

平成 28 年度卒業論文

画像処理装置を用いた自動追装置の
高性能化

福岡工業大学 工学部 知能機械工学科

13E2009 井本拓見

13E2039 立石健太

13E2066 山内勉

指導教員 河村 良行

1 章	緒言	1
2 章	実験装置	3
2.1	追尾システム	
2.1.1	追尾システム概要	
2.1.2	経緯台	
2.1.3	望遠鏡	
2.1.4	画像処理装置	
2.1.5	CCD カメラ	
2.1.6	DC モータ	
2.2	実験器具	
2.2.1	レーザーポインタ	
2.2.2	マイクロ回転ステージコントローラー	
2.3	モータ制御システム	
2.3.1	制御回路	
2.3.2	スイッチング電源	
2.3.3	D/A-A/D 変換	
2.3.4	AC-DC コンバータ	
2.3.5	電圧制御回路図	
3 章	実験準備	12
3.1	DC モータ仕様変更	
3.2	経緯台の特性	
3.3	電圧制御回路の電源選定	
3.4	電圧制御回路の修復	
3.4.1	電圧制御回路フィードバック信号検出実験	
3.4.2	電圧制御回路フィードバック信号検出実験結果	
3.4.3	考察	
3.5	マイクロ回転ステージコントローラーの改造	
4 章	制御プログラム	20
4.1	LabVIEW	
4.2	画像処理装置の遅れ	
4.3	制御プログラムの改良	
4.3.1	P 制御	
4.3.2	PI 制御	
4.3.3	K _p 値場合分け制御	
4.3.4	K _p 値ローレンツ型関数化制御	
4.3.5	K _p 値ガウス関数化制御	
4.3.6	パルス化制御	

5 章 屋内実験	29
5.1 ステップ応答実験	
5.1.1 ステップ応答実験方法	
5.1.2 ステップ応答実験結果	
5.1.3 考察	
5.2 屋内追尾実験	
5.2.1 屋内追尾実験方法	
5.2.2 屋内追尾実験結果	
5.2.3 考察	
6 章 結言	35
謝辞	37
参考文献	38
付録	39

第1章 緒言

近年、宇宙工学への関心が高まることで政府機関に留まらず、民間レベルで ISS へ補給物資の輸送を行う会社や、宇宙旅行を実施する会社が現れ始めるなど宇宙開発が盛んに行われている。同様に人工衛星の開発も盛り上がりを見せ、中でも開発や打ち上げのコストが非常に安価である超小型規格の人工衛星 CubeSat は世界中の多くの大学や企業で開発が行われている。

本学では 2012 年に小型人工衛星 FITSAT-1 を開発し、無事 2 つのミッションの遂行には成功したものの、追尾装置がなかったため衛星の正確な信号検出に難航することとなった。2014 年に FITSAT の後継機を製作するプロジェクトが発足し、追尾装置の必要性が高まってきている。

昨年は、人工衛星の追尾を目標とし、追尾装置の性能評価と追尾実験を行った。結果昨年は、ISS を追尾することができるまで精度を上げることができた。しかし、信号電圧が、経緯台を駆動させるために最低限必要なモータ印加電圧（以下、最低駆動電圧と呼称する）を下回ることがあり、追尾対象と目標値の差が一定以上離れるまで経緯台が動かず、乱調が起こる問題があった。本年度は、DC モータの減速ギアを取り外し、立ち上がり時間（ピーク時間）を短くすることで高速化を図った。また、経緯台を動かす最低駆動電圧を引き下げることにより乱調を防ぎ、標準偏差を取り除く高性能化を目標とした。その為の装置やプログラムの改良を行った。

第 2 章 実験装置

2.1 追尾システム

2.1.1 追尾システム概要

図 2-1 に追尾システムの概要を示す。CCD カメラの視野に追尾対象を捉えると、画像処理装置で追尾対象の座標を算出する。座標値から出力電圧を計算し、経緯台に取り付けられた DC モータに出力することで CCD カメラを取り付けた望遠鏡を動かし追尾するシステムである。

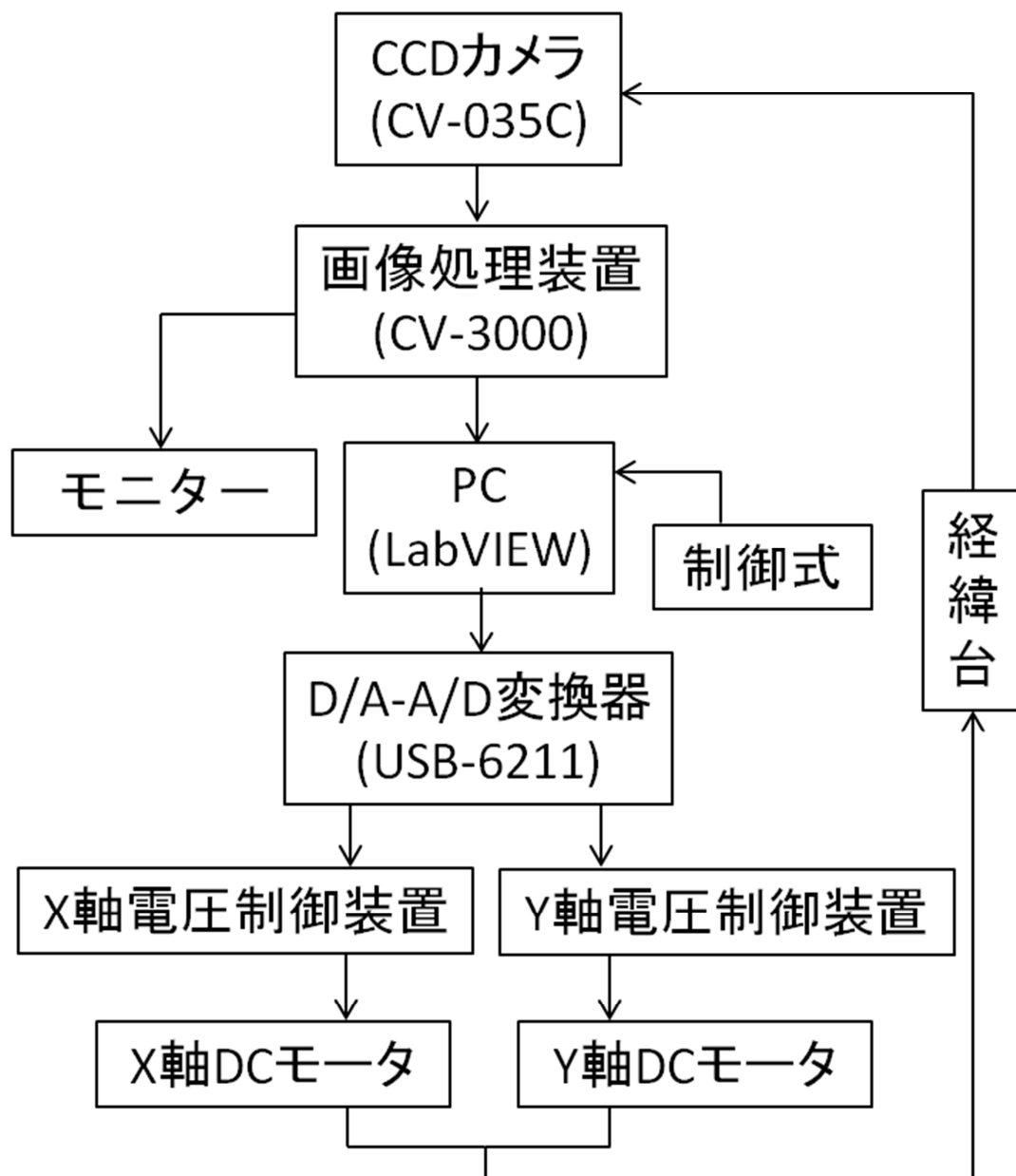


図 2-1 自動追尾システム

2.1.2 経緯台

経緯台の外観を図 2-2 に示す。使用している経緯台は、天文分野で使用されている特注の経緯台である。DC モータに電圧をかけることで Y 軸、X 軸を操作している。



図 2-2 経緯台

2.1.3 望遠鏡

望遠鏡の外観を図 2-3 に示す。KenkoTokina 社製の Sky Explorer SE102 を使用している。有効径 102mm，焦点距離 500mm である。CCD カメラに取り付け、レンズ代わりとして使用している。経緯台への取り付け部が短いため重心の調整が困難であった。そのため、昨年用いた望遠鏡の取り付け部を加工して流用した。



図 2-3 望遠鏡

2.1.4 画像処理装置

画像処理装置の外観を図 2-4 に示す。KEYENCE 社製の CV-3000 を使用している。CCD カメラを接続して使用する事ができ、色認識、形状認識、濃淡の認識を行うことができる。これらの組み合わせにより追尾対象の座標、大きさを数値データとして表すことができる。



図 2-4 画像処理装置

2.1.5 CCD カメラ

CCD カメラの外観を図 2-5 に示す。CCD カメラ (CV-035C) を使用し、電子シャッターの速度を 0.05~9000msec の範囲で設定を行うことができる。レンズは 50mm を使用し実験を行った。



図 2-5 CCD カメラ

2.1.6 DC モーター

図 2-6 に本年度の DC モーターを示す. ツカサ電光株式会社製の TG-77A(定格電圧 24[V], 定格トルク 98[mN・m], インダクタンス 3.3[mH])を使用した. この DC モーターは大型の望遠鏡を乗せて動かすため, 1/5 の減速ギアが付いていたが, 応答速度を速めるため減速ギアを取り外した.



