慣性ロータを用いたバイク型二輪車の姿勢制御 (模型実験用車体の開発)

Control of a Motorcycle Type Two-Wheeled Vehicle Using an Inertia Rotor (Development of a Model Vehicle for Model Experiments)

○学 池田 友宏・愛工大 学 朝蔭 規文・愛工大 正 渡辺 修・愛工大

Tomohiro Ikeda(Aichi Institute of Technology)
Kiyoshi Asakage(Aichi Institute of Technology)
Osamu Watanabe(Aichi Institute of Technology)

Key Words: Two-Wheeled Vehicle, Inertia Rotor, Stabilization

1. 緒言

近年シミュレーション技術の発達にともない、二輪車の運動解析などにもこれを用いることが多くなってきている。一方実験によるシミュレーション結果の検証もますます重要となってきた。ライダーが実車を用いて検証実験を行う場合、安全性や再現性などの面から制約が課せられることは明らかであろう。模型二輪車を任意の状態で行走させることができれば、シミュレーションの検証のほか路面状況の急変や突風の影響、また転倒時など、様々な条件下での挙動を明らかにする模型実験も可能になることが期待できる。

二輪車の安定化に関する研究はこれまで多くなされており、様々な知見が報告されている。例えば佐藤ら⁽¹⁾は台車を用いた重心移動機構による二輪車の安定化制御、佐口ら⁽²⁾はハンドル制御による自転車ロボットの安定化走行制御を行っている。しかし模型実験に使用することを念頭にいた、制御が容易で行走特性が優れた模型二輪車の開発例は少ないように思われる。

本研究では、このような背景の下、さまざまな走行姿勢をとることができ、また再現性のある走行が可能なバイク型模型二輪車を開発し、その特性について検討した。

2. 二輪車のモデル化

二輪車の運動は複雑であり、厳密にモデル化し制御を行うことは困難であるため、ここでは二輪車のロール方向の運動を Fig.1 に示すように倒立振子に置きかえ、これを慣性ロータを用いて安定化制御することとした。はじめに、この系に対する運動方程式の導出を行う。Table 1 に用いた記号を示す。

Fig.1 Simplified model of two-wheeled vehicle

車体と慣性ロータの運動エネルギー、位置エネルギー、散逸エネルギーを求め、ラグランジュ法を用い運動方程式を導出した。さらに、二輪車が $\theta=0$ 近傍で制御できるとして、 $\cos\theta \doteq 1, \sin\theta \doteq \theta$ と近似することにより、車体に対しては式(1)、慣性ロータに対しては式(2)の運動方程式が得られる。

$$\ddot{\theta} = \frac{m_1 g L_1 + m_2 g L_2}{d} \theta - \frac{\mu_1}{d} \dot{\theta} + \frac{\mu_2}{d} \dot{\phi} - \frac{1}{d} \tau \quad (1)$$

$$\ddot{\phi} = -\frac{m_1 g L_1 + m_2 g L_2}{d} \theta + \frac{\mu_1}{d} \dot{\theta} - \frac{(d+J_2)\mu_2}{dJ_2} \dot{\phi} - \frac{d+J_2}{dJ_2} \tau \quad (2)$$

ここで、 $d = J_1 + m_1 L_1^2 + m_2 L_2^2$ とおいた。

慣性ロータに用いるモータの電圧 V とトルク τ の関係式は

$$\tau = n \frac{k_m}{R_m} V - \frac{k_m k_e}{R_m} \dot{\phi} \quad (3)$$

これらの式から二輪車の倒立モデルに関する状態空間表現は式(4)から式(9)のようになる。

$$\dot{x} = Ax + bu \quad (4)$$

$$y = Cx \quad (5)$$

$$x = [\theta \ \dot{\theta} \ \phi \ \dot{\phi}]^T \quad (6)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{m_1 g L_1 + m_2 g L_2}{d} & -\frac{\mu_1}{d} & 0 & \frac{1}{d} \left(\mu_2 + \frac{k_m k_e}{R_m} \right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{m_1 g L_1 + m_2 g L_2}{d} & \frac{\mu_1}{d} & 0 & -\frac{(d+J_2)}{dJ_2} \left(\mu_2 + \frac{k_m k_e}{R_m} \right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{d} \cdot \frac{n k_m}{R_m} \\ 0 \\ \frac{d+J_2}{dJ_2} \cdot \frac{n k_m}{R_m} \end{bmatrix} \quad (8) \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Table 1 Definition of symbols

symbol	Parameter
θ	Roll angle of two-wheeled vehicle [rad]
ϕ	Rotation angle of inertia rotor [rad]
m_1	Mass of two-wheeled vehicle [kg]
m_2	Mass of inertia rotor [kg]
L_1	Height of center of gravity of vehicle [m]
L_2	Height of center of gravity of rotor [m]
J_1	Inertia moment of two-wheeled vehicle [kgm ²]
J_2	Inertia moment of inertia rotor [kgm ²]
μ_1	Friction coefficient of tire and ground [kgm ² /s]
μ_2	Friction coefficient of inertia rotor and motor [kgm ² /s]
k_m	Torque constant [Nm/A]
k_e	Back electromotive force [V·s/rad]
R_m	Internal resistance [Ω]
n	Gear reduction ratio [-]

