

# メカトロ教育用マイコンボード TK400 シリーズの開発と教育実践

高田 直人\* 川谷 亮治\*\*

## Development and Educational Practice of TK 400 Series Microcomputer Board for Mechatronics Education

Naoto TAKADA\* and Ryoji KAWATANI\*\*

(Received January 31, 2018)

Sensors, microcomputers and actuators are the indispensable elements which should be learned in mechatronics education. Especially, selection of microcomputer and its programming development environment is very important and related to a learning arrival target and task assignment of learning. So, we have initiated develop the microcomputer board TK400 series for mechatronics education everyone easy to use.

In this paper, we introduce the development background of the TK400 series for mechatronics education and several examples of educational practice.

**Key words :** Mechatronics, Microcomputer Board, Mechatronics Education, Education Practice

### 1. 緒言

工学を学ぶ者にとって、ものづくりの構想・設計・製作・評価は欠かすことのできない能力の一つである。これらの能力の育成方法の一つとして、メカトロニクス教育（以下、メカトロ教育と称す）が行われている<sup>[1]~[3]</sup>。例えば、与えられた仕様を満たすロボットを構想・設計・製作し、さらに課題をクリアするプログラムを作成することは、学習到達目標や成果がわかりやすく、ハードウェアとソフトウェアの両分野について総合的に学習できるという意味で、優れた題材の一つである。さらに、半導体集積化技術の進化により、マイコンだけでなく、さまざまな物理量を計測するセンサとインタフェース回路が集積化され、安価に入手できるようになった。このため、さまざまなアクチュエータと組み合わせることにより、所属学科の特色を活かしたロボット

の製作が可能になっている。

ところで、メカトロ教育では、センサ・マイコン・アクチュエータは必須のハードウェア要素である。この中でも特に、マイコンの選定が極めて重要であり、このハードウェア仕様とプログラム開発環境によって学習到達目標や課題設定が左右される。そこで筆者らは、指導者側にとっても学生側にとっても利用しやすい専用マイコンボードの開発を行い、メカトロ教育やフィードバック制御の学習に活用してきた。

本稿では、メカトロ教育用マイコンボード TK400 シリーズの開発背景を紹介すると共に、それらを活用した教育実践について述べる。

### 2. マイコンボード TK400 シリーズの開発

#### 2.1 開発の経緯<sup>[4][5]</sup>

筆者の一人が所属する機械工学科では、創成教育の一環として、学生自らが創造し、製作を行い、成果の発表と評価を行う機械創造演習という創成科目を学部 3 年生を対象として 2006 年度からスタートさせている。その中で筆者らは、自律移動ロボットの構想・設計・製作を通して、メカトロニクスの基

\* 長野県飯田 OIDE 長姫高等学校

\*\* 機械工学専攻

\* Iida OIDE Osahime Senior High-School

\*\* Mechanical Engineering Course, Graduate School of Engineering

礎を習得させることを目的とした移動ロボットプロジェクト（以下、ロボプロと称す）に関わっている。ロボプロの演習開始当初は、二輪独立駆動型の移動ロボットに搭載するマイコンとして、16ビットマイコンである H8/3052F（ルネサスエレクトロニクス）を搭載した市販のマイコンボードを採用した。しかし、汎用のマイコンボードであるため、センサや DC モータを利用するにはインタフェース回路の自作が必要であった。一方、ロボプロの受講生は、電子回路製作の経験がない者がほとんどであり、はんだ付けの経験も乏しく、部品の名称やその極性の有無についても知識をもっていない。そのため、ユニバーサル基板やプリント基板への部品実装に多くの時間と労力を費やしていた。また、基板完成後の動作確認においても、テスタなどの扱い方や確認方法の説明などにも時間が必要であった。部品の実装や配線・確認作業は、電気系のものづくりに関する知識と技能を育むという面において効果が期待できる。しかし、所定の動作が得られずにトラブルがひとたび生じると、ロボプロの受講生だけではその原因を特定することは困難である。ロボットを製作する前段階における本質的でない部分での時間の浪費は、限られた人員による指導者側の負担を増大させるだけでなく、受講生のモチベーションを低下させてしまうという課題があった。さらに、ロボットを希望通りに動かすためには適切なプログラムが不可欠であるにもかかわらず、マイコンを活用することで、どの様なことが可能になるのかに関する体験的な学習とマイコンのプログラミング経験が十分でないといった課題があった。そこで 2007 年 12 月に、二輪独立駆動型の移動ロボットに搭載することを前提にして、指導者側にとっても学生側にとっても活用しやすいメカトロ教育用マイコンボードの開発に着手した。

## 2.2 マイコンボード TK400 の開発

### 2.2.1 設計仕様

メカトロ教育用に特化したマイコンボードの開発コードネームは、筆者らの名前から TK400 とし、2008 年 4 月からの適用を目指した。設計するにあたって前提とした主な条件を以下に示す。

- (1) 使用目的は学生を対象としたメカトロ教育用
- (2) マイコンは入手が容易であり、C 言語による開発環境を整えやすい 16 ビットマイコンから H8/3694F（ルネサスエレクトロニクス）を採用  
32KByte のフラッシュ ROM、2KByte の RAM を搭載し、メカトロ教育には十分と考えられる 37 本の I/O 端子、拡張性を高める I<sup>2</sup>C バスインタフェー

スを内蔵したシングルチップマイコンである。

- (3) ガラスエポキシ製両面プリント基板による製作キット形式の採用

マイコンボードは、学生が搭載部品をはんだ付けすることで完成させるキット形式とした。電子部品の実装を通して、はんだ付け技能の習得、部品の名称や使い方、さらには市場における部品単価の相場などを知ること、電気系ものづくりのセンスとスキルについて学習することができる。

- (4) シリアルポート (D-Sub9 ピン) コネクタ搭載

標準コネクタを搭載することで専用ケーブルを不要とし、プログラムの書き込みやデバッグ、外部機器との通信など幅広く対応できる。

- (5) マイコン駆動用電源 (乾電池) 搭載

外部電源を供給することなく、マイコンボード単体で動作が可能となるようにボード上にマイコン駆動用電源 (006P 型 9V 乾電池) を搭載する。これにより自由度の高い利用形態が可能となる。

- (6) LCD (液晶ディスプレイ) 搭載

教育を目的とするマイコンボードにとって、数字や文字の表示は学習効果を高める上で極めて有効な機能である。LCD (16 文字 × 2 行) は入手が容易で安価であり、その扱いも容易である。

