

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：54301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01051

研究課題名(和文) 難解な制御工学を実体験により学び直すことができる実験教材の開発

研究課題名(英文) Development of educational materials to re-learn control engineering by real experience

研究代表者

川田 昌克 (Kawata, Masakatsu)

舞鶴工業高等専門学校・電子制御工学科・教授

研究者番号：90311042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、難解な制御工学の学習用教材として安価なクレーン/倒立振子を開発した。この教材は、LEGO MINDSTORMSの部品、LEGO Power Functionsのモータ、サードパーティのLEGO用角度センサおよび汎用的な部品を利用して、簡単に組み立てられる。ソフトウェアとしては制御工学の分野で標準的なMATLAB/Simulinkを利用する。この教材を利用して、モデリング、古典制御、現代制御を効果的に学習できるコンテンツを提案し、実際に授業で使用した。授業後のアンケートによりその学習効果を確認した。また、web上にコンテンツを掲載し、一般公開した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed an inexpensive crane/inverted pendulum as an educational material of control engineering. This educational material can be easily assembled using LEGO MINDSTORM, LEGO Power Functions XL motor, third party angle sensor and general parts. As software, we use MATLAB/Simulink which is standard in the control engineering field. Using this educational material, we propose educational contents which can effectively learn modeling, classical control and modern control, and we actually used them in class. We confirmed the learning effect by questionnaire to the students after class. Also, we published the educational contents on the web.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学教育 メカトロニクス技術者育成 LEGO MINDSTORMS MATLAB/Simulink

1. 研究開始当初の背景

図1に示すLEGO MINDSTORMSは、教育用ロボット玩具のキットであり、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)へと発展している。LEGO MINDSTORMSは、容易に筐体を組み立てることができるだけでなく、ソフトウェアの種類が豊富であるという利点がある。そのため、大学・高専などの多くの教育機関や企業研修の現場では、競技性を持たせたPBL(Project/Problem Based Learning)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が広く導入されている。

一方で、LEGO MINDSTORMSは制御の基本要素であるマイコン、センサ、アクチュエータを備えているので、「制御工学」の教育に利用したいという要望が強くある。しかし、以下の問題があるため、国内外を問わずLEGO MINDSTORMSを「制御工学」の教育に活用した事例はきわめて少ない。

- (i) LEGO MINDSTORMSは付属するモータがロータリエンコーダ(角度センサ)を内蔵するサーボモータであるので、容易にモーションコントロールを実現できるという利点がある。しかし、LEGO MINDSTORMSのサーボモータには多段の歯車が内蔵されているのでバックラッシュが大きく、不安定系に用いると大きな持続振動を生じる。また、いびつな形状をしているため、取り付け場所が限られる。
- (ii) LEGO社からは角度センサが提供されていないため、サーボモータが取り付けられていないロボットの関節角の検出には、ドリフトの問題があるジャイロセンサを用いざるを得ない。
- (iii) コントローラの実装などにC言語を利用する場合、プログラミングの知識が必要である。この前提条件は、所属学科によっては「制御工学」の学習に不向きである。
- (iv) 従来研究で提案されている二輪型倒立振り子“NXTway”や玉乗りロボット“Ballbot”は、不安定系としてしか扱えないので、パラメータ同定やPID制御の学習には向いていない。

2. 研究の目的

先に述べたように、サーボモータの構造的な問題や、センサの種類が少ないなどが要因で、LEGO MINDSTORMSを「制御工学」の教育への活用事例はほとんどない。本研究では、LEGO MINDSTORMSと、制御工学分野で標準的なMathWorks社のソフトウェアMATLAB/Simulinkを併用し、安価で操作が容易な「制御工学」の教育コンテンツを開発し、広く一般に公開することを目的としている。また、開発した教育コンテンツを実際

に高専での授業や企業での研修で利用し、難解な制御理論を実体験により学び直す教育効果を検証する。

3. 研究の方法

(1) 倒立振り子で学ぶ「制御工学」の教育コンテンツの提案

倒立振り子とは「手のひらの上の棒を倒さないようにする遊び」を自動制御により実現するための実験装置であり、大学や高専の学生実験で多く利用されている。その理由のひとつは、不安定なシステムであるので制御を行う理由が明確であり、「制御工学」の有用性を初学者に実感してもらうことができる教材であるためである。

