

磁気浮遊装置の制作 - その3

金野茂男

1. はじめに

磁気浮遊装置の構築については既報である⁽¹⁾⁽²⁾。それらの論文で紹介しているシステムを、順に1号、2号、3号(参考文献(2)では2つのシステムを紹介している)と呼称しよう。最近、電子部品のインターネット販売が行われている。日本の僻地(失礼)でも、少し時間とお金がかかるであろうが、自在に特殊な電子部品でも購入できるようなのである。試しに、1号、2号で使用している外国製品でDC-DC変換器であるMAX635を検索してみた。販売価格はネット販売店にもよるが、1000円以下で販売していた。これならば、3号で紹介しているロジックICを利用した直流マイナス電源供給回路とする必要性は無いような気にもなっている。それぞれか?

磁気浮遊装置の改良型として、最近、4号の制作を行った。この論文で、その報告を行おう。1号から3号では、アナログ処理で、システムの制御を行っていた。今回紹介する4号では、ワンチップマイコンを使用し、デジタル制御方式を取り入れた。又、ホールセンサ用電源は、独立した別電源とした。電池を使用し、他の回路電源から切り離すことができたので、必要なOPアンプの個数を低減することができ、また、OPアンプもマイナス電源が不要な片電源での駆動を行うことができた。コイルの駆動回路には、Nチャンネル・エンハンスメント型FETを使用することで、先の定電流回路によるコイル駆動回路より簡易な回路とすることが出来た。以上の改良により、回路に必要な電子部品を大幅に低減することができた。アナログ制御方式を採用していた1号から3号では、時折、共振現象が垣間見られ、それを抑えるために、微妙な調整が必要であった。完成した4号では、この共振現象を抑制することは容易に出来ているようである。

本システムの再現のためには、制御回路で使用するワンチップマイコンPIC16F683に、アセンブラプログラムを書き込む必要がある。そのためのアセンブラ関係ソフト及びライターが必要になる。1号、2号、3号では全く必要の無かったものである。本システムの再現だけのために、ライターなどを購入するには費用がかかりすぎるであろうし、勿体ない。ライターなどのない人は、知人でライターを持っている人をお願いして、著者の公開しているアセンブラプログラムをPICに書き込んでもらうのが1番であろう。或いは、今後PICの使用を考えているならば、これを機会にライターを購入するのも良いであろう。なを、ライターにはアセンブラ関係ソフトも無償で付属しているし、ライターがマイクロチップ社のものであれば、ホームページ経由で無償でダウンロードすることも出来る。

2. 制作

写真1に、今回制作した制御回路の外観を示している。対比のために、写真2に、1号の制御回路の外観も示している。両方の写真を見比べれば、制御回路が極めて簡易化されていることがわらう。

図1に、4号の制御回路図を示している。同じく参考のために、図2に、2号の制御回路(1号の制御回路図)も示しておこう。ホールセンサ周りの素子が少なくなっている。3号まではホールセンサの駆動回路として、参考文献に従った回路を採用していた。が、実際にテストボードを使用して試験してみると、本システムでは、図1に示している駆動回路で十分であることがわかった。

本システムでは、ホールセンサにはホール電流供給電源として、独立した電源(乾電池)を使用する。なを、ホールセンサTHS130のテクニカルシートによれば、ホール電流供給電源として+5.0Vが指定されているが、この電圧値に特にこだわることはなさそうである。+6Vでも、良好動作はする。その他の電圧でも、十分に使用できそうである。ホール電流源が絶縁されたので、出力されるホール電圧の取り扱いが容易となった。出力あるホール電圧の増幅には、片電源動作のOPアンプの非反転増幅回路で事足りた。

4号の制作中、使用した電磁コイル+ホールセンサ、土台は2号のものを代用して使用した。従って、ホールセンサは、今までと同様に、電磁コイルの下面に貼り付けてあり、コイルと浮遊物体頭部の磁石から形成される磁界強度を計測し続ける。

使用するワンチップマイコンは、マイクロチップ社のPIC12F683(DIP型8ピン)である。著者は最近、PIC18シリーズを良く使用している。が、このシリーズではDIP8ピン型は提供されていない。本システムで必要とされるワンチップの入出力端子は少ない。端子は8ピンで十分である。ワンチップマイコンに書き込むプログラムも、それほど大きくはなさそうである。このようなことから、12F683を選定した。

PIC用クロックパルスは外付けの10MHzセラミック発振素子で規定した。この12F683のAD変換器への許容電圧は+6V強である。OPアンプは+12Vで動作させるので、その出力を分圧して、12F683のアナログ入力端子AN0に inputs させる。

