

モータ軸直接駆動型単一モータ ライントレーサキットの開発

平岡 延章* 十河 宏行* 由良 諭* 正箱 信一郎*

Single Motor Line Tracer with Intermittent Motor Shaft Direct Drive Scheme

Nobuaki HIRAOKA, Hiroyuki SOGO, Satoshi YURA and Shinichiro SHOBAKO

Abstract

A single motor line tracer type training kit that has basic factors on mechatronics system such as sensor, actuator, power drive, micro-controller and control code is described. The kit has a base plate of printed circuit board where one small DC motor and follower legs made of meandering aluminum wire are fixed by nylon fasteners. Electronic devices including micro-controller and battery cases are soldered to the PCB, and a photo reflector for line tracing is placed in front of the motor. For cost cut, the number of motor is reduced down to one and motor shaft direct drive method without reduction gears is used. Intermittent drive scheme is introduced to overcome the insufficient degree of freedom for forward and steering motions due to single motor system. Key design concept is briefly described, and discussed.

Keywords : Single Motor Line Tracer, Motor Shaft Direct Drive, Intermittent Drive Scheme, Low-Cost Training Kit, Mechatronics System

1. はじめに

モノづくりの動機付けにおいては、仕組みが簡単で確実に動作する機械システムを自分で組み立て、そのからくりからモノづくりに興味を持たせるリアルな経験が大切である。ここでは、機械電子工学科が電気情報工学科有志と協力して実施してきた小学生向けモノづくり体験講座「からくり工房 201x」¹⁾用に開発した安価な組立工作キットの仕組みと開発概況について報告する²⁾。

ここで紹介する組立キットは、プリント回路基板を土台として、電池ボックスや模型用DCモータを回路基板に直接取り付け付けた自立自走型のライントレーサである。部品点数を少なくし、安価かつ組み立てやすいキットに仕上げるため、モータの数を一つとし、減速機を廃してモータ軸で床面を直接駆動する方式とする。なお、モータ軸直接駆動のアイデアは古く、例えば三

井³⁾が模型駆動に用いることを提案し、製作事例を紹介している。

次章で、単一モータライントレーサキットの基本コンセプトと基本構造を示し、単一モータで二自由度(走行・操舵)のラインレースを実現するための動作原理を述べる。続いて、アイデア着想から現在の形に至るまでの開発過程を概観し、若干の考察を加えて小文のまとめとする。

2. 基本コンセプトと全体構造

2.1 開発コンセプト

別報⁴⁾で紹介し当学科の学生実験実習用として供用中の組立教材キットから、さらに部品点数を削減してコストカットすることを考える過程で、単一モータライントレーサのアイデアが生まれた。

アイデアの実現に際し、著者らが重視したキット設計の基本コンセプトを以下に列挙する。

- ・メカトロニクスの基本要素を具備すること。

* 香川高等専門学校機械電子工学科

- ・卓上で何がしかの知的な動作をすること。
- ・正しく組み立てることで確実に動作すること。
- ・組み立て作業が容易であること。
- ・部品点数が少なくローコストであること。
- ・入手容易な物品で構成すること。

2.2 基本構造

図1に開発した単一モータライトレーサの写真(後方から見たはんだ面と前方から見た部品面)を示す。ライトレーサの基本構造は、プリント回路基板を土台として、その上に小型DCモータ、電池ボックス、光センサ、電子回路等を実装する一体の自立/自律型である。モータ軸とアルミ線を曲げ加工した後脚による3点支持とし、モータ軸で床面を直接駆動する。

