

ヨーレイトのモデルマッチング制御を用いた二輪車の操舵制御

日大生産工(院) ○大明 洋輝 日大生産工 丸茂 喜高
東京農工大学大学院 毛利 宏

1 緒言

二輪車の操舵は、逆操舵といわれる特殊な操作が要求され、また、前後輪の二点で接地しているため、特に低速時では、車体の直立安定のための積極的な操作が必要となる¹⁾。このような複雑な操舵に対して、ステアバイワイヤ技術を適用することにより、逆操舵や直立安定のための操作を必要としない二輪車が提案された²⁾。さらに、ステアバイワイヤを適用した二輪車の制御系の制御量をヨーレイトとすることで、ヨーレイトやロール角のダンピング性能において良好な制御効果が得られている³⁾。

それらの検討では、ライダーから指令値が入力された際の過渡状態について考慮されておらず、速応性に課題を抱えていた。このような課題に対して、モデルマッチング制御 (MMC: Model Matching Control) を適用し、目標ロール角の過渡状態について考慮することにより、速応性が改善することが確認されている⁴⁾。そこで、制御量をヨーレイトとし、ライダーからの指令値の過渡特性を考慮することで、良好なダンピング性能を維持しつつ、指令値への追従性を改善できると考えられる。

本研究では、二輪車の操舵制御において、モデルマッチング制御を適用し過渡特性を考慮することで、制御量をヨーレイトとした場合の操縦安定性を向上させる検討を行う。

2 車両モデル

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、右下向きの直交座標系としている。運動方程式の詳細は末尾の付録に記載し、ここでは簡略化した方程式のみを示す。

- 横運動の運動方程式

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

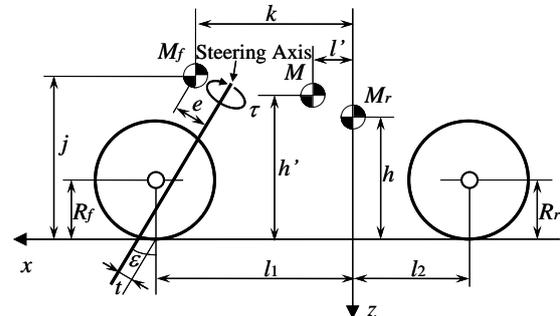


Fig.1 Mathematical model
(four-degree-of-freedom model)

- ヨー運動の運動方程式

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

- ロール運動の運動方程式

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

- 操舵系の運動方程式

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

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

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, $\mathbf{x} = [\dot{y}_1 \ \dot{\psi} \ \dot{\phi} \ \dot{\delta} \ \phi \ \delta]^T$, $\mathbf{u} = \tau_{sbw}$,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

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. 状態変数 \mathbf{x} は, メインフレーム重心点の横速度 \dot{y}_1 , ヨーレイト $\dot{\psi}$, ロールレイト $\dot{\phi}$, 操舵角速度 $\dot{\delta}$, ロール角 ϕ および操舵角 δ であり, 制御入力 \mathbf{u} は操舵トルク入力 τ_{sbw} である.

本研究では, ステアバイワイヤの制御手法として, MMC を適用して過渡特性を考慮した制御系と, 比較対象として, 過渡特性を考慮しない既存研究の制御系³⁾を用いて制御効果を確認する.

3.1 モデルマッチング制御による制御系

二輪車の制御系に MMC を適用することで, フィードフォワード制御による操舵トルク τ_{ff} により, 実ヨーレイト $\dot{\psi}$ を任意の規範ヨーレイト $\dot{\psi}_{ref}(s)$ に追従させる.

まず, 操舵トルクからヨーレイトまでの伝達関数を以下のように表せるものとする.

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

目標ヨーレイト $\dot{\psi}_{des}(s)$ から規範ヨーレイト $\dot{\psi}_{ref}(s)$ までの規範モデルの伝達関数を $G_r(s)$ とし, $G_r(s)$ と $G_{\dot{\psi}}(s)$ 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.

$$\tau_{ff}(s) = G_r(s)G_{\dot{\psi}}^{-1}(s)\dot{\psi}_{des}(s) \quad (7)$$

この時, $G_{\dot{\psi}}(s)$ が二つの不安定零点 $z_{\dot{\psi}1}$, $z_{\dot{\psi}2}$ を持っているため, 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, $G_{\dot{\psi}}(s)$ の相対次数は1次であるため, $G_r(s)$ の相対次数が1以上でないと, $\dot{\psi}_{des}(s)$ 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.

