

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

平岡 延章* 十河 宏行* 由良 諭* 正箱 信一郎*

A Study on Low-Cost Mechatronics Training Kit

Nobuaki HIRAOKA, Hiroyuki SOGO, Satoshi YURA and Shinichiro SHOBAKO

Abstract

A low-cost training kit that has basic factors on mechatronics system such as sensor, actuator, power drive circuit, micro-controller and control code is described. The kit consists of a base plate of printed circuit board and a battery case fastened perpendicularly on the PCB by small screws and nuts. Two small DC-motors are also fixed on PCB by nylon fasteners and form three points running support with switch lever of the battery case. Electronic devices including micro-controller are soldered to the PCB, and a photo reflector unit for line tracing is pasted on the lower side of battery case by double-sided adhesive tape. In order to reduce cost, motor shaft direct drive method without reduction gears is used, and the motors are driven intermittently to overcome disadvantage of motor shaft drive direct scheme. Key design concept and brief development history are described, and some inherent difficulty of the kit is also discussed.

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

1. はじめに

メカトロニクス分野の実践的モノづくり教育においては、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の基本を学ぶ経験が大切である。ここでは、機械電子工学科2年生の授業に取り入れている安価な組立教材キットの仕組みと開発概況について紹介する¹⁾。

ここで紹介する組立教材キットは、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モータをこれ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。安価に仕上げるため、減速機を廃してモータ軸で直接床面を駆動する直接駆動とし、継続的に入手容易な汎用電子部品で構成した。なお、モータ軸直接駆動のアイデアは古く、たとえば三井²⁾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、キット開発の基本コンセプトを述べ、続いて組立教材キットの詳細と動作原理を紹介する。さらに、キットに内在する本質的な問題点の解決策を示し、現在供用している標準型に至るまでの開発過程を概観する。最後に、若干の考察を加えて小文のまとめとする。

2. 組立教材キットの基本コンセプト

機械電子工学科³⁾はメカトロニクス技術者の育成を教育目的としており、キット開発はその授業教材に用いることを前提として、以下の要件を満たすことを基本とした。

- 1) メカトロニクスシステムの基本要素(センサ、アクチュエータ、電力駆動回路、マイクロコントローラ、制御プログラム)を具備すること。
- 2) 卓上で何がしかの知的な動作をすること。
- 3) 組み立ての際、何がしかの選択肢があること。

* 香川高等専門学校機械電子工学科

- 4) 正しく組み立てることで確実に動作すること。
- 5) 低学年の講義や実験実習の学習内容と連携しており、学科の教育課程に対する方向付けに寄与すること。
- 6) 高学年の講義や実験の中で、振り返って参照でき、構成要素の中にブラックボックスがないこと。
- 7) 材料費が安価であること。
- 8) 長期に亘り継続して使用部品の調達が可能であること。

ここで、1)–4)項が狭い意味でのキット開発のコンセプトであり、5)–6)は教育課程との整合によるコストパフォーマンスの追求、7)–8)は事業継続の視点から求められる重要事項である。授業では、クラス単位で学生全員に個別配布することを前提としており、本キット開発においては1セットの部品原価を1,000円以下とすることが一つの目安目標であった。

3. 組立キットの構成

3.1 基本構造と仕様

キットの基本構造は、反射型光センサを用いて床面の白黒を検知し、マイクロコントローラと電力半導体素子で2個のDCモータをOn/Off制御し、白と黒の境界線上を走るライントレーサである。二つのモータの回転軸と電池ケースに付属するスイッチレバーを脚とする3点接地構造を持ち、減速器なしのモータ軸直接駆動である(図1)。

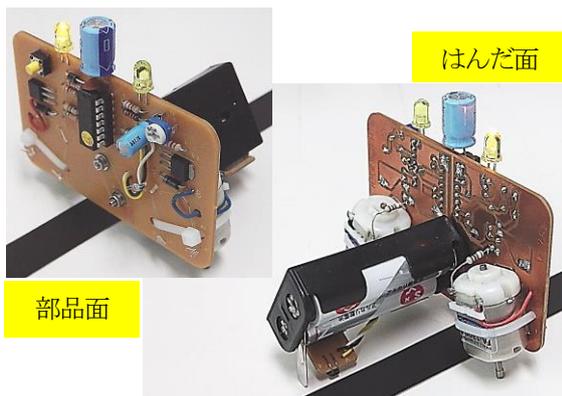


図1 組立キットの完成外観(MOSFET仕様)

標準キットの基本仕様は、以下のとおりである。

- ・反射型光センサ : 1個
- ・感度調整用可変抵抗器 : 1個
- ・DCモータ : 2個
- ・動作状態表示用LED : 2個
- ・モード切替スイッチ : 1個
- ・マイクロコントローラ : 1個

