

二輪車の車線維持性能向上に関する研究

-ステアバイワイヤが車線維持性能に及ぼす影響-

日大生産工(院) ○野見山 龍介
日大生産工 丸茂 喜高 綱島 均

1. 緒言

交通渋滞や環境負荷などの自動車が抱える問題に対して、燃費がよく、誰でも簡単に操縦できるパーソナルモビリティビークルの研究・開発が行われている。しかし、そのほとんどはコンセプトカーであるため、すぐに普及させることは難しいと考えられる。そこで筆者らは、既に広く普及している二輪車をベースとするパーソナルモビリティビークルを検討している。

二輪車は、旋回する際に旋回方向とは一度逆方向に操舵する逆操舵や低速時に直立安定を確保するための積極的なハンドル操作など、複雑な操作が必要とされる。そこで、これらの操作を除去するために、二輪車にステアバイワイヤ技術¹⁾を適用することで複雑な操縦が除去され操縦安定性が向上することが、簡易モデルのシミュレーションにより示された²⁾。さらに、二輪車の運動を詳細に再現した車両モデルを用いた場合でもその有効性が確認されている³⁾。

これらの研究では、二輪車に乗車するライダーは、目標とする車両のロール角を入力し、それを実現するようにステアバイワイヤにより操舵トルクを制御しているが、目標ロール角は、ステップ入力など確定的に与えられている。実際の運転では、目標コースに沿って走行するために、ライダーは目標となるロール角を時々刻々算出していることが考えられる。

本研究では、目標車線に追従して走行するためライダー操縦モデルを用いて、ステアバイワイヤ技術を適用した二輪車のシミュレーションを行い、ステアバイワイヤ技術が車線維持性能に及ぼす影響を検討する。さらに、ステアバイワイヤを適用した二輪車に対して、車線維持支援システム⁴⁾を併用した場合の車線維持性能についても検討を行う。

2. シミュレーションモデル

2.1. 車両モデル

制御効果を検証するために、二輪車の運動を詳細に再現した汎用シミュレーションソフトウェアであるBikeSim⁵⁾ (Version 2.0)を用いる。このソフトウェアで用いられているモデル(以下、車両モデル)は、ライダーを含む9つの剛体から構成されていて、運動自由度は29自由度である。本研究のシミュレーションで用いた車両諸元は、車体総重量約180kgの中型車のものであり、ライダーの質量は、約70kgである。また、座標系は右上向き直交座標系となっている。

2.2. 同定モデル

上記モデルに対して、制御系設計を行うために、システム同定により線形モデルを導出する。システム同定の条件としては、16.7m/s (60km/h)で直進走行中の二輪車に、片振幅10Nm、周波数1Hzの正弦波1周期分の操舵トルク τ を入力する。ステアバイワイヤの制御目標はロール角を制御することであり、車線維持支援システムは横変位を制御することを目的とするため、検出する物理量はロール角 ϕ と横変位 y_0 とした。これらの入出力のデータから、Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification法(N4SID法)⁶⁾を用いて、状態空間モデルを導出する。導出するモデルの次数については、2次から10次までの次数で、十分な再現性を得られ、かつ次数が低いモデルを選んだ結果、得られたモデルの次数は8次となった。以上より、同定されたモデル(以下、同定モデル)状態方程式は以下のようにになる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T$,
 $u = \tau$, \mathbf{A} は8行8列のシステム行列、 \mathbf{B} は8行1列の入力行列である。

また、出力方程式は以下のように表される。

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{y} = [y_0 \ \phi]^T$, \mathbf{C} は2行8列の出力行列である。

この同定モデルに対して、システム同定時の条件でシミュレーションを行ったときの結果を図1に示す。実線は車両モデルの応答を示し、破線は同定モデルの応答を示している。同定モデルの応答が、車両モデルのものとはほぼ一致していることから、同定モデルが車両モデルを再現していることが確認できる。

3. ライダ操縦モデル

ライダーの操縦を表現するモデルとして、図2に示すような前方注視モデルを用いる。

二輪車の操縦は四輪車の操縦と異なり、方向制御だけでなく、姿勢安定を保つために車両のロール運動を制御する必要がある⁷⁾。二輪車を操縦するライダーは、以下に示すように、目標車線と前方注視点の横偏差に基づく目標ロール角 ϕ_{des} を算出していると考えられる。

