

## 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

○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-machi, Kanazawa, Ishikawa

Key Words: Self-sustaining Two-wheeled Vehicle, Robust Stabilization of Running, Attitude Control

## 1. はじめに

近年、二輪車を題材とした研究が盛んに行われてきている<sup>1)~3)</sup>。特に走行安定化を題材にした研究では、ハンドル操作のみを利用した報告が多い。著者らはこれまでに、二輪車を静止時において安定化させる目的で、ライダーの重心移動に相当する台車系とハンドル操作系を備えた小型の自立走行二輪車を製作し、姿勢制御実験を行うことでその有効性を示した<sup>4)</sup>。

本研究では、この自立走行二輪車に対して走行安定化を目的とした制御系を構成する。 $H_\infty$ 制御系設計問題により、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ロバスト制御器を設計する。走行実験により走行中に受ける外乱に対しても安定化可能であることを示す。また、二輪車の質量が変動した場合に対しても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<sup>4)</sup>

Fig. 1 に自立走行二輪車のモデル図を示す。

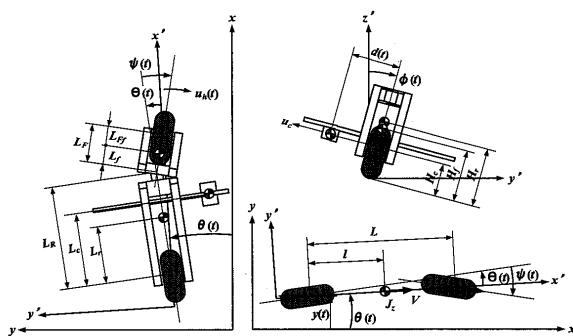


Fig. 1 Two-wheeled vehicle model

モデリングに際し、以下の仮定を設ける。ここでは、静止時のモデリングで必要となる仮定以外に、走行を考慮した場合に重要となる仮定のみを挙げる。

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。

上記の仮定のもと運動方程式を導出する。なお、以後の式中に現れる記号の説明を Table 1 に示す。二輪車が速度  $V$  で走行する場合、静止時の場合<sup>4)</sup>との違いは  $y$  方向へ次式の並進運動を伴うことである<sup>5)</sup>。

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

以上の関係を  $y$  方向の運動に考慮して 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。この際、ハンドルを切ることによって生ずる  $x'$  軸と後輪部とのなす角  $\Theta(t)$  は、二輪車が直線走行するものと仮定しているので、次式の近似式に置き換えて導出する。

$$\Theta(t) = \frac{L_F}{L_F + L_R} \psi(t) \quad (2)$$

また、台車系とハンドル系は仮定よりその運動方程式が次式で与えられるとして導出した<sup>6)</sup>。

$$\begin{cases} \ddot{d}(t) + \alpha \dot{d}(t) = \beta u_c(t) \\ \ddot{\psi}(t) + \gamma \dot{\psi}(t) = \delta u_h(t) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  はモータ系の物理パラメータである。

モデルの出力は台車の移動量  $d(t)$ 、二輪車の傾き  $\phi(t)$ 、ハンドルの切れ角  $\psi(t)$ 、後輪部の方位角  $\theta(t) + \Theta(t)$  であるので、状態量を式(4)と置けば、状態空間モデルは式(5)となる。

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} d(t) & \phi(t) & \psi(t) & \theta(t) & \dot{d}(t) & \dot{\phi}(t) & \dot{\psi}(t) & \dot{\theta}(t) \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha & 0 & 0 & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} & a_{68} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma & 0 \\ 0 & 0 & a_{83} & a_{84} & a_{85} & a_{86} & a_{87} & a_{88} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \beta & 0 \\ b_{61} & b_{62} \\ 0 & \delta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u \quad (5)$$

式(5)中の各要素の詳細は文献7)を参照されたい。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。静止時の場合には二輪車の方位角  $\theta(t)$  と走行速度  $V$  に関する項が存在しない。式(5)から上記の項を取り除くと静止時のモデルと一致する。静止時のモデリングについては文献4)を参照されたい。

3. 制御系設計<sup>8)</sup>

まず、二輪車に加わる外乱について考える。二輪車の姿勢は系を安定にする台車系とハンドル系の挙動に左右される。したがって、過度の操作量に加わると大きな姿勢変化を招くことになる。そこで、外乱  $w_1$  は操作量に起因する外乱として定義する。

さらに、モデル化の際の簡略化などによる起因するモデル

Table 1 Definition of Symbols

$M_f, M_r, M_c$	Mass of each part
$H_f, H_r, H_c$	Vertical length from a floor to a center-of-gravity of each part
$L_{Ff}, L_F$	Horizontal length from a front wheel rotation axis to a center-of-gravity of part of front wheel and steering axis.
$L_r, L_R$	Horizontal length from a rear wheel rotation axis to a center-of-gravity of part of rear wheel and steering axis.
$L_c$	Horizontal length from a rear wheel rotation axis to a center-of-gravity of the cart system.
$l$	Horizontal length from a rear wheel rotation axis to a center-of-gravity of Two-wheeled Vehicle.
$J_x, J_z$	Moment of inertia around center-of-gravity $x$ axially and $z$ axially.
$\mu_x, \mu_z$	Viscous coefficient around $x$ axially and $z$ axis.
$V$	Velocity of Two-wheeled Vehicle.
subscript $f, r, c$	Part of front wheel, rear wheel, and cart system respectively

