

自転車姿勢制御モジュールの提案

25G1065 塩澤匠生

2025 年 6 月 11 日

1 はじめに

社会的背景として自転車の単独事故は年 5497 件発生していて、その割合は年々増加しているというものがある [1].

そして、単独事故の原因の内 7 割が転倒事故であるというものがある [2].

1.1 問題点

ここで、自動車の単独事故の原因の内訳と比較してみると、車の単独事故における転倒 (横転) 事故の割合は 1% である一方で、自転車の転倒事故の原因の内 7 割が転倒事故であることから自転車は乗り物の性質上転倒事故が発生しやすいという問題があると考えられる。

1.2 目的

問題を解決することにより、自転車で転倒事故が発生しない、または発生しにくくすることで自転車の転倒事故を減少させることを目的とする。

1.3 主張

現状、自転車は乗り物の性質上転倒事故が発生するという問題に対して走行中に自転車の転倒を抑制するという製品はない。そのため今は自転車の転倒事故を減少させるためには呼びかけなどの活動が行われている。

しかし、呼びかけによって乗り手の注意力を高めたとしても急な転倒や路面状況による転倒など意識するだけでは防ぐことのできない転倒事故がある。

そこで我々は自転車姿勢制御モジュールというものを提案する。外付けで物理的に転倒を抑制するモジュールを提案することで呼びかけによって転倒に対して乗り手に注意を促すよりも確実に転倒事故を防止、減少させることに対するアプローチになると考えられる。

2 解決策としての提案手法

自転車の性質上、転倒事故が発生しやすいという問題に対して我々は自転車姿勢制御モジュールというものを提案する。自転車姿勢制御モジュールの概念図を図 1 に示す

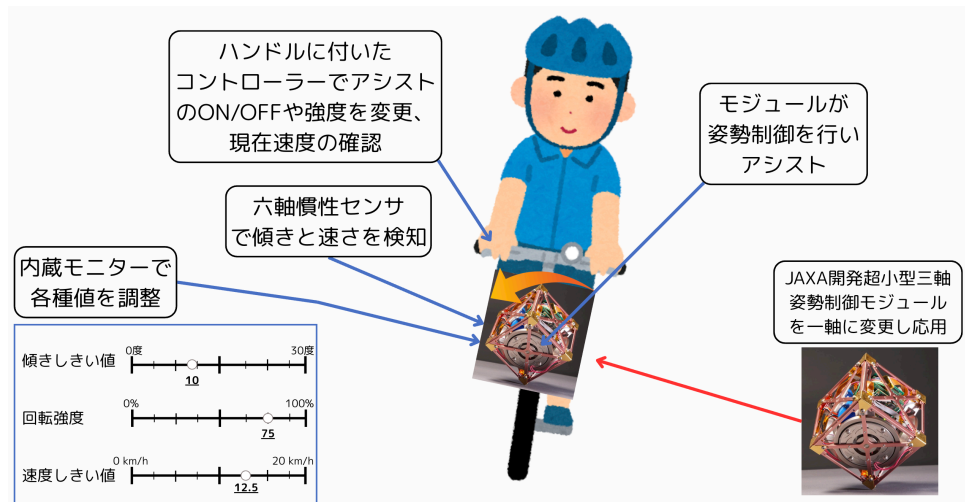


図1 自転車姿勢制御モジュールの概念図

まず、先行研究として、JAXAが開発した超小型三軸姿勢制御モジュールについての解説を行う。[3] このモジュールは人工衛星の小型化を図るために作られたもので、慣性センサから本体の傾きを検知し、ブラシレス DC モータでフライホイールを回転させることで生まれた反作用による力を用いて本体の姿勢を制御するものである。サイズは $10 \times 10 \times 10\text{cm}^3$ である。

次に、提案するモジュールについての解説を行う。提案する自転車姿勢制御モジュールは先行研究で用いられている技術を応用し、姿勢制御を行う軸を三軸から一軸に変更することで小型化と軽量化を図り、自転車に搭載しやすくしたモジュールである。このモジュールは搭載されている六軸慣性センサーにより自転車の傾き、自転車の速度、横方向加速度を取得し、取得した情報を下にモーターを回転させ、モーターの回転によって生まれる力で自転車の姿勢を保つものである。また、自転車のハンドル部分にコントローラーを取り付けることで、アシストの ON/OFF やアシストの強度変更を運転中に行うことができる様になっている。このコントローラーには速度のモニター用の速度が有効数字3桁以上で確認できる二色7セグメント LED もついており、走行速度の確認も同時に行えるようになっている。この速度モニターは自動アシストが有効になっているか、なっていないかで表示する色を変える処理を加え、速度の確認とともにアシストが有効になっているかどうかの確認についても行えるようにする。