図 2-6 DC モーター (減速ギア無)

2.2 実験用器具

2.2.1 レーザーポインタ

レーザーを壁に照射することで光点とし, 屋内実験の際に衛星の代用で追尾対象とした.

2.2.2 マイクロ回転ステージコントローラー

図 2-7 に MINI-5P, 図 2-8 に STAGE CONTROLLER の外観を示す. マイクロ回転ステージコントローラーとは, 九州計測器株式会社製 STAGE CONTROLLER とシグマ光機社製 MINI-5P を改造した, 実験用器具の名称である, 回転ステージの角速度は, ファンクションジェネレーターを用いて, 入力電圧の周波数を指定することで, 任意の速さで制御できるようにした. +5V 単パルスの信号電圧を入力すると 0.005[deg]回転する.

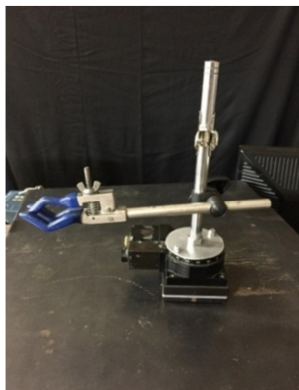


図 2-7 MINI-5P



図 2-8 STAGE CONTROLLER

2.3 モータ制御システム

モータ制御装置の概要を図 2-9 に示し, 制御装置の外観を図 2-10 に示す. 内部にはスイッチング電源(HWS-600-24), D/A-A/D 変換器(USB-6211), オペアンプ用電源(AC-DC コンバータ:KWD10-1212), 制御回路が収まっており, この装置がモータを制御している.

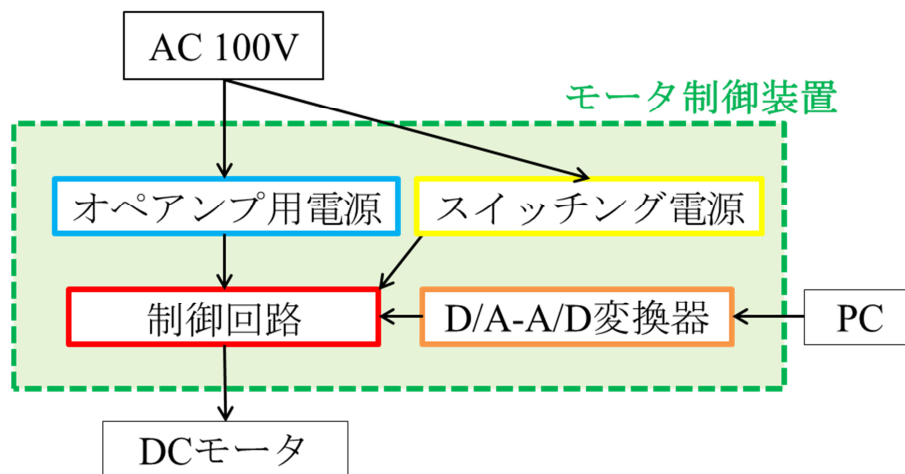


図 2-9 制御装置概要

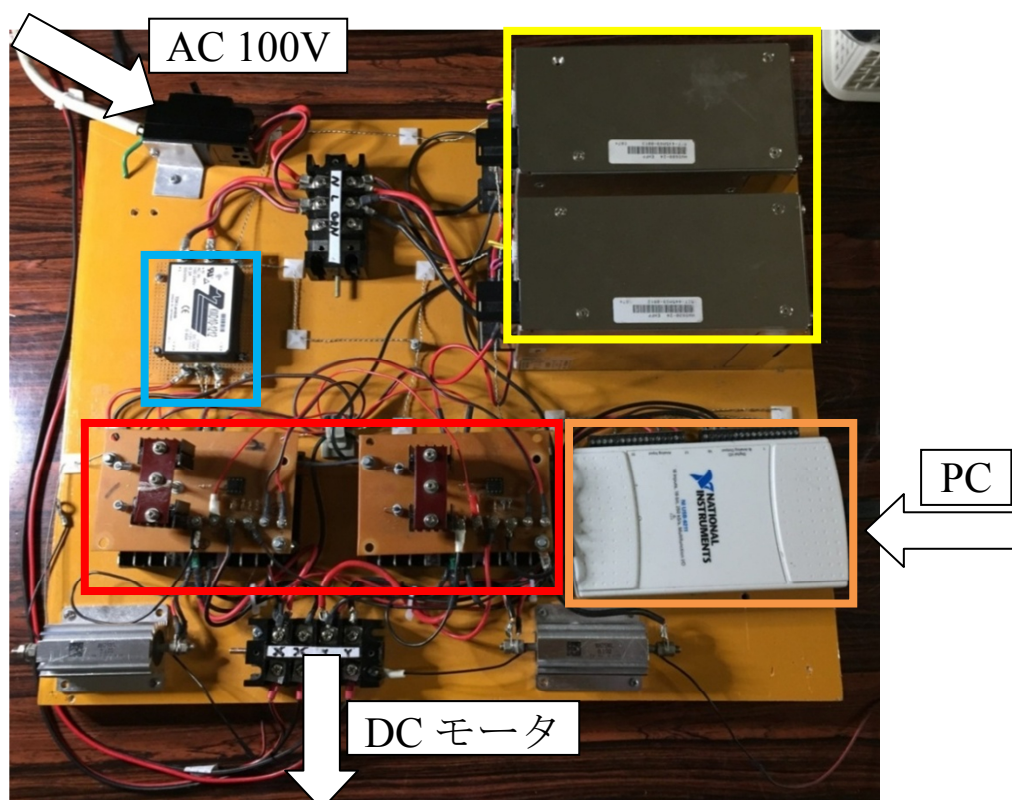


図 2-10 制御装置外観

2.3.1 制御回路

図 2-11 に電圧制御回路の外観を示す。コンピュータで信号電圧に制御式を通した操作電圧を受けて、操作電圧に比例した電圧制御を行い、モータの印加電圧をフィードバックしている。

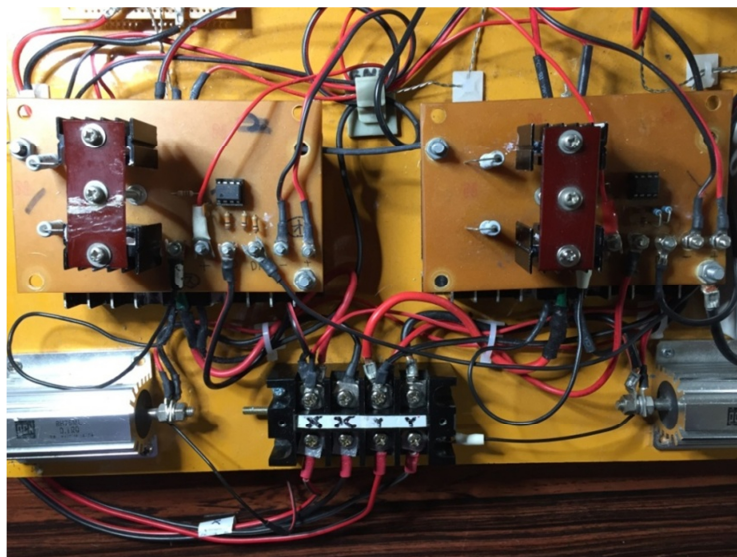


図 2-11 電圧制御回路,

2.3.2 スイッチング電源(HWS-600-24)