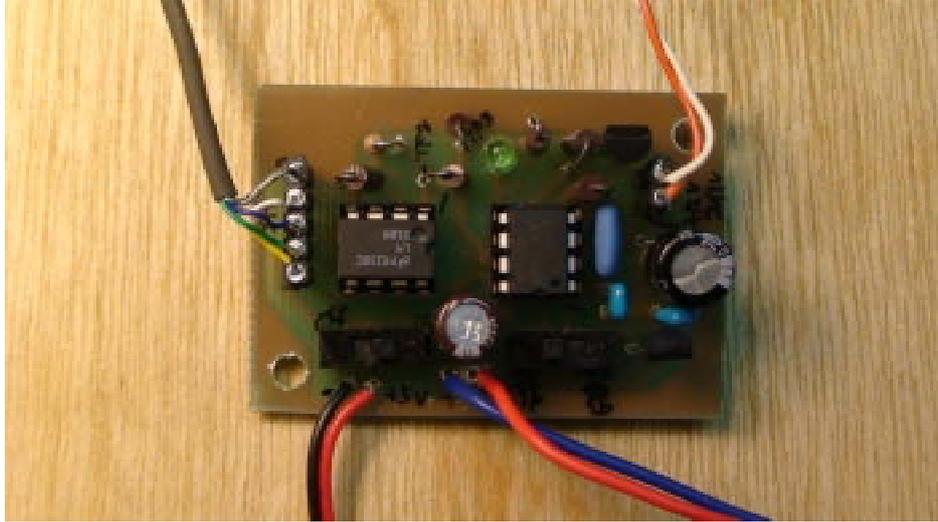


写真1 4号の制御回路の外観



写真2 1号の制御回路の外観

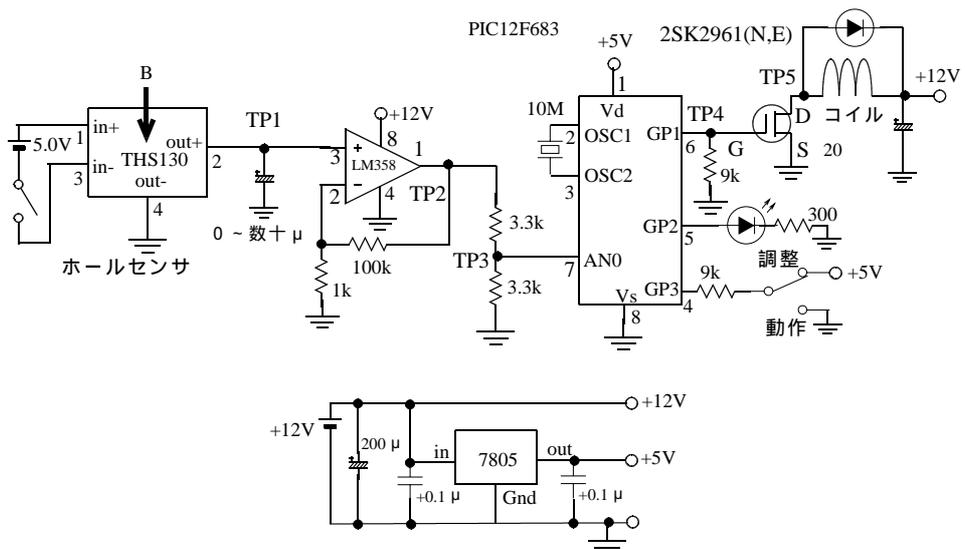


図1 4号の制御回路図

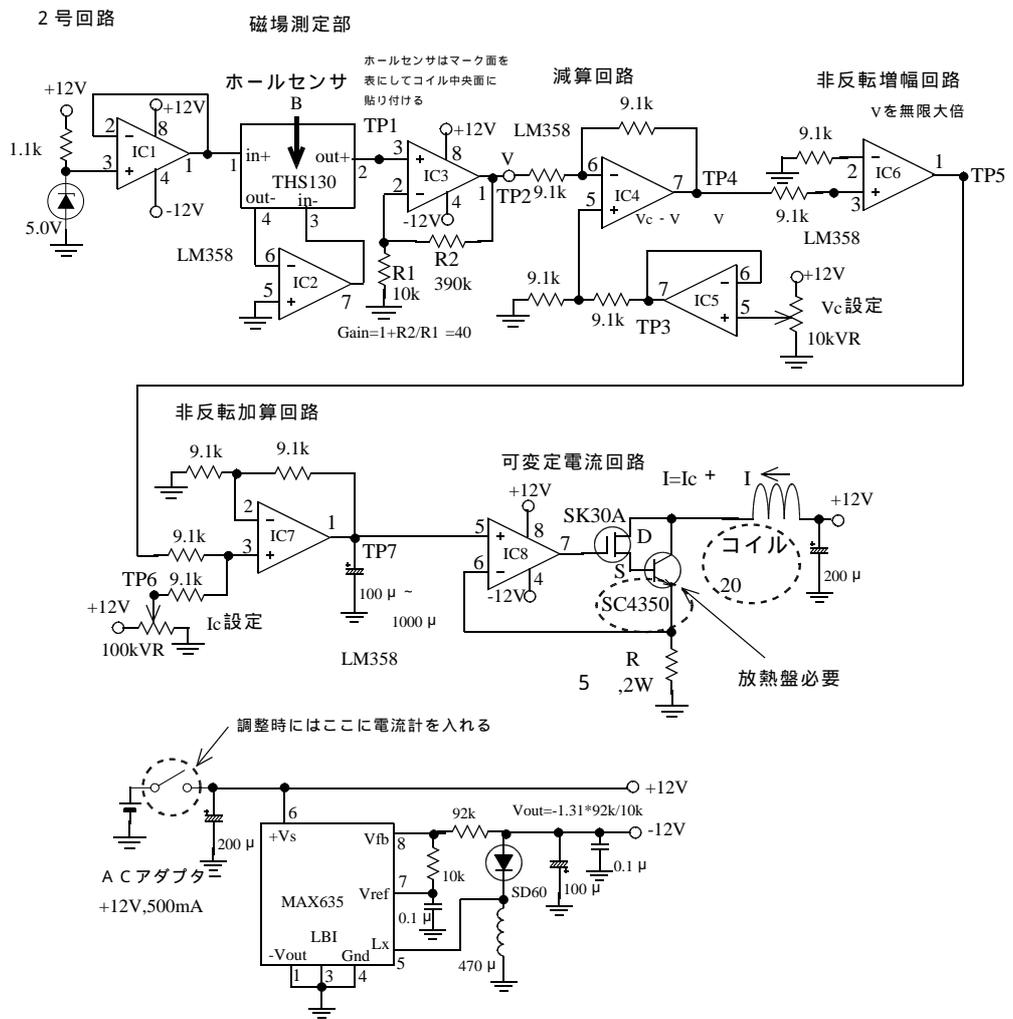


図2 2号の回路図

OPアンプの利得は、現回路では約100倍となっている。この程度の利得が、ホールセンサ出力電圧とPICのアナログ入力電圧範囲との相性が良さそうである。再現においては、若干利得の調整が必要になるかもしれない。抵抗値を変えるだけで行えよう。12F683の定格電源電圧は推奨で+5Vである。これに従って、本システムでは12F683の電源電圧を+5Vとした。が、そのままこの+5Vを、OPアンプの電源ともすると、少しシステムの性能が低下することになる。OPアンプの電源電圧を、12F683の電源電圧と同じ+5Vとすると、入力信号に大きな利得を設定しても、出力信号は高々電源電圧の80%強である。電源電圧までとなることはない。従って、OPアンプの電源電圧を+5Vとすると、出力信号は0V~+4V程度の範囲で変化することになる。

AC100V DC+12VのAC/DCアダプタで本システムに電源を供給することにするので、OPアンプの電源として、直接、+12Vが使用できる。12F683の電源電圧は+5V。AD変換は、電源電圧とアース電位の間で行わせるので、0V~+5Vの電圧範囲で、AD変換が行われる。従って、AD変換器への入力電圧は、やはり、0V~+5Vの範囲としたい。このようなことから、OPアンプの電源電圧を+12Vとすれば、多分OPアンプからの出力電圧の最大電圧は約+10V。この電圧を1:1に分圧すれば、要求通り、AD変換器に、最大入力電圧値として+5Vを供給できることになる。