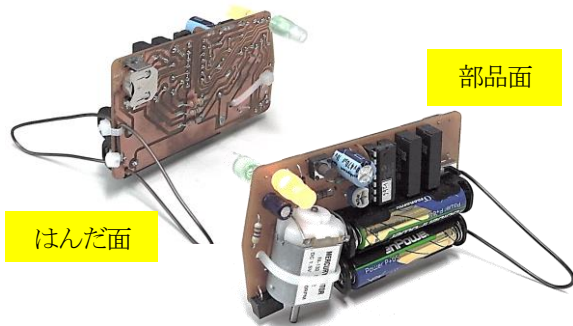


図1 単一モータライトレーサ

モータは、回路基板上に張ったビニル紐(配線結束用)で固定位置を定め、基板の穴に通した結束バンドで締め付けて固定する。前端下部に光センサ(黒い箱状)を、モータ上方に動作状態表示用のLED(部品面側が黄色に光っている)を取り付け、中央下部に2本の単4型乾電池を、上部にマイクロコントローラとリードリレー(2本並んだ黒い箱)を実装した。後端下部にアルミ線を洋服ハンガー型に曲げ加工して中央部を持ち上げた形状の支持脚を取り付け、はんだ面側の後方上部にボタン電池を配置した。

2.3 電子回路

回路図を図2に示す。マイクロコントローラを中心に、左に光センサと押しボタンスイッチの入力要素を、右にLEDとモータ制御素子の出力要素を描いた。制御部の電源は、別報⁴⁾に記した電源分離を行い模型用DCモータの短絡モードにより生じる不具合に対処した。R5の役割は、アートワーク布線の都合で発生したジャンパー線であり、回路設計上は0Ωとして特段の支障はない。図中の回路定数は設計中央値の数値例で

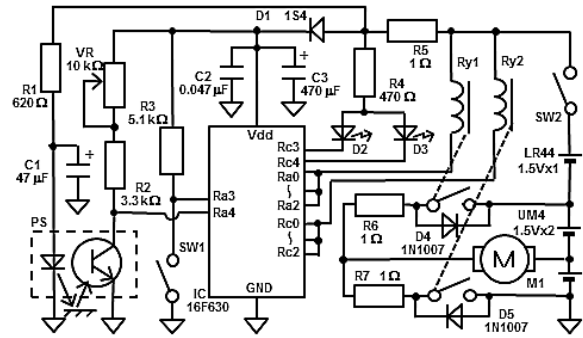


図2 単一モータライトレーサの電子回路図

あり、定数の増減に対して余裕を持たせた値である。

床面を直接駆動するモータ一つでライトレース動作を行うためには、モータの正逆転動作が必須となる。マイクロコントローラによりDCモータの正逆転を行うには、二つの回路選択がある。一つは、Hブリッジ回路を用いる方法で、電力素子4個が必要となる。モータ動作時にパワー素子2個分相当の電圧損失があり、低電圧大電流型の負荷を駆動する場合、電圧効率が低い。二つ目は、正転と逆転で別々の電源(電池)を用いるシングルエンド回路である。電池が余分に必要となる点を除けば、回路構成が簡単で部品数は少ない。

低電源電圧動作では、いずれの回路でもハイサイド側の電力素子の駆動に工夫を要し、コンプリメンタリペア素子の使用、もしくはレベルシフトまたはフォトカプラが必要となる。ここでは、部品点数の少ないシングルエンド型を採用し、パワー素子としてリードリレー(機械接点)を用いることで、ハイサイド側の駆動のため部品が増加するという不都合問題を解決した。なお、ここで用いたリードリレー巻線の定格電圧が5Vであるため、2個のモータ用電池にボタン電池1個を追加し、制御部電源電圧を4.5Vにかさ上げた。

図3は、はんだ面から見た回路基板のアートワークである。外寸は、幅84mm×高さ45mmで、切削型のプリント基板加工機を用いて学科内の実験室で作っている。裏文字に見える赤色のデータは部品面(この

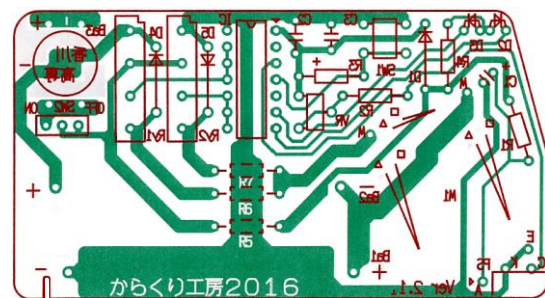


図3 はんだ面から見た回路基板のアートワーク

図の裏面)側の加工データである。

右下側方に引かれた線の中から「□」もしくは「△」の組のどちらかを選んでビニル紐を張ることにより、モータの床面に対する取り付け角度を大(□)、小(△)から選択できる。右下端が光センサの取り付け位置で、基板左下端の切れ込みに洋服ハンガー型に整形したアルミ線の中央下部を持ち上げて差し込み、後脚の中央支持部とする。ボタン電池用電池ボックスは、電池の負極がプリント回路基板のパターン銅箔と直接接触するよう、はんだ面側に実装して配線の無駄をなくした。