$$G_r(s) = \frac{k_{\dot{\psi}}\omega_n^2(s - z_{\dot{\psi}1})(s - z_{\dot{\psi}2})}{(Ts + 1)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (8)$$

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, $k_{\dot{\psi}}$ はヨーレイト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, 実ヨーレイトを規範ヨーレイト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

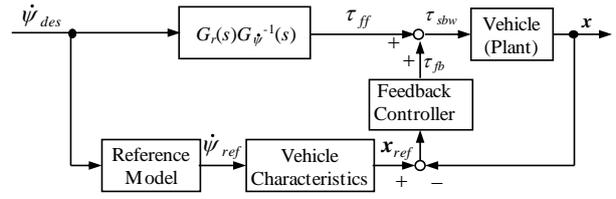


Fig.2 Block diagram of steer-by-wire vehicle with MMC

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, 横速度, 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.

$$\dot{y}_1(s) = G_{\dot{y}_1}(s)\tau(s) \quad (9)$$

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

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

$G_{\dot{\psi}}(s)$ 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.

$$\dot{y}_{1ref}(s) = G_{\dot{y}_1}(s)G_{\dot{\psi}}^{-1}(s)\dot{\psi}_{ref}(s) \quad (12)$$

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

$$\dot{\delta}_{ref}(s) = G_{\delta}(s)G_{\dot{\psi}}^{-1}(s)\dot{\psi}_{ref}(s) \quad (14)$$

$$\phi_{ref}(s) = G_{\phi}(s)G_{\dot{\psi}}^{-1}(s)\dot{\psi}_{ref}(s) \quad (15)$$

$$\delta_{ref}(s) = G_{\delta}(s)G_{\dot{\psi}}^{-1}(s)\dot{\psi}_{ref}(s) \quad (16)$$

これらを, 規範ヨーレイトに対する状態変数として以下のようにまとめる.

$$\mathbf{x}_{ref} = [\dot{y}_{1ref} \ \dot{\psi}_{ref} \ \dot{\phi}_{ref} \ \dot{\delta}_{ref} \ \phi_{ref} \ \delta_{ref}]^T \quad (17)$$

実際の状態変数 \mathbf{x} と規範ヨーレイトに対応する状態変数 \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.

$$J = \int_0^{\infty} \{q_{\dot{\psi}}(\dot{\psi}(t) - \dot{\psi}_{ref}(t))^2 + r\tau_{fb}^2(t)\} dt \quad (18)$$

ここで, $q_{\dot{\psi}}$ は実ヨーレイトと規範ヨーレイト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. 求めたフィードバックゲイン \mathbf{K} に対して規範ヨーレイトに対応する状態変数 \mathbf{x}_{ref} と実際の状態変数 \mathbf{x} の差をかけることで, フィード

バック制御による操舵トルクが決定される。

$$\tau_{fb} = -\mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{ref}) \quad (19)$$

ただし、 $\mathbf{K} = [K_{\dot{y}_1} \quad K_{\dot{\psi}} \quad K_{\dot{\phi}} \quad K_{\dot{\delta}} \quad K_{\phi} \quad K_{\delta}]$ である。

以上より、(7)式と(19)式で表した操舵トルクを足し合わせたものを、ステアバイワイヤによる操舵トルク τ_{sbw} として、二輪車に入力する。

$$\tau_{sbw} = \tau_{ff} + \tau_{fb} \quad (20)$$

このときのブロック線図を図2に示す。

3.2 既存研究の制御系

既存研究では、伝達関数の定常成分を用いたフィードフォワード制御と、平衡点(定常状態)まわりでの最適レギュレータによるフィードバック制御を用いた二自由度制御を行っていた。制御系設計については参考文献3)に示されており、ここでは最適レギュレータの構成のみを示す。

(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。

$$J = \int_0^{\infty} \{q_{\dot{\psi}}(\dot{\psi}(t) - \dot{\psi}_0(t))^2 + r\tau_{fb}^2(t)\} dt \quad (21)$$

