

低速走行時における二輪車の安定制御*

4D-3

○小野田晴康 山田新一 藤川英司†
 武蔵工業大学 ‡

1 はじめに

二輪車は、四輪車と比べて動的に不安定であるにも関わらず、誰でも容易に乗ることができる便利な乗り物である。しかしその運動上のメカニズムは、まだ詳しくわかっていない。

本研究では二輪車のモデルを、実際のモデルに近いマン-マシンシステムのモデルと考え、二輪車にとって不安定である低速走行で安定を保てるような、制御則を確立することを目的とする。制御アクチュエータとしては、人間の動作と同じハンドル操作と体重移動操作とを考える。そして、目標値追従特性とロバスト安定化特性とを独立に設計できる2自由度制御則を適用した場合の設計法と、その有効性について述べる。

2 二輪車のモデリング

まず、制御対象である二輪車をモデリングする際、次のような仮定を導入して式を簡単化する^{[1][2]}。

- ・ 一定の低速走行で、タイヤの横滑りはない
- ・ 慣性乗積、ハンドル系の慣性などは無視できる
- ・ 車体の傾き角、横向き角、ハンドル角は微小

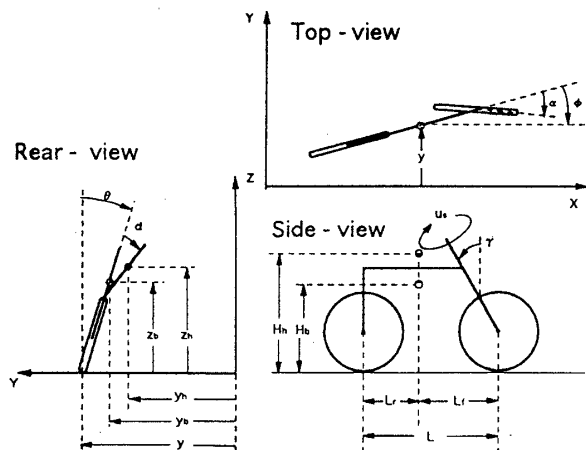


図1：二輪車の理論モデル

図1に二輪車の理論モデルを示す。このときの制御対象の状態方程式、観測方程式は式(1)、(2)のようになる。

$$\dot{X} = AX + BU \quad (1)$$

$$Y = CX + DU \quad (2)$$

ここで、状態変数ベクトル X と出力変数ベクトル Y 、係数行列 A, B, C, D は次のようになっている。 ϕ はヨー角、 y は横変位、 θ はロール角、 v_1, v_2 は、ロールまわりのパラメータ、 V は前進速度、 I は二輪車の重心まわりの慣性モーメント、 J は人間の慣性モーメント、 M, m はそれぞれ二輪車、人間の質量を表す。 U は制御入力である。

$$X = \begin{bmatrix} \phi & y & v_1 & v_2 \end{bmatrix}^T \quad Y = \begin{bmatrix} y & \theta \end{bmatrix}^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega^2 & \omega^2 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ QL_r & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & (f_\theta - f_u)g \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\omega^2}{g} & \frac{\omega^2}{g} & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -f_u \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} * \quad Q &= \frac{V}{L} \cos \gamma, \quad \omega^2 = \frac{(MH+mh)g}{I+J+MH^2+mh^2} \\ f_\theta &= \frac{M}{MH+mh}, \quad f_u = \frac{mh}{I+J+MH^2+mh^2} \\ v_1 &= y + \frac{\theta + (f_u u_w)g}{\omega^2} \end{aligned}$$

3 2自由度制御系を用いた設計

本研究で用いた2自由度制御系^{[3][4]}のブロック図を図2に示す。この制御系は、フィードフォワード補償とフィードバック補償とを共有する形となっている。この2つの補償要素をもつ制御系を二輪車モデルに適用すると、操舵応答特性改善にはフィードフォワード補償、外乱抑制及びロバスト性向上のためにはフィードバック補償というように、役割分担を決めて設計できるという利点が生まれる。このとき、2自由度制御系の補償器は、

$$\begin{bmatrix} u_s \\ u_w \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} C_1 & -C_2 \end{bmatrix}}_{C_B} \begin{bmatrix} y^* \\ \theta^* \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

