

授業内演習のための自動制御実験装置の開発

大塚 弘文* 葉山 清輝**

Development of An Experimental Equipment for Lecture of Feedback Control System

Hirofumi Ohtsuka*, Kiyoteru Hayama**

For a purpose of getting a well-understand for the effects of feedback control, there exist several types of the experimental equipment. One of them is a “ball and beam” system, by which the stabilizing control method for single input single output system can be learned, because it can directly show the effect of control as the balance of beam and location of the ball to target position. In this report, the development of simple experimental equipment of “ball and beam” using an Arduino compatible micro-computer is described. The advantage of the developed experimental equipment are (1) small size, (2) low cost, and (3) ease for construction.

キーワード：制御工学, フィードバック制御, 実験装置, ボール&ビーム, 安定化制御

Keywords : Control system, Feedback control, Experimental equipment, Ball and beam, Stabilizing

1. はじめに

動的システムの数学的モデル化と、これを利用した時間応答・周波数応答特性解析法に基づくフィードバック制御系の解析と設計に関する基本技術は「制御工学」として電気・電子工学系技術者および機械工学系技術者を育成する高等技術者教育で実施されており、フィードバック制御技術の適用対象は極めて広範に及ぶ。数学的な基礎知識の習得の後、初学者が制御システム設計の演習を通じてフィードバック制御の効果を確認することが習熟に効果的であることから、机上での計算演習のみならず制御系 CAD を活用したシミュレーション実験を取り込む書籍が近年多く出版されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、本来はコンピュータをシミュレータとして活用するのではなく、実機に対する制御装置として制御システムを設計構築し、それによる制御効果を実体験として確認・検証することによって、学習効果はより高まると期待できる⁽³⁾。そのような視点から、制御実験の対象モデルとして多用されるものに、例えば倒立振り子系、ボール&ビーム系などが従前より検討されてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。コンピュータを利用したフィードバック制御では、制御装置をパーソナルコンピュータやマイコンボードによって構成し、制御則をプログラミング言語で記述し、制御信号を上述の実験系のアクチュエータに加え制御動作を実現する。

そのため、学習者に対してプログラミング技術の習得を事前準備として必要とするだけでなく、実験装置の規模が肥大となり、実験施設での常設を余儀なくされるものが多い。さらに、従来の理論解説および数値シミュレーション演習で構成した授業展開の場合よりも、制御実験を授業と連動し講義室において機動的に実施することで技術習得への向上心の高揚や理解度の向上が期待されることから、近年実験装置の小型化が図られてきているものの、授業内で運用が可能なシステムは希少である。

そこで、本研究では、プログラミングに関する事前知識習得の負担を軽減し、講義室内で授業と連動する制御実験の実施を可能とする簡易制御実験装置の開発を行った。本稿では開発した簡易制御実験装置の詳細と授業内での運用事例および得られた知見について報告する。

2. ボール&ビーム制御実験システムの概要

本研究では、ボール&ビーム系(図1)を開発する実験システムとして採用した。図示のように、長さ L [m]の梁(ビーム)の上に質量 m [kg]、半径 R [m]の球(ボール)が乗っており、ビームはサーボモータで回転駆動され水平状態からの傾斜角 α [rad]が与えられるとする。傾斜角 α の調節により、ボールをビーム上の任意の位置に移動させ停止させる制御問題、すなわち位置決め制御問題が学習者に課される設計課題となる。

2.1 数学モデル⁽⁵⁾

いま、ビーム上で転がる球について、スリップが生じず、かつころがり摩擦の影響は無視できると仮定する。さらに、ボールの加速度のビーム傾斜角加速度への影響が十分に小

* 制御情報システム工学科
〒861-1102 熊本県合志市須屋2659-2
Department of Control and Information System Engineering
2659-2, Suya, Koshi, Kumamoto 861-1102

** 情報通信エレクトロニクス工学科
〒861-1102 熊本県合志市須屋2659-2
Department of Telecommunication and Electronics Engineering
2659-2, Suya, Koshi, Kumamoto 861-1102

