

ジャイロトルクを用いた自立自転車の研究

人間環境学専攻 47146710 寺本 大輝 平成 28 年 3 月修了
指導教員 保坂 寛 教授

This paper studies stabilization of a bicycle by utilizing a gyro actuator. This actuator generates torque for standing up bicycle by gyro effect, so this actuator can help stability of bicycle especially in low speed or no speed. First, in a simple model, dynamic equation was led. Then, by a simulation, difference of forces acting on the bicycle between moving and stopping is found very small when bicycle starts moving. And actual size experimental apparatus was designed and experiment was conducted to show the appropriateness and error of theory.

Key words: Gyro Effect, Bicycle

1 はじめに

自転車は環境に配慮した交通手段の1つとして広く普及している。しかし、近年重大事故が増加し¹⁾、その対策が求められている。自転車では出会い頭の衝突が多く、これは起動に多くの力を要するため、運転者が停止を嫌うためと考えられている。そこで、停止した自転車の直立と低速安定性の向上を実現し、起動時の身体負担を低減させるアクチュエータの研究を行う。自転車の安定化における従来の研究はハンドル制御²⁾や重心移動を用いるものが多い。しかしこれらは自転車の走行による慣性力を用いるため、低速または停止状態では性能が著しく落ちる。一方本研究では、ロータを搭載し、走行と無関係に自転車を起き上がらせるジャイロトルクを発生させる。これにより、低速・停止状態の安定性の補助を目指す。

先行研究において、停止状態におけるジャイロアクチュエータを搭載した自転車の運動方程式と近似的な実験において、ジャイロ効果を用いて起き上がりが可能であることが示された。また、1入力2出力の状態フィードバック制御により、傾いた車体を直立位置に収束させられることが示された。そこで以下では、発動時の走行効果を含むジャイロアクチュエータを用いた場合の理論解析とジャイロを搭載したラジコンバイクの実験から実寸サイズに必要なジャイロの仕様を検討した。また、実機サイズでの理論の検証とロータサイズや回転速度低減の為に実機サイズ実験機のシミュレーション、実験を行った。

2 理論

2.1 運動方程式

Fig.1 に示すように、自転車にロータ、自転モータ、傾斜モータからなるアクチュエータが取り付けられ、走行効果を考慮しながら、傾いた自転車を、ロータを前後に傾斜させることで直立させることを考える。単純化のため、人、フレーム、傾斜モータのケースなどは互いの相対運動がない1つの剛体とする。この剛体を他の部分と呼ぶことにする。Fig.1 で、空間に固定した座標系を X, Y, Z とする。原点 O は、自転車直立時のロータ重心の鉛直下方、地面の高さにあるとする。また、走行効果の1つの遠心力を利用するために、前輪の操舵角を一定値として与える。自転車の前方向を X, 左横方向を Y, 鉛直上方向を Z とする。今問題にしているのは、X 軸回りの倒れである。Y 軸回りと Z 軸回りは、その他部分が回転しないように、ちょうど良い大きさの地面反力と静止摩擦力が車輪に発生して釣り合うので、X 軸回りのトルクの釣り合いのみを計算する。そこで得られた運動方程式が以下である。ここで

m はロータの質量、a は X 軸からロータの重心の距離、M はその他の部分の質量、d は X 軸からその他の部分の重心までの距離、g は重力加速度、 I_1 , I_3 はロータの慣性モーメント、 θ_x , ω_x は自転車の倒れる角度、角速度、 θ_y , ω_y は傾斜モータの角度、角速度、 ω_z はロータの自転速度、 I_w は車輪の慣性モーメント、v は自転車の速度、 R_w は車輪の半径、r は操舵角を一定とした時に自転車が周回する円の半径を表している。

$$\begin{aligned} & \left(ma^2 + \frac{4}{3}Md^2 + I_1 \cos^2 \theta_y + I_3 \sin^2 \theta_y \right) \ddot{\theta}_x \\ & + [(I_3 - I_1)\omega_y \sin 2\theta_y] \dot{\theta}_x + I_3 \omega_y \omega_z \cos \theta_y \\ & = (ma + Md)g \sin \theta_x \\ & + 2I_w \frac{v^2}{R_w r} \cos \theta_x + (ma + Md) \frac{v^2}{r} \cos \theta_x \end{aligned} \quad (1)$$