図 2-12 にスイッチング電源の外観を示す。TDK ラムダ株式会社製 HWS-600-24（定格電圧 DC24[V], 最大電流 27[A]）を使用しており、モータを動かす為の電圧としている。



図 2-12 スイッチング電源

2.3.3 D/A-A/D 変換機(USB-6211)

図 2-13 に D/A-A/D 変換機の外観を示す。コンピュータからのデジタル信号をアナログ信号に変換し、制御回路に出力している。通信は USB ケーブルを使用し、分解能 16 ビット出力レンジ $\pm 10[V]$ の物を使用している。



図 2-13 D/A-A/D 変換機

2.3.4 AC-DC コンバータ (KWD10-1212)

図 2-14 にオペアンプ電源(AC-DC コンバータ)の外観を示す。ラムダ株式会社製（出力電圧 $\pm 12[V]$ ，出力電流 $0.45[A]$ ）を使用しており、オペアンプの電源としている。

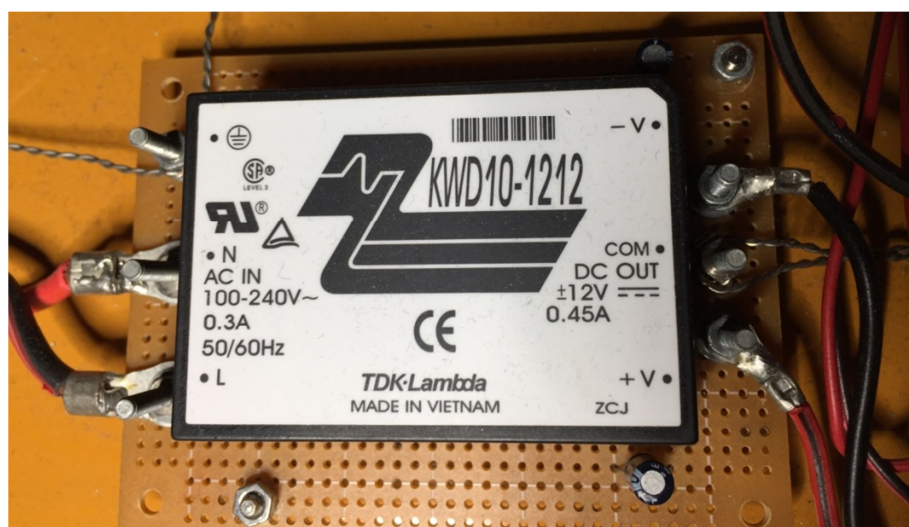


図 2-14 AC-DC コンバータ

2.3.5 電圧制御回路図

図 2-15 に電圧制御回路の回路図を示し、また、使用部品を表 2-1 に示す。

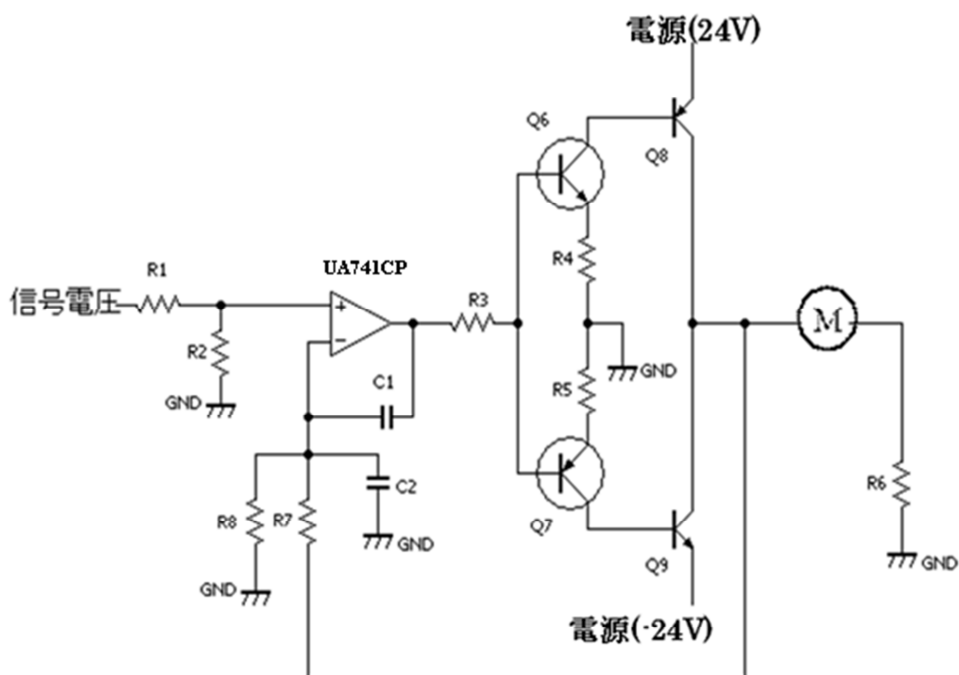


図 2-15 電圧制御回路図

表 2-1 電圧制御使用部品

電圧制御回路	部品名	仕様
R1, R2, R7		カラー抵抗(10k Ω , $\pm 5\%$)
R3, R8		カラー抵抗(1k Ω , $\pm 5\%$)
R4, R5		カラー抵抗(50 Ω , $\pm 5\%$)
R6		シャント抵抗(0.1 Ω)
OP アンプ	UA741CP	OP アンプ($\pm 15V$)
C1		コンデンサー(0.01 μF)
C2		コンデンサー(10 μF)
Q1	2SD880	トランジスタ(30A, 30W)
Q2	2SB834	トランジスタ(-30A, 30W)
Q3	2SA1943	トランジスタ(15A, 150W)
Q4	2SC5200	トランジスタ(-15A, 150W)

第 3 章 実験装置の改良

3.1 DC モータの改良

今年度は応答速度を早くするため減速比が 5:1 の減速ギアを取り外した。そしてプーリを直接モータに取り付けタイミングベルトによりウォーム軸にトルクを伝達するようにした。DC モータの外観を図 3-1 に示す。また、減速ギアを取り外したことによるトルクの減少はプログラムにより補正を行った。

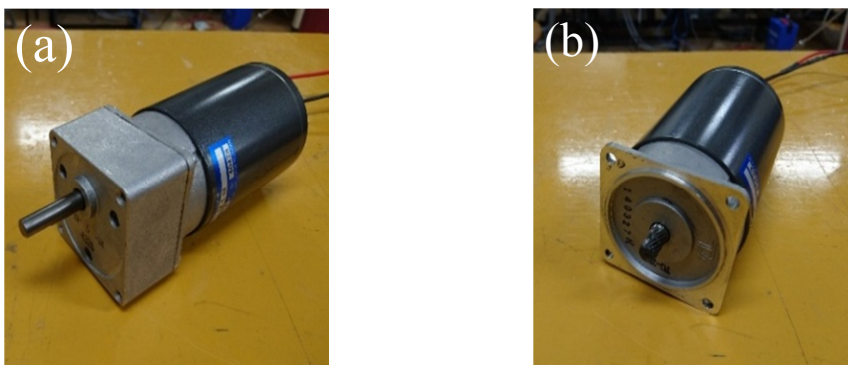


図 3-1 DC モータ ((a):減速ギア有, (b):減速ギア無)

次に、減速ギアを付けた場合と外した場合の応答速度の変化を確認するための実験を行った。CCD カメラの端に光点を合わせ、モータに 8[V] の電圧をかけ光点がモニタの中で動く平均の早さにて比較を行った。結果を図 3-2 に示す、減速ギアを外した場合が平均速度で 1157[pixel/s], 付けた場合が 346[pixel/s] で動いた。このことより、減速ギアを外した場合の方が減速ギアを付けた場合に比べて、約 3 倍の速度を出すことが出来ると考えた。

