

二輪車のサポートシステムを想定した自立走行二輪車のロバスト走行安定化

Robust Stabilization of Running Self-sustaining Two-wheeled Vehicle for Bicycles Support System

○正 佐藤 拓史 (長岡技科大) 正 滑川 徹 (金沢大)

Hiroshi SATOH, Nagaoka University of Technology, 1603-1, Kamitomioka, Nagaoka, Niigata
Toru NAMERIKAWA, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, IshikawaKey Words: Self-sustaining two-wheeled vehicle, Robust stabilization of running, Attitude control,
Varying running speed, Mass variation

1. はじめに

自転車やオートバイといった二輪車は私たちに身近な乗り物である。特に自転車は通勤通学の交通手段にもよく用いられ、健康意識の向上や環境問題にも後押しされ、自転車の利用が再認識されつつある。しかし、二輪車はその構造上不安定な乗り物であるので、誰もがすぐに乗れるという乗り物ではない。

こうした二輪車を制御の対象とした研究も近年盛んに報告されてきており、静止時での安定化^{1),2)}や直進安定化³⁾カーブ走行⁴⁾に対する研究などが行われている。しかし、これらの研究では特定の条件下における安定化を扱っており、二輪車へのサポートシステムを想定しているとは言いがたい。二輪車のサポートシステムとしての利用を考えるならば、走行速度の変動や異なるライダーが乗車することによる質量変動を考慮した制御系を設計することが必要である。

本研究では、静止状態に限定した文献1)の数学モデルを走行安定化を目的とした数学モデルへ拡張する。二輪車のサポートシステムを想定し、二輪車の走行速度や異なるライダーの乗車などにより二輪車の質量が変動した場合においても安定した走行を実現させる制御系の構成を行う。二輪車の速度変動や質量変動に対して安定に走行できることを確認し、設計した制御器の有効性を示す。

2. モデリング

Fig.1 に自立走行二輪車のモデル図を示す。モデリングに際し、以下の仮定を設ける。

1. タイヤの横すべりは生じない。
2. 二輪車は走行ローラ上を直線走行をする。
3. 二輪車の傾き角、台車の変位、ハンドルの切れ角、二輪車の方位角は微小である。
4. 台車、ハンドルの駆動用モータは速度制御系が構成されたサーボアンプにより駆動される。
5. 線形化において2次以降の微小項は無視する。

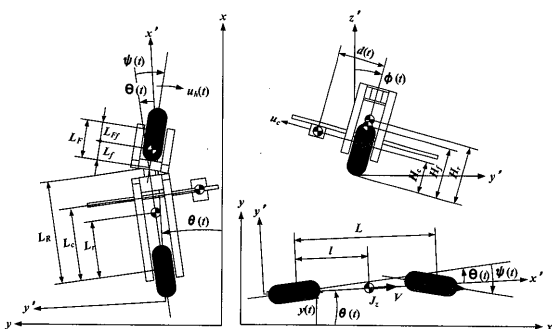


Fig. 1 Two-wheeled vehicle model

上記の仮定のもと運動方程式を導出する。二輪車が速度 V で走行する場合、静止時の場合¹⁾との違いは y 方向へ次式の並進運動を伴うことである。

$$\dot{y}(t) = V \sin \theta(t) - \frac{l}{L} V \sin \{\psi(t) - \theta(t)\} \quad (1)$$

以上の関係を考慮して Lagrange 法により運動方程式を導出し、平衡点 ($d(t) = \phi(t) = \psi(t) = \theta(t) = 0$) 周りで線形化を行うことで、次式の状態空間モデルを得る。モデリングの詳細については文献5)を参照されたい。

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha & 0 & 0 & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} & a_{68} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma & 0 \\ 0 & 0 & a_{83} & a_{84} & a_{85} & a_{86} & 87 & a_{88} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \beta & 0 \\ b_{61} & b_{62} \\ 0 & \delta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{43} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x \quad (2)$$

$$x = [d(t) \ \phi(t) \ \psi(t) \ \theta(t) \ \dot{d}(t) \ \dot{\phi}(t) \ \dot{\psi}(t) \ \dot{\theta}(t)]^T \quad (3)$$

