

令和 2 年 5 月 15 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01093

研究課題名（和文）移動ロボットを用いて制御理論を学ぶ教材とカリキュラム開発

研究課題名（英文）Development of a curriculum and a teaching material for learning linear control theory with a mobile robot

研究代表者

山川 聡子（Satoko, Yamakawa）

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：20293748

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：この研究では、移動ロボットを使用して制御理論を学ぶための実験カリキュラムを提案しました。移動ロボットの運動モデルは非線形ですが、厳密な線形化手法を用いることで線形制御理論を使用して制御ゲインを調整できます。この特徴に注目することで、安価な移動ロボットを用いて基本的な線形制御理論の特性が移動ロボットの走行軌道として観測できる実験カリキュラムを実現しました。提案した実験カリキュラムを大学の講義で実施し、受講者にアンケート調査を行って教育効果を検証しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動化技術の発展にともない、エンジニアにとって制御工学の知識はますます重要になっています。本研究で提案したカリキュラムを用いると、移動ロボットを用いて線形制御の基礎を学ぶことができます。制御則や制御パラメータによる影響がロボットの走行軌道として目で見て比較できるので自動制御の効果を実感するとともに、制御理論に対する理解を深めることが期待できます。この移動ロボットを用いた実験カリキュラムは自動運転とも関係が深く、受講者の興味を惹きつけ、教育効果があることが受講者対象のアンケート結果から確認できています。

研究成果の概要（英文）：This research proposed an experimental curriculum to learn control theory using a mobile robot. Although the model of the mobile robot is nonlinear, a strict linearization method makes it possible to adjust the control gains using the linear control theory. By applying the method, the characteristics of linear control systems are explicitly observed in the traveling paths of the mobile robot, so an experimental curriculum to learn the basic linear control theory can be realized using an inexpensive mobile robot. The proposed experimental curriculum was carried out in a class of a mechanical engineering course, and its educational effect was confirmed from the results of the questionnaires.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 教育 移動ロボット PID制御 非線形制御 軌道追従

1. 研究開始当初の背景

産業用ロボットなどだけでなく、様々な家電や乗用車などの自動化がますます盛んになっている。制御工学はこれらの自動制御には欠かせない学問であり、その重要性は今後も増すと考えられる。制御理論に対する理解を深めさせるための実験装置として DC モータの実験装置が市販されており、学部生対象の実験科目に導入している大学も多い。これ以外にもより複雑な制御理論を用いる倒立振り子システムなども市販されているが、一般に市販の実験装置は高価である。そのため、学生数名で1台の実験装置を使用する実験環境になることも少なくなかった。

一方で、大学や工業高校等においてロボット製作を題材にした PBL 講義の例が数多く報告されている。それらの PBL ではロボット製作やプログラミングに重点が置かれることが多く、制御理論にもとづいた制御系設計の学習には至らないことが多かった。加えて、移動ロボットは非ホロノミック系といわれる非線形系であるため、大学学部レベルで学ぶ線形制御理論の学習教材として用いることが難しかった。しかし、走行を続ける車両の軌道制御に限れば、厳密な線形化手法を用いることで線形制御理論にもとづいた制御ゲインの設計が可能となる。この性質を利用すれば、安価な小型移動ロボットを用いて線形制御理論にもとづいた制御系設計を理解させるための新しい教材開発ができると考えた。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、移動ロボットを用いて線形制御理論の基礎を理解させるための実験教材とカリキュラムの提案、開発を行なうことである。理論にもとづいて移動ロボットの軌道制御則や制御パラメータを変更して実際の移動ロボットの走行軌道を比較することで、理論と実際の運動を結びつけて制御理論に対する理解を深める教育手法を提案する。実際に大学学部の講義科目等に導入して、提案する教育手法と教材の評価を行なう。特に、以下の点に留意した。

- (1) 教材開発：受講者が自動制御の効果を実感できること。比較的安価な移動ロボットで実現できること。プログラミングの知識がない受講者でも制御則やパラメータの変更が自由に行えること。実験結果の比較とデータ取得が容易に行えること。
- (2) 教育方法：大学学部生が座学で学ぶ制御工学と関連付けて、線形制御理論の特徴を比較できる実験カリキュラムを作成すること。理論的アプローチの有効性が実感できるテキストを作成すること。いくつかの実習科目、対象者別のバリエーションを考慮すること。
- (3) 評価と検証：大学の実験科目等で実験カリキュラムを実施した場合の効果を検証すること。