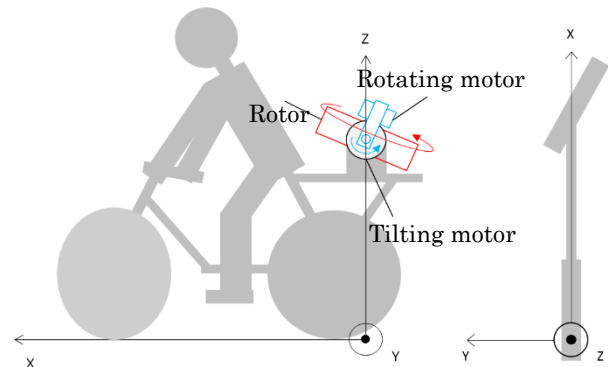


Fig.1 Simple model of bicycle

左辺第 1 項はロータと車体が一体となって回転する場合の慣性力である。第 2 項はロータが ω_y の傾斜により X 軸回りの質量分布が変化するために発生するコリオリ力、第 3 項はロータの自転によるジャイロトルク、第 4 項は回転する車輪によるジャイロトルク、第 5 項は自転車が方向を変えることによる遠心力である。この左辺第 4 項と第 5 項が停止状態の運動方程式から追加された項である。右辺は車体とロータの重力トルクである。

2.2 縮小モデル

先行研究では、自転車を倒立振り子で模した実験が行われた。本研究では、自転車により近いものとして、玩具のラジコンバイクにジャイロを搭載した実験を行った。外観を Fig.2 に示す。可動部の軽量化のために、ロータの自転をモータで行うのではなく、ピボットベアリングを採用し、糸を巻いて手で回転させている。ロータの傾斜には超音波モータを使用している。

実験装置の製作に当たり、まずロータ径を決めるためのシミュレーションを行った。自転の回転数は 300rpm とし、 10° の傾きから起き上がるためのロータのサイズを計算した。結果、半径 70mm、厚さ 10mm のステンレス製のものを使用した。

ジャイロをバイクに搭載し、ロータを傾斜させた。自転速度 300rpm、初期倒れ角度 10° としたときは起き上がらなかった。自転速度 450rpm、初期倒れ角度 5° のときは起きあげることができた。この原因としては、想定よりもロータの取付位置が高くなったことや、固定のために重くなってしまうことがあり、これを補正することで実験値と近い、計算値が得られた。



Fig.2 RC toy bike with gyro actuator

2.3 実寸サイズのシミュレーション

縮小モデルを使ったシミュレーションと実験により、実際の自転車にも理論を適用できることが分かった。そこで人が乗っている自転車にジャイロを搭載する場合、どのくらいのサイズのロータをどのくらいの速度でまわす必要があるのかを計算した。自転車の重量は 10kg、搭乗者の体重は 60kg とした。また自転車のフレーム及び車輪、搭乗者は互いに相対運動のない剛体として仮定し、その重心が地面から 1.0 m にあり、ジャイロ装置のロータ重心が地面から 0.9 m とした。ステンレスロータ直径 30 ~ 40cm、厚み：1 ~ 2cm、回転数：0 ~ 10000 rpm、超音波モータの動作速度 10 ~ 50 rpm、トルクは ∞ とし、検証を行った。その結果を以下に示す。

ロータ直径・厚さ	ロータ回転数 (rpm)	傾斜速度 (rpm)
30cm・2cm	9000	50
30cm・2cm	10000	50
40cm・1cm	7000	20
40cm・1cm	8000	10
40cm・1cm	9000	10
40cm・1cm	10000	10

Table.1 Condition of actual size gyro

以上の結果、停止時ではロータのサイズが大きくなりすぎることが分かった。そこで走行時と停止時の起き上がり特性を比較し、ロータサイズの小型化、自転速度の減速を検討する。ロータを直径 40cm、厚さ 1cm のステンレス製とし、自転速度 ω_z を 8000rpm、傾斜速度 ω_y を 10rpm、その他の質量を 70kg とする。また、車輪の慣性モーメン

ト I_w は 0.15kgm^2 、車輪の半径 R_w は 26inch、前輪と後輪の進行方向がなす角を 20 度、ホイールベースを 1m とする。ここで周回円の半径 r は前輪と後輪の進行方向がなす角 α とホイールベース L を用いて、以下で求める。

$$r = L/\tan \alpha \quad (2)$$

速度 v については、一定加速度 1m/s^2 を与えることとする。

この条件下で、車体の初期角度 10 度からの起き上がりのシミュレーションを行った。以下の Fig.3 に示す。青線が走行効果を含めた場合、赤線が停止状態である。また黒線は走行効果のみで支えられる角度を示している。停止状態である赤線の場合、0 度になって起き上がりが完了するが、走行効果を含めた青線の場合、黒線の交わった時点でアクチュエータを停止させても安定すると考えられる。