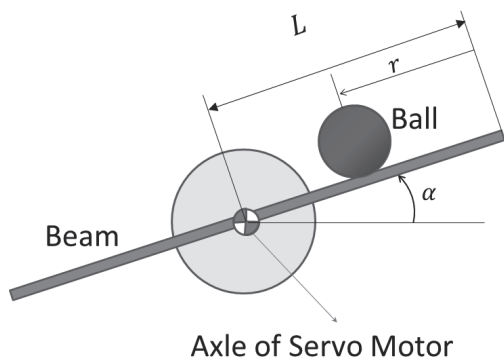


図1 ボール&ビーム系の簡易モデル
(Fig.1 Simple Model of "Ball and Beam")

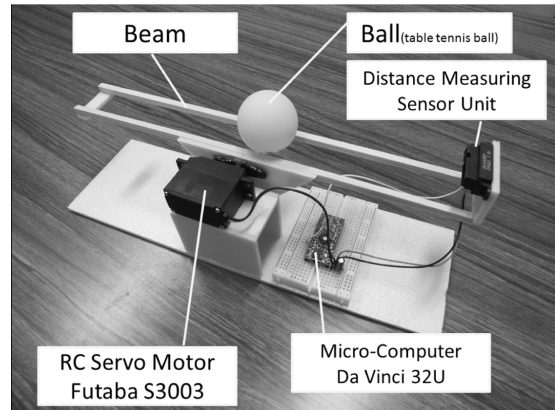


図2 ボール&ビーム実験装置
(Fig.2 "Ball and Beam" Experimental Equipment)

さく無視できると仮定すると、ボールのころがり運動に関するラグランジュの運動方程式は次式で与えられる。

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right)\ddot{r}(t) + mg \sin(\alpha(t)) - mr(t)\dot{\alpha}(t)^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 J はビームの慣性モーメントを表す。ビーム傾斜角が微小 ($\alpha \approx 0$) であるとき、ボール&ビーム系の運動方程式 (1) は以下の線形微分方程式に近似できる。

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right)\ddot{r}(t) = -mg\alpha(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式が設計に用いられるボール&ビーム系の数学モデルであり、原点に極を有する2次一入出力システムである。

2.2 PD 制御則

ボールの目標変位を r_i (一定値) とし、操作量 $\alpha(t)$ を次式：

$$\alpha(t) = K_p(r(t) - r_i) + K_d\dot{r}(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

のPD制御則で与えることにより、(2) のシステムモデルは

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right)\ddot{r}(t) + mgK_d\dot{r}(t) + mgK_p r(t) = K_p r_i \quad \dots\dots\dots (4)$$

なる2次標準系となり、 $K_p > 0$ 、 $K_d > 0$ なるPD制御則ゲインの設定によって安定なフィードバック制御系を構成できることが知られている。具体的な K_p 、 K_d の決定には種々のフィードバック制御系設計手法を適用でき⁽¹⁾、授業内でも計算機利用により短時間で数値シミュレーションを行える簡便なモデルとなっていることが分かる。線形化モデルの導出のために設定した「仮定」が合理的なものであることを確認する意味でも、実機実験は極めて有用であり、制御効果がビーム上のボール挙動として直観的に確認できることはボール&ビーム系の最大の特長といえる。

3. 実験装置の開発

上述の特長を持つボール&ビーム系の簡易モデルに整合

し授業内演習においても容易に活用できる小型実験装置を開発することが本研究の主目的である。図2に開発した実験システムを示す。

3.1 機構部

ビーム部の回転駆動用アクチュエータにはRCアナログサーボモータ・Futaba製S3003を使用している。モータ支持台およびベース板はパルサ材を使用しており、装置寸法は奥行100mm・幅300mm・高さ100mmである。RCアナログサーボモータの出力軸回転角度は後述するマイコンのPWM出力信号により回転角度指令制御(基準位置に対し±90度を指定可能)を行う。ビーム部は5mm角工用ヒノキ角材を使用し、サーボモータホーンとの接合部はホットボンドにより接着固定している。ビーム上に載るボールは市販の卓球ボール(直径40[mm]、重量2.7[g])を使用する。

