

ハンドル操作を考慮した二輪車の安定化制御
Stabilizing Control of a Two-Wheeled Vehicle with Handle Manipulation

○ 佐藤 拓史 (長岡高専) 正 川谷 亮治 (福井大)
Hiroshi SATOH and Ryoji KAWATANI
Nagaoka College of Tech., 888, Nishi-katakaimachi, Nagaoka-shi, Niigata
Fukui University, 3-9-1, Bunkyo, Fukui-shi, Fukui

1. はじめに

二輪車やバイクなどの二輪車系は身近にある不安定系の1つである。これに対して人間は学習を繰り返すことによって、五感に基づくフィードバック制御による安定走行を実現している。

二輪車の安定化を題材にした研究では、人間にとっても容易なことではない二輪車の静止状態における安定化について議論されており、良好な成果を収めてきた^{1) 2)}。このうち文献²⁾の場合、安定化は二輪車に取り付けたモータ駆動による台車の移動を利用しており、ハンドル操作は考慮されていない。しかし、二輪車においてハンドル操作は走行時における操縦や安定化にとって欠くことのできないものである。

そこで、本研究では、台車の移動に加えてハンドル操作も考慮に入れた二輪車の安定化制御問題を議論し、従来の結果との比較を通して、二輪車の安定化に対するハンドル操作の有効性を検討することを目的とする。

2. モデリング

以下に示す仮定の下で、ハンドル操作を考慮した二輪車に対する数式モデルを導出する。

- (1) 二輪車の傾き角、台車の変位、ハンドルの切れ角は微小である。
- (2) タイヤは横方向へのすべりを生じない。
- (3) 台車-ハンドルの各接点では、すべりを生じない。
- (4) 台車、ハンドルは速度制御系が構成されたサーボモジュールにより駆動される。

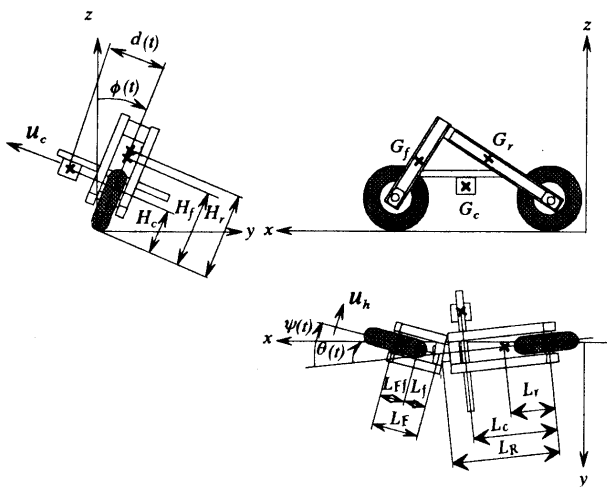


Fig. 1 : A two-wheeled vehicle model with handle manipulation

Fig. 1 に示すハンドル操作を考慮した二輪車に対して、Lagrange 法に基づいて非線形運動方程式を導出するが、ハンドルを切ることによって生ずる二輪車のヨー角 $\theta(t)$ は

直接観測することができない。しかし、Fig. 1 の幾何学的関係から $\theta(t)$ は次式として表せる。

$$\theta(t) = \tan^{-1} A$$

$$= \sin^{-1} \frac{A}{\sqrt{1+A^2}} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1+A^2}} \quad (1)$$

