

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：54301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K02949

研究課題名(和文) 実践的に制御理論を学ぶための教材とカリキュラム開発

研究課題名(英文) Development of teaching materials and curriculum for learning control theory in a practical way

研究代表者

川田 昌克 (Kawata, Masakatsu)

舞鶴工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：90311042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、生産が終了した LEGO MINDSTORMS の代わりに Arduino と汎用のモータ・センサを使用した教材として、回転型/アーム型 LEGO 倒立振子を開発した。ただし、特殊な機械加工をすることなく、誰でも簡単に組み立てることができるという利点を活かし、本体の製作には LEGO 部品を利用した。そして、この教材を利用することで、PID 制御、モデリング、現代制御からアドバンスト制御までを、実践的に学ぶことが可能であることを示した。また、開発した教材の製作方法や MATLAB/Simulink ファイルを、web 上に公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「制御工学」は、数式を駆使して自由自在にモノを操ることを目的とした学問である。しかし、講義科目では、数式を追いかけることが主となってしまいがちである。本研究で開発した LEGO 倒立振子は、特殊な加工技術が必要とせずに誰でも簡単に製作することができ、MATLAB/Simulink により簡単に実験を行うことができる。また、コンパクトな構造でありながら比較的安価であるため、少人数で実際に動かしながら「制御工学」を学ぶことができる。このような学習スタイルを新たに展開していくことは、制御技術をますます浸透させるうえで、意義深いと考える。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a rotary/arm-type LEGO inverted pendulum as a teaching material using Arduino and general-purpose motors and sensors instead of LEGO MINDSTORMS, which are no longer in production. However, LEGO parts were used to fabricate the main body, taking advantage of the fact that anyone can easily assemble it without special machining. We showed that these materials are suitable for learning PID control, modeling, modern control, and advanced control in a practical manner. The developed teaching materials and MATLAB/Simulink files are available on the web.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 カリキュラム開発 教材開発 Arduino LEGO MATLAB/Simulink

1. 研究開始当初の背景

LEGO MINDSTORMS は第一世代の RCX が 1998 年 9 月に発表されて以来、第二世代の NXT (2006 年 8 月)、第三世代の EV3 (2013 年 9 月) へと進化している。そして、高専や大学といった教育現場では、競技性を持たせた PBL 教育やプログラミングの実習を行うための教材として LEGO MINDSTORMS が広く導入されてきた。しかし、EV3 モータのいびつな形状に起因する取り付け場所の制約、センサの種類が限定的であるという制約、ソフトウェアの制約 (高度な記述式言語もしくは低レベルのビジュアル言語を使用せざるを得ない) があり、「制御工学」の学習に不向きであるという問題があった。

そこで、本研究の遂行者は、LEGO MINDSTORMS とは別の LEGO Power Functions の XL モータや、サードパーティ(mindsensors.com)の角度センサ GlideWheel-M を使用することにより、世界で初めて LEGO による回転型倒立振子を開発した。また、「制御工学」の分野で標準的なソフトウェア MATLAB/Simulink を利用することで、コントローラの実装や信号の計測を容易に行えるように工夫した。これにより、モデリング、PID 制御 (古典制御)、現代制御から先進的なアドバンスト制御までの幅広い「制御工学」のカリキュラムを提供してきた。

一方で、サードパーティが提供している LEGO センサの多くは、LEGO MINDSTORMS のマイコン部である EV3 インテリジェントブロックの Simulink サポートパッケージに対応しておらず、実験装置を開発する上で大きな制約となる。また、LEGO のモータやセンサは種類が限られているので、様々な実験装置を開発するには、汎用モータやセンサの利用を検討する必要がある。こういったことから、汎用モータやセンサを EV3 インテリジェントブロックで利用するための方策を検討する必要があると考えるに至った。同時に、EV3 インテリジェントブロックの代わりに、Simulink サポートパッケージに対応している Arduino を使用することで、さらに汎用性を向上させ、柔軟な教材開発を進めていくこととした。

