

インホイールモータを用いた電動キックボードの制作

Manufacture of Electric Scooters using In-Wheel Motors

栗 秋 亮 太^{*1}

五 十 嵐 智 彦^{*1}

KURIAKI Ryota

IGARASHI Tomohiko

要約 電動車両 (EV : Electric Vehicle) とは、エンジン・燃料の代わりに電池に蓄えた電気エネルギーを動力源としてモータにより駆動する車両である。本稿では 2018 年より総合制作のテーマとして取り組んできたブラシレス DC モータの制御に関する研究の延長として、次世代電気自動車のコンポーネント技術として注目されているインホイールモータについてこれを活用した電動キックボードを制作した。

1. はじめに

電気エネルギー制御科では、制御工学や電気機器、電気・電子回路について学習するが、これらを総合的に活用し学習するや実習装置がない状況である。そこで総合制作の取り組みとしてモータの設計からモータドライバの制作、制御プログラミングまでの一貫した学習ができ、かつ、負荷装置として使用できる装置を作ることを目標に制作を行ったところである。^{※1),2)}本稿ではこれらの取組みの延長として新たにブラシレス DC モータ (以下 BLDC とする) の一種であるインホイールモータを採用した電動車両の制作を行ったので、その結果について報告する。

2. インホイールモータとは

インホイールモータ (以下 IWM とする) はホイールモータやハブモータとも呼ばれる主として電気自動車などに使用されるモータである。IWM はモータが車輪のハブ内部もしくはハブと同軸で繋がった構造をしており、駆動力がホイールへ直接的に伝達される。このため、従来のギアや駆動軸などによるエネルギー損失がなく、重量・容積・費用・故障・保守などの点で優れており、次世代自動車のコンポーネント技術とされているモータである。電気自動車などに採用した場合、各車輪を個別に駆動できることから、より高度な制御が行えるほかドライブシャフト等の機械的な制約がないため駆動力の配分やデザインの面においてより高い自由度を得ることができる。

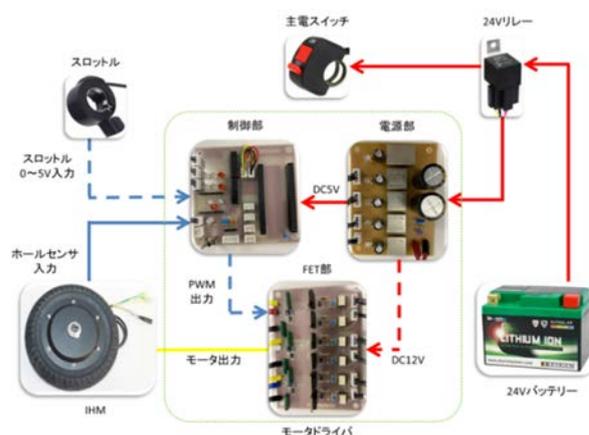


図1 IWMの制御システム構成イメージ

筆者らは比較的安価であり、かつ、容易に購入が可能な市販の IWM を採用し、これを制御できるモータドライバを制作した。また、筐体には市販のキックボードを採用し、この前輪を IWM に改修を行った。図1に制作した IWM の制御システム構成イメージを示す。

3. IWMの選定

製作にあたり、駆動に必要なとなるモータ出力およびトルクについて設計を行った。走行は屋外で行うものとし、平坦な通路 (勾配 0°) を目標運転速度 15 km/h (8 inch タイヤ換算で回転速度 : 約 530 min⁻¹)、目標速度までの加速時間はキックスタートを行いながら比較的緩やかに目標速度まで加速するものとして 15 秒と設定した。次に、車両の転がり摩擦抵抗および走行時の空気抵抗および加速抵抗について求めた。採用したキックボードの車体重量は約 3 kg であり、バッテリーや IWM の重量を合わせて約 5 kg 程度となると想定