デジタル出力端子GP1から、コイル駆動用のパルス列を出力する。Nチャンネル・エンハンスメント型FETである2SK2961のゲートに入力させ、FETにスイッチング動作をさせ、電磁コイルに流れる電流を制御する。この回路では、Nチャンネル、エンハンスメント型FETで、定格が2SK2961と同程度ならば、どのようなFETでも使用できよう。実際、著者に手持ちがなかった(希なことではあるが)ので、学生が手持ちしていた2SK2961を使用しただけである。

PICは2ms毎に、ホールセンサ電圧をエンドレスで検出するようプログラムされている(もちろん、変更可である)。浮遊物体が仮平衡位置に位置している時のホールセンサ電圧値を仮平衡値と確定し、2ms毎に得られるホール電圧を、この仮平衡値と比較し、差を算出する。差が0、即ち、仮平衡位置と判断した時には、PICはGP1から、デューティサイクル50%のコイル駆動パルスを出力する。浮遊物体が仮平衡位置より下に位置している場合は、検出しているホール電圧は仮平衡値より小さいので、差が負になる。この場合には、Hレベルが50%以上のコイル駆動パルスを出し、コイルに流れる電流を大きくし、コイルの磁力をより大きくし、浮遊物体を上を引き上げるさせる。

一方、差が正の場合、この場合は、検出しているホール電圧は仮平衡値より大きい。つまり、浮遊物体は仮平衡位置より上に位置している。Hレベルが0%、即ち、Lレベルだけを出力し、コイルに流れる電流を止める。コイルの磁力を0とし、浮遊物体を引き上げている吸引力を0とする。その結果、当然、浮遊物体は下に落下することになる。これらのパルスの様子を図3に図化している。