このモジュールが動作する条件は、低速時に車体のふらつきを検知したとき、急な転倒を検知したとき、コントローラーからの操作でアシスト ON が指定されたときの3つである。低速時に車体のふらつきを検知したときの制御に関しては、アシスト自動 OFF 速度の設定を行うことにより、自転車が設定した速度以上に達し、十分車体が安定したと判断される場合は自動でふらつきを検知したときの制御が OFF になり、車体を傾けてのカーブが可能になる。急な転倒を検知したときの制御に関しては六軸慣性センサーで車体の横方向の加速度の急激な変化を検知し、転倒を検知したときに強力なアシストを行う機能である。

検出される傾きのしきい値やモーターの回転力の強さ、アシスト自動 OFF 速度のしきい値など、乗る人によって個別に設定が必要な項目についてはモジュールに取り付けられたモニターで細く設定することができる。自転車後輪上部にある荷台への取り付けを可能にすることで様々な自転車に特別な取り付け器具無しでつけられる様にするを想定している。

次にモジュールの制御に関する具体的な流れ図を図2に示す。

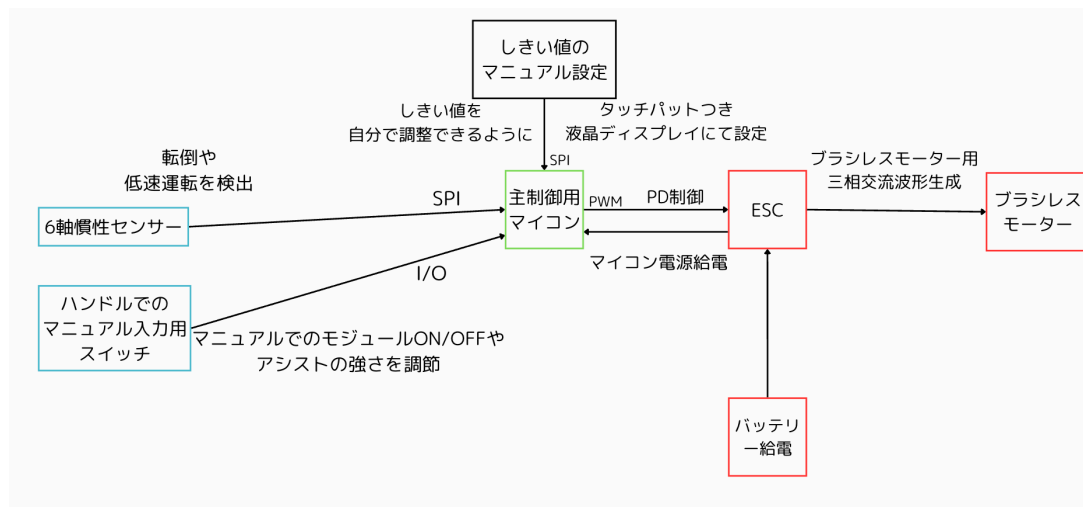


図2 自転車姿勢制御モジュールの制御の流れ図

制御用マイコンへの入力として、6 軸慣性センサー、ハンドル部のコントローラーがあり、そのデータに基づいてマイコンが PID 制御を行い、適切な PWM 波形を生成し、ESC に対して出力、そして ESC が PWM 波形を三相交流電圧に変換し、ブラシレスモーターを制御するという流れになっている。ここで ESC に付いての解説を行う。ブラシレスモーターは DC モーターと違い、制御するために単純な直流電圧ではなく三相交流電圧が要求される。そこで、PWM 波形に基づいて三相交流波形を生成するものが ESC である。

そして次にモジュールを実現するための部品の選定を行った。まず、6 軸慣性センサについては車体の速度検出、車体の傾き検出、そして急な転倒の検知が求められるのでデータの取得が高速かつデータの精度の高いセンサーが要求される。そこで今回は Panasonic が販売している EWTS5G を使用するのが適切だと考えられる。EWTS5G はマイコンとの通信方式が SPI であり、他のシリアル規格である I²c や UART と比べて高速なデータ通信が可能であり、感度出力誤差も $\leq \pm 3.0\%$ であることから精度も申し分ないと考えられるので、自転車姿勢制御モジュールの 6 軸慣性センサとして適していると考えられる。