^{*1} 電気エネルギー制御科

Department of Electrical and Energy Control

し、操縦者の体重 W を 70kg として車両の転がり摩擦係数 μ について求めたところ、 $\mu = 0.020$ となった。また、車体の全影投影面積 A の値は車両を実測した結果 0.12 m^2 であり、車両の空気抵抗係数 Cd の値は過去に採用した自転車での値を参考に $Cd = 0.9$ 、空気密度 ρ は 1.25 kg/m^3 とし、機械効率 η は 0.8 として、各抵抗値を以下の式で求めた。

① 転がり摩擦抵抗 $R_r = \mu \cdot W = \boxed{14.70 \text{ N}}$

② 空気抵抗 $R_a = \frac{1}{2} \cdot Cd \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 = \boxed{2.083 \text{ N}}$

③ 加速抵抗 $R_v = (W + W_r) \times \alpha / g = \boxed{27.78 \text{ N}}$

上記の計算結果より、全走行抵抗 $R_{all} = 44.56 \text{ N}$ であり、この値から必要となる所要動力 $P_{all} [\text{W}]$ およびトルク $\tau_{all} [\text{N} \cdot \text{m}]$ の値は以下のように求められる。

④ 所要動力 $P_{all} = R_{all} \cdot V / \eta = \boxed{309.45 \text{ W}}$

⑤ トルク $\tau_{all} = R_{all} \cdot D / 2 / \eta = \boxed{5.57 \text{ N} \cdot \text{m}}$

以上の結果から、IWMは駆動電圧 24V、定格出力 350W、最大トルク $11 \text{ N} \cdot \text{m}$ のものを採用した。

4. IWM用ドライバの設計・制作

次に IWM を駆動するモータドライバを設計する。別添図 1 に制作した IWM 用モータドライバ回路図を示す。回路は、三相フルブリッジインバータ部、電源回路部、制御回路部で構成される。以下、各部の詳細について解説する。

(1) 三相フルブリッジインバータ部の設計・制作

IWMはBLDCと同様に、三相の各コイルにそれぞれハイサイド（電源側）、ローサイド（グラウンド側）に接続されている半導体スイッチ（MOS-FET等）をON/OFFし、各コイルに電流を流すことで回転磁界を生成して駆動する。各コイルにはモータの回転位置に応じて適切な回転磁界を生じるよう制御を行う必要があるが、使用した IWM には回転位置の検出用ホールセンサが内蔵されており、これを使用して回転位置に応じた出力信号を生成して MOS-FET のスイッチング制御を行う 120 度通電制御方式を採用した。図 2 に制作したインバータ部の外観を示す。

① MOS-FETのゲートドライブの方法の考察

過去の制作物で使用していたゲートドライブ用 IC (IRS2186) は、シンプルで低コストである一方、IC 内部のブートストラップコンデンサを充電する必要があるため Duty 比とスイッチングパターンに制限が生じ



図 2 三相フルブリッジインバータ部の外観のデメリットがある。また、スイッチング時のサージ電圧やモータからの逆電圧の影響と想定される IC の焼損が多く見られ、故障率が高いという問題があった。本稿ではハイサイド側のゲート駆動電圧に相毎に絶縁型 DCDC コンバータを用いて 12V の電圧を、ローサイド側には 3 相分を一括して 1 つの DCDC コンバータで給電している。これにより、ハイサイド側に Nch-MOSFET を使用できる他、duty 比やスイッチングパターンを任意に設定することができる。

② MOS-FETの選定

MOS-FET の選定は IWM の定格電流、定格電圧を基準に行う。ドレイン・ソース間の絶対最大定格値はスイッチングによるサージ電圧を考慮し、最低でもモータ定格電圧の 2 ~ 3 倍以上とすることが望ましい。また、MOS-FET には大電流が流れるため発熱による焼損を防ぐためにスイッチング損失を可能な限り低減する必要がある。そのため、オン抵抗は可能な限り低く、かつ、入力容量は小さいことが望ましい。また、ゲート抵抗が大きすぎると MOS-FET の入力容量に対する充電時間が長くなり、結果的にスイッチング損失が大きくなるため、可能な限りゲート抵抗は小さくする。同様の理由でマイコンからの各 MOS-FET のゲート出力は高速で行う必要がある。本項ではインバータ部と制御部のアイソレーションにフォトカプラを用いているが、これらには動作が高速な MOS-FET のゲート駆動に適したものを採用使用している。