- (7) LED とオシロスコープ用チェック端子の搭載

LED はマイコンからの信号出力確認用として最も原始的な表示器であるが、プログラム学習における第一歩として有効活用できる。さらに、プログラムの実行確認や処理時間の実時間計測にはオシロスコープによる周期計測が必須になる。そこでマイコンの出力端子に割り付けた LED と並列に、オシロスコープのプロブを接続できるプロブ用チェック端子を搭載する。

- (8) DC モータ用駆動回路の搭載

メカトロ教育において、二輪独立駆動型の移動ロボットの制御は、最もよく使われる題材の一つである。そこで、数アンペの駆動電流にも対応できる DC モータ用駆動回路を標準搭載し、DC モータからのケーブルを接続するだけで使用できるようにする。駆動回路はブラシ付き DC モータ用とし、正転、逆転、停止、ブレーキの 4 状態が可能であり、さらに DC モータの速度制御を可能とする PWM 制御機能対応とする。

- (9) RC サーボ端子の搭載

RC (ラジコン) サーボはパルス信号によって位置決め制御が可能なアクチュエータの一つである。移動ロボットの走行系として DC モータ用駆動回路だけでなく、さまざまな機械的な機構を駆動するためのアクチュエータは、メカトロ教育における多彩

な学習を可能にする。このため、RC サーボを接続するだけで使用を可能にする RC サーボ端子を搭載する。

#### (10) 各種センサの接続を可能にするアナログ/デジタル入力端子の搭載

メカトロ教育では、センサからの信号処理と利用方法の学習が重要である。さまざまな物理量を計測するセンサの出力信号形態には、アナログ系とデジタル系がある。どの形態でも接続が可能な入力端子を複数搭載する。

#### (11) メカニカルスイッチの搭載

マイコンプログラミングでは、入力信号を意図的に与えるスイッチが必須である。このため故障が少なく丈夫で安価なメカニカルスイッチを複数個搭載する。

以上の設計仕様に基づいて製作した TK400 の外観を図 1 に示す。



図 1 メカトロ教育用マイコンボード TK400

マイコンボードのサイズは 90mm × 110mm である。プリント基板の四隅に開けられた固定用穴の間隔は 5mm の整数倍とし、ロボット製作時における設計や加工を容易にする工夫を行っている。DC モータと DC モータ用電源の接続には、電線の太さと接続の利便性を考慮し、ねじ式のターミナルブロック端子を使用した。また、センサからの信号線が集中する場所には、配線がコンパクトに収まるようストレートピンヘッダを採用し、ピンソケットで接続できるようにしている。

### 2.2.2 学習テキスト

TK400 はキット形式としたため、製作手順などをまとめたテキストが必須である。そこで、両面プリント基板におけるはんだ付けの注意点や部品実装の手順に加え、部品の外観と名称、抵抗のカラーコードやコンデンサの標記数字の解読、極性の有無や実装方法などを自主的に学べるように意図した製作

テキストを作成した。さらに、全ての部品の単価も掲載し、市場価格の相場と部品に対するコストも意識できるように配慮している。また、回路図や外観寸法なども掲載し、製作後も参考資料として活用できるように工夫した内容になっている。

### 2.2.3 ボードサポートライブラリ関数

TK400 のような組込用マイコンのプログラムを作成しようとした場合、マイコンのポート設定やタイマなど内蔵周辺機能モジュールの初期設定などが不可欠である。これらの設定はマイコンの内部構造を理解していないと記述できないが、プログラム作成上、本質的でない部分が多い。特に、メカトロ教育の導入段階で重要なことは、マイコンを使うとどのようなことが可能になるのかの概念の理解と、繰り返し処理やフロー制御など基本的なプログラミングスタイルの習得である。筆者らは、マイコンの内部構造に詳しくなくても容易にプログラムを記述でき、アルゴリズムの本質について思考を集中できるように、マイコン固有の内部モジュールに関する設定は全て関数化し、簡単なコマンドと引数を与えるだけで設定を可能にする TK400 ボードサポートライブラリ関数を作成した。これは、CPU 動作環境設定、メカニカルスイッチ、アナログ/デジタルセンサ入力、DC モータ制御、ラジコンサーボ制御、シリアル通信機能、LCD 出力、時間待ち、の 8 分野である。本ライブラリ関数を利用することにより、TK400 がもつ機能を最大限発揮させることが可能になる。

### 2.2.4 プログラム開発環境

プログラムの開発言語にはさまざまなものがあるが、我々は C 言語を採用した。Arduino などのマイコンボードは、共通プラットフォームとよばれる開発環境下で、専用の簡易言語を利用することにより、全く知識をもたない人でも容易にプログラム作成を行える利点がある。その一方で制約事項も多く、簡易言語による学びには技術の発展性に課題も多い。工学部系の学生にとって、専用マイコンボードと C 言語という学習環境は、組み込み開発として実践に近い環境であり、ハードウェアもソフトウェアも学習目的に応じて深く学ぶことができる利点があると考える。

プログラムの開発環境は、プログラム作成時に試行錯誤を繰り返し、扱う時間も長時間に及ぶため、その選択は重要である。多くの場合、マイコンメーカーが提供するマイコンごとに最適化された統合開発環境と呼ばれるソフトウェアを教育現場でもそのまま活用している。しかし、これは学生にとって必ずしも使いやすい開発環境ではない。筆者らはプログ



ラム開発環境の重要性についても着目し、メーカー純正品ではないが、十分な知識を持たない学生でも操作がわかりやすいサードパーティによる統合開発環境 YellowIDE (エル・アンド・エフ社) を採用している。YellowIDE は、ANSI 規格に準拠した C コンパイラを搭載した GUI による統合開発環境である。プロジェクトの作成や割り込みに関する設定手順が簡素化されており、学生でも容易に扱うことができる。さらに詳細設定機能により、メモリ管理などが必要な上級者にも対応している。このほかにも以下に示す特徴をもつ。

- (1) ターミナルソフト機能を搭載しているため、プログラム開発画面上でシリアルポートへのデータ送信やモニタが可能である。
- (2) 標準入出力デバイスとしてシリアルポートが設定されているため、printf 関数や scanf 関数などが使用できる。このため、マイコンに対してパソコンのキーボードからデータを入力したり、マイコンから送信されたデータをターミナルソフトの画面上に表示することができる。これらの機能の利用により、言語学習を効率よく行うことができる。
- (3) プログラムの書き込み (ターゲットマイコンへのプログラム転送) 機能を装備しているため、コンパイルが完了すると直ちにプログラム転送ができる。
- (4) 異なるマイコンファミリ (例えば H8, H8S, SH, RX マイコン) でも共通の環境でプログラム開発できる。
- (5) C ソースコードはメーカー純正品のプログラム開発環境とほぼ互換性をもつ。

