

# 低速走行時における二輪車の安定制御\*

7T-5

○高野義規 小野田晴康 志田晃一郎 藤川英司 山田新一†  
武蔵工業大学‡

## 1 序論

本研究では、二輪車について、不安定であり、制御するのが困難である低速走行時における動作を取り扱う。操作としては人間同様、ハンドルと体重移動を考え、低速走行を前提として二輪車のモデリングをする。安定でかつ、目標の軌道に追従し、さらに横風などの外乱に対しても強い制御系の確立をめざす。

## 2 二輪車の運動方程式

図1に二輪車のモデルを示す。二輪車の横変位  $y$  に関する式は幾何学的解析モード、傾き角  $\theta$  に関する式は倒立振り子モードと記述することができる。このときの制御対象の状態方程式、観測方程式は、それぞれ (1), (2) 式のようになる。

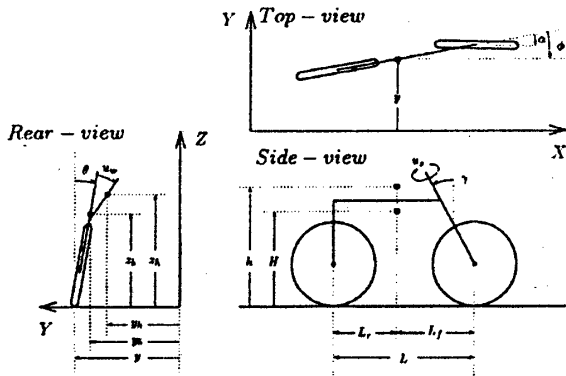


図1: 二輪車の理論モデル

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{y} \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega^2 & \omega^2 & 0 \end{bmatrix}}_{A_p} \begin{bmatrix} \phi \\ y \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & + \underbrace{\begin{bmatrix} Q & 0 \\ -QL_r & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & (f_\theta - f_u)g \end{bmatrix}}_{B_p} \begin{bmatrix} U_s \\ U_\omega \end{bmatrix} \quad (1) \\ \dot{Y}_p & = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega^2 & \omega^2 & 0 \end{bmatrix}}_{C_p} \begin{bmatrix} \phi \\ y \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \\ & + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -f_u \end{bmatrix}}_{D_p} \begin{bmatrix} U_s \\ U_\omega \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

## 3 2自由度制御系による制御系設計

二輪車をプラントと見なすと、2入力2出力のシステムであり、(1),(2)式より(3)式と表せる。このシステムに対して2自由度制御系を構成する。まず既約分解形  $P = ND^{-1} = \tilde{D}^{-1}\tilde{N}$  とベズー等式  $XN + YD = \tilde{N}\tilde{X} + \tilde{D} + \tilde{Y} = I$  の解  $X, Y, \tilde{X}, \tilde{Y}$  を求める。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y \\ \theta \end{bmatrix} & = P \begin{bmatrix} u_s \\ u_\omega \end{bmatrix} \quad (3) \\ P & = C_p(sI - A_p)^{-1}B_p + D_p \\ & = \begin{bmatrix} \frac{-Q(sV + L_r)}{s^2} & 0 \\ \frac{Q\omega^2}{s^2} \frac{s^3V + s^2(L_r + \omega^2L - \omega^2V - \omega^2L_r)}{s(s^2 - \omega^2)} & \frac{-f_u s^2 + f_\theta \omega^2}{s^2 - \omega^2} \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1 s + \alpha_2}{\beta_5 s^3 + \beta_6 s^2} & 0 \\ \frac{\beta_1 s^3 + \beta_2 s^2 + \beta_3 s + \beta_4}{\beta_5 s^3 + \beta_6 s^2} & \frac{\gamma_1 s^2 + \gamma_2}{s^2 + \gamma_3} \end{bmatrix} \quad (4) \end{aligned}$$

2自由度制御系では目標値応答特性とフィードバック特性を独立に設計できる。そこで本研究ではフィードバック特性として外乱応答特性を選び、目標値応答特性と外乱応答特性とを独立に設計することを考える。この時の特性方程式は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{目標値応答特性} \quad G_{ry} & = NK, \quad K \in RH_\infty, \\ \text{外乱応答特性} \quad G_{dy} & = (\tilde{Y} - NR)\tilde{N}, \quad R \in RH_\infty. \end{aligned}$$

上式で与えられる目標値応答特性と外乱応答特性に対する一般解は次のようになる。

\*Stability Control of Two-wheeled Vehicle at Low Speed  
†Yoshinori Takano, Haruyasu Onoda, Koichiro Shida, Hideji Fujikawa, Shin'iti Yamada  
‡Musashi Institute of Technology

