

Arduino UNOを用いた磁気浮遊装置の作成と分析 —磁界センサによる位置制御と浮遊時の磁界分布—

森重比奈¹⁾・加藤徹也^{*2)}

¹⁾ 千葉大学・教育学部・学部学生 ²⁾ 千葉大学・教育学部

Construction and analysis of magnetic floating device using Arduino UNO - Position control using a magnetic-field sensor and field distribution during floating -

MORISHIGE Hina¹⁾, KATO Tetsuya^{*2)}

¹⁾ Faculty of Education, Chiba University, Undergraduate Student

²⁾ Faculty of Education, Chiba University

電磁石は電流の大きさや向きにより、その磁力や極性が変化する。電磁石のこの性質は小学校5年で学習し、中学校2年では電流と磁界の関係に焦点を当てた内容を学習する。近年、磁気浮遊玩具が一般に市販され、電磁石により制御された不思議な磁気浮遊が身近な存在になった。このような、非接触の力の存在を印象付ける現象は子どもたちの興味を引き、中学校教科書でも取り上げられた。しかし、市販品は仕組みがブラックボックス化されているため、具体的な学習内容を想起させることは難しい。そこで、理科教材化を念頭に、手作り磁気浮遊装置を一から作成し浮遊の仕組みを分析した。電磁石の電流の制御には磁界センサとつながった簡易マイコン (Arduino) を用いた。さらに、浮遊時の磁界分布を有限要素法で解析した。

An electromagnet changes its strength and the directions of magnetic fields depending on the amount of electric current and direction of current. This property of electromagnet is learned in the fifth grade of elementary school. Junior high school 2nd-grade students learn the contents that focus on the relationship between current and magnetic field. Recently, magnetic floating toys are being marketed, and the strange float controlled by electromagnetic forces has become common. Such phenomenon impresses the existence of non-contact force and attracts children's interest so as to appear in science textbooks for junior high school. However, the structure of the commercial products is covered with a black box, so that it is difficult to recall specific learning contents. Therefore, the present author showed the way of making magnetic floating device from scratch and analyzed the mechanism of its levitation in order to develop science teaching materials. A simple microcomputer (Arduino) with a magnetic field sensor was used to control the electromagnet current. Furthermore, the magnetic field distribution during floating was analyzed by use of the finite element method software.

キーワード：物理教育 (Physics Education), 電磁石 (Electromagnet), 磁気浮遊 (Magnetic Floating),
Arduino (Arduino), 有限要素法 (Finite Element Method)

1. 背景

磁石に磁石を近づけると、それらの極性によって、引き合ったり反発したりする。重力を打ち消すように磁力をはたらかせて、何の支えもなしに絶妙な位置に磁石をとどめ、浮遊させることはできない。このことは経験からもわかるが、静電ポテンシャルに関するアーンショーの定理 (文献1) を応用すれば、物体に作用する磁力によって安定的な浮遊は不可能であることが説明される。しかし、興味深いことに磁石による浮遊玩具が市販されている (文献2)。磁力によって浮く地球儀のオブジェは中学2年理科の教科書 (文献3) でも写真で取り上げられ、「電流と磁界」の章の導入に使われた。そこに原理についての説明はないものの、重力を打ち消し、何と

も接触せずに浮遊する姿は不思議に映るだろう。この不思議に思う感性は、その分野への生徒の学習意欲をかき立てることができる。浮遊には制御された磁力が欠かさないし、機能性の高い回路素子があればコイルに流れる電流を制御してそれを実現しているということも、学習後であれば想像がつく。しかし、構造がブラックボックス化された製品では、学習の導入時点でその内容との関連性を想起させることは難しく、学習意欲どころか混乱を生じてしまう。教科書上に写真以外には何ら情報がないため、教師がこの玩具を話題にできないこともありうる。

しかし、近年では取り扱いも入手も容易になったマイコンがあり、これを使えば手作りでこの浮遊玩具を作製できる。教師が作製方法についての知識や経験を身に付けければ、そして、なぜ浮くのか、電流や磁界の学習内容と具体的にどう関わるのかを整理すれば、生徒がこの浮

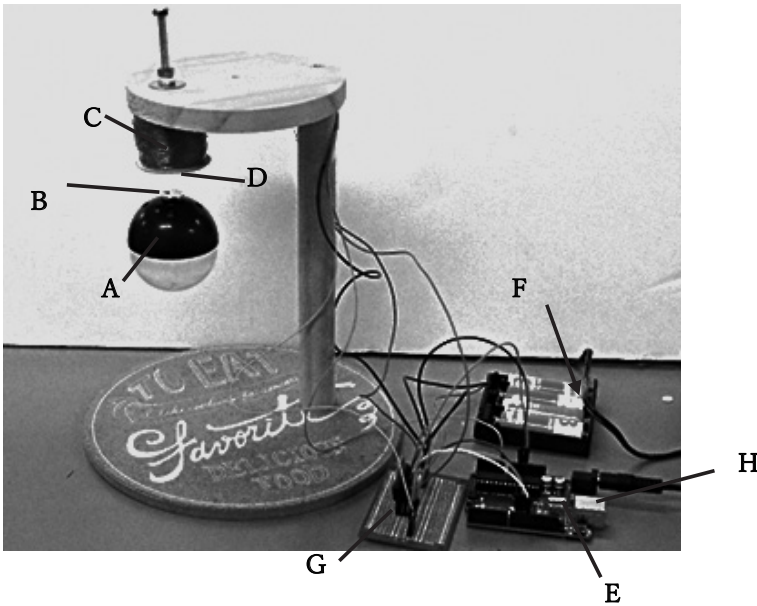


図1 磁気浮遊装置の全容

この装置は以下により構成される。A：浮遊物体，B：磁石，C：コイル，D：磁界センサ，E：Arduino UNO，F：コイル励磁用6V電源，G：モータードライバ回路，H：USB端子（図外のPCと有線接続する）

遊玩具に直接触れる授業，あるいは，関連する科学技術の具体的な紹介を組み込んだ魅力的な授業が展開可能になるだろう。

そこで著者らはブログ（文献4）に紹介されている方法を参考に，図1のシステムを作製した。このブログには回路や工作についての初心者に向けた作製手順，マイコンを除き合計1,000円程度で用意できる材料，作製上の勘所に関する実験結果，磁力制御の方法，浮遊を困難にする振動対策の考察，および，室内装飾に適した追加回路が詳細に紹介されている。ただし，磁界分布については情報がなく，手探りの研究となっている。

本報告では，学校教員が作製することを念頭にしながら，著者らが用意した材料による作製手順と各部品の説明，および，磁界分布についての有限要素法シミュレーションを行ったのでそれらについて報告する。