- ・乾電池(単3型) : 2個
- ・外寸 : 全長 70~80*×幅 87×高さ 81 mm
※ 組み立て方に依存して変動する。
- ・質量(アルカリ乾電池含む) : 約 110 g
- ・製作時の選択オプション
モータ固定角度 : 大 / 小
モータ取付面 : はんだ面 / 部品面
電力素子 : ダーリントンTr / MOSFET
回路部品定数 : 定数の許容範囲を提示

3.2 機構

機構の土台は、プリント回路基板である(図2)。電池ボックスを基板と垂直な向きにM2のビスナットで固定し、電池ボックス付属のスイッチレバーを前脚として利用する。スイッチをオンにした状態で、スイッチレバーが基板の中心線上にあり、かつ床に対して垂直となるように、電池ボックスの取り付け位置と傾きを決めた。

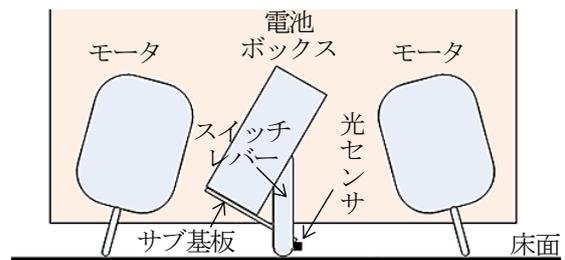


図2 機構の正面図

電池ボックスの前端(スイッチレバー脇)に反射型光センサを取り付けたサブ基板を両面テープで固定して、機構前端部で床面の白黒を検知する構造とした。図3に示すようにセンサはサブ基板に対して約30°の傾きで実装し、電池ボックスにサブ基板を貼り付ける位置により、床面からセンサまでの距離を調節する。

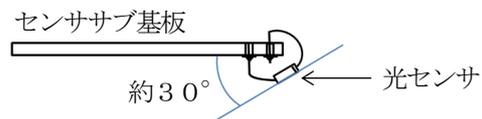


図3 センササブ基板と光センサの取付角度

二つのDCモータは回路基板の表面(部品面)または裏面(はんだ面)のいずれにも取り付け可能で、回路基板上に張るビニル紐のガイドに沿って両面テープで仮止めし、基板の穴に通した結束バンドで締め付けて「ハの字」型に固定する。機構全体は、2個のモータ軸と

スイッチレバーの3点で床と接し自立する。

図4はプリント回路基板のはんだ面で、基板左右下方の線に付した「△」または「□」の指示印により、モータ取り付け角度は大(△)または小(□)の2種類が選択できる。選んだ指示印に従ってビニル紐(電線結束用)を張り、モータの位置決めガイドとする。紐で作った枠内に、紐に沿ってモータを置けば、床からの取り付け高さや角度が自動的に定まる仕組みとした。

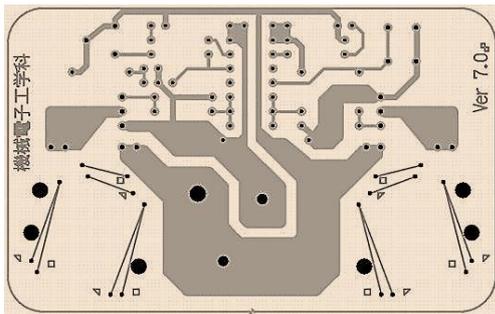


図4 土台となるプリント回路基板(はんだ面)

3.3 電子回路

標準キットの回路図を図5に、部品リストを図6に示す。全体回路は、反射型光センサと押しボタンスイッチをマイクロコントローラ(PIC16F630)の入力ポートに、2個のLEDと2個のパワー素子(モータ)を出力ポートに接続したありふれた回路構成である。LEDは、例えば光センサで見た床面の白黒判別を表示し、2個のDCモータは、パワー素子のOn/Offにより独立に回転/停止する。

図5の回路図どおりパワー素子にバイポーラトランジスタを用いる場合、R8, R9は実装しなくても動作に特段の支障はない。Tr1, Tr2にMOSFETを用いる際は、PICをソケットから取り外すことでゲート回路が開放となるため、ゲート絶縁膜を静電気から保護するため、R8, R9の実装が必要となる。