2.4 制御プログラム

制御プログラムの流れのサンプル例を図4に示す。電源オンに続くオンチップパワーオンリセットの動作後プログラムがスタートし、入出力ポートとタイマや割り込みなどの初期設定をした後、ライトレースを行う無限ループに入る。

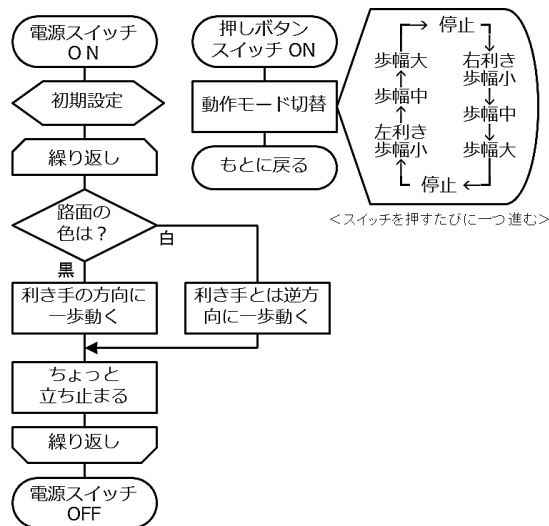


図4 制御プログラムの流れの一例

電源オン時の初期モードは、モータ停止モードで、この状態でライトレーサを走行させる床面に置き、センサの感度を調整し、床の白黒に対する応答を確認することができる。割り込み駆動の押しボタンスイッチを押すと、図4の右上に示した順序で8個の動作モードが順に切り替わる。したがって、床面に描かれた黒ラインの右もしくは左エッジをトレースするライトレース動作を、それぞれ3種類の歩幅で実行できる。

ここで、ライトレーサの歩幅は、空間距離ではなくモータを駆動する時間幅でプログラムしており、それぞれのモードにおける一步の移動距離は電池の新しい古いや消耗の度合いにより変動する。新しい乾電池

では、歩幅小、中が適度な動作になり、歩幅大は前端が大きく左右に振れるワイルドな動作となる。乾電池が消耗すると、歩幅小では、うまく前進できなくなり歩幅中、大が適度な運動となってくる。プログラム例に示したモード切り替えは、ライトレース時の動作の変化を楽しむためと同時に、動作に伴う電池消耗に対処して電池動作時間を長くするための工夫でもある。

2.5 原価計算

組立キットの部品表と 2016 年夏時点の部品原価を表1に示す。価格は、安価な通信販売事業者から部品を10個、100個単位で購入した場合の部品単価から算出したものである。回路基板については、未加工の定尺生基板(約1m×1m)の購入価格から割り出したプリント基板素材の価格である。

表1 部品表と原価計算例

部 品 名	価 格
PS: 反射型光センサ(LBR-127HLDなど)	45 円
IC: PIC16F630I/P	100 円
M1: マブチ FA-130(同等品)	100 円
Ry1,Ry2: SS1A05D(同等品)×2	126 円
D1: 1S4(同等品)	14 円
D2,D3: LED φ5の普通品×2	36 円
D4,D5: 1A 100V以上(1N4007など)×2	10 円
VR: 10kΩ 半固定抵抗	20 円
R1 : 1/4W 620Ω カーボン	1 円
R2 : 1/4W 3.3kΩ カーボン	1 円
R3 : 1/4W 5.1kΩ カーボン	1 円
R4 : 1/4W 470Ω カーボン	1 円
R5-R7: 1/4W 1Ω カーボン	3 円
C1: 10V 47μF程度 電解	20 円
C2: 50V 0.047μF セラミック	10 円
C3: 10V 470μF 電解	20 円
SW1: タクトスイッチ □5	7 円
SW2: スライドスイッチ 3p	25 円
電池BOX: 単4×1用×2	60 円
電池BOX: LR44×1用	20 円
乾電池: 単4(UM-4)×2	40 円
乾電池: LR44	10 円
ICソケット: 14pin	10 円
回路基板	98 円
結束バンド, ビニル紐, アルミ線, など	30 円
可変抵抗調整用ドライバ(3Dプリンタ製)	1 円
(部品数:34) 計	809 円