3.2 制御演算部

Arduinoブートローダを搭載しArduino開発環境を利用可能なDa Vinci 32Uを制御用マイクロコンピュータ(以下マイコン)として使用する。Da Vinci 32UはATMEGA32U4をCPUに使用した10ビットA/Dコンバータ内蔵超小型マイコンボードであり、図2に示すようにベース板上に接着固定したブレッドボード上で実装している。前述のRCアナログサーボモータの駆動電源および上記マイコン駆動電源は制御プログラム開発用パーソナルコンピュータと制御プログラム転送用USBケーブルによって5[V]を供給する。

3.3 ボール位置計測部

SHARP製測距センサGP2Y0A21YK0Fを図2に示すように、ビーム端に固定した。同センサは、PSD(position sensitive detector; 位置感知検出器)とIRED(infrared emitting diode; 赤外線発光ダイオード)と信号処理回路で構成される。測定対象物(ボール)までの距離により、

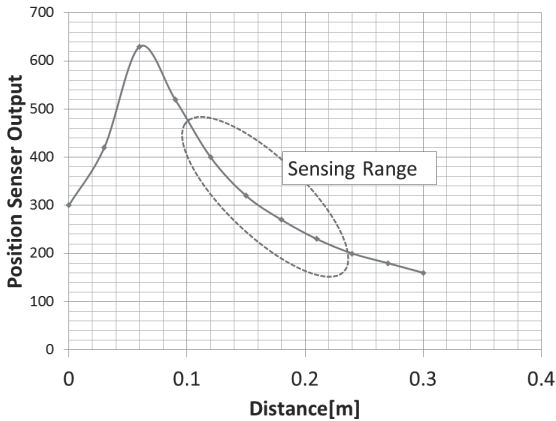


図3 測距センサ出力測定結果
(Fig.3 Output signal of GP2Y0A21)

IREL が照射した赤外線が PSD へ入射する角度の変化に応じて信号処理回路はアナログ電圧出力（最大値は電源電圧3.3V）を行う⁽⁷⁾。本実験装置では、この出力電圧信号を上述した制御用マイコンにより A/D 変換し（A/D 変換値は 0 - 1023 の整数値）、制御演算に使用する。図3に同センサによるボール位置計測結果例を示す。

3.4 計測制御プログラムと制御実験結果例

Arduino 開発環境をパーソナルコンピュータ上に構築し、計測制御用スケッチ（プログラムソースコード）を作成し、USB ケーブルを介して制御用マイコンに転送・実行させる。Da Vinci32U は USB シリアル通信制御が可能であることから、制御実行結果はシリアル通信によりパーソナルコンピュータによりモニタリングが可能である。学生実験において学生へ提供したサンプルスケッチ（サンプルコード）を以下に示す。

ここでは、図3に示したように測距センサ出力電圧特性は非線形性を示すものの目標位置をセンサ固定端から100 [mm] 以上に設定し、その近傍で位置決め制御を行う場合は、出力電圧特性の直線性が高いと考え、サンプルスケッチでは計測値をフィードバック信号として直接使用している。前述の PD 制御に積分補償項を付加した場合の制御実験結果例（ボール位置計測データ）を図4に示す。P ゲインに0.02、D ゲインに0.06、積分ゲインに0.001を設定し、位置決め目標を300（約0.15m）に設定した場合の実験結果である。また、制御周期は loop（）内で、delay（150）すなわち150[ms]と設定した。センサの計測ノイズの影響とみられる振動が発生しているものの目標位置近傍でボールのバランスを保つフィードバック制御が達成できていることが分かる。また、制御途中で矢印で示した時点で、ボールを指で弾くインパルス状外乱を加えているが、いずれの場合もボール位置制御を達成していることが分かる。