この結果、確かに走行効果を含めた場合のほうが、起き上がりも速く有利である。しかしそれを考慮しても約 0.15 秒しか速くならず、効果は微小である。この理由としては、走行効果は速度に依存していることがあげられる。よって、起動時における安定化のためには走行効果は微小であり、無視しても問題ないことがわかった。

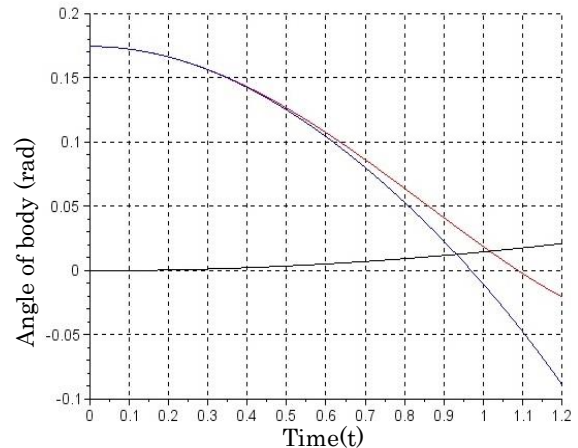


Fig.3 Difference of forces acting on the bicycle between moving and stopping

3 実験

3.1 実機サイズ実験機

走行効果を考慮しても、低速域では効果は小さく、ロータの小型化にはつながらなかった。そこで人が乗れるサイズの実験機を作成する。ここまでは、初期倒れ角度を 10 度と設定し、ジャイロで安定に必要な力を全てまかなうことを考えていたが、人が操作することでより小さい角度用のジャイロでも安定を保てる可能性がある。また、ロータの小型化につながるものとして、ロータの重心の位置を低くすることがあげられる。そこで実機サイズの実験機を作成し、倒れ角度をより小さい範囲に限定した場合の直立を目指し、実験を行った。以下の Fig.4 に作成した実機サイズ実験機を示す。今回は車体傾斜範囲を ± 3 度として実験を行った。この実機サイズ実験機では、直径 40cm、厚さ 1cm のステンレス製のロータを使用している。ロータ以外の内ジンバル部と外ジンバル兼車体傾斜部を合わせたロータ以外の部分の重量は約 50kg となった。また、ロー

タ部の重心は車体傾斜軸から約 0.6m の位置に、その他の部分の重心は車体傾斜軸から約 0.4m の位置となった。この実験機を用いて実験を行っていくが、実験機のその他の部分が 50kg あるということで自転車の一般的な重量の 10kg を除けば、40kg となり、人が乗っているのと同じくらいの状態となった。そこでこの実験では、人を乗せずこのままの状態でも実機サイズでも起き上がりも直立位置での維持ができるかの確認を行った。



Fig.4 Actual size experimental apparatus

3.2 実機サイズ実験機の手動制御

ロータ傾斜用モータを手動で動かし、倒れている車体を直立にする実験を行った。ロータの自転速度を 1400rpm とし、ロータ傾斜角を 15rpm とし、手動で回転方向を切り替え、直立を維持する実験を行った。そのときのグラフを Fig.5 に示す。これにより、手動制御において約 4.5 秒間直立を維持できることが分かった。この結果は実寸サイズのシミュレーションにおける直径 40cm、厚さ 1cm のステンレスモータを 7000rpm で自転させ、20rpm で傾斜させる必要があるところと比べると大きく回転数を低減できており、人の安定感をサポートする形で、小さい角度内に保つという手法が効果的だというのが示された。

3.3 実機サイズ実験機のパンパン制御

次にエンコーダから読み込んだ角度に応じて、ロータ傾斜モータの回転方向を変える制御を入れて、実験を行った。この時の制御は、車体角度が正のときにロータを負の方向に傾斜させ、車体角度が負のときはロータを正の方向に傾斜させるという、パンパン制御である。このときのロータの自転速度は 1400rpm とし、手動実験時と同じとした。そのときの車体傾斜角度とロータ傾斜角度のグラフを以下の Fig.6 に示す。このグラフから車体が傾きだしたところから、ロータが傾斜し、起こしていることが分かる。しかし、次に車体傾斜角度の符号が変わったときには、反応してロータの傾斜方向を反転しているものの、間に合わず制限角度である 3 度を越えてしまっている。つまりこの制御では約 1 秒間の直立は保てるが、手動の約 5 秒間に比べると安定性が低いということが分かった。このパンパ

