

DSPリアルタイムシミュレータシステム による制御系設計教育

兼重 明宏* 藤本 浩*

The Education of Control System Design using a DSP real-time Simulator

Akihiro KANESHIGE* and Hiroshi FUJIMOTO*

Abstract

Control engineering is an interdisciplinary area extending across other science and technology fields. Complexity and the incidence of large-scale systems will increase in future, and control engineering will become increasingly important. As such, educational programs encompassing the area of control engineering must be expanded. One problem, however, is that the existing programs for students tend to be attached to conventional mathematics, and we are apt to forget the essence of what control engineering is.

The purpose of this report is to present the control educational program by means of simulator. This program is composed of step response, frequency analysis and design of control system by optimum regulator.

Key Words : MATLAB Software, Control Engineering Education, Step Response, Frequency Analysis, Optimum Regulator

1. 緒言

制御技術はコンピュータ技術の発展とともに急速に発展している。高度な数学基礎が必要な制御理論、物理的センスのいるモデリング技術やコンピュータシミュレーション技術、そして、センサ、アクチュエータ、コンピュータによるデジタル技術が統合されて制御システムの最適な設計がなされている^{1)~6)}。このように、制御は他分野にまたがる学問であり、今後益々複雑大規模化していく社会において重要な役割を担うものである。そのため、エンジニアとして高度な専門技術と総合的なセンスを十分に身につけた学生の育成が望まれる。しかし、制御理論の教育では、解析、設計が中心となり高度な数学知識が必要とされ、制御理論の講義では数式の羅列になることが多く、制御理論そのものの本質が見失われがちである⁴⁾。

一方、PCを用いた数値解析ソフトウェアが種々開発されており、その中でもMATLABが制御系設計解析ソフトウェアとしてよく用いられている。また、MATLABはDSP(Digital Signal Processor)と併用することにより、C言語によるプログラミングをすることなく、制御系の設計を行うことができ、実験解析が容易に行えるという利点を持っている。

本報告では、本校機械電気工学科における制御理論

に対する理解をより深いものとするため、4年生の工学実験、専攻科の総合実験を対象に、DSPリアルタイムシミュレータを用いた制御設計教育プログラムの検討を行い、そのプログラムについて報告する。

2. 制御理論教育の現状

制御における目標は、ある目的に適合するように、対象となっているものに所要の操作を加えることである⁸⁾。すなわち、制御系の設計を行うことができるようにすることが、制御教育における目的となる。この制御系設計を行うためには、制御理論を十分に理解し、また制御の目的を把握し、現象を観察、解析し、因果関係を捉え、対象となるシステムの特性を十分に理解することが必要不可欠である。

制御系設計は一般に図1に示す手順で行われる¹⁾。この手順を学習することが制御工学を学ぶということになる。

まず、制御系設計の目的を明らかにする。次に、制御対象となるシステムの分析とモデリングを行い、モデルの未知パラメータの導出、特性解析、導出されたモデルの妥当性の検証を行う。さらに、制御仕様を決め、モデルに基づいた制御系設計、仕様を満たし且つ設計された制御系の有効性の検証を行う。最後に実用

* 機械電気工学科

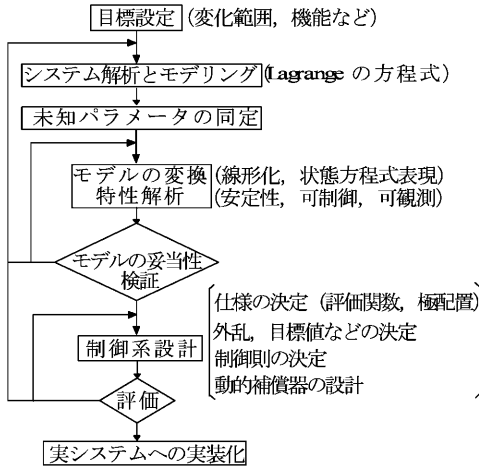


図1 制御系設計の手順

化のための検討を行い、実システムへの実装化を行う。

一般に、学校教育においては制御の方法論を体系的、理論的に教えることを目的としている。したがって、古典制御、現代制御、非線形制御、ロバスト制御、インテリジェント制御などの代表的な制御理論のいくつかを教えることになる。全ての制御理論を深く学習することは容易ではないが、必要に応じて、あるものは深く、そして、将来のために全般にわたり知識を持つことが望まれる。そのため、多くの授業では、制御理論の講義が中心となり、その内容は数学的になっている⁴⁾。このように、制御教育では理論中心の教育となっており、理論が本当に適用できるのか、実システムの結びつきが捉えづらくなっている。

