体験型導入講義のための制御実験装置の小型化・低価格化

井 上 正 樹*・石 川 将 人*

浅 井 徹*・大須賀 公 一*

Improvement of Portable and Inexpensive Control Experimental System for Motivational Lectures

Masaki INOUE*, Masato ISHIKAWA*,
Toru ASAI* and Koichi OSUKA*

In order to help students understand the basic control theory, the authors have proposed a motivational lecture, where students get personal experience in advance of theoretical lectures. To realize the motivational lecture, the authors have designed a portable and inexpensive control experimental system. However, the system has some points to be improved in terms of costs, size and functions. Hence, the authors revise the experimental system to be more portable and less expensive. Moreover, the system is expanded so that education of other fundamental concepts is possible. This paper shows the design details of the experimental system.

Key Words: control education, control experiments, society

1. はじめに

制御理論の理解を促すために、従来よりさまざまな試みが行なわれている^{1)~4)}。これらの試みは主に講義終了後に知識を確実に定着させることを目的としている。しかしながら、少なくとも著者らの経験の範囲内では、ほとんどの学生は講義内容自体の理解が不十分であり、講義後にさまざまな試みを行なっても期待どおりの成果を挙げにくい状況にある。

このような状況に陥っている主原因は、教育の初期の段階でフィードバック制御（以下、FB制御）の目的や意味が十分に伝わっていないことにあると考えられる。通常、最初の講義では導入のための説明がなされている。しかしながら、FB制御の教育においては、図・動画・言葉などによる説明だけでは十分ではないようである。そこで著者らは、学生に理解の基礎を与えることを目的として、制御工学教育の最初に小型実験装置を用いてFB制御を体験させ、その有効性を確認した⁵⁾。Fig. 1はこの体験講義に用いた実験装置の写真である。このような実験装置を用いることで、FB制御の本質やFB制御にかかわる現象を多くの事前知識を必要とすることなく体験することができる。

上記の教材は著者らが直面する教育現場だけでなく、広く一般の制御工学教育の現場でも有効であると考えられる。そのような教材を容易かつ安価に製作できれば、多くの教育現

Fig. 1 Experimental control system

場でそれを活用することが可能になるだけでなく、社会の多くの人々が制御工学をより深く・正しく理解することにも寄与するものと考えられる。

Fig. 1の実験装置は市販されている部品を用いて構成されており、部品の入手・製作のいずれも容易である。また、この実験装置の材料費は約15,000円^(注1)であり、工作の手間を厭わなければ既製品の1/10あるいはそれ以下の費用で制御実験装置を実現することができる。しかしながら、大量に製作するにはこれでも十分に安価とはいえない。また、上記の実験装置に用いたモータはギヤの摩擦が大きく、結果として体験講義で想定した効果の一部を十分に体験できていなかった。

(注1) 2012年5月時点での販売価格。

* 大阪大学大学院工学研究科 吹田市山田丘 2-1

* Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita

(Received May 30, 2012)

(Revised September 10, 2012)

た。さらに、電源に乾電池を多用しているために、乾電池の残量チェックや交換などの手間を要するなど、実用的に使用するためにはまだ課題が残されている。

そこで、実験装置の製作・保守をより容易にするために、著者らは実験装置のハードウェアの変更を行なった。本論文では、このシステムの詳細を示す。

本論文の構成は以下のとおりである。文献 5) の体験講義を実施する前の学生の意識を確認するために、それらの学生に対してアンケート調査を実施した。まず、その結果を紹介する。その後、体験講義の内容を簡単に示しつつ、Fig. 1 の実験装置の設計上の問題を具体的に指摘する。その上で、新たに設計した実験装置の詳細を示す。

2. 工学的な経験に関するアンケート

著者らをはじめとして（制御）工学の授業担当者の多くは、学生に何らかの工学的経験を期待して授業を行なっていると思われる。しかしながら、そのような期待・仮定が妥当でないことを痛感することが少なくないのも事実である。そこで、学生の経験に対する仮定の妥当性を検証するために、学生に対してアンケート調査を実施した。

アンケート調査の対象は大阪大学工学部応用理工学科機械工学科目 2 年生で「計算機とプログラミング」を履修した 115 名である。得られた回答数は 80 件であった。以下にアンケートの質問項目とそれに対する回答を示す。