ここで、 $q_{\dot{\psi}}$ は実ヨーレートと目標ヨーレート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に対する重みである。求めたフィードバックゲイン \mathbf{K} に対して、目標ロール角の定常値に対応する状態変数 \mathbf{x}_0 と、実際の状態変数 \mathbf{x} の誤差をかけることで、フィードバック制御による操舵トルクが決定される。

$$\tau_{fb} = -\mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (22)$$

ただし、 $\mathbf{K} = [K_{\dot{y}_1} \quad K_{\dot{\psi}} \quad K_{\dot{\phi}} \quad K_{\dot{\delta}} \quad K_{\phi} \quad K_{\delta}]$ である。

4 シミュレーションによる検討

MMCの制御効果を確認するために、MMCを適用した制御系と既存研究の制御系の、二種類の制御系を用いてシミュレーションを行う。シミュレーション条件としては、(1)~(4)式の運動方程式で示した二輪車が車速60km/hで走行中に、シミュレーション開始1s後に両振幅5.1deg/s、周波数1Hzの余弦波半周期分の目標ヨーレートが入力されるものとした。

図3、図4にそれぞれMMCおよび過渡特性を考慮しない既存研究の制御系のシミュレーション結果を示す。制御系設計のパラメータとして、MMCでは規範モデルの伝達関数の時定数 T を0.001sとし、減衰比 ζ を1、固有角周波数 ω_n

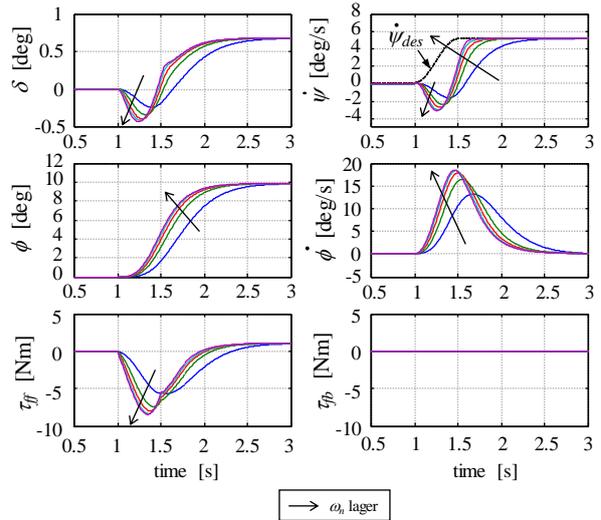


Fig.3 Time history of steer-by-wire vehicle with MMC(increasing ω_n)

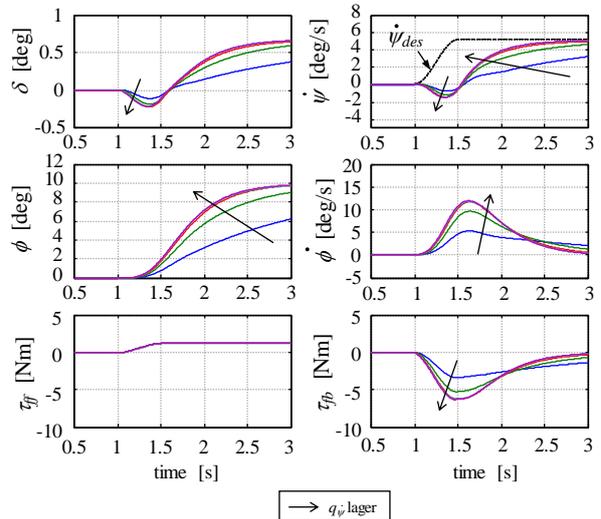


Fig.4 Time history of steer-by-wire vehicle with conventional control (increasing $q_{\dot{\psi}}$)

を6.28rad/s(1Hz)から31.4rad/s(5Hz)まで6.28rad/s(1Hz)刻みで増加させた。また、過渡特性を考慮しない制御系では、評価関数の重みは $r=1$ とし、 $q_{\dot{\psi}}$ を $10^3 \sim 10^7$ まで変化させている。

図3のMMCに着目すると、規範モデルの固有周波数が増加にともない、フィードフォワード制御による操舵トルク τ_{ff} の最大値が増加し、ヨーレート $\dot{\psi}$ の追従性が向上していることが確認できる。また、操舵トルク入力では、逆操舵や目標ヨーレートでの定常円旋回に必要な操舵トルクをフィードフォワード制御のみで実現しており、フィードバック制御による操舵トルクが入力されていないことがわかる。

