

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

1.1 社会的背景

現状、自転車の単独事故は年 5497 件発生して、自転車全体の事故における割合は年々増加している [1]. そこで、単独事故の原因について調べると 7 割が転倒事故である事がわかった [2]. 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事がわかる.

自転車が自動車と比べて転倒しやすいのは自転車が 2 輪だからである. なぜなら自動車と自転車を比較すると自動車は 4 輪であるのに対して自転車は 2 輪なので、横から加わる力に弱く、自立しないため走行時にバランスを取らなければならないためである. 自転車の転倒に対する防止策として乗り手に対する呼びかけがある. この方法は乗り手に対して転倒を意識させることで転倒ないように運転するようになってもらえる効果がある. しかしこの方法だと意識が薄れたら効果が減少するという問題や、予期しない路面の段差による急な転倒事故は防げないという問題がある.

乗り手の意識や外部の状況に依存しない転倒防止技術として、ジャイロ効果を用いた転倒防止システムが開発されている [3]. しかしこのシステムは常にモーターを回転させ続けるためモーターが発熱するという問題や、補正が必要ない状況でもジャイロ効果を発生させるためにモーターを回し続けなければならないという問題がある.

ジャイロ効果以外に姿勢を安定させる技術としてフライホイールを回転させることにより生まれる反作用の力を利用して姿勢を制御する技術がある. ジャイロ効果を利用しないため常に回転し続けているわけではなく補正が必要になった場合のみ回転し反作用の力を発生させるものである. この技術は主に衛星の分野で使われる技術であり自転車の分野では利用されていない.

1.2 問題点

自転車は乗り物の性質上横から加わる力で簡単にバランスを崩しやすく、自立しないため、安定した走行を行うには乗り手が意識してバランスを取らなければならない. また、いくら意識していても転倒事故が起こる可能性があるという問題がある.

1.3 目的

問題を解決することにより、自転車を乗り手の意識や外部の状況に左右されない安定した乗り物にすることを目的とする。自転車の通常走行速度は平均 15km/h であることから、 5km/h 以下の低速走行時に 100m 走行し、幅 15cm 以上ブレることなくまっすぐ走行できるかということと、 10km/h 以上の通常速度での走行時に凸凹の路面を 100m 走行し、転倒せずに走行しきれるかということを評価指標とする。

1.4 主張

我々はフライホイールが回転することによって生まれる反作用の力によって自転車の姿勢を制御するモジュールを提案する。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自転車を乗り手の技量や路面状況に左右されない安定した乗り物にすることが期待できる。

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

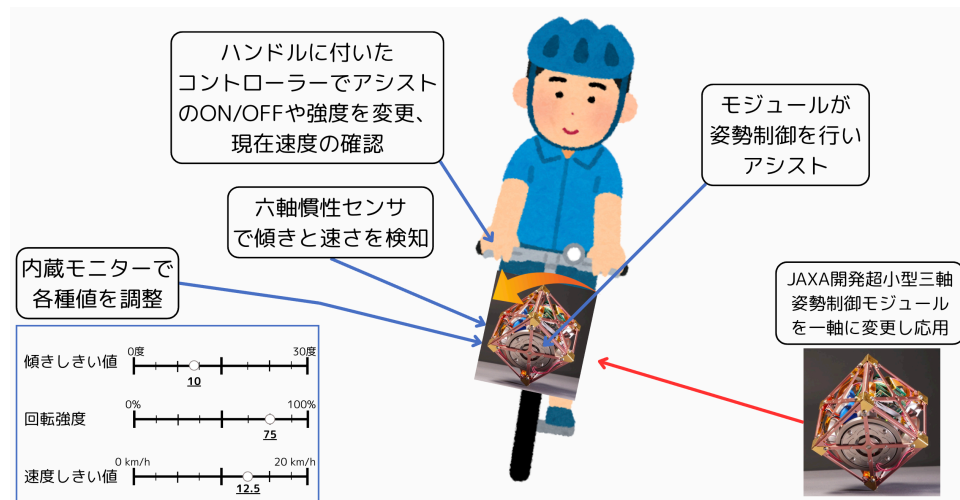


図1 自転車姿勢制御モジュールの概念図

まず、先行研究として、JAXAが開発した超小型3軸姿勢制御モジュールについての解説を行う。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 [4]。

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3軸から1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6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

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 2 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事を想定している。