本研究では、LEGO MINDSTORMSを利用した教材として倒立振り子を開発する前段階として、倒立振り子によって学べる「制御工学」の重要な事項(モデリング、PID制御、現代制御やアドバンスト制御)を提示する。同時に、実験装置がなくても効果的に学習できるように、MATLAB/Simulinkファイルを、web上で広く一般に公開する。

(2) NXTを利用した「制御工学」の教育コンテンツの実践

研究代表者は、NXTを利用した「制御工学」の教育コンテンツを開発し、書籍にまとめている(川田昌克:MATLAB/Simulinkと実機で学ぶ制御工学, TechShare(2013))。

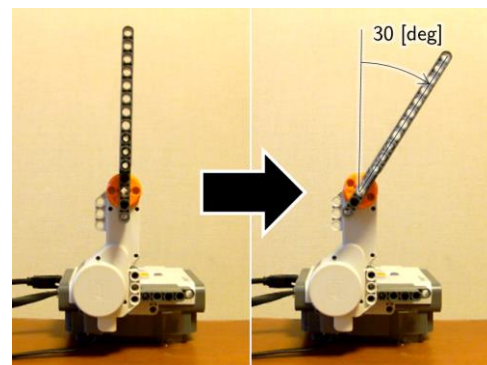


図2 NXTモータのPID制御



図3 回転型クレーン/倒立振り子

この教育コンテンツではNXTモータを利用して、信号処理やPID制御を学習すること

ができる (図 1). また, (i)–(iv) の問題に対処することで, 図 2 に示す回転型倒立振子を開発した. 具体的には, NXT モータの代わりに LEGO Power Functions シリーズの XL モータと, サードパーティ (mindsensors.com) のロータリエンコーダ GlideWheel-M を併用した. また, MATLAB/Simulink で使用可能な無償の Simulink Support Package を利用することを提案した. この回転型クレーン/倒立振子により, モデリング, 古典制御, 現代制御からアドバンスド制御までの幅広い内容を学習できる.

そこで, この「制御工学」の教育コンテンツを舞鶴高専専攻科の授業や, 企業技術者の研修で利用し, その効果を検証する. また, 実験装置がなくても効果的に学習できるように, パワーポイントの資料や実験動画を, web 上で広く一般に公開する.

(3) EV3 を利用した「制御工学」の教育コンテンツの提案

図 2 に示す回転型クレーン/倒立振子はコンパクトな構造であるので, 1 人 1 台での使用を前提とするのであれば使いやすく, 学習効果が高いと考えられる. 一方, 大学や高専における学生実験のように, 複数人で 1 台を使用したり, 教室で多数の受講者に実物を提示するのであれば, レールが 1m 程度の長さの標準的な台車型クレーン/倒立振子 (図 3) の方が使いやすい. そこで, EV3 により台車型クレーン/倒立振子を開発し, 「制御工学」を効果的に学習できる教育コンテンツを提案する.

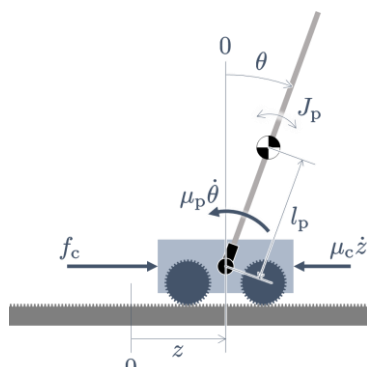


図 3 台車型クレーン/倒立振子

台車型クレーン/倒立振子の製作には, 教育用 EV3 の標準セットと拡張セットに含まれる LEGO パーツを使用するが, これ以外に LEGO Power Functions の XL モータおよびサードパーティの LEGO 用エンコーダも併用する. また, レール部には汎用のラックを, 振子部には汎用のアルミ丸パイプを利用するが, 素人でもできる程度の簡単な工作に留める. その結果, 市販の台車型クレーン/倒立振子実験装置と比べ, 安価に製作できる.