システムはエンドレスで、これらを繰り返す。が、浮遊物体が、下がりすぎると、つまり床に落下すると、励磁電流を幾ら最大にしても、浮遊物体を引き上げることは出来ない。2号、3号では、浮遊物体の落下を検出し、無駄に過電流が流れ続かないようにするため、浮遊物体の真下の床にスイッチを取り入れた。浮遊物体が落下し、スイッチが駆動すれば、システムの電源が切れるようにしていた。

今回はこのような外部スイッチは使用しないで、制御プログラムで対応している。浮遊物体が、床に落下した状態では、仮平衡値とホールセンサ電圧値との差が、大きくなる。その差に従って、コイル電流を最大限にしても、本システムの性能では対処できない。従って、落下すると、仮平衡値との差値が予定(限界)値より大きくなるので、コイル駆動パルスをLレベル100%とする。FETのゲート電圧が0Vとなるので、FETはオフ状態となり、 I_{SD} 電流が流れないようにしている。

デジタル出力端子GP2には、LEDを接続し、システムの状態モニター、アセンブラプログラムのデバックなどに使用しているのは、著者の常套手段である。

デジタル入力端子GP3には、切り替えスイッチが接続されている。GP3端子を+5Vにプルアップした場合には、システムは調整モードとして動作させることが出来る。スイッチを、このモードとして、システムに電源を入れる。電磁コイルの下に、浮遊物体の電磁石を仮平衡位置に手で保持する。このモードでは、電磁コイルには、検出されるホール電圧とは無関係に、常時デューティサイクル50%の励磁電流が流れ続けている。

浮遊物体の磁石は電磁コイルのコア(軟鉄ボルト)と常に引力(F_1)を及ぼしあっている。図4参照。浮遊物体には重力(F_w)が常時作用している。励磁コイルにはデューティサイクル50%の電流が流れているので、浮遊物体はコイルから引力(F_2)を受けて引き寄せられている。これら F_1 、 F_2 、 F_w の3力が釣り合い、 $F_1 + F_2 = F_w$ となれば、手から浮遊物体を放しても、浮遊物体が急激な落下も、急激な引き上げもない箇所(ここが仮平衡位置)を見出し、スイッチを調整側から、動作側とする。仮平衡位置の設定が上手くいけば、手を放しても、浮遊物体は自動的に空中に浮かび続けるであろう。

電磁コイル+ホールセンサ、浮遊物体(磁石+錘)が確定していれば、完成したシステムの調整部分は、手で浮遊物体を予定平衡位置に配置することだけである。そのように配置して、当初、スイッチを調整側から動作側とした時、浮遊物体が落下したり、電磁コイルに引きつけられたりするであろう。そのような場合には、予定平衡位置を少しづつ修正し、再調整を繰り返していけば、容易に解決

しよう。

調整時、磁石がコイルに強く吸引され、“衝突する”場合がある。磁石を仮平衡位置に配置する時、人差し指をコイルと磁石の間に挿入しながら行うことを勧める。図5参照。衝突は簡単に回避できよう。