$$G_{ry} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11} \prod_{i=1}^{m_1} (s+\gamma_i)}{\prod_{i=1}^{l_1} (s+\alpha_i)} & \frac{a_{12} \prod_{i=1}^{m_2} (s+\gamma_i)}{\prod_{i=1}^{l_2} (s+\alpha_i)} \\ \frac{a_{21} \prod_{i=1}^{m_3} (s+\gamma_i)}{\prod_{i=1}^{l_3} (s+\alpha_i)} & \frac{a_{22} \prod_{i=1}^{m_4} (s+\gamma_i)}{\prod_{i=1}^{l_4} (s+\alpha_i)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$G_{dy} = \begin{bmatrix} \frac{b_{11} \prod_{i=1}^{n_1} (s+\gamma_i)}{\prod_{i=1}^{n_1+1} (s+\alpha_i)} & \frac{b_{12} \prod_{i=1}^{n_2} (s+\gamma_i)}{\prod_{i=1}^{n_2+1} (s+\alpha_i)} \\ \frac{b_{21} \prod_{i=1}^{n_3} (s+\gamma_i)}{\prod_{i=1}^{n_3+1} (s+\alpha_i)} & \frac{b_{22} \prod_{i=1}^{n_4} (s+\gamma_i)}{\prod_{i=1}^{n_4+1} (s+\alpha_i)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで(5)式において  $l \geq m+1 \geq 1$  であり,  $K$  は  $N^{-1}(G_{ry})$  と計算できる. また, (6)式において  $n \geq 1$  であり,  $R$  は  $N^{-1}(\dot{Y} - G_{dy}\dot{N}^{-1})$  と計算できる.

二輪車の場合には, 目標値応答は横変異  $y$  に関する応答とみなすことができる. さらに横変位のみを使用し, 傾き角の応答は 0 とした. 一方, 外乱応答は, 横風などに対して押えるような設計をしなければならない. 今回は  $(d_\theta - \theta)$  の外乱応答のみを使用した. 一般的には制御系の次数は低い方が望ましいので, 一般解の中でもっとも次数が低い場合を使って設計例とし, その時のシステムの制御特性を以下に示す. また, シミュレーションで使用した条件は(7),(8)式で  $q_{11} = q_{12} = q_{41} = q_{43} = q_{44} = 1, q_{42} = 0$  とした.

$$G_{ry} = \begin{bmatrix} p_{11}/(s+p_{12}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$G_{dy} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & q_{41}(s+q_{42})/(s+q_{43})(s+q_{44}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

## 4 シミュレーション

本設計法の有効性をシミュレーションにより確かめる. 2自由度制御系は  $z$  変換して離散系で計算する. 二輪車の運動は4次ルンゲクッタ法により連続系で計算する.

操作として, ハンドルと体重移動を考えているが, コントローラで計算された指令通りにアクチュエータが動くとは考えにくい. しかし, シミュレーションではアクチュエータの誤動作を外乱と仮想的な外乱の和と考え, この外乱を押えることにより理想通りに動くものとする.

以上より, 二輪車の横変異に初期誤差がある場合や目標値に追従するような場合, ステップや周期外乱がある場合などの条件を想定してシミュレーションを行ない制御則の有効性を確かめた. 図2は横変位を 2.5m から 1.0m まで変化させたときの目標値応答である. オーバーシュートのあまりない2自由度制御系の特徴が明らかであり, 進路変更する際の傾き角  $\theta$  の変化もうまく抑えられている. 次に, 走行時に横風や各種振動の影響を調べるため, 図3に最大値 0.8N で 1.5Hz の正弦波振動を加えたときの応答を示す. 結果としてハンドル操作と体重移動

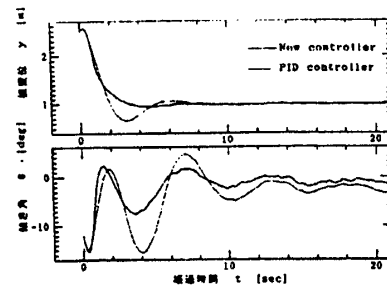


図2: 横変位目標値に対する応答

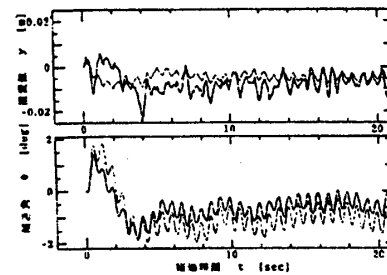


図3: 周期外乱に対する応答

操作の調和がうまくとれ車体を安定に保っているが, ハンドルの機敏な動きが要求されている.

## 5 結論

2自由度既約分解法は, 設計の自由が利き, 見通しが立ちやすいという長所がある反面, 計算量が多くなるという欠点があり大規模システムにはあまり向いていない. 本研究で取り扱っているシステムは, 2入力2出力であるが, 二輪車の特徴, つまり, 目標値応答を横変位  $y$  に関する応答とみなすことができるということを用いて計算量を減少させることができる.

この制御則を二輪車に適用することにより, 従来の方法ではなかなか実現が難しかった2つの入力, ハンドル操作と体重移動操作をうまく調和して目標値追従特性と外乱抑制特性の2つの特性を同時に満たすことができた.

## 参考文献

- [1] 永井正夫, 二輪車のモデリングと制御機構, 自動制御連合講演会, No.32, pp.113-118(1991).
- [2] 塚田幸男, 江上正, 低速時における二輪車の最適予見軌道制御, 日本機械学会論文集 (C) 編 60 巻, 573 号, pp.168-173(1994)