自律走行自転車ロボットの安定化走行制御*

佐口太一^{*1}, 吉田和夫^{*2}, 高橋正樹^{*3}

Stable Running Control of Autonomous Bicycle Robot

Taichi SAGUCHI^{*4}, Kazuo YOSHIDA and Masaki TAKAHASHI^{*4} Department of System Design Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

Bicycle is the unstable system in itself. Although there are two methods of steering a handle and moving a weight in order to make a bicycle stable, it is shown that the former is more effective than the latter. This study deals with modeling and stabilizing control problems of a two-wheel bicycle. In the modeling, wheels side slip is taken into consideration. In the control, an optimal feedback control for stable running control is obtained. An autonomous bicycle robot is further developed. As a result of experiment, it is shown that the bicycle robot is able to run straight and turn stably. The effectiveness of the two-wheel bicycle model and control law are demonstrated.

Key Words: Bicycle, Modeling, Moving Robot, Motion Control, Optimal Control, Handle Control

1. 結 言

自転車は人間の力を借りなければ安定走行できない不安定な系である。この自転車を制御により安定化させることに興味をもたれ、研究されている。自転車の安定化の実現により、将来的には自転車の機動性を活かし、自動車が侵入できない狭い通路でも通行できる自律ロボットへの応用など考えられる。

二輪車のモデルは Sharp⁽¹⁾により提案されているが、厳密なモデルのため複雑であり、自転車の姿勢安定化のための制御系設計には適さない。また、自転車の自律走行を目的として Getz⁽²⁾が、ピッチ運動やキャスト角を除いた簡易な非線形モデルの自転車に厳密な非線形フィードバックを適用している。しかし、実験で検証を行ってはおらず、実際に安定化させるにはより簡易に制御系設計可能なモデルが必要であるといえる。

そこで、自転車ロボットを製作して安定化を試みている研究が近年盛んに行われている。佐藤ら⁽³⁾は重心移動を用いることで主に静止状態での自転車の安定化を行っている。小田ら⁽⁴⁾、Tsai ら⁽⁵⁾、仁木ら⁽⁶⁾はハンドル操舵による走行安定化を、山北ら⁽⁷⁾は重心移動による走行安定化を試みている。小田らはモデルを用いずにゲインの調整により、Tsai らは倒立振子のモデルと自転車の地面との拘束条件を幾何的に表して組み合わせた

線形モデルを基に制御則を構築し、安定化を試みているが実験による十分な安定化はできていない。仁木らも Tsai らと同様のモデルを用いてローラー台上での安定化を実現している。また、2005年に榊村田製作所が慣性ロータの反力を利用した自転車ロボット「ムラタセイサク君」を開発して安定化を実現している⁽⁸⁾。

一方、著者らは重心移動に比べハンドル操舵の方が走行時の自転車の安定化に有効であることを既に示している⁽⁹⁾。そのため先駆けてハンドル操舵による安定化に着目し、タイヤの横すべりおよびヨーイングとローリングの連成を考慮した線形自転車モデルを構築してきた。構築したモデルではタイヤの横すべりを考慮していることが特徴であり、コーナリングパワーを調整することで異なる路面上でも対応できると考えられる。

本論文では、著者らが構築してきたタイヤのすべりおよびヨーイングとローリングの連成を考慮した簡易な線形自転車モデルを提示する。安定化の制御としては、既に本研究⁽⁹⁾で有効性が示されているハンドル操舵を制御する方法を用い、最適制御手法により制御則を確立する。また、市販の自転車にセンサ、アクチュエータ等を取り付け製作した自律走行自転車ロボットを用いて安定化実験を行い、構築した自転車モデルの妥当性および制御則の有効性を実証する。

構築した自転車モデルの妥当性を示せたことにより、モデルベースによる様々な制御系設計が可能であると考えられる。そこで本論文の最後に、自転車を傾斜させることでカーブ走行を行う制御則を設計し、これにより容易にカーブ走行を実現できることを示す。

* 原稿受付 2006年12月19日。

^{*1} 学生員、慶應義塾大学大学院理工学研究科(〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。^{*2} 正員、フェロー、慶應義塾大学理工学部。^{*3} 正員、慶應義塾大学理工学部。

E-mail: saguchi@yoshida.sd.keio.ac.jp

2. 自転車のモデリング

タイヤの横すべりおよびローリングとヨーイングの連成を考慮して導出した本論文で提示する自転車の線形簡易モデルについて述べる。まず、自転車の姿勢安定化を行うとき、ハンドル操舵によりタイヤに横すべりが生じる。ゆえに、タイヤに働く力を考慮する必要がある。このことを表現するために、車両工学で述べられる自動車の二輪簡易モデルを用いる。そして、自転車の倒れるという性質を倒立振り子モデルにより表現する。これら二つのモデルを組み合わせることで自転車モデルを構築する。