文献4で紹介したDCモータを2個使用する形式のライトレーサキットとの比較で、部品点数が83% (41→34点)に減少し、組み立て工数が少なくなった。また、部品表からネジ類がなくなり、組み立て難易度が下がった。キット原価も若干ではあるが割安となった。

3. 単一モータによるライントレース動作

3.1 間欠駆動運動の観察

前章で述べた単純な構造の機構に取り付けたモータ一つ(1自由度)を回転させるだけで、ライントレース(前進と操舵の2自由度)動作ができるだろうか？

ここで提案したライントレーサで、モータを間欠駆動する際の一步ごとの動きを観察して、模式的に表したものが図5である。大きな三角形の各頂点は床面との接地点(モータ軸と後脚の両端)を表し、赤印がモータ軸側である。モータを間欠駆動すると、図中に丸印「L」または「R」で示した点付近を中心とした円弧に沿ってモータ軸端が動き、1回のOn/Offで例えば図中の矢印分だけ移動する。

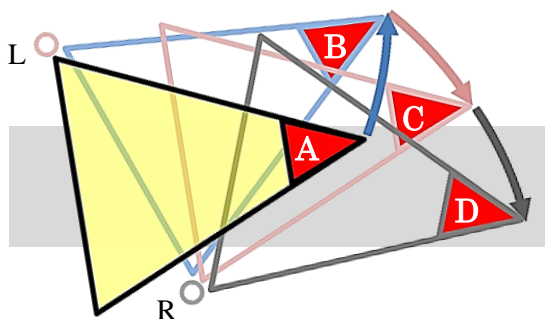


図5 間欠駆動時の接地点の運動

図5の事例では、モータを左に1歩、右に2歩だけ間欠駆動した際の運動を示しており、結果としてモータ軸端(赤三角)がA→B→C→Dと前方(図の右方向)に向かって移動していく。モータ軸付近の床面の白黒を光センサにより検知して、図に示すように白黒の境界線方向にモータを駆動すれば、境界線を行き来しながら少しずつ前に進むライントレーサが実現できる。

なお、ここで示した一連の運動に関する力学モデルを用いた解析は、今後進める予定である。

3.2 モータ軸直接駆動と間欠駆動

モータ軸直接駆動では、モータ軸と床面は点接触であり、連続回転するモータ軸と床面は動摩擦を介するすべり接触となる。したがって、文献3に記述があり、文献5,6で解説されているとおり、駆動力の伝達は不安定である。また、床面が弾塑性変形して軸荷重によりくぼみができる場合、くぼみから抜け出すことができず駆動軸の空転を生じやすい。

ところで、モータ軸が静止状態から回転を始める際には、静摩擦力が作用するため、一般に動摩擦駆動時より大きな駆動力が得られる。モータ軸を単純に連

続回転させるのではなく、モータ電流を断続して間欠回転させると、静摩擦による蹴りだし効果を利用でき、パルス状ではあるがより大きな駆動力を繰り返し発生させることができる。

マイクロコントローラ搭載機器では、通常PWM駆動法によりDCモータの速度制御を行うため、間欠駆動の実装にあたりハードウェア、ソフトウェア上の仕組みに特別な追加負担はない。したがって、モータ軸直接駆動では、間欠駆動法[†]が一つの有効な選択肢である。

