

# 機械・金属加工を多用した 制御用教材開発

ポリテクセンター石川 伊藤 徹  
(石川職業能力開発促進センター)

## 1. はじめに

セミナーの開発過程においては、その訓練目標に対して実習教材の製作やテキストの作成および進め方などが並行して検討される。この中で、特にメカトロニクス関連の実習教材の製作では、その対象によって設計や部品の選定から機械加工、金属加工などの技能が必要となる。これらの作業には多くの時間が費やされ、このことが教材開発のネックとなっている要因と考える。

今回、制御関連のセミナーの実習教材として磁気浮上装置の製作を行った。これまで磁気浮上装置に限らず実習教材における制御理論と実験結果については、多くの書籍で述べられているが<sup>1)</sup>、装置の製作過程を含めて述べたものはあまり見当たらない。セミナー開発では、実習教材の製作が不可欠であり必ず出会うハードルであると考え、本文では磁気浮上装置の概要と製作過程から制御実験方法までの教材開発における一事例を述べる。

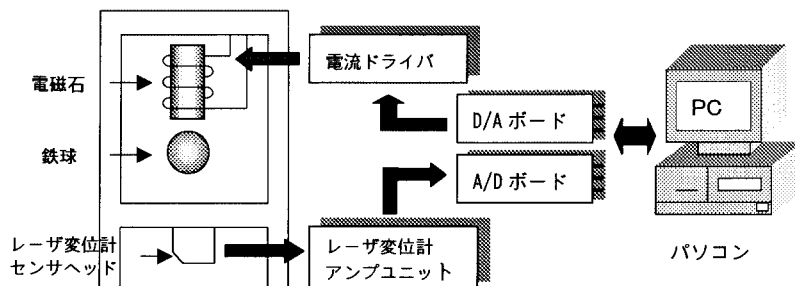


図1 実験装置の概要図

## 2. 磁気浮上装置の概要

図1に、磁気浮上の実験装置概要を示す。基本原理は、電磁石に対して操作量である駆動電流を制御することによって発生する電磁吸引力と、鉄球に働く重力と釣り合いを保つことである。これより鉄球をある定位置に浮上停止させることができる。

装置の上部には電磁石を取り付け、その高さを調整できる構造とした。制御をするためには、鉄球の位置と速度の2つの状態量を求める必要がある。鉄球の位置データは、非接触式のセンサであるレーザー変位計を使用しA/D変換器を介して測定した。速度は、位置データをもとにコントローラであるパソコン内部で差分計算によって求める。この2つの状態量をもとにフィードバックループを構成し制御を行

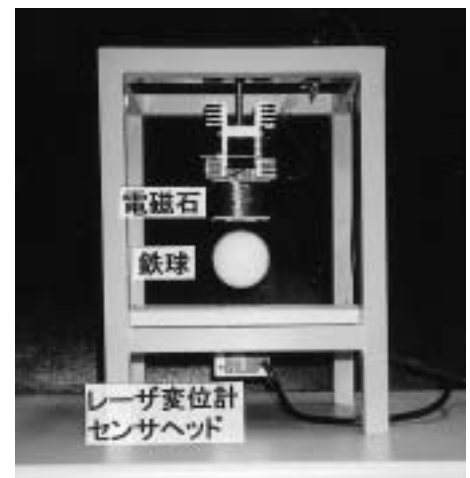


図2 磁気浮上装置

う。操作量である電磁石の駆動電流は、パソコンより制御アルゴリズムに従いD/A変換器を介して電流ドライバを駆動することによって得る。

### 3. 構成部品・機器

鉄球、電磁石等おもな部品の製作方法と、使用した機器の選定理由について述べる。

#### 3.1 鉄 球

鉄球の重量が小さくなるに従って小さな電磁吸引力で制御できることより電流値を低くでき、実験装置の小型化と低消費電力によって電磁石の発熱を抑えることができる。また、鉄球は、レーザ変位計による確実な位置測定のため適当な大きさが必要である。鉄球は厚さ0.8mmの鉄板をプレスによって半球に成形したものを2つ用意し、周囲を溶接することによって製作した。

その結果、鉄球の重量はその直径が57mmとしたにもかかわらず、中空であることより  $530 \times 10^{-3} \text{N}$  とすることができた。塊とした鉄球に比べて約14分の1の重量とすることができた。色は白色塗装とすることでレーザ変位計の感度を高めることができる<sup>2)</sup>。