3. 研究の方法

(1) 教材開発：制御理論の研究成果を適用して小型移動ロボットの軌道制御を行なう実験教材を開発した。ロボットに自動車のレーンチェンジのような動きをさせる実験とし、時間軸状態制御形にもとづく非線形制御法(文献1, 2)を適用した。この制御法を用いると水平面内での移動ロボットの軌道が線形2次系の応答と一致する。そのため、線形制御理論で知られているシステムの極と応答との関係などをロボットの軌道として目で見て確認することができる。この制御則を用いて、Arduino を搭載したロボット(図1)用の制御プログラムを作成した。使用した安価な小型の移動ロボットは制御を行わないと直進走行性が保てないことが多いが、上記の制御則を用いると理論値とほぼ一致する動きが実現できた。また、この制御プログラムには PID 制御を用いた軌道制御も組み込み、制御則を切り替えられるようにした。

つぎに、実験科目等においてプログラミングの知識がない受講者でも容易に実験が実施できるように、Visual C++を用いて Windows PC 用の GUI(Graphical User Interface)プログラムを作成した。受講者は移動ロボットと接続された Windows PC 上の GUI プログラムを介して、ロボットの制御則の選択、制御ゲインの設定、および目標速度・目標軌道の変更ができる。また、この GUI プログラムはリアルタイムでロボットのデータを取得し、走行軌道を画面上にグラフとして表示することができる(図2)。

(2) 教育方法：作成した実験システムを用いて、大学学部3年生が180分×2回で実施する実験カリキュラムを構成した。この実験カリキュラムはつぎの3つの実験で構成されている(文献3)。

実験1「軌道制御をしない場合」：軌道制御を行わずに何度か走行させて軌道を測定する。

実験2「PID制御による軌道制御」：直線状の目標軌道(ステップ関数)を与えて、PIDゲインを変更しながら、走行軌道の行き過ぎ量、速応性、定常偏差などを調べる。一般的に知られているPID制御の特徴を考慮して、実験結果を考察する。並進速度や目標軌道を変更した場合について走行軌道を調べて考察する。

実験3「非線形制御による軌道制御」：厳密な線形化手法で得られた線形モデルにもとづいて、極配置法を用いて制御ゲインを決定する。いくつかの極に対して決定した制御ゲインを用いて実験を行い、極と応答との関係を調べ、考察する。

まず、実験1では受講者に軌道制御を行っていない状態での移動ロボットの特性を把握させる。安価なロボットではモータのばらつきなどのため、軌道制御を施さないと直進走行しないことが多い。実験1の後、実験2でPID制御を用いて直進走行させることで、フィードバック制御の効果を実感させることができる。実験2ではPIDゲインを自由に変更させて挙動の違いを調べさせる。実験テキストには、線形近似モデルを用いた理論的な解析を掲載し、実験結果と理論

的な解析との相違点を考察させる。実験3では極配置法によって制御ゲインを求めてから実験を行わせる。理論的な知見にもとづいて制御則や制御ゲインを決定する利点を理解させる。

なお、受講者がPID制御の特徴や極と応答との関係を理解しやすくなるように、事前に予備実験を行ってこのシステムに適した代表的な制御パラメータを決定した。実際の実験では、これらの値を受講者に提示して主な特徴を理解させたのち、受講者に自由に制御パラメータを変更させて制御則と応答との関係を考察させる。

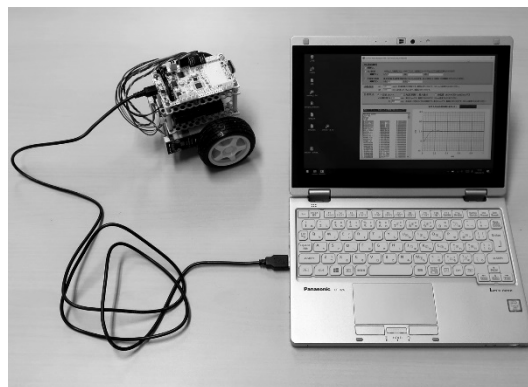


図1 実験システム

(3) 評価と検証: 実際に大学3年生対象の実験科目内で、提案した実験カリキュラムを実施し、受講者にアンケート調査を行う。この実験科目は、制御工学の講義科目と並行して開講するため、制御工学の一連の講義科目が終了した時点でもアンケート調査を実施し、実験が講義での理解の助けになったかどうかを調査する。