4. 研究成果

(1) 倒立振子で学ぶ「制御工学」の教育コン

テンツの提案

「制御工学」の基礎的内容である

- モデリングとパラメータ同定
- PID 制御
- 安定性・可制御性
- 状態フィードバック制御
- サーボ制御
- 可観測性とオブザーバ
- 離散化

や, 発展的内容である

- LMI による制御
- デジタル制御
- 非線形制御

を, 「倒立振子」の例示により効果的に学習できることを示した. これらの内容は書籍にまとめた ([図書] ②を参照).

同時に, web 上にサポートページを開設した ([その他] ②の URL を参照). サポートページには,

- IP Toolbox : MATLAB/Simulink 用の Toolbox (倒立振子シミュレータであり, 図 4 に示すようなブロック群)
- 書籍で利用した MATLAB/Simulink ファイル (図 5) とその使用方法
- 動画

を掲載している.

公開したサポートページには, 2018 年 6 月 15 日時点で 2,715 アクセスがあり (二重カウントなし), 多くのユーザが利用していることがうかがえる.

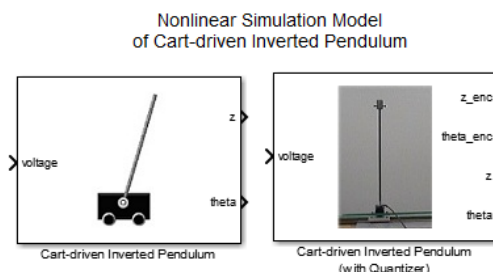


図 4 IP Toolbox の一部

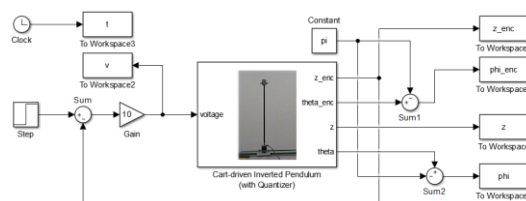


図 5 Simulink モデルの一例

(2) NXT を利用した「制御工学」の教育コンテンツの実践

舞鶴高専専攻科 1 年科目「システム制御工学」において, 提案する教育コンテンツを実践し, 受講後にアンケートをとった. 受講者は, 舞鶴高専電子制御工学科および電気情報工学科であり, 本科目受講前に, 全員が「制御工学」に関連した講義科目を受講した経験がある. アンケート項目は表 1 の通りである.

表1 アンケート項目

Q1	興味を持って授業に取り組みましたか？
Q2	MATLAB/Simulink の利用は効果的でしたか？
Q3	LEGO MINDSTORMS の利用は効果的でしたか？
Q4	通常の「制御工学」に関連した講義と比べて効果的に学習できましたか？
Q5	通常の「制御工学」に関連した実験と比べて効果的に学習できましたか？
Q6	「制御工学」, 「信号処理」, 「数値計算」などのつながりを理解できましたか？
Q7	自動制御の構成要素（モータ, センサ, マイコン）がどのように接続され, それぞれどのような役割を果たしているか理解できましたか？
Q8	フィードバック制御のイメージはつかめましたか？
Q9	モデリングの意味は理解できましたか？
Q10	コントローラを試行錯誤ではなく合理的な根拠に基づいて設計することの重要性は理解できましたか？
Q11	卓上の理論と実際の動きの違いを感じましたか？

表2 アンケート結果

	1	2	3	4	5
Q1	60%	40%	0%	0%	0%
Q2	88%	12%	0%	0%	0%
Q3	80%	16%	4%	0%	0%
Q4	72%	20%	8%	0%	0%
Q5	63%	25%	13%	0%	0%
Q6	36%	48%	12%	4%	0%
Q7	52%	44%	0%	4%	0%
Q8	64%	20%	12%	4%	0%
Q9	36%	48%	8%	8%	0%
Q10	68%	28%	4%	0%	0%
Q11	76%	12%	8%	4%	0%

1: はい 2: どちらかといえばはい
3: どちらともいえない
4: どちらかといえばいいえ 5: いいえ

表1の項目を5段階のレベルで評価してもらった結果を表2に示す。また, 自由記述のアンケート結果を以下に示す。

- 実際の動きを確認できるので, コントローラ設計の重要性を理解しやすかった。
- 制御工学の授業は理論的な話ばかりで制御のイメージがつかみにくかったが, LEGO と MATLAB を使いながら学習できたので, わかりやすかった。
- 実験が多く, 内容が理解しやすかった。
- 理論と実際の動きを比較することで, 制御についてよく理解できた。
- 理論通りにモデルが動き, 感動した。
- 電気情報工学科では制御工学の実習が少なく, 理解していない部分が多かったが, 理論から学習し, 動作させることで, 以

