

二輪車の過渡特性を考慮した車線追従制御

日大生産工(院) ○大明 洋輝 日大生産工 丸茂 喜高

1 まえがき

二輪車の操縦では、逆操舵と呼ばれる特殊な操作や、走行中に直立安定を確保する必要があるため、一般的に運転操作が難しいと言われている¹⁾。複雑な操縦系を持つ二輪車に対して、ステアバイワイヤ技術を用いた操舵制御を行うことにより、逆操舵や直立安定のための操作を除去し、誰もが簡単に操縦可能なコモータとして活用できる可能性が示された²⁾。

そこでの検討では、ライダーが指令値である目標ロール角を入力した際の過渡特性を考慮せず、ステアバイワイヤの制御系を構成していたため、旋回のきっかけとなる逆操舵がフィードバック制御により実現されることとなり、速応性に課題を抱えていた。この課題を解決するために、任意で設定した目標値と出力を一致させるモデルマッチング制御 (MMC: Model Matching Control) を適用し、目標ロール角に対する実ロール角の追従性を向上させることで速応性が改善した³⁾。

このように、ステアバイワイヤにより二輪車の操縦安定性を改善できるが、事故を防止するうえでは、ライダーのエラーをカバーする運転支援システムも重要であり、二輪車に車線追従制御を適用することが検討されている⁴⁾。ここでは、目標車線からの横偏差が最小となるようにフィードバックを行う制御系を構成していたが、MMCを適用し、フィードフォワード制御を追加することで横変位の過渡特性を改善できると考えられる。

そこで本研究では、二輪車の車線追従制御において、過渡特性を改善するためにMMCを適用し、シミュレーションによりその制御効果について検討を行う。

2 実験方法および測定方法

本研究では、Sharp⁵⁾により定式化された運動方程式を基本としたモデル⁶⁾を用いる。車両モデルを図1に示す。この図では、座標系をメインフレームの路面の投影点を基準として、右手下向きの直交座標系としている。ここでは

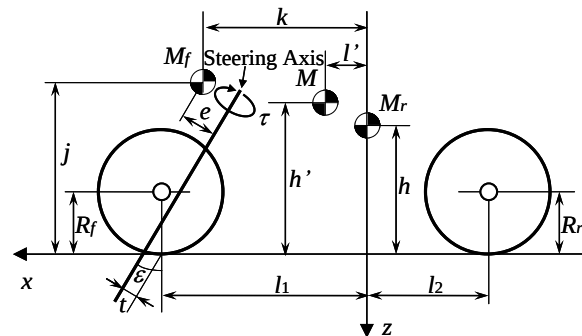


Fig.1 Mathematical model
(four-degree-of-freedom model)

簡略化した方程式のみを示す。

・横運動の運動方程式

$$B_{11}\ddot{y}_1 + B_{12}\ddot{\psi} + B_{13}\ddot{\phi} + B_{14}\ddot{\delta} + A_{11}\dot{y}_1 + A_{12}\dot{\psi} + A_{17}Y_f + A_{18}Y_r = 0 \quad (1)$$

・ヨー運動の運動方程式

$$B_{21}\ddot{y}_1 + B_{22}\ddot{\psi} + B_{23}\ddot{\phi} + B_{24}\ddot{\delta} + A_{21}\dot{y}_1 + A_{22}\dot{\psi} + A_{23}\dot{\phi} + A_{24}\dot{\delta} + A_{27}Y_f + A_{28}Y_r + A_{29}T_{zf} + A_{2a}T_{zr} = -\tau \cos \varepsilon \quad (2)$$

・ロール運動の運動方程式

$$B_{31}\ddot{y}_1 + B_{32}\ddot{\psi} + B_{33}\ddot{\phi} + B_{34}\ddot{\delta} + A_{31}\dot{y}_1 + A_{32}\dot{\psi} + A_{34}\dot{\delta} + A_{35}\phi + A_{36}\delta + A_{3b}T_{xf} + A_{3c}T_{xr} = -\tau \sin \varepsilon \quad (3)$$