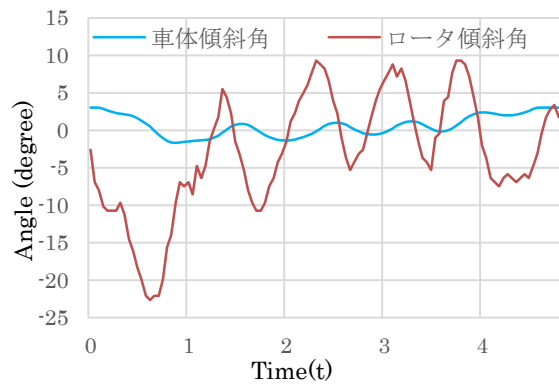


Fig.5 Body angle and inclining angle when taking the balance by manual control

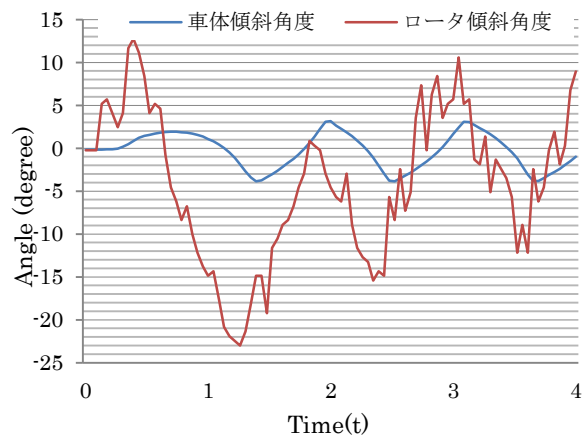


Fig.6 Body angle and inclining angle when taking the balance by bang-bang control

ン制御での欠点としては、ロータ傾斜モータのトルクが足らず、回転方向反転の指令が入っても内ジンバルの慣性モーメントに勝てず、すぐに反転できていないことがあげられる。この解決策としては、より強力なトルクのモータに交換することや内ジンバルの小型軽量化が考えられる。また、制御自体に関しても、車体角度 0 度の近傍で不感帯をつくって、反対側に倒しきらないようにすることや車体傾斜速度やロータ傾斜速度も読み込んでフィードバック制御することによる、性能向上が考えられる。

3.4 フィードバック制御のシミュレーション

ここまでは手動やパンパン制御において直立実験を行ってきたが、実際に使用する際には、正確性と長時間維持するコントロールが必要である。ここからは、フィードバックを取り入れた制御により、車体を直立させ、同時にロータ傾斜位置もトルクを発しなくなる領域に入らないようにするシミュレーションを行った。ジャイロを搭載した自転車の運動方程式を状態方程式の形にすると式(3)のようになる。フィードバックゲインを k_1, k_2, k_3, k_4 においてフィードバック制御則を式(4)のようにおく。フィードバックゲインの決定には Ricatti の微分方程式を用いた最適レギュレーション法を使用した。その結果、 $k_1 = 7842$, $k_2 = 1843$, $k_3 = 1228$, $k_4 = -36.15$, という値が得られ、これを使用した際のシミュレーション結果を以下に示す。このシミュレーションの結果から、実機サイズ実験機において、上のような条件でフィードバック制御を行うと約 2

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \theta_x \\ \dot{\theta}_x \\ \theta_y \\ \dot{\theta}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{(ma+Md)g}{J_B} & 0 & 0 & -\frac{I_3 \dot{\theta}_z}{J_B} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{I_3 \dot{\theta}_z}{I_1} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_x \\ \dot{\theta}_x \\ \theta_y \\ \dot{\theta}_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\tau_y}{I_1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$J_B = ma^2 + \frac{4}{3}Md^2 + I_1 \cos^2 \theta_y + I_3 \sin^2 \theta_y$$

