

電子制御式スロットル装置の教材製作に関する研究*

坂井 淳¹⁾

渡部 賢²⁾

脇田 喜之³⁾

A Study of the Development for Teaching Materials Electronic about Electronic Control Throttle System

Jun Sakai

Masaru Watabe

Yoshiyuki Wakita

In this study, our goal is to develop the teaching materials about electronic control throttle system. However, it is difficult to arrange the ECU for teaching materials, because we have no information about internals of ECU. Therefore, we tried to develop the ECU software which performs equal to original one. As a result, we obtained the throttle system which works during 0.26 ~ 0.27 second both from open to close, from close to open the valve. Also We have clarified the problems in the making.

Key Words: Electronics and Control, ECU, Control System, Electronic Control Throttle System, Teaching Materials (E1)

1. はじめに

自動車における電子制御技術の普及は、すでにあらゆる価格帯の自動車に広がっている。自動車整備士教育における電子制御技術のカリキュラムもまた同様に、一級自動車整備士から導入が始まり、近年は二級から三級にまで、徐々に導入が進んでいる。電子制御技術は、一部の上級エンジニアのみが理解する高度な最新技術ではなく、すべてのエンジニアが理解する一般的な技術となりつつある。

しかし、電子制御技術の中核である ECU は、依然としてブラックボックスである。自動車整備士の教育者としては、座学の指導内容においても、実習教材の製作においても、取り扱いが厄介であることにおいては、昔も今も変わっていない。その理由の一つは、その技術情報の公開が必要最低限であるため、より理解を深めるための技術情報が不足していることである。整備マニュアルに掲載されている技術解説は、点検要領を理解するための解説が中心である。未知の不具合に対処する力を養うためのより深い理解は、これらの技術解説のみでは不十分であると考えられる。

また、学習教材の製作を妨げる要因の一つとして、ECU の構成が挙げられる。例えば、二級ガソリン自動車エンジン編の電子制御のカリキュラムでは¹⁾、燃料噴射装置、アイドル回転速度制御装置、点火制御装置、電子制御式スロットル装置の4テーマが単元として取り上げられており、このうち電子

制御スロットルの学習教材のみを製作しようとした際に、エンジン ECU は1台で前述の制御すべてを行っているため、ECU の他の制御機能を無効化することはできず、学習教材の製作は困難となる。

そこで本研究では、エンジン ECU と同等の制御機能を持つ、電子制御スロットル専用の ECU を試行錯誤により製作することとした。これにより、整備マニュアルの技術解説だけでは得られない技術情報を、教員自らの力で獲得することを目的とする。これと同時に、エンジン ECU を利用することでは困難だった、電子制御スロットルだけを動かして、その機能の理解を向上させる教材を製作することを目的とする。

本報告では、研究の第一段階として、電子制御スロットル教材の製作における、電子回路とプログラムの試作について報告する。そして、試作において明らかとなった、技術的な問題点について報告する。

2. 製作教材の概要

本研究では、題材として電子制御スロットルを採用することとした。エンジン電子制御のうち、他の3テーマはエンジンの運転状態に関係するため、初めての試みとしてはハードルが高い。電子制御スロットルでは、アクセルペダルとスロットルボデーのみが制御対象となるため、比較的、難易度が低いと考えられる。

教材を製作するにあたり、アクセルペダルとスロットルボデーは、学生への訴求力、部品の調達容易さ、製作の容易さを配慮して、実車の部品を利用することとした。また、本研究のゴールとして、本教材を実習で利用する際に、他の教材との関連付けられるよう、本学のベンチエンジン（トヨタ

*2020年9月14日受理。

第52回全国自動車短期大学協会研究発表会において発表。

1)・2)・3) 新潟工業短期大学 自動車工業科

(950-2076 新潟県新潟市西区上新栄町5-13-7)

1NR-FE エンジン) の部品を利用することとした。ECU のマイコンは、本学の電子制御コースでも教材に導入しており、部品の調達容易さ、技術資料⁽²⁾、⁽³⁾ の豊富さを配慮して、Arduino UNO R3 を利用することとした。