自転車の姿勢を保てるほどの強力なモーターに関してはブラシレスモーターを使用するのが適切と考えられる。ブラシレスモーターは DC モーターに比べ小型でも強い力を生み出すことができるのでこのモジュールの要件に適している。実験を行ったわけではないのでどのくらいのパワーがあれば自転車の姿勢制御が十分に行えるかはわからないが、今回はネットで売られている商品の内なるべく 1 ボルトあたりの無負荷回転数が高いものを使用する想定にする。無負荷回転数が高ければ、フライホイールを高速で回し、大きな力を得ることが可能だと考えられる。また、1 ボルトあたりの無負荷回転数が増えるとモーターのトルクが下げるという問題があるが、もしフライホイールを回すためのトルクが足りなかった場合は減速ギアを使用し、トルクを上げることで対応可能である。そして、もう一つのブラシレスモーターの選定基準として、センサー付きかという基準を設ける。ブラシレスモーターにはセンサー付きのものがあ、このセンサー付きのモデルはローターの位置を把握する事ができ、これにより、スムーズなモーターの始動制御が可能になる。自転車姿勢制御モジュールは細かな制御が必要だと考えられるため、このセンサーがついていることは必須の条件だと考えられる。これらの基準から部品の選定を行うと 1 ボルトあたりの無負荷回転数が 4150 回転と高く、センサー付きのブラシレスモーターであるジフォース社の Neo Fast 8.5T というモーターを使用するのが適切であると考えられる。

次に Neo Fast 8.5T も動かすことができる ESC の選定を行った。Neo Fast 8.5T は対応電圧 8.4V、最大出力 345W なので電流量 $I = W/V$ で求めると $I = 41A$ となり、ESC の出力できる電流量が 41A 以上のものを搭載しなければならない。また、モーター始動時の突入電流のことを考慮し選定を行ったところ、ジーフォース社の BLC50 Type-D を使用するのが適切だと考えられる。この ESC は連続最大電流が 50A でブラシレスモーターの電流に耐えることができ、また、瞬間最大電流が 300A なので突入電流に対しても十分強い。ため BLC50 Type-D を使用するのが適切だと言える。

次にバッテリーに付いて考える。BLC50 Type-D は 2 セル 7.4V のリポバッテリーか 4-6 セル 4.8~7.2V のニッケル水素電池に対応している。今回はニッケル水素電池に比べて小型でも充電容量が多く、高い電流を流すことのできる 2 セル 7.4V のリポバッテリーを使用するものとする。条件にあう商品を調べたところ、容量も十分な SIGP 2S 7.4V リチウム電池 6000mAh という商品が見つかったのでこの商品を使用する想定とする。

マイコンは SPI での通信と PWM 出力ができるものが要求される。この条件は昨今のマイコンにはだいたい当てはまるので今回はなるべく開発しやすく安価で高性能なマイコンを選ぶ。この条件で考えた場合の販売している ESP32-DEVKITC-32E を使用するのが望ましい。このマイコンは一枚 1,292 円と安価かつ arduino や PlatformIO といった統合開発環境での開発が可能なので使用するのに適していると考えられる。

次にしきい値等の調整に用いる液晶モジュールについて考える。値の調整を行うため外部からの入力が必要だが、タッチパッド機能付きの液晶を採用すればボタン等の入力機器を搭載しなくてもそれ単体で役割を果たせるためタッチパッド機能付きの液晶を探す。十分設定が行えるサイズであることも考慮し、今回は ILI9341 搭載 2.8 インチ SPI 制御タッチパネル付 TFT 液晶 MSP2807 を使用する想定とする。

