

マルチボディシミュレーションによる二輪車用ステアバイワイヤの検証

日大生産工(院) ○桑原 健吾 日大生産工(院) 片桐 希
日大生産工 丸茂 喜高 日大生産工 綱島 均

1 緒言

二輪車は、一般的に車両が軽量であり、エンジンの排気量も小さいため、燃費がよい。また、都市部では移動速度が乗用車と比べて高いという利点を有している。加えて、省スペース性が高いため、輸送密度や駐車密度を高めることが可能である。

最近、自動車の抱える社会的な問題に対して、自動車輸送の実態に適したコミュータの開発が行われている¹⁾。筆者らは、比較的操縦が難しいとされている二輪車に対して、ステアバイワイヤ技術^{2),3)}を適用することにより、複雑な操縦を除去できることを示した⁴⁾。その結果、前述の二輪車のもつ利点とあわせて、二輪車を誰もが簡単に操縦できるコミュータとして利用できる可能性が示唆された。しかし、そこで検討されたシミュレーションモデルは、Sharp⁵⁾により定式化された簡易モデルであり、実写適用への妥当性が必ずしも示されたわけではない。また、そこでは、制御系設計モデルと制御対象モデルが同一であり、二輪車の質量は、乗車するライダーのそれに比較的接近しているため、ライダーの身体の影響が、乗用車の場合と比較して大きく、モデル化誤差やロバスト性の検証も重要である。

本研究では、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BikeSim⁶⁾を用いて、二輪車におけるステアバイワイヤ技術の妥当性を検証することを目的とする。

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BikeSimを用いる。このソフトウェアで使用されている運動モデルは、横運動、ヨー運動、ロール運動、操舵系運動のほか、車体の前後、上下、ピッチ運動に加えて、車輪の回転運動等も考慮されたモデルである⁷⁾。また、二輪車に乗車しているライダーの身体もモデル化されており、車体のロール角およびロールレイトに応じて、ライダー上半身のリーン角が決定される。この車両モデルは、ライダーを含む9つの剛体から構成されており、運動自由度は21自由度である。また、座標系は右上向きとなっている。

本研究の計算に用いた車両緒元は、重量約150kgの中型車のものである。ライダーの質量は約70kgである。

2.2 同定モデル

上記モデルに対し、制御系設計のための線形モデルを導出するため、システム同定を行う。システム同定時の条件として、走行速度16.7m/s(60km/h)で直進走行中に、図1左上に示すような、振幅5Nm、周波数5Hzの正弦波形一周期の操舵トルク t を入力する。このときのヨーレイト \dot{y} 、ロール角 f 、操舵角 d の各応答を検出し、入出力データからNumerical Algorithms for Subspace State Space System Identification 法 (N4SID法)⁸⁾を用いて状態空間モデルを導く。この方法は不安定系や閉ループ系などにも適用することが可能であり、二輪車のシステム同定にも用いられている^{9),10)}。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定した結果、得られたモデルの次数は6次となった。以上より、同定されたモデル(以下、同定モデル)の状態方程式は以下ようになる。

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

ただし、 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$ 、 $u = t$ 、 \mathbf{A} は6次のシステム行列、 \mathbf{B} は6行1列の入力行列である。また、出力方程式は以下の通りである。

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

ただし、 $\mathbf{y} = [\dot{y} \ f \ d]^T$ 、 \mathbf{C} は3行6列の出力行列である。この同定モデルに対し、同定時と同条件のシミュレーションを行った。そのときの、車両モデル、同定モデルのそれぞれの時系列応答を図1に示す。この図より、車両モデル、同定モデルそれぞれの応答がほぼ一致しており、車両モデルの妥当性が示されていることがわかる。

次に、同定モデルの極配置を図2に示す。この図より、同定モデルは二組の共役な複素固有値と一つの不安定な実固有値、安定な実固有値をもつことがわかる。一般に、二輪車の直進時の運動モードは、操舵系の振動であるウォブルモードと、多自由度が連成したウィーブモード、および車体が倒れこむ非振動運動であるキャブサイズモードの3つの運動モードが明らかにされている。ウィーブモードの振動数は1~4Hz、ウォブルモードの振動数は6~10Hzとされており、同定モデルの極配置と対応がとれていることがわかる。