ここで、

$$A = \frac{L_F \sin\{\psi(t)\}}{L_R + L_F \cos\{\psi(t)\}} \quad (2)$$

である。

これらを Lagrange の運動方程式に代入し、平衡点 ($d(t) = \phi(t) = \psi(t) = 0$) 周りで線形化を行うことにより線形運動方程式を得る。ただし、仮定より二輪車モデルの台車、ハンドル系は速度制御系が構成されたサーボモジュールにより駆動されるので、(3) 式のように近似できる。

$$\ddot{d}(t) + \alpha \dot{d}(t) = \beta u_c$$

$$\ddot{\psi}(t) + \gamma \psi(t) = \delta u_h \quad (3)$$

以上より、ハンドル操作を考慮した二輪車の特性を与える微分方程式は次式となる。

$$\ddot{\phi}(t) = -\frac{M_c g}{den} d(t) + \frac{(M_f H_f + M_r H_r + M_c H_c)g}{den} \phi(t)$$

$$+ \frac{(M_f L_r L_f + M_c L_c L_f + M_f L_f L_r)g}{(L_R + L_F) den} \psi(t)$$

$$- \frac{M_c H_c \alpha}{den} \dot{d}(t) - \frac{\mu_X}{den} \dot{\phi}(t) + \frac{M_f H_f L_f \gamma}{den} \psi(t)$$

$$+ \frac{M_c H_c \beta}{den} u_c(t) - \frac{M_f H_f L_f \delta}{den} u_h(t)$$

$$\ddot{d}(t) = -\alpha \dot{d}(t) + \beta u_c(t)$$

$$\ddot{\psi}(t) = -\gamma \psi(t) + \delta u_h(t)$$

ここで、

$$den = M_f H_f^2 + M_r H_r^2 + M_c H_c^2 + J_X$$

である。式中、 M : 質量、 H : 床から重心までの距離、 L : タイヤ中心からの距離、 J_X : X 軸方向の重心周りの慣性モーメント、 μ_X : X 軸方向の粘性係数、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: 台車、ハンドルの物理定数である。添え字 c, f, r はそれぞれ台車、前輪部、後輪部を表している。

Table 1 : Physical parameters of two-wheeled vehicle model with handle manipulation

| | | | | | |
|------------|--------|------------|-------|-------------------------------|--------|
| M_f [kg] | 2.14 | M_r [kg] | 5.91 | M_c [kg] | 1.74 |
| H_f [m] | 0.0800 | H_r [m] | 0.161 | H_c [m] | 0.0980 |
| L_f [m] | 0.0940 | L_r [m] | 0.128 | L_c [m] | 0.259 |
| L_F [m] | 0.133 | L_R [m] | 0.308 | J_X [kgm ²] | 0.2 |
| α | 905 | β | 255 | μ_X [kgm ² /s] | 0.0333 |
| γ | 176 | δ | 395 | | |

ハンドル操作を考慮した二輪車に使用する物理パラメータを Table 1 に示す。

3. 制御器の設計

本研究では H^∞ 制御系設計手法の 1 つであるループ整形設計手法³⁾を用いて制御器の設計を行う。

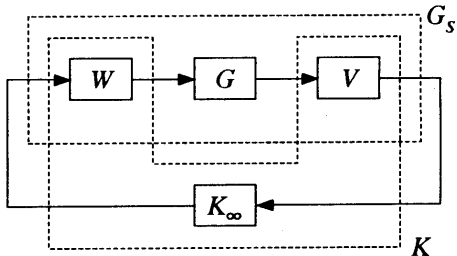


Fig.2 : Loop shaping design procedure

ここで、 W , V は閉ループ系の特性改善に関連した重み行列であり、これらを適切に選ぶことにより、ループ整形の立場から希望する閉ループ特性をもつ制御器を設計することができる。ここでは、二輪車の安定化に対して、台車の移動とハンドル操作それぞれが有効な制御帯域が異なると考え以下のように設定した。

$$W_c = \frac{250}{s+500}, W_h = \frac{1}{s+1}, V = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 \\ 0 & 0 & 40 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(5) 式の W_c は台車に対して、 W_h はハンドルに対する重み伝達関数である。