③ スナバ回路の設計

MOS-FET はスイッチング時に電源電圧にサージ電圧などの異常電圧を生じ、これらが原因で MOS-FET や DCDC コンバータが焼損する可能性がある。本稿ではこれらの対策としてスナバ回路を採用している。スナバ回路は、サージ電圧を各 MOS-FET のドレイン・ソース間に並列に接続されたコンデンサで吸収し、蓄えた電荷を抵抗器で消費するものである。

④ 電源回路部の設計・制作

主電源電圧はモータ駆動電圧であり、本稿では採用した IWM の定格電圧から 24V である。モータ駆動電圧は高くなるほどバッテリーからの供給電流量が小さく抑えられ長時間の運転が可能となるが、各制御素子の耐圧が高いものを選定する必要がある。また、MOS-FET 回路のスイッチングサージ等の影響も大きくなり故障が発生しやすくなるデメリットもあるため IWM の選定時には注意が必要である。図 3 に制作した電源部の外観を示す。



図 3 電源部の外観

⑤ 制御回路部の設計

各部の制御には当機構の応用課程において広く利用されているルネサスエレクトロニクス社製 RX62N マイコンを採用した。RX62N マイコンにはマルチタイマーユニット 2 の CH3 と CH4 を使用して 3 相分の相補 PWM 出力を制御できるモードが用意されている。このモードではデッドタイムの生成、ホールセンサの入力に応じた出力パターン、正相・逆相の出力パターンの設定などを行う。本機ではハイサイド側をレベル出力、ローサイド側をスロットルからの入力電圧に応じて PWM の duty 比を変化させ回転速度の制御を行う。図 4 に制作した制御回路部の外観を示す。

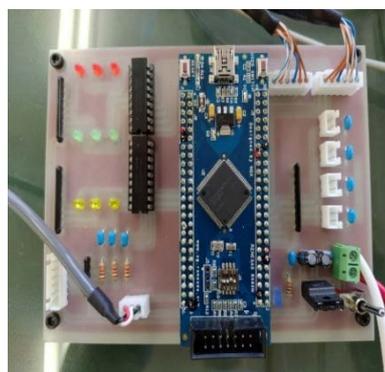


図 4 制御回路部の外観

5. 走行試験

図 5 に完成した電動キックボードの走行試験の様子を示す。走行試験の結果、最高走行速度は 14.4 km/h、負荷電流は 6 ~ 7A、出力 140 ~ 170 W で目標値に近い結果を得られることが確認できた。なお、完全な静止時から加速した場合においては 20A 程度の大電流が流れるが本制作物では静止時からの加速はキックスタートを行うことを想定しているため、この問題は特に影響しないものと考えている。定常時において制作したモータドライバに異常な発熱や故障も見られないことから、ほぼ設計通りに制作することができたといえる。