Evaluation of Steer-by-Wire System for Motorcycles by Multibody Dynamics

Kengo KUWAHARA, Nozomi KATAGIRI, Yoshitaka MARUMO, and Hitoshi TSUNASHIMA

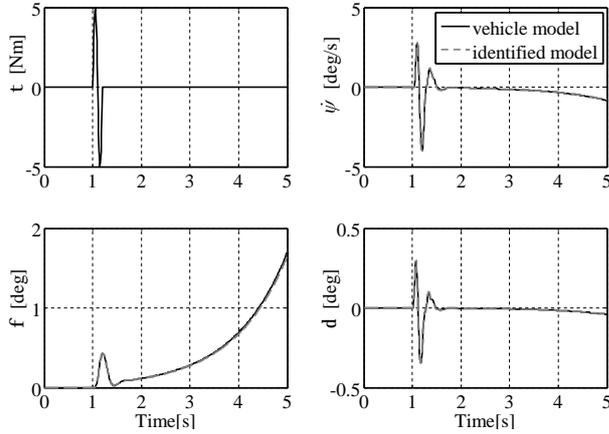


Fig.1 Time History of vehicle model and identified model

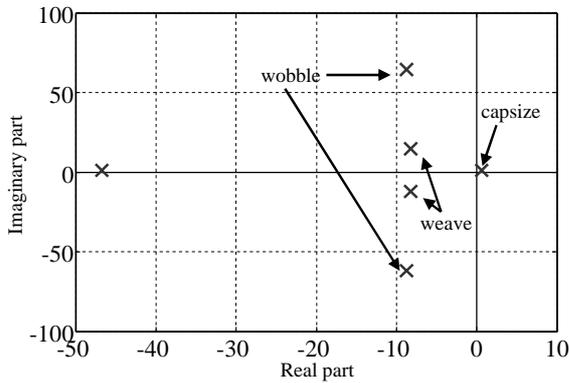


Fig.2 Pole placement of identified model

これらの結果から、同定モデルは、一般的な二輪車の特徴を表しており、車両モデルの特性を十分再現しているといえる。

3 制御系設計

本研究では、ライダーから入力された指令値に対応した目標ロール角を、ステアパイワイヤの操舵トルクにより実現する制御系を設計する。なお、ここでは、目標ロール角はライダーから直接指令されるものとする。目標ロール角に対するフィードフォワード制御入力 t_{ff} と、指令入力に対応する状態からの偏差に対するフィードバック制御入力 t_{fb} を考えると、制御入力 t_{sbw} は以下のように表せる。

$$t_{sbw} = t_{ff} + t_{fb} \quad (3)$$

このとき、以下に示す二自由度制御系を設計する。

3.1 フィードフォワード制御

ライダーから指令された目標ロール角 f_{des} を維持するのに必要な操舵トルクをフィードフォワード制御により実現する。今、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。

$$f(s) = G_f(s)t(s) \quad (4)$$

この伝達関数の定常成分のみを考慮し、目標ロール角に対

するフィードフォワード制御による操舵トルク t_{ff} を以下のように定める。

$$t_{ff} = G_f^{-1}(0)f_{des} \quad (5)$$

3.2 フィードバック制御

フィードバック制御は、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こととし、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制御を適用する。

定常旋回中に、(1)式で示したシステムの状態変数のいくつかは有限な定常値を持つ。そこで、各定常値に追従させる設定値制御レギュレータを設計する。今、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。

$$x_i(s) = G_{x_i}(s)t(s) \quad (6)$$

ただし、 $i = 1, 2, \dots, 6$ である。

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

$$x_{i0} = G_{x_i}(0)G_f^{-1}(0)f_{des} \quad (7)$$

ただし、 $i = 1, 2, \dots, 6$ である。

これらを状態変数の平衡点として、以下のようにまとめる。

$$\mathbf{x}_0 = [x_{10} \ x_{20} \ x_{30} \ x_{40} \ x_{50} \ x_{60}]^T \quad (8)$$

平衡点からの状態変数 $\Delta\mathbf{x}$ を、以下のように定義し、これを新たな状態変数として、レギュレータを構成すればよい。

$$\Delta\mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0 \quad (9)$$

ただし、 $\Delta\mathbf{x} = [\Delta x_1 \ \Delta x_2 \ \Delta x_3 \ \Delta x_4 \ \Delta x_5 \ \Delta x_6]^T$