### 2.2.5 TK400 から TK400A へ

TK400 の開発当初、アナログ/デジタル入力専用端子は 20 極 (10 × 2 ピン) 構成とした。しかし TK400 を実際に活用してみると、5V の電源を必要とするセンサへの接続が複雑になることがわかった。この点を改善するために、コネクタの信号配列を 30 極 (10 × 3 ピン) 構成に変更したものが TK400A である。

入力端子の外観を図 2 に示す。各入力端子におけるピン配列を電源 (5V) - 信号 - GND という構成にし、3 端子のピンソケットを使用することにより、各センサへの電源供給が可能になり、さまざまなアナログセンサやデジタルセンサを容易に接続できるようになった。このピン配列はこれ以後、TK400 シリーズの共通仕様になっている。

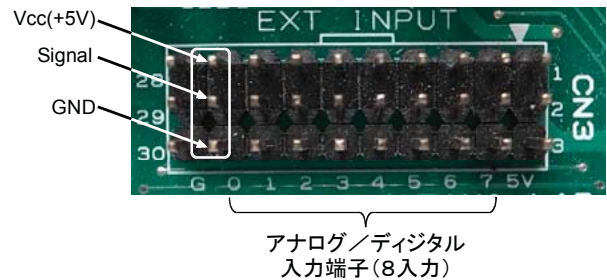


図 2 アナログ/デジタル入力専用端子のピン配列

## 2.3 TK400SH の開発

### 2.3.1 TK400SH の開発背景

センサ入力と DC モータ用駆動回路を搭載した TK400 (A) は、メカトロ教育だけでなく、フィードバック制御の学習にも適用が可能である。その適用事例として、車輪型倒立ロボットの開発を行った<sup>[6]</sup>。しかし、DC モータ系のフィードバック制御システムを構成しようとする、DC モータの回転角度や角速度が必要であり、そのためにはロータリエンコーダのパルスカウント機能が求められる。TK400 (A) にはその入力端子をもたないため、当初は外付けの電子回路基板を製作し、I<sup>2</sup>C バスで接続していた。さらに、制御器の実装には、浮動小数点を有する数値演算が必要であり、TK400 (A) に搭載したマイコンでは十分な計算能力を有していなかった。また、メカトロ教育の場面では、センサ入力だけでなく、自由に利用できる汎用 I/O ポートが必要になった。以上のことから、2011 年に TK400 (A) の設計仕様を継承し、マイコンボード上の部品レイアウトをほぼ同じにした TK400SH の開発を行った。

### 2.3.2 TK400SH のハードウェア仕様

TK400 (A) の上位に位置するメカトロ教育用マイコンボード TK400SH は、搭載するマイコンとして、組み込み機器用 32 ビット RISC マイクロコンピュータである SH (SuperH) シリーズ (ルネサスエレクトロニクス) の中から SH7125 を採用した。このマイコンは、ロータリエンコーダからのパルス信号をカウントする 2 チャネルの位相計数モードを搭載している。最大 50MHz のクロックで動作し、乗算器内蔵により計算能力が向上しており、37 本の汎用 I/O 端子と 8 本の入力専用端子をもつ。

TK400SH の主な機能を以下に示す。

- (1) マイコン: SH7125F  
内蔵フラッシュ ROM 128KByte, RAM 8KByte
- (2) LED × 2 (オシロブロープ用チェック端子付)
- (3) LCD (2 行 × 16 文字) × 1

- (4) タクトスイッチ × 2
- (5) 10進ロータリディップスイッチ × 1
- (6) DC モータ駆動回路 (TB6549PG) × 2  
最大定格負荷 30V, 3.5A, PWM 制御機能付
- (7) ラジコンサーボ用端子 × 2
- (8) アナログ/デジタル入力専用端子 × 8  
A/D 変換器の分解能は 10 ビット
- (9) 汎用 I/O 端子 × 8
- (10) ロータリエンコーダ入力用端子 × 2  
電源供給が可能であり, 2 相信号入力対応
- (11) シリアルコミュニケーションポート × 2  
TTL/RS232 レベルの選択が可能
- (12) マイコン動作電源搭載  
006P 型 9V 乾電池を搭載し, 6V ~ 12V の外部電源の利用も可能. マイコンと周辺回路の電源電圧は 5V であり, 1A までの負荷電流を安定供給できる低損失型の電源回路を搭載.

TK400SH の外観を図 3(a) に示す. 基板サイズは TK400(A) よりも少し大きくなり, 100mm × 115mm である.



(a) TK400SH (100mm × 115mm)



(b) LFTK400SH (100mm × 85mm)

図 3 メカトロ教育用マイコンボード (LF)TK400SH

図 3(b) は表面実装部品を使用して小型化した互換品の LFTK400SH である.

### 2.3.3 TK400SH の利用形態

TK400SH は TK400(A) と同様に製作テキストを作成し, 学生がはんだ付けを体験できるようにすると共に, 株式会社バイナスからは完成品を購入できるようにした. さらに, 株式会社エル・アンド・エフの協力により, TK400SH を小型化(100mm × 85mm)した互換品の LFTK400SH を購入できる.

### 2.3.4 (LF)TK400SH 用ボードサポートライブラリ関数

(LF)TK400SH がもつ機能を最大限発揮できるようにしたボードサポートライブラリ関数は, TK400(A) と互換性を維持するためにできる限り関数名を統一している. 作成した関数は以下に示す 9 分野 51 関数である.

- (1) I/O ポート初期設定, スイッチ・センサ入力
- (2) DC モータ制御, RC サーボモータ制御
- (3) A/D 入力, 2 相ロータリエンコーダ入力
- (4) 汎用 I/O ポート
- (5) シリアルコミュニケーションインタフェース
- (6) 時間待ち
- (7) LCD 出力
- (8) DC モータ制御基板専用
- (9) I<sup>2</sup>C バスインタフェース

### 2.3.5 (LF)TK400SH を活用したフィードバック制御用学習教材

フィードバック制御について学習するために, (LF)TK400SH を制御用マイコンボードとして活用した教育教材の事例を紹介する<sup>[7]~[11]</sup>. なお, TK400 シリーズを搭載した実験装置には, MCORE という名称をつけている. これらのマイコンボードが, メカトロニクス (Mechatronics) の学習の中で核 (Core) になってもらいたい, という筆者らの願いが基になっている.