図 1 に製作した教材の全体写真を示す。右上がスロットルボデー、右下がアクセルペダル、左下が ECU である。なお、製作した教材の中には、参考としてステッピングモータを利用した電子制御スロットル (図の左上) も含まれているが、今回の報告では使用していない。

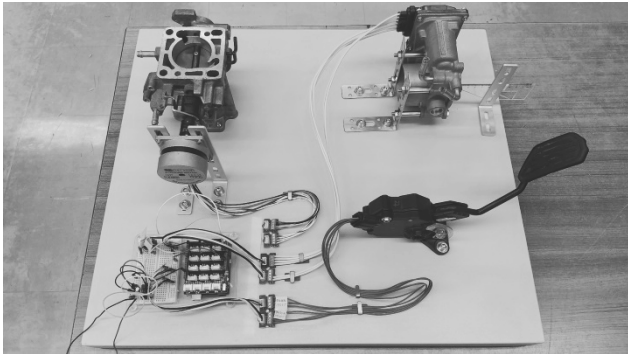


Fig. 1 電子制御スロットル教材

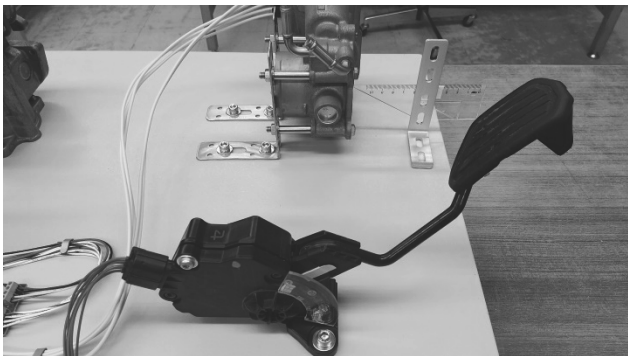


Fig. 2 アクセルペダル

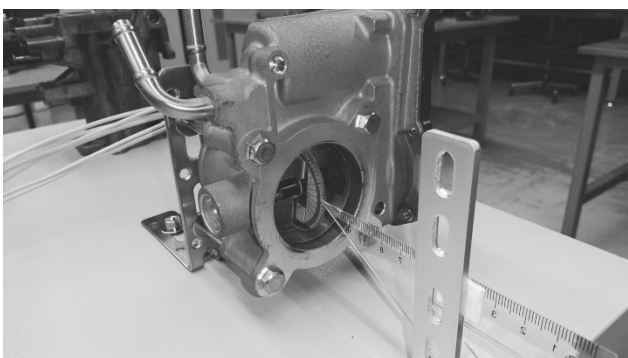


Fig. 3 スロットルボデー

アクセルペダルとスロットルバルブには、図 2 と図 3 に示すように、回転角度を読み取るための分度器を貼り付けている。また、アクセルポジションセンサとスロットルポジションセンサは、ともに、主制御用センサと異常検知用センサの

2個が内蔵されており、これらの接続端子を設けている。しかし、本報告では試行錯誤の段階であるため、異常検知は行っていない。これらのセンサ電圧は、ECU の Arduino マイコンに内蔵された 10bit の A/D 変換器を通して、パソコンに取得することができる。

スロットルバルブに接続されたモータ (以下、スロットルモータと称する) の駆動回路については、今回は二通りの回路で試行錯誤を行った。第一の回路では、スロットルバルブのリターンスプリングが十分に強いことに期待して、スロットルモータの駆動はスロットル開弁方向のみとし、回路の簡便化を図った。すなわち、オープンドレイン型の一石 FET スイッチ回路 (2SK2232) を利用した。図 4 に回路図を示す。