Improving Lane Keeping Performance for Motorcycles

- Effects of Steer-by-Wire System on Lane Keeping Performance -

Ryusuke Nomiya, Yoshitaka MARUMO and Hitoshi TSUNASHIMA

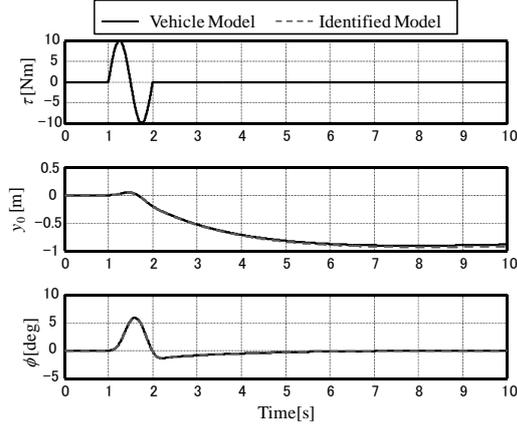


Fig.1 Time history of vehicle and identified models

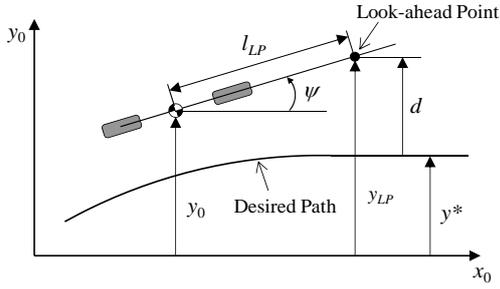


Fig. 2 Rider control model by look-ahead point

$$\phi_{des} = -K_{RM}d \quad (3)$$

ただし、 $d = y_{LP} - y^*$ 、 $y_{LP} = y_0 + l_{LP}\psi$ であり、 K_{RM} は前方注視点の横偏差に対するゲインである。

従来の二輪車では、ライダーが操舵トルクを発生させる。算出された目標ロール角 ϕ_{des} をもとに、ライダーの入力する操舵トルク τ_{RM} は以下のように表現できる。

$$\tau_{RM} = -\left\{K_{\phi_{-RM}}(\phi - \phi_{des}) + K_{\dot{\phi}_{-RM}}\dot{\phi}\right\} \frac{1}{1 + T_D s} e^{-T_L s} \quad (4)$$

ただし、 $K_{\phi_{-RM}}$ と $K_{\dot{\phi}_{-RM}}$ はそれぞれロール角とロールレイトに対するゲイン、 T_L と T_D はそれぞれライダーの入力のむだ時間と一次遅れ系の時定数である。

ステアバイワイヤを適用した二輪車の場合、ライダーは目標ロール角をステアバイワイヤに入力する。このとき、ライダーが目標ロール角 ϕ_{des} に対応する注視点横変位を認知してから目標ロール角を入力するまでには遅れがあるため、むだ時間と一次遅れを考慮して、ライダーが実際に入力する目標ロール角 ϕ_{com} を以下の式で表す。

$$\phi_{com} = \phi_{des} \frac{1}{1 + T_D s} e^{-T_L s} \quad (5)$$

4. ステアバイワイヤシステムの制御系設計

ステアバイワイヤの制御系設計においては、状態フィードバックをベースとする最適制御理論を適用し、センサで観測された物理量から状態変数を推定するために、カルマンフィルタを併用したLQG制御を用いる³⁾。

まず、状態フィードバックを行うにあたり、目標ロール角に対応した状態変数を導出する。同定モデルにおいて、操舵トルクからロール角までの伝達関数が以下のように表されるものとする。

$$\phi(s) = G_\phi(s)\tau(s) \quad (6)$$

また、同定モデルの操舵トルクから、各状態変数までの伝達関数が以下のように表現できるものとする。

$$x_i(s) = G_{x_i}(s)\tau(s) \quad (7)$$

ただし、 $i = 1, 2, \dots, 8$ である。

これらの伝達関数の定常成分を用いて、ある目標ロール角 ϕ_{com} が与えられたときの各状態変数は、(6)式より、以下のように表すことができる。

$$x_{refi} = G_{x_i}(0)G_\phi^{-1}(0)\phi_{com} \quad (8)$$

ただし、 $i = 1, 2, \dots, 8$ である。

これらを、目標とする状態変数として以下のようにまとめる。

$$\mathbf{x}_{ref} = [x_{ref1} \ x_{ref2} \ x_{ref3} \ x_{ref4} \ x_{ref5} \ x_{ref6} \ x_{ref7} \ x_{ref8}]^T \quad (9)$$

レギュレータの設計にあたっては、(1)式で示されたシステムに対して、以下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。

$$J_{SBW} = \int_0^\infty (q_\phi \phi^2(t) + r_{SBW} \tau_{SBW}^2(t)) dt \quad (10)$$