・操舵系の運動方程式

$$B_{41}\ddot{y}_1 + B_{42}\ddot{\psi} + B_{43}\ddot{\phi} + B_{44}\ddot{\delta} + A_{42}\dot{\psi} + A_{43}\dot{\phi} + A_{44}\dot{\delta} + A_{45}\phi + A_{46}\delta + A_{47}Y_f + A_{49}T_{zf} + A_{4b}T_{xf} = \tau \quad (4)$$

ここで、 $A_{11} \sim B_{44}$ は車両諸元に依存した係数であり、本研究に用いた諸元は、排気量250ccの中型車のもので、参考文献⁶⁾に記載されている。

3 制御系設計

二輪車の車線追従制御では操舵トルク τ により、ライダーから入力される目標車線の横変位 y^* への車線追従を行う。また、ライダーからの入力が無い場合には、二輪車が直進するように作用し、車線維持を実現する。

制御系を設計するにあたり、(1)～(4)式で示した運動方程式から以下のような状態方程式を導出する。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (5)$$

ただし、 $\mathbf{x} = [\dot{y}_0 \ \dot{\psi} \ \dot{\phi} \ \dot{\delta} \ y_0 \ \psi \ \phi \ \delta]^T$ ， $\mathbf{u} = \tau$ ，

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & 0 & a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & a_{26} & a_{27} & a_{28} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} & a_{37} & a_{38} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & a_{46} & a_{47} & a_{48} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ここで、 $a_{11} \sim b_{41}$ は運動方程式から導出される係数である。 y_0 はメインフレーム重心点の横変位、 ψ はヨー角、 ϕ はロール角、 δ は操舵角であり、制御入力 $\mathbf{u}$ は操舵トルク入力 τ である。

3.1 モデルマッチング制御

MMCを用いて車線追従制御の制御系を設計する。

フィードフォワード制御では、操舵トルク τ_{ff} により、実際の横変位を任意の規範横変位 y_{0ref} と一致させる。操舵トルクから横変位までの伝達関数を以下のように表せるものとする。

$$y_0(s) = G_{y_0}(s)\tau(s) \quad (6)$$

目標車線の横変位から規範横変位までの規範モデルの伝達関数を $G_r(s)$ とし、 $G_r(s)$ と $G_{y_0}(s)$ の逆モデルを用いることで、 $\tau_{ff}(s)$ は以下のように表される。

$$\tau_{ff}(s) = G_r(s)G_{y_0}^{-1}(s)y^*(s) \quad (7)$$

$G_{y_0}(s)$ の極と零点の配置を図2に示す。×印が伝達関数の極を表し、○印が零点を表している。 $G_{y_0}(s)$ では、実部が負の零点である不安定零点 z_{y_0} があり、 $G_{y_0}^{-1}(s)$ では不安定極を持つこととなる。そのため、安定な制御系を構成するためには規範モデルの伝達関数の分子部に不安定零点を追加し、それらを極零相殺する必要がある。また、 $G_{y_0}(s)$ は、極の数が8点（原点付近には3点の極が存在する）、零点の数が6点の相

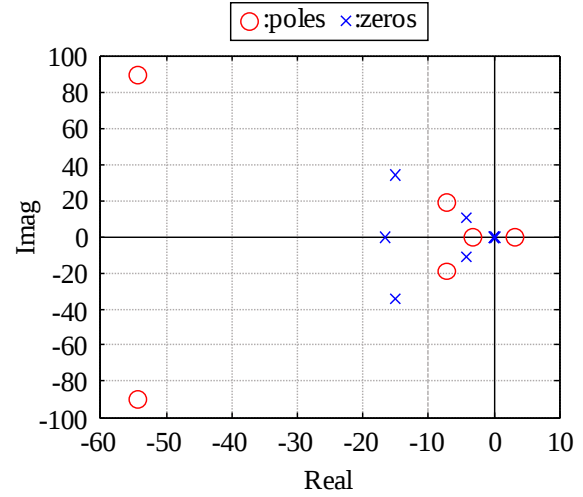


Fig.2 Pole placement of lateral displacement

対次数が2次の伝達関数であり、 $G_r(s)$ の相対次数が2次以上でない $y^*(s)$ から τ_{ff} までの伝達関数が非プロパーとなる。そのため、 $G_r(s)$ は一次遅れ系と二次遅れ系を組み合わせ以下のように定めた。