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。

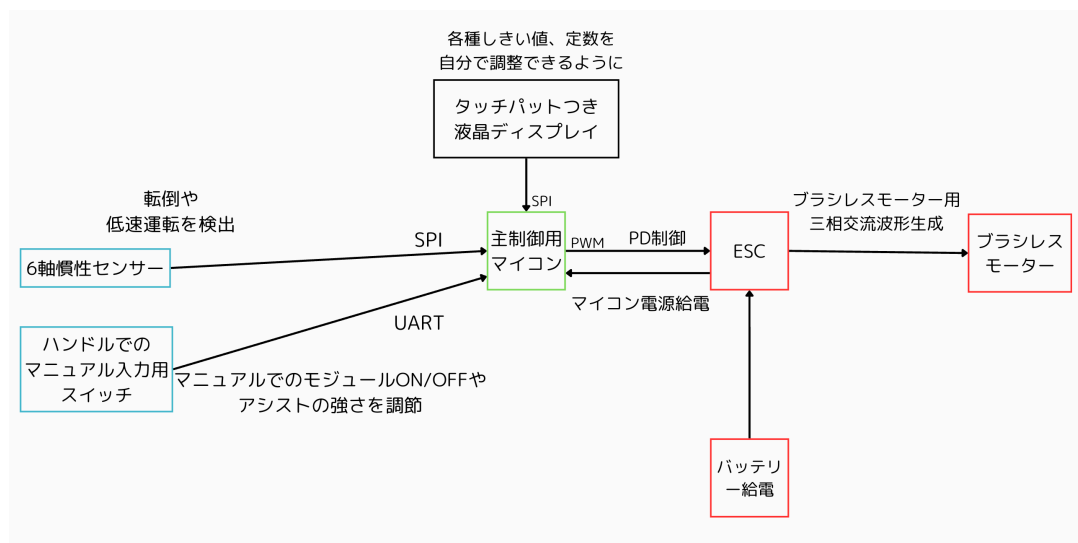


図 2 自転車姿勢制御モジュールの制御の流れ図

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 についての解説を行う。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のが ESC である。

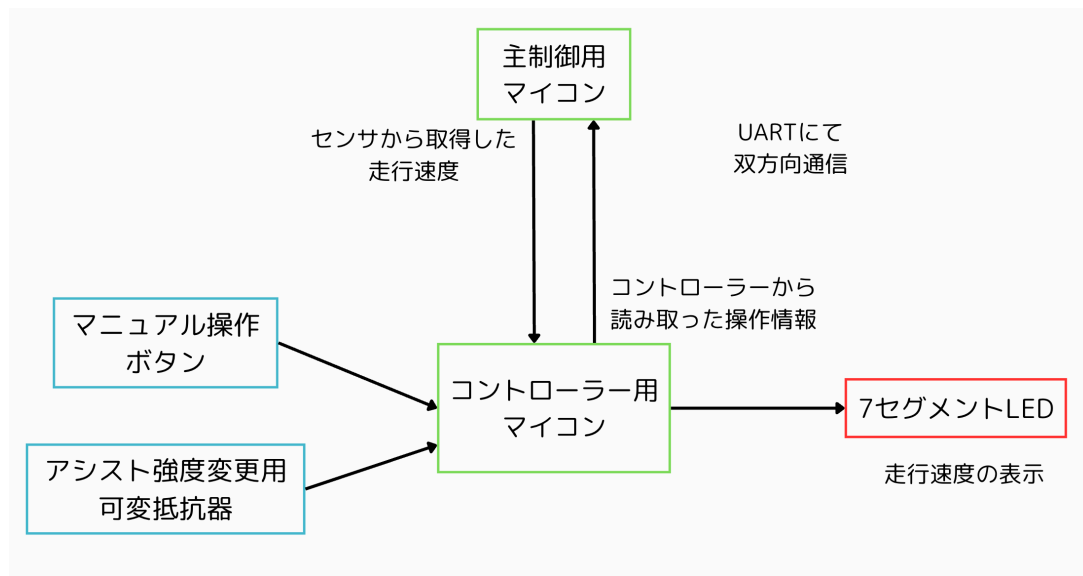


図3 コントローラー制御の流れ図

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。

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どのくらいの回転数のモーターがあれば姿勢を制御するほどの力を生み出せるかについての考察と、どの様にPID制御を行えば適切に姿勢を制御できるかについての考察と、部品の選定についての考察と、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、この提案をする上での課題について考える。

まず、選定したモーターで転倒を抑制できるほどの力を生み出せるかについての考察を行う。物体が転倒するときに生まれる力である転倒モーメントは以下 (1) 式で求められる。物体が転倒するときに生じる転倒モーメント M は、重心の高さ h 、質量 m 、加速度 a によって以下の式で表される。

$$M = h \cdot m \cdot a \quad (1)$$

- M : 転倒モーメント (物体が転倒するときに生じる力の大きさ)
- h : 重心の高さ
- m : 質量
- a : 加速度

この時、重心の高さを 1m 、質量を自転車の重さと乗り手の体重を合わせて 80kg 、重力加速度 9.8m/s^2 、車体の傾きを 20° とそれぞれ仮定し、(1) 式に代入すると転倒モーメントは以下のように計算できる。

$$M = 1 \cdot 80 \cdot 9.8 \cdot \sin(20^\circ) \approx 268.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

したがって、フライホイールで $268.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 以上のトルクを生み出す必要がある。