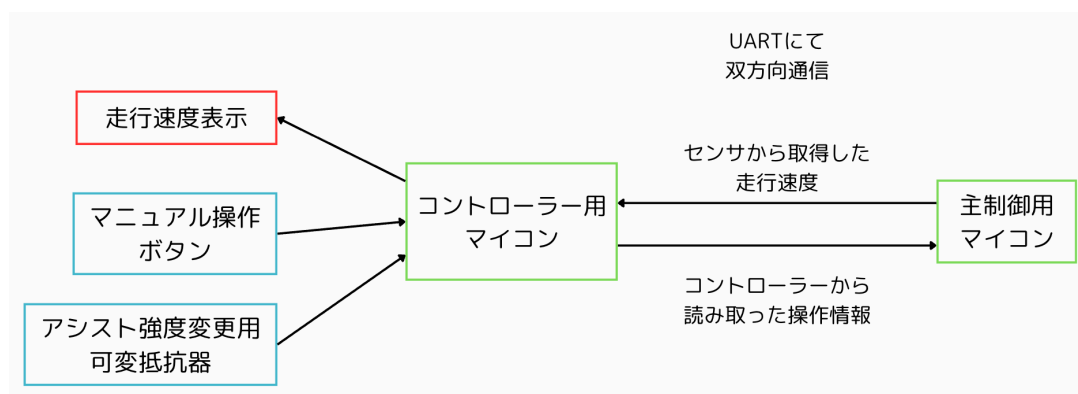


図3 コントローラー制御の流れ図

次にハンドル部のコントローラーに関しての解説を行う。ハンドル部についての処理の流れ図を図3に示す。

コントローラーはハンドル部に取り付けられており、主制御部である後輪からは 1 メートルほど離れており、単純に GPIO によりスイッチからの情報を取得しようとする配線の距離が長いとノイズが乗り、正確に値が取得できないというリスクが有る。そこで今回はコントローラー部にも主制御用マイコンとは別にコントローラー用マイコンを搭載する。コントローラー用マイコンと主制御用マイコンは UART にて通信を行う。 I^2c は推奨される通信距離が 20 30cm、SPI は 10cm 程度であるため今回の通信には不向きであるが UART なら 10m 程度の距離でも通信可能であるため今回の要件に適している。通信するデータの内容は、主制御用マイコンからコントローラー用マイコンに向けては自転車の速度、コントローラー用マイコンから主制御用マイ

コンに向けては入力されたボタンと可変抵抗器の値を送信する。これによりコントローラーでの速度表示とコントローラーからの操作情報の取得が可能になる。

速度確認用の 7 セグメント LED は有効数字 3 桁以上で速度を表現でき、かつ 2 色以上の表示色をもつものが求められる。そこで表示桁が 3 桁以上かつ、ドットポイントがあるもので表示色が 2 色のものを選ぶ必要がある。これを下に条件に合う 7 セグメント LED を調べた結果 4 桁 2 色 7 セグメント LED 表示器 赤・黄緑 カソードコモン OSL40363-LRYG という製品が見つかった。最低 3 桁でも要件は満たされているが、拡張性に付いて考慮し、今回は 4 桁のものを採用する。

3 提案手法の実現可能性の評価と妥当性の検証

今回提案したモジュールはフライホイールの回転によって生まれた反作用の力を用いて自転車の姿勢制御を行うものとなっている。六軸慣性センサから自転車の速度、傾き、横方向加速度を取得、コントローラーからはマニュアル操作の受付を行い、それらの情報に基づいて PID 制御を行い適切な PWM 波形を出力し、波形に基づいて ESC がブラシレスモーターを制御するというものになっている。

ここで、提案するモジュールの実現可能性の評価と妥当性の検証を行う。実現可能性の評価として適切な部品の選定は済んでいるのでそれらの部品が調達可能であるかについての考察と、コストを考えた場合実現可能かについての考察を行う。妥当性の検証としてコントローラーは必要かについての考察と既存の自転車姿勢制御システムの研究と比べてこのモジュールを実現する価値があるかについての考察を行う。そして最後に、この提案をするうえでの課題について考える。

3.1 部品が調達可能かについての考察

まず、選定した部品が生産終了、在庫切れで調達が不可能なため実現できなくなっていないかについての考察を行う。

六軸慣性センサである Panasonic 社の EWTS5G に関しては DigiKey での取り扱いがあり、2025 年 6 月 18 日現在 1,866 個の在庫があるため調達可能である。

ブラシレスモーターに使用するジーフォース社の Neo Fast 8.5T に関しても 2025 年 6 月 18 日現在 Amazon での取り扱いがあり、在庫不足の表記もないことから調達可能である。

ESC に使用するジーフォース社の BLC50 Type-D に関しても 2025 年 6 月 18 日現在 Amazon での取り扱いがあり、在庫不足の表記もないことから調達可能である。

リポバッテリーに用いる SIGP 2S 7.4V 6000mAh に関しても 2025 年 6 月 18 日現在 Amazon での取り扱いがあり、在庫不足の表記もないことから調達可能である。

マイコンに使用する Espressif Systems 社の ESP32-DEVKITC-32E に関しても 2025 年 6 月 18 日現在 DigiKey での取り扱いがあり、1,183 個の在庫があるため調達可能である。