ただし、 τ_{SBW} は操舵トルク入力、 q_ϕ 、 r_{SBW} はそれぞれロール角、操舵トルク入力に対する重みである。

求めたフィードバックゲインを用いて、以下のようなフィードバックを行うことにより、制御入力が決まされる。

$$\tau_{SBW} = -\mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{ref}) \quad (11)$$

ただし、 $\mathbf{K} = [K_{x_1} \ K_{x_2} \ K_{x_3} \ K_{x_4} \ K_{x_5} \ K_{x_6} \ K_{x_7} \ K_{x_8}]$ である。

次に、状態推定を行う上で、検出する物理量としては、システム同定時に用いたロール角および横変位を採用し、カルマンフィルタを設計する。プロセスノイズを w として、制御対象の入力端に操舵トルク外乱 τ_{dist} が加わるものとする、カルマンフィルタを用いたシステムの状態方程式は以下ようになる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{G}\mathbf{w} \quad (12)$$

ただし、 $w = \tau_{dist}$ 、 $\mathbf{G} = \mathbf{B}$ である。

また、出力方程式は、センサノイズ \mathbf{v} を用いて以下のように記述できる。

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (13)$$

ただし、 $\mathbf{v} = [v_y \ v_\phi]^T$ である。

以上より、カルマンフィルタゲインを算出し、観測出力と制御入力から状態変数を推定する。また、ブロック線図を図3に示す。

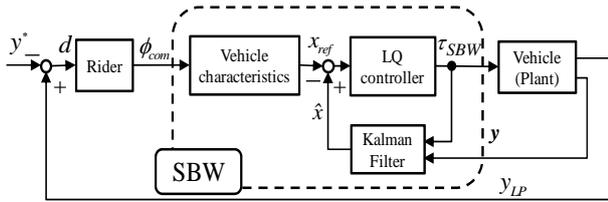


Fig. 3 Block diagram of closed-loop system

5. シミュレーションによる検討

3章で仮定したライダー操縦モデルと4章で設計した制御系を用い、図3に示すように二輪車-ライダー系のクローズドループを作成し、シミュレーションを行う。

シミュレーション条件は、二輪車が60km/hで走行中に、シミュレーション開始1s後に両振幅10Nm、周波数1Hzの余弦波1周期分の操舵トルク外乱が入力されるものとし、目標車線 y^* は0mとする。なお、制御系の設計にあたっては、評価関数の重みを $q_\phi = 300^2$ 、 $r = 1$ とした。ライダー操縦モデルに関するパラメータは、それぞれ $l_p = 25\text{m}$ (注視時間1.5s)、 $K_{\phi_{RM}} = 70\text{Nm/rad}$ 、 $K_{\dot{\phi}_{RM}} = 10\text{Ns/rad}$ 、 $K_{RM} = -0.12\text{rad/m}$ 、 $T_D = 0.1\text{s}$ 、 $T_L = 0.1\text{s}$ とした。シミュレーション結果を図4に示す。実線はステアパイワイヤを適用した二輪車、すなわちライダーが指令した目標ロール角を実現させるためにステアパイワイヤにより操舵トルク τ_{SBW} が入力される場合の応答を示している。破線は従来の二輪車の応答、すなわちライダーが操舵トルク τ_{RM} を入力する場合の応答を示している。ステアパイワイヤを用いることで、操舵トルク τ (図右上) の応答が速くなるため、ロール角 ϕ (図左下) が抑えられている。その結果、従来の二輪車と比較して、横変位 y_0 (図左上) が小さくなるため、車線維持性能が向上することが確認できる。

さらに q_ϕ を 300^2 、 400^2 、 500^2 と変化させた場合のシミュレーション結果を図5に示す。重みを増加させると横変位 y_0 (図左上) が小さくなるため、車線維持性能が向上することが確認できる。

6. 車線維持支援システムを用いた場合の検討

前章の結果より、二輪車にステアパイワイヤを適用することで車線維持性能が向上することが確認できた。しかし、ステアパイワイヤのように、ライダーが意図した通りに車両運動を実現させるシステムでは、ライダーのエラーにより生じる事故を防ぐことはできないため、ライダーのエラーを車両側でカバーするような運転支援システムが重要であると考えられる。

既存研究では二輪車の車線維持支援システムについて、ライダー操縦モデルを用いて評価を行い、車線維持性能が向上することを確認している⁸⁾。そこで、本章ではステアパイワイヤを適用した二輪車に車線維持支援システムを併用した場合の車線維持性能について検討する。車線維持支援システムの制御系設計については、参考文献4)に示されており、ここでは概要のみを記述する。