4. 運用例

前章に示した開発したボール&ビーム実験装置を、大塚

```
#include <Servo.h>

const int analogInPin = A0; // Analog input pin that the potentiometer is attached to
int servoCenter = 100; // variable to store the servo position
int sensorValue = 0; // value read from the pot
int posCenter=300;
float p=0, pp=0, i=0, d=0, pid=0;

Servo myservo; // create servo object to control a servo
// a maximum of eight servo objects can be created

void setup()
{
  myservo.attach(9); // attaches the servo on pin 9 to the servo object
  myservo.write(servoCenter); // tell servo to go to position in variable 'pos'
  delay(5000);
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  sensorValue = analogRead(analogInPin);

  Serial.println(sensorValue);

  pp=p;
  p=-(sensorValue-posCenter);
  i+=p;
  d=p-pp;
  pid=p*0.03+i*0.001+d*0.08;
  myservo.write(servoCenter+pid); // tell servo to go to position in variable 'pos'

  delay(200); // waits 15ms for the servo to reach the position
}
```

リスト1 PID 制御用サンプルスケッチ
(List 1 Sample sketch of PID control)

が担当する平成25年度電子情報システム工学専攻1年次前期開講選択科目「計測と制御」（2単位）において試験運用した。履修生数24名に対して3名/班の構成により100分間の授業時間で実施した（図5）。なお、本科において制御工学の基礎を学習した学生は8名（全体の3分の1）であり、他の学生は初学者であるが、本実験演習は講義最終回において実施したため、全員がフィードバック制御系の特性解析やPD制御等、制御系設計の基礎を受講していた。授業時間内では、まず実験装置および制御プログラムの簡単な解説を行った上で（1）センサー特性計測実験、（2）RCアナログサーボモータ単体での角度指令実験、（3）ボール位置決め安定化制御実験（PID制御ゲインの調整、制御周期の調整による制御性能への影響検証）の3項目の実験を順次行った。実験の進捗は班ごとに異なるが、概ね説明：30分、実験（1）：20分、実験（2）：20分、実験（3）：30分の時間配分で実施できた。実験実施後に実験レポート作成を課した。実験レポートに記載された学生コメントには以下のような意見が大勢を占めた。

- ・理論やシミュレーションだけでなく、実際に実験装置を使用して制御に触れることができたので、制御工学を学んできたものとしてとてもためになった。
- ・実験を行ってPID制御について理解を深めることができた。
- ・PID制御以外の方法で制御器を設計して制御してみ

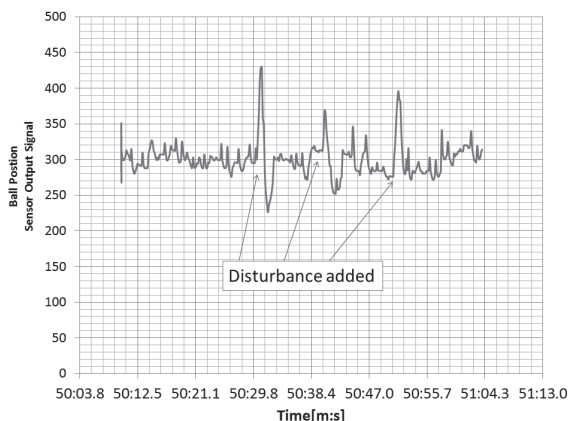


図4a 制御実験結果 (ボール位置)
(Fig.4a Experimental Result (Ball Position))

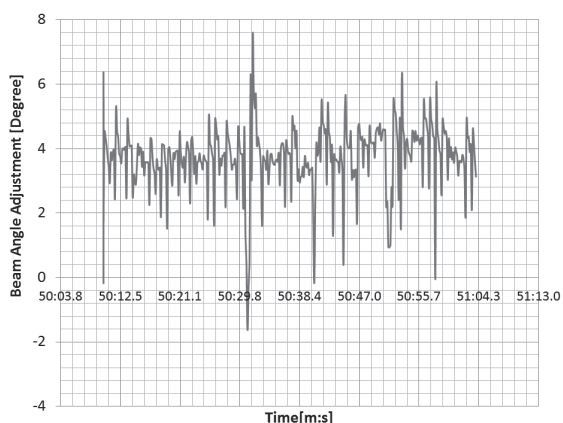


図4b 制御実験結果 (ビーム制御角)
(Fig.4b Experimental Result (Beam Angle Control Signal))