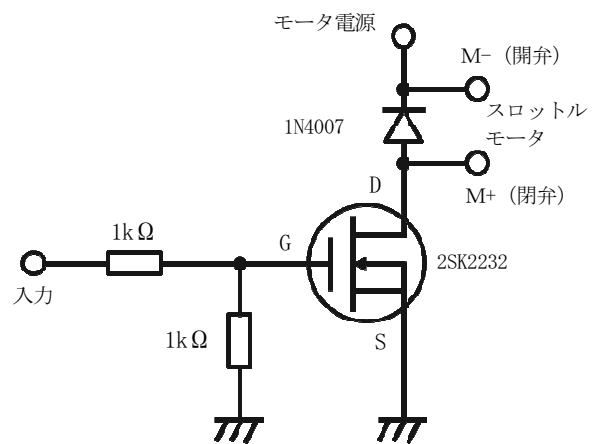


Fig. 4 一石 FET スイッチ回路

第二の回路では、スロットルモータの駆動はスロットル開弁方向と閉弁方向の両方向とし、フル H ブリッジ IC 回路 (東芝 TA7257P) を利用した⁽⁴⁾。図 5 に回路図を示す。

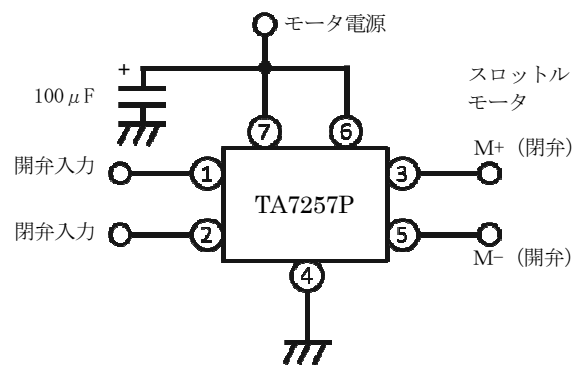


Fig. 5 フル H ブリッジ IC 回路

一般的には、電子制御スロットル装置のスロットルモータの駆動回路は図 5 のフル H ブリッジ回路が利用されていることが知られている。しかし、学生の素朴な考えとして、リターンスプリングを期待して開弁のみ駆動する図 4 の一石 FET

スイッチ回路が、なぜ利用されていないのか、という疑問が生じることが予想されるため、その疑問に対する具体的なデータを示すことができるように、この二通りの回路について試行することとした。

3. 試作結果

本節では、二通りのモータ駆動回路を利用して、電子制御スロットルを試作した結果を報告する。駆動回路の応答特性を評価するにあたり、アクセルペダルを手で動かした場合、一定の入力信号（駆動命令信号）を与えることが困難なため、スロットルバルブの応答特性を比較することはできない。そこで、入力信号はアクセルペダルを利用せず、全閉状態と全開状態までの階段状波形（ステップ波形）をプログラムにより与えることとした。そして、スロットルポジションセンサから得られた出力信号波形（ステップ応答波形）を比較した。