これらの重みに対して設計したコントローラのゲイン特性ならびに閉ループ特性を Fig.3, 4 に示す。

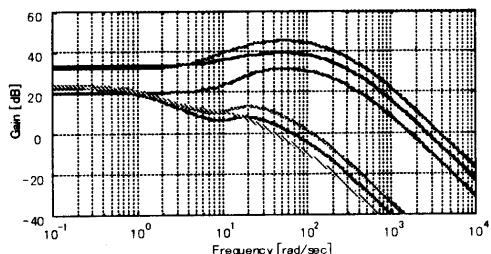


Fig.3 : Bode diagram of a designed controller

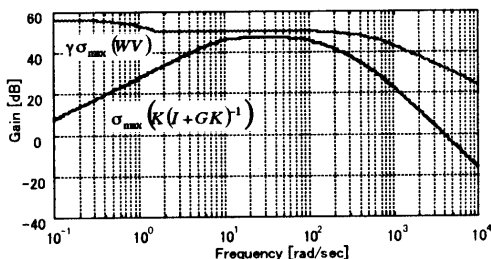


Fig.4 : Bode diagram of shaped model

5. 制御実験

前節で得られたコントローラとハンドルを固定したモデルに対して設計したコントローラをサンプリング時間 0.5 [msec] で離散化し、制御系実装ツール DSP-CIT を利用して実装し、制御実験を行った。その結果の一例を Fig.5, 6 に示す。

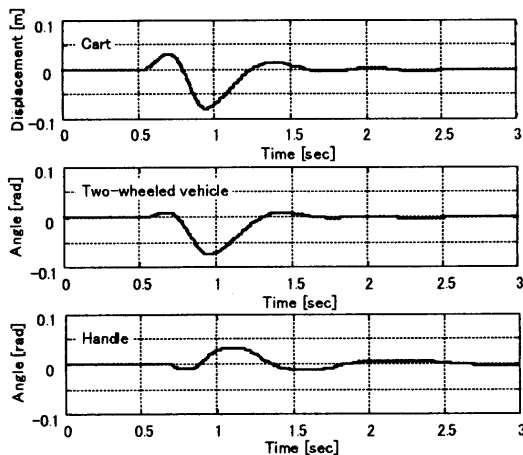


Fig.5 : Impulse response in experiment with handle manipulation

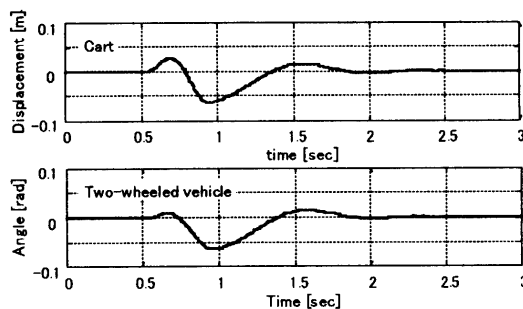


Fig.6 : Impulse response in experiment with non-handle manipulation

それぞれ二輪車にインパルス状の外乱を与えたときの応答結果であるが、ハンドルを考慮したコントローラの方が収束性の改善が見られている。ハンドル操作を有効に行うことで性能改善を行うことができる。

6. 結論

不安定システムの一つである二輪車に対して、ハンドル操作を考慮した安定化制御について議論し、良好な制御系を設計することができた。

参考文献

- 1) 中野, 岩崎, 大根: マイクロジャイロを用いた無人自転車の安定化制御, 計測自動制御学会第 40 回自動制御連合講演会・前刷, 343/344 (1997)
- 2) 佐藤, 川谷: 二輪車の安定化制御, 日本機械学会北陸信越支部第 33 期総会・講演会論文集, 289/290 (1996)
- 3) D.C.McFarlane & K.Glover: Robust Controller Design Using Normalized Coprime Factor Plant Description, Lecture Notes in Control and Information Science (1990)
- 4) 美多: H^∞ 制御, 昭光堂 (1994)
- 5) 細江, 荒木: 制御系設計 H^∞ 制御とその応用, 朝倉書店 (1994)
- 6) 中村, 川谷: 二輪車に対するロバスト安定化, 日本機械学会創立 100 周年記念北陸信越支部講演会・講演論文集 (1998)