まず、二輪簡易モデルについて述べる。移動座標系上で表した走行する自転車のモデルを図1に、上方から見たモデルを図2に示す。まず、 β をタイヤの横すべり角、 ω をヨー方向角速度、 I_{xG} 、 I_{yG} をそれぞれ自転車のヨーイング、ローリング慣性モーメントとし、前後のタイヤに働く力としてコーナリングフォース F_f 、 F_r 、キャンパスラスト F_{cf} 、 F_{cr} とする。このとき、移動する自転車の座標系に固定した重心点の並進運動、およびヨーイング方向の回転運動に関してタイヤに働く力から自転車の運動を記述する式(1)(2)が導出される。

Fig.1 Two-wheel bicycle model

Fig.2 Two-wheel bicycle model (horizontal plane)

・横方向

$$mV \left(\frac{d\beta}{dt} + \omega \right) - mh \frac{d^2\phi}{dt^2} = F_f + F_r + F_{cf} + F_{cr} \quad (1)$$

・ヨーイング方向

$$I_{xG} \frac{d\omega}{dt} = l_f F_f - l_r F_r + l_f F_{cf} - l_r F_{cr} \quad (2)$$

ここで前後輪のタイヤのコーナリングパワーをそれぞれ K_f 、 K_r とする。横すべり角が小さければ F_f 、 F_r はそれぞれ横すべり角 β_f 、 β_r に比例する。そこで、横すべり角は微小であると仮定する。図2のように角度を反時計回りを正とすると、横すべり角が正のとき、負の向きにコーナリングパワーは働くため、 F_f 、 F_r はそれぞれ以下のように表される。

$$F_f = -K_f \beta_f = -K_f \left(\beta + \frac{l_f}{V} \omega - \delta \right) \quad (3)$$

$$F_r = -K_r \beta_r = -K_r \left(\beta - \frac{l_r}{V} \omega \right) \quad (4)$$

ここで δ はタイヤの実操舵角である。

また、自転車の場合、車体のロール運動によって生じるキャンバ角はロール角 ϕ に等しい。キャンパスラストはロール角が微小であればロール角に比例する。そこで、ロール角は微小であると仮定する。前後輪それぞれに働くキャンパスラスト F_{cf} 、 F_{cr} は、キャンパスラスト係数 K_{cf} 、 K_{cr} を用いてそれぞれ以下のように表される。

$$F_{cf} = -K_{cf} \phi \quad (5)$$

$$F_{cr} = -K_{cr} \phi \quad (6)$$

次に、倒立振り子のモデルについて述べる。ヨーイング方向の回転運動により、重心に遠心力が働く。そこで、 x 軸まわりのモーメントの釣り合い式は(7)式で表すことができる。

・ローリング方向

$$(I_{xG} + mh^2) \frac{d^2\phi}{dt^2} - mhV \left(\frac{d\beta}{dt} + \omega \right) = mgh\phi \quad (7)$$

以上(1)、(2)式に(3)(4)(5)(6)式を代入した式、および(7)式が提案する自転車の運動方程式である。

3. 安定化走行制御

3・1 状態方程式

導出した運動方程式を基に安定化走行制御則を設計する。そのために運動方程式から状態方程式を求める。その際、用いた物理パラメータを表1にまとめる。また、4章で述べる自転車ロボットではDCサーボモータでハンドルを操舵する。つま

りハンドル操舵に遅れが生じるため、モータモデルを導入し、状態方程式に組み込む必要がある。モータのトルク方程式は以下になる。

$$\left(\frac{J_0}{k^2} + J_1\right) \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = Ki \quad (10)$$

ここで、 i は入力電流、 θ はモータの軸の回転角、 J_0 はハンドル操舵部の慣性モーメント、 J_1 はモータのシャフトと減速器からなる慣性モーメントである。また、モータの軸の回転角 θ とハンドル操舵角 δ との間には以下の関係式が成り立つ。

$$\theta = -k\delta \quad (11)$$

2章で提案した自転車モデル、およびモータのトルク方程式をあわせて拡大系として状態空間方程式を導出する。ここで u はハンドル操舵用モータへの入力電流である。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (12)$$

$$y = Cx \quad (13)$$

$$x = [\phi \quad \dot{\phi} \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad \omega \quad \beta]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & 0 & a_2 & 0 & a_3 & a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_5 & 0 & 0 \\ a_6 & 0 & a_7 & 0 & a_8 & a_9 \\ a_{10} & 0 & a_{11} & 0 & a_{12} & a_{13} \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \quad 0 \quad 0 \quad b_1 \quad 0 \quad 0]^T$$