- オーディオ機器（ソフトウェアプレーヤなども含む）の、イコライザをいじったことがありますか？

ある	27.5%
ない	16.3%
イコライザって何？	56.3%

- オーディオコンポ（アンプやプレーヤが別々になっているもの）を使ったことがありますか？

配線したこともある	12.5%
使ったことはある	45.0%
ない	42.5%

- DC モータを（電池などを使って）回したことがありますか？

ある（スピードの変え方も知っている）	5.0%
ある	16.3%
ない	78.8%

- アナログテスタを使ったことがありますか？

ある	11.3%
デジタルはあるがアナログはない	20.0%
テスタって何？	68.8%

- 学校・大学の授業以外で電子回路の工作やはんだづけをしたことがありますか？

何度もある	6.3%
ある	36.3%
ない	57.5%

以上のアンケート調査を見ると、DC モータに対する経験が

希薄であることが目につく。しかしながら、DC モータは小学校の教材にも取り入れられているはずなので、ここまで経験がないという結果には疑問がある。そこで、このアンケート調査後に著者らの研究室に所属している学生数名に、

- 小学校の理科教材として使用しなかったか
- モータ駆動の自動車模型で遊んだ経験はないか
- 大学入学後の実習科目で使用していないか

などを個別に質問した。その結果、どの学生も少なくとも上記のいずれか一つには該当していた。すなわち、学生は事実としてモータを使用した経験はあるものの、それらはほとんど印象に残っていないようである。講義を理解する際には、事実として経験があるか否かよりも、むしろ講義内容から該当する経験を想起できるか否かのほうが重要である。よって、授業改善を考える際にも、学生の意識の実態をよくあらわしている上記のアンケート結果のほうが事実よりも重要である。

また、“DC モータ”の意味が学生に理解されなかった可能性もある。しかしながら、DC と直流、直流モータと模型工作用のモータが結びつかないとすれば、やはり工学的な意識が希薄であることには変わりない。

オーディオ機器の接続は伝達関数の直列接続のイメージと近く、この経験は伝達関数という考え方の理解を助けるものと思われる。しかしながら、現実にはそのような経験も期待できないようである。また、イコライザの存在さえ知らない学生が過半数であることから、周波数応答の概念の理解に相当な困難を伴うことがこの結果からも示唆される。

テスタやはんだづけについても、過半数の学生は教科以外に経験がない。これらのことから、大学入学前にモノを動かした、あるいは動かそうとした経験もほとんどないことが窺われる。

以上の結果から、学生には制御理論理解の基盤となるような工学的経験がきわめて不足している状況にあることがわかる。よって、制御工学の教育もこの状況を踏まえた上で実施する必要がある、体験講義が必要であることの明示的な証左が得られた。この結果は必ずしも一般性があるものではなく、大学や学科により学生の意識や経験が異なっている可能性は高い。本論文および文献 5) での提案も、著者らが直面している大阪大学機械工学科目の現状に対する方策である。ただし、このアンケート結果と同様な状況にある大学・学科はほかにもあると思われるので、そのような教育場面では本論文の提案も役立つはずである。

3. 小型制御実験装置を用いた体験講義

著者らは、制御理論を説明する前に FB 制御の原始体験を与えることが理論の効率的な理解に効果的であることを指摘している。さらに、FB 制御の原始体験として、著者らは下記の一連の体験を与えることを提案している⁵⁾。

- (1) モータへの印加電圧を変化させることで、モータ軸回転の定常角速度や回転方向を変えることができる。
- (2) 手動制御によってアームの位置決め制御を行なわせ

る。これにより、位置決め制御を実現するためには制御入力をアームの動きに応じて動的に変える必要があることを理解する。また、アームの位置決めが完了した後に指でアームを回すように指示し、外乱によってアームの位置が変わることを確認させる。

(3) 小さなゲインのFBコントローラを用いてFB制御によるアームの位置決め制御を行なう。手動で指令値を変更すると、動作は緩慢ではあるがアームの動きが指令値に追従することを確認させる。

(4) FBゲインを増大させることにより追従性能が向上することを確認させる。また、指令値を変化させない状態でアームを指で回すと、アームが指の力に抵抗することを確認させる。これにより、FB制御による位置決めは単にアームの位置を合わせるだけではないことを理解させる。