4. 研究成果

市販の安価な小型移動ロボットを対象にして、ロボットの軌道制御プログラムとPC用のGUIプログラムを作成した。これらのプログラムを利用すれば、Windows PCと約1.5万円の移動ロボット、単三電池4本で実験システムが実現できる。ロボットが走行する範囲は300mm×1200mm程度であり、図3のような机の上で実験可能である。

大学学部生が制御理論を学ぶための実験カリキュラムおよび実験テキストを作成し、大学の機械工学科3年生対象の実験科目内で実施した。受講生に対して、実験終了時と、約半年後の制御工学の講義科目終了時にアンケート調査を実施した。その結果、移動ロボットは従来のDCモータを用いた実験装置に比べて学生の興味をひきやすいこと、制御工学の重要性を意識させることができること、また、実験の経験によって講義の際に制御系の応答や特徴がイメージしやすくなることなどの効果が確認できた。

提案した教材とカリキュラムは、安価な移動ロボットでも線形制御理論の知見をうまく表わす実験結果が得られる点が特徴的である。安価な実験装置であることは、台数を確保しやすく、受講者一人一人がより自主的に実験を実施できるので、教育的な効果が上がることが期待できる。また、ロボットの走行軌道制御は自動車の自動運転との関連づけがしやすく、視覚的にも判りやすいので、受講者の制御理論への理解がより深まることが期待できる。これに加えて、目標速度や目標軌道を変更することで、PID制御だけで制御した場合の限界が、ロボットの回転運動のような明確な不安定現象として確認できる。線形制御の学習に加えて、より発展的な考察も行うことができる教材となった。このような教材は大学生だけでなく、大学院生や社会人対象の教育上も意義があると考えられる。そこで、大学院生対象の講義科目や企業の新人社員研修向けに説明内容を修正したカリキュラムを作成し、実習・講義を実施した。

提案した実験装置と制御則、運動モデルにもとづいた解析、および実験を行った教育効果については学術論文として公表した。一方、本課題で作成した移動ロボットの制御プログラムの説明はJAPAN ROBOTECH社へ寄稿し、同社から発売中のロボットキットのマニュアルに掲載されている。また、制御プログラムとGUIプログラムは実験動画とともにホームページで公開した。

<引用文献>

- (1) 山川聡子, 時間軸状態制御形にもとづく Chained System の安定化条件, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.5, pp.499-504 (2013)
- (2) Satoko Yamakawa and Kenta Ebara, Control of Mobile Robot by Switching Traveling Direction and Control Gain, ROBOMECH Journal, Vol.4 (2017)
- (3) 山川聡子, 移動ロボットを用いて制御理論を学ぶ実験カリキュラム, 計測自動制御学会論文集, Vol.55, No.7, pp.457-465(2019)

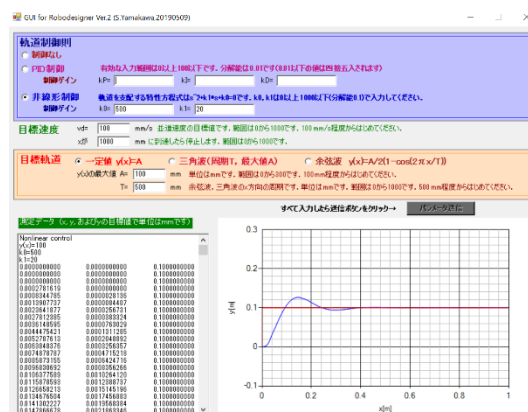


図2 作成したGUIの表示画面



図3 学生実験の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yamakawa Satoko, Ebara Kenta	4. 巻 4
2. 論文標題 Control of mobile robot by switching traveling direction and control gain	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40648-017-0097-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 山川聡子	4. 巻 55
2. 論文標題 移動ロボットを用いて制御理論を学ぶ実験カリキュラム	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 457-465
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.55.457	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中皓貴・山川聡子
2. 発表標題 旋回時に自動で速度調整を行う移動ロボットの軌道追従制御
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ホームページ「ロボットで制御を学ぼう」
<http://www2.toyo.ac.jp/~yamakawa/lecture/>

ROBO DESIGNER User's Guide ver.3.10, 株式会社JAPAN ROBOTECH (2017)
第11.11節「オドメトリを用いた軌道制御」山川聡子

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
--	---------------------------	-----------------------	----