2. 研究の目的

「制御工学」の教育で利用するための様々な実験装置が販売されているが、一般に高価(多くは 1 式 100 万円以上)であり、授業で利用するために台数を揃えることが困難である。また、「制御工学」の分野で世界標準のソフトウェア MATLAB/Simulink に対応していないことも少なくない。それに対し、LEGO MINDSTORMS や Arduino は比較的安価なプラットフォームであり、MATLAB/Simulink にも対応している。さらに、PBL 教育の授業と共用することも可能であるため、導入コストを抑えることができる。しかも、LEGO 部品を利用すると分解や組み立てが簡単であり、1 セットで様々な教材を組み立てることが可能である。

本研究では、このような現状を鑑み、LEGO MINDSTORMS や Arduino を利用することによって実践的かつ効果的に制御理論を学ぶことが可能な安価な教材とカリキュラムを開発する。そして、得られた知見を広く一般に公開することで、「制御工学」の教育のニーズに応えることを目的としている。なお、想定している教育内容を表 1 に示す。

表 1

【レベル 1】 古典制御	【レベル 2】 モデリング	【レベル 3】 現代制御	【レベル 4】 アドバンスト制御
信号処理 PID 制御と性能解析 モデルに基づく設計 など	2 次遅れ系の特性 最小二乗法 など	極配置法 最適レギュレータ サーボ系設計 など	データ駆動制御 非線形補償 量子化制御 など

3. 研究の方法

図 1 に示すような工夫を施すことにより、受講者が興味深く学習できるような様々な「制御工学」の教材を試作する。

- 教材のマイコンとしては、Simulink モデルを作成するだけで簡単にコントローラ実装や信号の計測ができる、LEGO MINDSTORMS EV3 もしくは Arduino MEGA 互換ボードにシールドが搭載されたものを利用する。
- 本研究で開発する教材の本体は、特殊な機械加工をすることなく簡単に組み立てることができるように LEGO 部品を使用する。また、LEGO 用の CAD ソフトウェアである Studio2.0 を利用して組立図を作成することにより、ユーザをサポートする。
- LEGO モータ・センサの代わりに汎用モータ・センサを利用するが、ネジ類などにより簡単に LEGO 部品に取り付け可能なものを選定する。

そして、表 1 の内容を効果的に学習できるかを検証する。また、開発した教材のなかでとくに有用なものについては、組立図、部品表、MATLAB/Simulink ファイル等を広く公開する。