#### (1) 二輪独立駆動型ロボット MCORE-CART

図 4 は, 安価で入手が容易な模型用のギヤボックス, タイヤセット, ユニバーサルプレートで構成した二輪独立駆動型の台車である. これは, 駆動輪の速度制御系や台車の位置制御系を対象にした実験教材で, 駆動輪には回転角度センサとしてロータリエンコーダを取り付けてある. 台車系は低次のモデルでその動特性を近似でき, フィードバック制御の学習においてシミュレーションと実際の応答がよく一致する. この台車の活用をとおして, 古典制御や現代制御理論の理解を深めることができる.

#### (2) 車輪型倒立ロボット MCORE-IP

図 5 は, MCORE-CART の本体部分に傾斜角度を

検出する回転角度センサを設けることにより、倒立させてバランスを取ることを目的とした制御対象である。

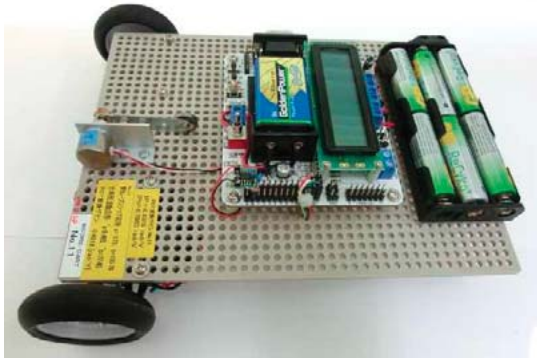


図4 二輪独立駆動型ロボット M-CORE-CART

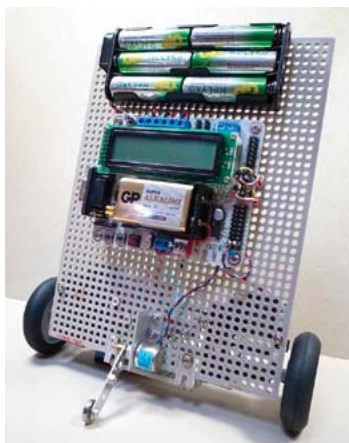


図5 車輪型倒立ロボット M-CORE-IP

### (3) 台車型倒立振り子 M-CORE-IPn

図6は、M-CORE-CART上に回転角度センサを置き、それに適当な長さのアルミ製の棒を取り付けることで、台車型倒立振り子にしたものである。

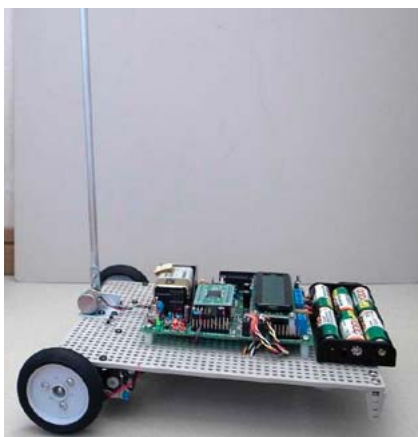


図6 台車型倒立振り子 M-CORE-IPn

### (4) 磁気浮上実験装置 M-CORE-Magnet

図7は電磁石に適切な電流を流し、鉄球を空中浮上させることを目的とした実験装置である。製作費用を削減するために、鉄球の位置の計測にアルミパイプと回転角度センサを使用している。元々はマイコン H8/3052F で構成されていた装置を TK400SH に置き換えたものである。

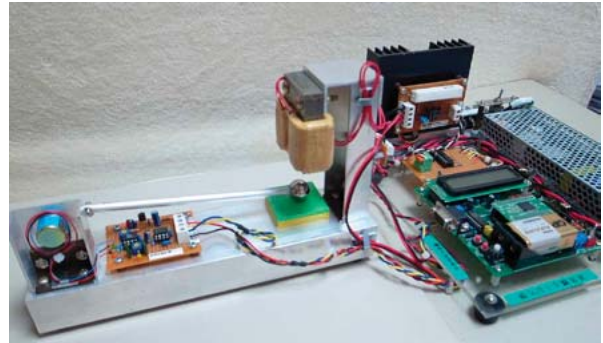


図7 磁気浮上実験装置 M-CORE-Magnet

## 2.4 TK400RXの開発

### 2.4.1 開発の背景

(LF)TK400SHの開発から5年が経過し、その間にマイコンとその周辺技術が著しく進化した。また、開発当時は主流であったマイコンも次世代のマイコンへと移行してきた。さらに Arduino マイコンの台頭がある。オープンソースの開発環境とオープンハードウェアによる資産が数多く公開され、誰でも自由に利用するため、ホビー分野だけでなく教育分野にも一気に普及し、制御系の実験装置も作られるようになった<sup>[12]</sup>。

その一方で制約も多く、特にタイマ割り込みに関しては、設定時間の範囲に大きな制約がある。メカトロ教育からフィードバック制御教育までを視野に入れた場合、サンプリング時間ごとに制御器などの数値計算を行うために  $100\mu\text{s} \sim 50\text{ms}$  程度の範囲で任意に設定できるタイマ割り込みが必須である。メカトロ教育用マイコンボードを利用する対象者も学生だけでなく、制御の研究や一般のエンジニアにも利用してもらうためには、これまで以上に高性能なマイコンボードが必要になった。

そこで、これまで開発してきた TK400(A)、(LF)TK400SH の設計仕様を継承しつつ、新しいマイコンを採用することで数値計算能力のさらなる向上、CAN を含むシリアル通信機能の充実、高分解能な A/D、D/A 変換器の搭載、DC モータ駆動回路の多チャンネル化など、より多くの機能をもったマイコンボード TK400RX を 2016 年に開発した<sup>[13]</sup>。



## 2.4.2 LFTK400RX のハードウェア仕様

TK400RX は、株式会社エル・アンド・エフにより商品化され、LFTK400RX として 2017 年から製造・販売・サポートが行われている。図 8 に示す基板のサイズは LFTK400SH と同じ 100mm × 85mm である。TK400SH までははんだ付けを体験できるキット形式を選択可能であったが、LFTK400RX では高密度実装のため、完成品のみでの利用になる。

主な構成を以下に示す。



図 8 マイコンボード LFTK400RX

### (1) マイコン RX62T

CPU 32 ビット RX CPU

積和演算器と FPU（浮動小数点プロセッサ）搭載

ROM 256K バイト, RAM 16K バイト

ボード上での動作周波数(CPU 96MHz, 最大動作周波数 100MHz)