ここで、式(2)中の各要素のうち、 $a_{67}, a_{68}, a_{83}, a_{84}, a_{85}, a_{86}$ 要素が走行速度に依存した要素となる。なお、二輪車の物理パラメータは同定実験によって求めた。

3. 制御系設計

まずはじめに、ノミナルモデルを設定する。ここでは、26インチの自転車を体重 65[kg]のライダーが運転することを想定する。実際の自転車では通常 20[km/h]程度で走行しているため、ノミナルモデルの走行速度を 10[km/h]で走行しているものと想定する。二輪車モデルを実際の自転車のスケールダウンモデルとして考えると、26インチの自転車が 10[km/h]で走行しているときのタイヤ回転数とほぼ一致する $V = 1.0$ [m/s] をノミナルモデルの走行速度に設定する。このとき、付加質量を搭載しない場合を体重 65[kg]のライダーが乗車するときと設定する。

制御器の設計には H_∞ 混合感度問題を用いて、一般化プラントを Fig.2 のように構成した。ここで、 W_1 は感度関数に関する重み、 W_2 は乗法的な不確かさに関する重み、 W_3 は制御入力に対する重み、 W_4 は入力外乱に対する重みである。

重み関数 $W_2(s)$ は走行速度と質量変動をモデルに生ずる不確かさとして扱い、想定する不確かさを覆う関数として次式に示す関数として設定した。

$$W_2(s) = \text{diag}(W_{21}, W_{22}, W_{23}, W_{24}) \quad (4)$$

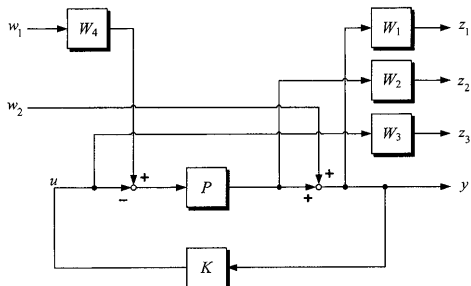


Fig. 2 Generalized plant

$$W_{21} = W_{22} = W_{23} = W_{24} = \frac{1}{8} \times \frac{0.5 \times 2\pi}{s + 0.5 \times 2\pi} \times \frac{s + 50 \times 2\pi}{50 \times 2\pi}$$

感度関数に対応する関数 W_1 は低周波数帯域で高ゲインになるように設定し、制御入力に対応する関数 W_3 は安定走行中に過度なハンドル操作を生じさせないように、台車の操作量に対する重みに比べて大きな値を設定する。重み関数 W_4 は入力外乱に対応する重みであるので、二輪車の姿勢変化に影響の大きい台車への入力外乱を抑えるように、ハンドルへの入力外乱に対する重みに比べて大きな値を設定する。これらの設計重みは走行実験の結果を踏まえながら最終的に次式のように設定した。

$$W_1(s) = \text{diag}(W_{11}, W_{12}, W_{13}, W_{14}) \quad (5)$$

$$W_3 = \text{diag}(15, 100), \quad W_4 = \text{diag}(50, 10) \quad (6)$$

$$W_{11} = \frac{35000}{s + 50}, \quad W_{12} = W_{13} = W_{14} = \frac{20}{s + 0.001}$$

4. 姿勢制御実験

得られたコントローラを 0.2[msec] で離散化して実装した。姿勢制御実験は安定走行中のインパルス外乱応答を行う。インパルス外乱応答は、安定走行中に台車の操作量 4.76[V] の電圧を 0.1[sec] 間印加した。ここでは、速度変動と質量変動について同様に実験する。

その応答結果の一例を Fig.3, 4 に示す。走行速度を 2.0[m/s] に変動させた場合を Fig.3 に、付加質量 1.49[kg] (質量比 18.5%) 搭載時した場合を Fig.4 に示す。グラフは上から台車の移動量、二輪車の傾き角、ハンドルの切れ角である。外乱はグラフの 1[sec] 時に印加している。グラフの実線がノミナルモデルの応答結果、破線が変動モデルの応答である。