$$G_r(s) = \frac{k\omega_n^2(s - z_y)}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)(Ts + 1)} \quad (8)$$

ただし、 T は時定数、 ζ は減衰比、 ω_n は固有角周波数であり、 k は横変位の定常値を一致させるためのゲインである。

フィードフォワード制御により実際の横変位を規範横変位に一致させることができるが、パラメータ変動や、走行中に外乱等が加わった際の安定性を補償するために、フィードバック制御も加えた二自由度制御系を設計する。

本研究では、フィードバック制御に状態フィードバックをベースとする最適制御理論を用いる。操舵トルクから、ヨー角、ロール角、操舵角への伝達関数を以下のように表せるものとする。

$$\psi(s) = G_\psi(s)\tau(s) \quad (9)$$

$$\phi(s) = G_\phi(s)\tau(s) \quad (10)$$

$$\delta(s) = G_\delta(s)\tau(s) \quad (11)$$

$G_{y_0}(s)$ と(9)～(11)式の伝達関数を用いることで、規範ロール角に対応する各状態変数は以下のように表せる。

$$\dot{y}_{0ref}(s) = G_{y_0}(s)G_y^{-1}(s)y_{0ref}(s) \quad (12)$$

$$\dot{\psi}_{ref}(s) = G_\psi(s)G_y^{-1}(s)y_{0ref}(s) \quad (13)$$

$$\dot{\phi}_{ref}(s) = G_\phi(s)G_y^{-1}(s)y_{0ref}(s) \quad (14)$$

$$\dot{\delta}_{ref}(s) = G_\delta(s)G_y^{-1}(s)y_{0ref}(s) \quad (15)$$

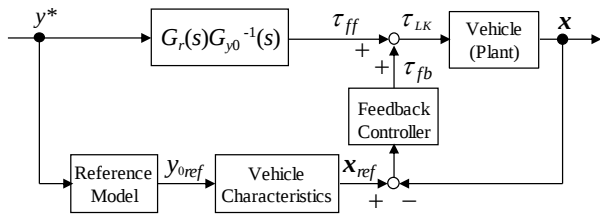


Fig.3 Block diagram of Lane tracking control with MMC

$$\psi_{ref}(s) = G_{\psi}(s)G_y^{-1}(s)y_{0ref}(s) \quad (16)$$

$$\phi_{ref}(s) = G_{\phi}(s)G_y^{-1}(s)y_{0ref}(s) \quad (17)$$

$$\delta_{ref}(s) = G_{\delta}(s)G_y^{-1}(s)y_{0ref}(s) \quad (18)$$

これらを、規範横変位に対する状態変数として以下のようにまとめる。

$$\mathbf{x}_{ref} = [\dot{y}_{0ref} \quad \dot{\psi}_{ref} \quad \dot{\phi}_{ref} \quad \dot{\delta}_{ref} \quad y_{0ref} \quad \psi_{ref} \quad \phi_{ref} \quad \delta_{ref}]^T \quad (19)$$

実際の状態変数 $\mathbf{x}$ と $\mathbf{x}_{ref}$ の偏差から、最適レギュレータを構成する。(5)式のシステムに対して、次に示す評価関数が最小となるようなフィードバックゲイン $\mathbf{K}$ を求める。

$$J = \int_0^{\infty} \left\{ q_{y_0} (y_0(t) - y_{0ref}(t))^2 + r \tau_{fb}^2(t) \right\} dt \quad (20)$$