これらの解決策の1つとして、教室での制御理論の学習とともに、実験を通して制御理論の確認(実証)を行うことが大切であると考えられる。制御理論を学習するための実験装置やシミュレータは種々開発されており、倒立振り子実験装置をはじめ、大型の制御システムとして、制御用CADソフトウェアと併用する制御教育トレーニングシステムが取り入れられている⁴⁾。実験を行うことにより、抽象的であった理論を感覚的にとらえることができ、これらの実験が有用であることが分かる。これらのことから、本校でも授業に沿った実験を用いた教育プログラムの作成が望まれている。

3. 制御教育プログラムの検討

3.1 シミュレータの検討

本教育プログラムは、シミュレータとしてMATLABを用いることとした。MATLABは高いグラフィック機能をもち、分かり易いモデルの作成が可能である。

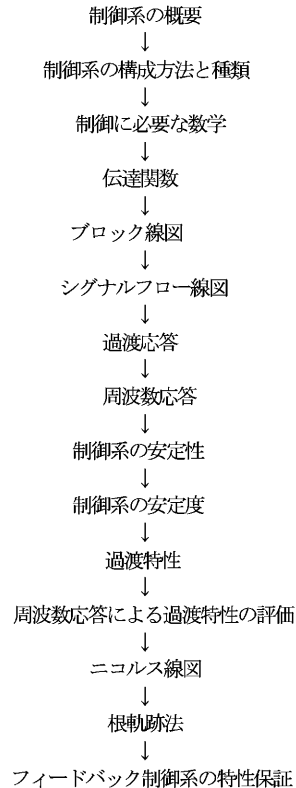


図2 4年次授業の流れ

また、Visual BasicやC言語など既存の言語を使用してプログラミングしなくとも、制御系の設計、解析が行える。また、DSPと併用することで、作成したモデルをCコードに生成し容易にリアルタイム実行プログラムを作成でき、非常に有効なツールである。しかし、C言語等のプログラム教育を別に行う必要がある。

3.2 教育プログラム検討

教育プログラムは、実験に利用できる時間などを考慮し、授業内容に沿って作成する。4年次と専攻科の授業の流れを図2と図3に示す。前述した制御系設計の手順より、まずモデリング、特性解析について学ぶ必要がある。図2の授業内容より、前者にあたる伝達関数やブロック線図、後者にあたる過渡応答や周波数応答など、古典制御理論を学習するプログラムを検討した。実験装置として、研究室に既存の装置である自動制御シミュレータ(太平洋工業社製)、MATLABを用い、基本制御要素にステップ入力を与えた時の過渡応答、また周波数応答解析を行う。これにより、制御系の特性解析の方法、基本制御要素(伝達関数)のもつ特徴、ブロック線図やボード線図について学習することが可能である。

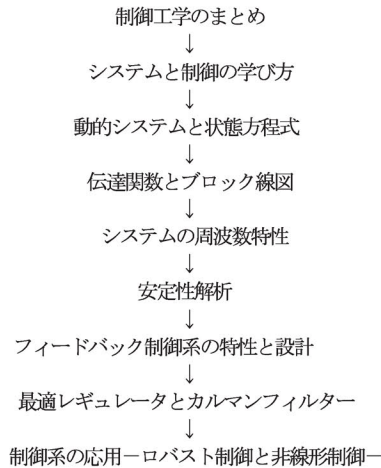


図3 専攻科授業の流れ

自動制御シミュレータ(太平洋工業社製)は、パッチコードを用いてパネル上にブロック線図を構成することで、直ちに、ステップ応答や、周波数応答などの入出力特性を求めることができるよう、内部に電気回路が組み込まれた装置である。MATLAB を使い、そこで得られた結果が正しいものだといっても、抽象的な理論と何ら変わらないものになってしまうので、実際に電気回路を組み込んだ自動制御シミュレータと比較することにより、MATLAB により得られた結果が信頼できるものであるということを実感してもらうためである。