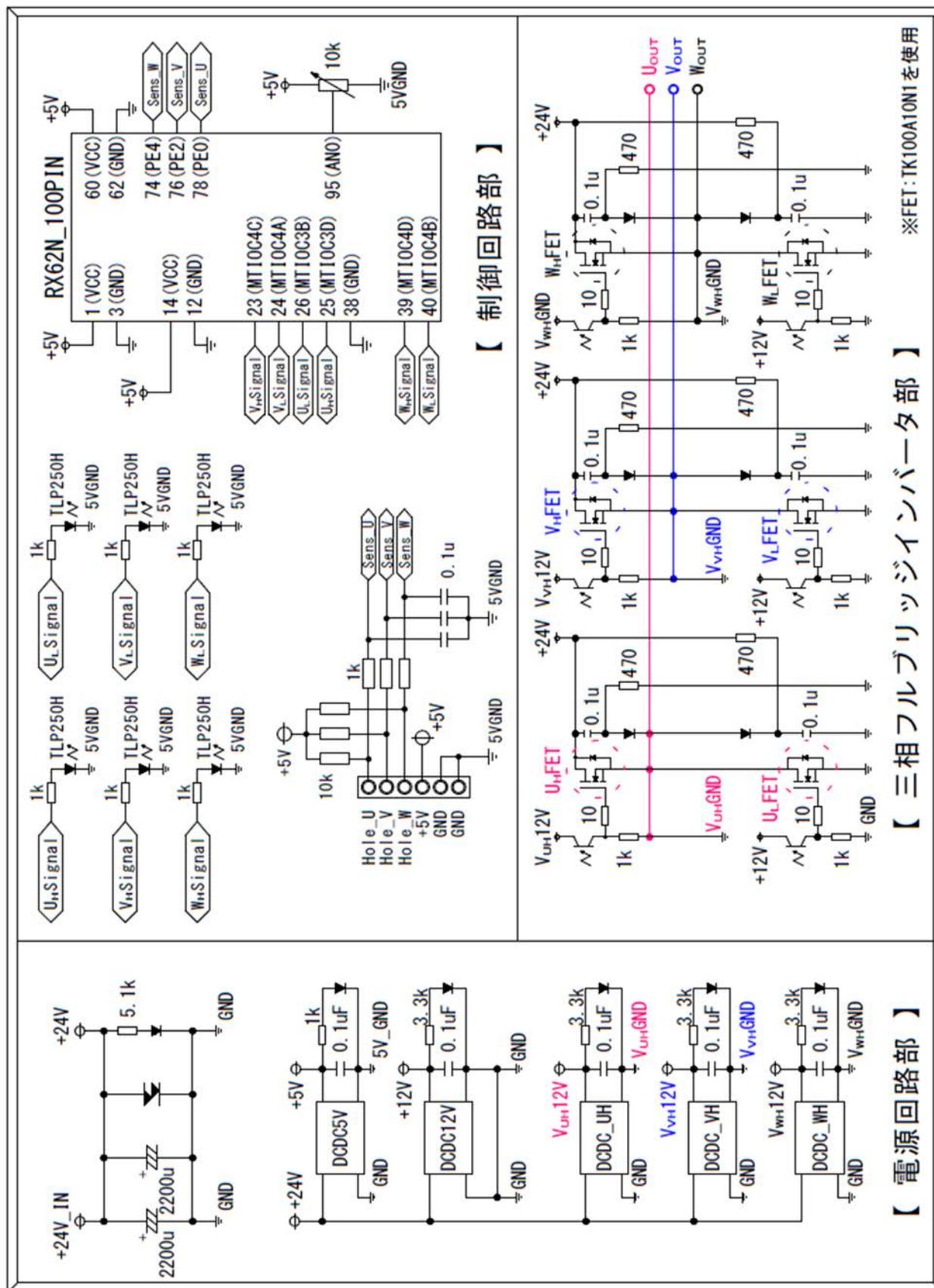
図 5 電動キックボードの走行試験の様子

6. まとめ

本稿では、IWM を用いた電動キックボードの制作を通して筆者らが実践した IWM の選定およびドライバの設計方法、試験結果についてまとめた。本制作を通して当初の目的であった学習用教材の制作についての知見は修得できたと考える。今後は回転速度や電流、電圧などのセンシング技術の修得、それらを活用したより高度な制御手法の修得に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 栗秋 亮太, 「電動車両の制作」, 千葉職業能力開発短期大学校紀要, 第 21 号, pp24-27
- 2) 栗秋 亮太, 「ブラシレス DC モータを用いた電動車両の制作」, 千葉職業能力開発短期大学校紀要, 第 23 号, pp6-9
- 3) 平原 英明, 山本 修, 「ブラシレス DC モータの設計・制作技術」, 技能技術実践研修
- 4) 鈴木 美郎志, 「たのしくできる単相インバータの制作と実験」, 東京電機大学出版局



別添図1 IWM用モータドライバ回路図