前に受講した「制御工学」の授業よりも深く理解することができた。
• 特に印象が残ったのはローパスフィルタであり, あの辺りはすんなり頭に入った。

これらのアンケート結果より, 提案する教育コンテンツの有用性がわかる。

表3 アンケート結果

非常に役に立った	28%
役に立った	43%
普通	29%
役に立たなかった	0%
全く役に立たなかった	0%

また, 若手企業技術者に対する研修会でも提案する教育コンテンツを実践した。研修後のアンケート結果を表3に, 自由記述のアンケート結果を以下に示す。

- PIDに関する知識を得ることができた。単なるPIDのみだけでなく, パラメータ・ゲイン調整法やI-PD制御などなかなか経験することができない内容を実験機(ロボット)を使って学習できるのは非常に良かった。
- PID制御におけるPI-D, I-PDの違いが理解できた。P, I, Dそれぞれパラメータの変化による対象の動作の違いも, 実験機があり, かつ, 感覚的な言葉で頭に入ってきて, 一層の理解が深まった。
- 実際にモノを動かしたり, 動画での説明があったのでわかりやすかった。
- PID制御の考え方について非常にわかりやすく, 有益だった。実験機器での実演で実際に制御に触れられて体感できた。後輩にも是非, 受講してもらいたい講義であった。

アンケート結果より「制御工学」が必要な実際の現場で働いている企業技術者に対して, 提案する教育コンテンツが有用であることがわかる。

なお, web上にサポートページを開設した(〔その他〕①のURLを参照)。公開したサポートページには, 2018年6月15日時点で995アクセスがあり(二重カウントなし), 受講者以外にも多くのユーザが利用していることがうかがえる。

(3) EV3を利用した「制御工学」の教育コンテンツの提案

(3-1) 台車型クレーン/倒立振子の製作

台車型クレーン/倒立振子をLEGOパーツの車輪を利用して四輪駆動とすることも考えられるが, モータを高速回転させたときのタイヤの滑り(空転)が問題となる。そこで, モータ駆動部をラック・ピニオンで構成することにした。ラックとしてはLEGOパーツを利用することも考えられるが, 大量に入手することは困難であるので, 汎用のモジュール1.0のラックを利用することにした。また,

ピニオンがラックから外れないように、アルミアングルをラック 2 本（全長 1m）の両側に挟み、床板に両面テープで固定した（図 4）。

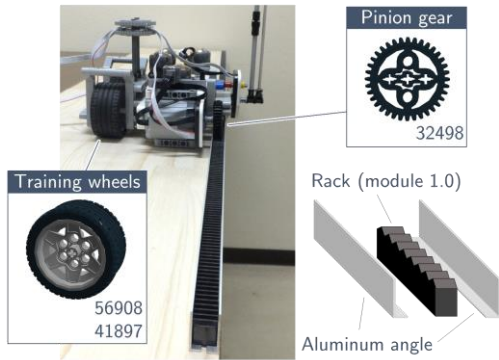


図 4 ラック・ピニオンで構成された駆動部

台車のベースは教育用 EV3 の基本セットや拡張セットに含まれている LEGO パーツを利用して製作した（図 5）。モータが高速回転したときのベースの跳ね上がりに対処するために、おもりとして LEGO パーツのスチールボールをキャスターにより取りつけている。また、EV3 モータの代わりに LEGO Power Functions シリーズの XL モータを使用した。台車位置と振り角度を検出するためのセンサとしては mindsensors.com のロタリエンコーダ GlideWheel-M を使用した。振り子の基本部分は LEGO パーツを利用して製作したが強度が不十分なので、外径が 3mm のアルミ丸パイプを補助的に取りつけた。