4. 着想から実現までを振り返って

4.1 着想とスケルトンモデルによる検証

ライントレーサの部品数を削減するため、駆動モータを一つにしたい。しかし、運動自由度を考えると無理がありそうだ。モータの回転方向を正逆転させるだけでは、ただ同じ場所を往復運動することしかできないだろう。でも、試してみよう。図6は、この機構のアイデア確認に用いた簡易模型である。

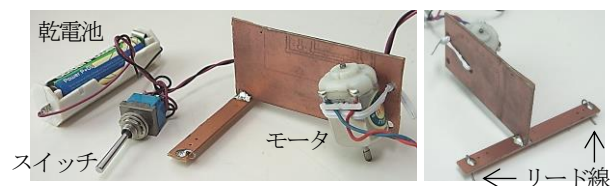


図6 動作確認用スケルトンモデル

このスケルトンモデルは、両面プリント基板の切れ端をはんだ付けして機構の骨格を作り、模型用のDCモータを軸が床に対して斜めになるよう、針金入りのリボン紐でプリント基板に縛り付けたものである。さらに、後方の水平部の両端に抵抗器のリード線をはんだ付けしてソリ状にしたバラック模型である。中立付の長レバートグルスイッチを介して乾電池1個を繋ぐことで、手動により正転・停止・逆転の操作ができる。

手動でスイッチを小刻みに切り替えると、軽いバラック模型は勢い良く前へ前へと進んだ！まったく予想外の動作ではあったが、これが単一モータライントレーサ開発のスタートとなった。ちなみに、モータの取り付け角度を図6に示す前傾とは逆の後傾にすると、モータの適切な断続操作でバラック模型の後退運動が確認できた。

[†] 間欠駆動法は、PWM(パルス幅変調)駆動と同じOn/Off駆動であるが、負荷慣性による運動の平滑化が起こらない低周波数領域の断続動作である。

4.2 実用可能なキットの実現に向けて

マイクロコントローラ制御のライトレーサに仕上げるまでに、三つの困難があった。はじめは、2章の電子回路の節で述べたとおりで、最少の部品数でDCモータの正逆転駆動を簡単かつ確実に実現する方法を見出すことであった。

模型用DCモータの駆動に使用できる安価で入手容易なHブリッジICがあれば話しは簡単であるが、低電圧で比較的大電流の模型用DCモータの駆動に適するものは見出せなかった。個別のパワー半導体素子でHブリッジを構成すると素子数が増加し、またコンプリメンタリ素子を使わない限りハイサイド側の駆動にさらに余分な部品が必要となる。一方、コンプリメンタリ素子は高価であり、また入手性が悪い。

ふとしたことから、小さなリードリレーが安価に販売されていることに気づき、問題は一気に解決した。リレーは磁気駆動の機械接点であるため、駆動コイル側と負荷(機械接点)側は電気的に絶縁されており、使用にあたってハイサイド側であるかローサイド側であるかを意識する必要がない。

二つ目は、後部の支持構造とその素材である。回路基板に簡単かつ強固に取り付けできる構造と素材は何か? 図7は、ライトレーサの機能を持つ試作 Ver.1の写真である。後脚は、ピアノ線(φ1mm)を回路基板にあけた穴に通し、はんだ付けで基板銅箔に固定した。丸線のはんだ付け固定は十分に強固ではないため、長期間の使用を考えると補助支持/固定対策が必要である。また、この太さのピアノ線を回路基板に通した後に、図のように曲げ加工するのは容易ではない。

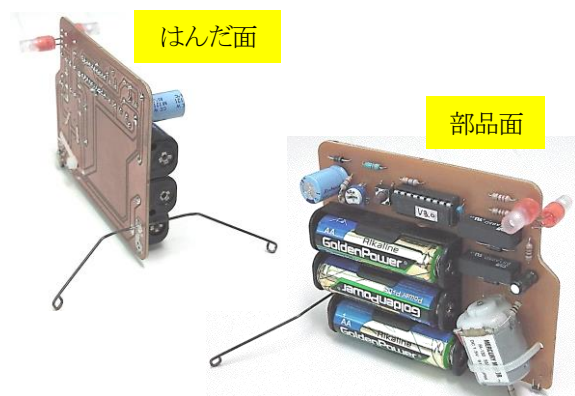


図7 試作ライトレーサ Ver. 1

いくつかの試行錯誤を経て、図1に示したようにφ1.2mmの園芸用アルミ線を洋服ハンガー状に加工して、モータと同様に回路基板にあけた穴に通した結束バンドで固定する方法にたどり着いた。この素材は、