2. 磁気浮遊装置の作製

この浮遊システムは，浮遊物体Aの上面に貼り付けたネオジム磁石Bの磁力を磁力調整用のコイルCの下端に貼り付けた磁界センサDで検出し，その値が物体を吊り上げるべき位置で検出される値（目標値）になるよう，ずれに応じた電流をコイルCに流すことで浮遊物体Aの位置を制御する装置である。この電流は磁界センサDの値をもとにマイコンEで計算され，電源FからコイルCへと送られる。マイコンEの出力をコイルに流す電流の向きと大きさに変換するのはモータードライバと呼ばれる素子Gであり，コイルへの出力電流はパルス幅変調法（Pulse Width Modulation, PWM）を用いた。なお，使用したマイコンはArduino UNO（文献5），モータードライバはTA7291P（文献6）である。PC上でスケッチと呼ばれるプログラムコードを作成し，USBケーブルHを経由してこれをマイコンに書き込めば，マイコン

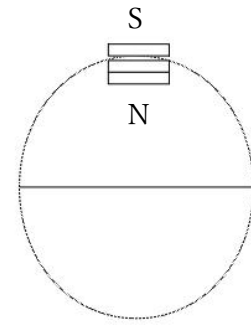


図2 浮遊物体と磁石

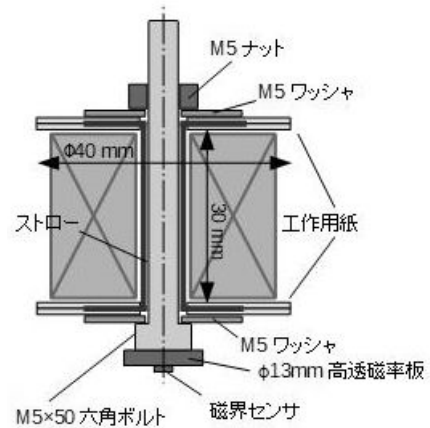


図3 2000巻コイル用のボビン

単独で動作する。以下，これらの構成要素A～Hについて順に述べる。

2-A 浮遊物体（図2）

2-B 磁石（図2）

材料：プラスチック製球殻（ガチャポンのカプセル），直径φ13mm，厚さ2.5mmのネオジム磁石×3
 作り方：カプセルの内側に2つ，外側に1つネオジム磁石を張り合わせる。ネオジム磁石は浮遊時にS極が上面にくるようにする。

2-C コイル（図3）

材料：銅線（ポリウレタン線，φ0.32mm），ストロー（軸用，φ5.5mm），工作用紙，M5六角ボルト（鉄ユニクロームメッキ，長さ50mm），六角ナット（M5），ステンレスワッシャ（外径φ20mm，内径φ5.5mm，厚さ1mm）
 作り方：銅線を巻き付けるボビンを製作する。ストローの両端が8等分になるように縦に10mmの切り込みをいれ，直角に折って開く。工作用紙を直径40mmの円形に4枚切り抜き，それぞれの中心に直径5mmの穴をカッターであける。切り込みを入れたストローの両端をそれぞれ工作用紙2枚ではさみ合わせてボンドで固定する。M5ボルトを芯とし，ワッシャでボビンを挟み，ナットで固定する。この完成したボビンに銅線を2,000巻きする。この時，銅線の先端はコイル内部に巻き込まないように注意する。コイルのボルトの上端を木製のフレー

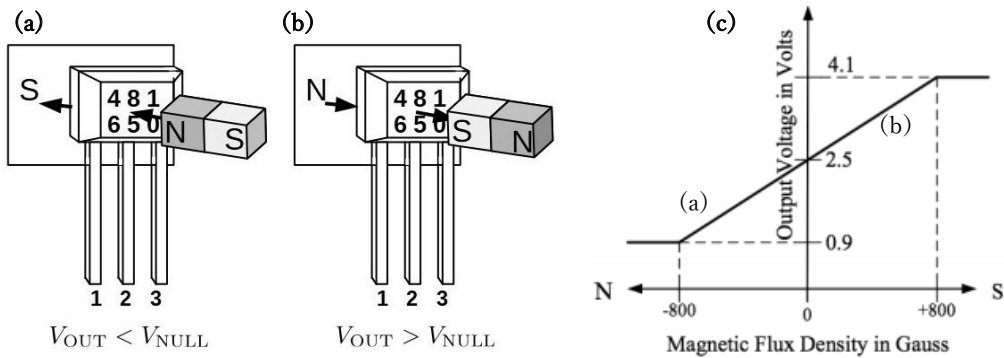


図4 磁気センサTSH481の特性 (文献7)

ただし、端子1は電源 V_{CC} (許容されるのは3.0V~6.5V)、端子2はGND、端子3は出力 V_{OUT} 。である。(a)、(b)はおもての印字面に対する磁界の向きとそれに対応する V_{OUT} の範囲、(c)は $V_{CC} = 5V$ のときの V_{OUT} (縦軸) と印加磁界 (横軸) の線形性を示す。このときゼロ磁場下の出力は $V_{NULL} = 2.5V$ である。



図5 磁界センサとその脚の保護

ムにナットで固定して、銅銭の両端の被膜をはがす。
ボルト下端の頭部にはφ13mmの高透磁率板 (ネオジム磁石を300℃で焼き、常磁性隊として冷却したもの。ネオジムは残留磁化が小さく、ほとんど消磁される。)を両面テープで貼り付ける。

2-D 磁界センサ (図4, 図5)

材料：磁界センサ TSH481, 熱収縮チューブ
センサの特性：図4にはTaiwan Semiconductor社製磁気センサ TSH481のデータシート (文献7)に記載された磁界と出力の関係を示す。この磁気センサを電磁石の頭部 (図3の最下部) に貼り付ける。ただし、センサの印字面は図3で下向きに設置する。磁界センサの脚は絶縁のため、図5のように熱収縮チューブで保護する。

| 端子番号 | 記号 | 端子説明 | Arduino等への接続 |
|------|------|------------|--------------------|
| 1 | GND | GND | Arduino(GND) |
| 2 | OUT1 | 出力1 | コイル |
| 3 | NC | (非接続) | 接続しない |
| 4 | Vref | 制御電源入力 | Arduino(D9) |
| 5 | IN1 | 入力1 | Arduino(D10) |
| 6 | IN2 | 入力2 | Arduino(D11) |
| 7 | Vcc | ロジック用の電源入力 | Arduino(5V output) |
| 8 | Vs | 出力用の電源入力 | 6V電源 |
| 9 | NC | (非接続) | 接続しない |
| 10 | OUT2 | 出力2 | コイル |

図6 モータードライバIC(TA7291P)端子とその接続 (文献6)

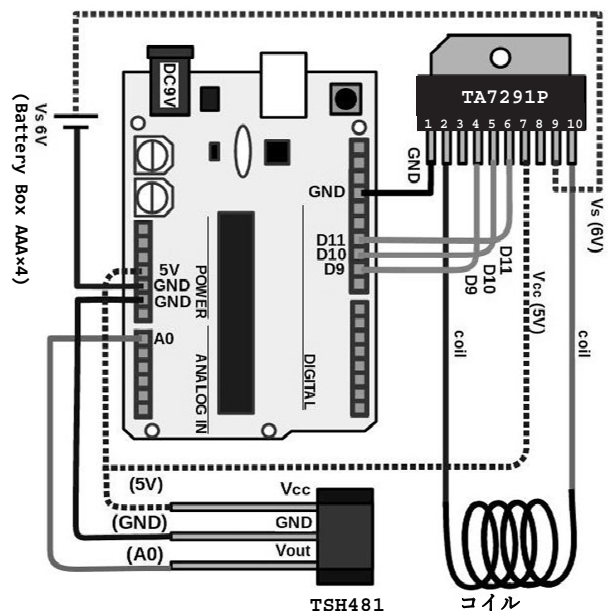


図7 回路の全体図

| 入力 | | 出力 | | モード |
|-----|-----|------|------|--------------|
| IN1 | IN2 | OUT1 | OUT2 | |
| 0 | 0 | ∞ | ∞ | ストップ (負荷を開放) |
| 1 | 0 | High | Low | 正転 |
| 0 | 1 | Low | High | 逆転 |
| 1 | 1 | Low | Low | ブレーキ (負荷を短絡) |

