

自立走行二輪車のロバスト走行安定化

長岡技術科学大学 佐藤 拓史, 金沢大学 滑川 徹

Robust Stabilization of Running Self-sustaining Two-wheeled Vehicle

Hiroshi SATOH Nagaoka University of Technology, Toru NAMERIKAWA Kanazawa University

Abstract: This paper deals with robust stabilization problem of running self-sustaining two-wheeled vehicle. We have proposed the stabilization of Two-wheeled vehicle in the state of stillness, and have shown the effectiveness. In this research, we compose the control system that aims at the running stabilization of Two-wheeled vehicle. We use \mathcal{H}_∞ mixed sensitivity problem to design the controller to achieve stability running even if the mass of Two-wheeled vehicle changes. The experimental results show stability running vehicle even if the mass of Two-wheeled vehicle changes.

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^{1) - 3)}. 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, その有効性を示した⁴⁾.

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. 制御器の設計には \mathcal{H}_∞ 混合感度問題を用いて, 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. 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, 二輪車の質量変動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⁴⁾⁵⁾

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.

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⁴⁾ 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.

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

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

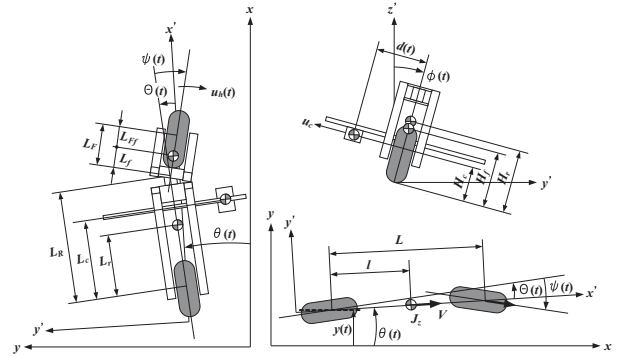


Fig.1 Two-wheeled vehicle model

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.

$$x = [d(t) \quad \phi(t) \quad \psi(t) \quad \theta(t) \quad \dot{d}(t) \quad \dot{\phi}(t) \quad \dot{\psi}(t) \quad \dot{\theta}(t)]^T \quad (4)$$

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

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{43} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x \quad (5)$$

ここで, 式 (5) 中の各要素は次式となる.

$$\begin{aligned} den &= M_f H_f^2 + M_r H_r^2 + M_c H_c^2 + J_x \\ a_{61} &= -\frac{M_c g}{den}, \quad a_{62} = \frac{(M_f H_f + M_r H_r + M_c H_c) g}{den} \\ a_{63} &= -\frac{(M_f L_F L_R + M_r L_r L_F + M_c L_c L_F) g}{(L_F + L_R) den}, \quad a_{65} = -\frac{M_c H_c \alpha}{den} \\ a_{66} &= -\frac{\mu_x}{den}, \quad a_{67} = \frac{M_f H_f L_F \gamma}{den} + \frac{L_L (M_f H_f + M_r H_r + M_c H_c) V}{(L_F + L_R)^2 den} \\ a_{68} &= -\frac{(M_f H_f + M_r H_r + M_c H_c) V}{den}, \quad a_{83} = -\frac{L_L (M_f + M_r + M_c) V^2}{(L_F + L_R)^2 J_z} \\ a_{84} &= \frac{(M_f + M_r + M_c) V^2}{J_z}, \quad a_{85} = -\frac{M_c V}{J_z} \\ a_{86} &= \frac{(M_f H_f + M_r H_r + M_c H_c) V}{J_z} \\ a_{87} &= \frac{(M_f L_F L_R + M_r L_r L_F + M_c L_c L_F) V}{(L_F + L_R) J_z}, \quad a_{88} = -\frac{\mu_z}{J_z} \\ b_{61} &= \frac{M_c H_c \beta}{den}, \quad b_{62} = -\frac{M_f H_f L_F \delta}{den}, \quad c_{43} = \frac{L_F}{L_F + L_R} \end{aligned}$$

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

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.
μ_x, μ_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

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⁶⁾

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。

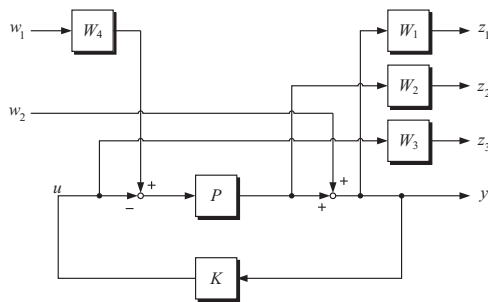


Fig.2 Generalized plant

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。

$$\begin{aligned}
 W_1 &= \text{diag}(W_{11}, W_{12}, W_{13}, W_{14}) \\
 W_2 &= \text{diag}(W_{21}, W_{22}, W_{23}, W_{24}) \\
 W_3 &= \text{diag}(75, 110), \quad W_4 = \text{diag}(50, 10) \\
 W_{11} &= W_{12} = W_{13} = W_{14} = \frac{20}{s+0.001} \\
 W_{21} &= W_{22} = W_{23} = W_{24} = \frac{0.5 \times 2\pi}{s+0.5 \times 2\pi} \times \frac{s+10 \times 2\pi}{10 \times 2\pi}
 \end{aligned} \tag{6}$$

得られたコントローラ K のゲイン線図を Fig.3 に示す。

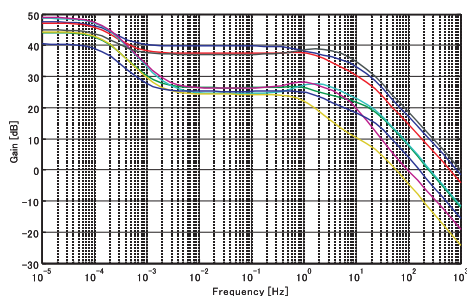


Fig.3 Gain diagram of controller K

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。

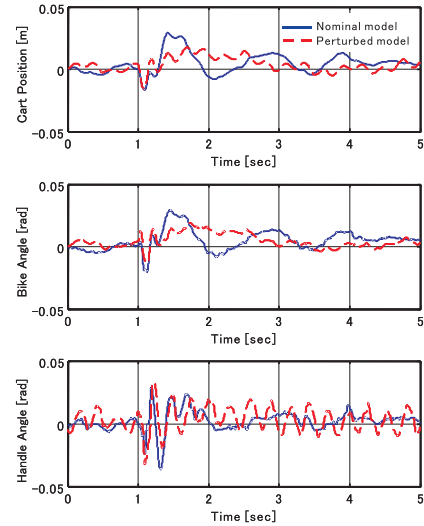


Fig.4 Experimental results for running vehicle

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_∞ 混合感度問題を用いた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) 宮崎, 池田, 山北, 太田, 倉林, 広瀬: バイク型二輪車両の走行制御, ロボティクスシンポジウム予稿集, Vol.10, 447/452 (2005)
- 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) 細江, 荒木: 制御系設計 - H_∞ 制御とその応用 -, 朝倉書店 (1994)