処方

(1) 磁界強度のAD変換は2ms毎に実行する。

この際のAD変換時間は2msに対して無視できるほど小さい

(2) AD変換値の大小に応じて、2ms幅のパルスを出力する。

磁石が仮平衡位置の時 AD値は予定値 H=50%,L=50%

磁石が上がりすぎた時 AD値大 コイル電流を0とする H=0%,L=100%

磁石が下がりすぎた時 AD値小 コイル電流を大きくする H>50%,L<50%

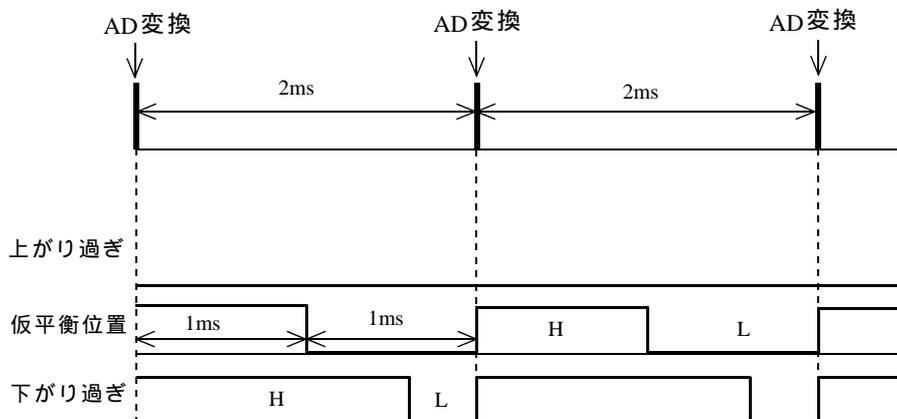


図3 コイル駆動電圧パルス

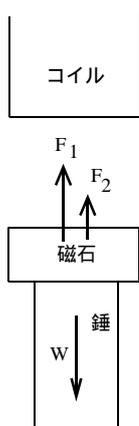


図4 3力の釣り合い

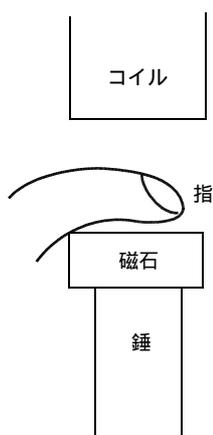


図5 調整時の工夫

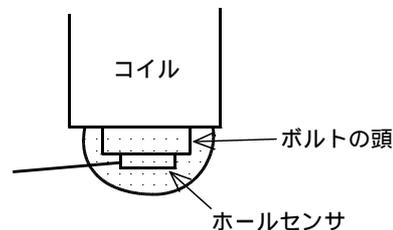


図6 ホールセンサの取り付け

図6に、コイルのコア（軟鉄ボルト）へのホールセンサの取り付けの様子を示している。ボルト頭に、ホールセンサの前面を外側として、接着する。接着剤は緩衝材の役割も持たせるため、たっぷりつける。接着剤は2液混合型のアラルダイトなどでよい。接着剤が硬化するまで、数十分以上かかる。

る。その間、手で持っているのも大変である。ボルトの頭に瞬間接着剤を一滴垂らして、ホールセンサを接着してから行えば、その手間が省けよう。



写真3 4号の外観

写真3に、完成間近で試験中の4号の外観を示している。ホールセンサ用電源として単3乾電池×4本を使用しているが、もっと小さい乾電池でも十分である。使用目的、或いは使用時間によってはボタン電池でも代用できよう。4号のために、電磁コイルを再制作した。2号、3号で使用しているものと同規格のコイルとした。

本システムでの浮遊物体のパラメータなどを記述しよう。写真3で見える浮遊物体では、ネオジ磁石(1枚は直径15mm×厚さ3mm)が2枚、軟鉄六角ボルト(太さ10mm×長さ30mm、重量27g)は1本、他に重量調整用鉛(10g)、安定浮遊中の浮遊物体の全重量は約47gであった。実際においては、重量調整用鉛の量を加減することが必要であろう。また、安定に浮遊していても、時折共振現象が発露する場合がある。共振現象を抑えるには、1つには鉛の量を部妙に変更すること。1つにはホールセンサの出力側(回路図のTP1点)に、適当な容量の電解コンデンサを取り付ける、磁石の枚数、大きさの変更、等である。これらはトライアンドエラーである。

写真4に、浮遊物体が安定して平衡状態に浮かんでいる状態時の試験端子TP2とTP4(図1参照)での電圧波形を示している。矩形波(ch1)がTP4での信号波形、リップル様波形(ch2)がTP2での電圧波形である。共にアースは画面の中央水平、電圧レンジは共に2V/div、時間軸は2ms/divである。電圧波形の特性については後述している。

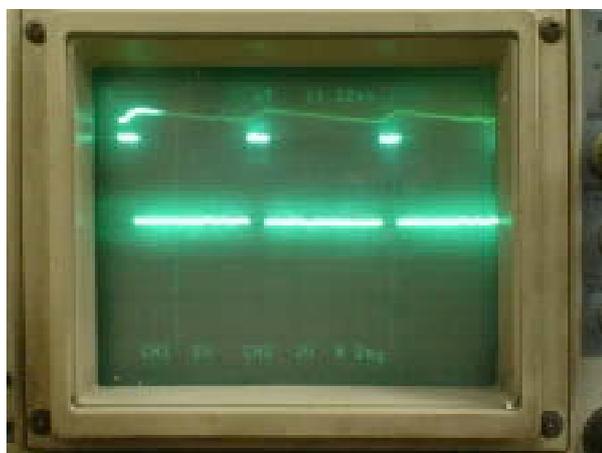


写真4 空中浮遊実現中での制御基板試験端子での電圧波形

3. 制御アルゴリズム

システムはホールセンサで磁界強度を測定し、PICでその値を読み出し、値の大小から、コイルに流す電流パルス幅を変化させる。これら一連の制御は12F683で行っている。図7に、制御の流れ図を示している。12F683に書き込んでいるアセンブラプログラムはこの流れに沿って構築されている。

システムを初めて動かす場合、或いは調整する場合には、モードスイッチを調整側として、システムの電源を入れる。コイルにはデューティサイクル50%の電流パルスが、エンドレスで供給され続け、PICはホール電圧のAD変換をエンドレスで繰り返す。この状態で、浮遊物体を仮平衡位置（一応、空中浮遊するであろう位置付近）に手で保持する。先に述べているように、手を放しても浮遊物体が空中に保持されそうな位置あたりに保持し、モードスイッチを調整側から動作側に切り替える。このとき、AD変換したホール電圧値は仮平衡値として、プログラム中で使用されるとともに、PICのEEPROMにも書き込みされ、保存される。なを、システムの電源を切り、その後、モードスイッチを動作側として、再度電源を入れ、システムを再動作させる時に、この記憶している仮平衡値が使用される。