図8 モータードライバIC (TA7291P) の入力端子IN1, IN2による制御の切り替え (文献6)

2-E Arduino UNO

2-F コイル励起用6V電源 (単3電池×4)

2-G モータードライバ回路 (図6~図8)

ArduinoUNOはATmega328Pマイコン (文献8)を心臓部とした安価な小型ボードである。コンピュータと通信するために必要な機能を含め、マイコンの基本動作に必要な全ての要素が1枚のボードに搭載され、シールドと呼ばれる拡張ボードにより機能拡張も容易である。

ボード上にある多数のピンにより、デジタルあるいはアナログの入出力を行う。ピンの一部は機能が変更でき、スケッチと呼ばれるプログラムコードで設定する。

ボード上の印字「DIGITAL」で括られた14本(D0~D13)はデジタルの入力あるいは出力に使うが、これらのうち、番号の前に印字「~」がある6本(D3, D5, D6, D9, D10, D11)はパルス幅変調(Pulse Width Modulation, PWM)と呼ばれる方式のアナログ出力が可能である。一方、印字「ANALOG IN」で括られた6本(A0~A5)は、アナログセンサ等の電圧につき、0から1023の値として読み取るのに使うことができる。

モータードライバICには模型用モータの制御には定番のTA7291Pを用いた。許容電流の上限(定格)は1Aである。その端子の詳細を図6に、また、回路全体の様子(コイルやArduino等への接続)を図7に示す。TA7291PのVref(4番ピン)IN1(5番ピン)、IN2(6番ピン)はそれぞれArduinoのD9, D10, D11から電圧を受け取る。Arduino側は2進数の1か0か(TA7291Pの入力としてはHIGH=1)かLOW=0)かによって、コイルへの出力(ON・OFFおよび電流の向き)が決まる。(図8)

コイル励起用の電源として、6Vを用意している。これはTA7291Pのロジック電圧との関係を考慮しなければならない。TA7291P内で1V弱の電圧降下があり、それを考慮してもコイルの電源はロジック用電源VCC(図6の端子7,ここでは一般的な5VをArduinoから供給)より高電位である必要がある。

2-H PC

Arduino UNOとUSB接続したPC上で(統合開発環境)Arduino IDE(文献9)を動作させ、プログラミングを行う。そのプログラムコードはスケッチと呼ばれる。図9に示すスケッチをPC上でコンパイルしてArduino本体のメモリに転送すると、Arduinoの起動とともにそのコードが実行される。コードの文の詳細について、特にコメント中に示す①~⑨については付録で説明する。なお、浮遊物体の磁石の向きにより、浮遊の次回センサの出力目標値が異なることに対応して、センサに向かう磁極がSなら「constintcp=838;」、Nなら「constintcp=190;」等にする必要がある。

3. 磁界分布

浮遊を可能にする磁力の性質を理解するため、また、浮遊に適した形状を見出すための資料として、磁石やコイルの周りの磁界分布を調べた。

3-A 磁界センサによる磁石の位置検出について

作製した浮遊装置では磁力がどのようにはたらき、浮遊に寄与するかを調べるため、図10のように装置を組み直して、電磁石頭部と永久磁石のあいだの距離を変えながら、電流の流れていない状態での磁力を測定した。このとき、電磁石頭部に組み込んだTSH481による磁界測定

```
double x, y;
double recX1, recX2;
const int cp = 838;
//浮遊物体の磁石上面の極性が
//Sのときは cp=838程度にする
//Nのときは cp=190程度にする
const int kP = 60;
const int kI = 50;
const int kD = 10;
void setup () {
//①~⑨は付録にて解説参照
TCCR1B &= B11111000; //...①, ③
TCCR1B |= B00000001; //...②, ③
pinMode(9, OUTPUT); //...④
pinMode(10, OUTPUT); //...④
pinMode(11, OUTPUT); //...④
}
void loop (){
recX2 = recX1;
recX1 = x;
x = analogRead(0); //...⑤
y = min( max( (x-cp)*kP +
(2*x+recX1+recX2-4*cp)*kI +
(2*x-recX1-recX2)*kD, -255), 255 );
//...⑥
if ( y > 0 ) {
analogWrite( 9, y ); //...⑦
PORTB |= _BV(2); //...⑧
PORTB &= ~_BV(3); //...⑨
} else {
analogWrite( 9, -y ); //...⑦
PORTB |= _BV(3); //...⑧
PORTB &= ~_BV(2); //...⑨
}
}
}
```

図9 物体浮遊のための制御スケッチ

と同時に、永久磁石を固定したPASCO社製高精度力センサPS-2189による磁力測定を行った。いずれも回転対称軸上での鉛直(図10中の可動台の移動方向に平行)な成分を測定した。図10は図1の浮遊装置とは上下が逆になっている。これは、力センサにより磁力が容易に測定できるよう意図したものである。

3-A-1 測定方法

磁界センサTSH481のVcc端子とGND端子はそれぞれArduinoの5VピンとGNDピンに、また、Vout端子はArduinoアナログ入力A0ピンに接続した。このアナログ電圧を読み出すためのデジタルマルチメータ(DMM)を接続した。また、Arduino読み取りのトリガとして押しボタン(タクトスイッチ)をデジタル入力(D2)へ接続し、スケッチ上でプルアップ(通常は5V)に設定した。これにより、タクトスイッチ押下でGNDになる瞬間に読み取りが実行できる。これらの動作のために、図11の回路と図12のスケッチを作成した。なお、スイッチのチャタリング防止のために0.1μFのセラミック