Table 1 Values of bicycle robot parameters

Symbol	Parameter	Value
m	Mass of bicycle robot	41.82(kg)
V	Velocity of bicycle robot	1.6(m/s)
h	Height of center of gravity	0.586(m)
l_f	Length from front wheel to center of gravity	0.68(m)
l_r	Length from rear wheel to center of gravity	0.32(m)
K_f	Cornering power for front wheel(carpet)	2000(N/rad)
K_r	Cornering power for rear wheel(carpet)	2800(N/rad)
K_{ft}	Cornering power for front wheel(tiling)	1500(N/rad)
K_{rt}	Cornering power for rear wheel(tiling)	2100(N/rad)
K_{cf}	Camber thrust factor for front wheel	333(N/rad)
K_{cr}	Camber thrust factor for rear wheel	466(N/rad)
I_{xCG}	Inertia moment of center of gravity(x-axis)	3(kg · m ²)
I_{zCG}	Inertia moment of center of gravity(z-axis)	3(kg · m ²)
J_0	Inertia moment of handle axis	0.171(kg · m ²)
J_1	Inertia moment of shaft axis	0.021(kg · m ²)
K	Torque constant	2.92(N · m/A)
k	Reduction gear ratio	2
b	Viscous friction constant	0.001

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3・2 安定化走行制御則

次に状態方程式を基にフィードバック制御によりすべての状態量を 0 にするレギュレータ問題を解く。本研究では(14)式で表される評価関数 J を最小にする最適制御問題を解くことでフィードバックゲイン F を導出する。重み行列は数値計算上で自転車安定化走行できるように調節して決定した。 Q に関してはロール角を 0 にすることが目的であるため、ロール角に重きをおいた。

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + r u^2) dt \quad (14)$$

$$u = -F x \quad (15)$$

$$Q = \text{diag}[4000 \quad 2000 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1], \quad r = 15$$

$$F = [-39.7 \quad -15.4 \quad 5.96 \quad 0.571 \quad -0.0724 \quad 28.1]$$

また、状態量のうち、ヨー方向角速度およびタイヤの横すべり角の状態量はカルマンフィルタを用いて状態推定を行う。

3・3 ハンドル操舵制御則

前節で導出したモータへの制御入力を実際のモータに入力して得られる挙動はモデル化誤差や外乱の影響により所望の結果が得られるとは限らない。そこで自律走行自転車ロボットのハンドル操舵用モータの制御には目標指令値に対して望ましい応答を示すモデルを付加し、その内部状態変数を用いて拡大系を構築するモデル追従型サーボ系⁽¹⁰⁾を用いる。具体的には、(15)式で導出した制御入力を u_r とし、モータモデルに加えたとき得られるハンドル操舵角、角速度を計算、その結果と実際の角度、角速度との誤差から PI 制御により実際にモータに入力する電流 u を導出することで、ハンドル操舵の制御を行う。ここで目標追従モデルを次のようにする。

$$\begin{cases} \dot{x}_r = A_r x_r + B_r u_r \\ y_r = C_r x_r \end{cases} \quad (16)$$

ハンドル操舵用モータへの制御入力は次のようになる。

$$u = -F_1 x_m - F_2 \int_0^t y_e dt - F_3 x_r \quad (17)$$

$$(y_e = y_r - x_m)$$

ゲインは最適制御手法を用いて決定する。これらをふまえ、姿勢安定化走行制御則の全体の制御系構成図を図 3 に示す。

Fig.3 Stable running control for bicycle

4. 自律走行自転車ロボットシステム構成

提案した自転車モデルの妥当性を検証するためには、安定化走行制御則による自転車の走行実験の結果と数値計算結果を比較する必要がある。そこで実際に自転車ロボットを製作する。本章では製作したハンドル操舵型自律走行自転車ロボットについて述べる。図4に示すように市販の自転車を改造することにより自転車ロボットを製作した。システムはセンシングシステム、アクチュエータシステム、情報処理システムの三つから構成されている。全体のシステムに関して図5に示し、以下詳細を述べる。

4・1 センシングシステム 走行する自転車のロール角、ロール角速度、およびハンドルの操舵角度をセンサにより計測する。ロール角は重力加速度の方向を検出する傾斜角センサ（緑測器製 PMP-S20T）を用い、ロール角速度はジャイロセンサ（Silicon Sensing Systems Japan Ltd製 CRS03-02）を用いて計測される。ハンドルの操舵角度はモータ軸に取り付けたロータリエンコーダにより計測される。ここで、傾斜角センサは加速度に影響され誤差が生じるため、ジャイロセンサで補正する⁽¹¹⁾ことでロール角を導出する。

