

AI 制御による自動運転可能な鉄道車輛の製作と評価

愛知県立愛知総合工科高等学校

外山 優治

1. 導入

平成 30 年告示「高等学校学習指導要領解説」工業編によると科目「課題研究」の目標として「この科目においては、社会における工業の意義や役割の視点から捉え、工業に関する学習の上に立って、工業に関する課題を生徒自らが見いだして設定し、課題の解決を図る実践的・体験的な学習活動を行うことなどを通して、ものづくりを通じ、社会を支え産業の発展を担うことができるようにすることをねらいとしている」とある。このことから、「課題研究」においては教科横断性、主体性、対話性が重要であると考えられる。本校においては「課題研究」における教育目標を、実社会における課題解決を工学的視点から図るものとし、教材の構築と実践及び評価を行うこととした。

2. 教材の概要

平成 30 年度告示「高等学校学習指導要領」工業編に記載された「課題研究」に準拠した授業内容として教材を製作した。「課題研究」を通して工業に関する現用技術の理論と実践を学ぶとともに、社会における課題点を生徒独自の視点から改善することを本教材の目標とした。

本教材は少子高齢化、エネルギー価格の高騰、2024 年問題に代表される流通網の問題について取り扱うものである。課題解決の方法を「AI 制御による自動運転可能な鉄道車輛の製作と評価」とし VVVF インバータによって三相誘導電動機を制御する 5 インチゲージを製作し、この車輛を AI 制御で運行するものである。一般財団法人日本エネルギー研究所「EDMC エネルギー・経済統計要覧 2022」によると、鉄道はバス、航空機、乗用車等の輸送手段と比較して単位輸送量あたりの二酸化炭素排出量が約 1/5 となっており、鉄道は資源消費と環境負荷の低い輸送手段であると評価されている。また、省人化の際に自動運転が有効であるが、自動車の自動運転と比較して、運行ルートが固定されている鉄道の自動運転は技術的ハードルが低いためである。

3. 製作した車輛の概要

3.1 VVVF インバータ回路の設計及び製作

三相誘導電動機の制御ユニットには VVVF インバータを使用した。VVVF インバータは、直流電源で三相交流モータを可変速度、一定トルクで回転させる装置である。VVVF インバータの制御フローを図 1 に示す。

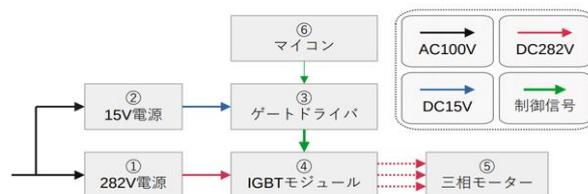


図 1 VVVF インバータ回路

図 1 に示した番号の順番で交流 100V 電源を三相交流電流に変換し、三相誘導電動機を駆動させている。交流 100V 電源は鉛蓄電池を電源とする DC/AC インバータを使用した。

- ① 入力された交流 100V を倍電圧整流回路を用いて直流 282V へ変換する。これは、モータへ入力される電源である。
- ② 交流 100V をトランスによって交流 15V まで降圧させた後、全波整流回路と三端子レギュレータを用いて直流 15V を生成する。
- ③ IGBT モジュールをドライブする回路である。直流 15V 電源で動作する。モータドライブが可能なフォトカプラを用いてマイコンと IGBT モジュールを絶縁しつつ、信号を確実に伝える U、V、W 相の各相にローサイドとハイサイド 2 つ、計 6 つの回路がある。ハイサイドの電源には DC/DC コンバータを使用した。
- ④ 電源ゲートドライバから送られた信号の通りにスイッチングする。
- ⑤ モータは単相と比較して電力消費や騒音、振動の少ない三相モータを使用した。
- ⑥ マイコンは STMicroelectronics の Nucleo F401RE を使用した。32bit のマイコンである高機能タイマーを使用し、三相分の相補 PWM 計 6 つの PWM 信号の出力、及び VVVF 制御や加速減速の処理を行う。