ただし、 q_{y_0} は実際の横変位と規範横変位の偏差に対する重みであり、 r はフィードバック制御による操舵トルク τ_{fb} に対する重みである。以下のようなフィードバックを行うことにより、フィードバック制御による操舵トルク τ_{fb} が決定される。

$$\tau_{fb} = -\mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{ref}) \quad (21)$$

ただし、 $\mathbf{K}$ は 1 行 8 列のフィードバックゲインである。

以上より、(7)式と(21)式で表した操舵トルクを足し合わせたものを、車線維持制御の制御入力 τ として、二輪車に入力する。

$$\tau = \tau_{ff} + \tau_{fb} \quad (22)$$

この時のブロック線図を図 3 に示す。

3.2 従来の制御系

従来の制御系では、目標車線の横変位と実際の横変位の偏差が最小となるようにフィードバック制御を行うことで車線維持を実現していた。制御系設計については参考文献3)に示されており、ここでは概要のみを記述する。

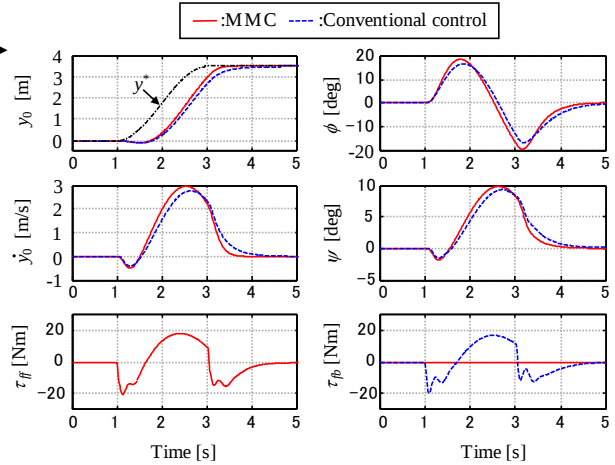


Fig.4 Time history of lane tracking control with MMC in comparison with conventional control

(5)式のシステムに対して、次に示す評価関数が最小となるようなフィードバックゲイン $\mathbf{K}$ を求める。

$$J = \int_0^{\infty} \left\{ q_{y_0} (y_0(t) - y^*)^2 + r \tau_{fb}^2(t) \right\} dt \quad (23)$$

ただし、 q_{y_0} は実際の横変位と規範横変位の偏差に対する重みであり、 r はフィードバック制御による操舵トルク τ_{fb} に対する重みである。そして、状態変数 $\mathbf{x}$ と $\mathbf{x}_0$ の偏差を以下のようにフィードバックすることで、フィードバック制御による操舵トルクが決定される。

$$\tau_{fb} = -\mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (24)$$

ただし、 $\mathbf{K}$ は 1 行 8 列のフィードバックゲイン、 $\mathbf{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ y^* \ 0 \ 0 \ 0]^T$ である。

4 シミュレーションによる検討

MMC による車線維持制御と最適制御によるフィードバック制御のみで構成される従来の制御系の比較を行う。シミュレーション条件としては、(1)～(4)式の運動方程式により表される二輪車が車線変更を行うことを想定し、目標横変位 y^* が、両振幅 3.5m、周波数 0.25Hz の余弦波が反周期分入力されるものとする。

4.1 目標値追従シミュレーション

MMC の制御効果を確認するために、MMC と従来の制御系の比較を行う。規範モデルのパラメータは、時定数 T を 0.1、固有角周波数 ω_n を 12.6rad/s(2Hz)、減衰比 ζ を 1 とした。また、評価関数の重みは制御系によらず共通であり、MMC の操舵トルク τ と、従来の制御系のフィードバック制御による操舵トルク τ_{fb} の最大値が同程度となる値を選定し、 q_{y_0} を $10^{7.66}$ 、 r を

1とした. 図4にシミュレーション結果を示す. 実線が MMC の応答であり, 破線が従来の最適制御の応答である. フィードフォワード制御による操舵トルク τ_f では, MMC の応答のみを記述している.