専攻科では4、5年次に学習した古典制御の知識を基に、図3に示すように現代制御理論を中心に学習する。そこで主に学習する最適制御理論を用いて、図1に示す手順で制御系の設計を行い、制御系設計の流れを学習するとともに、各手順に必要な知識を学ぶプログラムを検討する。

実験装置として振り子付き台車搬送システムを対象とし、最適レギュレータによる振れ止め搬送制御系の設計を行う。本実験を行うことにより、制御系設計の流れを学習するとともに、各段階で行われるモデリング、パラメータの同定、モデルの検証、制御系設計、制御系の評価などにより、制御系設計に必要な知識の学習を行うことができる。また、振り子長さを変化することにより、機械システムの変化による制御系への影響やロバスト性の検証なども学習することができる。

4. 実験教育プログラム

4.1 4年生工学実験の教育プログラム

4.1.1 実験装置

実験装置には、自動制御シミュレータ、MATLAB、記録計を用いる。自動制御シミュレータを図4に各制御要素での回路図を図5に示す。

4.1.2 実験教育プログラム内容

基本制御要素である比例・積分・一次遅れ・二次遅れ要素の単位ステップ入力に対する過渡応答及び周波数応答について、MATLAB、自動制御シミュレータを用い、授業1.5時限(135分)×2で実験を行う。各制御要素に対して表1のようにパラメータを与える。パラメータの値により、どのように応答が変化するか実験を行い、要素の特徴を考察してもらう。

表1 基本制御要素のパラメータ

| | 1回目 | 2回目 |
|------|----------------------------|-------------------------|
| 比例 | 0.5 | 1 |
| 積分 | 0.5/s | 1/s |
| 一次遅れ | 1/(1+0.5s) | 1/(1+s) |
| 二次遅れ | 1/(s ² +0.4s+1) | 1/(s ² +s+1) |



図4 自動制御シミュレータ

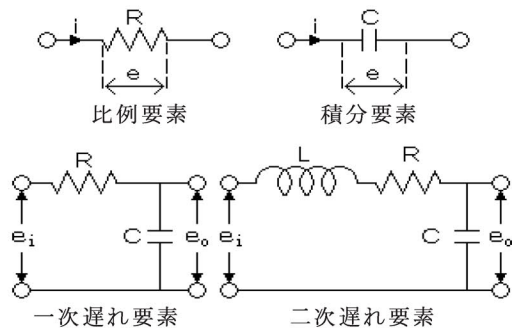


図5 各制御要素の回路図

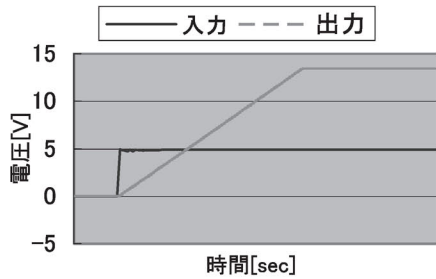


図6 自動制御シミュレータ積分要素の過渡応答

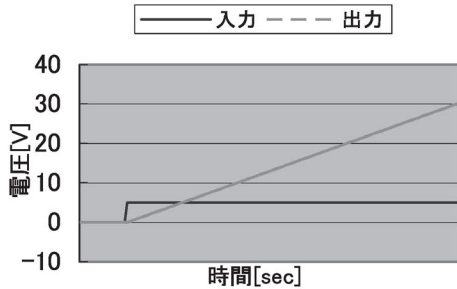


図7 MATLAB 積分要素の過渡応答

4.1.3 本教育プログラムにおけるねらい

実験実習を通し、教室で学習してきた伝達関数がどのような応答を示すのかを確認し、過渡応答や周波数応答の特性解析をどのように行うのか、その方法を学習する。具体的には、時定数やゲインの値によって、応答がどのように変化するかも確かめ、それらの値がどのような意味を持つのか理解してもらう。