比較項目は、全閉から全開までの開弁時間、スロットルバルブが全開状態を行き過ぎる量（オーバーシュート量）、全開から全閉までの閉弁時間、の三項目である。

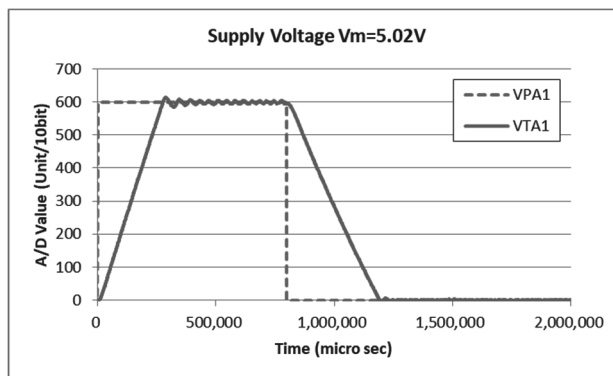
3.1. 一石 FET スイッチ回路による試作結果

図 4 の回路でスロットルバルブを駆動させた場合、開弁時のみバルブをモータで駆動し、閉弁時はバルブをリターンスプリングで駆動力することになる。

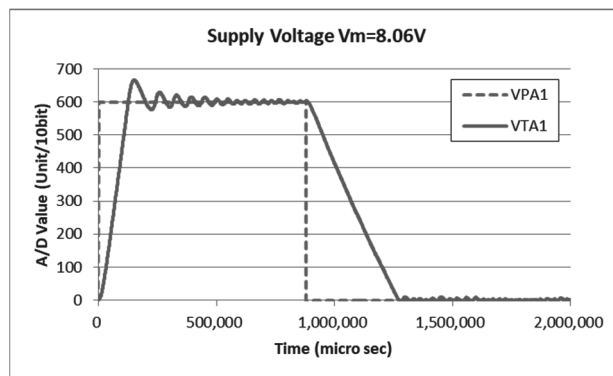
ところで、モータ電源電圧は、マイコン電源電圧と分離されており、マイコン電源電圧は 5V、モータ電源電圧は 5V～12V を与えることができる。モータ電源電圧を増加すると、モータ駆動トルクも増加するため、開弁時間を短縮することはできる。しかし、リターンスプリングの駆動トルクは変化しないため、閉弁時間は常に一定である。

この時の、入力信号（ペダルポジション信号）VPA1 と、出力信号（スロットルポジション信号）VTA1 の波形を図 6 に示す。モータ電源電圧 V_m は 5V から 10V まで変化させたが、例として、(a) に $V_m=5.02V$ での波形を、(b) に $V_m=8.06V$ での波形を示している。開弁時間の変化は (a) の 0.276 秒から (b) の 0.126 秒へ改善されているが、閉弁時間は (a) の 0.391 秒と (b) の 0.393 秒で殆ど変化していない。約 0.4 秒の閉弁時間は、俊敏なアクセルワークに対して、目視でもかなり遅く感じられる。

また、波形を見て分かる通り、(a) ではごく僅かなオーバーシュート（2.2%）しか見られないが、(b) のオーバーシュート（11%）は波形だけでなく、目視や動作音でも感じられた。これらのモータ電源電圧による、ステップ応答特性の総合的变化を、図 7 のグラフに示す。



(a) モータ電源電圧 $V_{cc} = 5.02V$



(b) モータ電源電圧 $V_{cc} = 8.06V$

Fig. 6 一石 FET スイッチ回路によるステップ応答特性

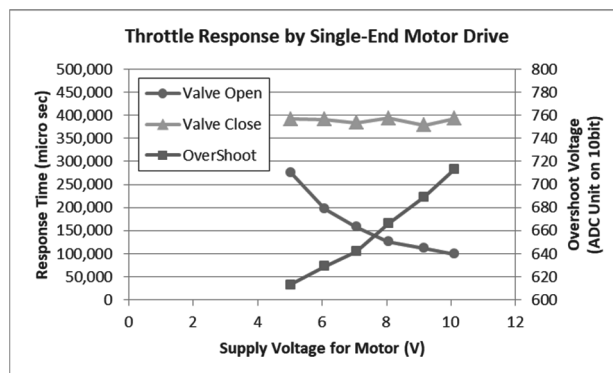


Fig. 7 モータ電源電圧によるステップ応答特性の変化
(一石 FET スイッチ回路の場合)

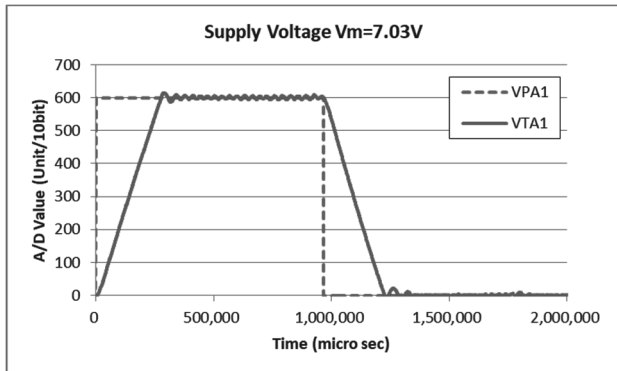
3.2. フル H ブリッジ IC 回路による試作結果

図 5 の回路でスロットルバルブを駆動させた場合、開弁時、閉弁時ともにバルブをモータで駆動することができる。したがって、一石 FET スイッチ回路における閉弁時間に対して、十分に応答特性を改善することが期待できる。