MMC では, フィードバック制御による操舵トルク τ_b が入力されておらず, フィードフォワード制御のみで目標車線への追従が実現できていることがわかる. また, この図よりフィードフォワード制御を追加することで, 従来の制御に比べ, 車線追従性能が向上していることが確認できる.

4.2 二人乗りシミュレーション

二人乗りを模擬したシミュレーションを行うことにより制御系のもつロバスト性について検証する³⁾. 制御系設計のパラメータは図4と同様とした.

図5にシミュレーション結果を示す. 実線が MMC の応答であり, 破線が従来の最適制御の応答である. MMC では, パラメータ変動によるモデル誤差が生じることで, 一名乗車時に入力されていなかったフィードバック操舵トルク τ_b が入力されている. また, 横変位が目標車線の横変位に追従していることより, 制御対象の特性が変化した場合にも安定した制御効果が得られることが確認できる. 二つの制御系を比較すると, 図4と同様に MMC の方が車線追従性能が向上していることが確認できる.

5 まとめ

本研究では, 二輪車の車線追従制御において, 過渡特性を改善するために MMC を適用し, シミュレーションによりその制御効果について検討を行った. その結果, 以下の結論を得た.

- (1) モデルマッチング制御と最適制御によるフィードバック制御によって構成される従来の制御系を比較した結果, MMC では, フィードフォワード制御により目標車線を実現できるようになり, 二輪車の車線追従性能が向上した.
- (2) MMC を適用した車線追従制御のロバスト性を検証するために, 二名乗車を想定した際のシミュレーションを行った結果, フィードバック制御によりロバスト性を有していることを確認した.

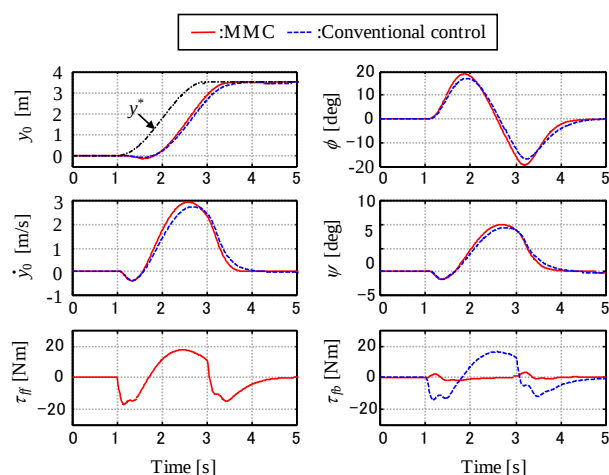


Fig.5 Time history of lane tracking control with MMC in comparison with conventional control (tandem riding)

「参考文献」

- 1) 丸茂喜高, “ステアバイワイヤによる二輪車の予防安全技術の可能性”, 自動車技術会シンポジウムテキスト, No. 20-07, p. 15-20 (2008)
- 2) Marumo, Y., and Nagai, M., “Steering Control of Motorcycles Using Steer-by-Wire System”, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 45, No. 5, p. 445-458 (2007)
- 3) 丸茂喜高, 大明洋輝, 横田武, “モデルマッチング制御による二輪車の操舵制御の検討-規範モデルを用いた過渡特性の改善-”, 自動車技術会論文集, Vol. 48, No. 5 p. 1107-1112 (2017)
- 4) 丸茂喜高, 片桐希, 網島均, “二輪車の動特性を考慮した車線追従制御に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 737, p. 37-43 (2008)
- 5) Sharp, R.S., “The Stability and Control of Motorcycles”, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 13, No. 5, p. 316-329 (1971)
- 6) 自動車技術会編, “自動車技術ハンドブック 基礎・理論編 (第1分冊)”, 自動車技術会, p. 343-345 (2015)