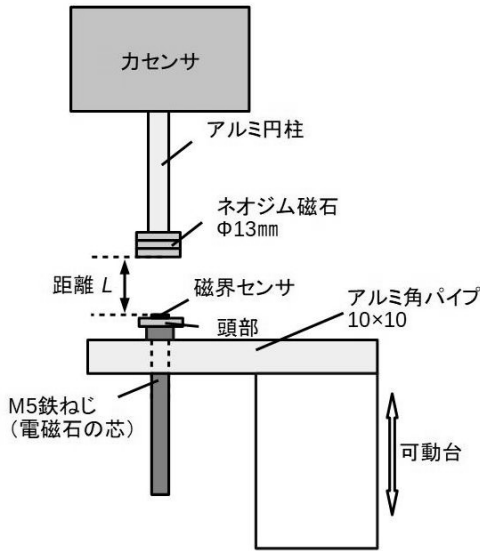


図10 測定装置

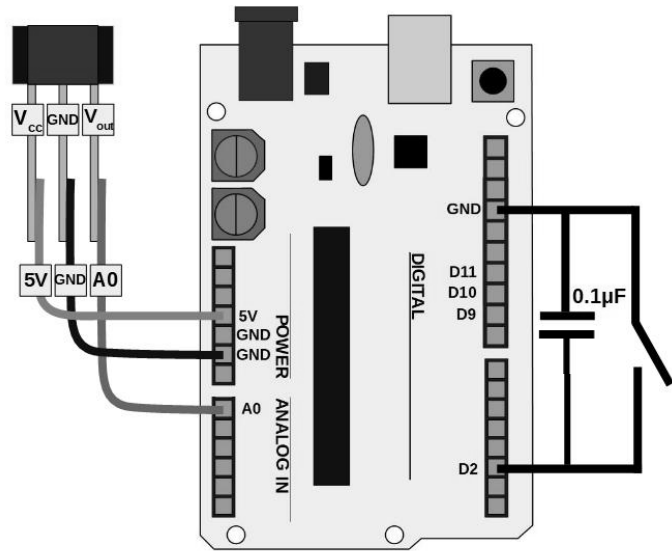


図11 磁気センサTSH481 (左)とArduino UNO (中)およびタクトスイッチ (右)の接続

クコンデンサをスイッチに並列にいれた。

測定では電磁石頭部としてM5のボルトの頭にφ13mmの高透磁率の板(2-C末尾を参照のこと)を貼り付け、その上面の中央位置に磁気センサTSH481を貼り付けた。永久磁石はφ13mm、厚さ2.5mmのネオジウム磁石(3枚貼り合わせたもの)をアルミ円柱にエポキシ接着剤で貼り付けた。これは浮遊装置の状況の再現であるが、比較のために、直径φ6mmのネオジウム磁石に対して2-C末尾の処理をした高透磁率板でも測定した。

3-A-2 測定結果

測定は磁界センサと磁石とが向かい合う表面間の距離(図10に示すL)を2Lmmまで近づけて測定し、1mmずつ遠ざけながらこの測定を繰り返した。まず、図13は力センサの出力値(永久磁石を十分遠方に置いたときに出力をゼロに調整済み)を距離Lに対してプロットしたものである。磁石を遠ざけるとともに磁力は減少する、また、電磁石頭部の高透磁率板の寸法がφ6mmとφ13mmとで若干の違いがあり、φ13mmの方が磁力が大きい。

図14(a)は磁気センサTSH48の出力をArduinoによってアナログ読み取りした値VAを、距離Lに対してプロットしたグラフである。磁界センサは、永久磁石が遠方にあるときはVAの値で600、近づくとき最大で860程度の値を出力し、また、860付近で出力は飽和する。この飽和のふるまいはTSH481の測定可能な磁界範囲(データシートによれば±800Gauss, 出力電圧でV=2.5±1.6V程度)を超えたためである。また図15にて示す磁力測定と磁界測定の両出力の線形性から、VA=592の値がゼロ磁界に対応していることがわかる。これをDMMで同時に読み取った電圧V_{DMM}によるプロット(図14(b), 縦軸はVA)に対応させると、このセンサで磁界と出力の線形関係が成り立つのはV_{DMM}の値が2.84~3.9V程度であることがわかる。また、距離Lが9mm以上であればArduinoによるアナログ読み取りが正確に行われること

```
int a,g;

void fg(){
  g=0;
  a=analogRead(0);
  Serial.print(a);
}

void setup() {
  Serial.begin(57600);
  pinMode(2,INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(0,fg,FALLING);
}

void loop() {
  //loopは空
}
```

図12 測定プログラム (Arduino のスケッチ)

もわかった。

なお、図14からは、電磁石頭部の高透磁率板の違い(φ6mmとφ13mm)による差異もわずかに読み取られる。図13に示された磁力はφ13mmの方が大きいですが、図14(a)に示された磁界はφ6mmの方が強かった。

磁界センサの出力VAを、同時に測定した力センサの出力に対してプロットしたのが図15である。この図で力センサの出力がゼロとなる付近では、両者に比例関係がみられる。その近似直線から、VA=592がゼロ磁界に対応することがわかった。ただし、この値は履歴により2%程度のずれが生じることを確認した。また、VAの値が850を超えると磁界センサの値が飽和していることがわかる。ただし図15については、直線あてはめが成り立つ範囲でφ6mmとφ13mmでの差が明らかであり、φ13mmの方が磁界が小さく磁力が大きいことが明らかで