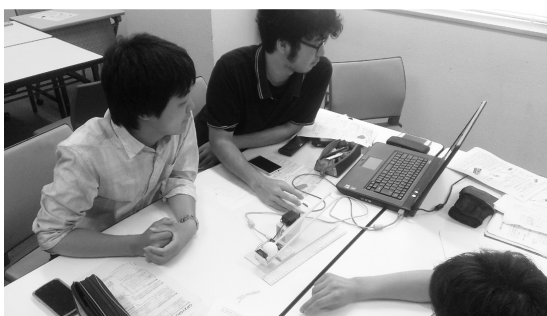


図5 制御実験風景
(Fig.5 Experimental sight for advanced course lecture)

たい。

- ・今までレポートで制御の問題を解いてきたが、PIDゲインの調整で制御にどのような変化が表れるのか実感できなかった。しかし、今回の実験でPIDゲインを自由に变化させてみたことで制御ができなくなったり、ビームが激しく動いたりして驚いたが、こんな風に制御の効果が変わるといのがよく分かった。
- ・紙の上で計算するだけでは分からないことが、実験を通して初めて理解できた。

これらの学生コメントから、従来の理論解説および数値シミュレーション演習で構成した授業展開の場合よりも、開発した簡易型制御実験装置を用いた実験演習を授業と連動して講義室において機動的に実施する授業手法によって技術習得への向上心の高揚や理解度の向上などの面で所期の目的達成が期待できることが分かった。

5. 今後の展開

前述したように主に計測ノイズの影響のため、サンプルスケッチを用いた制御実験結果ではボールを目標位置で完全に静止させるような良好な制御性能を発揮する制御パラメータの調整は困難である。計測した信号の雑音除去対策など計測技術の講義内容との連動した実験運用を行った上で、制御実験へ展開するといった運用の拡大を検討し、今回の試験運用で確認された前述の顕著な学習効果をより定量的に分析することを計画している。

制御性能の向上のためには、組込みシステムで多用されるタイマー割込みの活用が有効となると考えられるが、それらマイコン組込みシステムにおけるプログラミング技術習得を目的とした授業での運用展開も検討の余地がある。

また、提案実験装置の運用を前提とした知識解説部分と実験演習部分とが有機的に連携する構成での新しいタイプの独習テキスト開発は興味深い。そのようなタイプに類する既存の教材に文献⁶⁾があるが、提案教材はそれと比較して非常に安価かつ平易に実験装置を製作できることから、実験装置製作から実施する演習重点型授業展開を図る場合においても、有用性が高いと考えられ、試験的運用を通して学習効果の検証を行う計画である。

(平成25年9月25日受付)

(平成25年11月6日受理)

参考文献

- (1) 足立修一：MATLABによる制御工学，東京電機大学出版局（2007）
- (2) 川田昌克，西岡勝博，井上和夫：MATLAB/Simulinkによるわかりやすい制御工学，森北出版（2001）
- (3) 山田健仁，芳川健：リアルタイムデジタル制御とネットワーク技術の修得を目的とした遠隔制御実験システムの検討，徳山工業高等専門学校研究紀要，Vol.30，pp.13-20（2006）
- (4) Wen Yu, Floriberto Ortiz: Stability analysis of PD regulation for ball and beam system, Proceeding of the 2005 IEEE Conference on Control Applications, Tronto, Canada, August 28-31, pp.517-522（2005）
- (5) John Hauser, Shankar Sastry, and Peter Kokotovic: Non-linear Control Via Approximate Input-Output Linearization: The Ball and Beam Example, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.37, No.3, pp.392-398
- (6) 平田光男：ArduinoとMATLABで制御系設計をはじめよう！，TechShare株式会社（2012）
- (7) SHARP GP2Y0A21YK0F データシート，http://www.sharpsma.com/webfm_send/1489