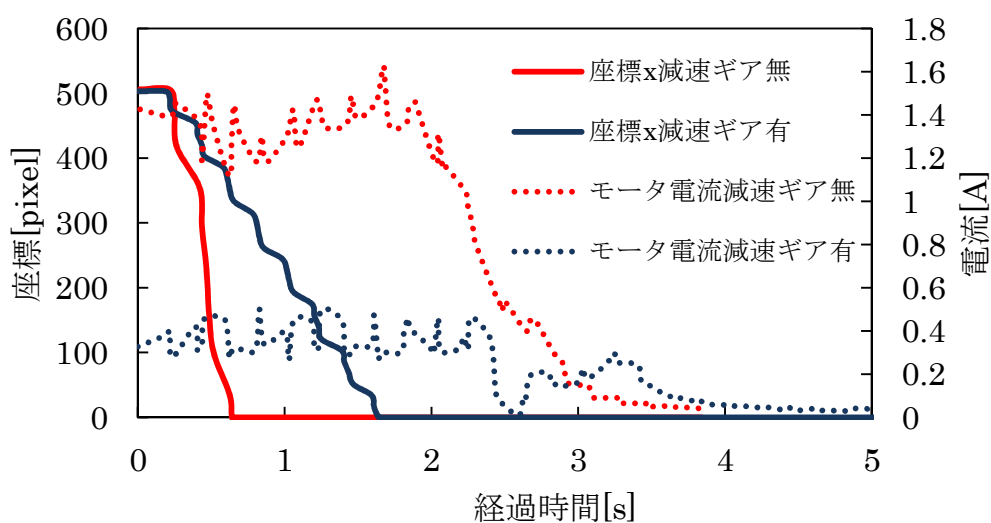


図 3-2 減速ギアの有無による応答速度の比較

続いて、実験を行った際のモータ電流をモータ単体の負荷特性図と照らし合わせて確認を行った

図 3-3 に示す。

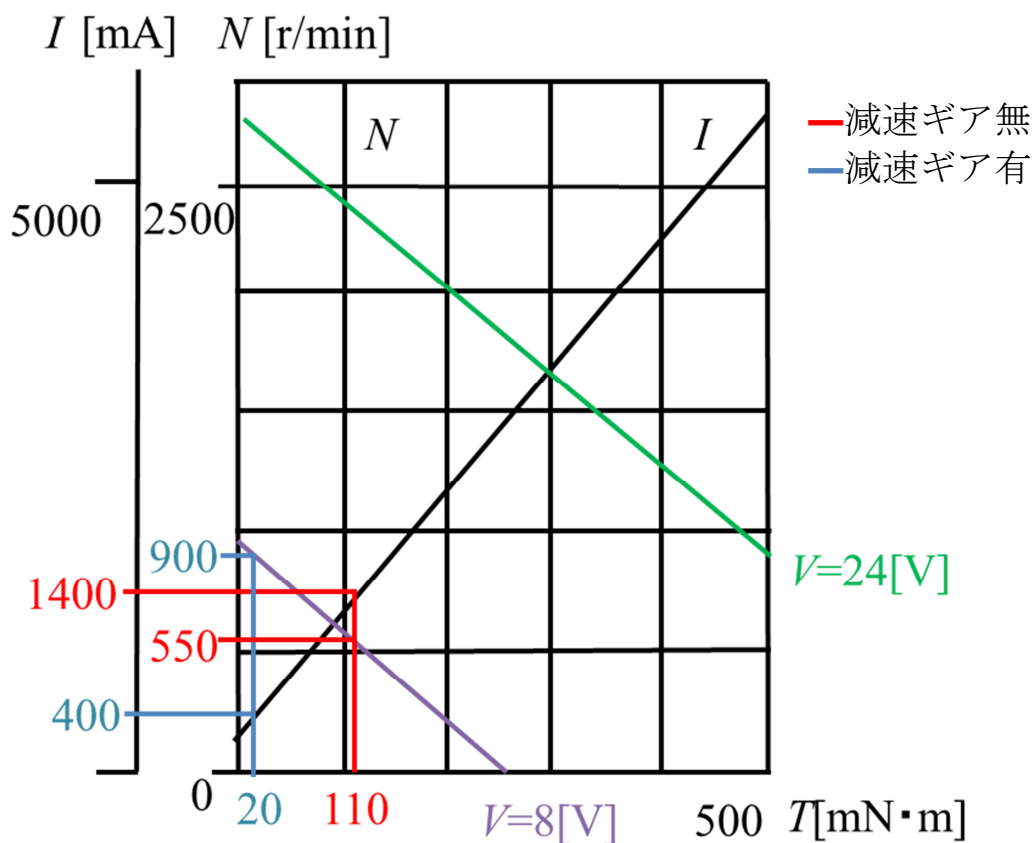


図 3-3 モータ単体の負荷特性図

緑の線は定格電圧 24[V]の時の T - N 曲線である。紫の線が経緯台に 8[V]の電圧をかけた際の T - N 曲線である。減速ギア有のモータ電流は 400[mA]となり、その時の回転数は 900rpm を示す。しかし、1:5 の減速ギアを付けている為シャフトの回転数は 1/5 倍され 180rpm となる。そして、減速ギア無の場合の電流は 1400[mA]となり、その時の回転数は 550rpm となる。二つを比較すると約 3 倍となり、モータの負荷特性図からも減速ギアを外したことによる経緯台の応答速度の向上は確認が出来る。また、今回は 8[V]以上の電圧で経緯台を動かすと早すぎたため、カメラが認識できなかったためデータはないが、負荷特性図から電圧を 24[V]に上げた場合、減速ギア有のシャフトの回転数は 560rpm、無の場合は 2450rpm になると思われる 4.5 倍近い応答速度に上げることが可能と考えられる

3.2 経緯台の特性

減速ギアを外したことにより，トルクが減少し一定の電圧をかけても駆動する所と止まる所があった．したがって直流安定化電源を用いて経緯台が駆動を始めるまで電圧かけ，その時の電圧を経緯台の静止摩擦力を超えるために必要な電圧として記録した．結果を図 3-4 に示す．

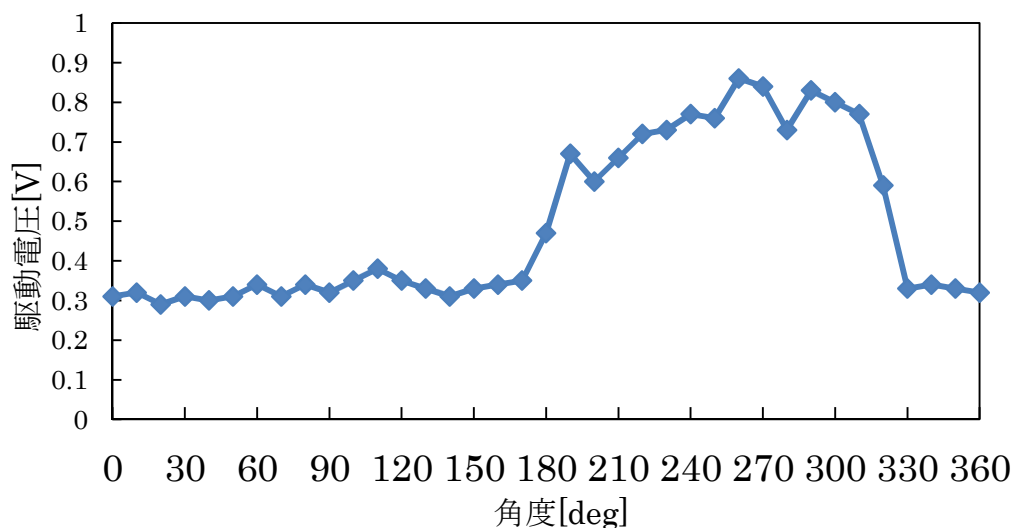


図 3-4 経緯台の負荷の偏り

この結果から 50 度の範囲で負荷が強くなる場所があると分かった．しかし，経緯台の内部構造が図 3-5 の様になっているため，固定用のネジを緩めて経緯台を動かすとどの部分に負荷の偏りがあるのかが分からなくなってしまう．この負荷の影響を受けにくくする方法として，ウォーム軸とウォームホイールの噛み合いを緩くする方法とプログラムにより高い電圧をかける方法の 2 つが考えられた．しかし，噛み合いを緩くしてしまうと経緯台のバックラッシュが大きくなるため，負荷が大きな場所でも駆動が可能なプログラムを作る必要があった．