CPU リセットスイッチ搭載

### (2) LCD(2 行 × 16 文字) × 1

### (3) LED × 2

ポートに直接接続されており、プログラムで点滅制御が行える。オシロスコープ用チェック端子を設け、プログラムの処理時間の計測などに使用できる。

### (4) タクトスイッチ × 2, 10 進ロータリディップスイッチ × 1

### (5) ブラシ付き DC モータ駆動回路 × 4

モータ用電源入力(2.5V ~ 15V), 定格出力電流 1.2A (ピーク 4.5A), 最大 PWM 周波数 400kHz

### (6) ラジコンサーボ用端子 × 2

市販のラジコンサーボのコネクタを接続するだけで直ちに利用することができる。サーボ用電源は外部から供給する仕様になっており、4.8V ~ 6V を推奨。

### (7) アナログ/デジタル入力 × 8

12bit 分解能をもつ A/D 入力を 8 チャンネル搭載。

基準電圧は 4.096V/5.0V のどちらかを選択できる。アナログ入力時以外はデジタル入力として動作。

### (8) アナログ出力 × 2

12bit 分解能をもつ D/A 変換器を 2 チャンネル搭載。基準電圧は 4.096V/5.0V のどちらかを選択できる。

### (9) 汎用 I/O ポート × 1 (8 入出力)

### (10) ロータリエンコーダ入力 × 2

2 相ロータリエンコーダを直接接続でき、オープンコレクタ出力型でも TTL 出力型でも接続可能。電源供給機能も搭載。

### (11) シリアルコミュニケーションポート × 3

通信速度は 100bps ~ 150kbps の範囲で設定可能。TTL/RS232 レベルのどちらかを選択可能であり、フロー制御にも対応可能。

### (12) I<sup>2</sup>C 端子 × 1

シリアルコミュニケーションポートと兼用。最大 400kHz のクロック周波数まで対応可能。

### (13) SPI (Serial Peripheral Interface) × 1

最大 3 デバイスまで接続可能。

### (14) CAN × 1

ISO11898-1 仕様に準拠した CAN (Controller Area Network) モジュールを搭載。標準 ID フォーマット, 拡張 ID フォーマットのどちらにも対応でき、最大 1Mbps までの通信速度の設定が可能。接続と切り離しが可能な終端抵抗と CAN トランシーバを搭載しているため、CAN を搭載した機器や複数の LFTK400RX を直接接続することができる。

### (15) マイコン駆動用電源搭載 (006P 型乾電池)

外部電源接続端子を設けているので、乾電池以外の電源供給も可能。低損失型の安定化電源回路を搭載しており、マイコンを含め周辺回路に 5V, 1A までの負荷電流を安定供給できる。

### (16) 基板サイズ 100mm × 85mm

TK400SH より多機能であっても互換品の LFTK400SH と同じ基板サイズである。LCD や電池ケース, 入力端子や汎用 I/O ポートなどの接続端子は、従来の機種と同じ位置にしてあるため、マイコンボードの置き換えが可能である。

## 2.4.3 タイマ割り込み

LFTK400RX に搭載されているマイコンが待つタイマ機能の内、ユーザが自由に利用できるタイマ割り込みは 3 系統 (CMT0, CMT1, CMT3) である。タイムベースとなる 48MHz のクロックを分周することにより、0.3  $\mu$ s ~ 0.7s の範囲で割り込み時間を設定し、利用することができる。また、タイマ割り込みそれぞれに優先順位を割り当て、複数のタイマを同時に使用する多重割り込み処理を行うことも可能である。

#### 2.4.4 離散時間制御器における数値計算能力

現代制御理論に基づいて設計された制御器は式(1)のように離散化され、プログラムによる計算式としてマイコンに実装される。ここで、 $z[k]$ 、 $y[k]$ 、 $u[k]$ はそれぞれ状態量、観測量と操作量を意味する。

$$\begin{cases} z[k+1] = A_d z[k] + B_d y[k] \\ u[k] = C_d z[k] + D_d y[k] \end{cases} \quad (1)$$

モデル化された制御対象は、高次の制御器であるほど積和演算が増え、より多くの計算時間が必要になる。そこで代表的な次数をもつ制御器に対して、式(1)の数値計算に要する時間を計測した結果の一例を表1に示す。LFTK400RXに使用しているマイコンは、積和演算器と単精度浮動小数点演算器を搭載しているため、TK400(A)、(LF)TK400SHよりも大幅に計算時間が短縮されており、高い数値計算能力を有していることがわかる。

なお、図4から図7の制御用学習教材は、いずれもわずかなプログラムの修正だけでLFTK400RXで制御することが可能である。

表1 TK400シリーズの数値計算能力

制御器の次数	TK400(A)	(LF)TK400SH	LFTK400RX
2次	1.31ms	0.25ms	1.61 $\mu$ s
4次	3.0ms	0.59ms	3.44 $\mu$ s
6次	4.8ms	0.98ms	5.92 $\mu$ s

#### 2.4.5 LFTK400RX 用ボードサポートライブラリ関数

ボードサポートライブラリ関数は、2.3.4で述べた9分野の関数にD/A出力とCAN通信に関する機能を加え、11分野75関数を作成した。

TK400シリーズのボードサポートライブラリ関数は、製造販売とサポートを行っているエル・アンド・エフ社のホームページから無償でダウンロードして利用することができる。さらに、関数のソースコードは全て公開しており、利用者が使用目的に応じてカスタマイズすることも可能である。

#### 2.5 TK400シリーズの機能比較

表2は2008年から開発を行ってきたTK400シリーズにおける主な機能を比較したものである。

TK400(A)に搭載したマイコン H8/3694は、製造が収束しているため、現在では新規購入することができない。開発当初のTK400(A)の機能と比べ、LFTK400RXではマイコンの性能が大きく向上して

いるだけでなく、周辺機能の種類が大幅に増えている。特にシリアル通信の一つであるCANは、車載用装置に使われていることから、CANを活用したメカトロ教材の製作が可能である。

表2 TK400シリーズの主な機能の比較

シリーズ	TK400	TK400A	(LF)TK400SH	LFTK400RX
開発年	2008	2010	2011	2016
搭載マイコン	H8/3694 16bit		SH7125 32bit	RX62T 32bit, FPU搭載
ボード上の動作周波数	20MHz		CPU : 50MHz 周辺 : 25MHz	CPU : 96MHz 周辺 : 48MHz
内蔵タイマ機能	16bitタイマ×4ch 8bitタイマ×2ch		16bitタイマ×8ch	16bitタイマ×16ch
主な機能	LCD(16文字×2行)		LCD(16文字×2行)	LCD(16文字×2行)
	スイッチ類(3)		スイッチ類(3)	スイッチ類(3)
	モニタ用LED(2)		モニタ用LED(2)	モニタ用LED(2)
	RCサーボ制御(2)		RCサーボ制御(2)	RCサーボ制御(2)
	DCモータドライバ(2)		DCモータドライバ(2)	DCモータドライバ(4)
	シリアルポート(1)		シリアルポート(2) (TTL/RS232選択可)	シリアルポート(3) (TTL/RS232選択可) (フロー制御対応)
	アナログ入力(8) (10bit ADC)		アナログ入力(8) (10bit ADC)	アナログ入力(8) (12bit ADC : 8) ロータリ
	—		エンコーダ入力(2)	エンコーダ入力(2)
	—		汎用I/O(8)	汎用I/O(8)
	—		—	アナログ出力(2) (12bit DAC)
	I2C(1)		—	I2C(1)
	—		—	SPI(1)
—		—	CAN(1) (トランシーバ搭載)	