*Stability Control of Two-wheeled Vehicles at Low Speeds

†Haruyasu Onoda Shin-ichi Yamada Hideji Fujikawa

‡Musashi Institute of Technology

1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo 158, Japan

となる。制御入力 U はハンドル操作 u_s と体重移動操作 u_w である。

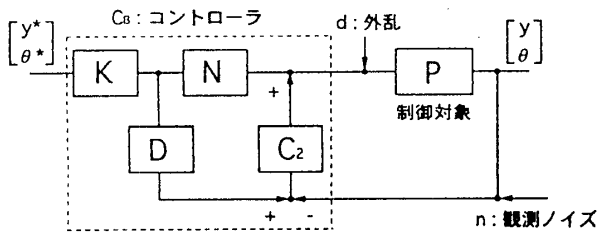


図2: 制御系のブロック図

次に、図2において制御系の内部を安定にするすべてのプロパーな安定化補償器 C_B のクラスを求める。まず制御対象の伝達関数 P の既約分解形を求める。

$$P = B(sI - A)^{-1}C + D = \underbrace{ND^{-1}}_{\text{右既約分解}} = \underbrace{\tilde{D}^{-1}\tilde{N}}_{\text{左既約分解}} \quad (4)$$

ここで、 $N, D, \tilde{N}, \tilde{D} \in RH_\infty$ である。 $(RH_\infty$ とはプロパーかつ安定な実係数安定行列の集合を表す)そして、ベズー等式 $XN + YD = \tilde{N}\tilde{X} + \tilde{D}\tilde{Y} = I$ を満たす解 $X, Y, \tilde{X}, \tilde{Y} \in RH_\infty$ を求める。すると安定化補償器 C_B のクラスは

$$C_B = (Y - R\tilde{N})^{-1} [K \quad -(X + R\tilde{D})] \quad (5)$$

で与えられる。また、このとき安定化補償器 C_B によって達成可能な伝達関数のクラスは、

目標値応答特性	$G_{ry} = NK$
外乱応答特性	$G_{dy} = (\tilde{Y} - NR)\tilde{N}$
ノイズ応答特性	$G_{ny} = -N(X + R\tilde{D})$
感度関数	$S = (\tilde{Y} - NR)\tilde{D}$
相補感度関数	$T = I - S = N(X + R\tilde{D})$

となる。2自由度制御系では伝達関数の設計の自由度は、 $K, R \in RH_\infty$ の2つなので、独立に設計できる伝達関数は G_{ry} と (G_{dy}, G_{ny}, S, T) の中から1つの計2つである。本研究ではフィードバック特性として外乱応答特性 G_{dy} 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。この場合の残りの伝達関数、安定化補償器との関係を示す。

$$\begin{aligned} S &= G_{dy}P^{-1} \\ T &= I - S \\ G_{ny} &= S - I = G_{dy}P^{-1} - I \\ C_B &= [G_{dy}^{-1}G_{ry} \quad -(G_{dy}^{-1} - P^{-1})] \end{aligned}$$

4 計算機シミュレーション

シミュレーション結果の例を図3に示す。図は横交位0.5[m]の車線変更をさせたときの結果である。二輪車の前進速度は1.5[m/s]とする。二輪車の運動は4次のルンゲクッタで計算し、時間刻みは50.0[ms]とする。

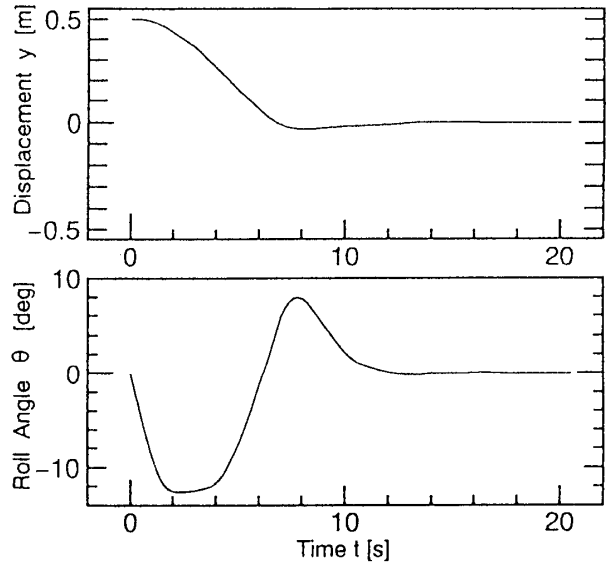


図3: シミュレーション結果

5 まとめ

本論文では、もっとも不安定である低速走行時の二輪車を安定走行させるために、操舵応答特性に関する制御目標と、外乱抑制・ロバスト性向上に関する制御目標とをそれぞれ独立に設計できる2自由度制御系の考え方を適用した設計法について述べた。

さらに、シミュレーションによって制御目標どおりの特性が得られることを確認した。

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, pp168-173(1994)
- [3] Toshiharu Sugie and Tsuneo Yoshikawa: General Solution of Robust Tracking Problem in Two-Degree-of-Freedom Control System, IEEE Trans. Automat. Contr. vol.AC-31, pp.552-554(1986)
- [4] 前田肇, 杉江俊治: アドバンスト制御のためのシステム制御理論, システム制御情報学会編, 朝倉書店(1990)