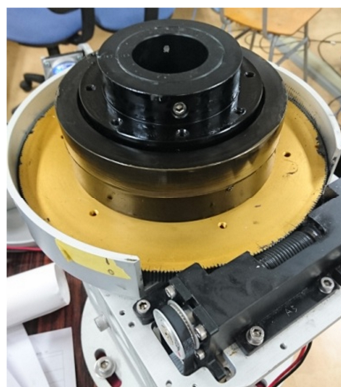


図 3-5 経緯台内部構造

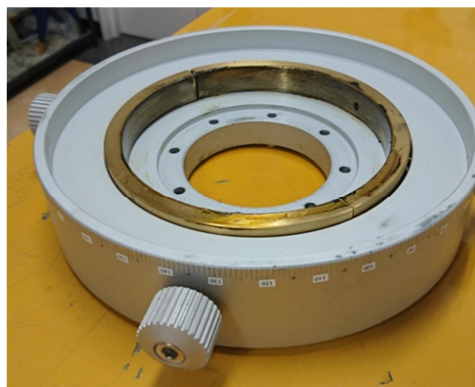


図 3-6 外蓋

3.3 電圧制御回路の電源選定

追尾対象を ISS から飛翔体に変更するにあたり、経緯台の駆動速度を高速化させる必要があった。従来使用していた直流安定化電源では、最大出力電流 1.7[A]までしか出力されず、DC モータ本来の性能が発揮されない状態にあり、追尾速度が不足していた。したがって、TDK ラムダ株式会社製 HWS-600-24(定格電圧 DC24[V], 最大電流 27[A])を使用した。それにより、モータの最大電流までモータの駆動が可能となり、電源によるモータ駆動の制約を無くした。

また、D/A-A/D 変換器の出力最大電圧が ± 10 [V]までしか出力できない問題点があった。

この問題は、電圧制御回路を使用し、操作電圧に比例した電圧制御を行うことで、最大出力電圧を超えることなくモータ印加電圧の調整が可能となった。

3.4 電圧制御回路の修復

昨年回路の故障や、ノイズの混入などにより、使用を断念した電圧制御回路の修復を行った。

まずは、故障部の追究のために、各部品に流れる電圧値の検出を行った。

また、2章に記載している図 2-15 の回路を使用している。

3.4.1 電圧制御回路の信号増幅実験

電圧制御回路の信号増幅確認のため、ファンクションジェネレーターを用いて信号電圧 ± 1 [V]、周波数 $f = 1$ [Hz]の方形波を、信号電圧として出力し、そのときのモータ電圧 V_2 と信号電圧 V_1 を測定した。(オペアンプ負極入力電圧、オペアンプ出力電圧、トランジスタベース電圧、シャント電圧も同時に信号データを取得しているが、今回は信号電圧とモータ印加電圧を記載している)

3.4.2 電圧制御回路の信号増幅実験結果

修復前後の 2 回に分けて測定を行った。修復前の結果を図 3-6 に、修復後の結果を図 3-7 に示す。図 3-6 より、まず初めに信号電圧が負の値を示したときのみ増幅されている点、次に、モータ印加電圧が増幅されていない点、発振を起こしている点の 3 つの問題点が浮上した。この後、各部品の入出力信号を測定すると、オペアンプの出力電圧より、正側の電圧値が出力されていないことが分かった。これは、プリント銅線ごとハンダが微小に剥離していることで、信号が上手く伝達されていないことが原因だった。

今回は剥離したプリント銅線の代用として、錫メッキ線を用いて再配線を行い、以前は旧制御装置の箱全体をアースして使用していたが、箱に酸化被膜による不動態が形成されていてテスターを用いて調べてみるとアースが取れていないことがわかった。また、発振については、コンデンサー C_2 の値が $1[\mu\text{F}]$ を使用していたが、静電容量の値が小さいためにローパス

フィルターが機能していないと疑い、静電容量の値を 10[μ F]に変えて再度実験を行った。修復後の実験結果を図 3-7 に示す。

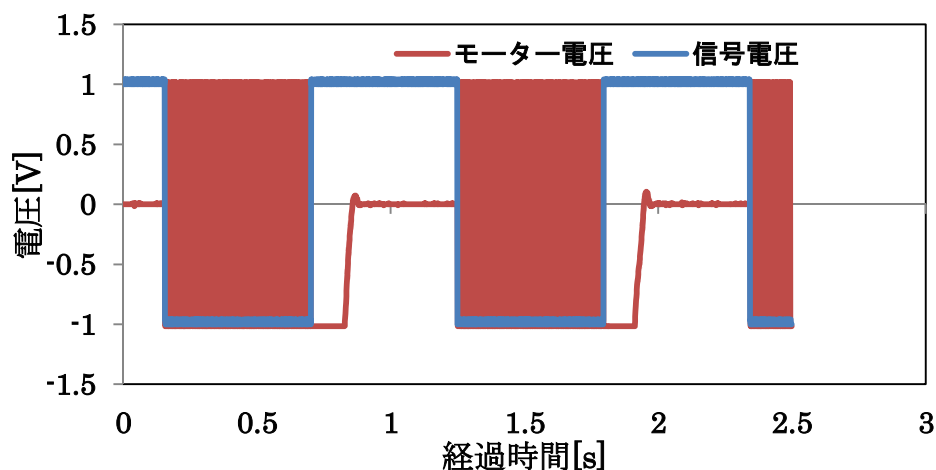


図 3-6 モーター電圧と信号電圧 修復前

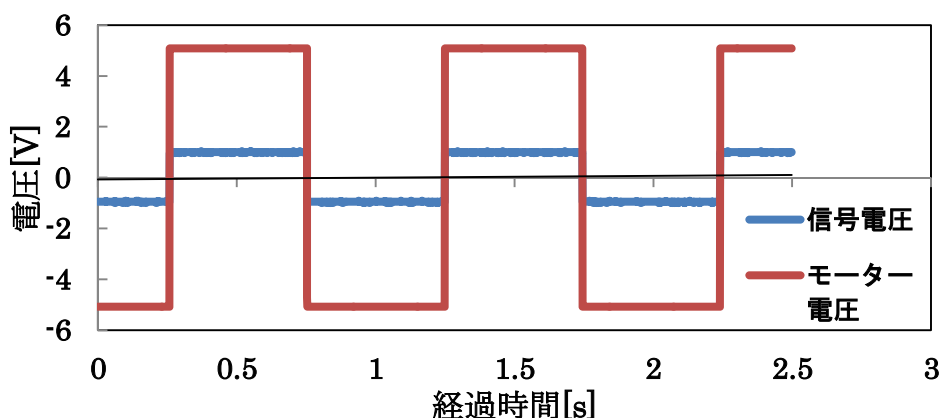


図 3-7 モーター電圧と信号線圧 修復後

3.4.3 考察

実験結果より、回路で設定した増幅率 5.5 倍で、信号電圧と位相がほぼ同じくモーター印加電圧が増幅されていることが確認できた。ここではデータを載せていないが、周波数や信号電圧を変えた際も周波数や同位相、増幅が確認できたのでこれをもって修復完了とした。

先程記述した、トランジスタの増幅不振の問題点については、プリント導線が剥離したことで、トランジスタが導通するのに十分なベース電流が流れなかったことが原因だと考えられる。また、アースを電圧制御回路全体で取りなおすことで、解消された可能性もあった。

基盤の故障が疑われる時は、始めに基盤の入出力信号を各部品確認することで、故障個所の特定を行う。また、必要であれば簡易回路を作成して、今回の様な回路の配線自体に問題があったのか、オペアンプやトランジス

タ本体が故障したのか，などより詳細に原因追究する．もちろんオペアン
プ本体を新規の物に取り替えて確認も可能だが，芋ハンダ，プリント銅線
の剥離などに原因がある場合も考慮することが必要となる．発振について
も， C_1 ， C_2 のコンデンサーがフィルターの役割を持っているなど，回路の
配線された各部品の意味の理解が必要不可欠である．

3.5 マイクロ回転ステージコントローラーの改造

図 3-8 にマイクロ回転ステージコントローラーの外観を示す．九州計測
器株式会社製 STAGE CONTROLLER とシグマ光機社製 MINI-5P を改造し
た．改造内容は，BNC 端子と 3 端子スイッチをコントローラー側面にボー
ル盤で穴を開けて取り付けた，モータ駆動用電源などは既製品のものをそ
のまま引用している．



図 3-8 マイクロ回転ステージコントローラー

次に STAGE CONTROLLER の内部に設置されているモータドライバーの
CW，CCW パルス信号入力端子にドータイトを使用して接着させた．その
端子と取り付けた BNC と GND の配線を行った．