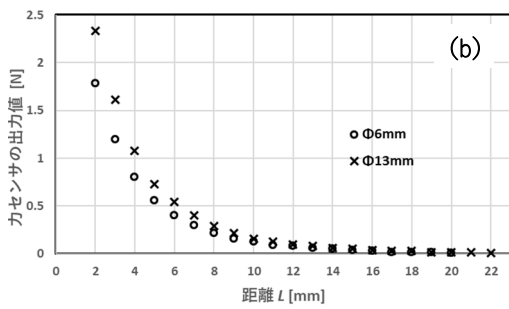


図13 距離Lによる磁力の変化

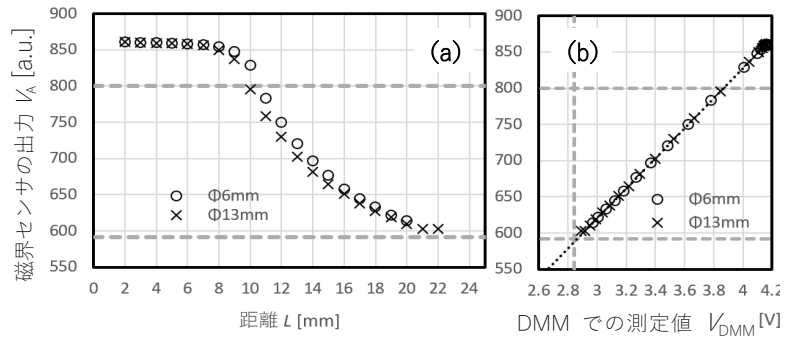


図14 (a) 距離Lと磁界センサの出力 V_A および
(b) DMMでの測定値 V_{DMM} と V_A

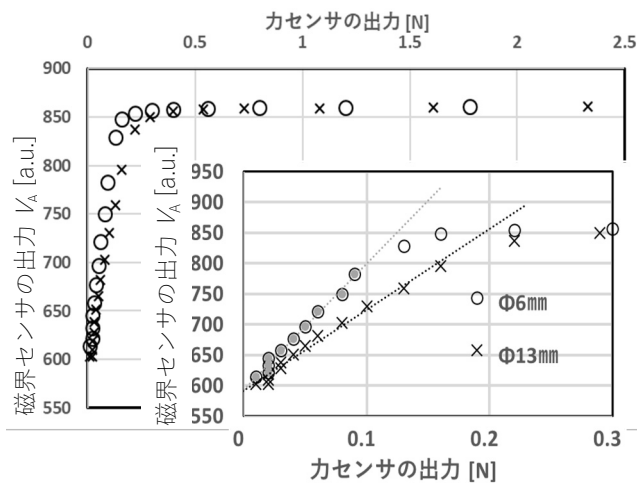


図15 測定された磁力と磁界の比例関係、
および磁界センサの飽和

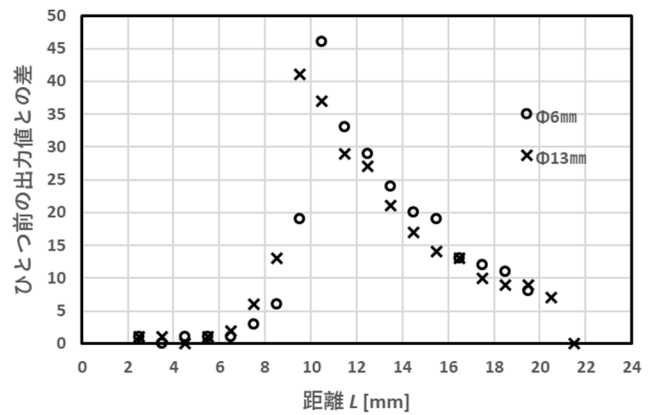


図16 距離Lと磁界センサの感度の関係

ある。これは、 $\phi 6\text{ mm}$ の場合に磁力線が密集したものと説明することができる。

さて、実際の浮遊装置では図14(a)に示された特性をもとに制御が行われる。このグラフの傾きは大きいほど位置検出感度が良いことになる。そこで、このグラフの微分曲線を求めるべく、隣接するVAの測定値の差分（前後するふたつの測定値の差）と、そのときの平均距離Lでプロットしたグラフを作成した（図16）。このグラフから、磁界の変化率 dH/dz は $L=10\text{ mm}$ 付近（ $\phi 13\text{ mm}$ では $L=9.5\text{ mm}$ 、 $\phi 6\text{ mm}$ では $L=10.5\text{ mm}$ ）で最大であることがわかる。この装置では $L=10\text{ mm}$ の位置は磁界センサによる位置検出感度が最高で、制御には最適である。

3-B 浮遊と磁界

この装置で物体浮遊がうまくいくための鍵は、物体にかかる重力と磁力のつりあいを起こす位置に物体があること、および、位置がずれたときの磁界の変化を検出し、コイルに流れる電流による追加の磁力によってずれを元に戻すように、安定した復元力を発生させることにある。浮遊物体が $L=10\text{ mm}$ の位置に安定して浮遊しているときの状況を調べたところ、制御のためにコイルに出力される電圧は平均で 4.24 V 、電流は大きさ 0.14 A で、向きはこの電流による磁化が電磁石の頭部をS極にする向きであった。このとき、磁界センサの出力 V_{OUT} のアナログ読み取り値はおよそ、Arduinoの制御目標である838

（電圧として 4.09 V ）であった。これは、浮遊側の永久磁石のS極により誘起されてセンサ裏面にある電磁石の頭部が図4(b)のようにN極になることをあらわす。つまり、鉄心に接近しようとする磁石（浮遊物体）を、制御されたコイル電流はときどき押し返す磁力をはきすことがわかった。

なお、浮遊側の永久磁石を十分遠ざけてみると V_{OUT} 読み取り値は456（電圧として 2.23 V ）になった。このとき磁界の向きは図4(a)と同じである。つまり、電磁石の頭部（高透磁率板）にはわずかな残留磁化が見られ、磁界センサに接する面はそのS極であった。

次に、電磁石の頭部と浮遊物体の形状がどのように浮遊に寄与するかを調べるため、それらが異なる場合で浮遊可能な物体質量の範囲を測定した。高透磁率板は2種類（直径 $\phi 6\text{ mm}$ × 厚さ 2.5 mm 、および、 $\phi 13\text{ mm}$ × 2.5 mm ）、浮遊物体はプラスチック製で、図17に示す4種類（円筒形容器（化粧瓶）の蓋のみ(a)と全体(B)、および、ふたつの大きさの球形容器（CとD、いずれもガチャポンのカプセル））を使用し、これらに $\phi 13\text{ mm}$ の永久磁石3つを貼り合わせた。その状態で永久磁石の表面磁束密度をガウスメータで測定すると $B=0.33\text{ T}=3.3\text{ kG}$ ($H=262.6\text{ kA/m}$)であった。

直径 $\phi 13\text{ mm}$ 厚さ 2.5 mm のネオジム磁石3枚を含む、各浮遊物体の容器（図17）の質量は、A: 10 g 、B: 15 g 、C: 12 g 、D: 17 g であった。これにBB弾（ 0.25 g ）数個を容器に貼

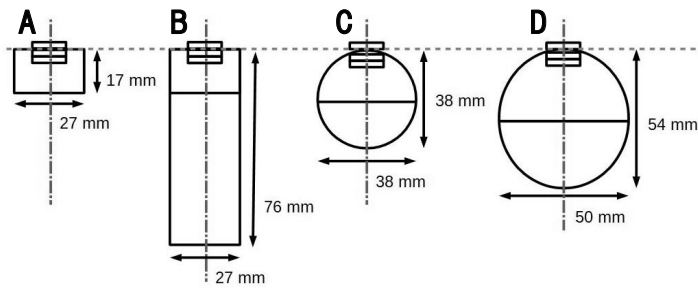


図17 浮遊物体の容器の形状。質量はA:10 g、B:15 g、C:12 g、D:17 g

入れることで全体の質量を調節した。

図18は各浮遊容器で試行した結果を表にまとめたものである。浮遊物体Aの場合、頭部がφ6 mmで10~13gのみ浮遊し、φ13mmでは13~14gで浮遊した。浮遊物体Bの場合、頭部φ6 mmのときに浮遊するのは15gのみ、φ13mmのときは15~21gで浮遊した。浮遊物体Cの場合、頭部φ6 mmで14gでのみ浮遊、φ13mmでは12~19gで浮遊した。浮遊物体Dの場合、頭部φ6 mmのとき浮遊する重さはなく、φ13mmでは17~18gで浮遊した。

これらの結果から、頭部の大きさは物体の浮遊に関わるものであり、容器Aを除きφ6 mmよりもφ13mmの方が浮遊可能な重さの範囲が広いことが分かる。また、容器の形状は球形よりも円筒形の方が浮遊可能な重さが多いことが分かる。

3-C 磁界分布のシミュレーション解析

これらの現実的なデータをもとに幾何学的パラメータを決め、有限要素法シミュレーションソフトCOMSOLを用いて磁界分布の様子を調べた。計算の効率化のために、システム全体を回転対称とし、円筒座標系(r, ϕ, z)の中心軸($r=0$)をコイルと永久磁石(円柱型)の軸にとり、コイルの電流(J_r, J_ϕ, J_z)の J_r, J_z 成分はゼロ、また、磁束密度(H_r, H_ϕ, H_z)の H_ϕ の成分はゼロとした。