### 3. TK400シリーズを活用した教育実践

#### 3.1 大学・社会人教育における活用

##### 3.1.1 機械創造演習

2.1節でも述べたように、TK400シリーズを開発するきっかけとなったのが、機械工学科3年生を対象として2006年度にスタートした機械創造演習である。本演習は、通年で実施される必修科目で、前後期それぞれ15コマ(2.5時間/コマ)の演習時間が割り当てられている。本演習では、3~4のプロジェクトが用意されており、学生の希望に基づいて配属を決定する。筆者の一人が担当しているのはプロジェクトの1つであるロボプロである。

本プロジェクトの目的は、自律移動ロボットの構想・設計・製作を通して、ハードウェアからソフトウェア、さらには期限までにロボットを完成させる工程管理などを総合的に体験することで、メカトロニクスの基礎や開発プロジェクトにおけるスケジューリングの重要性などを習得させることである。

表3は、演習開始から2017年度までに使用したマイコンボードの変遷を示したものである。TK400シリーズの開発に合わせて、使用するボードを更新している。なお、2017年度にTK400SHからLFTK400SHに変更したのは、演習を受講した学生



表3 機械創造演習におけるマイコンボードの変遷

年度	マイコンボード	人数/グループ
2006	H8/3052	5
2007	H8/3052	5
2008	TK400	5~6
2009	TK400	4~5
2010	TK400A	4
2011	TK400A	6
2012	TK400A	3
2013	TK400A	3
2014	TK400SH	4
2015	TK400SH	4
2016	TK400SH	4
2017	LFTK400SH, RX	4

からの「ボードのサイズを小さくして欲しい」との要望に答えるためである。また、同年度は、オムニホイールを利用してロボットを製作したグループがあり、LFTK400SH が駆動できる DC モータの最大数から、LFTK400RX を使用させた。2018 年度以降は LFTK400RX を利用する予定である。同表に、グループあたりの学生数もまとめてある。2011 年度まではグループの構成人数が 4～6 名であったが、2012 年度と 2013 年度に 3 名としたところ、学生の負担が大きくなった。そのため、2014 年度以降は 4 名としている。プログラム開発だけでなくロボット本体の製作を考えたとき、1 グループあたり 4 名が適切な人数であると考えられる。

ところで、ロボプロではプログラミングの学習が必須となる。汎用マイコンボード H8/3052 を使用していた 2006 年度と 2007 年度は、おおよそ 6 コマを使用してボードならびにセンサ・DC モータ用の回路製作ならびに動作確認を行い、その後プログラミングの学習をスタートさせていた。それに対して、2008 年度から TK400 に更新したことで、2 回で回路製作が完了し、プログラミングの学習を開始することができるようになった。そのため、前期終了までに基本的なライントレースロボットの製作が可能となった。さらに、2014 年度以降は完成品の (LF)TK400SH を使用することで、プログラミングを体験しながら理解する時間をより多く取れるようになった。

TK400 シリーズのプログラミング用のテキストは、当初自作のものを使用した。そのテキスト中に、ロボプロ用に用意したサンプルを豊富に盛り込むことで、自習できる環境を整えた。教員や TA は受講

生からの質問に対応する形をとるので、負担軽減につながる。2016 年度からは、本演習での実体験を基に書籍「実験で学ぶメカトロニクス ～ TK400SH ボード実習～」を出版<sup>[14]</sup>し、それをテキストとして採用している。

ロボプロでは、年度末にチャレンジマッチと称する成果発表会を開催している。これまでのロボプロにおける目標課題を紹介する。2006 年度と 2007 年度は演習の立ち上げということもあり、ライントレースを基本課題とした。また、2008 年度と 2009 年度は、TK400 の導入開始ということで、ライントレースと壁をトレースする課題とした。2010 年度以降は、1.5m × 1.5m の競技フィールド(白色)を用意し、以下に示す課題を設定した。

-2010 年度 3 × 3 区画の格子状のコースの格子点上のいずれか 1 箇所には円筒が置かれており、それを倒すことなくゴールエリアに運ぶ。使用するセンサは、フォトセンサ(ライントレース用)と測距センサ(円筒検出用)である。また、この年度からラジコンサーボを使用することを要求する課題となった。

-2011 年度 3 × 3 区画の格子状のコースのどれか 1 つの区画中央にピンポン球が 1 個置かれており、それをゴールエリアに運ぶ。ただし、コース上には 1 箇所、障害物となる円筒が置かれており、それを回避しなければならない。

-2012 年度 2 × 2 区画の格子状のコースの 2 箇所の区画中央付近にそれぞれピンポン球が 1 個置かれており、それらをゴールに置かれた箱に入れる。2011 年度は単にピンポン球をゴールに運べばよかったが、2012 年度は箱に入れる必要がある。そのため、ロボット上にラジコンサーボを駆動源とするアーム機構が必要となる。

-2013 年度 黒テープで作られた四角の枠内に置かれた 5 個のピンポン球をゴールに置かれた箱に運搬する。

2012 年度ならびに 2013 年度のロボットの基本構成として

- (1) 移動用の 2 個の DC モータ
- (2) ライントレース用の 5 個のフォトセンサ
- (3) 2 個もしくは 3 個の測距センサ
- (4) 2 個のラジコンサーボ

が必要となる。シリアルポート、I<sup>2</sup>C バスインタフェース端子を除いて、ほぼすべての TK400A の入出力端子を利用することになる。この意味で、TK400A を利用して、機械創造演習内で製作を完了できる課題はこの程度ではないか、と考える。