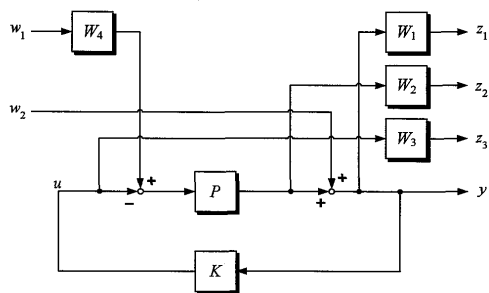


Fig. 2 Generalized plant

の不確かさや、ライダーの搭乗や荷物の搭載などの外的要因によっても二輪車の姿勢は左右される。そこで、これらをまとめて外乱 $w_2$ として定義する。

次に、被制御量を設定する。制御の基本仕様が二輪車の安定走行であるので、二輪車の姿勢 $(d(t), \phi(t), \psi(t), \theta(t))$ に重み付けした被制御量 $z_1, z_2$ を定義する。同様に過度の制御入力を抑えるために、制御入力 $u$ に重み付けした被制御量 $z_3$ を定義する。

最終的に、制御対象と重み行列をまとめて一般化プラントを Fig. 2 のように構成した。このように一般化プラントを構成すると、 $W_1$ 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に対応する。

本制御系設計での制御問題は、系を内部安定とし、かつ条件

$$\left\| \begin{matrix} T_{z_1 w_1}(s) & T_{z_1 w_2}(s) \\ T_{z_2 w_1}(s) & T_{z_2 w_2}(s) \\ T_{z_3 w_1}(s) & T_{z_3 w_2}(s) \end{matrix} \right\|_{\infty} < \gamma \quad (6)$$

を満たすコントローラ $K(s)$ を構成する問題である。ここで、 $T_{z_i w_j}(s)$ は外乱 $w_j$ から、被制御量 $z_i$ までの伝達関数行列を意味している。二輪車の走行速度は $V=1.0$  [m/s]として、安定化制御器を設計した。設計には次式の重みを用いた。

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

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

$$W_3 = \text{diag}(75, 110), \quad W_4 = \text{diag}(50, 10) \quad (7)$$

$$W_{11} = W_{12} = W_{13} = W_{14} = \frac{20}{s+0.001}$$

$$W_{21} = W_{22} = W_{23} = W_{24} = \frac{s+0.5 \times 2\pi}{0.5 \times 2\pi} \times \frac{10 \times 2\pi}{s+10 \times 2\pi}$$

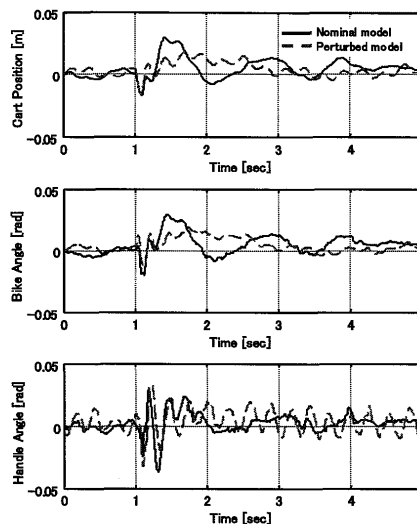


Fig. 4 Experimental results for running vehicle

#### 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。実験は、安定走行中に台車の操作量に 10 [N] 相当の電圧を 0.1 [sec] 間印加する。その応答結果を 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、破線が付加質量 1.25 [kg] (質量比 12.8 %) 搭載時の応答である。

ノミナルモデルでは、外乱入力後、一度大きな姿勢変化が起こるが、不安定になることなく姿勢を収束させ、安定走行できていることが確認できる。一方、付加質量を搭載した場合、外乱入力前からハンドルが小刻みに修正を繰り返しているが安定走行は実現できている。外乱入力後の姿勢の収束性は悪化するが、安定性は保たれている。付加質量 1.49 [kg] までは安定走行が実現できたが、それ以上は車体のふらつきが大きくなり、安定走行が不可能となった。

#### 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、走行を考慮したモデリングを行った。 $H_{\infty}$ 制御系設計により安定化制御器を設計し、姿勢制御実験を行った。実験の結果、インパルス状外乱が入力されても、安定に走行する制御系を構成することができ、付加質量を搭載した場合においても安定走行が実現できた。

#### 参考文献

- 1) 仁木, 村上: 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, 779/785 (2005)
- 2) 佐口, 高橋, 吉田: 自立走行自転車ロボットの安定化走行制御, D&D 2006 CD-ROM 論文集 (2006)
- 3) 山北, 関口, 歌野, 大田, 池田, 倉林: バランサー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, 2P2-E25 (2006)
- 4) 佐藤, 滑川: 静止時における自立走行二輪車のモデリングとロボスタ姿勢制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, No.719, 2130/2136 (2006)
- 5) 安部 正人: 自動車の運動と制御, 山海堂 (1992)
- 6) 高木 章二: メカトロニクスのための制御工学, コロナ社 (2000)
- 7) 佐藤, 滑川: 自立走行二輪車のロボスタ姿勢制御, 第 7 回 SICE SI 部門講演会 講演論文集, 832/833 (2006)
- 8) 細江, 荒木: 制御系設計- $H_{\infty}$ 制御とその応用-, 朝倉書店 (1994)