

定電圧電源モジュールの マイコン制御ラインレースカー教材への適用

改正 清広
(静岡大学教育学部)

Application of a Constant-Voltage Power Supply Module to a Microcontroller-Controlled Line-Tracing Car Educational Kit

Kiyohiro Kaisei

Abstract

中学校技術・家庭科技術分野 D 情報の技術において、マイコン制御型ラインレースカーを用いた設計・製作・制作活動を実施する際に用いる電源について、通常のアルカリ乾電池を用いた場合に生じる製作品の動作特性の振る舞いの違いを解消するために、定電圧電源モジュールを適用した事例について研究報告を行った。比較対象としては、通常のアルカリ乾電池、1.5 V 出力のリチウムイオン電池とした。既定の走行路での試験の結果、開発電源の設定電圧をアルカリ乾電池の合成電圧よりも 0.7 V 低く設定することで、アルカリ乾電池とほぼ同様の走行時間とすることができることを示し、未使用、使用済みアルカリ乾電池の特性を任意に設定して設計・製作・制作活動を実現できることを示した。

キーワード： Constant Voltage Power Supply Module, Design, Studuino, Line-Tracing Car, Educational Robotics

1. 本研究の背景および目的

中学校技術・家庭科技術分野において育成すべき資質・能力に関しては、「単に何かをつくるという活動ではなく、技術の見方・考え方を働かせ、生活や社会における技術に関わる問題を見いだして課題を設定し、解決策が最適なものとなるよう」に、設計・製作を行うこととされている¹⁾。技術分野の C エネルギー変換の技術による電気回路を用いて最適な解決方法となるように設計活動を行うには、電源の電圧が変化しないようにしなければならない。さらに、機械を用いて仕事をさせる場合においては、その機械的な特性を評価するためにも、出力電圧が負荷によらず一定となる電源は必要となる²⁾。前報ではマイコン制御ではないコンパレータや NAND ロジック IC を用いて制御回路を構成したラインレースカーに対し、ラインレースカーの設計・製作時に生じる電源電圧の変動による予

想動作の確実性を担保するための、電源電圧変動を軽減できる定電圧電源モジュールの製作例を示し、電圧変動の課題を解決した³⁾。一方で、ラインレースカーは計測・制御のプログラミング教材として用いられてもいる⁴⁾。これは中学校技術・家庭科技術分野の D 情報の技術 (3) 計測・制御のプログラミングによる問題の解決に適切な教材と認識されてきたためである。しかし、マイコン制御のラインレースカーはマイコン制御ではないラインレースカーに比べてマイコンボードを搭載するために精密に設計される必要がある。特にモータを制御するマイコンは安定した電圧が供給される必要がある。一方で、モータには過渡的にサブ A オーダの電流が流れるため、仮に制御回路基板上の電子回路のグラウンドまでの経路がアナログ回路とデジタル回路で分離されていたとしても、三端子レギュレータによる電圧安定化やマイコンボードに搭載され

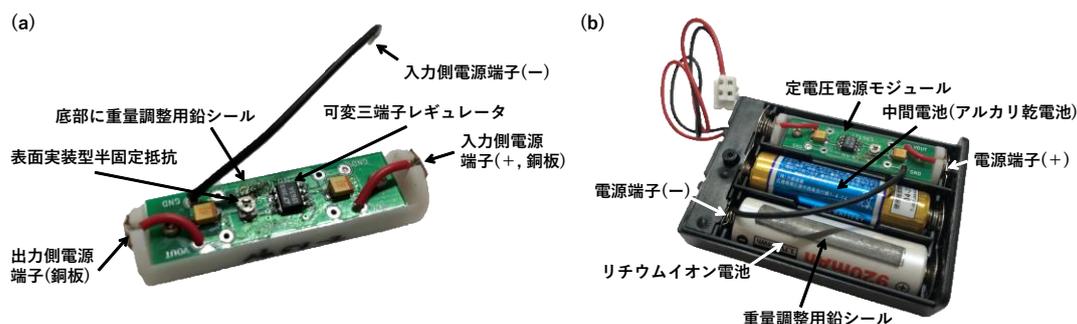


図1 定電圧モジュール. (a) 改良版モジュール. (b) 単三電池ボックスに内蔵した状態.