#### 3.2 電 磁 石

電磁石は、EIコアの構造をした電源トランスを利

用し、E形コアの両端を切り落としボビンに挿入する中央部のみを鉄心として製作した。コイルに使用する導線には、用途によって太さや絶縁材料の種類、温度指数などの異なる多種多様なものがある。今回使用したのは、絶縁皮膜を含めて太さ0.35mm、温度指数が120 のポリウレタン銅線である。コイルは、旋盤を利用して巻いた。旋盤のチャックに電磁石の鉄心の部分をくわえ、回転速度を20rpm程度と低くする。また刃物台には樹脂パイプを固定し、その穴に導線を通し旋盤の自動送り量を導線の太さと同じ値に設定し、ボビンに巻き付けコイルを製作した。巻数はチャックの回転数を反射形の光電センサとユニバーサルカウンタで測定した。なお、電磁石の巻き数は約1400ターン インダクタンスは176mH、直流抵抗は32.0 であった。

次に、製作した電磁石の吸引力についての特性を実験により求める。電磁吸引力  $f$  は式(1)で表される。

$$f = \frac{Q}{2} \frac{i^2}{(z+Z_0)} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $i$  : 電磁石の駆動電流  
 $z$  : 電磁石と鉄球の距離  
 $Q, Z_0$  : 定数

図4は、鉄球が電磁石との距離  $z$  において平衡を保つのに必要な駆動電流  $i$  との関係性を求めた結果を示す。この実験では、距離  $z$  の間にアクリル板を挿入し、鉄球を吸引するに十分な電流より徐々に低下させ、落下する寸前の電流を求めた。

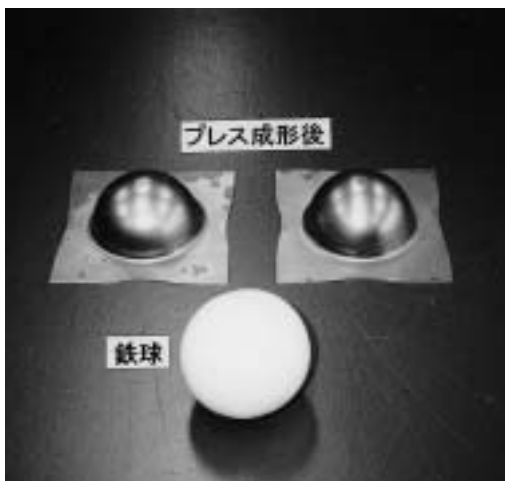


図3 鉄球の製作

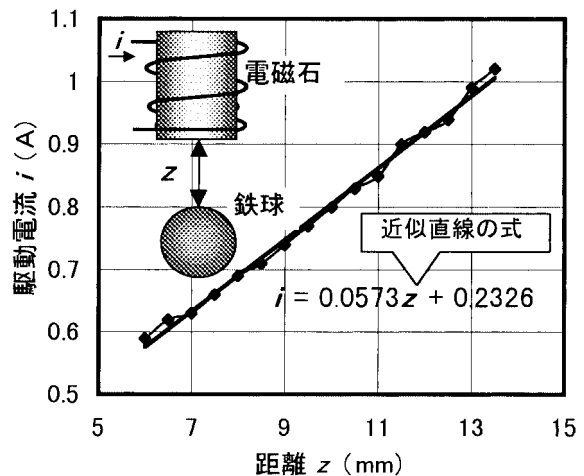


図4 鉄球との距離と駆動電流

### 3.3 レーザ変位計の選定

鉄球の位置の測定には、非接触センサをもつレーザ変位計を使用した。表1には、選定したレーザ変位計の仕様を示す。機種を選定するには、主に2つの条件によって決定した。1つは、対象物との距離測定において、どこからどこまでが可能なかを示す検出範囲である。検出範囲は基準距離±測定範囲で表すこととする。目標とする停止位置より外乱などによるある程度の上下変動に対しても正確な距離が得られる測定範囲を有する必要がある。2つ目は、センサとしての周波数応答である。入力周波数とセンサの出力の関係を表すボード線図<sup>2)</sup>における折点周波数は、制御におけるサンプリング周波数より十分に高くなくてはならない。

### 3.4 電流ドライバ

電磁石の駆動には、式(1)に示すように電流に比例した電磁吸引力が得られることよりアンプとして電流ドライバ(以下、ドライバと略す)を使用する。表2には、ドライバの仕様を示す。なおこの製品はモータのドライバとしても使用することができる。

表1 レーザ変位計の仕様

レーザ変位計：(株)キーエンス	
センサヘッド型式	LB-02
アンプユニット型式	LB-62
応答速度	0.15ms
折点周波数	3kHz( - 3dB )
基準距離	40mm
測定範囲	± 10mm
アナログ出力	- 4V ~ + 4V( 0.4V/mm )
電源電圧	DC12 ~ 24V ± 10%

表2 電流ドライバの仕様

ドライバ：サーボランド(株)		
型 式	SMCM4 - AI	
定格出力	電圧 ± V	88
	電流 ± A	3.6
	電力 W	316

ドライバの出力電流の指令方法は、パソコンより制御アルゴリズムに従って得られた出力データをD/A変換器より指令値として与える構成としたためアナログ入力型とした。図5はドライバに電磁石を接続したときのドライバに対してのアナログ指令電圧と電磁石の駆動電流の関係を求めた結果を示す。