標準キットの回路上の工夫点は、R10, R11の挿入とD3によるPIC-DCモータ間の電源分離の2点であり、ともに模型用DCモータの持つ不都合な特性

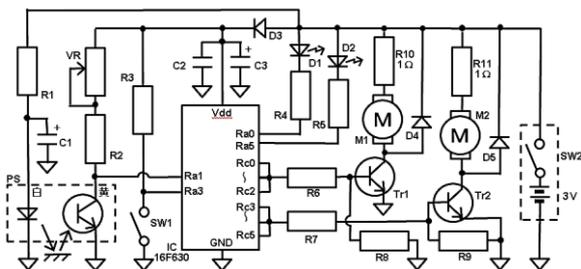


図5 標準キットの電子回路図

に対する保護対策である。これについては、後の章で詳述する。

回路設計では、設計余裕を大きく取り、使用電子部品の回路定数は図6に示すとおり許容範囲の表記とした。消費電流を小さくする省エネ型にするか安全率重視の安定動作型にするかを、作製者の考えにより広く選択できる。また、主要部品は同等品で代替可能な部品仕様としているため、その時点で入手性のよい物品に適宜振り換えて授業計画を進めることが可能である。電力素子については、R6~R9の定数調整によりMOSFETに変更することが可能な回路基板仕様としている。

なお、電池ボックスについては、スイッチレバーが前方の支持脚を兼ねるため、他品種での代替は困難であるが、執筆時点で複数の販売業者が取り扱っている普及品であるため、当面の入手性に問題はないと判断している。

PS:	反射型光センサ (TPR-105F など)
IC:	PIC16F630 (PIC16F676 でも可)
M1, M2:	マブチ FA-130 または同等品
Tr1, Tr2:	2SD1828 または同等品
D1, D2:	LED φ3~φ5の普通品, 何でも良い
D3:	ショットキーダイオード 1A 30V以上
D4~D5:	1A 100V以上 (10E1, 1N4007 など)
VR:	5kΩ 半固定抵抗
R1:	1/4W 240Ω~300Ω カーボン
R2:	1/4W 10kΩ~15kΩ カーボン
R3:	1/4W 2kΩ~4kΩ カーボン
R4, R5:	1/4W 120Ω~200Ω カーボン
R6, R7:	1/4W 120Ω~150Ω カーボン
R8, R9:	1/4W 50kΩ~∞Ω カーボン
R10, R11:	1/4W 1Ω カーボン
C1:	10V 10~20μF 程度 電解
C2:	50V 0.010. 1μF セラミック
C3:	10V 470μF以上 電解
SW1:	タクトスイッチ □5
SW2:	スイッチつき電池ボックス 単3×2

図6 標準の部品リスト

3.4 制御プログラム

制御プログラムの大まかな流れの一例を図7に示す。電源スイッチを入れると、パワーオンリセットに続いて、I/Oポートやタイマ等の初期化を行い、その後はライトレースを続ける無限ループに入る。サンプルとして提供するプログラムは、図7の右上に示すとおり、停止(センサ感度調整)モードを含む8つの動作モードを持ち、押しボタンスイッチを押すたびに順次一つ次の動作モードに移動する仕組みとしている。押し

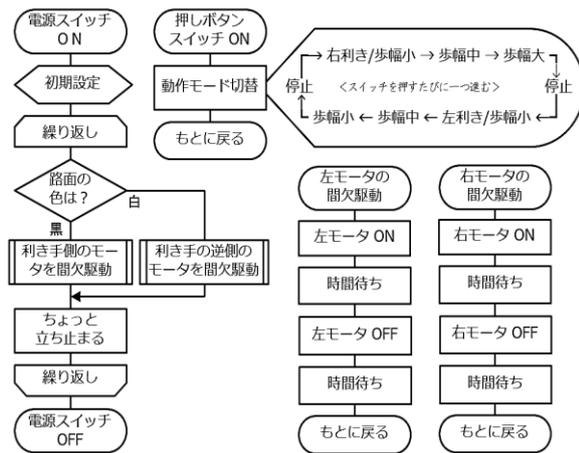


図7 制御プログラムの流れの一例

ボタンスイッチの動作は、ハードウェア割り込みを用いて検出し、操作の即応性に配慮した。

なお、当学科の学生は3学年でマイクロコントローラPICのハードウェアとソフトウェアに関する講義と実験を受講する。PICプログラミングについて学習した後は、学生自身がソースコードから自由にキットの制御プログラムを作成/修正して、PICに書き込みすることが可能である。たとえば、制御プログラムを修正して無限ループ内でポーリングするスイッチ検出手法に変更すれば、このキットを用いて外部入力に対する即応性の良否を体験することができる。

3.5 原価計算

授業で用いる教材キットは、教育課程に即したものであると同時に安価であることが望まれる。

電子部品の価格は、時価であり購入数量や入手先で大きく異なる。ここでは、一例として、機械電子工学科が授業用に調達している電子部品の平均的な購入価格から積算したキット1台あたりの部品原価を表1に示す。主な調達先は、10個、100個単位で部品を提供している通信販売事業者である。