3.2.駆動系

駆動系のユニットはギア駆動とし、モータ側と車軸側のギア比は 1:1 とした。トルクは 60W のモータを 2 台使用しているため、重量物を牽引しても安定した運転が実現できる。小型のモータを組み合わせることで、機関部をコンパクト化して、出力を高めるという工夫を行った。モータ及びギアのモジュールを 1 軸につき 1 台使用することができるよう設計し、今回は 2 台のモータを使用している。速度調整は VVVF による周波数制御を行っており、変速機は使用していない。制御ユニット 1 台で複数台の三相誘導電動機を制御することができるため、車台のスペースに大きな制約がない点がメリットとして挙げられる。これにより機関車、客車の製作で設計を共用することができた。

3.3.シャーシ

シャーシは CAD ソフトで設計し、組立を行った。強度を重視し、ステンレス製ラダーフレームを台車として、各部品を組み付けた。台車は加工性を重視し、スチール製とした。車軸、車輪は 5 インチゲージ規格の物を購入し、加工して台車に取り付けた。台車は、ホイールベースを長くするとカーブを曲がることができないため、一般的な鉄道車輛と同様、ボギー台車とした。1 台の車台に 2 台の台車を組み合わせて使用している。車体は CAD ソフトで設計したものをレーザー加工機で加工し、手曲によって製作した。

3.4.車体のデザイン

デザインは東日本旅客鉄道株式会社の EF510-500 形式電気機関車をモデルとした。大部分をアルミの板材を曲げ加工した後、組立し、細部は木材を用いて製作した。台車に被せるようにし、ビス等で固定して運用するものとし、車台の剛性に影響が出ないように配慮した。塗装はスプレーガンによる塗装を行い、塗りむらが極力出ないようにし、美観の向上を図った。また、配色は実際の車輛を参考にし、親近感を得られるように工夫した。レールは 5 インチゲージ用の汎用品を使用した。スチール製とアルミ製を購入し、加工が必要な曲線部分にはアルミ製、直線部分で耐久性を重視した部分にはスチール製を使用した。枕木は合成樹脂製木材風の 10cm 角材を使用し、レールにはビスと座金を用いて取り付けた。座金を使用する

ことで面圧が十分にかかるようにした。風雨に強く耐荷重のある本材料を使用することで、レールにゆがみが生じないように施工した。

3.5.AI 制御

本研究では、NVIDIA 社が提供する Jetson Nano を用いて画像処理による自動運転用モジュールを製作し、AI 制御について研究を行った。Jetson Nano は小型で低価格の開発ボードであり、低電力で高速処理ができるという特徴をもっており、AI 制御に適していると考えた。制御ユニットに本モジュールを接続することで自動運転や Web ブラウザからの遠隔操作が可能となる。

AI 制御を実現するために、機械学習が必要不可欠である。特に人や信号機の機械学習には時間を要するため、Google 社が提供している mobilenet-ssd というモデルを使用し、画像認識による物体の検知ができるようにした。mobilenet-ssd は信号機の識別を行えないため、アセットを使用せず、自作の学習データを用いて機械学習を行った。学習モデルを作成するには大量の画像が必要になるため、Python を使用したスクレイピングで画像を収集した。今回収集した画像枚数は 100 枚程で機械学習の精度を担保するには少量である。そのため、Python を使用してすべての画像を 90 度、180 度、270 度でそれぞれ回転させた画像を保存して枚数を増やした。次に、画像を色ごとに分類する必要があるため、Vott というソフトを使用して 1 枚ずつ分類した。その後、これらを Jetson Nano を使用して機械学習をさせることで教師データを用意した。画像処理の方法は Jetson Nano に取り付けられたカメラの映像を確認できるようにするため、Raspberry Pi 上に構築したブラウザにアクセスすることで実現した。Jetson Nano でカメラの映像を画像認識した後、画像を JPEG 形式に変換する。ブラウザによるアクセスを実現するために、JPEG 形式に変換した画像データを Web サーバが読み込む。大量の画像データを読み込もうとすると、デバイスの保存容量が大量の画像データによって圧迫されてしまう。そこで、JPEG 形式のバイナリデータを Base64 と呼ばれるテキストデータに変換し、そのデータを Web サーバ側が読み込んでから複合化することで処理の高速化が実現し、効率よく web サイトに画像を表示することができる。Web サーバに文字列を送るには、WebSocket の通信を確立する必要があり、Web サイトで JavaScript の Socket-io ライブラリを使用し、接続を確立している。このように WebSocket を使用することになったため、Web にすべてのデバイスカメラの映像を表示することができた。Jetson Nano と操作用 PC 間の通信を WebSocket で構築したため、双方向に通信できるようになり、Web のみで制御することが可能になった。