簡易配線図を図 3-9 に示す．回転ステージの回転方向を変える際には，
手動でスイッチの切り替えが必要となる，回転ステージの角速度は，ファ
ンクションジェネレーターを用いて，入力電圧の周波数を指定することで，
(MINI-5P が脱調する，最大周波数 $f=10\text{k}[\text{Hz}]$ まで) 任意の速さで制御でき
るようにした．

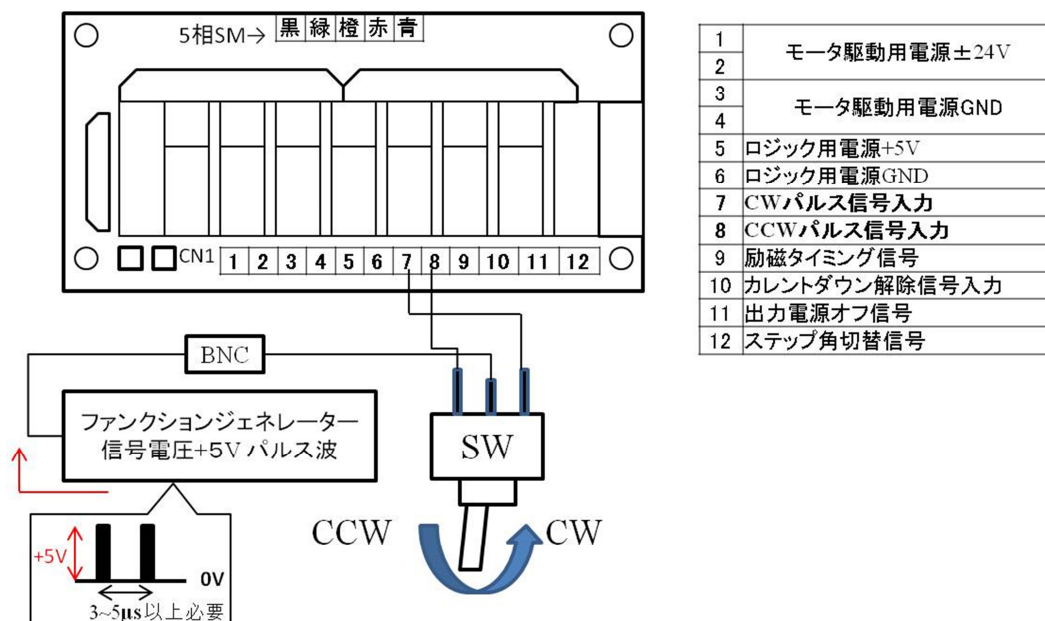


図 3-9 モータドライバー簡易配線図

また、ファンクションジェネレーターを使用して回転ステージの角速度を変更する際は、既存するモータドライバーの CW, CCW パルス信号入力端子に、今回配線した BNC の信号線を直接接続しているため、電圧降下が生じてしまう。つまり、STAGE CONTROLLER の入力信号部に BNC を取り付けて、コントローラ印加電圧をオシロスコープで計測し、オフセットなどを駆使して+5[V]付近のパルス波に調整する必要がある。入力パルス信号の仕様は、パルス幅 3 sec 以上、立ち上がり・下がり時間は、2 μ [sec]以下、パルスデューティ比 50%以下、回転方向を変更する際は、インターバル時間を最小 10 μ [sec] とする。+5[V]単パルスの信号電圧を入力すると約 0.005[deg]回転する。

第4章 制御プログラム

4.1 LabVIEW

LabVIEWとはVI(Virtual Instrument:グラフィカルプログラミング言語)を組み合わせて配線する事で、プログラムを製作することのできるプログラムソフトである。視覚的に認識でき、修正や変更が容易である。数式などをそのまま使用できるメリットがあり、初心者でも扱い易い。このソフトを用いて画像処理装置が算出した座標データを読み取り、プログラムを作成した。

4.2 画像処理装置の通信遅れについて

LabVIEWで取得したデータに遅れが確認されたことから、画像処理装置からの信号に遅れがある可能性を考え確認実験を行った。方法としては、まず乾電池を用いてその座標を画像処理装置で認識できるように印を付ける。そして乾電池の電圧と座標をLabVIEW上に入力する。その状態で乾電池を画面外に飛ばすと同時に電圧も遮断する。図4-1に実験方法の概要を示す。また、その時の入力データを図4-2に示す。

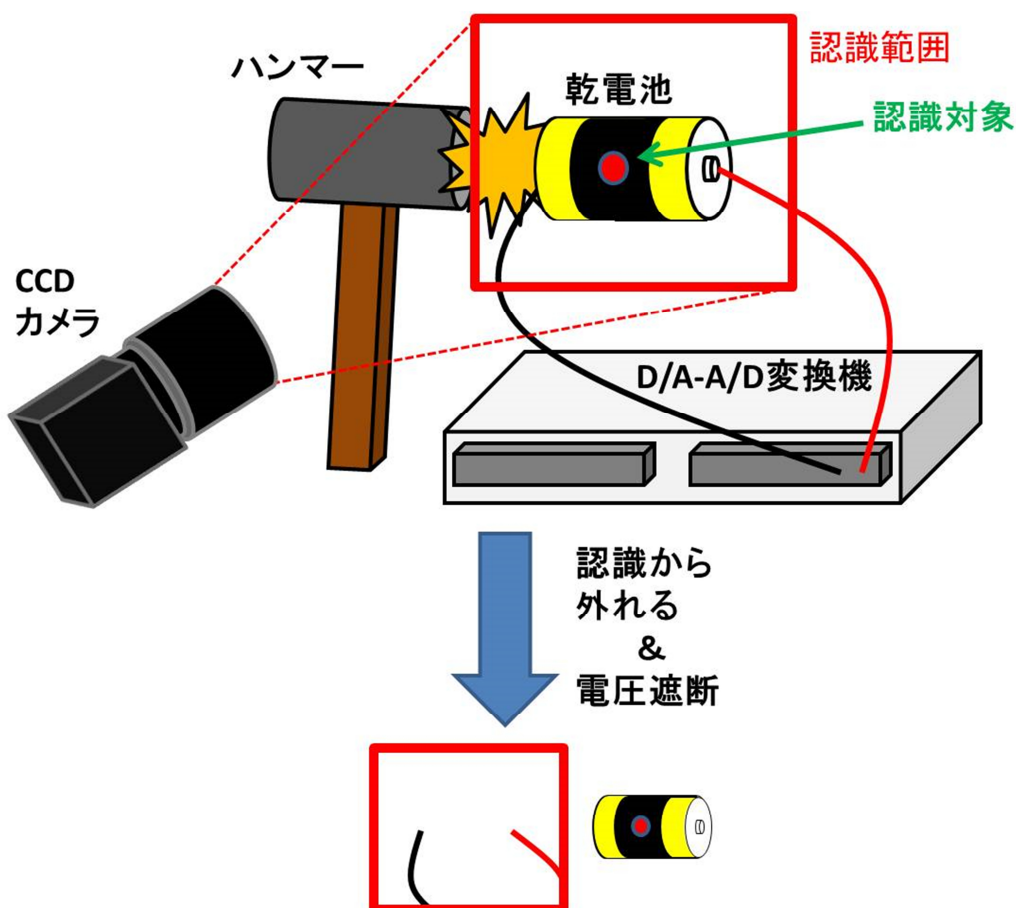


図 4-1 実験方法概要

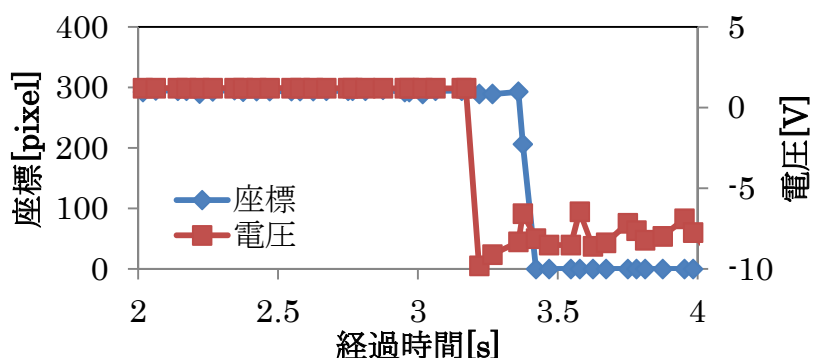


図 4-2 画像処理装置の通信遅れ

グラフより座標データの方が、約0.3秒入力が遅れていることが分かる。このことから今後追尾精度の向上を目指していく上でプログラムソフトもしくは画像処理装置の再選定が求められる。