このとき、磁界分布を計算するのに用いられるベクトルポテンシャル(A_r, A_ϕ, A_z)の A_r, A_z 成分はゼロとなる。また、磁力線上では r と A_ϕ の積が一定となる。すると磁束密度は $B_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z}(rA_\phi)$ 、 $B_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rA_\phi)$ で与えられる。ここで、2次元ベクトル(B_r, B_z)に垂直なベクトル($B_z - B_r$)は、 rA_ϕ をポテンシャルとする曲線となることが示される。したがって磁力線は rA_ϕ が一定の曲線コンターとして正確な曲線描写が容易にできる。

図19はCOMSOLで解析した空間の全体(ただし、内部を見やすくするために回転中心軸を通る一部を切り取ったもの)である。中心軸上にコイルや浮遊物体とその上部の磁石が並んでいる。浮遊物体はその輪郭のみを示していて、磁石以外の領域は周囲の空気と同じものとして扱った。以下、図20(a)~(c)はCOMSOLの計算結果で、コイルの芯や磁石の近くを拡大した断面(rz 面)である。いずれも左端が回転中心軸、右向きに r 軸、上向きに z 軸をとった。黒い線は磁力線、矢印は長さが磁力の大きさの対数、向きがN極からS極に向かう磁界の向きを示している。

| z | A | B | C | D | A | B | C | D |
|----|-------|---|---|---|--------|---|---|---|
| | φ6 mm | | | | φ13 mm | | | |
| 10 | ○ | / | / | / | × | / | / | / |
| 11 | ○ | / | / | / | × | / | / | / |
| 12 | ○ | / | ○ | / | × | / | ○ | / |
| 13 | ○ | / | × | / | ○ | / | ○ | / |
| 14 | × | / | × | / | ○ | / | ○ | / |
| 15 | / | ○ | × | / | / | ○ | ○ | / |
| 16 | / | × | × | / | / | ○ | ○ | / |
| 17 | / | × | × | × | / | ○ | ○ | ○ |
| 18 | / | × | × | × | / | ○ | ○ | ○ |
| 19 | / | × | × | × | / | ○ | ○ | × |
| 20 | / | × | × | × | / | ○ | × | × |
| 21 | / | × | × | × | / | ○ | × | × |
| 22 | / | × | × | × | / | × | × | × |

図18 電磁石の頭部の大きさ(φ6あるいはφ13 mm)と浮遊物体の形状(図17のA~D)に対する浮遊可能質量

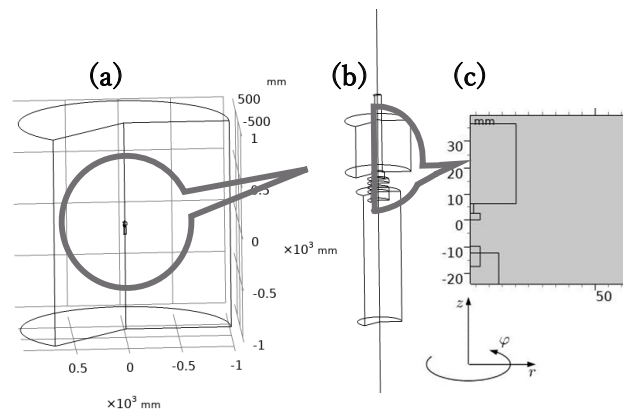


図19 (a) COMSOLで解析した円柱形の空間全体と、その中心に置かれた(b)コイル・鉄心・永久磁石・円柱型浮遊容器と、(c)それを拡大した rz 断面

図20(a)で、電磁石の頭部に向かう上向きの矢印が見られることから、コイルに流れた電流により電磁石の頭部の極性はS極であることが分かる。図20(b)で、永久磁石の上面に下向き矢印が見られることから、永久磁石の上面はS極である。また、図20(a)に比べて矢印が大きく、磁力線が密になる部分が顕著であり、そこでは電磁石により生じる磁界よりも永久磁石の磁界の方が強い。図20(c)で、電磁石頭部付近の矢印が図20(a)のような上向きではなく下向き(永久磁石に向かう向き)であることから、強力な永久磁石が近づくことによりコイル電流による磁界は打ち消され、電磁石の頭部はN極になっていた。

これらのシミュレーション結果は、磁界センサやガウスメータで測定した現実のデータに基づいた、浮遊時の磁界の様子を表している。さらに、図20(a)の結果と図20(b)の結果とを成分ごとに足し合わせた図が図20(c)と一致することを確認した。つまり、浮遊時の磁界の分布(c)は、コイル電流による磁界分布(a)と、永久磁石に

よる磁界分布(b)の重ね合わせとして理解することができる。ただし、実際の磁性材料は外部磁界の下で誘起される磁化が非線形性を持つことがあるが、ここではそれをモデル化しなかった。COMSOLにはそれに対処する機能があるがここでは簡素化のために使用していない。

4. 考察

4-1 磁力と制御について

コイルに流れる電流による付加的な磁力は常時かかるものではなく、1 kHz以上の周波数でくり返し、かつ1周期の間に電流が流れるのはわずかな時間である。また、この電流により生まれる磁界は永久磁石の磁化とは逆向きで、永久磁石を搭載した浮遊物体に反発力を及ぼす。コイルの電流が流れていないとき、永久磁石はコイルの中の鉄心を磁化して定常的に引き寄せるため、浮遊物体にはこの力と重力による正味の力として、常時上向きに力がかかっている。物体位置が上がると、センサが受ける磁界が強くなると、それを抑え込むような断続的な磁力がコイルの電流によってかかる。

安定的に浮遊させるうえで理想的なのは、位置変化で

センサが受ける磁界が変化し、それに応じて電流の大きさや頻度を変える制御を行いながら、位置の変化は目に見えないほど小さく、システムの振動が生じない状況である。つまり、同じ永久磁石を使ったとしても、づ裕が実現する距離付近での、高さによる磁界の変化が大きいたことが望ましい。そして、それにはコイルの鉄心の頭部の材質(透磁率)や大きさ、形による影響が大きい。

本報告では、コイルの鉄心の頭部よりも大きな、高透磁率の円板を貼り付けた。大きな円板を使って磁力線のむら进行消し、高透磁率材を使って近くの磁力線を集める効果が期待できる。高透磁率常磁性材料としてはパーマロイ合金が知られているが、より入手が容易で手ごろなものとしては、鉄や磁石の強磁性体が巨視的磁化を失った「みかけの常磁性体」が候補となる。磁石の中ではネオジム磁石のキュリー温度(磁化消失温度)が比較的低いこと、また、実際に高温にして室温に戻すと残留磁化の少ない「みかけの常磁性体」としてふるまう様子が見られたことから、これを電磁石の頭部に貼り付けることにした。その大きさについては、φ6mmの方がφ13mmよりも磁界センサの出力が少し大きく、磁束密度がわずかに高いことがわかった。ただし、φ6mmの円板はφ13mmの円板よりも面積が4分の1程度と小さいので磁束(=磁束密度×面積)すなわち磁極強さはφ13mmのほうが大きい。また、本論文で使用した磁界センサ(TSH481)にとっては飽和磁束密度に近く、磁束密度は低いほうが良い。したがってφ13mmの円板のほうが制御しやすいことがわかった。なお、可能であればこのセンサよりも飽和磁束密度の高いものを用いるのが良い。