4. 本質的な問題点と対処法

この章では、モータ軸直接駆動の本質的な弱点に対する対応策として間欠駆動法を提案し、間欠駆動法の導入による駆動性の改善に言及する。合わせて、実測により露見した模型用DCモータの本質的な不都合特性を示し、これに対処する回路上の工夫を紹介する。

4.1 モータ軸直接駆動の弱点と間欠駆動

モータ軸直接駆動手法は、床面上のモータ軸のすべり回転を前提とした駆動法であり、文献2に記述があ

表1 キット1台あたりの部品原価の一例

部 品 名	価 格
PS: 反射型光センサ(TPR-105Fなど)	36円
IC: PIC16F630	100円
M1,M2: マチ FA-130(同等品)×2	200円
Tr1,Tr2: 2SD1828(同等品)×2	100円
D1,D2: LED φ3~φ5 普通品×2	36円
D3: ショットキーダイオード 1A 30V以上	14円
D4,D5: 1A 100V以上(1N4007など)×2	10円
VR: 5kΩ 半固定抵抗	20円
R1: 1/4W 240Ω~300Ωカーボン	1円
R2: 1/4W 10kΩ~15kΩカーボン	1円
R3: 1/4W 2kΩ~4kΩカーボン	1円
R4,R5: 1/4W 120Ω~200Ωカーボン	2円
R6,R7: 1/4W 120Ω~150Ωカーボン	2円
R8,R9: 1/4W 50kΩ~∞Ωカーボン	2円
R10,R11: 1/4W 1Ωカーボン	2円
C1: 10V 10~20μF程度 電解	20円
C2: 50V 0.01~0.1μF セラミック	10円
C3: 10V 470μF以上 電解	20円
SW1: タクトスイッチ 05	7円
SW2: スイッチつき電池ボックス 単3×2	60円
乾電池: 単3(UM-3)型×2	40円
ICソケット: 14pin	10円
回路基板	115円
M2×10皿ねじ, M2ワッシャ(平/バネ), M2ナット, 結束バンド,ビニル紐, など	40円
(部品数 :41) 計	849円

り、文献4,5で解説されているとおり、駆動力の伝達是不安定である。

駆動軸と剛な床の接触は図2で示したように点接触である(条件a)。一方、床が弾塑性体の場合、床の変形に応じて2つの現象が起こる。床の変形が大きくモータ軸に掛かる荷重により接地点が沈み込む条件(条件b)では、駆動軸の発生する駆動力によりくぼみから抜け出すことができず、その場でモータ軸が空転することとなる。モータ軸の荷重による床のくぼみが小さい場合、床面の変形により接地部分がモータ軸周に沿って線上に広がるため、剛な床と比べて方向の定まったやや大きな駆動力が得られる(条件c)。実用上、条件cが走行に適した駆動状態となる。

いずれの条件でも、駆動力は接地点における軸の垂直荷重に動摩擦係数を掛けた値となる。そこで、軸にたとえば薄い軟質樹脂パイプをかぶせるなどの工夫により動摩擦係数を大きくすれば、駆動力の増加を図ることはできるがその代償として、モータ軸の回転速度が低下し、電機子電流が増加する[†]。電源内蔵の自立型模型では、モータ消費電流の増加は電池の消耗につながり、電池寿命が短くなる。

[†] モータ印加電圧を一定とするDCモータ駆動回路では、回転速度0のとき、電機子電流が最大であり、回転数の増加とともに電機子電流が減少する。

ところで、モータ軸が静止から回転に移行する運動初期においては、モータ軸と床面の間の摩擦は静摩擦である。一般に静摩擦は動摩擦より大きく、これをうまく利用すると同じ駆動系で何倍かの駆動力が得られる。図7に流れを示したサンプルプログラムでは、ここに着目してモータを間欠駆動[‡]する手法を用いた。

モータの動き出し時に静摩擦による蹴り出し効果を使う間欠駆動は、マイクロコントローラ制御であれば容易に実現できる手法であり、モータ軸直接駆動系においてより大きな推力を得る簡単かつ有効な手段である。モータオン時に起動電流に相当する大きなモータ電流が流れるが、On/Off周期に対するデューティ比が小さいため、平均電力における消費電力増加は軽微であると見込まれる。

4.2 DCモータの瞬時短絡特性と電源分離

すでに常識なのかもしれないが、開発の過程で確認した模型用DCモータの不具合特性についてデータを示してコメントし、対応策を記しておく。

キット開発の当初からしばらくの間、図5のD3, R10, R11がない(導線で直結した)駆動回路を用いていた。この際、マイクロコントローラが突然リセットされたり、プログラムの暴走によりキットの動作が停止したりする誤動作が見られた。モータ負荷による電源ノイズを疑って、モータ周りに成書に見られるノイズ対策を試みたが本質的な改善には至らなかった。