やわらかくて加工が容易であり、入手性もよい。また、リング状にすることで、必要な支持強度が得られる。

最後は、ライトレーサの質量の問題である。リードリレーの巻線仕様から、4.5Vの電源電圧を得るために単3乾電池3個を用いて、図7に示す Ver.1を作製したが、重心が高く不安定かつ重い(124g: 乾電池を含む)というのが試作の結果であった。

そこで、重心を下げるために電池を回路基板両面に振り分け、軽量化のためにモータに直接電力を供給しない乾電池1本を単4型に変更した「からくり工房2015」モデル(Ver.2, 103g: 乾電池を含む)を図8に示す。重心が下がるとともに、若干の質量減を実現できたが、はんだ面に配置した電池ボックスの取り付けと配線が煩雑で、組み立てに苦勞するモデルとなった。

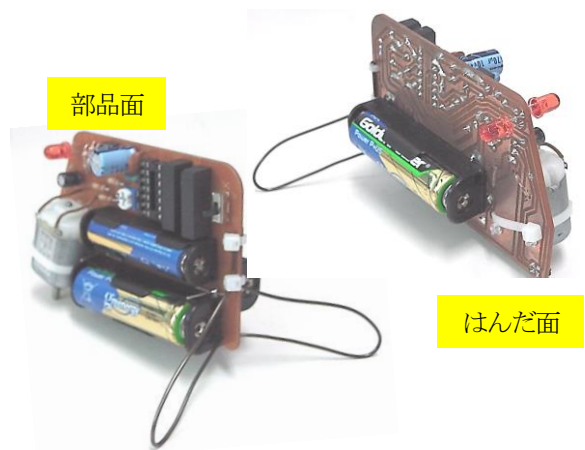


図8 乾電池を回路基板の両面に配した Ver.2

以上の開発過程を経て、当初の諸課題を克服した図1の「からくり工房2016」モデル(Ver.3, 全質量66g: 乾電池を含む)が、実用に耐える現行モデルである。アルミ線を用いた後ろ足を持ち、モータ駆動用に単4乾電池を2個、制御回路用の電圧かさ上げにボタン電池1個を使用している。モータ軸には、金属軸の上にビニルパイプ(魚釣用カラミ止パイプ: 外径2mm, 内径1.5mm, 長さ5mm程度に切断)を差し込んで静動摩擦の増加を図った。イラストにより部品を示した公開講座用「部品表」の上にキット(Ver.3)一式(大きさの都合で回路基板を除く)の部品を並べると図9のようになる。