レギュレータの設計にあたっては、(1)式のシステムに対して、以下に示す評価関数が最小になるようなフィードバックゲインを求める。

$$J = \int_0^{\infty} (q_f f^2(t) + r t_{fb}^2(t)) dt \quad (10)$$

ここで、 q_f 、 r は、それぞれロール角、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、平衡点からの状態変数がかかることで、設定値制御レギュレータの制御入力 t_{fb} が決定される。

$$t_{fb} = -\mathbf{K}\Delta\mathbf{x} \quad (11)$$

ただし、 $\mathbf{K} = [K_{x_1} \ K_{x_2} \ K_{x_3} \ K_{x_4} \ K_{x_5} \ K_{x_6}]$

次に、状態推定を行う上で、検出する物理量として、システム同定時に用いた、ヨーレート、ロール角、操舵角を採用し、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 t_{dist} が加わるものとする、カルマンフィルタを用いた状態方程式は以下ようになる。

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

ただし、 $w = t_{dist}$ 、 $\mathbf{G} = \mathbf{B}$ 。また、出力方程式は、センサノイズ \mathbf{n} を用いて以下のように記述できる。

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

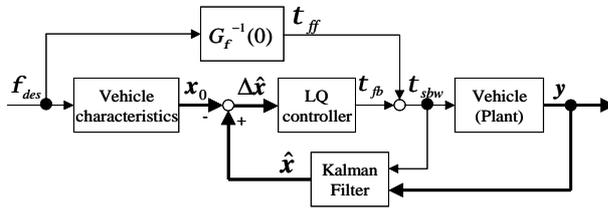


Fig.3 Block diagram of LQG control

ただし、 $\mathbf{v} = [v_y \quad v_f \quad v_d]^T$

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。このときのブロック線図を図3に示す。

4 シミュレーションによる検討

前章で得られた制御系を検証するために時系列シミュレーションを行う。ここでは、1)ライダから目標ロール角が入力された場合の実ロール角の追従性、2)ライダからの指令値はなく、外乱が入力された場合の直立安定性、3)一名乗車時で設計された制御系で、二名乗車を行った場合のロバスト性、の3つの項目について検討する。

以下で述べるシミュレーションでは、車両モデルが16.7m/sで走行するものとした。(10)式に示す評価関数の重みはそれぞれ $q_f=100^2$, $r=1$ とした。また、プロセスノイズであるヨーレイトのノイズ v_y 、ロール角のノイズ n_f 、操舵角のノイズ n_d の共分散をとともに 0.01^2 とした。

4.1 目標ロール角への追従性

ライダから目標ロール角が入力された際の制御効果を検討する。シミュレーション結果を図4に示す。この図には、ロール角への重み q_f を 200^2 , 300^2 とした場合も重ね書きしている。この図左上のステアパイワイヤの操舵トルク入力により、図右下のロール角応答から、実ロール角が目標ロール角に追従している様子がわかる。また、評価関数中のロール角に対する重みを大きくすることで、安定して追従性が向上していることが確認できる。

4.2 外乱入力に対する直立安定性

ライダからの入力がない場合において、操舵トルク外乱を入力した場合について検討する。シミュレーション結果を図5に示す。図5右上のような、振幅10Nm、周波数2Hzの操舵トルク外乱 t_{dir} を入力されても、図右下のロール角応答から、車両モデルの直立安定性が保たれていることが確認できる。また、ロール角への重みを増加させると、ロール角の収束が改善される。

4.3 二名乗車によるロバスト性

ここでは、二輪車の乗員のもっとも大きな質量変動を想定して、二名乗車時の制御系のロバスト性について検討する。まず、二名乗車の際に、操舵トルクを入力した場合の時系列応答を図6に示す。この図より、二名乗車時では、一名乗車時と比較して、ロール角や操舵角などは収束するが、操舵トルク入力後、2Hz程度の振動が発生することがわかる。制御系のロバスト性の比較対象としては、一名乗車時