(5) FBゲインの変化による振舞いの変化を明確に認識させるために、指令値を自動で与えた場合の応答を確認させる。具体的には、ゲインを小さなものから中程度のものまでの範囲で変化させ、ゲインを大きくすると追従性能が高まることを確認させる。

(6) FBゲインをさらに増大させることにより制御系が不安定になることを確認させる。その後、ゲインを減少させることにより安定性が回復することを確認させ、不安定化が装置の故障によって発生するわけではなく、ゲインの違い、すなわち制御則の違いによって発生することを理解させる。

上記体験講義の提案時には、(1)の項目はどちらかといえば装置の動作確認、学生の既有知識の再確認の意味で行っていた。しかしながら、前章のアンケート結果から、この項目も重要な経験を与えるものであったことがあきらかとなった。

Fig. 1の小型制御実験装置は、上記の原始体験を最初の講義時間中に与えるために構想・製作したものである。実験装置のサイズは110×260×108mmであり、講義室の机上に十分収まる大きさである。

実験装置にはDCモータと8bitマイコンシステムを用いている。マイコンシステムはArduino Unoを用いた。Arduinoは開発環境も整備されており、制御実験を容易に行なうことが可能である⁶⁾。DCモータはジャパンロボテック社製RDO-29B50G9Aを使用した。RDO-29B50G9Aはエンコーダが付属するモータの中では安価で入手が容易である。エンコーダが付属しているのでポテンシオメータをモータ軸に結合する工作が不要である。しかしながら、その一方でRDO-29B50G9Aに付属しているギヤは摩擦が大きく、特にアームを指で回転させたときにFB制御の効果を実感しにくい結果となった。

電源はモータ用に単三乾電池8本、マイコン駆動用に006P型9V乾電池を使用した。実験装置重量の30%を乾電池が占めている。このことから、乾電池を使用しなければ実験装置を軽量化することができる。実際、マイコン駆動用電源はDC/DCコンバータを用いればもっと小さな電池でも支障はな

い。また、乾電池を使用すると、電池の消耗状況を常にチェックしておかなければならず、電池交換の手間やコストが定期的に発生してしまう。この意味においても乾電池の使用は避けたほうが望ましい。

実験装置の部品費は約15,000円である。市販の制御実験装置よりは安価であるが、講義では20~30台必要になることを考えると1台あたりの費用はさらに少ないほうが望ましい。

4. 実験装置の設計変更

4.1 実験装置の構成

以上のように、設計・製作した実験装置には改良すべき点がいくつかある。それらの問題を解消するためにハードウェアの設計変更を行なった。設計変更の主な目的はコスト低減化である。ただし、コストの抑制を図ったことによって製作・使用できる環境が制約されては本末転倒である。すなわち、多くの教育場面で使えるようにすることを考慮すると、無条件でコストを抑制すればよいわけではない。著者らは設計変更の検討の際、以下の条件を設けた。

- 講義室で体験実験を実施できるようにバッテリーで稼動できること。ただし、交換の手間を減らすため乾電池は使用しないこと
- いつでも、誰でも製作できるように、供給持続性に不安がある部品、入手が困難な部品は用いないこと。同じ理由で専用部品の製作はしないこと。
- 制御工学の導入教育を多くの場面で容易に行なえるようにすることが主目的であるので、コスト要因となるような過度な拡張性を求めないこと。

上記の条件のもとで検討を行なった結果至った設計変更の詳細を以降で順に示す。なお、以降では前章の実験装置を旧型機、本節で示す実験装置を新型機と称することとする。

旧型機の部品費の約50%をモータが占めている。このモータはエンコーダが付属しているものの中では安価であるが、エンコーダを使用しなければ、さらに安価なモータは多数存在する。よって、部品費を削減するために、角度の検出はポテンシオメータで行なうこととした。モータおよびギヤボックスはタミヤ社製ミニモータ標準ギヤボックス(Item No. 70188)^(注2)またはミニモータ多段ギヤボックス(Item No. 70190)^(注3)を用いる。使用したギヤ比はそれぞれ9.5:1, 9.7:1である。この変更により、モータの費用低減とともに、モータの軽量化、さらにはモータ駆動電圧の低電圧化も図ることができる。