図8は、マイクロコントローラの電源端子の電圧波形である。モータがオンになる期間に多少の電源ノイズが見られる程度との予測に反して、現実の電圧波形

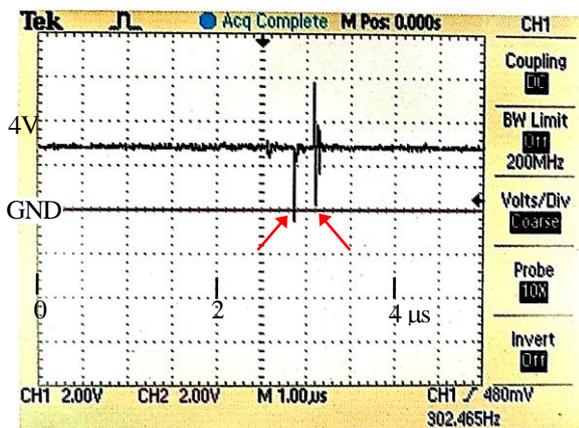


図8 PIC電源端子($V_{DD}-V_{SS}$ 間)の電圧波形

[‡] 間欠駆動は、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を指す。

ではマイクロコントローラの電源電圧がほぼ0Vまで下がる瞬間が見える(図8中の矢印)。つまり、マイクロコントローラの電源が瞬間停電していた。その際に、パワーオンリセットの発生やブラウンアウトリセット状態が起こると考えるなら、上に書いた不具合動作は容易に理解できる。

原因が判明すれば対策は簡単である。モータ電源とマイクロコントローラの電源を分離すればよい。図5の回路図でD3が電源分離用のダイオードであり、電圧降下を最小限に押さえるため、ショットキーバリア型を用いた。D3の追加により、モータ側で電源の瞬断(ショート)が生じて、電源電圧が回復するまでC3の電荷によりマイクロコントローラの電源供給を維持でき、モータ側の電源瞬断によるパワーオンリセットやブラウンアウトリセットは生じない。

ところで、モータが電源を短絡する期間には、モータに短絡電流が流れ、パワー素子や電池には大きなストレスが掛かる。これを緩和するために、モータと直列に抵抗R10, R11を追加した。表1に示した回路定数は、短絡電流をモータ自身の起動電流程度に抑える効果がある。

対策後の電源電圧波形を図9に示す。上の波形 V_{Bat} が電池側(モータ供給側)の電圧波形であり、下の波形 V_{DD} がマイクロコントローラの電源端子波形である。電源側の波形には、やはり電源電圧が0Vとなる瞬間(矢印)が見られるが、 V_{DD} については、ほぼ2V以上の電圧が維持されている。

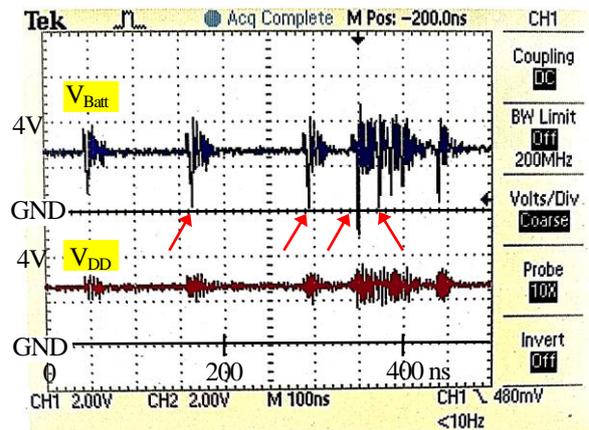


図9 電源分離対策後の電圧波形

以上の事実より、模型用DCモータの使用に際しては、短時間ではあるがモータ端子間がほぼ短絡する動作モードがあることを知っておくことが、電子制御時の不具合を回避するため有用であることが分かった。DCモータはブラシノイズがありコンデンサ等を用い

ストと電池容量/動作時間から単3型乾電池2本を前提に回路設計をはじめた。この部分は現在に至るまで変更していない。なお、同じ単3型乾電池2本でも、アルカリ乾電池では43~48g、マンガン乾電池では35~38gと質量が異なる。経験的に、質量のバラつきの中で、軽量の製品は電池容量が小さいという印象がある。

このキットのパワー素子には、ダーリントン型バイポーラトランジスタとMOSFET(絶縁ゲート型電界効果トランジスタ)が使用できる。駆動性能は、ドレインオン抵抗の小さいMOSFETの方が勝るが、モータと直列に電流制限抵抗R10, R11を挿入すると、両者の