各制御要素がどのような電気回路に相当するのかを学習するとともに、実際の電気回路を組みこんだ装置の結果と、MATLAB の数値解析による結果がほぼ一致することを確認し、MATLAB の有用性を確認してもらうためである。また、シミュレーションによる結果と、実験による結果の違いも確認する。例として積分要素の過渡応答を図6、図7に示す。グラフから分かるように、MATLAB と自動制御シミュレータの結果は一致する。しかし、実験ではコンデンサの容量があるので、ある値で飽和するが、MATLAB によるシミュレーションでは、飽和値（上限値）を設定しない限りそれが現れない。

4.2 専攻科総合実験の教育プログラム

専攻科では、90分×15回で総合実験のカリキュラムが組まれている。以下にプログラムの内容について述べる。

4.2.1 実験装置

- ・ 振り子つき台車搬送システム(写真図8)
- ・ MATLAB
- ・ DSP

【台車搬送システム実験装置の概要】

サーボモータの動力をタイミングベルトで伝えて台車を搬送する実験装置で、エンコーダにより、位置、振れの検出が可能である。最大搬送距離は0.48[m]となっている。台車搬送システム実験装置のモデル図を図9に示す。

4.2.2 実験教育プログラム内容

台車搬送システムを対象に、振り子の振れを抑制しつつ、且つ最速で搬送を行う搬送制御系を、最適レギュレータを用いて設計することを学習目標とした。振り子は3種類の長さを用意し、それぞれ制御系の設計を行うこととする。

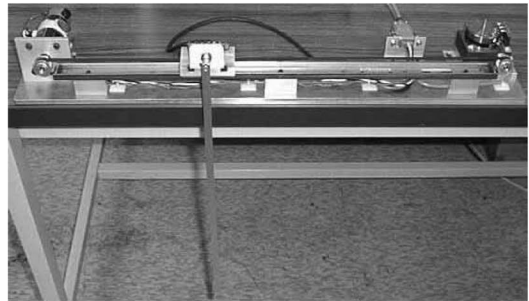
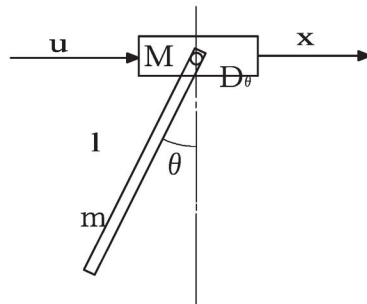


図8 台車搬送システム実験装置



- x : 移動距離[m] u : モーターへの入力電圧[V]
 D_θ : 振り子摩擦抵抗[N] θ : 振れ角[deg]
 m : 振り子質量[kg] l : 振り子長さ[m]
 M : 台車質量[kg]

図9 台車搬送システムモデル

実験装置の制約から以下の設計仕様を定める。

- a)搬送距離は0.4[m]
- b)リファレンス(台形速度カーブ)は、図11のように与える
- c)台車の行き過ぎ量は0.02[m]以内とする
- d)搬送終了時の振れは0.1[deg]以内
- e)最大振れ角は4[deg]以内

以上の仕様を満たすよう制御系を設計する。

図1で示した手順に従い、次の設計手順で搬送制御系の設計を行う。

(1) モデリング

状態方程式をラングランジュの運動方程式や力の釣り合いを用いて導く。また、サーボモータの伝達関数は次式に近似してモデリングを行う。

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K_M}{s(1+Ts)}$$

K_M : モータゲイン, T : モータ時定数である。

(2) 未知パラメータの同定

状態方程式の未知の変数を求める。サーボモータの伝達関数の定式化を行い、そのモータゲインを実験的に求める。

(3) モデルの検証

作成したモデルのシミュレーション結果と、実験装置での実験結果を比較し、求めたモデル、パラメータが妥当かどうか検証を行う。妥当でないと判断された場合は、モデル、パラメータを検査し直す。モデルの検証を通して解析手法の学習を行う。