### 3.5 組立・調整

装置は、中空の角鋼材を溶接して骨組みとし、さらに塗装を施し製作した。電磁石と下部に固定するレーザ変位計のセンサヘッドは、その鉛直方向が一致するように取り付ける。レーザ変位計は、検出範囲が限られているため電磁石の取り付け高さを調整する必要がある。したがって、実験に際してはまず電磁石より何mm下の位置で鉄球を浮上停止させたのか、距離  $z$  を決める。鉄球の下端とレーザ変位計上端の距離を表1に示す基準距離の40mmとするために、距離  $z$  と鉄球の径を合計した高さをもつ角材を電磁石の下端に密着させ、レーザ変位計の出力を計測しながら電磁石の取り付け高さを調整した。

## 4. 制御理論

式(2)は、図2に表される磁気浮上系に対する運動方程式を示す。

$$M\ddot{z} = Mg - \frac{Q}{2} \frac{i^2}{(z+Z_0)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $M$ ：鉄球の質量

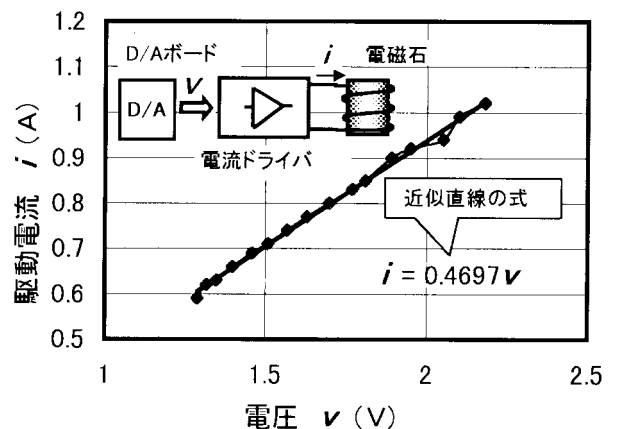


図5 ドライバへの指令値と駆動電流

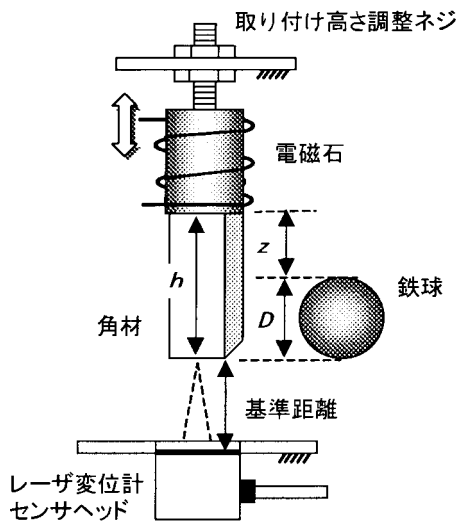


図6 電磁石の取り付け高さの調整

上式は、非線形微分方程式である。取り扱いを容易にするために  $z = z_{equ} + z, i = i_{equ} + i$  と定義し線形化を行った結果を式(3)に示す。

なお、 $z_{equ}$  と  $i_{equ}$  はそれぞれ平衡状態での電磁石と鉄球との距離および、電磁石の駆動電流を表し、 $z$  と  $i$  は平衡状態からの変化量である。

$$\frac{d^2}{dt^2} z = \frac{Qi_{equ}^2}{M(Z_{equ} + Z_0)^3} z + \frac{Qi_{equ}}{M(Z_{equ} + Z_0)^3} i \dots (3)$$

次に、定数である  $Q, Z_0$  の求め方について述べる。式(2)において平衡状態では  $\ddot{z} = 0$  であることより式(4)が成り立つ。

$$i_{equ} = \sqrt{\frac{2Mg}{Q} z_{equ}} + \sqrt{\frac{2Mg}{Q} z_0} \dots (4)$$

上式は図4における実験値の近似式に相当する理論式であることより  $Q$  と  $Z_0$  を求めた。

$$Q = 0.3224 \times 10^{-3}$$

$$Z_0 = 4.06 \times 10^{-3}$$

式(3)において、 $z_{equ} = 10.0\text{mm}, i_{equ} = 0.8\text{A}$  として、行列を用いて書き換えると式(5)となる。

$$\frac{d}{dt} x = Ax + Bu \dots (5)$$

$$x = \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1374 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -24.16 \end{bmatrix}$$