たバイパスコンデンサ程度では異常な動作となる恐れがある。本論文での再現性を特定のプログラムで同様の動作を実現する確率と定義すると、電源以外にも動作の再現性に課題があることも指摘されており、再現性不足により学習者・指導者の負担軽減のためにシミュレータの開発もなされている⁵⁾。

そこで本研究では、マイコン制御のライントレースカーに定電圧電源モジュールを適用した場合の適用可能性について検討した結果について報告する。

2. 電源

2.1 定電圧電源モジュールの電源構成

前報では単三電池型定電圧電源を製作した結果について報告した³⁾。当該研究では単独で4 V程度の電圧を出力する単三電池型リチウムイオン電池(LUMINTOP⁶⁾)に可変三端子レギュレータ(LT1963A⁷⁾)を搭載した単三電池型定電圧化モジュールを組み合わせ、既存の電池ボックス内で単三アルカリ電池2本分の電池程度の任意の電圧を実現できるものである。前報では、これを中学校技術・家庭科技術分野のエネルギー変換の技術のなかでの実習教材として使用するマイコン制御ではないライントレースカーの設計活動のための電源として利用できるかについて検討した。本報では、当該定電圧電源モジュールをマイコン制御型ライントレースカーへ適用した結果について報告する。ただし、前報では単三電池2本分の電池の性能を実現していたが、今回の報告では電池3本分となっている。そこで、本研究では、単三アルカリ乾電池3本分の4.5 Vの安定電源を実現するための方法について検討する。具体的には、最大4 V程度の単三電池型リチウムイオン電池に単三アルカリ乾電池や1.5 Vの定電圧を出力する単三電池型リチウムイオン電池(UCharge⁸⁾)を追加し、単三電池3本分の容積の定電圧電源モジュールとして機能するかを検討する。なお、1.5 V出力の単三電池型リチウムイオン電池単体の利用可能性も検討するため、これらを3本使用しても十分な特性が得ら

れるかについても試験を行うこととした。

以上から定電圧電源モジュールの適用可能性を検討するために、表1のような電源によるライントレースカーの動作特性を評価する。開発電源の電圧範囲は、4 V出力のリチウムイオン電池が3.2 Vから4.1 Vを出力し、1.5 V出力のリチウムイオン電池は常時約1.5 Vを出力するため、開発電源内の可変三端子レギュレータの最大ドロップアウト電圧(340 mV)を考慮すると、4.4から5.3 Vが端子電圧の上限となる。アルカリ電池を用いた場合は単体で1.6 Vから放電終止電圧の0.9 Vまで下がるので、3本では4.8 Vから2.7 Vとなる。一方、1.5 V出力のリチウムイオン電池を3本使用したときの端子電圧は4.58 Vの固定値となった。各電源を固定抵抗で300 mA程度の電流となるように放電したときの内部抵抗はそれぞれアルカリ乾電池電源、開発電源、1.5 Vリチウムイオン電池電源でそれぞれ約1～3 Ω、約0.4 Ω、約0.5 Ωとなり、開発電源が最も小さい値を示した。アルカリ乾電池電源の容量については、PanasonicのEvolta(LR6)のデータシートを参考にした。実際には、大創産業で販売されているアルカリ乾電池を使用している。1.5 Vリチウムイオン電池電源については2000 mAhの仕様から200 mAでの放電電流で20 h使用できるものと概算した。また、この容量は940 mAhの4 Vのリチウムイオン電池より容量が大きいので、開発電源については920 mAhを200 mAで除した4.6 hを容量として概算した。重量については、リチウムイオン電池は出力電圧に関わらずアルカリ乾電池より軽いため、鉛シールを貼り付けることで、走行特性に影響を与える重量差の影響を排除した。今回の研究では慣性モーメントをアルカリ乾電池と同一にするところまでは考慮していない。

2.2 定電圧電源モジュールの改良点

前報³⁾では、定電圧電源モジュールの電圧は、高さが7.6 mmの半固定抵抗を用いていた¹⁰⁾。しかしながら、多用途への適用が可能な電源となるためには、一

表1 各電源の比較

比較項目	アルカリ乾電池電源	開発電源(中間電池は下)		1.5 Vリチウムイオン電池電源
		1.5 Vリチウムイオン電池	アルカリ乾電池	
出力電圧の範囲	2.7 Vから4.8 V	上限が4.4 Vから5.3 V	上限が3.7 Vから5.3 V	4.58 V(固定)
最大電流	表記なし	1.5 A ⁷⁾		表記なし
内部抵抗†	1～3 Ω	0.4～0.5 Ω	0.4～0.6 Ω	約0.5 Ω
容量	250 mAで9.3 h ⁹⁾	200 mAで4.6 h		200 mAで10 h
重量	69 g(3本)	69 g(調整済み)		53.6 gから69 gに調整済