そのために、2014 年度から TK400SH を利用する

こととした。なお、2014年度から2016年度は同じ課題とした。その課題を以下に示す。

3×3区画の格子状のコースを2013年度までに利用した競技フィールド上に作成する(図9)。格子点上の2箇所に円筒を置き、スタート時にロボットに搭載した2個のピンポン球をそれぞれ円筒に投入する。ただし、円筒の1つは開口部が上であるが、もう1つは開口部が下になっているため、円筒を反転させる必要がある。そのための機構をロボット上に搭載させる必要がある。学生が製作したロボットの一例を図10に示す。本課題では、ロボット駆動用の2個のDCモータと2個のラジコンサーボに加えて、ロボットの構成によっては1～2個のDCモータが必要となる。(LF)TK400SHで利用可能なDCモータ用拡張基板を用意し、それを利用させている。

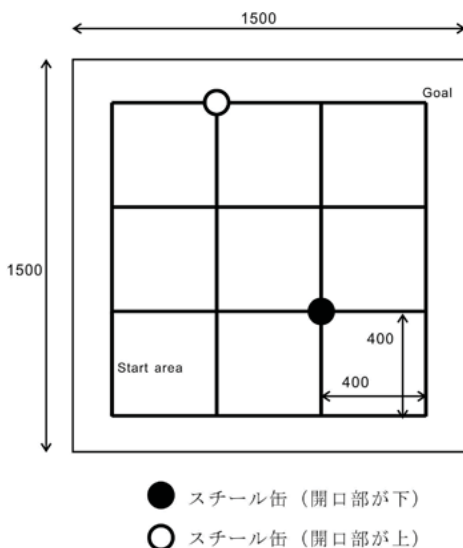


図9 課題コース例

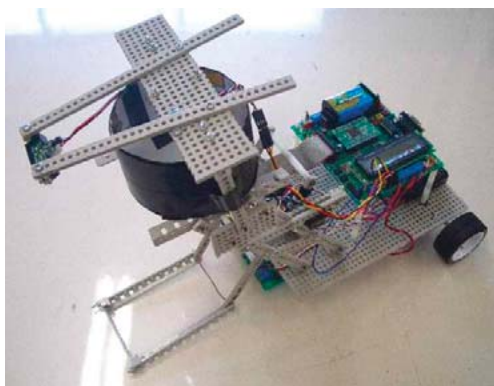


図10 製作したロボットの一例

2017年度は、競技フィールドを20度傾斜させ、坂道をラインレースする課題とした。ラインレースの際に、ロボット上に円筒を置き、それを倒さ

ないでゴールに運ばなければならない。そのため、円筒を倒さないように何らかの制御が必要となる。学生が考えた制御方策はアクティブ方式とパッシブ方式に分類できる。前者に対しては、これまでの課題にないセンサを利用する必要がある。今年度はI<sup>2</sup>Cバスを利用した方位センサや傾斜を計測するための加速度センサを採用するグループがあった。また、ロボットの駆動においても、オムニホイールを使用したり、これまでの二輪独立駆動方式ではなく、操舵方式を採用するグループがあり、多様なロボットの開発が行われた。

### 3.1.2 機械工学実験

講義で学ぶフィードバック制御を実体験させることを目的として、これまで機械工学科3年生を対象に磁気浮上実験を行ってきた(図7)。本実験は電磁石に流す電流を適切に制御することで、鉄球を安定に空中に浮上させることを目指している。2016年度から、図4に示すMCORE-CART(TK400SH搭載)を制御対象として、周波数応答やPID制御を体験する実験に変更した。2～4名のグループに対して、MCORE-CARTとPCをそれぞれ1台用意する。MCORE-CARTはシミュレーション結果とよく一致する実験結果が得られるために、教育上有用な実験装置であると考えられる。また、MCORE-CARTは、筆者の一人が担当している高度ポリテクセンターにおける社会人を対象にしたセミナーでも活用している。本セミナーは、MCORE-CARTを利用して線形制御理論を学習した後、理解を確認するための応用事例として、図6に示すMCORE-IPnの安定化制御に挑戦してもらう内容となっている。受講者からは高評価を得ている。

### 3.2 高等学校における活用<sup>[13]</sup>

図4に示すMCORE-CARTは、学生・社会人だけでなく工業を学ぶ高校生に対する制御教育用としても活用できる。筆者の一人が所属する高校では、3年生を対象にフィードバック制御実習を2017年度から実施している。3年生の実習は、テーマの一部が選択になっており、その内の一つがフィードバック制御実習である。2017年度は対象となる38名中15名が自らの意志で本実習を選択した。生徒は3年生の4月までに、指数関数、三角関数、微分と積分を、さらに専門科目の電気基礎において、複素数を使った計算について学習済みである。

この実習の目的を以下に示す。

- (1) 授業で学ぶ数学がフィードバック制御の中でどのように活用されるのか、について学習する。
- (2) 駆動輪の速度制御系とMCORE-CARTの位置制

御系を対象とし、各種制御方式によって何がどのように改善できるのか、について学習する。

実習は9授業時間（150分×3回）を使い、制御対象に対して代表的な制御方式を適用することにより、安定条件や特性の改善について、実験をとおして体験的に学ぶ内容になっている。

実験内容は以下のとおりである。

- (1) 導入：いくつかの時間関数の応答、一次・二次システムにおける特性多項式と極、極と安定性、応答性の関係。
- (2) 速度制御系（駆動輪の速度制御）実験  
P制御とPI制御による速応性と定常偏差の改善。
- (3) 位置制御系（駆動輪の回転角度制御）実験  
周波数応答実験によるボード線図作成とMCORE-CARTのパラメータ同定ならびにP制御、PD制御、PID制御による安定性と定常偏差の改善。  
実習風景を図11に示す。



図11 高校生に対する制御学習風景

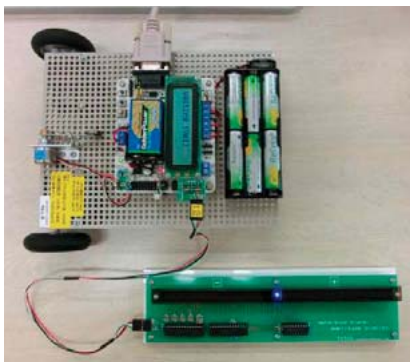


図12 周波数応答実験における入力信号視覚装置

実習はMCORE-CARTとPCを一人一台の環境で行い、制御系の設計や実験データの数値処理にはフリーソフトのScilabを利用している。図12は位置制御系における周波数応答実験の様子である。振幅と周波数を(LF)TK400SHに設定すると、台車が前後方向に移動する。このときの駆動輪回転角を