4.3 制御プログラムの改良

4.3.1 P 制御

LabVIEW を用いて P 制御プログラムを作成した。画像処理装置が算出した追尾対象の現在座標と目標座標である CCD カメラの中心点との偏差を算出し、 K_p 値との積からモータ電圧 V を決定する。制御式は以下の式

$$V = K_p(x_o - x) \quad (4-1)$$

K_p : 比例ゲイン x_o : 目標座標 x : 現在座標

で表すことができる。以降偏差 $x_o - x$ を Δx とする。また、LabVIEW 上で作成した P 制御プログラムのブロックダイアグラムを図 4-3 に示す。

4.3.2 PI 制御

P 制御に積分項 I を組み合わせることにより追尾対象が目標座標から離れている際、その偏差を取り除くために積分値を足していき電圧を増大させる。つまり、偏差が存在する時間が長ければ長いほどモータ電圧はより大きくなる。制御式を(4-2)に示す。なお、積分時間 t は $\rightarrow \infty$ としている。

$$V = K_p \Delta x + K_i \int_0^t \Delta x dt \quad (4-2)$$

K_i : 積分ゲイン

しかし、追尾対象が目標座標に収束出来ずに静止している際、積分値が大きくなり静止摩擦力が動摩擦力に変わり一気に動き出すのでハンチングを起こすという問題点があった。

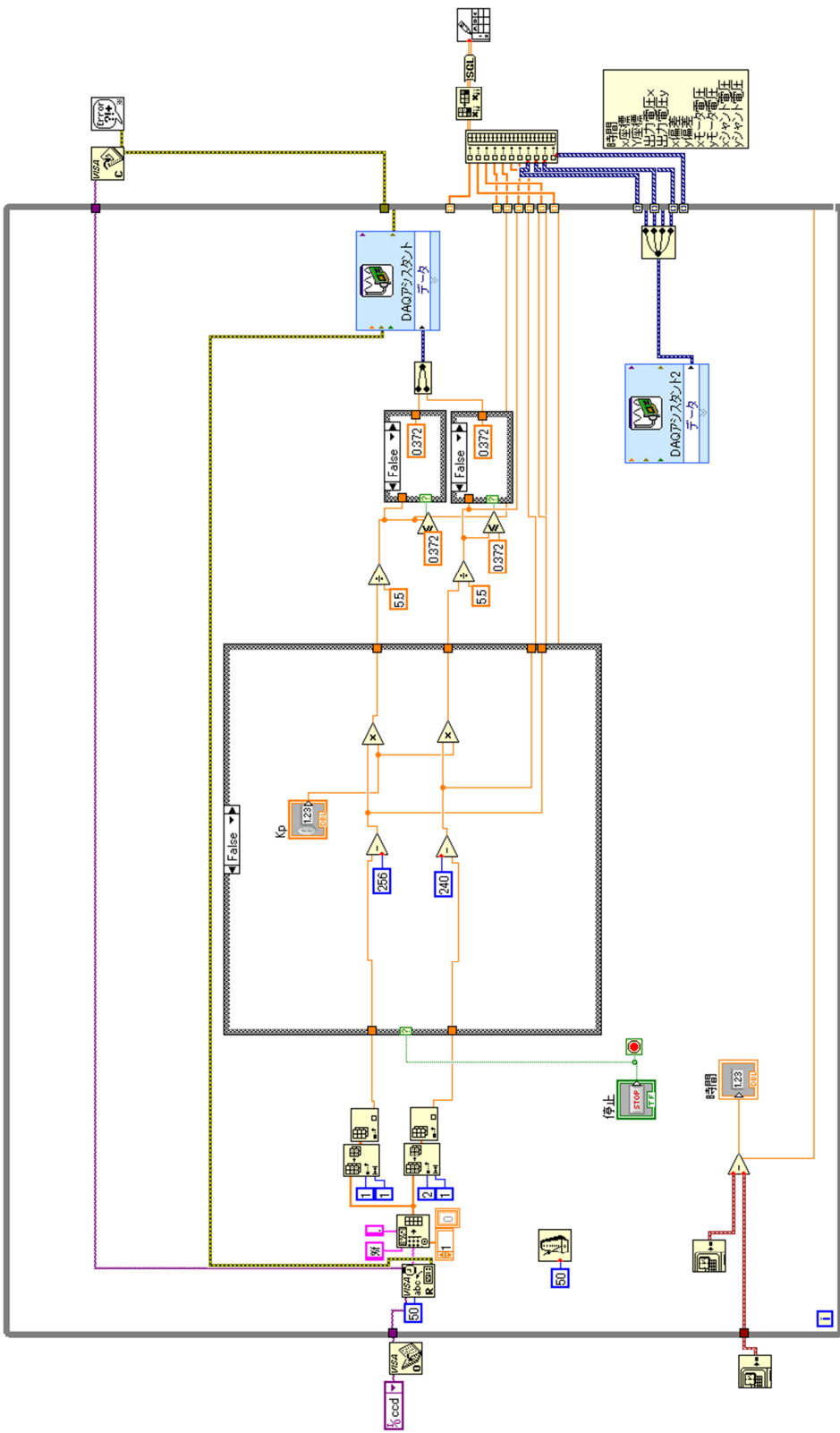


図4-3 P制御ブロックダイアグラム

4.3.3 K_p 値場合分け制御

P 制御のみでは目標値に収束させる際にオーバーシュートや、ハンチングにより、目標値に届かなかった。そのため、目標値との偏差ごとに K_p 値を変化させるプログラムを作成した。

最初に用いた方法としては、現在座標の値が含まれる範囲に応じて K_p 値を変化させるというものである。対象が目標値から近いほど電圧値を大きくし、目標値から遠いほど電圧値が小さくなるように K_p 値を変化させる。このプログラムでは調整が段階的にしか出来ないことと立ち上がり時間が掛かる問題があった。偏差による K_p 値の変化を表すグラフを図 4-4 に示す。また、この制御プログラムのブロックダイアグラムを図 4-5 に示す。