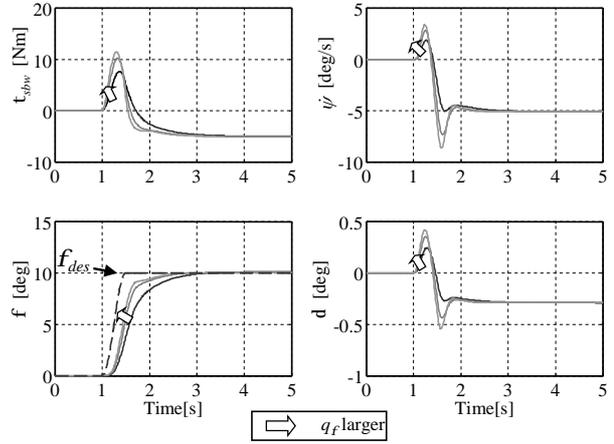


Fig.4 Time history of step response

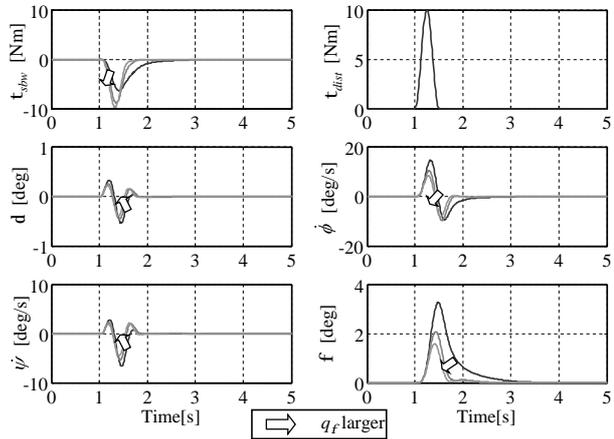


Fig.5 Time history under steering torque disturbance

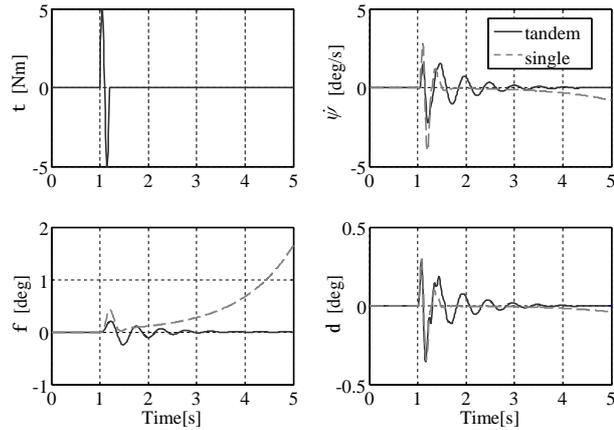


Fig.6 Time history of vehicle mode (single and tandem riding)