4・2 アクチュエータシステム アクチュエータシステムでは DC サーボモータが指令に従ってハンドル操舵および駆動力の供給を行う。駆動力はモータ軸に取り付けたスプロケットを自転車のチェーンに介して後輪に伝える。一方自転車のハンドルにアームを取り付け、サーボモータを接続することにより、前輪のハンドルを駆動させる。

4・3 情報処理システム 情報処理システムでは自転車ロボットへの入力電流量を計算する PC 部、センサ情報を処理し、アナログ信号をデジタル信号に変換する AD 変換ボード、エンコーダ情報を処理するエンコーダカウンタボード、モータドライバへ PC から指令を送るためにデジタル信号をアナログに変換する DA 変換ボードから構成される。PC の OS には Red Hat Linux9 を用い、プログラムの開発言語には C++言語を使用する。

Fig.4 Autonomous bicycle robot

Fig.5 System for autonomous bicycle robot

5. 直立安定化走行実験

5・1 実験条件 路面状態が絨毯、およびタイル貼りの廊下という異なる環境下において、路面状況を考慮してコーナリングパワー、キャンバラスト係数の値を調整して走行実験をする。これらの値は塚田⁽¹²⁾の測定結果を参考に推定し、実験と数値計算の結果を照合することで決定した。また、本研究における安定化走行制御実験に際して、走行開始および停止の指令は別に用意したノート PC から無線 LAN を通じて実行する。ノート PC は実行ファイルの転送および実行指令用であり、計算などのプログラム実行は自転車ロボットに搭載された PC で行う。計算およびモータへの指令の制御周期は 1.5msec とする。初期状態は直立状態近傍とする。

5・2 実験結果 直立安定化走行実験のロール角およびハンドル操舵角の時刻歴応答を図6に示す。このとき路面は絨毯という環境下で実験を行った。この結果、傾斜した方向にハンドルを操舵することで自転車ロボットが倒れることなく安定に走行していることを確認できる。また路面がタイル貼りの環境下において、人為的に自転車ロボットの側面を叩き、外力を加えた。実験によるロール角の時刻歴結果と数値計算上

の結果が適合するように外力の値を推定する. 2 章で提案したモデルの数値計算によるロール角, およびハンドル操舵角の時刻歴応答の比較をそれぞれ図 7, 図 8 に示す. この結果より, 実験と数値計算によるロール角およびハンドル操舵角の挙動がほぼ一致していることが示された. ゆえに提案したモデルの妥当性を実証することができたといえる. なおコーナリングパワーの値の違いに対するロバスト性は高く, 絨毯の路面状況では実験および数値計算において推定値を 1000N/rad 程度変化させた状況においても安定走行を実現した. ロバスト性が高い一方, コーナリングパワーの推定値の信頼度も低いといえる.

Fig.6 Result of Stable running control

Fig.7 Comparison of simulation and experiment results (roll angle ϕ)

Fig.8 Comparison of simulation and experiment results (handle steering angle δ)

6. カーブ走行制御

6・1 カーブ走行制御則 前章の結果より, 提案した自転車モデルの妥当性を示すことができた. このことから提案した自転車モデルを用いることで, モデルベースによる様々な自転車の制御則の設計が可能であるといえる. 本論文では適用例として, カーブ走行制御則の設計を行った結果を示す. 制御方法はハンドルを操舵し自転車を傾斜させた状態で安定にする. これによりカーブ走行を実現できる. カーブ時における走行軌道を曲率半径 ρ で与え, 遠心力と重力の釣り合いから, 以下のように目標ロール角 ϕ_{ref} を導出する.

$$\phi_{ref} = \frac{V^2}{\rho g} \quad (18)$$

そして, その目標ロール角に自転車ロボットのロール角を追従させる. 目標ロール角はステップで与える. このとき最適サーボ問題として, ロール角と目標ロール角との偏差を積分し, 定常偏差なく追従させる.

$$u = -Fx + Kz \quad (19)$$

$$\dot{z} = \phi_{ref} - \phi \quad (20)$$

フィードバックゲインは最適サーボ問題を解くことにより以下のように導出される.

$$F = [-62.4 \quad -12.0 \quad 4.58 \quad 0.447 \quad -0.0437 \quad 21.8]$$

$$K = -45.3$$

また, 安定化走行制御と同様にヨー方向角速度およびタイヤのすべり角の状態量はカルマンフィルタを用いて状態推定を行う.