(LF)TK400SHが取得し、シリアル通信によってパソコンに転送することにより、Scilab上でゲインと位相差を求めている。

また、正弦波入力信号に対して、前後方向に動作する台車から、振幅と位相差の関係を視覚的に実感してもらうために、正弦波入力信号の振幅を80個のバー型LEDで表示する「基準信号表示装置」を製作した。この表示装置は省配線化のためにI<sup>2</sup>Cバスで接続している。(LF)TK400SHはI<sup>2</sup>Cバスをもたないが、汎用I/Oポートを利用したインタフェース回路を設けることで接続が可能になる。

なお、(LF)TK400SHの上位互換性をもつLFTK400RXを搭載すれば、I<sup>2</sup>Cバス端子に直接接続して使用することが可能である。

フィードバック制御実習を学んだ生徒に対して、実験報告書の提出と記述式のアンケートを実施している。回答として得られた主な感想を以下にまとめる。

- (1) 基準信号表示装置を活用した周波数応答実験について

- ・出力信号（台車の動き）と入力信号の動きや遅れが目で確認できたので、わかりやすかった。
- ・もし基準信号表示装置がなかったら、車体と信号の差はグラフでしかわからないけれど、表示器があることにより、一目で差がわかった。
- ・実際に車体の動きと信号の動きを目で見て比較することができるので、どのくらいの差が生まれているのかが一目でわかるので、とてもわかりやすかった。
- ・表示器と実際のロボットの動きとでは、意外に遅延があることに驚いた。

- (2) フィードバック制御実習全般について

- ・P制御からPD、PID制御まで3つの制御をとおして、微分・積分を加えることにより（応答が）目標値に近づき、定常偏差がほぼゼロになったとき、フィードバック制御の良さを知ることができた。
- ・数学で習った微分や積分が制御で扱われていることがわかり、とても興味深く学べてよかったと思った。実際にさまざまな制御を試し、グラフで表示したりロボットを動かしたりと、一目でわかる環境で勉強しやすかった。
- ・フィードバック制御の実習をとおして、改めて数学が大切だと感じた。
- ・フィードバック制御の実習ではたくさんの計算を必要としたので、とても苦労した。グラフもたくさん読み取らなければいけないのも苦労した。



#### 4. 結 言

本稿では、筆者らが開発したメカトロ教育用マイコンボード TK400 シリーズについて、開発の背景から開発の経過について述べた上で、活用事例として大学ならびに高校での取り組みについて紹介した。

TK400 シリーズの開発のきっかけとなった機械創造演習を受講する学生の多くはプログラミングの初心者であり、ほとんどがマイコンを扱った経験をもたない。そのような学生が与えられた課題をクリアするロボットを期間内に完成させる過程で、TK400 シリーズのマイコンボードが果たす役割は大きいと考える。2018 年度以降に利用する予定の LFTK400RX は本シリーズの最上位に位置しており、潜在能力の非常に高いマイコンボードである。学生に対して過負荷にならないように注意しながら、有効に活用方法を検討していきたいと考える。また、(LF)TK400SH や LFTK400RX を搭載した MCORE-CART は、簡単な構造ではあるが、線形制御理論の学習用教材としては有用な制御対象であり、現在、機械工学実験や社会人を対象にしたセミナーで活用している。MCORE-CART はアレンジを加えることでさまざまな制御対象に変わり得る<sup>[15][16]</sup>。この特長を活かして、これからも教材開発を進めていく予定である。

一方、MCORE-CART を活用した高校生に対する制御教育では、フィードバック制御実習のアンケート結果から、実験を通して制御効果を体験的に理解することについて、概ね良好な反応が得られた。その一方で、授業で学ぶ数学がフィードバック制御の中でどのように活用されるのか、という学習においては、数式がもつ意味の理解には大きな障壁があると感じた。授業で学ぶ数学は計算テクニックに偏りがちであり、数式と物理的な現象との対応関係について学ぶ機会が少ない。このため、数式の意味について戸惑う場面が多かった。その一方で、制御対象の伝達関数から、2 次方程式で表される特性方程式の解は、中学で学ぶ「解の公式」によって求められることに大きな反応があった。高校生に対してフィードバック制御について教える場面においては、工学的センスを育むためにも、数式の見方や解釈のしかたに関する助言や指導が必要であると考え。今後、MCORE-CART を有効活用しながら、高校生向けのフィードバック制御学習について学習内容を工夫していく予定である。

#### 参考文献

- [1]水川, 安藤, 春日: "大学学部向けロボット教材開発とその活用実践", 日本ロボット学会誌, 24-1, pp.10--15 (2006).
- [2]竹澤, 長松, 高島, 中村, 大竹, 吉田: "就職活動支援に連携した自律型ロボットものづくり教育", 工学教育, 60-4, pp.44--49 (2012).
- [3]戸田, 奥村, 富山, 古田: "実践して理解する大学新入生向けオリジナルロボット製作実習", 日本ロボット学会誌, 31-2, pp.147--153 (2013).
- [4]川谷: "自律移動型ロボットを対象としたメカトロ教育", SI2007, pp.175--176 (2007).
- [5]高田, 川谷: "マイコンボード TK400 を活用したメカトロニクス教育実践", 工学教育, 64-1, pp.45--53 (2016).
- [6]川谷, 高田: "メカトロ教育用マイコンボードの開発とその応用事例", Robomech2010, 1P1-G10 (2010).
- [7]川谷, 高田: "初学者向けの制御教育用教材の開発", SI2014, 1E1-4, pp.351--354 (2014).
- [8]川谷, 高田: "マイコンボード TK400 を活用したメカトロ教育の事例紹介", 第 57 回自動制御連合講演会, 1A07-6, pp.556--559 (2014).
- [9]川谷, 高田: "マイコンボード TK400SH とその応用事例の紹介", SI2011, 2G1-5, pp.1457--1460, (2011).
- [10]川谷, 高田: "制御教育用教材 MCORE-IP の紹介と活用事例", 工学教育, 61-2, pp.67--72 (2013).
- [11]川谷: "フリーソフトで学ぶ線形制御", 森北出版 (2008).
- [12]平田: "Arduino による Ball & Beam 実験装置", 計測と制御 3 月号, 54, pp.188--191 (2015).
- [13]高田, 川谷: "メカトロ教育用マイコンボード TK400RX の 開 発 ", SI2017, 2C3-04, pp.1721--1725 (2017).
- [14]川谷, 高田: "実験で学ぶメカトロニクス TK400SH ボード実習", 東京電機大出版局, (2015).
- [15]武市, 川谷, 高田: "MCORE-CART を利用したシーソー系の安定化制御", Robomech2017, 2P2-K10 (2017).
- [16]川谷, JIN, 武市, 高田: "台車系を利用した制御理論学習システムの開発", SI2017, 2C3-05, pp.1726--1730 (2017).