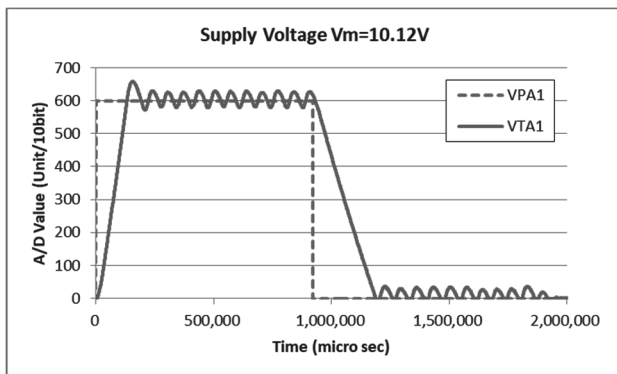
ところで、フル H ブリッジ IC 回路では、ブリッジを構成するトランジスタの特性により、モータに印加される電圧は、モータ電源電圧よりも約 2V (トランジスタ 1 個あたり約 1V)

の電圧低下が生じる⁽⁴⁾。このことから、一石 FET スイッチ回路における $V_m=5V$ および $8V$ のモータ電源電圧は、フル H ブリッジ IC 回路では、 $V_m=7V$ および $10V$ に相当すると予想される。

また、モータ電源電圧 $V_m=5V$ の時はモータへの印加電圧は約 $3V$ となり、動作が安定しなかった。よって、モータ電源電圧 V_m は $6V$ から $10V$ まで変化させた。この時の入力信号 VPA1 と VTA1 の波形を図 8 に示す。



(a) モータ電源電圧 $V_{cc} = 7.03V$



(b) モータ電源電圧 $V_{cc} = 7.03V$

Fig. 8 フル H ブリッジ IC 回路によるステップ応答特性

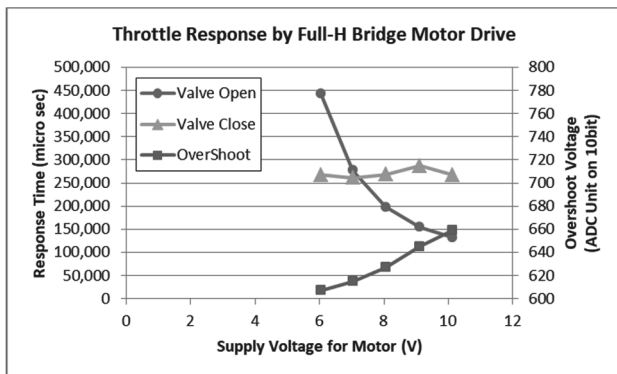


Fig. 9 モータ電源電圧によるステップ応答特性の変化 (フル H ブリッジ IC 回路の場合)

図 8 では、モータ電源電圧を変化させた例として、(a) に $V_m=7.03V$ での波形を、(b) に $V_m=10.12V$ での波形を示している。(a) の開弁時間は 0.277 秒、(b) の開弁時間は 0.132 秒となり、予想通りの結果となっている。その一方で、閉弁時間は (a) が 0.261 秒、(b) が 0.267 秒となり、リターンズプリングのみの駆動時より 1.5 倍ほど駆動が俊敏となっているが、モータ電源電圧を変化させても応答特性は殆ど変化していない。

また、オーバーシュートの量についても、一石 FET スイッチ回路と同様に、(a) では僅かなオーバーシュート (2.5%)、(b) では目視などで確認可能なオーバーシュート (9.8%) となった。モータ電源電圧による、ステップ応答特性の総合的变化を、図 9 のグラフに示す。図 7 のグラフでは開弁時間が劣悪であるため、実用的である条件を見出すのは難しかったが、図 9 のグラフでは、開弁時間と閉弁時間がほぼ同じ $0.26 \sim 0.27$ 秒で、オーバーシュートも控えめに 2.5% となっている、モータ電源電圧 $V_m=7V$ (モータ印加電圧 $5V$ 相当) が、最も好ましい条件であることが明らかとなった。