Fig.3 では、ハンドル操作による修正動作が顕著に現れているが、二輪車の姿勢は良好である。この走行速度は、想定している自転車での走行速度 20[km/h] に相当している。Fig.4 では、外乱入力後の収束性はノミナルモデルと比べると若干劣り、収束までに約 5[sec] 要しているものの、こちらも良好な結果である。この結果は、実際の自転車ではゆっくりとした走行速度 10[km/h] で、体重 65[kg] のライダーから体重 80[kg] のライダーに代わったとしても発散することなく安定化することができることを示している。

これらの結果より、設計した制御器は実際の自転車で走行する速度域やライダーの変更に対しても、外乱が入力されたとしても安定な走行が実現できることを示しており、二輪車のサポートシステムとしての有効性が確認できる。

5. おわりに

本研究では、静止状態において安定化させる目的で開発した自立走行二輪車に対し、走行安定化を目的とした制御系を構成した。制御系設計問題を用いて安定化制御器を設計し、自立走行二輪車の走行速度を変動した場合と、付加質量を搭

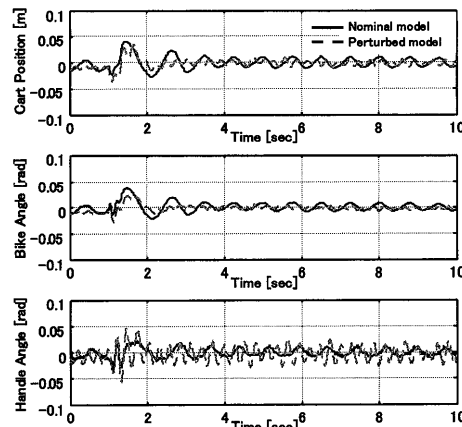


Fig.3 Experimental results for running vehicle at 2.0 [m/s]

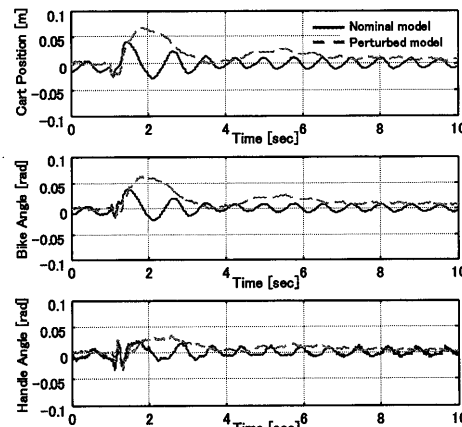


Fig.4 Experimental results for running vehicle with mass variation (1.49 [kg])

載した場合においても安定化が実現できた。このことにより、速度変動や質量変動に対して十分な制御性能を有しており、二輪車のサポートシステムへの利用が期待できる。しかし、台車系によるバランス装置はその形状が二輪車の横に張り出しているため、走行障害を引き起こす可能性がある。実際には、±10[cm] ほどのストロークがあれば安定化走行は可能であるが、サポートシステムの実用化のためには、台車系に代わるバランス装置の考案が必要である。

参考文献

- 1) 佐藤拓史, 滑川徹: 静止時における自立走行二輪車のモデリングとロバスト姿勢制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, No.719 (2006), pp.2130-2136
- 2) 山北昌毅, 関口和真, 歌野敦夫, 大田祐介, 池田貴幸, 倉林大輔: バランス搭載型二輪車の自動制御: 実験的検証, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006 予稿集, No.06-4 (2006), CD-ROM No.2P2-E25
- 3) 仁木宏, 村上俊之: ハンドル制御による電気自転車の走行安定化に関する一考察, 電気学会論文集 D, Vol.125, No.8 (2005), pp.779-785
- 4) 佐口太一, 吉田和夫, 高橋正樹: 自立走行自転車ロボットの安定化走行制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.73, No.731 (2007), pp.2036-2041
- 5) 佐藤拓史, 滑川徹: 速度と質量の変動に対する自立走行二輪車のロバスト走行安定化, 第 10 回「運動と振動の制御」シンポジウム 講演論文集, No.07-13 (2007), pp.55-60
- 6) 安部 正人: 自動車の運動と制御, (1992), 山海堂
- 7) 劉康志: 線形ロバスト制御, (2002), コロナ社