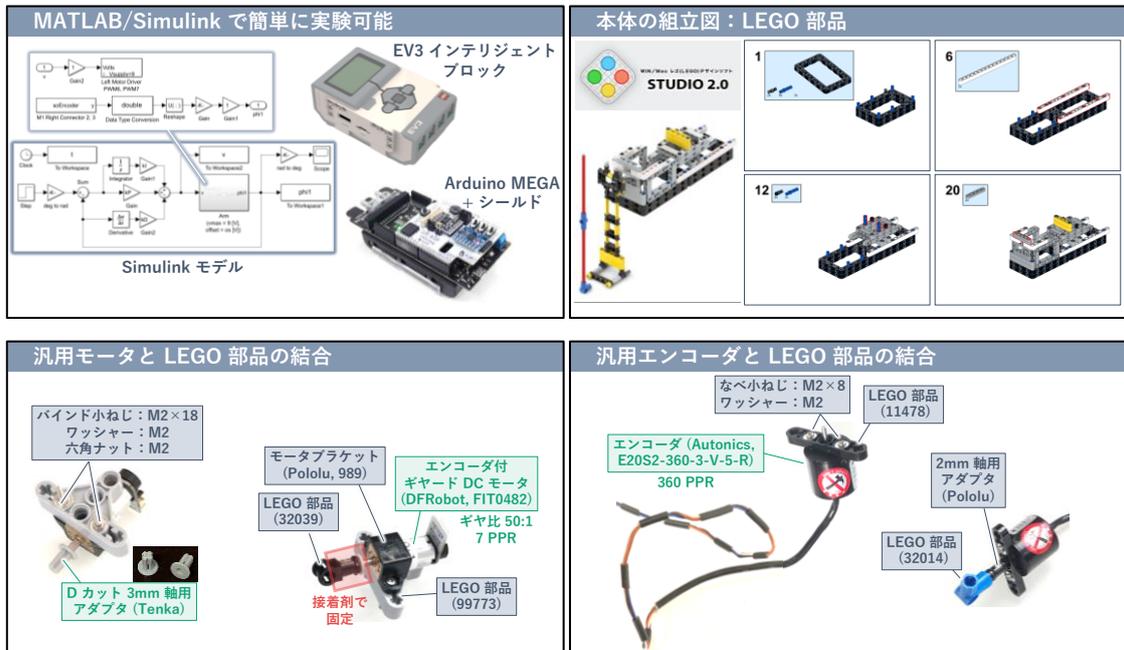


図1 教材開発における着目点

4. 研究成果

(1) EV3 インテリジェントブロックを利用した教材開発

LEGO MINDSTORMS の EV3 インテリジェントブロックと汎用のモータやセンサを併用した制御工学教育用の実験装置の試作した。一例として、試作した 2 軸ヘリコプタを図 2 示す。汎用モータとして Pololu 社のマイクロメタルギアモータを使用することを検討したが、EV3 インテリジェントブロックは LEGO 純正の L モータと M モータを識別する回路が内蔵されており、直接的に接続しても認識しないことがあった。そこで、公開されている EV3 のデータシートを解析し、識別用の回路をブレッドボードで構成し、M モータとして認識できるようにした。その結果、傾斜角や旋回角方向の PID 制御を実現することができた。実験の様子は

<https://youtu.be/1EaQAljTwo>
で公開している。

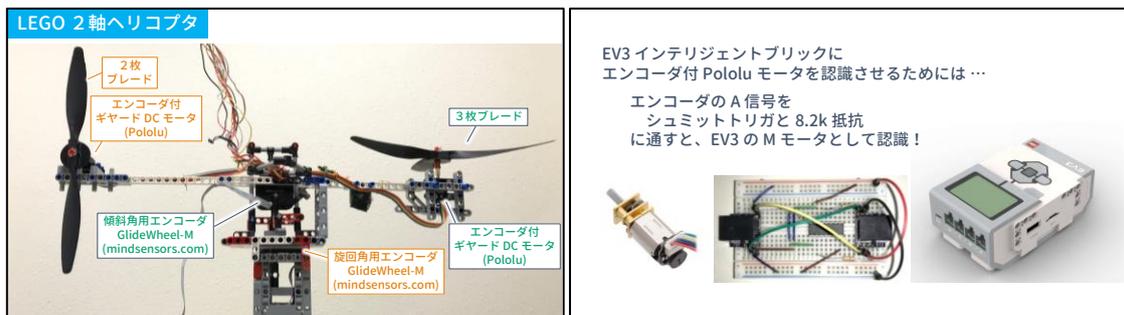


図2 EV3 インテリジェントブロックと汎用のモータを利用して製作された 2 軸ヘリコプタ

(2) LEGO 部品と Arduino を利用した教材開発 — 回転型/アーム型倒立振子の開発

研究を進めていく途中で、LEGO MINDSTORMS EV3 の配給が 2021 年 6 月 30 日を以って終了となるのが正式に発表された。そのため、EV3 インテリジェントブロックの代わりに Arduino MEGA 互換ボードとシールド MinSegShield (モータドライバ、エンコーダ入力、6 軸センサの機能) を使用することを本格的に検討した。