(4) 制御系設計

最適制御を用いて最適レギュレータの設計を行う。3種類の長さ0.2, 0.4, 0.6[m]に対する最適レギュレータの設計を行い、振り子長さの違いにより設計した制御系がどのように変化するか調べる。

(5) ロバスト性の検証

求めた制御系のロバスト性(0.2~2[m])を調べ、制御系が可変パラメータに対してどの程度有効であるか、機械システムをどうとらえるか学習する。

4.2.3 本教育プログラムにおけるねらい

実際の機械システムを対象として制御系の設計を行うことにより、その流れを学習するとともに、各手順において必要な知識を身につける。また、機械システムの変化が制御系にどのような影響を与えるか、その変化に対する制御系のロバスト性との関連を学習してもらう。

これらの学習により、制御理論の最終目標である制御系の設計能力を養ってもらう。

5. アンケート結果と考察

今回作成した教育プログラムを用いて、4年次の過渡応答実験と周波数応答実験を行い、その際アンケートを実施した。図11と図12に、その結果を示す。

実験指導書の内容について理解しやすかったかという質問に対し、周波数応答実験、過渡応答実験共に9割近い理解が得られている。指導書の体裁や流れに関してはほぼ問題ないと考えられる。理解しづらかったという意見では、図の文字が見づらかったというものが多く、その点に関しては修正を行った。実験装置の取り扱い方に関しても9割近い理解が得られており、実験内容に集中して実験実習が行えると考えられる。理解しづらかった意見の中に、操作を1人の人が行ったため使用法を学習できなかったという意見があった。この問題は、設備数の改善や各要素に操作を行う人を変えるよう指導することで解決できると考えられる。

過渡応答、周波数応答を理解できたかという質問では、8割近い理解が得られており、大部分の学生が理解してくれたようである。過渡応答と周波数応答では、周波数応答の方が、「よく理解できた」、「ある程度理解できた」の両項目で高い割合となっている。周波数応答の方が理解しづらいつとえられるのに高い割合を示したのは、先に行った過渡応答実験の時には教室での授業が進んでいなかったのに対し、周波数応答実験の時にはある程度進んでいたことがその理由ではないかと考えられる。現カリキュラムでは、教室での理論の学習、工学実験共に後期に行われることになっており、前期に理論の学習をし、後期に実験を行うことでよりよい学習成果が得られると考える。アンケートの意見にも、まだ学習していない内容なので理解しづらかったという意見があった。今後の改善が必要である。

各制御要素の特徴を理解できたかという質問では、過渡応答では9割、周波数応答ではほぼ10割の学生が理解を示した。各要素の特徴は実験データをグラフ化することにより容易に見て取れることから高い理解を得られたと考えられる。周波数応答でより高い理解が得られたのは、過渡応答での経験より、グラフから特徴を読みとる力が養われたのではないかと考えられる。