†負荷電流を200～300 mA程度としたときの1電源(乾電池3本相当)あたりの内部抵抗。1.5 Vリチウムイオン電池を除いて、端子電圧が変化、あるいは変化させることによって内部抵抗も変化した。

表2 ライントレーサーアイコンプログラミング

メニュー	動作/サブメニュー	センサ	その他
メニュー	1.0 秒待機	設定なし	設定なし
	サブメニュー2	赤外線フォトリフレクタ値 < 4	リピートあり
	サブメニュー1	赤外線フォトリフレクタ値 > 4	リピートあり
サブメニュー1	0.1 秒直進	設定なし	速度5, ブレーキあり
	0.1 秒右回り旋回	設定なし	速度6, ブレーキあり
サブメニュー2	0.1 秒直進	設定なし	速度5, ブレーキあり
	0.1 秒左回り旋回	設定なし	速度7, ブレーキあり

一般的な電池ボックス内にモジュールの格納が可能でなければならないため、表面実装型の半固定抵抗(高さ 1.2 mm¹¹⁾)で調整ができるようになっている。加えて、使用しないときの待機電力を減らすためのスイッチも基板内の面積確保の観点から取り付けられていない。

3. 走行試験とその考察

3.1 走行試験のためのロボットと試験走行路

定電圧電源モジュールのマイコン制御型ライントレーサーカーへの適用可能性を評価するために実施する走行試験のために用いたロボットは、アーテック社製のライントレーサーカーである。当該ライントレーサーカーでは、制御信号は ATmega168PA を載せたマイコンボード Studuino 上で処理される¹²⁾。ボード上にはモータ制御のためのドライバ IC である TB6552FNG も載せられている。ATmega168PA は Studuino 上では 8 MHz で動作させるために¹³⁾、最低でも 2.4 V 以上の電圧が必要である¹⁴⁾。そのため、ボード上の電源電圧端子から入力された電圧は低ドロップアウト電圧レギュレータである MIC5205-3.3YM5 により 3.3 V にまで降圧されてマイコンに導入されている¹⁵⁾。このため、モータにサブ A オータの負荷電流が流れる前は 4.5 V 程度の電圧が加わり、負荷電流が流れることで仮に電池ボックスの端子電圧が 4.0 V にまで低下したとしても、3.3 V の電源電圧でも ATmega328PA は約 2.4 mA の負荷電流しか必要せず¹⁴⁾、MIC5205-3.3YM5 でのドロップアウト電圧は高々 100 mV 程度であるため¹⁵⁾、3.3 V に対して十分な余裕を持った設計となっている。また、モータ

を含めて電源に流すことができる電流については、定電圧電源モジュールを使用した場合は、前報に掲載されている低ドロップアウト電圧レギュレータ (LT1963AES) では 1.5 A の電流が流せることになっており⁷⁾、4 V、1.5 V のリチウムイオン電池も 2 A 以上の電流を出力できるが、今回対象としたマイコンボードへ電流を流す場合は、TB6552FNG は出力電流を最大 1 A とする保護回路が内蔵されているため¹⁶⁾、リチウムイオン電池も同じく 1 A の電流で制限される。このため、最大でも電源の内部抵抗約 0.4 Ω に 1 A を乗じた電圧 0.4 V までしか電圧は下がらないものと推測される。

ライントレーサーカーは組立説明書に沿って製作した¹⁷⁾。走行路については組立説明書 17 ページに掲載されている走行路を A4 用紙に印刷し、その上を走行させた。走行プログラムについても表 2 のようなデフォルトのプログラムをそのまま用いた。左右のモータの特性を同一とするキャリブレーションは行っていない。走行時間については、プログラムにある 1 秒間の停止時間を差し引いて平均周回時間を算出した。また、走行時の室温は 19~23°C、照度は約 350 lx である。

3.2 マイコンボードへの供給電源電圧の評価

走行試験を実施する前に動作試験時の電源電圧をオシロスコープにより測定した。ここでの動作試験とはタイヤを接地せずに回転させるものを指す。結果を図 2 に示す。未使用の端子電圧 4.8 V のアルカリ乾電池