実際に開発した教材は図 3 に示す回転型倒立振子と図 4 にアーム型倒立振子である。回転型は水平面を回転するアームの先端に取り付けられた振子の倒立を、アーム型は鉛直面を回転するアームの先端に取り付けられた振子の倒立を維持することを目的とした教材である。これらはいずれもコンパクトな構造であり、振子を取り外すとアーム系、振子を真下基準とするとクレーン系となり、学習内容によって、難易度を変更することができる。

また、アーム型は振子だけでなくアームも重力の影響を受けるため、回転型よりも非線形性が強く、アームが水平付近で可制御性が失われるため、制御の難易度は高い。また、振子を取り除いた鉛直面を回転するアーム系は、線形近似すると、教科書でよく例示されている 2 次遅れ系であり、PID 制御の学習に適している。

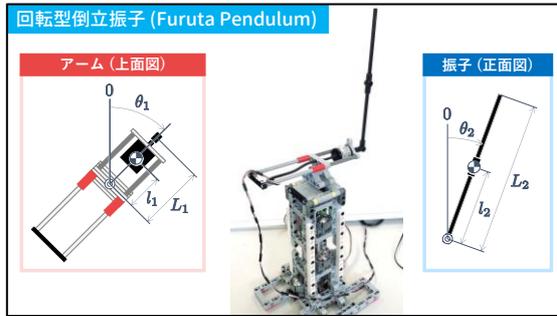


図3 回転型倒立振り子

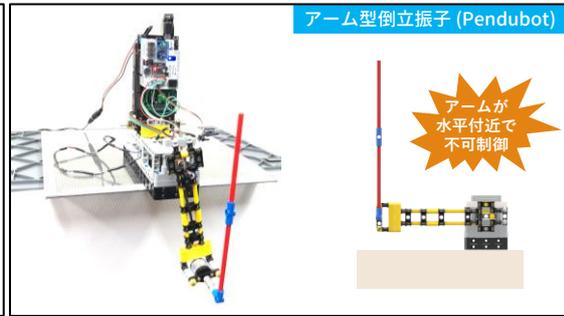


図4 アーム型倒立振り子

実験装置の開発手順の詳細や実験の様子は以下の URL で公開している。

- https://youtu.be/KVR_2Jlwgk …… SCI'22 でのプレゼン動画 (回転型倒立振り子)
- <https://youtu.be/rav6z8miqd0> …… MSCS2023 でのプレゼン動画 (アーム型倒立振り子)
- <https://qiita.com/Carter/items/a3ddaad078bbebe42998> …… 回転型倒立振り子
- <https://qiita.com/Carter/items/de0add289c762a20d7b6> …… アーム型倒立振り子

カリキュラムの一例として、鉛直面を回転するアーム系の PID 制御を行った結果を図 5 に、アーム型倒立振り子の目標値追従制御を行った結果を図 6 に示す。

図 5 (a) は P (比例), I (積分), D (微分) の各動作の効果を確認したものである。P 制御では重力項の影響で定常偏差が生じているが、PI 制御では定常偏差が 0 となっている。しかし、振動が激しいため、D 動作を加えて PI-D 制御とすると、振動が抑制できた。つぎに、図 5 (b) では近年、注目されているデータ駆動制御の効果を確認したものである。さいごに、図 5 (c) は非線形補償を加えることで、目標角を大きくしたときの線形化誤差の影響が抑制できることを確認したものである。