液晶モジュールに使用する MSP2807 に関しても 2025 年 6 月 18 日現在秋月電子通商にて取り扱いがあり 701 個の在庫があることから、調達可能である。

7 セグメント LED に用いる OSL40363-LRYG に関しても 2025 年 6 月 18 日現在秋月電子通商にて取り扱いがあり 506 個の在庫があることから、調達可能である。

このことから使用する製品はすべて現在販売されており在庫もあることから調達可能なためモジュールの開発は実現可能であると考えられる。

3.2 コストに関する考察

次に、コスト面に付いての考察を行う。まずは使用する製品の値段をまとめる。値段は取り扱いを確認した店舗での販売価格を参考にする。まとめた結果を表 1 に示す。

表 1 使用を想定する製品の値段表

取り扱い店舗	製品名	値段 (円)
DigiKey	6 軸慣性センサー (Panasonic EWTS5G)	2,821
Amazon	ブラシレスモーター (Neo Fast 8.5T)	7,480
Amazon	ESC (BLC50 Type-D)	6,530
Amazon	リポバッテリー (SIGP 2S 7.4V 6000mAh)	4,199
DigiKey	マイコン (ESP32-DEVKITC-32E)	1,292
秋月電子通商	液晶モジュール (MSP2807)	1,450
秋月電子通商	7セグメント LED (OSL40363-LRYG)	220

マイコンは 2 つ使用するので 2 個分の値段で計算し、全ての値段を合計すると以下のようになります。

$$\begin{aligned}\text{合計金額} &= 2,821 + 7,480 + 6,530 + 4,199 + (1,292 \times 2) + 1,450 + 220 \\ &= 25,284 \text{ 円}\end{aligned}$$

したがって、提案する自転車姿勢制御モジュールの部品コストは約 25,284 円となります。更にここに具体的な金額の算出の難しい項目の金額を追加する。細かな電子部品 (抵抗, コンデンサーなど) やスイッチの値段を 1000 円程度と仮定し、外形フレームやフライホイールの値段を 10000 円程度と仮定すると約 37000 円が制作費用にかかると考えられる。

モジュールが様々な自転車に取り付け可能で使いまわしできることから十分妥当な金額だと言える。

3.3 コントローラーは必要かに付いての考察

コントローラーは本当に必要かについての考察を行う。コントローラーをつける目的としてはマニュアル操作でのアシスト ON/OFF 切り替えと、アシスト強度の変更、走行速度の確認である。

ここで、コントローラーが無い場合どのような問題があるか考える。コントローラーが無い場合、まず運転中のマニュアル操作でのアシスト ON/OFF の切り替えができなくなる。これが起こってしまうと自分の想定していないタイミングでアシストが ON になってしまった場合とつぎに OFF にすることができず、転倒事故の発生につながってしまうと考えられる。これは転倒事故の減少というこのモジュールの目的と真反対の結果なので、起こってはならない。また、逆に何らかの要因でアシストが自動で ON にならなかった場合マニュアル操作で ON にできないとこちらも転倒事故の減少というこのモジュールの目的から遠ざかってしまうので起こってはならない。よってマニュアル操作でのアシスト ON/OFF 切り替えは必須の機能だと考えられる。次に、コントローラーが無い場合、アシスト強度の運転中の変更ができなくなるについて考える。一見、モーターの回転する強さはモニターから変更ができるためこの機能は不要なものかと思える。しかし、この機能がなかった場合、モニターで設定した値が適切でなかった時にとつぎのアシストの強度変更ができなく、ア

シストが弱すぎたり逆に強すぎたりして転倒につながってしまうと考えられる。このとき転倒事故の減少というこのモジュールの目的にそぐわなくなるのでこの機能は必要だと考えられる。しかし、PID 制御するなら多少モニターで設定した値が適切でなかったとしても補正が効くのでは？ という考え方もできる。確かに補正がされることで結果的にはアシストができるかもしれないが PID 制御の性質上、適切に補正がなされるまで補正が完了するまでの遅延が生まれる。これが生まれてしまうと急な転倒など、即座にアシストが必要な場面で若干の遅れが生じてしまう可能性がある。これは転倒事故の減少というこのモジュールの目的に対して不確実なものにしてしまう恐れがあるので、目的を確実に達成できるようにするにはこの機能は確実に必要だと考えられる。