角度の検出にはポテンシオメータを使用する。モータ印加電圧を変化させることでアームの定常回転角速度が変化することを確認させるため、ポテンシオメータは無限回転が可能なのでなければならない。またさらに、全角度域でFB制御を行なうために、無限回転でありながらも不感帯がないものが

(注2) http://www.tamiya.com/japan/products/70188mini_gearbox/index.htm

(注3) http://www.tamiya.com/japan/products/70190mini_multiratio/index.htm

Fig. 2 Method to join potentiometer to the motor shaft

Fig. 3 Potentiometer joined to the motor shaft

必要である。これらの条件を満足するために、ポテンシオメータには小型で無限回転が可能なアルプス電気社製ポテンシオメータ RDC803001A を用いる。ポテンシオメータとアーム軸との結合は Fig. 2 のようにポテンシオメータの上からハトメをかしめて取り付けた。取り付けた写真を Fig. 3 に示す。この取り付けには手加工が必要になるため製作の難度が高く、提案する実験装置をキット化する場合の障害となっている。

旧型機ではマイコンシステムに Arduino Uno を用いていたが、新型機では Arduino Pro Mini 328 - 5V/16MHz を用いることとした。これにより、マイコンのコストを $\frac{2}{3}$ に圧縮することができる。また、Arduino Uno と Arduino Pro Mini は同じマイコン ATmega328 を使用しているの、基本的には旧型機で開発したソフトウェアを新型機に流用することができる。ただし、角度の計測をエンコーダからポテンシオメータに変更したため、それに伴う改変は必要である。特にポテンシオメータは無限回転型であるために、一回転を越える角度の計測についてはソフトウェアで対応する必要がある。また、実装する制御則も変更の必要がある。

モータの小型化とマイコンシステムの変更によって電源の低電圧化も可能になった。そこで、バッテリーには 3.7V の充電型リチウムイオン電池^(注 4)を 2 つ使用することとした。一方はマイコン用であり、もう一方はモータ駆動用である。以上の構成部品を接続するための周辺回路には、Spark Fun 製の Koala ボード^(注 5)、モータドライバ^(注 6)、バッテリー充電器^(注 7)を用いた。モータドライバは旧型機に使用していたものよりも応答が高速なものである。

実験装置の回路図を Fig. 4、製作したボードおよびバッテ

Fig. 4 Connection diagram of revised experimental system

Fig. 5 Main board

Fig. 6 Main board with batteries

りを接続した場合の写真をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す。バッテリー表面はアルミで覆われているので、基盤との接触によるショートを防止するため、バッテリーには紙や絶縁テープなどを巻いている。マイコンには Koala ボードに接続するバッテリーから給電する。一方、モータはバッテリー充電器に接続するバッテリーを使用する。Koala ボードおよびバッテリー充電ボードは USB からの給電によるバッテリー充電回路が実装されているので、それぞれを PC などの USB ポートに接続することによりバッテリーに充電することができる。なお、Koala ボードと PC 間の USB 接続はバッテリーへの充電と同時に PC とマイコン間の通信にも使用される。この通信手段を用いることで、特別なコストをかけることなく、この実験装置を体験講義以外のより高度な目的にも使用するような拡張性を実現することができた⁷⁾。

(注 4) <http://www.sparkfun.com/products/339>

(注 5) <http://www.sparkfun.com/products/8722>

(注 6) <http://www.sparkfun.com/products/9457>

(注 7) <http://www.sparkfun.com/products/10217>

Table 1 Comparison of sizes and weight

	old system	new system
size [mm]	110 × 260 × 108	87 × 177 × 90
weight [g]	805	365

製作した実験装置の外観を **Fig. 7**, **Fig. 8**, **Fig. 9** に示す。Fig. 7 は上面からの写真である。下側のポテンショメータはモータへの印加電圧値や位置決め目標値を与えるものであり、上側のポテンショメータはFB制御のゲインを定めるものである。Fig. 8, Fig. 9 はいずれも側面からの写真である。Fig. 8 の左側のスイッチはFB制御のON/OFFを切り替えるものであり、右側のスイッチは目標値の自動入力ON/OFFを切り替えるものである。Fig. 9 のスイッチは電源スイッチである。