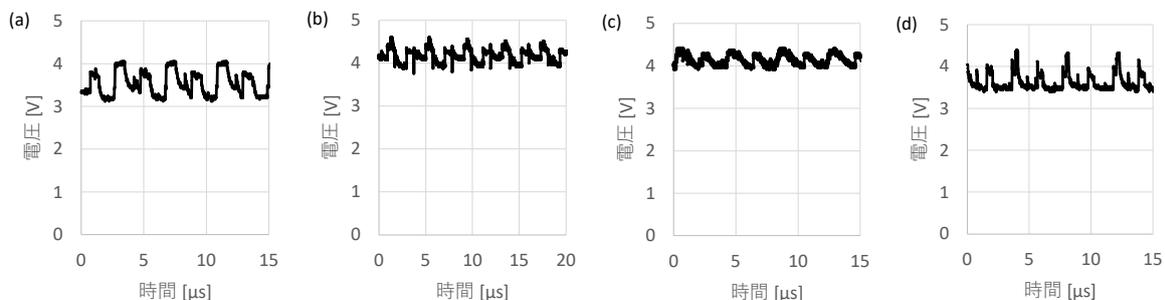


図2 走行時の電源電圧の変動評価: (a)アルカリ乾電池(未使用), (b)開発電源(中間電池:アルカリ乾電池, 1.56 V), (c)開発電源(中間電池:1.5 V リチウムイオン電池), (d)1.5 V リチウムイオン電池。

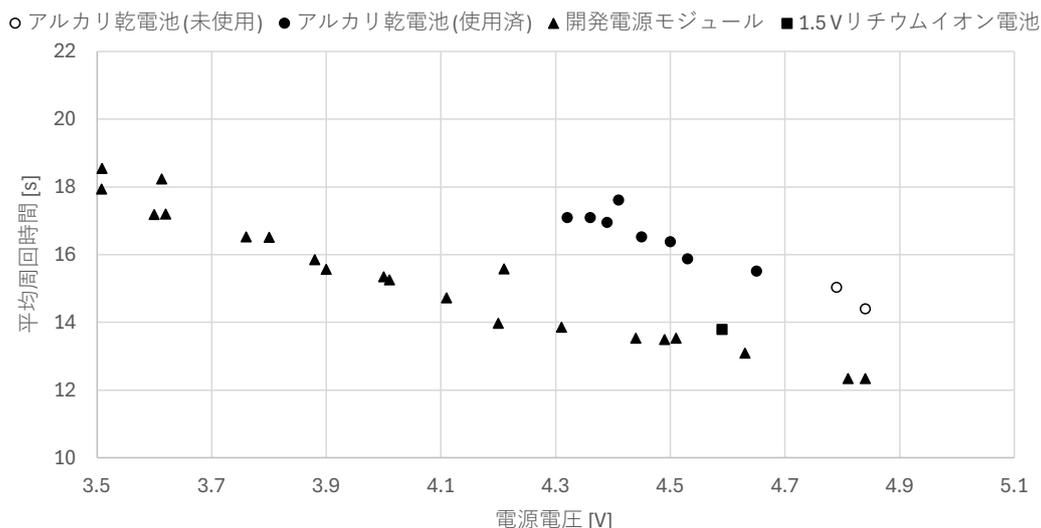


図3 走行試験の結果

の場合、モータ動作前は4.8 V程度の電圧であったものが、モータ動作時には3.1 Vから4 V程度の1 Vppで電圧変動が生じていることがわかった。また、出力電圧4.5 V設定の定電圧電圧モジュールについては、内部にアルカリ乾電池を使用する場合と1.5 Vリチウムイオン電池を使用する場合は、前者は3.92 Vから4.40 V、後者は3.76 Vから4.6 Vとなった。電圧差は0.48 Vpp、0.68 Vppとなり、それぞれアルカリ乾電池のみで作られた電源に比べて変動は小さいものの、内部にアルカリ乾電池を含む場合は、含まないそれに比べて大きくなる結果となった。1.5 Vリチウムイオン電池のみで構成された電源の場合も4.6 V程度であったものが、3.4 Vから4.4 V程度で変動し、アルカリ乾電池と同程度であった。この傾向はおおむね電源の内部抵抗の大きさと一致している。