プログラムはEEPROMにデータを書き込んだ後、流れ図の右側のAD変換部分に移動し、以後の処理を継続する。仮平衡値と取り込んだ現AD変換値の差の大小により、コイルへ流す電流パルス幅を変化させ、コイルの吸引力を変化させ、浮遊物体を空中に保持しようとエンドレスでパルス幅調整を自動的に行う。

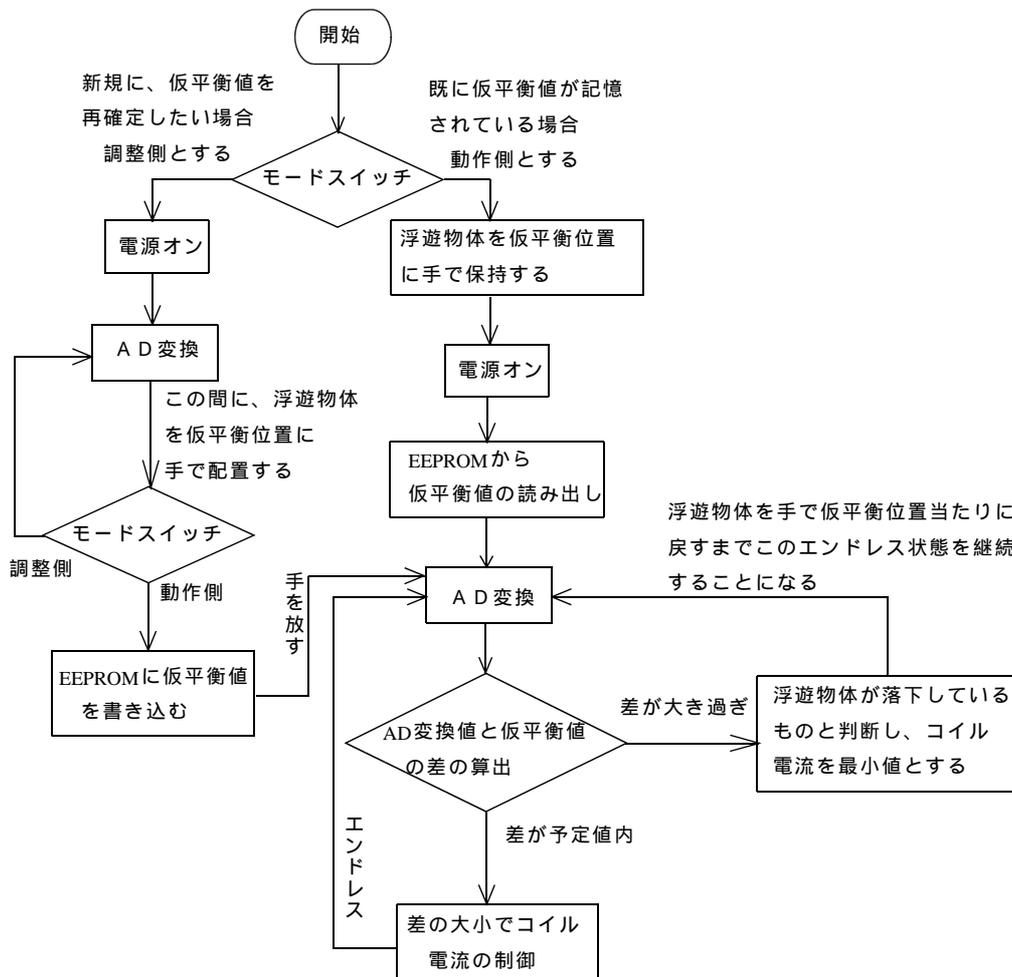


図7 システムの制御流れ図

調整において、モードスイッチを調整側にし、そして動作側とした時、浮遊物体が頻繁に落下するならば、仮平衡位置を少しずつ上に上げて、調整を繰り返す。一方、浮遊物体がコイルに吸着するようであれば、仮平衡位置を少しずつ下に下げて、調整を繰り返す。浮遊物体の錘の量を調整するのも良いであろう。

一度、調整が済み、期待通りの空中浮遊動作を維持していても、外乱などで平衡状態が崩れ、浮遊物体が落下したり、コイルに吸着する場合がある。その場合には、浮遊物体を手で仮平衡位置あたりに持っていき、ゆっくり放すと、空中浮遊が簡単に再現されるであろう。共振現象が目立つようならば、錘の量の微調整、回路図中のTP1の所のコンデンサ容量の変更で一応は対応できよう。システムの動作開始時、共振現象が目立つ場合が多い。が、時間が経過するに従って、共振現象が納まる時もあるので、暖機運転を行うことを勧める。

空中浮遊に当然飽きることがある。電源を切っても結構である。既に仮平衡位置データがEEPROMに保存されていれば、電源を入れた後、浮遊物体を仮平衡位置に手で配置し、ゆっくりと手を放すだけで、以前通り空中浮遊が再現されるであろう。