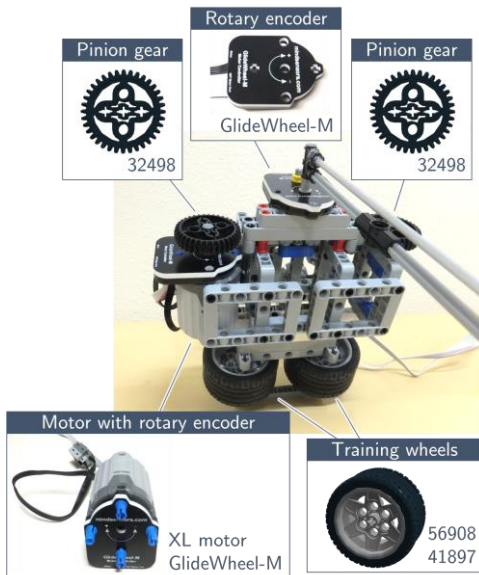


図 5 台車部

(3-2) 教育コンテンツ

台車型クレーン/倒立振り子のモデルは物理法則などにより得られるので、モデルに含まれるパラメータを同定する手順を示した。台車のパラメータは、台車位置の P 制御の行き過ぎ時間とオーバーシュートより定めることができる（図 6）。また、振り子のパラメータ

は、自由振動の周期と減衰率より定めることができる（図 7）。

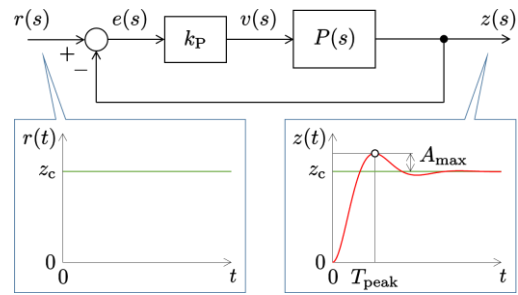


図 6 台車のパラメータ同定

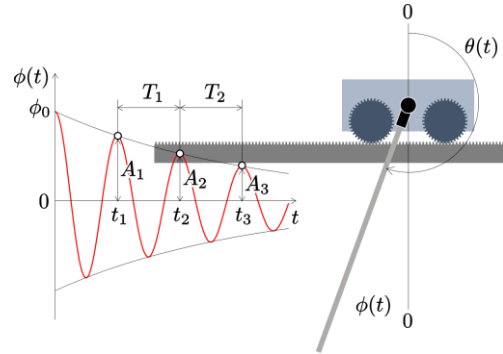


図 7 振り子のパラメータ同定

得られたモデルを線形化し、状態空間表現で表すことで、設計モデルが完成する。この設計モデルに対して、状態フィードバック形式のコントローラを設計することで、安定化や台車位置のサーボ制御を実現できた（図 8）。

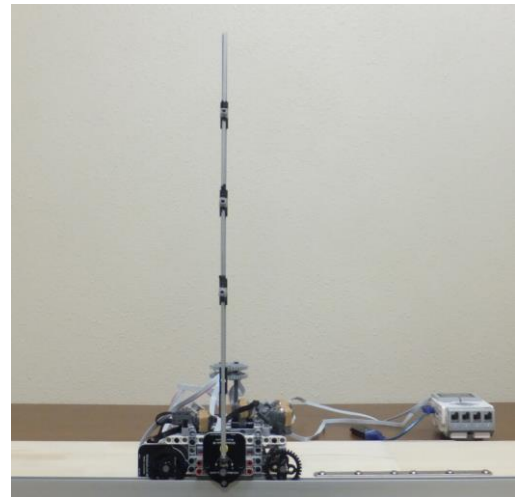


図 8 台車型倒立振り子が安定化された様子

コントローラは、現代制御で代表的な最適レギュレータにより設計したが、ゲインを抑制したまま代表極を負側に大きくすることが困難であった。そのため、図 9 に示すように、台車位置の収束性がよくない。この問題に対処するため、極の存在領域を指定したうえで最適レギュレータと同様の評価関数を最小化するようなコントローラを LMI（線形行列不等式）により設計した。その結果、図