駆動性能の差異はほとんどなくなる。結果としてコストパフォーマンスからバイポーラトランジスタの方が有利な選択となる。ただ、バイポーラトランジスタの型番選定に当たっては、個々の素子のコレクタ飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ に注意が必要であり、0からモータ起動電流付近までのコレクタ電流範囲で $V_{CE(sat)}$ の小さな素子を選択することが大切である。

キットの全体サイズは、ほぼ回路基板の大きさに依存しており、開発当初より回路基板のサイズ削減を進めてきた。図11に、動作検証試作モデル(2008年)から、現行の標準モデル(2014年~)にいたるまでの回路基板とア트워크の変遷を示す。

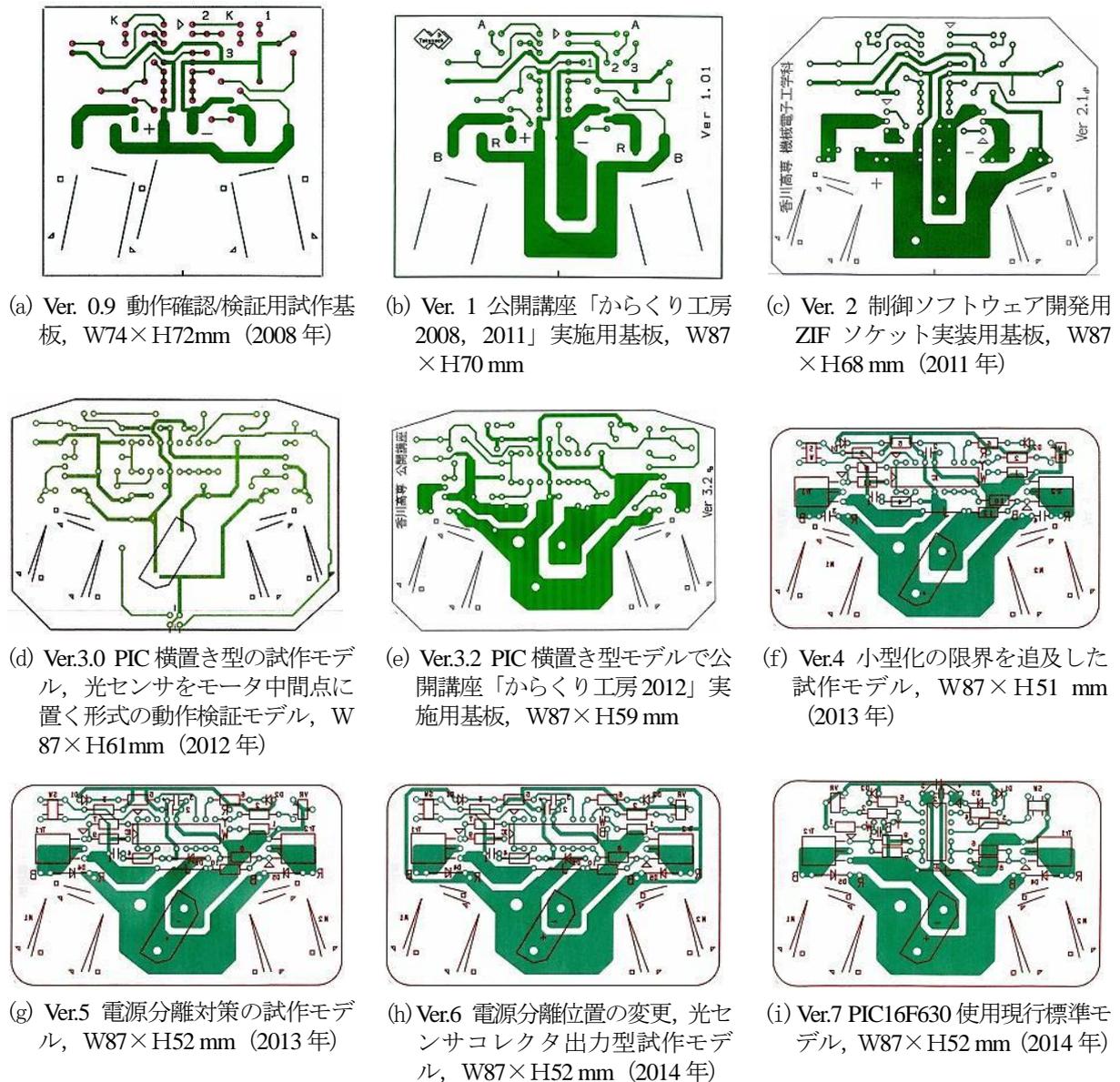


図11 プリント回路基板の変遷

図1 1(a) Ver.0.9 は、キット基本構造の動作確認検証版である。ライントレーサとして機能はするが、組み立て後の横方向の部品配置が窮屈であり、左右モータと電池ボックスの間隔不足のため乾電池を電池ボックスに装着すること自体が困難であった。部品配置に関する多くの検討課題を提供して、試作検証モデルの役割を果たした。これを改良した図(b) Ver.1 からが教材キットとして使用可能な水準のモデルであり、小学生向けの公開講座⁸⁾の教材として活用する中で、組み立てやすさや動作の再現性を実践的に評価しながら、以降のモデルにおいて小型化、低価格化、完成度の向上などの改善を進めてきた。