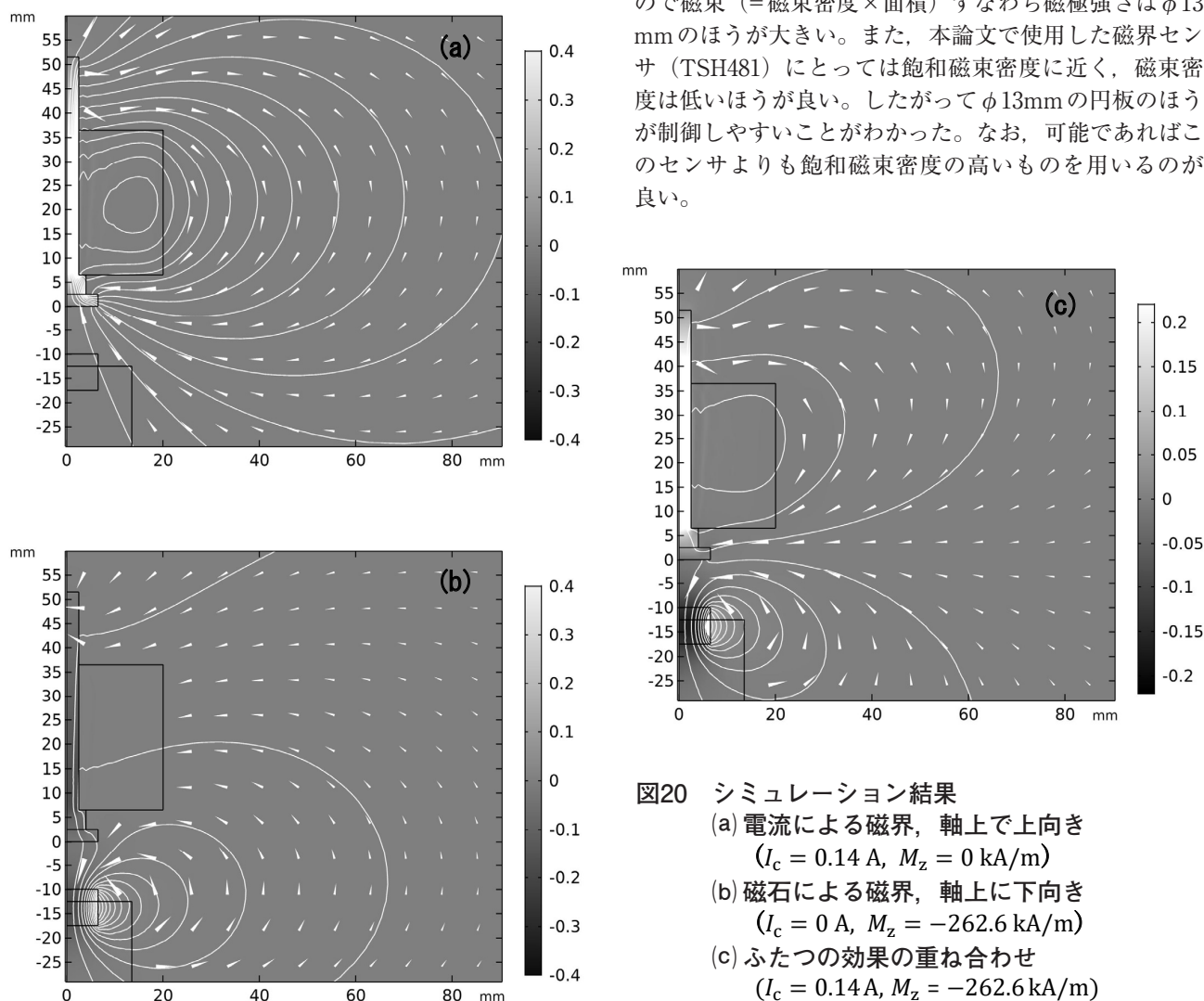


図20 シミュレーション結果
 (a) 電流による磁界, 軸上で上向き ($I_c = 0.14 \text{ A}$, $M_z = 0 \text{ kA/m}$)
 (b) 磁石による磁界, 軸上で下向き ($I_c = 0 \text{ A}$, $M_z = -262.6 \text{ kA/m}$)
 (c) ふたつの効果の重ね合わせ ($I_c = 0.14 \text{ A}$, $M_z = -262.6 \text{ kA/m}$)

4-2 制御の速度

本論文で用いた図9のアルゴリズムにはArduino言語のほか、処理速度をより高速化させるためにArduinoの心臓部であるATmega328Pマイコンの制御コードやクロック設定の変更を行った。その手順をArduino言語だけで書くことも可能であるが、その場合、それをコンパイルしても安定した浮遊はできなかった。この実行ファイルは処理速度の点で十分ではないためと思われる。

安定した浮遊を実現するために、最速でプログラムを動かしたところ駆動周波数は4566Hzであった。この周波数は、制御プログラムに通信コードを書き足し、10000ループにつき1回の通信で所要時間を測定した。処理速度の浮遊への影響を調べたところ、1000Hzでは浮遊に成功したが、500Hzでは浮遊しなかった。なお、割り込み処理のタイミングは1ms刻みで指令するため、1000Hzと500Hzの間の駆動周波数の測定はできなかった。

4-3 その他、作成上のノート

この装置で使用した2,000巻きコイルの特性をLCRメーター(YHP 4275A)を使って測定したところ、直流抵抗は29Ωで、1kHz($\omega = 6.28\text{kHz}$)の交流を流した時の自己インダクタンスは39mH、リアクタンスは $\omega L = 245\Omega$ であった。

コイルは緩むと浮遊に影響がでるためワイヤが緩まないよう密に巻き付ける必要がある。コイルの保持用枠組みへの固定が緩むのも不安定になる原因になる。いずれも、安定した浮遊ができないときは、浮遊すべき物体が上下に振動し、かつ、その振幅が収束せずに発振してしまう。そのような力学的振動の自由度をなくすこと、また、振動を減衰させることが重要である。文献4では低反発ウレタンシートのような緩衝材を使っていた。本研究では木製の枠組みで保持し、固定は十分固くした。

5. まとめと展望

実際に自分で作成してみると、力学的にも、電気回路的にも、アルゴリズム的にも、簡素な要素が集まったものである。しかし、磁力による反発で物体の浮遊がうまくいったりうまくいかなかったりする。

その様子を見て、うまくいかないのはなぜかを考えることはとても重要な体験であろう。空中浮遊玩具のように一見すると魔術のように感じられる現象に対して、設計通りに実現させることと、それにあたって失敗の原因になることをひとつひとつ潰していくことは地道な作業であり、また、生徒たちが学習する内容を超越するものであるのは確かである。そして、自分の操作によって興味を引く現象が変化していく様子を体験し、その変化を制御することに熱中しながら変化の予想ができるようになれば、予想と学びがつながる。そこにどのような着眼点があり、どのような学びの側面があるのかを整理して、このような装置に興味を持った生徒の学びへの接続を容易にしたい。