これらの構成変更により実験装置1台あたりの部品費は約9,000円となり、旧型機から4割程度削減された。旧型機と新型機の大きさを比較した写真を **Fig. 10** に示す。また、各実験装置の大きさ、重量を **Table 1** に示す。ただし、Table 1 の大きさにはUSBケーブルは含まれず、重量には電池が含まれている。Fig. 10, Table 1 より、実験装置の小型化・軽量化が実現されていることが確認できる。さらに、旧型機よりもギヤの摩擦が小さくなったことでバックドライバビリティが向上し、アームを指で回転させた際にFB制御の効果を確認しやすくなった。

また、角度計測をエンコーダからポテンショメータに変更したことで、エンコーダパルスをカウントするための割込処理が不要となった。これにより、処理負荷が軽減され、演算処理能力の余裕が大きくなった。3章の体験講義のための処理負荷はそれ程高くはないが、処理能力に余裕があれば実験装置のほかの目的への応用が容易となる。

USBを経由してPCと通信できることから、PC上で制御結果や各機器を操作した結果を確認することができる。この機能は実験装置の構成要素とその働き・接続の学習に活用することもできる。そこで新型機ではメインボードを実験装置に固定するのではなく、実験装置からボードを着脱できるように設計した。実際、Fig. 6のメインボードは実験装置から分離した状態を示したものである。メインボードは、実験装置内の基盤上のコネクタに直接差すことで実験装置に接続できるようにした (**Fig. 11**)。さらに、メインボードを取り外した際にモータへ電力を供給し、さらにセンサ信号を取得できるようにするために、実験装置には対応するケーブル・コネクタも設置した。

以上のように構成したことにより、メインボードを接続する基盤を実験装置とは別に用意することで、制御系の構成要素を順に接続しながら、それらの動作を確認することが可能となった。**Fig. 12** は操作用のポテンショメータと実験装置のモータ部・センサ部をコネクタを用いて接続できるようにした例である。Fig. 12の左図はユーザが操作するためのポテンショメータである。Fig. 12の構成でメインボードのUSB

Fig. 7 Top view of the experimental system **Fig. 8** Mode switches **Fig. 9** Power switch **Fig. 10** Comparison of the experimental systems

Fig. 11 Inside of the experiment system

を PC に接続し、PC 上の応答を見ながら各機器を順に接続していけば、操作用ポテンショメータ、モータ、角度計測用ポテンショメータの動作を確認しながら、それらの接続関係と働きを理解することができる。

4.2 実験装置の応答特性

旧型機は体験講義に使用することのみを目的としていた。一方、新型機は USB 接続を活用することで、体験講義以外の目的にも使用可能である。そこで本節では、新型機の有用性を検証するために、新型機の応答特性を示しながら新型機がどの程度の教育目的に堪えられるのか検証する。

旧型機では体験講義のための FB 制御則に PID 補償器を用いていた。一方、新型機では比例制御のみで不安定にすることができたので、比例制御のみを用いている。比例制御のみで不安定になるのは、主に離散化の影響によるものである。以下にその根拠を示す。

ここでは、制御対象の伝達関数を DC モータの典型的な伝達関数

$$P(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$

とみなして考える。ステップ応答から T , K を求めると $T = 0.0552$, $K = 14.7$ である。連続時間系の枠組でこの制御対象を正のゲイン $K_p > 0$ で比例制御を行なうと、任意の $K_p > 0$ に対して閉ループ系は安定である。これに対し、 $P(s)$ をサンプル周期 10 ms でゼロ次ホールド等価の意味で離散化すると、つぎのパルス伝達関数が得られる。

$$P_d(z) = \frac{0.0126z + 0.0118}{z^2 - 1.83z + 0.834} \quad (1)$$

この伝達関数に比例制御を施すと、閉ループ系は比例ゲイン $K_p > 0$ が $0 < K_p < 14.0$ のときは安定であるが、 $K_p > 14.0$ で不安定となる。実際の実験装置でも、ほぼ同等の値で不安定化が発生している。 $K_p = 10$, $K_p = 20$ のときの実験およびシミュレーションの結果を、それぞれ Fig. 13, Fig. 14 に示す。なお、本実験装置のモータ印加電圧は ± 3.7 V なので、シミュレーションでは制御入力に $[-3.7, 3.7]$ の範囲の飽和を設定している。Fig. 13, 14 から、応答の傾向はおおよそ一致していることが確認できる。