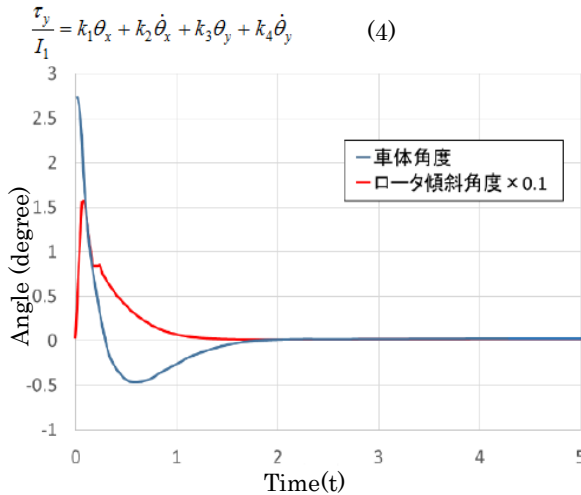


Fig.7 Body angle and inclining angle when taking the balance by feedback control

秒で車体の直立位置への収束とロータ傾斜角を元の位置への収束を完了できることがわかった。最適レギュレータでフィードバックゲインを求めた場合、全体的にゲインが大きくなっており、応答は速い。ゆっくりした応答が良いと思っても、評価関数の重み係数を多少変えても応答速度はあまり変わらない。最適レギュレータの評価関数は収束するまでの総エネルギーのような量を評価しているので、速く収束した方が総エネルギーとしては小さくなるということだと考えられる。

3.5 インホイールモータを使った実験機

先の実機サイズ実験機では自転車用モータが大きくなってしまったため、装置全体が重くなってしまった。そこでここでは、ホイールの中にモータが内蔵されたインホイールモータを使った実験機を作成した。インホイールモータはロータのまわりにタイヤがついていることで、安全上においても、ロータ傾斜軸まわりの慣性モーメントの低減においても有利と考え、これを使用した。このインホイールモータの直径 20inch で幅が 3inch、重量が 10kg である。このインホイールモータを用いて、内ジンバルを構成し、実機サイズ実験機の内ジンバルと交換した。以下にインホイールモータを用いた実験機と操作時の様子を Fig.7 に示す。体重 70kg の人が乗って、ハンドル操作によるジャイロトルクと体重移動を用いてバランスを保つ実験を行い、実際にバランスを約 3 秒間維持できた。そのときの車体角度とロータ傾斜角度を Fig.8 に示す。

3 秒という短時間であるが、人の体重移動とあわせてバランスを維持することができた。このインホイールモータと自転方向に同慣性モーメントのステンレスロータを作るとすると、直径 34cm、厚さ 1cm のものでよく、重さ



Fig.7 Experimental apparatus by using in-wheel motor

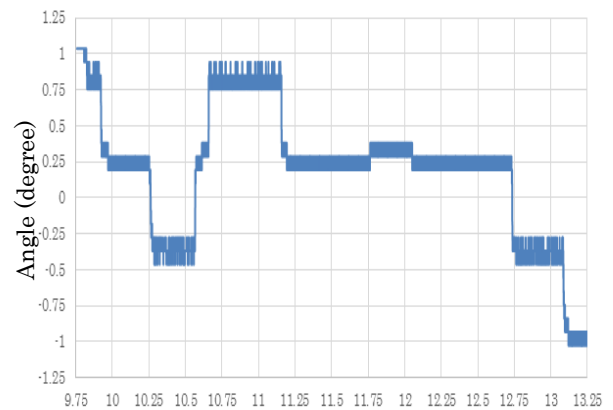


Fig.8 Body angle in in-wheel motor experiment

は約 7kg なのでインホイールモータよりさらに小型軽量にできる可能性がある。

4 結論

二輪車の事故の現状と、その原因について述べ、二輪車の姿勢安定化の有用性について述べた。本研究ではジャイロ効果を利用することで、人が乗った自転車の低速域での安定性の向上を目指した。走行効果を含めたジャイロ搭載時の自転車の運動方程式を求め、走行効果が低速域では微小であることが分かった。そこで実機サイズ実験機を作成し、実際のサイズでもジャイロによる直立が可能であり、車体角度を限定することで、ロータの自転速度を小さくできることを示した。インホイールモータを使った実験機では、人が乗って体重移動とあわせて安定化を行うことで、さらに低い自転回転数とロータの慣性モーメントでバランスの維持を行うことができることを示した。

文献

- 1) 警察庁交通局, 「平成 25 年中の交通死亡事故の特徴及び道路交通法違反取締り状況について」
http://www.hcd-japan.com/2015_02_20_keisatuchou.pdf
- 2) 山口高志, 柴田剛慶, 村上俊之: “バックステップングを用いた電動自転車の姿勢安定化制御”, 精密工学会誌, Vol.74, No.5, pp509-513