6・2 カーブ走行実験 カーブ走行制御系を用いてカーブ時における安定走行実験を行う. 実験環境および初期条件は 4・4 節で示したものと同様とする. 制御開始から約 3 秒経過後に目標ロール角を 0° から曲率より導出された目標ロール角まで変化させる. このとき, 曲率半径 2m と 3m から目標ロール角を計算し, それぞれにおいて右回転, 左回転の指令を与え実験を行った. 実際のカーブ走行の様子を約 1.2 秒毎にとらえた写真を図 9 に示す. また, 曲率半径 3m, 左回転の指令を与えたときのロール角, ハンドル操舵角の時刻歴応答を図 10 に示す. また, 図 10 から, 目標ロール角に自転車のロール角が追従できていることを確認できる. 実際の走行軌道に関しては計測するセンサを導入していないため正確には把握できないが, 目標とする曲率半径 2m のとき, 実際には約 2.5m 程度, 3m のとき実際には 4m 程度でのカーブ走行を確認した. 目標

Fig.9 Trajectory of curve running

Fig.10 Result of curve running control

とする曲率半径と実際との誤差の原因は、目標ロール角に追従させているだけで軌道情報をフィードバックしていない、旋回運動による遠心力により傾斜角センサの出力に長時間におよぶ誤差が生じ補正処理で正確に補正できなくなっている、走行速度が安定しない、などの影響が考えられる。以上より、走行軌道に誤差が生じるものの、最適サーボ問題を解くだけで容易にカーブ走行を実現することができることを実証した。

7. 結 語

タイヤの横すべりおよびローリングとヨーイングの連成を考慮した簡易線形自転車モデルを構築した。そのモデルに基づきハンドル操舵による安定化走行制御則を最適制御手法により確立した。また、実際に自律走行自転車ロボットを製作し、安定走行実験を行った。直立安定走行およびカーブ走行においてそれぞれ自転車ロボットが倒れずに走行することを実現した。そして、直立安定走行実験の結果と数値計算結果との比較により、整合性を取ることができ、構築したタイヤの横すべりを考慮した自転車モデルの妥当性を実証した。

謝 辞

過去に自転車ロボット開発に携わった小西康晴氏、村岡大介氏の尽力により本研究が実現したことを記し、謝意を表す。また、本研究は、文部科学省平成15年度21世紀COEプログラム「知能化から生命化へのシス

テムデザイン」によるものであることを記し、謝意を表す。

文 献

- (1) Sharp, R.S., The Stability and Control of Motorcycles, *Journal Mechanical Engineering Science*, Vol.13, No.5 (1971), pp. 316-329.
- (2) Getz, N.H. and Marsden, J.E., Control for an Autonomous Bicycle, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1995), pp. 1397-1402.
- (3) Satoh, H. and Namerikawa, T., Modeling and Robust Attitude Control of Stationary Self-sustaining Two-wheeled Vehicle, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.719, (2006), pp.2130-2136.
- (4) Oda, Y., et al., Study on the autonomous run by integrated control of a bicycle. In the case of control of a handle steering angle and the amount of center-of-gravity movements, *Japan Society of Mechanical Engineers Transportation and Logistics Conference*, Vol.11, (2002), pp.97-100.
- (5) Tsai, C.C., et al., Steering Control System Design and Implementation for Riderless Bicycle, *Proceeding of International conference on Mechatronics Technology*, Vol.7th, (2003), pp.203-208.
- (6) Niki, H. and Murakami, T., An Approach to Self Stabilization of Bicycle Motion by Handle Controller, *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Series D*, Vol.125, No.8, (2005), pp.779-785.
- (7) Yamakita, M. et al., Automatic Control of Bicycles with a Balancer, *Conference of the Robotics Society of Japan (CD-ROM)*, Vol.23rd, (2005), pp.1E13.
- (8) <http://www.murataboy.com/>
- (9) Konishi, Y. and Yoshida, K., Modeling and Stabilizing Control for Dynamics of a Bicycle, *Dynamics and Design Conference 2001 of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.7th, (2001-4), pp. 456- 458.
- (10) Nonami, K. and Nishimura, H., Basic of Control Theory by MATLAB (in Japanese), *Tokyo Denki University Press*, (1998), pp.201-202.
- (11) Muto, K. and Abe, H., Three-dimensional posture angle sensor, *Tokin technical review*, Vol.26, (1999), pp. 69-73.
- (12) Tsukada, Y., Characteristics of Bicycle Tires, *Science Reports of Research Institute for Engineering Kanagawa University*, No.6, (1983), pp.23-31.