3. 制御系の設計

導出した状態方程式から LQG 制御を用いて制御系の設計を行った。すなわち式(10)で示される評価関数 J が最小になるように、リカッチ方程式、式(11)の正定行列 P を用いてフィードバックゲイン K を式(12)のように求めた。

$$J = \int_0^\infty \{x^T Q x + ru^2\} dt \quad (10)$$

$$A^T P + PA - r^{-1} P b b^T P + Q = 0 \quad (11)$$

$$K = -r^{-1} b^T P \quad (12)$$

状態量はカルマンフィルタを用いて推定した。制御系のブロック線図を Fig.2 に示す。

Fig.2 Block diagram of control system

4. シミュレーション結果

カルマンフィルタを用いて状態推定を行ったシミュレーション結果を Fig.3 に示す. ここで, 初期値は車体傾斜角度を約 1 度 ($\theta = 0.0175[\text{rad}]$), 車体の角速度($\dot{\theta}$), 慣性ロータの角度(ϕ), 角速度($\dot{\phi}$)の値を 0 と設定した. Fig.3(a),(b)より車体の傾斜角度, 角速度, 慣性ロータの回転角度, 回転角速度は 3 秒ほどで収束し, 安定化されることがわかる.

(a) Vehicle angle ($\hat{\theta}$), vehicle angular velocity($\hat{\dot{\theta}}$)

(b) Rotor angle ($\hat{\phi}$), rotor angular velocity($\hat{\dot{\phi}}$)

Fig.3 Simulation result

5. 模型車体

製作したバイク型二輪車を Fig.4 に示す. 車体は全長 560mm, 全高 250mm, 質量 4.1kg である. 車体の角速度の測定には角速度センサを用い, 慣性ロータの回転角度の測定にはモータ軸上に装着したロータリーエンコーダを用いた.

Fig.4 Motorcycle type two-wheeled vehicle

6. 実験

6.1 姿勢制御実験

静止状態の車体を手で保持し少し傾けた状態から, サンプリング周期 2[msec]で制御実験を行った. 実験により得られ

Fig.5 Experiment result ($\hat{\theta}, \hat{\dot{\theta}}$)

た車体の傾斜角度($\hat{\theta}$), 角速度($\hat{\dot{\theta}}$)を Fig.5 に示す. 図より車体の傾斜角度は 3 秒ほどで収束し, 安定状態を維持することがわかる. また, 角速度センサのドリフトの影響も抑え, 安定状態を長時間持続することができた.

6.2 定常円走行実験

定常円走行実験では Fig.6(a)に示すように二輪車のステアリング角を固定し, 円周上を走行した際の軌跡を観測した. 軌跡の一例を Fig.6(b)に示す. この図は車体に LED を取り付け, 10 周旋回するまで撮り続けた写真である. また, 図には異なる旋回半径のものを合わせて示してある. この写真から旋回軌跡は完全に同じ経路をたどっており, 十分再現性のある定常円旋回が出来ることがわかる.

ステアリング角を固定し, 車速を変えた際の車体姿勢の変化を Fig.7 に示す. Fig.7(a)は低速時の走行状態を, Fig.7(b)は高速時の走行状態を示している. 旋回走行中に生じる遠心力に釣り合う車体の傾斜角を維持して走行することがわかる.

(a) Two-wheeled vehicle

(b) Trajectory of steady turning

Fig.6 Steady turning

(a) Low-speed turning

(b) High-speed turning

Fig.7 Turn running

7. 結言

慣性ロータを備えた模型バイク型二輪車を開発し, 車体を倒立振子とみなして LQG 制御することにより十分な安定性を得ることができた. また走行試験によりさまざまな走行状態において高い再現性があることを確認した.

文献

- (1) 佐藤拓史, 滑川徹: 静止時における自立走行二輪車のモデリングとロバスト姿勢制御, 日本機械学会論文集 C 編, 72(719), pp2130-2136,(2006)
- (2) 佐口太一, 高橋正樹, 吉田和夫: 自律走行自転車ロボットの安定化走行制御, 日本機械学会論文集 C 編, 73(731), pp128-133,(2007)