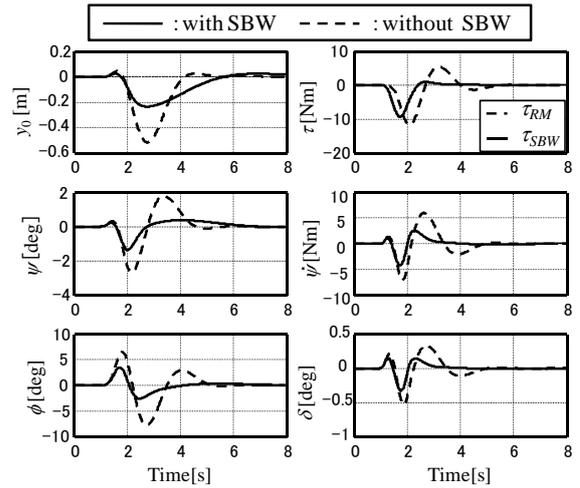


Fig. 4 Time history of rider-motorcycle system with and without SBW system

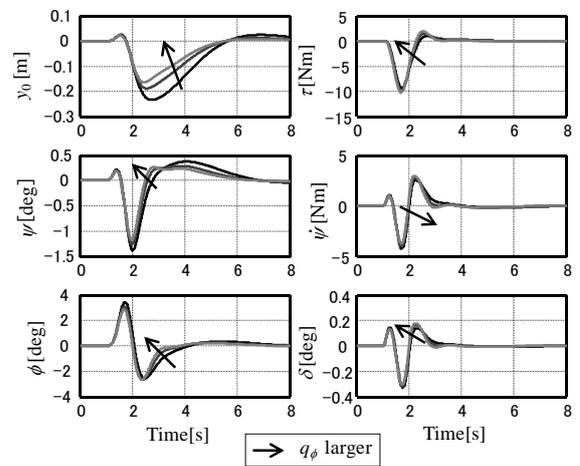


Fig. 5 Time history with steering torque disturbance (increasing q_ϕ)

車線維持支援システムの制御系の仕様を決める評価関数を以下のように定める。

$$J_{LK} = \int_0^{\infty} (q_y y_0^2(t) + r_{LK} \tau_{LK}^2(t)) dt \quad (14)$$

ここで、 q_y 、 r_{LK} は、それぞれ横変位、操舵トルクに対する重みである。式(14)が最小となるようにフィードバックゲイン K_{LK} を求め、状態変数をかけることで、操舵トルク τ_{LK} が決まる。

ステアパイワイヤを適用した二輪車に車線維持支援システムを併用した場合の車線維持性能を検討するため、前章に示した操舵トルク外乱を付加した場合と同様のシミュレーションを行なった結果を図6に示す。ここでは、ステアパイワイヤの評価関数の重みを $q_\phi = 300^2$ 、 $r_{SBW} = 1$ とし、車線維持支援システムの評価関数の重みを $q_y = 10^2$ 、 $r_{LK} = 1$ とした。実線は二輪車にステアパイワイヤと車線維持支援システムを適用した場合の応答、すなわち二輪車にはステアパイワイヤによる操舵トルク τ_{SBW} と車線維持支援システムによる操舵トルク τ_{LK} が入力される。破線はステアパイワイヤのみ適用した場合の応答を示している。こ