図(c) Ver.2 は、図(b) Ver.1 とほぼ同じ仕様であるが、マイクロコントローラ用のソケットをZ I F (零拔差力)型にした制御ソフトウェアの開発用モデルである。Ver.3 では、マイクロコントローラの配置を横向きとして、基板高さの削減を試みた。図(d) Ver.3.0 は、別付けの光センササブ基板を本体に取り込み一体とすることを目的に、回路基板の下部中央に光センサを配置したモデルである。この光センサ配置では、満足なライントレース走行が実現できず、以降も光センササブ基板が電池ボックス先端に残ることとなる。結果として、図(e) Ver.3.2 の形に落ち着き、この年度の公開講座用教材とした。

図(f) Ver.4 は、基板高さ縮減の限界を迫った試作版で、組み立てることは可能であるが、細部で部品間の干渉があり、基板高さ5 1 mm は実装限界を下回るトライアルであることが確認できた。図(g)以降の+ 1 mm の余裕を加えた基板高さ5 2 mm が実用に差し支えない最小サイズとなる。

モータ自体が持つ不具合特性を回避するため、モータ部と制御部の電源分離効果を確認した試作モデルが図(g) Ver.5 である。電源分離範囲の修正に伴うアートワーク布線の見直しから、光センサ回路をコレクタ出力に変更して、図(h) Ver.6 になった。部品価格削減のためマイクロコントローラを 16F630 に変更した図(i) Ver.7 が、この小文の最初で紹介した現時点の標準モデルである。

足掛け7年に亘る継続的な開発を経て回路基板サイズを2 5%削減し、回路の見直しや使用部品の変更によりローコスト化と動作の確実性を改善することができた。キット使用部品の入手原価は、2008年の公開講座実施時点(図1 1の (b) Ver. 1モデル)の時価で約1,100円、回路基板サイズを縮小し、DCモータをノーブランドの同等品に置き換え、マイクロコントローラを 16F630 に変更し、さらに安価な購入先を選択する

ことなどの工夫により、2016年度時点でおおよそ表1の原価(約850円：バイポーラトランジスタ仕様)となっている。

5.4 写真で見るキットの変遷と全体像

組み立てた教材キットの写真を図1 2に示す。図中に付記した Ver. 番号は、図1 1の表記と対応している。紹介する教材キットの骨格となる基本構成と基本的な部品配置は、開発初期からほとんど変更していないので、特定の Ver. の開発モデルを紹介するというより、ここでは教材キットを色々な方向から見た写真を示すこととした。開発モデルごとの違いとともに、キットの全貌がイメージできることを期待する。

たとえば、図1 2(i)より、試作1号機ではモータと電池ボックスがくっついており、電池を装入する際の作業空間がないことが見て取れる。図(c)に示すZ I F ソケットモデルは、モータを基板の部品面側に取り付けた実装事例でもある。電池ボックスのスイッチレバーを前足にしている様子とセンサ基板の取り付け位置は、図(d)が分かりよい。キットを下か見た写真が図(f)で、中央部に見える黒い小さな四角形が光センサである。炎天下の屋外でデモ展示した際には、外光をさえぎるため図(h)に見られる黒い紙製のセンサカバーが有効であった。基板の小型化にあわせて、Ver.4以降のモデルでは、回路基板から光センサやモータに至るリード線の取り回しをきれいに仕上げる工夫がなされている。

6. まとめ

メカトロニクスの諸要素を具備する安価な組立教材キットを紹介した。ローコスト化のキーポイントは減速器の排除であり、モータ軸直接駆動法が有効である。モータ軸直接駆動時に、駆動力を大きくする手法として、静摩擦動作が利用できる間欠駆動手法を提案し導入した。また、DCモータが示す瞬時短絡特性を観測データから明らかにし、電源短絡に対する対処法としてダイオードによる電源分離と直列抵抗による電池電流の制限を行い、その有効性を確認した。

提案した組立教材キットは、これまでの実績として1セットの部品原価1,000円以下が実現でき、限られた教育実施予算の中で学生の教育に供することができた。執筆時点の運用実績は、開発モデルを含めて概略350セットである。汎用部品で構成したため、継続使用に際して、部品の入手等に関する特段の懸念材料はない。ケーススタディではあるが、小文が類似の教育を実施している諸兄のご参考とならんことを期待する。