5. まとめ

模型用DCモータ一つで動作する仕組みの簡単なローコストライトレーサキットを紹介した。単一モータ化により部品点数を削減し、モータ軸直接駆動法に

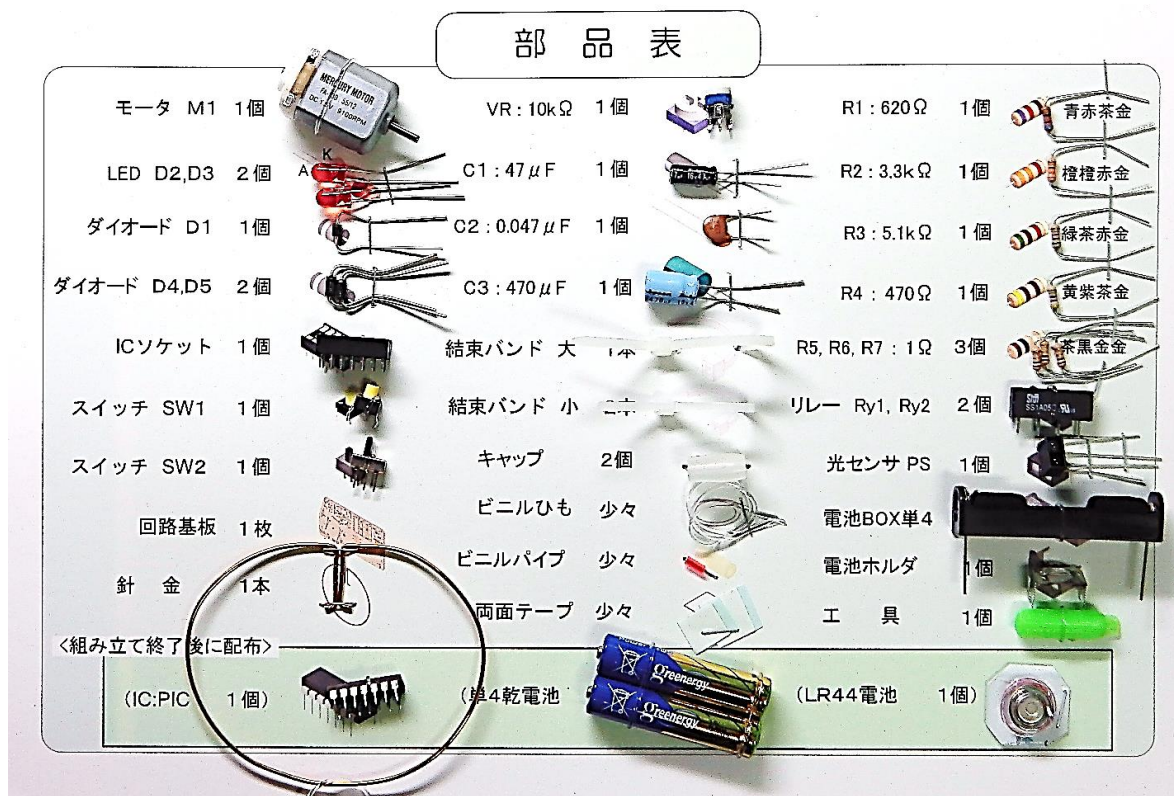


図9 部品表の上においたキット部品一式 (外形寸法の大きい回路基板を除く)

より減速機を廃してコストダウンを図った。本文で紹介した工夫を取り入れ、メカトロニクスの基本要素を具備する安価かつ組み立て容易な教材キットに仕上げた。

単一モータ化により生じる前進+操舵に対する運動自由度の不足を、モータの正逆転と間欠駆動により補う単純な機構を考案し、その動作を確認した。間欠駆動手法は、モータ起動時の静摩擦による蹴りだし効果が利用でき、モータ軸直接駆動法の駆動力を高める駆動法である。

ここで紹介したライントレーサキットは、2015年、2016年の夏に実施した小学生向け公開講座「からくり工房201x」¹⁾で用いる組み立て教材として順次開発し、講座教材として使用しながら実践的に評価し改良したものである。ケーススタディではあるが、この小文がメカトロニクス教育に携わる諸兄のご参考とならんことを期待する。

参考文献

1. <http://www.kagawa-nct.ac.jp/MS/koukaikouza/koukaikouza.html>
2. 平岡延章, 十河宏行, 由良諭, 正箱信一郎, メカト

ロニクス基礎教育用ローコスト組立教材キットの開発, 平成28年度「全国高専フォーラム」教育研究活動発表, D-10, 2016.

3. 三井康亘, アクリルモーターカーの工作, 第2章, 日本放送出版協会, 1980.
4. 平岡延章, 十河宏行, 由良諭, 正箱信一郎, メカトロニクス基礎教育用ローコスト組立教材キットの開発, 香川高等専門学校研究紀要第8号, pp.105-113, 2017.
5. 浅野圭佑, 白井達也, 富岡巧, ダイレクトモーターカーの運動特性の解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '10, 2A1-E15, 2010.
6. 小形遼平, 白井達也, 富岡巧, ダイレクトモーターカーの構造の違いによる運動特性の解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '10, 2A1-E24, 2010.