で設計した制御系による応答と同程度となるPD制御系を設計する。以下にPD制御系の概要を示す。

目標ロール角の変化は比較的小さく、その微分値は無視できるものとする、フィードバック制御による操舵トルク t_{fb} は以下のように表せる。

$$t_{fb} = -K_f \Delta \dot{f} - K_f \Delta f \quad (14)$$

ただし、 $\Delta \dot{f} = \dot{f}$ 、 $\Delta f = f - f_{des}$

このフィードバック制御は、ライダからの目標ロール角

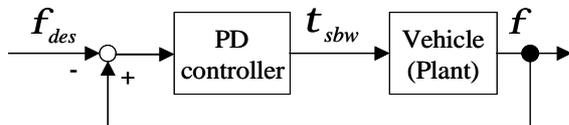


Fig.7 Block diagram of PD control

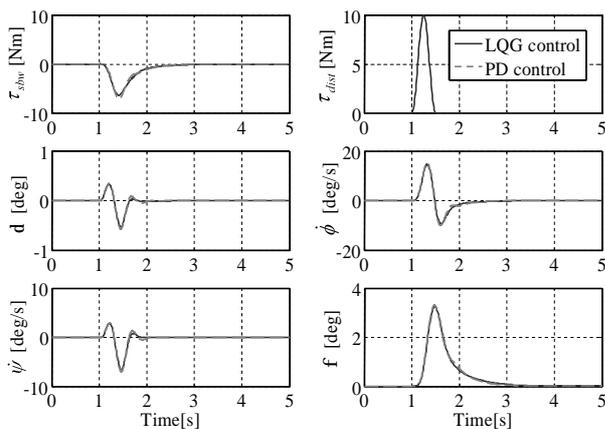


Fig.8 Time history of LQG and PD controls

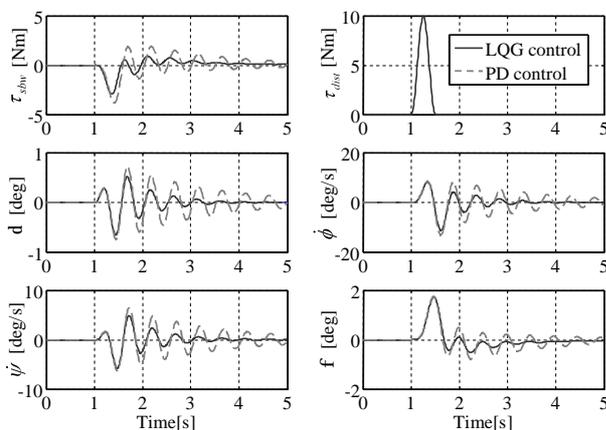


Fig.9 Time history with tandem riding

指令がない場合には、ロール角が0となるように作用し、直立安定化制御が実現される。このときのブロック線図を図7に示す。フィードバックゲインは、前述のLQG制御系と、ほぼ同じ効果が得られるように選定した結果、 $K_f = -111$ 、 $K_{\dot{f}} = -7.5$ となった。前節と同じシミュレーション条件で、

LQG制御とPD制御の比較を行ったものを図8に示す。この図より、乗車人員が一名の場合には、ほぼ同等の制御効果が得られることがわかる。次に、同じ制御系を用いて、車両モデルの乗車人員を二名にした場合のシミュレーション結果を図9に示す。同図右下のロール角の応答を比較すると、破線で示したPD制御の応答と比較して、LQG制御の収束が早いことがわかる。PD制御では、ロール運動に関してのみフィードバックが行われるのに大して、状態フィードバックをベースとするLQG制御では制御対象の動特性を考慮していることから、制御対象の特性が変動した場合であっても、PD制御の場合ほど制御効果が劣化しないことが考えられる。この結果、LQG制御を適用することで、乗車人員

が増えるような状況下でも、安定した制御効果が得られることが確認された。

5 結論

本研究では、二輪車のステアバイワイヤ技術について、高自由度モデルを用いたシミュレーションにより、有効性を検証した。結果を要約すると以下のようになる。

- 1) 車両モデルの入出力データから、システム同定を行い、制御対象の特性を再現するモデルを導出した。
- 2) ライダからの指令値に対応した目標ロール角に対して、車両の実ロール角が追従する事を確認した。また、重みを増やすことにより、追従性が向上することを示した。
- 3) ライダからの指令がない場合に、外乱入力に対して、直立安定性が保たれることを確認した。また、重みを増やすことにより、直立安定性が向上することがわかった。
- 4) 設計した制御系は、乗員数の変動に対してもロバスト性があることがわかった。

なお、本研究ではPD制御系の応答と比較してロバスト性を検証したが、ロバスト性を定量的に検証したわけではない。そのため、今後、制御系にロバスト制御理論を適用し、ロバスト性の定量的な検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 加藤喜昭, 細川光典, 森田真, 未来パーソナルモビリティ i-unit, 自動車技術, Vol.60, No.2, (2006), pp.97-102
- 2) 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
- 3) 金井喜美雄, 自動車のドライブバイワイヤ-航空機との共生, 自動車技術, Vol.58, No.4, (2004), pp.80-87
- 4) Y. Marumo and M. Nagai, Steering Control of Motorcycles Using Steer-by-Wire System, Vehicle System Dynamics, Vol.45, No.5, (2007), pp.445-458
- 5) R. S. Sharp, The Stability and Control of Motorcycles, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol.13, No.5, (1971), pp.316-329
- 6) バーチャルメカニクスホームページ, <http://www.virtualmechanics.co.jp/html/bs.html>
- 7) R. S. Sharp, D. J. N. Limebeer, A Motorcycle Model for Stability and Control Analysis, Multibody System Dynamics, Vol.6, No.2, (2001), pp.123-142
- 8) 足立修一, MATLABによる制御のためのシステム同定, 東京電機大学出版, (1996), pp.138-139
- 9) 鎌田豊, 西村秀和, 計算機支援機構解析による二輪車のモデル同定と前輪操舵制御, 日本機械学会論文集C編, Vol.69, No.681, (2003), pp.1309-1316
- 10) 鎌田豊, 西村秀和, 飯田英邦, 二輪車のシステム同定と前輪操舵制御, 日本機械学会論文集C編, Vol.69, No.688, (2003), pp.3191-3197