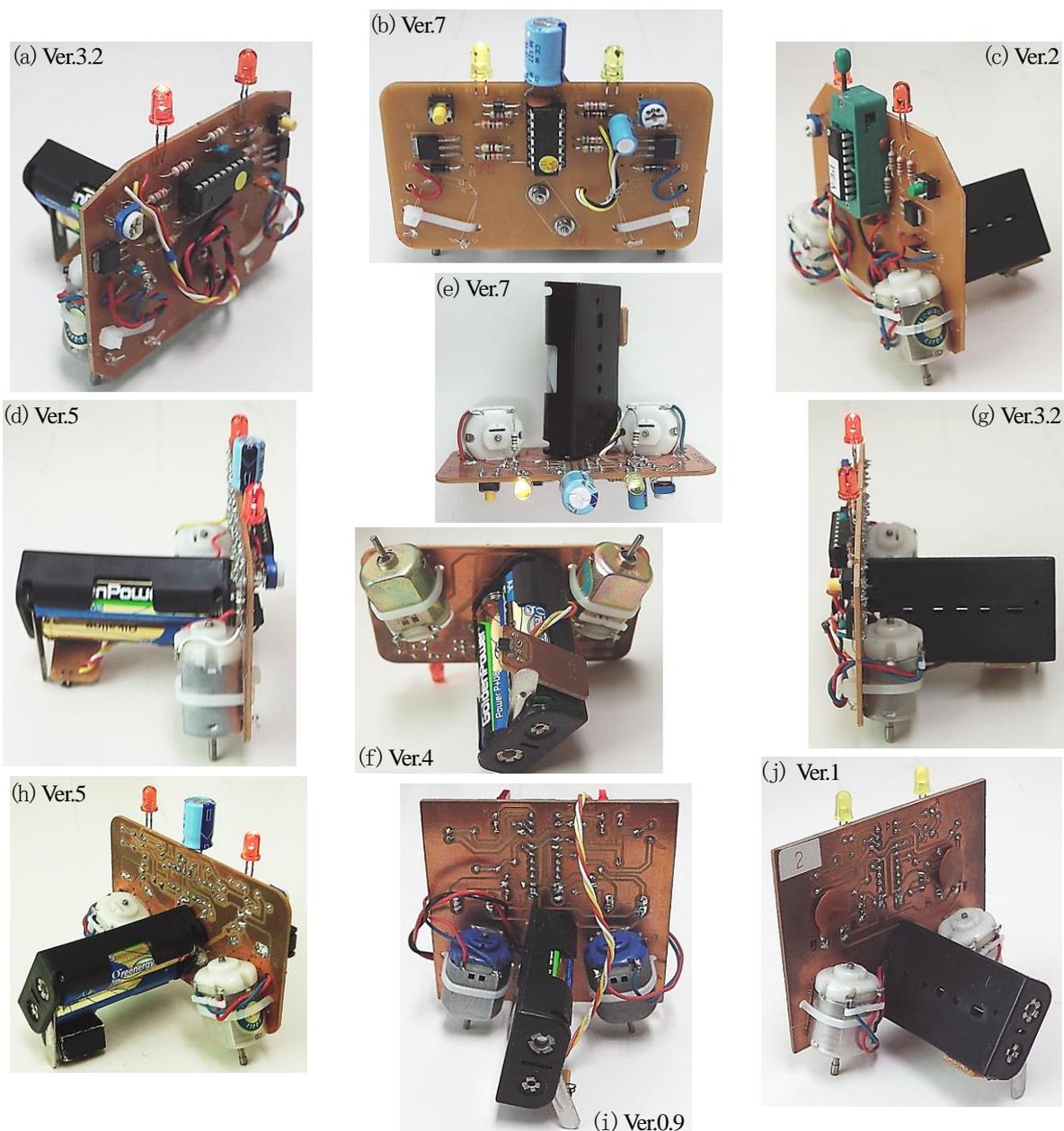


図1.2 色々な角度から見た組立キット(2008~2014年)

参考文献

1. 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.
2. 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.
3. http://www.kagawa-nct.ac.jp/MS/top_kikaidenshi.html
4. 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.
5. 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.
6. <http://www.kagawa-nct.ac.jp/MS/koukaikouza/koukaikouza.html> の「2002」年度のページ
7. <http://www.kagawa-nct.ac.jp/MS/koukaikouza/koukaikouza.html> の「2003」, 「2006」年度のページ
8. <http://www.kagawa-nct.ac.jp/MS/koukaikouza/koukaikouza.html> の「2008」年度以降のページ