4. 試作時における問題点

本節では、二通りのモータ駆動回路の製作と、マイコンによる制御プログラムを試作するにあたり、困難となった問題点について報告する。

4.1. フル H ブリッジ IC 回路に関する問題点

図 5 のフル H ブリッジ IC 回路の内部回路は、モータ正転時に駆動するプラス側トランジスタとマイナス側トランジスタ、および、モータ逆転時に駆動するプラス側トランジスタとマイナス側トランジスタの合計 4 個のトランジスタで構成されている。

モータを正転から逆転に切り替える際は、モータの逆起電力がトランジスタのコレクタ電流を OFF にすることを妨げる。そのため、正転用のトランジスタが OFF になる前に、逆転用のトランジスタが ON になると、電源とアース間の 2 つのトランジスタが共に ON になることで、電源短絡を生じる。この短絡電流を「貫通電流」と言い、フル H ブリッジ焼損の原因として注意が必要とされている。

貫通電流の防止方法としては、モータに並列に還流ダイオードを接続してモータの逆起電力を吸収するとともに、正転と逆転の間に、すべてのトランジスタが OFF となる停止状態を挿入する。使用した TA7257P では、 100μ 秒程度の停止状態を挿入することが推奨されている⁽⁴⁾。

本研究においても、実際にプログラムを修正するときのミスにより、正転と逆転の間に停止状態を設け損なったため、

IC内のトランジスタの断線により、モータ端子から電圧が出力されなくなった。試作の際には、要注意が必要である。

4.2. モータの異常振動に関する問題点

二通りのモータ駆動回路のいずれにおいても、特定の条件でモータの異常振動が発生した。その発生条件は以下の二つにまとめることができる。

異常振動が発生する第一の条件としては、マイコンの制御プログラムに多くの機能を組み込むなどの理由により、モータをON・OFFするサイクル時間が長くなった場合が挙げられる。サイクル時間が長い時、モータは停止すべき目標値を通り過ぎることとなる。目標値を通り過ぎたモータは、回転を逆転させることにより再び目標値に近づくが、サイクル時間が長いいため、やはり目標値を通り過ぎる。これを繰り返すことにより、異常振動が発生する。

この異常振動の防止方法としては、制御プログラムから不必要な機能を削減してサイクル時間を短くすること、マイコンの制御プログラムを改良して処理速度を向上する事、より処理速度の速いマイコンを使用する事などが挙げられる。

異常振動が発生する第二の条件は、バルブの開弁・閉弁時間を短くして応答性を向上させるなどの理由により、モータの駆動電圧を必要以上に高くした場合が挙げられる。この場合、第一の条件に挙げたマイコンのサイクル時間には変化は無いが、相対的にモータの回転速度が上昇するため、モータは目標値を通り過ぎることとなる。よって、第一の条件と同様に異常振動が発生する。

この異常振動の防止方法としては、モータの駆動電圧を必要以上に高くしないことが挙げられるが、一方でスロットルバルブの開弁・閉弁時間の応答性の要求を満たす必要があるため、モータの駆動電圧の最適化は容易ではない。よって、マイコンのサイクル時間と、モータの駆動電圧と、スロットルバルブの応答性の、三者のトレードオフで最適化を検討することになる。

本研究においては、スロットルバルブの応答性は配慮しなかったことで、マイコンのサイクル時間が約800 μ 秒以下、モータの駆動電圧が約6V以下で、異常振動をとりあえず収束することができた。また、マイコンのサイクルタイムは、センサのデータを記録しない条件で約400 μ 秒まで短縮できたが、その際でも、駆動電圧が約7.5V以下に制限しないと、異常振動を収束することは困難であった。

4.3. マイコンの処理時間に関する問題点

前述のとおり、モータの異常振動を抑制する要素として、マイコンのサイクル時間を短くすることを挙げた。そこで、本研究で使用したArduino UNO R3のマイコンにおいて、サ

イクル時間が長くなる要素として、四つの要素について報告をする。

第一に、マイコンがセンサのアナログ電圧を計測するA/D変換では、1チャンネルの計測あたり、およそ100 μ 秒を費やす⁶⁾。電子制御スロットルでは、必ずペダルポジションセンサとスロットルポジションセンサの2つを計測値するため、必ず200 μ 秒の処理時間を消費する。