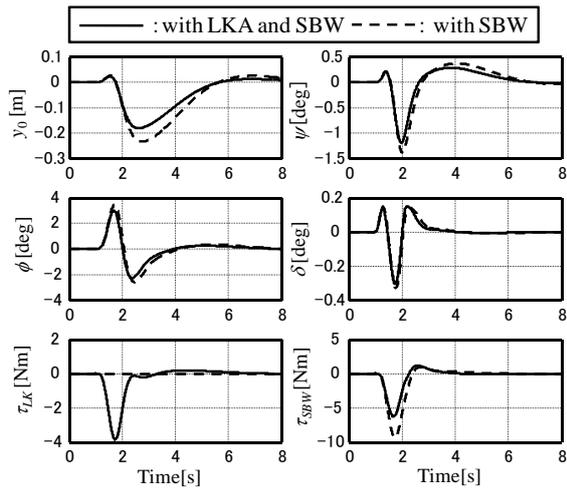


Fig. 6 Time history of SBW system with and without LKA system

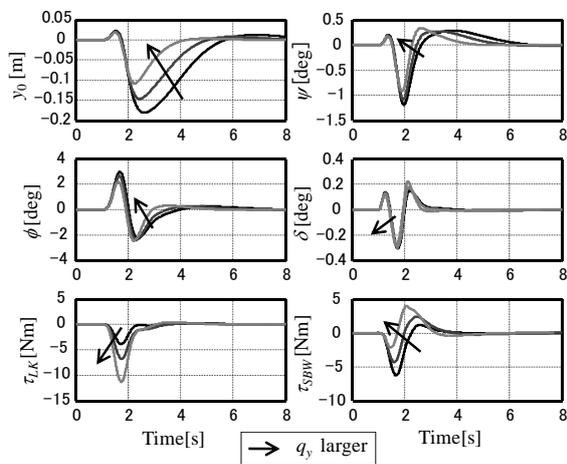


Fig. 7 Time history of SBW and LKA systems (increasing q_y)

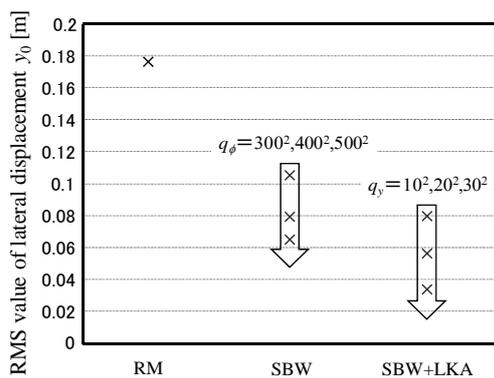


Fig.8 Comparison of lane keeping performance

の結果より、ステアバイワイヤを適用した二輪車に車線維持支援システムを適用することで、横変位はさらに抑制され、車線維持性能が向上することが確認できる。次に q_y を 10^2 、 10^3 、 10^4 と変化させた場合のシミュレーション結果を図 7 に示す。重みを増加させると

横変位が抑制され、車線維持性能が向上することが確認できる。

ここで、これまで検討した結果について、車線維持性能の比較を行う。評価指標としては、車両重心点横変位 y_0 の RMS (Root-Mean-Square) 値を用いて、それぞれのシステムを適用した場合の車線維持性能を比較する。比較結果を図 8 に示す。これより、ライダーのみの操縦 (RM) に比べて、ステアバイワイヤを適用した場合 (SBW) には横変位の RMS 値が小さくなるため車線維持性能が向上し、ステアバイワイヤの制御系設計における評価関数の重みを増加させることで、さらに向上することが確認できる。また、ステアバイワイヤに車線維持支援システムを併用 (SBW+LKA) することで、支援システムがない場合と比較して車線維持性能が向上し、支援システムの制御系設計における評価関数の重みを増加させると、車線維持性能がさらに向上することがわかる。

7. 結 言

本研究では、ステアバイワイヤが車線維持性能に及ぼす影響を検討するため、目標ロール角を算出するライダー操縦モデルを用いてシミュレーションを行った。また、車線維持支援システムを併用した場合の効果を検証した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) ライダーが算出する目標ロール角をもとに、ステアバイワイヤが操舵トルクを制御することで、良好な車線維持性能が得られることを確認した。
- (2) ステアバイワイヤを適用した二輪車に、車線維持支援システムを併用することで、車線維持性能が向上することを確認した。

「参考文献」

- 1) 本山康夫, ステアバイワイヤと車両運動制御, 自動車技術, Vol.57, No.2, (2003), pp.39-43
- 2) Marumo, Y. and Nagai, M., Steering Control of Motorcycles Using Steer-By-Wire system, Vehicle System Dynamics,, Vol.45, No.5, (2007), pp.445-458
- 3) 丸茂喜高, 桑原健吾, 片桐希, 網島均, 二輪車のステアバイワイヤによる二輪車の操舵制御の検討-マルチボディシミュレーションによる制御効果の検証-, 自動車技術会論文集, Vol.39, No2, (2008), pp.27-32
- 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, (2008), pp.37-43
- 5) Virtual Mechanics Corporationホームページ <http://www.virtualmechanics.co.jp/html/bs.html>
- 6) 足立修一, MATLAB による制御のためのシステム同定, 東京, 東京電機大学出版, (1996), pp.138-139
- 7) 片山硬, 西見智雄, 岡山功, 青木章, 二輪車ライダーの操縦動作シミュレーションモデル, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.3, (1997), pp.137-142
- 8) 片桐希, 丸茂喜高, 網島均, ライダ操縦モデルを用いた二輪車の車線維持支援システムの検討, 自動車技術会論文集, Vol.40, No.3, (2009), pp.635 -640