本研究はJSPS科研費JP17K00961の助成を一部受けて実施しました。

文献

- 1 太田浩一「電磁気学の基礎 I」p.99, 東京大学出版会 2012年.
- 2 市販のFloatingGlobeの紹介, 例えば「ReviewoftheCs hapeLEDWorldMapMagneticFloatingGlobe」<https://www.youtube.com/watch?v=YYSeFdyHFu> 2019年10月27日閲覧.
- 3 東京書籍 中学校用理科用文部科学省検定済教科書(H23.2)「新しい科学」2年, p.163, 2016年.
- 4 ArduinoDeXXX, 「Arduinoで作る浮遊光球」<https://www.instructables.com/id/A-Levitating-Sphere-Rotates-Glows-and-Blinks-in-JP/>2019年10月27日閲覧 .ArduinoDeXXX, “ALevitatingSphereRotatesGlow s and Blinks With Arduino”<https://www.instructables.com/id/A-Levitating-Sphere-Rotates-Glows-and-Blinks-With-/>2019年10月27日閲覧.
- 5 M.Banzian&M.Shiloh 著, 船田巧訳「Arduinoをはじめよう」オライリー・ジャパン2015年.
- 6 東芝DCモータ用フルブリッジドライバ(バイポーラ形リニア集積回路)TA7291P/S/SG/F/FG<https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=16127&prodName=TA7291P> 2019年10月27日閲覧.
- 7 TaiwanSemiconductor, Ratio-metric Linear Hall Effect Switch, https://www.taiwansemi.com/products/datasheet/TSH481_A14.pdf 2019年10月27日閲覧.
- 8 Microchip, ATmega328P完全データシート, <https://avr.jp/user/DS/PDF/mega328P.pdf>2019年10月27日閲覧.
- 9 Arduino公式ホームページ「Downloadthe Arduino IDE」<https://www.arduino.cc/en/main/software>2019年10月27日閲覧.
- 10 Ken Shirrif, Secrets of Arduino PWM, <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/SecretsOfArduinoPWM> 2019年10月27日閲覧.

付録

図9のスケッチ上で用いられているコード要素はC言語に近いArduinoの言語で書かれている。ここではArduinoの一般向け解説書(文献5)には書いていない要素について説明する。

① 複合演算子 $\&=$ について

ある整数から特定のビットを選択することが、AND演算子($\&$)の一般的な使い方の1つである。ポートの状態を取得してコントロールしたいピンに一致するビットだけをクリア(AND演算子を使用)にする。変数の特定のビットをクリア(0にする)ときに使用する。

② 複合演算子 $|=$ について

あるポートの値と新しい値を結びつけることがOR演

算子 (I) の一般的な使い方の一つである。変数の特定のビットをセット (1 にする) ときに使用する。(特定のビット以外には触れない)。

③ `TCCR1B&=B11111000;TCCR1B|=B00000001;` について (文献10)

ArduinoのPWM周波数の初期設定は64分周, すなわち490Hzである。これを1分周にすることで周波数を64倍 (31,372Hz) の約31kHzに変更する。分周の設定は以下の表1にまとめる。`TCCR1B&=B11111000;` は, 下3位のビットをクリア (0), 次の `TCCR1B|=B00000001;` は, 下1位のビットを1にするコマンドで, これらにより, 1分周の設定になる。クロック周波数=16MHz, 三角波の高さ=255としてPWM周波数 f は, $f = \text{クロック周波数} / (\text{分周比} \times 255 \times 2)$ で与えられる。ArduinoUNOのデフォルトは64分周で $f = (16 \times 10^6) / (64 \times 255 \times 2) \sim 490\text{Hz}$ で出力される。今回の設定では, 1分周で $f = (16 \times 10^6) / (1 \times 255 \times 2) \sim 31,372\text{Hz}$ となる。

④ `pinMode(9,OUTPUT);pinMode(10,OUTPUT);pinMode(11,OUTPUT);` について

指定したピンの入出力モードを設定する。ここではD9, D10, D11ピンを出力に設定。

⑤ `analogRead(0)` について

AD変換器を使って, アナログピンから値を読み取り, 1023段階のdigital情報として入力する。引数の0は, A0ピンから値を読み取るという意味。

⑥ `y=min(max((x-cp)*kP+(2*x+recX1+recX2-4*cp)*kI+(2*x-recX1-recX2)*kD,-255),255);` について

関数 `max()` の第一引数, `(x-cp)*kP+(2*x+recX1+recX2-4*cp)*kI+(2*x-recX1-recX2)*kD` ではPID制御における出力量を計算している。PID制御のとは目標値と現在の値の差をモニターしながら, その差に対するProportional (比例), Integral (積分), Differential (微分) と組み合わせて出力値を決め, それにより子の差を減らすという制御方法である。`min(x,y)` は2つの数値 x, y のうち小さいほうの値を返す。 $y=255$ により, x の値が255以下なら x のまま, それを超えると255に

する。`max(x,y)` は2つの数値のうち大きいほうの値を返す。 $y=-255$ により, 値の下限を-255にしている。

各時刻 t でのモニター現在の値との差 $e(t)$ から出力量 $u(t)$ を与える式は, 比例項, 積分項, 微分項の係数をそれぞれ kP, kI, kD として

$$u(t) = kP * e(t) + kI * \int e(t) dt + kD * de(t) / dt$$

と表すことができる。ただし, $e(t)$ は時刻 t における偏差, kP は比例ゲイン, kI は積分ゲイン, kD は微分ゲインである。

比例動作 (P動作) は, 制御量と目標値のずれを減らす方向に, 制御偏差に比例した操作量を制御対象に加える。つまり, 目標値と離れているときは大きな入力で動作させ, 目標値に近づいてきたら操作量を小さくする。しかし, オフセット (残留偏差) と呼ばれる, 目標値と制御量の差が時間が, 十分に経過しても残ってしまう。このオフセットをなくすために積分動作 (I動作) を加える。これは, 積分により偏差を蓄積し, 継続的に偏差を無くすような動作をする。一方, 微分動作 (D動作) は偏差の変化率に比例倍した大きさの操作量を生成し, 応答速度を速める。これによって, 偏差の変化を予測して制御する。

浮遊システムでは, それぞれのゲイン (Kp, Ki, Kd) を実験的に決める限界感度法から安定して浮遊する値に決めた。

⑦ `analogWrite(9,y)` について

`analogWrite()` では, PWM出力の開始とデューティ比の設定を行う。`analogWrite()` を呼び出した後, 指定したデューティ比の矩形波がピンに出力される。Arduinoの心臓部はATMEL社のマイコンATmega328Pである。ATmega328PはPWM出力に利用できるタイマ/カウンタ (TCCR0, 1, 2) を3個持っているが, ArduinoUNOの9番ピンでは, TCCR1(16ビット)により, PWM出力を制御する。

⑧ `PORTB|=_BV(2);` について

ポートBの2ビット目 (Arduino(D10)) にアクセスし, 1を出力する。引数の2は2ビット目の意味。

⑨ `PORTB&=~_BV(3);` について

ポートBの3ビット目にアクセスし (Arduino(D11)) に0を出力する。