一方、図4の過渡特性を考慮しない制御系では、 $q_{\dot{\psi}}$ を増加させるとヨーレート $\dot{\psi}$ の追従性

が向上するが、ある程度 q_{ψ} を増加させると目標ヨーレイトへの追従性が改善しなくなっている。また、操舵トルク入力では、旋回時に目標ヨーレイトを維持するための操舵トルクをフィードフォワード制御で実現し、フィードバック制御で目標ヨーレイトとヨーレイトの偏差が0となるように、逆操舵を含めた操舵トルクを入力していることが確認できる。

前述の条件以外でも、操舵トルクの最大値とロール角の立ち上がり時間を調べることで、MMCの優位性を検証する。ロール角の立ち上がり時間は、最終値の10%から90%になるまでに要する時間とした。

MMCの規範モデルは、時定数 T を0.001sとし、減衰比 ζ を1、固有角周波数 ω_n を1.26rad/s(0.2Hz)~62.8rad/s(10Hz)まで1.26rad/s(0.2Hz)刻みで変化させ、既存研究の制御系では、重み q_{ψ} を $10^3 \sim 10^9$ まで $10^{0.1}$ 刻みで変化させた。

各条件におけるロール角の立ち上がり時間と操舵トルクの最大値の関係を図5に示す。同図より、操舵トルクの最大値が等しい場合には、ロール角の立ち上がり時間が、MMCを用いることで短縮されていることが確認できる。また、過渡特性の考慮なしの制御では、 q_{ψ} を増加させても、ある程度のところでロール角の立ち上がり時間が改善しなくなるが、MMCでは固有角周波数を増加させることでロール角の速応性が改善していることがわかる。

5 結論

本研究では、二輪車の操舵制御において、モデルマッチング制御を適用し過渡特性を考慮することで、制御量をヨーレイトとした場合の操縦安定性を向上させる検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) モデルマッチング制御の規範モデルの固有角周波数を増加させると操舵トルクの最大値が増加し、ヨーレイトの追従性が向上した。
- (2) モデルマッチング制御と既存研究の制御を比較した結果、過渡特性を考慮することで、旋回のきっかけとなる逆操舵や旋回の維持をフィードフォワード制御のみで実現できるようになり、ヨーレイトの追従性が向上した。
- (3) 操舵トルクの最大値を同程度とした際に、モデルマッチング制御を用いることでロール角の立ち上がり時間が短縮した。

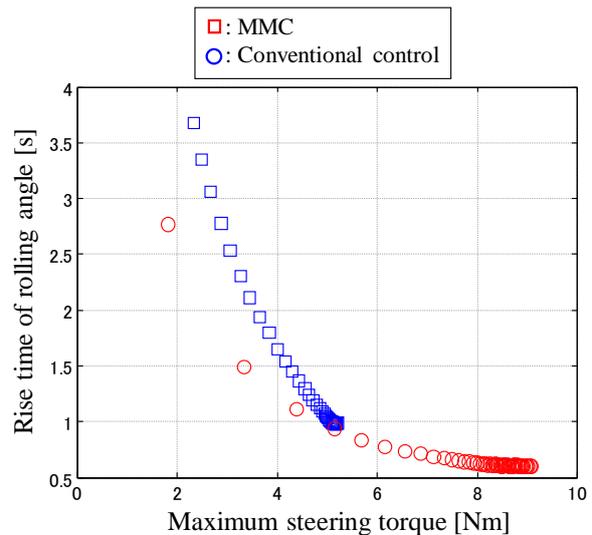


Fig.5 Relation between rise time of rolling angle and maximum steering torque

「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, (2008), p. 15-20.
- 2) Y. Marumo, and M. Nagai, “Steering Control of Motorcycles Using Steer-by-Wire System”, *Vehicle System Dynamics*, Vol.45, No.5, (2007), p. 445-458.
- 3) 丸茂喜高, 大木陽平, 毛利宏, ステアバイワイヤによる二輪車の操縦安定性向上に関する研究 (第3報, ロール角とヨーレイトを線形結合した制御量の提案), 日本機械学会論文集C編, Vol.79, No.804 (2013) p. 2841-2853.
- 4) 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 (2017) p. 1107-1112.
- 5) Sharp, R. S., “The Stability and Control of Motorcycles”, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol.13, No.5, (1971), p. 316-329.
- 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, (2015) p. 343-345.