現システムではコイル下部と浮遊物体の磁石との間隔は、平衡状態で15mm程度(余りこだわる必要はない)である。このとき、増幅されたホール電圧はPICのAD変換器の入力端子で2V程度になるように、アンプの利得を設定している。間隔が狭くなれば、ホール電圧は大きくなり、一方間隔が広くなれば、ホール電圧は低くなる。

アセンブラプログラム中では、仮平衡値と現ホール電圧値との差を計算している。差の程度でパルス幅を変更している。

本システムでは、浮遊物体が平衡位置に浮遊している時、写真4で示しているように、TP4をオシロスコープでモニタしてみると、Hレベルが1ms幅、Lレベルが5ms~7ms幅のパルスが確認できる。図8に、それを図示している。

制御アセンブラプログラムで、浮遊物体が仮平衡位置に位置している時は、Hレベルが1ms、Lレベルが1msのパルスがコイルに出力される。浮遊物体が仮平衡位置より下に位置すると、Hレベルを1msより長くし、Lレベルを1msより短くし、コイル電流を増大させている。降下量が大きいほど、大きな電流が流れるようにしている。

浮遊物体が仮平衡位置より上に位置した場合、プログラムは出力パルスをLレベルとし、コイルに流す電流を0としている。コイルの吸引力が0となるので、浮遊物体は落下し、仮平衡位置に達する。とすると、Hレベルが1ms、Lレベルが1msのパルスが出力される、が、1ms幅のHレベルでコイルに吸引力が発生し、浮遊物体は仮平衡位置より上に引き上げられているので、TP4からの出力は引き続いてLレベルとなる。これらの様子を図9に図化している。

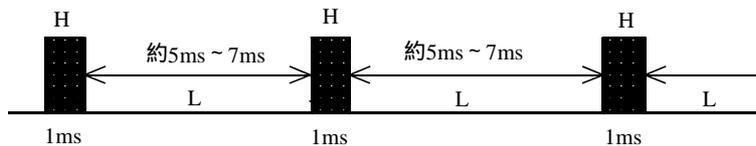


図8 浮遊物体が安定浮遊時のTP4での出力パルス波形

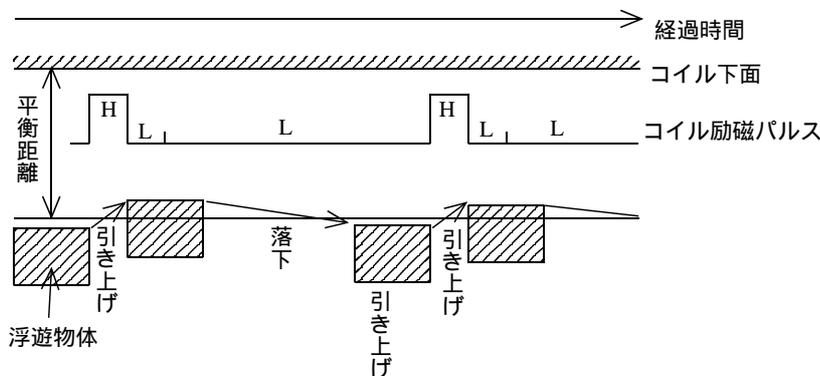


図9 平衡位置近傍で浮遊物体の位置とコイル励磁パルスの相関図

4. アセンブラプログラム

PIC12F683に書き込んだアセンブラプログラムは、開発ソフトはマイクロチップ社のMP LAB IDE V7.50、ライターは同社のPICSTART Plusを使用した。最後に資料として、アセンブラプログラムのソースファイルを添付しておく。ソースプログラムには注釈を多用している。図7の流れ図を参考にして、ソースプログラムを読めば、理解が進むであろう。ここでプログラム内容についての説明は省略する。

PICには種類が多い。各素子毎に、テクニカルノートをマイクロチップ社のホームページからダウンロードすることを薦める。型番号の少しの違いでも、予想もしない箇所で、互換性のないところがある。開発においては注意しなければならない。

5. 動作状況

浮遊物体が平衡位置に保持され続けている状態で、回路電流は20mA~30mA当たりで、変動し続ける。この状態で、FETへのゲートパルスの様子をオシロスコープで観察すると、Hレベル幅は狭く、Lレベル幅は広い。初期設定では、浮遊物体を予定平衡位置に保持し、そのときコイルにはデューティサイクル50%のパルスを送っている。その状態のまま、モードスイッチを動作側とすると、システムは自動運転に入る。従って、予定した平衡位置に浮遊物体は位置すべきであるが、安定した平衡位置は予定平衡位置より若干上に位置している。このことが、平衡状態の時、コイル駆動電圧パルスがHレベル幅が狭く、Lレベル幅が広いことと一致している。

平衡状態位置している浮遊物体を、手で静かに下に引き下げながら、ゲートパルスの電圧波形をオシロスコープで観察するとみると、パルスのデューティサイクルが50%になる所がある。この間には、当然ながら、浮遊物体を上へ引き上げる引力を、手で感じ取ることが出来る。初期設定では、このところで平衡が予定されていたのだが、このズレはどのように説明できるのであろうか？ 考察中である。