第二に、Arduinoは浮動小数点演算機能を持たないため、実数計算を行うと、多くの処理時間を消費する。例えば、ArduinoのA/D変換器は10bitのサンプリングを行うため、得られるデータは0~1023の整数である。しかしセンサ値を電圧で得たい場合は、0~1023の整数を0~5Vの実数にマッピングするための実数計算を行う必要がある。本研究では、制御においてセンサ値を電圧に読み替えることは不要と考えて実数計算を組み込まなかったため、この計算による処理時間の消費の目安は不明である。なお、報告書等でセンサ値を電圧に読み替えたい場合は、パソコンに整数のセンサ値を記録した後、表計算ソフト等で実数計算を行えば簡便である。

第三に、計測したデータをパソコンで記録する場合、シリアル通信を利用する必要がある。Arduinoの多くの参考書では、例として通信速度を9600bpsに設定していることが多いが、その場合、サイクル時間は20,000 μ 秒より短くすることはできなかった。本研究では、通信速度が上から2番目の1,000,000bpsに設定した。最も高速の2,000,000bpsでは、パソコン側のデータ受信プログラムが限界となり、パソコンの動作が不安定になった。

第四に、計測したデータをパソコンに送信する前に、計測データの整数値を文字列に変換する必要がある。本研究でパソコンに記録した文字列は、計測時刻(μ 秒で整数7桁)、区切り文字(コンマとスペースの2文字)、VPA1(整数3桁)、区切り文字(2文字)VTA1(整数3桁)である。これらを処理回数に直すと、整数の文字列への変換が3回、文字の連結が4回であり、他の処理と合わせて約500~600 μ 秒程度のサイクル時間となった。これを、整数データを5つに増やし、整数の文字列への変換が5回、文字の連結9回とした場合、他の処理と合わせて800~1000 μ 秒程度のサイクル時間となった。

5. まとめ

本研究では、学習教材の製作を妨げる要因はECU内部の情報が不足していることと位置づけ、ECUを自作することで、これを解決することを目標とした。そして本報告では、電子制御式スロットル装置の教材を製作した。

本報告で製作した教材は、スロットルバルブが全閉から全開・全開から全閉までの時間が共に0.26~0.27秒で、オーバーシュートが2.5%の性能が得られた。また、その製作ノウハ

ウを得ることができた。

今後は、今回製作した装置を教材にするにあたり、指導要領を検討・製作し、指導要領に適合したデータ表示装置などを追加で製作する。その際に、追加製作で生ずる問題点は、今回のノウハウで得られた問題点に対する解決方法を適用して、装置の改良を図っていきたい。

謝 辞

本研究を遂行にあたりまして、「財団法人 東京自動車技術普及協会」より助成金を賜りましたことをここに記し、頂きましたことに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 日本自動車整備振興会連合会 教科書編集委員会：第 8 章 電子制御装置，自動車整備士養成課程 教科書 二級ガソリン自動車 エンジン編，東京，日本自動車整備振興会連合会，2018 年，p.105-135.
- (2) Massimo Banzi, Michael Shiloh 著，船田巧 訳：付録 Arduino 公式リファレンス，Arduino をはじめよう 第 3 版，東京，株式会社オライリー・ジャパン，2016 年，p.131-237.
- (3) 神崎康宏 著：第 4 章，Arduino で計る，測る，量る，東京，CQ出版株式会社，2013 年，p.37-54.
- (4) 東芝株式会社 編：東芝バイポーラ形リニア集積回路 シリコン モノリシック TA7257P DC モータ用フルブリッジドライバ，東京，東芝株式会社，1999 年，
<https://www.alldatasheet.jp/datasheet-pdf/pdf/31264/TOSHIBA/TA7257P.html>.
- (5) Massimo Banzi, Michael Shiloh 著，船田巧 訳：アナログ入出力関数，Arduino をはじめよう 第 3 版，東京，株式会社オライリー・ジャパン，2016 年，p.184.