以上を踏まえ、マイコンモジュールの動作について検討すると、アルカリ乾電池電源と1.5 Vリチウムイオン電池電源の場合動作時の電源電圧の変動が大きく、マイコンモジュールの必要とする端子電圧3.43 Vを下回る電圧降下が生じていることがわかった。しかし、ロボットは問題なく動作している。このことから電源電圧が低下してもバイパスコンデンサ等の効果によりマイコンボードは正常に動作していることが推測される。開発電源では、アルカリ乾電池よりも電圧変動が抑制されているため、少なくともライントレースカーの製作実習の場合については代替する上で差し支えないと判断できる。

3.3 走行試験の実験条件

走行試験を実施するに先立ち、実験条件について検討する。3.1節で走行試験路や走行が電源の出力電圧に与える影響について実験的に考察した。ここでは、実際に走行させるにあたって生じる問題について言及する。

ライントレースカーでは、電源からの電力を制御回路を通してギアドモータに供給するため、ギアドモータには同一のパルス電流が与えられれば、同一の動作となっていることが期待される。しかし、実際には室温の範囲内の試験であっても、ギアドモータの動作は同一とならない場合がある。これは、ギアドモータ内に仕込まれたグリスが理由のひとつとして考えられる。グリスは、摩耗などから歯車を守るために表面に油膜を形成し、滑らかな動きを実現する一方で、グリスの粘度は高温になると下がる特性がある。このため、走行によりギアボックスの歯車の温度が上昇することで¹⁸⁾、走行開始時から走行終了時に向かってグリスによる摩擦トルクが減少し走行特性が向上する可能性がある。アーテック社製のギアドモータの場合、プラスチック製のギアが使用されているため、たとえば摩擦係数の小さなPTFE粒子が混入されたプラスチック樹脂を侵さない化学合成油をベースとしたグリスが使用されている可能性がある¹⁹⁾。以上を踏まえ、走行試験にあたっては、歯車の温度を揃え、粘度変化の影響を排除するために、試験路を3分間予備走行した後で個々の走行試験のデータを取得するものとし、事前に同一の走行条件であれば、ほぼ同一の結果が得られることを確認してから走行試験を実施することとした。加えて、予備走行試験終了後から本試験までの間にもギアボックス内部の温度は低下するので、試験路の走行特性の評価にあたっては、5周回したときの周回時間から平均周回時間を求め、これを評価対象とすることとした。

3.4 アルカリ乾電池の走行試験

放電状態の異なるアルカリ乾電池を用いて走行試験を行った。使用したアルカリ乾電池は、アルカリ乾電池1本あたり10 Ωの抵抗器で0時間、1時間、2時間、3時間、4時間、5時間放電させたものを用いた。

未放電である 0 時間の電池の開放電圧は、3 本直列接続で 4.79 V、4.84 V となった。放電時間 1 時間の電池は 4.53 V、4.65 V となった。2 時間は 4.45 V となった。3 時間は 4.39 V、4.50 V となった。4 時間は 4.36 V となった。5 時間は 4.32 V、4.41 V となった。放電状態の目安としては、Panasonic 製のアルカリ乾電池の定抵抗放電のデータシート⁹⁾を参考にした。室温でアルカリ乾電池 1 本あたり 10 Ω の抵抗器で放電し、放電終止電圧を 1.2 V と仮定すると、10 時間放電が可能となる。したがって、今回の放電深度は未使用状態から半分程度の時間放電したものと捉えることができる。結果を図 3 に示す。この結果から、未使用状態では 15 秒程度であった周回時間が 5 時間放電した電池を使用すると、17 秒程度となり 10 % 程度平均周回時間が延びることがわかった。このことから、マイコン制御のライトレースカーでも放電深度の異なる電池を用いることで、その動作を実現するプログラムが実現する動作は使用する電池の放電状態によって異なることが明らかになった。これは学習時の設計・製作・制作時の学習を阻害する要因となりうる。このため、乾電池の状態によって走行時間が変わらないようにできることが望まれることが確認できた。

3.5 開発電源での走行試験

定電圧電源モジュールを用いた走行試験では、中間に挿入される電池は 3.2 節で出力電圧の変動の少ないことが明らかになった 1.5 V 出力のリチウムイオン電池を採用した。周回時間の電源電圧依存性に関する走行試験の結果を図 3 に示す。端子電圧が 4.8 V から 3.5 V 程度まで下がることによって周回時間が長くなることがわかる。アルカリ乾電池の公称電圧 1.5 V の 3 倍の 4.5 V は 16 秒程度であることが読み取れるが、これは開発電源を 3.8 V 程度に設定した場合に相当する。このことから、アルカリ乾電池の特性を開発電源で再現するにはアルカリ乾電池の電圧を 0.7 V 程度差し引くことで概ね実現可能であることが確認できた。