以上の事実は比例制御で不安定化されることの合理的な根拠を与えているが、学部講義では離散時間システムは扱わない。よって、上記の理由を該当授業中で詳細に説明するこ

Fig. 13 Step responses ($K_p = 10$) Fig. 14 Step responses ($K_p = 20$)

ともできない。しかしながら、提案する体験講義の主目的は FB 制御系において不安定化が発生することを体験させることであるので、体験講義の時点では不安定化の機序の詳細まで理解させる必要はない。また、体験講義では学生は実験装置の振舞いを目視するのみであり、Fig. 13, 14 のような応答を見ることはできない。そのため、体験講義の時点で応答が一致しているか否かが問題になることはない。

もともと本実験装置は高精度な補償器設計を活かせるほどの精度も有しておらず、また連続時間システムとして近似できるほどサンプル周期を短くすることもできない。そのため、新型機の構想当初は本実験装置を定量的な評価に用いることは想定していなかった。しかしながら、Fig. 13, 14 が示すように、新型機は (1) 式のモデルと全く異なる振舞いをするわけではなく、モデルとおおよそ（当初の著者らの予想よりも遥かに）同じような応答を示すことがあきらかとなった。そこで、高精度な制御には堪えられないものの、新型機をある程度の定量的な評価を伴う実験に用いることは可能と思われる。

ある程度定量的な評価を伴う実験として、具体的には以下のような実験は可能である。

- 一定目標値への追従制御において、比例制御では定常偏差が発生すること。比例ゲインを大きくすると定常偏差は小さくなるがオーバーシュートが発生すること (Fig. 15)。
- 比例制御に加えて積分制御を行なうことにより、定常偏

Fig. 12 Explicit connection of control equipments

Fig. 15 Step responses ($K_p = 10$) Fig. 16 Response for sinusoid of $\omega = 0.8$

差をきわめて小さくできること (Fig. 15).

●制御対象に正弦波を印加し十分時間がたつと、対象の出力も同じ周波数で振動すること。また、周波数によって入出力の振幅比と位相差が変化すること (Fig. 16, Fig. 17). ここで, Fig. 15 は PI 制御

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

によって目標値追従を行なった結果である。いずれの場合も目標値は $\frac{\pi}{3}$ である。Fig. 15 の一点鎖線、破線は $K_i = 0$ とした場合、すなわち比例制御のみを行なった場合である。また、Fig. 16, 17 で与えた入力電圧はいずれも 3V である。正弦波の角周波数はそれぞれ $\omega = 0.8, 40$ であり、図の横軸は時間を各周期でそれぞれ正規化したものである。

上記の実験で扱う現象は、はじめて制御工学を学ぶ者にとってはあたりまえのものではなく、むしろ俄かには信じ難いものである。そのため、以上のような現象を理論の説明の前に体験・観察させておくことは、その後の理論学習を確かなものにするために重要である。また、そのような体験・観察においては応答の傾向がつかめれば十分であるので、この程度の実験装置であっても有効に活用することができる。また、本論文で提案した実験装置は安価に整備できるので、多数の実験装置を用いて多くの学生に対して同時に実験を行なわせることで、授業全体を効率的に進めることができる。

体験講義と同様に、上記の実験においても最初はモデルとの比較を行なう必要はない。実際、Fig. 15~17 にはモデルの応答は示されていないが、それぞれの図において学習者が

Fig. 17 Response for sinusoid of $\omega = 40$

学ぶべき重要な現象があらわれている。制御工学の実践においてはモデルとの比較やモデルに基づく議論が中心になる。しかしながら、上記の実験のように、教育においてはモデルを導入する以前に学んでおくべきものは多い。

繰り返しになるが、本実験装置は高精度な補償器設計を活かせるほどの精度は有していない。たとえば Fig. 15 の PI 補償器を用いて $0, \frac{\pi}{3}, 0, -\frac{\pi}{3}$ の目標値を繰り返し与えると、Fig. 18 の応答が得られる。Fig. 18 では回転の方向が逆転する際に大きなオーバーシュートが生じている。これはギヤのバックラッシュの影響によるものと考えられる。このような応答を生じる可能性があるので、本実験装置は高精度な制御系の性能検証には不適である。たとえば、ナイキスト安定判別法や周波数整形に基づく設計の正しさを検証するのであ