ブラウザにアクセスするためには、車体の中に設置されている無線ルータのローカルネットワークに接続する必要がある。しかし、電車が遠くに行くことにより電車の中に設置されている無線ルータの電波強度が低くなることで通信の速度が遅くなり、ブラウザに表示される映像が乱れることがある。それを防ぐために線路の脇などに散らばるように複数台の無線ルータを置き、Mesh Wi-Fi で無線ルータ同士を繋ぐことにした。これによって、電車が移動しても電波の強度は強いままになるので途切れにくくなる。全方位の人を検知するために Jetson nano と Arduino を直接接続するとそれぞれ六台ずつ必要になり現実的ではないので、Arduino と通信する専用の Jetson Nano を新たに搭載し、Socket 通信受信サーバとして構築することにした。

モータの制御では、Jetson Nano から送られた値を STM32 マイコンへ送る必要がある。マ

アイコンにデータを送ることで Arduino で変換した PWM 信号を周波数に変換でき、速度や進行方向の制御を行うことができる。

4. 車輛の運用

第 3 章で取り上げた各分野の成果物を組み合わせて AI による自動運転可能な VVVF 駆動の 5 インチゲージ規格の車輛を製作した。図 2 に製作した車輛を示す。製作した車輛を科目「課題研究」の授業時間及び特別活動等で走行展示した。車輛を複数回運用していく上で、各分野のエラーを洗い出し、修正を行った。過電流による IGBT モジュールの破損、ステンレス製シャーシの対地電圧の向上といった構想段階では想定していなかった問題点が発生したため、対策方法について協議をし、改善を図った。

運転時、AI による自動運転と、手動運転を状況によって切り替え、運用ノウハウの蓄積を行った。AI による運転は図 3 に示すように LED の信号を用意し、信号を読み取ることで運転、停止を切り替えた。信号機は ESP32 を使用してブラウザ上から制御を行った。



図 2 製作した車輛



図 3 自動運転用信号

5. まとめ

工業科の学習領域を教科横断的に学習し、現用の技術を実践的に習得した上で社会の課題に対応する教材の開発を行った。本教材では工業科各分野の理論を実践的に取り組み、製作を行うものとなった。これにより座学で学んだ内容について、ものづくりを通して学習することができた。また、実社会が抱える課題について考え、解決方法を提案するといった主体的かつ対話的な学習を行うこともできた。

謝辞

本研究にあたり、愛知県立愛知総合工科高等学校校長 山口直人先生に終始ご指導をいただいた。ここに感謝の意を表す。なお、本研究は公益財団法人天野工業技術研究所 2023 年度工業教育研究助成金を受けている。

参考文献

- 1) 文部科学省. 高等学校学習指導要領(平成 30 年告示)解説 工業編k1. 東山書房. 2018
- 2) 日本エネルギー経済研究所計算分析ユニット. EDMC/エネルギー・経済統計要覧 2022 年版. 理工図書. 2022.
- 3) VVVF 製作所. ゼロから作る VVVF インバータ制御電車. 2020.
- 4) dusty-nv. "jetson-inference", Github, <https://github.com/dusty-nv/jetson-inference>. (参照 2023-10-24).