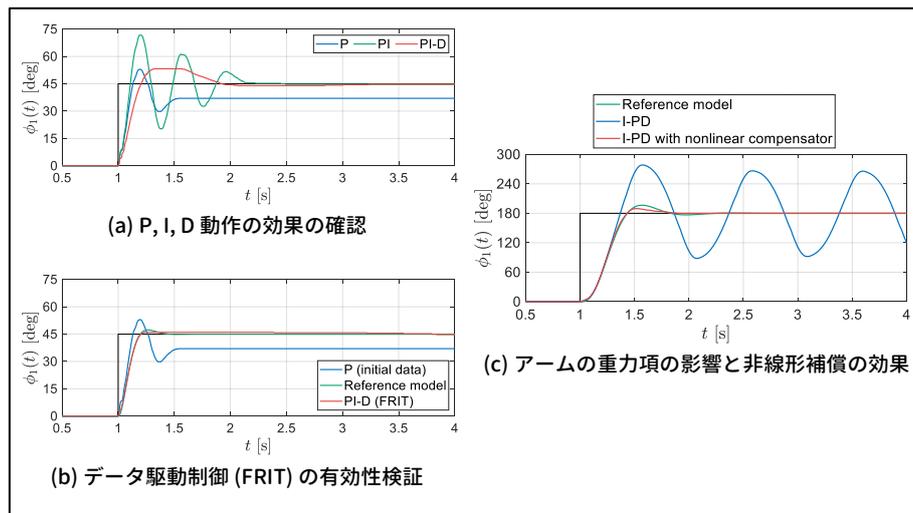


図5 鉛直面を回転するアーム系の PID 制御

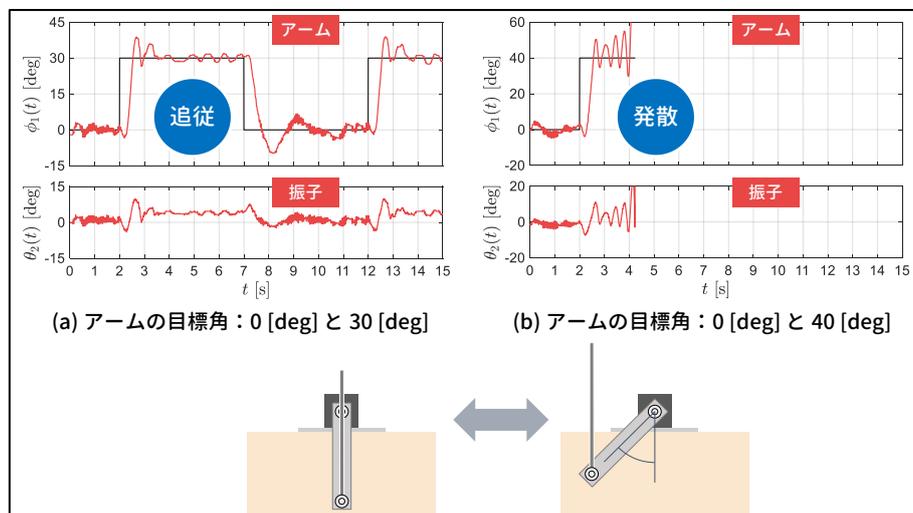


図6 アーム型倒立振り子の目標値追従制御

図 6 は、アーム型倒立振り子に対して、現代制御 (最適レギュレータ) により積分型コントロー

ラを設計し、振子の倒立を維持したままアームの目標角を変化させたときの時間応答である。目標角が 30 [deg] のときは目標角に追従しているが、40 [deg] のときは線形化誤差の影響で発散した。このように、アーム型倒立振子は非線形性が強い制御対象であることが確認できた。

(3) 「制御工学」を体感できる 2 輪スケートボードの開発

上記の (2) を実施する過程で、Arduino MEGA 互換ボードとシールド MinSegShield を利用した体感型の実験装置である 2 輪スケートボードを開発した (図 7)。これは、搭乗者が自分で水平を保つことが困難な 2 輪スケートボードを、自動制御技術でアシストするものであり、自動制御の有効性を自身で体感することができる。この実験装置は、搭乗部に 4 つの荷重センサが取り付けられており、搭乗モードと未搭乗モードのコントローラに切り替えを行っている。車輪の角度はエンコーダ、搭乗部の傾斜は 6 軸センサ (ジャイロセンサおよび加速度センサ) により検出され、この値をもとにして、P-D コントローラで搭乗部が水平を維持するような DC モータの指令電圧を計算している。実験の様子は以下の URL で公開している。

https://youtu.be/bs7qIt_Xre0

実際の授業のなかで、受講者に搭乗の体験をしてもらったところ、受講者のほとんどから好意的なアンケート結果が得られた (図 8)。また、この実験装置はオープンキャンパスや中学校での技術家庭科の出前授業でも利用している。本研究の成果は、第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会で発表し、共著者が学生発表賞を受賞した。