3.6 1.5 V リチウムイオン電池電源での走行試験

1.5 V リチウムイオン電池を 3 本合わせたときの出力電圧は 4.58 V であった。ライトレースカーでの走行試験の結果は図 3 に示す。この結果からその特性は開発電源 (4.6 V 設定) と同等の性能を有しているこ

表 3 ライトレースカーの学習単元構成

段階	作業内容	活動形態	想定時間
1	しくみを調べる	グループ	25 分
2	動きを考える	グループ	5 分
3	プログラムを作成する	グループ	10 分
4	確認と修正	グループ	10 分

とがわかる。しかし、アルカリ乾電池で未使用時に実現できる 15 秒弱に比べて 1 秒程度平均走行時間が短い。このことから、アルカリ乾電池で実現できる性能を超えているため、ライトレースカーのようなロボット教材への利用については使用は好ましくなく、限定的な利用にとどまることが予想される。この点については次節で説明する。

3.7 考察

前節までの結果からマイコン制御のライトレースカーであったとしても定電圧電源モジュールを用いることで、乾電池の使用状態 (未使用電池を使用した場合、放電した電池を使用した場合) に合わせた走行試験・設計活動が実現できることがわかる。

以下では具体的に乾電池、開発電源、1.5 V リチウムイオン電池の走行実験の結果から設計学習のための電圧電源の適否について考察する。授業では、ライトレースカーを製作後、走行プログラムを作成し、その動作状況からプログラムの適否を判定し、改善を行っていく。この際、走行試験での走行時間が累積していくことで、乾電池の電圧は下がっていく。アーテック社が提供している授業案²⁰⁾では、表 3 の通り、グループ学習の 50 分程度の時間でライトレースカーの仕組みを調べて動作させたりすることが想定されている。この想定の場合、4 の段階での走行状況がプログラムを反映したものか、電源電圧の低下や当初の消耗具合を反映したものかの区別は生徒には難しくなる可能性が生じると推測される。特に試行回数が多く走行時間の長い生徒のグループであれば、その影響は顕著に表れると推測される。

以上を踏まえると、グループ毎の電池の消耗具合をある程度平均化できるように、公称電圧程度の電圧を出力する電池を用いることを前提とした設計活動が期待される。しかし、そのように考えると、開発電源では出力電圧を 3.8 V 程度にすることで 1.5 V の乾電池を使用した時に得られる 4.5 V の特性が実現できる。これに対し、1.5 V リチウムイオン電池では未使用のアルカリ乾電池の特性を常時超えて設計活動をしなくてはならなくなる。したがって、設計・製作活動においては、1.5 V 出力リチウムイオン電池は簡便ではあるものの、開発電源の利用が好ましいと考えられる。

また、これは 4 以降でライトレースカーの走行大会を実施する場合にはについても考える必要がある。ライトレースカーの走行大会においては、走行路へのプログラムの最適化のみならず、電池の電圧に応じた最適なプログラムも見つけ出さなければならない。未使用の電池の方が長時間モータへ必要な電力を大きく供給できるものの、乾電池は刻々と消耗していくため、どのようなコースに対し、どのようなプログラム、電池が好ましいかまで検討するのであれば、電源電圧を

設定できる本論文で開発した定電圧電源モジュールがあれば、最適なプログラムの発見などには有効であることが考えられる。

4. まとめ

設計・製作・制作活動のための単三電池型定電圧電源をマイコン制御型のライントレースカーに適用した。結果としては電源電圧としてアルカリ乾電池、開発電源、1.5 V リチウムイオン電池を用いてライントレースカーを動作させ、出力電圧を比較した結果、アルカリ乾電池やリチウムイオン電池の出力電圧は開発電源のそれに比べて大きく変動していることが明らかになった。この結果は、マイコンの動作への開発電源の影響が相対的に少ないことを示していると考えられる。また、特定の走行路に対し、アルカリ乾電池、開発電源、1.5 V リチウムイオン電池を走行させたところ、アルカリ乾電池は同一の電圧でもそれ以外に比べて周回時間が長くなる傾向を示した。開発電源や1.5 V リチウムイオン電池は同一の電圧でアルカリ乾電池よりも走行時間が短くなった。特に開発電源とアルカリ乾電池とでは0.7 V程度の差が生じた。1.5 V リチウムイオン電池は開発電源と同様の傾向を示した。これらから、マイコン制御型ライントレースカーのようなロボット教材に対し、今回開発した電源を用いることで、電源電圧の変動を排除した設計・製作・制作活動を実現できることが確認できた。