次に、式(5)の状態方程式で表されるシステムが可制御であるか検討する。可制御というのは、入力  $u$

によってシステムを希望の状態に移すことが可能であるということである。その判定は可制御行列、

$$V = [B \quad AB] \dots (6)$$

のrankで示される。本システムでは計算結果より  $\text{rank}(V) = 2$  のフル行ランクをもつことよりシステムが可制御である。また、行列Aの固有値は  $+37.1$  と  $-37.1$  であるので不安定なシステムである。そこで状態フィードバックという考え方によって制御を行う。この手法を用いた制御システムのブロック線図を図7に示す。この手法は状態量として鉄球の平衡状態からの位置の変化量  $z$  と速度  $\dot{z}$  を求め、各々に適当なゲイン  $k$  をかけフィードバックループを構成して制御を行う。式(7)は操作量  $u$  を示す。

$$u = r - kx = r - \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \dots (7)$$

式(7)を式(5)に代入すると、

$$\frac{d}{dt} x = Ax + Bu \dots (8)$$

$$= (A - Bk)x + Br$$

となり  $(A - Bk)$  が安定な行列となるようにゲイン  $k$  を選定することによってシステムを安定化することができる。なお、ゲイン  $k$  は、フィードバックゲインと呼ばれ極配置法を利用して求め、さらにシミュレーションによつての確認を繰り返して決定する。式(9)は、極を  $-25 \pm 5j$  としたときのゲインを求めた結果である。

$$k = [ -83.19 \quad -2.06 ] \dots (9)$$

## 5. 制御プログラム

制御プログラムはC言語で記述した。制御プログラムの内容は、主にインターフェイスボード (CONTEC AD12-16U(98)) のA/D, D/Aなどの初期化や設定項目の記述と、図7において点線で囲まれた制御の部分の記述となる。図8には制御の部分のみについてのプログラムを示す。なお、この部分については使用したインターフェイスボードを

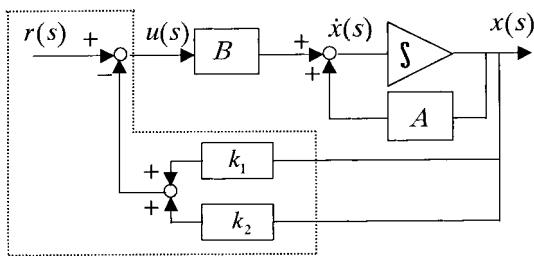


図7 ブロック線図

サポートする特有な関数である。また、これらの関数は“m308.h”において関数宣言されておりインクルードファイルとして指定する。

## 6. おわりに

制御用の実習教材としての磁気浮上装置について製作過程を含めて述べた。装置作りにおいて最も特徴的なことは、鉄球を中空で製作したことによって重量を軽くすることができたことである。これによって、操作量である駆動電流を小さくすることができ、電磁石の小型化とドライバのより低出力型の機種選定が可能となった。電磁石と鉄球の距離が6mm程度であれば、長時間の連続運転においてコイルの温度は手で触れて暖かく感じる程度で、ファンによる冷却の必要がない。

教材としての作りやすさとコストの低いものが求められ、複数台の製作にも有利である。新規のセミナー開発において実習教材は必要不可欠であり、とりわけメカトロニクス分野の教材製作では機械加工や金属加工、塗装などの技能が必要となり、身につけていけばよりよい物が製作できるのではないかと考える。

本実習教材を、フィードバック制御のみならず、C言語やインターフェイス等の関連したセミナーにも活用範囲を広げていきたい。

### <参考文献>

- 1) 例えば、森下，上野：デジタル制御工学 オーム社，pp.188 - 199，1992年．
- 2) レーザ式変位センサLBシリーズ取扱説明書，(株)キーエンス．

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include "m308.h"
#define ADR 0x01d0
#define k1 -83.19
#define k2 -2.06
void main( void )
{
    . . . . .
    float delta_t=0.006
    . . . . .
    for(;;){
        while((status & 0x01) == 1) {
            GetCNTStatus(ADR, &status);}
            StartAI(ADR,0);
            GetAIData(ADR,&ch0);
            /* Δx :鉄球の位置の変化量(mm) */
            delta_x=10.0-20.0/0xffe*ch0;
            /*vel : 鉄球の速度(m/s)*/
            vel=(delta_x - delta_xold)/(delta_t*1e+3);
            /* u : 操作量*/
            u =0.80-k1*delta_x*1e-3-k2*vel;
            delta_xold = delta_x;
            /*D/A ボードへの指令電圧計算*/
            Vequ = 2.137*u;
            aodata =(Vequ+10.0)*0xffff/20.0;
            /*ドライバへの指令データ出力*/
            SetAOData(ADR,aodata);
            GetCNTStatus(ADR, &status );
            while((status & 0x01) !=1){
                GetCNTStatus(ADR, &status );}
                RstCNTStatus(ADR);
            }
        }
    }
```

図8 制御プログラム