両実験で全体的に高い理解を得ることができたことから、良い教育プログラムができたのではないかと考えている。

また、専攻科の実験プログラムについては実施していない。今後、教育プログラムの検証を行い、これら

一連の教育プログラムの改善を図ってきたい。

できる。これにより、エンジニアとして高度な専門技

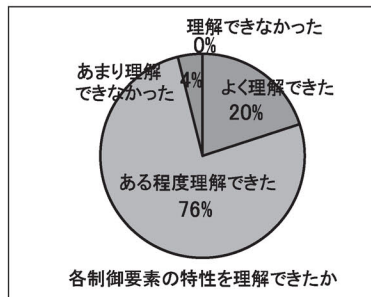
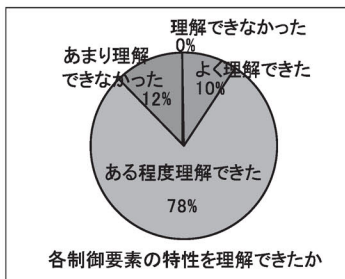
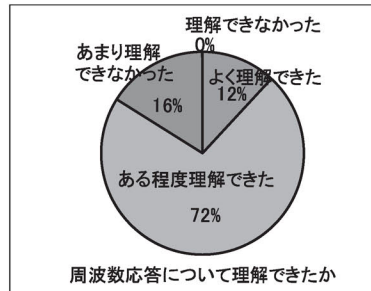
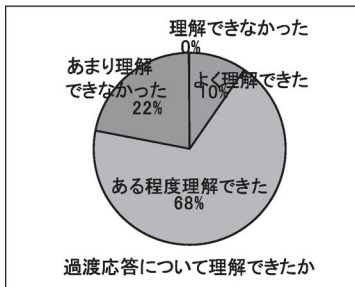
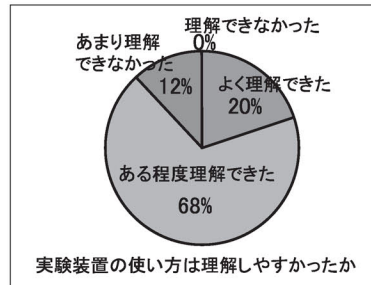
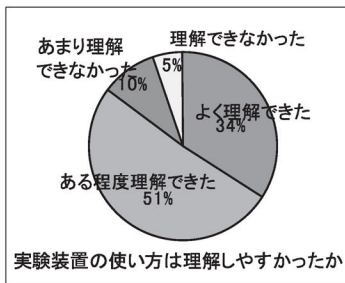
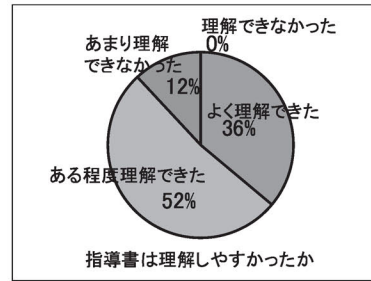
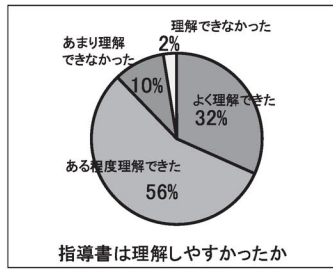


図 11 過渡応答アンケート結果

図 12 周波数応答アンケート結果

6. 結言

本報告では、DSPリアルタイムシミュレータを用いた教育プログラムを検討・作成した。この教育プログラムにより、モデリング技術、シミュレーション技術や最先端の制御系設計理論について、演習を通して反復的に学習し、かつ、プロセス、機械、電気などの実際の複合技術について実験を通して学習することが

術と総合的なセンスを育成し、今後の技術革新に対応できる。また、教室による学習で学んだ理論と実システムとの結びつきを確かめることができ、わかりやすい制御設計教育を行うことが可能となったと考える。高専教育では、実践的な開発型技術者の育成を目指しており、本教育プログラムにより、教育目標に合ったより良い教育が行えるようになったといえる。

最後に、本教育システムは平成15年度学内配分特

別研究促進費により充実が図られた。

文献

- 1) 古田勝久他, メカニカルシステム制御, オーム社, 1993.
- 2) 須田信英, 制御教育昔と今, 計測と制御, Vol.33, No. 6, pp.443-446, (1994)
- 3) 示村悦次郎, 制御工学とは何か, コロナ社, 1990.
- 4) Kaneshige Akihiro and Terashima Kazuhiko : The Control Engineering Education using an Advanced Control Training System by means of integrating MATLAB software and Experimental Systems, Proc.of the 4th Asian Control Conference, Singapor, pp.1406-1411, 2002.
- 5) 梶原宏之, 制御系 CAD ツールの発展, 計測と制御, Vol.33, No.6, pp.457-462, 1994.
- 6) 中野道雄・高田和之・早川恭弘, 自動制御, 森北出版株式会社, 1997.

(2004.9.6 受理)