参考文献

1. 文部科学省：中学校学習指導要領(平成 29 年告示)解説 技術・家庭編, 2017.
2. 柴野響, 川田和男: ライントレースロボットの組み立て精度と走行性能における因果関係に関する考察, 第 68 回日本産業技術教育学会全国大会, p. 187, 2025.
3. 改正清広: ライントレースカー教材に用いる定電圧電源モジュールの開発, 静岡大学教育実践総合センター紀要, Vol. 35, pp. 101-105 (2025).
4. 紅林秀治: 中学校における計測・制御の学習で身に付けさせたい知識と能力, システム/制御/情報, Vol. 62, No. 7, pp. 260-265, 2018.
5. 池田健太郎・片山徹郎: 「ライントレースカーの動作を反映するシミュレータの試作」, 宮崎大学工学部紀要, Vol. 37, pp. 317-324, 2008.
6. LUMINTOP: Lumintop 14500 USB Type-C Rechargeable Li-ion Battery 3.7V 1000mAh, <https://lumintoplighting.com/products/lumintop-14500-usb-type-c-rechargeable-li-ion-battery-37v-1000mah-179>, 閲覧日: 2025 年 12 月 26 日).
7. Analog Devices: LT1963A (<https://www.analog.com/jp/products/lt1963a.html>, 閲覧日: 2025 年 12 月 20 日).
8. UCcharge: リチウムイオン電池 (<https://www.amazon.co.jp/dp/B0DBLS78QM>, 閲覧日: 2025 年 9 月 1 日).
9. Panasonic: アルカリ乾電池<EVOLTA>単 3 形 LR6(EJ), 2009.
10. 半固定ボリューム: TSR-065R (<https://akizukidenshi.com/goodsaffix/tsr-065.pdf>, 閲覧日: 2025 年 9 月 1 日)
11. 表面実装用半固定ボリューム: TSR-C3305-103R (<https://akizukidenshi.com/goodsaffix/TSR-C3305.pdf>, 閲覧日: 2025 年 9 月 1 日).
12. アーテック: Studuino 基板回路図, (https://www.artec-kk.co.jp/studuino/docs/Studuino_board_shcematic.pdf, 閲覧日: 2025 年 9 月 1 日).
13. アーテック: Studuino 英語版取扱説明書, https://www.artec-kk.co.jp/studuino/docs/en/Studuino_board_manual.pdf, 閲覧日: 2025 年 9 月 1 日).
14. Microchip: ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/PmegaAVR® Data Sheet (<https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega328>, 閲覧日: 2026 年 1 月 5 日)
15. Microchip: MIC5205 150 mA Low-noise LDO Regulator (<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005785A.pdf>, 閲覧日: 2025 年 9 月 1 日)
16. 東芝デバイス & ストレージ: TB6552FNG (<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/semiconductor/product/motor-driver-ics/brushed-dc-motor-driver-ics/detail.TB6552FG.html>, 閲覧日: 2025 年 12 月 20 日)
17. アーテック: Line Tracer 組立説明書 (<https://www.artec-kk.co.jp/artecrobo//pdf/jp/LineTracer.pdf>, 閲覧日: 2025 年 9 月 1 日).
18. 岩佐健司, 庄司有, 越智真治, 庄司彰: プラスチック歯車の歯の温度上昇に関する基礎的研究, 日本機械学会東北支部第 42 期秋季講演会講演論文集 (2006).
19. タミヤ: ミニ四駆グリス(フッ素樹脂配合) (<https://www.tamiya.com/japan/products/15383/index.html>, 閲覧日: 2025 年 12 月 20 日).
20. アーテック: 計測と制御キット B プログラムによる計測と制御 教員用 (https://www.artec-kk.co.jp/special/school_programming/02jh_newtext/レンタル/AR1/基本実践パッケージ B/計測と制御キット B_67356.pdf, 閲覧日: 2025 年 12 月 20 日)