Fig. 18 Response of PI control

れば、たとえ整備できる台数が少なくても、より高精度な実験装置を用いたほうがよいと思われる。しかしながら、精度が不足しているからといって制御工学教育に使えないわけではなく、この程度の実験装置であってもすでに述べたようなさまざまな体験の目的には十分堪えることができる。また、同じナイキスト安定判別法を使う場合であっても、FB制御系にロバスト性が必要であることを印象づけることが目的であれば、本実験装置の精度の低さはむしろ教育目的に沿ったものとなる。

本論文で提案した実験装置を用いて、2012年度の第一回目の講義で体験講義を行なった。2012年度は体験講義以外にも授業改善を行なったので、それらの効果については別に報告する予定である。体験講義のすべての項目が終了した後も一部の学生は項目(1)の実験に興味深そうに続けているようすが見受けられた。こうしたようすは、アンケート結果であきらかとなった経験の希薄さを裏づけるとともに、本論文で提案している実験装置が興味の喚起に役立っていることを裏づけるものでもある。

5. おわりに

文献5)で提案されている体験講義をより安価かつ効果的に実現するために、実験装置の設計を変更することでコストダウンを実現した。本論文で示したシステムはすべてが安価かつ入手容易な汎用部品で構成されているため、将来的には大学だけでなく中学生・高校生でも製作できるようなキット化も検討している。

謝辞 (財)能力開発工学センターの矢口哲郎様には本論文のアンケート調査のきっかけとなった、示唆に富むコメントをいただきました。感謝申し上げます。また、実験装置の製作にご協力いただいた大須賀・石川研究室および浅井研究室内の学生各位にも感謝申し上げます。また、アンケートに協力あるいは体験講義を受講してくれた大阪大学工学部機械工学科目の学生諸君にも感謝します。

参考文献

- 1) 有本ほか：制御工学の教育特集号，システムと制御，**27**-1, 2/72 (1983)

- 2) 三平ほか：ミニ特集「制御の教え方を訪ねて」，計測と制御，**46**-9, 681/739 (2007)
- 3) D.S. Bernstein, H. Ashrafiuon, et al.: Innovations in undergraduate education, IEEE Control Systems Magazine, **24**-5, 18/94 (2004)
- 4) H. Ashrafiuon, D.S. Bernstein, et al.: Innovations in undergraduate education II, IEEE Control Systems Magazine, **25**-1, 21/96 (2005)
- 5) 浅井，大須賀，石川，井上：体感型制御実験装置を用いた動機づけ講義とその効果，第54回自動制御連合講演会講演論文集，1806/1811 (2011)
- 6) 石川，北，大須賀：Arduino/Processingを用いたシステム制御実験のラピッドプロトタイピング，第53回自動制御連合講演会予稿集，245/250 (2010)
- 7) 浅井，井上，石川，大須賀：体験型導入講義およびコア科目実験のための安価な小型制御実験システム，第12回制御部門大会，P0157 (2012)

[著者紹介]

井上 正 樹 (学生会員)

2009年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。同年同博士後期課程へ進学。2010年より日本学術振興会特別研究員(DC2)となり、現在に至る。時変システムの制御理論の研究に従事。システム制御情報学会の学生会員。(研究当時)

石川 将 人 (正会員)

1994年東京工業大学工学部制御工学科卒。2000年同大学院情報理工学専攻博士後期課程修了，博士(工学)。同大学助手，東京大学助手，京都大学講師を経て，2010年より大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻准教授となり現在に至る。非線形制御，非ホロノミックシステム，移動ロボットなどの研究に従事。システム制御情報学会，日本ロボット学会，日本機械学会，IEEEの会員。

浅井 徹 (正会員)

1996年東京工業大学大学院理工学専攻博士後期課程修了。同年日本学術振興会特別研究員。99年大阪大学大学院工学研究科助手，2002年同研究科講師，2005年同研究科助教授，2007年同研究科准教授となり，現在に至る。システム制御情報学会の会員。博士(工学)。

大須賀 公 一 (正会員)

1984年大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程(制御工学)修了。同年(株)東芝入社，総合研究所勤務。86年大阪府立大学工学部助手。その後，講師，助教授，京都大学大学院情報学専攻助教授，神戸大学工学部教授を経て，2009年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻教授となり現在に至る。ロボティクス，制御工学，レスキュー工学などの研究に従事。IEEE，システム制御情報学会，日本機械学会，日本ロボット学会などの会員。工学博士。