynamics, Vol. 18, suppl., (1989), 603-615.
- (6) CarSimEd User Reference Manual, Mechanical Simulation Corp., (1997).
- (7) Horiuchi, S., Okada, K. and Nohtomi, S., *Integrated Control of Four Wheel Steering and Wheel Torques Using Nonlinear Predictive Controller*, Proc. of International Symposium on Advanced Vehicle Control, Nagoya, (1998), 111-116.

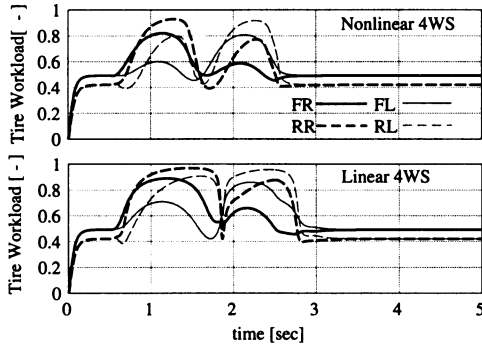


Fig. 5 Comparison of tire workload

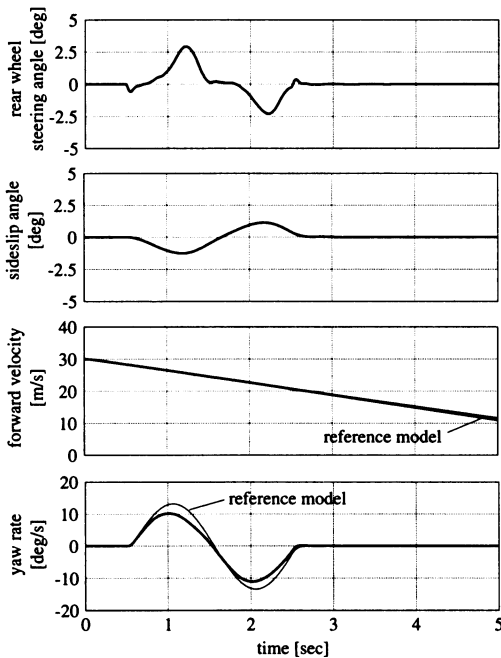


Fig. 6 Simulation results of 18DOF vehicle model

度、タイヤの上下運動4自由度、タイヤ回転4自由度、タイヤ横力遅れ4自由度の18自由度モデル⁽⁶⁾である。

シミュレーション結果を図6に示す。規範モデルへの追従は良好であり、制御系設計時のモデルとは異なる車両に対しても効果的な制御が行われていることがわかる。また、このシミュレーションでは、評価関数の重み Q, R は7自由度ノミナルモデルの場合と等しくとっている。以上の結果は、提案する制御系がモデル化誤差に対するロバスト性を有していることを示している。