図 7 2 輪スケートボード

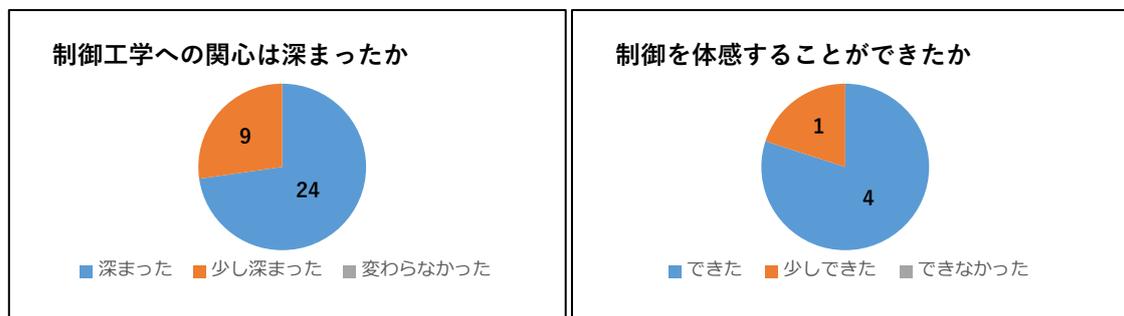


図 8 アンケート結果

(4) 書籍の出版

鉛直面を回転するアーム系については、出版した 2 冊の書籍の例題に採用した。

- 川田昌克, 西岡勝博: MATLAB/Simulink によるわかりやすい制御工学 (第 2 版), 森北出版 (2022.11)
- 川田昌克: MATLAB/Simulink による制御工学入門, 森北出版 (2020.2)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川田昌克
2. 発表標題 制御工学を実践的に学ぶことができる LEGO 倒立振子の開発
3. 学会等名 第 10 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川田昌克
2. 発表標題 PID制御の基礎
3. 学会等名 日本テクノセンターセミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川田昌克
2. 発表標題 制御工学教育のための簡易な回転型倒立振子の開発
3. 学会等名 第 66 回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菊本智寛, 浦久保孝光, 川田昌克, 室巻孝郎, 玉置 久
2. 発表標題 搭乗者を含む 2 輪スケートボードの力学モデル構築
3. 学会等名 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊本智寛, 川田昌克
2. 発表標題 自動制御を体験するための2輪スケートボードのモデリングと制御
3. 学会等名 第6回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川田昌克
2. 発表標題 PID制御の基礎
3. 学会等名 日本テクノセンターセミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊本智寛, 川田昌克
2. 発表標題 自動制御を体験するための2輪スケートボードの開発
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 川田昌克, 西岡勝博	4. 発行年 2022年
2. 出版社 森北出版	5. 総ページ数 224
3. 書名 MATLAB/Simulink によるわかりやすい制御工学（第2版）	

1. 著者名 川田昌克	4. 発行年 2020年
2. 出版社 森北出版	5. 総ページ数 272
3. 書名 MATLAB/Simulink による制御工学入門	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<ul style="list-style-type: none"> ・「LEGO 部品を利用した回転型倒立振子のレシピを公開!」のまとめ https://qiita.com/Carter/items/a3ddaad078bbebe42998 ・「制御工学を実践的に学ぶことができる LEGO 倒立振子の開発 (MSCS 2023 のプレゼン資料: 完全版)」 https://qiita.com/Carter/items/de0add289c762a20d7b6 ・「MATLAB/Simulink によるわかりやすい制御工学 (第 2 版)」サポートページ https://onl.sc/XhtzSkv ・「MATLAB/Simulink による制御工学入門」サポートページ https://onl.sc/sZaVAry
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------