フライホイールが生み出すトルクは、回転体の運動方程式 (2) で求められる。

$$M = I \cdot \alpha \quad (2)$$

- M : トルク (回転体に生じる力の大きさ)
- I : 慣性モーメント
- α : 角加速度

次に、慣性モーメントを求める。今回は自転車の荷台に搭載することを考え、フライホイールは鉄製で直径 20cm 、長さ 7cm の円柱を仮定する。鉄の密度を 7.85g/cm^3 とすると、回転体の質量 m は以下のように求められる。

$$m = (\pi \cdot (10)^2 \cdot 7) \cdot 7.85 \approx 17,249 \text{ g} \approx 17.25 \text{ kg}$$

この質量を円柱の慣性モーメントを求める (3) 式に代入すると、

$$I = \frac{1}{2}mr^2 \quad (3)$$

$$I = \frac{1}{2} \cdot 17.25 \cdot (0.1)^2 \approx 0.08625 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

よってフライホイールの慣性モーメントは $0.08625 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ となる。

求められた慣性モーメントで $268.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 以上のトルクを生み出すために必要な角加速度を (2) 式を利用して計算する。

$$\alpha = \frac{M}{I} = \frac{268.8}{0.08625} \approx 3116.5 \text{ rad/s}^2$$

ここで、角加速度を rpm (1 分間あたりの回転数) に変換する。一秒間でその回転数まで上昇するという想定にすると、

$$\text{RPM} = \omega \times \frac{60}{2\pi} = 3116.5 \times \frac{60}{2\pi} \approx 29760 \text{ rpm}$$

となり、29760 rpm 以上のモーターが要求される。ブラシレスモーターを調べたところ、30000rpm 以上の回転数を出せるブラシレスモーターが存在することから実現可能だと考えられる。

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。

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。

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態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。

このモジュールを提案するにあたっての課題についての考察を行う。

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っ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を乗り手の技術や外部の状況に左右されない安定した乗り物になる。また、自転車の事故の内、単独事故の割合が増加傾向であるという社会的背景に対しても単独事故の内 7 割が転倒事故であることから転倒事故を減らすことで単独事故の割合を減少させることも見込める。

このモジュールが実現すれば今まではジャイロ効果を利用した制御が必要だった分野に対して、フライホイールが回転することによって生まれる反作用の力を利用したモジュールでも代用可能であるということを示す事ができると考えられる。

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] 妹尾 大作, 古川 修, 長谷川 浩志, 間下 博 (2017). ジャイロ制御による低速時の自転車転倒防止システムを開発, 第 26 回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2017) https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmetld/2017.26/0/2017.26_1104/_pdf/-char/ja
- [4] JAXA 研究開発部門 超小型三軸姿勢制御 <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/innovation/triaxial.html>
- [5] DigiKey EWTS5GNB2 <https://www.digikey.jp/ja/products/detail/panasonic-electronic-components/EWTS5GNB21/22576403>
- [6] Amazon ジーフォース Neo Fast 8.5T ブラシレスモーター (センサー付) G0352 日本正規品 <https://www.amazon.co.jp/G-FORCE-%E3%82%B8%E3%83%BC%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%BC%E3%82%B9-Fast-8-5T-G0352/dp/B08VB2PS1W>
- [7] Amazon ジーフォース BLC50 Type-D G0380 日本正規品 <https://www.amazon.co.jp/%E3%82%B8%E3%83%BC%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%BC%E3%82%B9-BLC50-Type-D-G0380-%E6%97%A5%E6%9C%AC%E6%AD%A3%E8%A6%8F%E5%93%81/dp/B09XT12ZCB>
- [8] Amazon SIGP 2S 7.4V リチウム電池 6000mAh 70C ソフトケース T プラグ付き リモートコントロールカートラックオイルタンクレースの趣味に適しています <https://www.amazon.co.jp/7-4V%E3%83%AA%E3%83%81%E3%82%A6%E3%83%A0%E9%9B%BB%E6%B1%A0-6000mAh-70C%E3%82%BD%E3%83%95%E3%83%88%E3%82%B1%E3%83%BC%E3%82%B9-%E3%83%97%E3%83%A9%E3%82%B0%E4%BB%98%E3%81%8D-%E3%83%AA%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%88%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%82%AB%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%A9%E3%83%83%E3%82%AF%E3%82%AA%E3%82%A4%E3%83%9C%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%82%AF%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%B9%E3%81%AE%E8%B6%A3%E5%91%B3%E3%81%AB%E9%81%A9%E3%81%97%E3%81%A6%E3%81%84%E3%81%BE%E3%81%99/dp/>

B098K9ZH6N

- [9] digikey ESP32-DEVKITC-32E <https://www.digikey.jp/ja/products/detail/espressif-systems/ESP32-DEVKITC-32E/12091810>
- [10] 秋月電子通商 ILI9341 搭載 2.8 インチ SPI 制御タッチパネル付 TFT 液晶 MSP2807 <https://akizukidenshi.com/catalog/g/g116265/>
- [11] 秋月電子 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 <https://akizukidenshi.com/catalog/g/g115999/>