3.4 既存のジャイロスコープを取り付けた自転車の安定化モジュールとの違い

製品化はしていないが、芝浦工業大学の研究としてジャイロ制御による自転車転倒防止システムというものがある。このモジュールとの違いを考察する。

まず、自転車に対する姿勢制御の手段が違う。ジャイロ制御による自転車転倒防止システムはその名の通りフライホイールが回転し続ける事によって生まれるジャイロ効果を利用して姿勢を制御するものである。しかし、我々が提案するモジュールは転倒しそうになった場合のみフライホイールを回転させ回転したときに生じる反作用の力で姿勢を補正するものである。ジャイロ効果を用いて制御する場合、まずアシストを行いたい場合常にモーターを回転させ続ける必要がある。この場合、アシストが不必要な場面でもモーターは常に回転し続け、モーターが発熱することになる。モーターが発熱すると内部抵抗が増加しモーターの出力が落ちたり、モーターが劣化するという問題がある。しかし我々の提案するモジュールであれば、アシストが必要な場面のみ適切にモーターを回転させるという処理方法のためモーターの発熱を最小限に抑えることができる。

ここで、我々の提案するモジュールの欠点についても考える。ジャイロ効果を用いた場合は単純にモーターを回転させるだけでいいので自転車の傾きを取得したり複雑な PID 制御が不要というメリットが有る。だが、傾きも取得しないとなると低速時のみモーターを回すという処理になる。その場合ある程度速度が出ている状況で急な転倒が発生した場合モーターは回転しておらず自転車の姿勢の制御ができない。そのため、ジャイロ効果を用いた場合だと低速時の姿勢の安定化しかできなくなる。

よって、追加のセンサーや複雑な制御が必要な代わりに急な転倒などのジャイロ効果を用いた場合では対応できないケースに対応することができるとなると自転車の転倒事故を減少させるというこのモジュールの目的に更に効果的にアプローチでき、モーターを回転させるという処理方法のためモーターの発熱を最小限に抑えることができる我々の提案するフライホイールが回転する事によって生まれる反作用の力を用いた制御方法の方が優れていると言える。

3.5 提案する上での課題

このモジュールを提案するにあたっての課題は 2 つある。

1 つ目はモーターの出力がどの程度あれば自転車の姿勢を保つのに十分かについての検証を行えていないことである。

今回はなるべく 1 ボルトあたりの無負荷回転数が高いものを選ぶという基準で部品の選定を行った。回転数が高ければそれだけフライホイールを回す事ができ、より多くの反作用の力を生み出すことができるのでこの基準については間違っていないと考えられる。

しかし、その結果選ばれたモーターの 1 ボルトあたりの無負荷回転数である 4150 回転は他のブラシレスモーターと比べて回転数が多いというだけであり、4150 回転あれば自転車の姿勢を制御できるという確実な根拠を示せていない。

2 つ目の課題はリポバッテリーの安全性についての課題である。

リポバッテリーは放電性能に優れる一方、過充電をすると発熱や膨張、最悪の場合発火や爆発が起こるという性質と、過放電をすると内部構造が損傷し、容量が低下したり、充電ができなくなったりするという性質がある。そのため適切に充電管理を行う必要があり、知識のない利用者でも確実にバッテリーを運用することができる必要がある。しかし、今回はバッテリー充電については考察、想定ができていない。

4 おわりに

今回我々は自転車は乗り物の性質上転倒事故が発生しやすいという問題に対して自転車の転倒事故を減少させるモジュールの提案を行った。そこで提案した自転車姿勢制御モジュールはモータによってフライホイールを回転させ生まれる反作用の力によって自転車の姿勢を制御するものである。

このモジュールが実現すれば自転車の転倒事故の防止、減少をさせることができ、自転車は乗り物の性質上転倒事故が発生しやすいという問題を解消または軽減できる。

また、自転車の単独事故は年 5497 件発生していて、その割合は年々増加しているという社会的背景に対しても、自転車の単独事故が件数の減少することが期待できる。

参考文献

- [1] NEONAVI, 【自転車事故の実態】を知って安全に利用しよう～令和 5 年「交通事故統計」から, 2025 年 6 月 11 日閲覧,<https://neonavi.info/11203/>
- [2] 東京海上日動, 便利な自転車は運転次第で危険な乗り物になる, 2025 年 6 月 11 日閲覧,<https://www.tokiomarine-nichido.co.jp/world/guide/drive/202105.html>
- [3] 礒川悌次郎, & 信川創. (2023). 脳・神経系における機能創発の解明を目指した数理モデリングとデータ駆動分析—局所神経回路から大域的全脳レベルまで—. 計測と制御, 62(10), 587-592.