回路電流は最大で500mA強、アイドル状態で約5mAである。浮遊物体が落下した場合には、ホールセンサー電圧値が小さくなる。プログラム内で設定している閾値より小さいと判断させて、コイル電流を遮断している。一方、浮遊物体が上がりすぎて、コイルに吸着した状態となる場合もある。この場合には、自動的にコイル電流は遮断状態となる。

以下で、本論文を参考にして、本システムを再構築した場合のシステムの使用手順について順を追って説明をする。システムの各種パラメータは本論文のパラメータにほぼ同じ場合とする。が、多少異なっても大丈夫なような気がする。

(1) システムを制作して、初めて電源を入れる場合

処方手順

ホールセンサーの電源(乾電池)をオンとする。

モード切替スイッチを調整側とする。

AC100V/DC12Vアダプタをコンセントに差し込み、+12Vを供給する。

浮遊物体をコイルの下(大雑把で10mmから20mm間隔内)に、手で保持する。

コイルに近すぎると、上に引き上げられる力が手が感ずる。コイルより離れすぎると、

コイルからの引力は失われ、手は下に向かう重力を感ずる。

引力と重力の釣り合い位置(このあたりを仮平衡位置と呼称しているが)あたりに位置を決める。

その状態のまま、モードスイッチを動作側とする。

浮遊物体からゆっくり手を放す。少し上がって、浮遊となれば、成功である。

手を放すと、コイルに強く引き上げられる場合には、モードスイッチを設定側に戻し、

に戻る。前回より、保持位置を少し下にして、繰り返す。

手を放すと、落下する場合には、モードスイッチを設定側に戻し、に戻る。前回保持位置を少し上にして、繰り返す。

どうしても空中浮遊を実現できないようであれば、重量調整、磁石量の調整、等を行

い、

に戻る。

展示を終了したければ、アダプタをコンセントから抜く。乾電池もオフとする。

(2) 既に、(1)の手順が終了し、再度電源を入れて再展示をする場合。

処方手順

モードスイッチが動作側にあることを確認後、2系統の電源を入れる。

平衡位置近傍に浮遊物体を手で保持する。

安定して空中浮遊となる。

- (3) 安定状態が長く続かない場合。
 処方としては幾つか考えられる。
 (1) に従って再設定を行う。
 浮遊物体の重量を変更する。
 浮遊物体の磁石の枚数を変更してみる。
 T P 1 の所のコンデンサ容量を変更してみる。

6. 終わりに

本システムの制作費用を記述しよう。

ワンチップマイコン	P I C 1 2 F 6 8 3	¥ 1 8 0 円
OP アンプ	L M 3 5 8	¥ 2 0 円
ホールセンサ	T H S 1 3 0	¥ 5 0 円
3端子レギュレータ	7 8 0 5	¥ 5 0 円
F E T	2 S K 2 9 6 1	¥ 5 0 円
コイル	0 . 2 5 m m 、 6 0 g	¥ 1 0 0 円 ~ ?
ネオジウム磁石	1 枚 (1 5 m m x 3 m m t)	¥ 1 0 0 円 ~ ?

以下に、制作において、また制作を終了しての思うところを列記する。

(1) 浮遊物体の重量微調整には、著者は板鉛を使用している。アルミニウム、真鍮などでも良いのでは無からうか。非磁性体ならば、良さそうである。

(2) 実物の浮遊物体は磁石とボルトであり、見栄えが劣るかもしれない。人形、飛行機、袋等々、磁石が隠される浮遊物体の姿とすることも良いであろう。結構な保持力があるので、重い物体でも空中浮遊できよう。アダムスキー型 UFO は面白そうである。

(3) コイルは巻き数を少なくし、小さくしても良さそうである。

(4) 磁石の枚数を減らしたり、磁石の大きさを小さくしても良さそうである。

(5) 本システムでは浮遊物体の重量は約 5 0 g 程度である。磁石の磁力を大きくすれば、もっと重い重量でも浮遊させることが出来そうである。平衡時に H レベルが 1 m s 幅、L レベルが 5 m s 程度幅となっている。このことは、H レベル幅をより広くさせれば、より強い吸引力をコイルに与えることが出来ることを示している。実際、安定平衡時、回路電流は 2 0 m A 程度である。コイルには 5 0 0 m A は流せるから、十分に余力がある。

(6) 本システムのコントロールプログラムに、制御理論の P I D 制御などを採用すれば、より正確な制御をさせることが出来よう。が、この程度のシステムならば必要がないか？

参考文献

- (1) 「磁気浮遊装置の制作」金野茂男、小山高専電子制御工学科、2006年9月
 (2) 「磁気浮遊装置の制作 - その2」金野茂男、小山高専電子制御工学科、2006年10月

2007年 4月26日