10 に示すように、台車位置の収束性を高めることができた。

このように、現代制御の基本的な事項だけでなく、アドバンスな内容を学習することができることを示した。

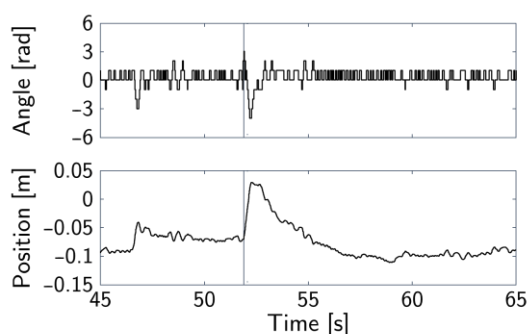


図9 最適レギュレータ

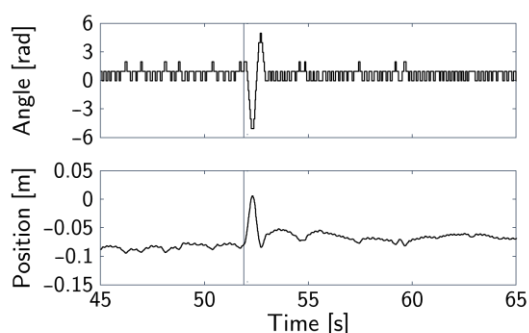


図10 LMIによる多目的制御

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① 川田昌克：LEGO MINDSTORMS を利用した回転型倒立振子の開発，自動化技術 (Automation Systems), Vol.31, No.8, pp.63-67 (2015) [韓国語翻訳版]

〔学会発表〕(計9件)

- ① 川田昌克：制御実験で学ぶPID制御の基礎とモデルベース設計による制御性能向上のポイント，日本テクノセンター (2015.6.26, ニュー共栄ビル (大阪))
- ② 川田昌克：LEGO MINDSTORMS を利用した制御工学教育の実践，平成27年度制御工学教育研究集会 (第58回自動制御連合講演会の関連行事) (2015.11.15, 神戸大学工学部)
- ③ 川田昌克：制御実験で学ぶPID制御の基礎とモデルベース設計による制御性能向上のポイント，日本テクノセンター (2016.7.8, たかつガーデン (大阪))
- ④ 川田昌克：制御実験で学ぶPID制御の基礎とモデルベース設計による制御性能向上のポイント，日本鉄鋼協会 (2017.2.2, 鉄鋼会館 (東京))

- ⑤ 川田昌克：制御実験で学ぶPID制御の基礎とモデルベース設計による制御性能向上のポイント，日本テクノセンター (2017.3.3, たかつガーデン (大阪))
- ⑥ 川田昌克：制御実験で学ぶPID制御の基礎とモデルベース設計による制御性能向上のポイント，日本テクノセンター (2017.7.14, たかつガーデン (大阪))
- ⑦ 川田昌克：LEGO MINDSTORMS を利用した制御工学教育の事例紹介，Robotics Education Day 2017, アフレル (2017.7.16, 品川シーズンテラス (東京))
- ⑧ 川田昌克：制御実験で学ぶPID制御の基礎とモデルベース設計による制御性能向上のポイント，日本テクノセンター (2018.2.23, たかつガーデン (大阪))
- ⑨ 川田昌克，青木紘海：LEGO MINDSTORMS を利用した教育用倒立振子の開発，第5回SICE制御部門マルチシンポジウム, Fr42-3 (2018.3, 東京都市大学世田谷キャンパス (東京))

〔図書〕(計2件)

- ① 川田昌克著，ウジンチュ (Woo-Jin Choi) 訳：MATLAB/Simulink と実機で学ぶ制御工学 -PID制御から現代制御まで-，教保文庫 (2015.11) [韓国語翻訳版]
- ② 川田昌克 (編著)，東俊一，市原裕之，浦久保孝光，大塚敏之，甲斐健也，國松禎明，澤田賢治，永原正章，南裕樹：倒立振子で学ぶ制御工学，森北出版 (2017.2)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

- ① 「MATLAB/Simulink と実機で学ぶ制御工学」サポートページ
http://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/study/book_lego/book_lego_page.html
- ② 「倒立振子で学ぶ制御工学」サポートページ
http://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/study/book_ip/book_ip_page.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川田昌克 (KAWATA, Masakatsu)
舞鶴工業高等専門学校・電子制御工学科・教授
研究者番号：90311042