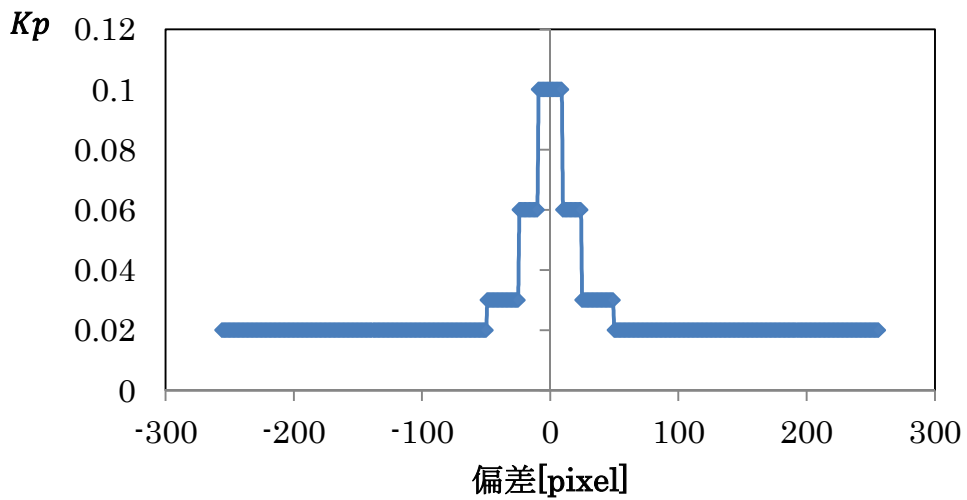


図 4-4 K_p 値場合分けプログラムにおける K_p 値変化

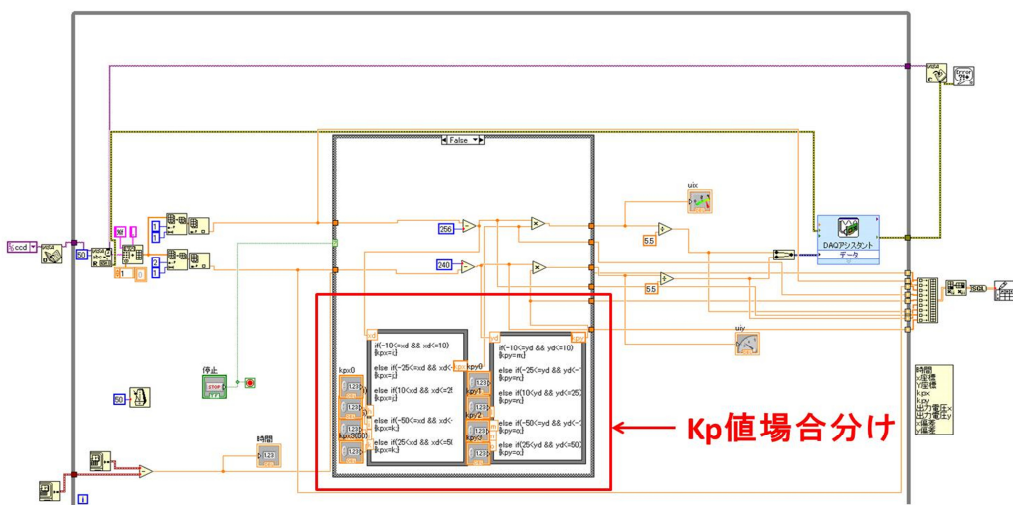


図 4-5 K_p 値場合分けプログラムのブロックダイアグラム

4.3.4 K_p 値ローレンツ型関数化制御

次に、関数を用いることによって K_p 値をより細かく変化させるプログラムを用いた。制御式は、式(4-3)に示す。制御式の基本形は P 制御と同様で K_p 値をローレンツ型関数として変化させている。また、偏差による K_p 値の変化量を表すグラフを図 4-6 に示す。しかし、このプログラムでは立ち上がり時間は早くなったが、オーバーシュートすることや K_p 値の変化量が比較的緩やかであり傾斜の調整に限界がある問題があった。さらに、ブロックダイアグラムについては図 4-5 の K_p 値操作の部分をローレンツ型関数の式にしている。

$$K_p = \frac{c}{(a\Delta x - b)} \quad (4-3)$$

a : ゲイン b : バイアス c : 定数

4.3.5 K_p 値ガウス型関数化制御

ローレンツ型関数を用いたときの K_p 値の変化量を自由に調整できない問題を解決するためガウス関数という別の関数を用いた。しかし、モータが動き出すまでに時間が掛かった。制御式については式(4-4)に示す。また、偏差による K_p 値の変化量を表すグラフを図 4-6 に示す。さらに、ブロックダイアグラムについては図 4-5 の K_p 値操作の部分をガウス関数の式にしている。

$$K_p = \exp\left\{\frac{-\Delta x^2}{2\sigma^2}\right\} + b \quad (4-4)$$

σ : 半値半幅 b : バイアス

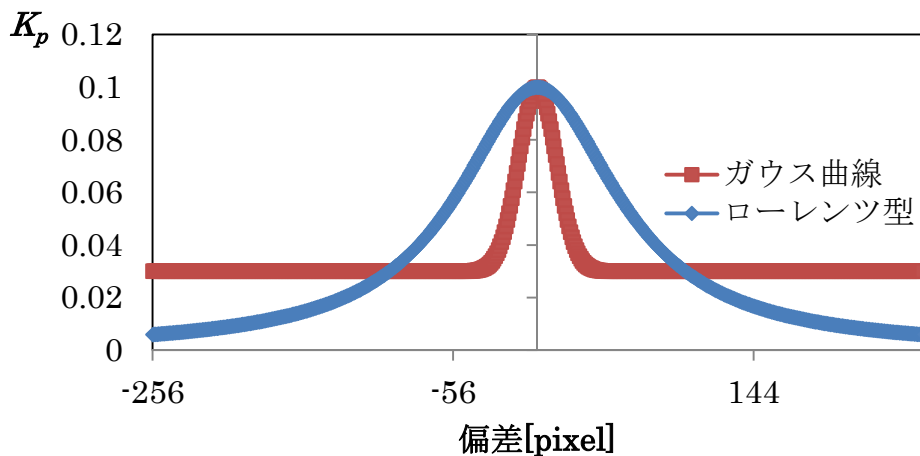


図 4-6 K_p 値関数化制御プログラムにおける K_p 値変化

4.3.6 パルス化制御

経緯台が動き始めると目標値に過剰な力で向かいハンチングが起きた。この原因は DC モータの減速ギアを取り外したことによるモータのトルク不足が原因と考えた。そこで、電圧をパルス波で出力する制御方法を考案した。信号電圧を瞬間的に高出力することによって撃力を発生させトルクの補正を行った。

ここで、この制御方法の有用性を確かめるための実験を行った。経緯台には、角度の変化によって偏りがあることがわかっているので、パルス波が経緯台の角度毎の負荷に与える影響について調べた。実験方法は、経緯台の角度を 30deg ずつ変えながらデューティ比を 100%から 5%まで段階的に変化させて、各位置で、動き始めるまで信号電圧を大きくし、駆動開始の電流値を調べた。図 4-7 に各デューティ比における最低駆動電流の変化を示す。

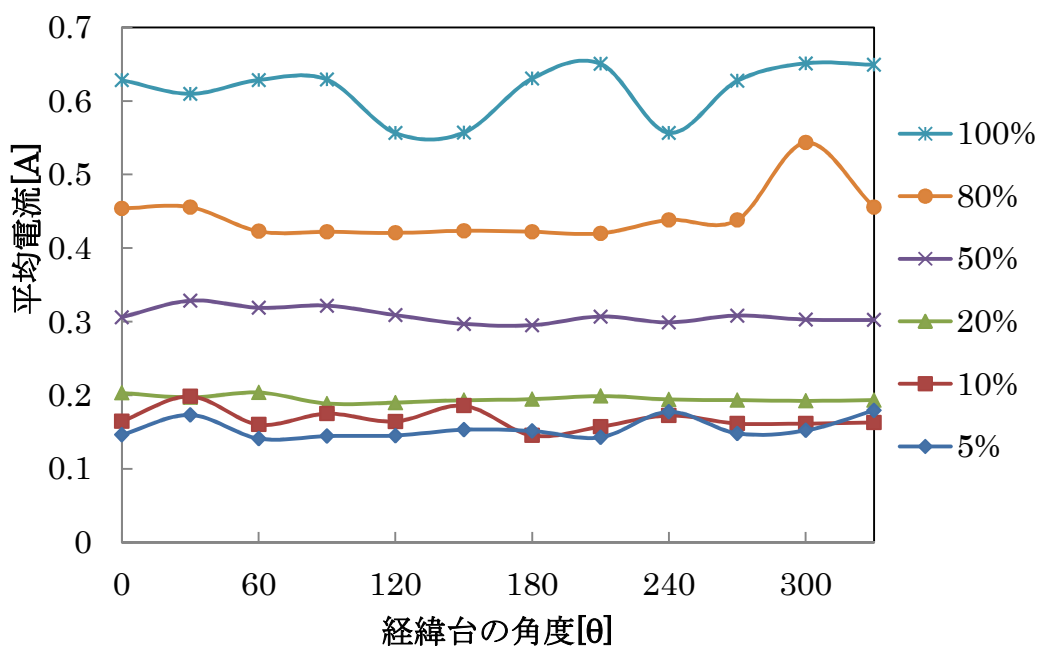


図 4-7 各デューティ比における最低駆動電流

図 4-6 の実験結果より、デューティ比 100%以外のときは、経緯台の角度に関わらず、平均電流がほぼ同じ値を示しており、グラフは横這いの形を取っている。つまり、経緯台の角度毎による負荷の影響をほぼ受けていないことからパルス化制御の有用性を確認した。この結果を利用して、式 (4-1) で算出した電圧をパルスで出力しモータに印加するプログラムを作成した。さらに、デューティ比を変更しても 1 周期あたりの電圧量が等しくなるように信号電圧の周期 T とパルス幅 τ を使い、 T を τ で割った値で

電圧を補正することで調整を行った。制御式は以下の式

$$V = K_p \Delta x \times \frac{T}{\tau} \quad (4-5)$$

となる。ここで、信号電圧の周期を T 、信号電圧のパルス幅を τ としている。また、ガウス型関数化制御で算出した電圧をパルス化する制御プログラムを作成した。制御式は

$$V = \left\{ (a - b) \exp\left(\frac{-\Delta x}{2\sigma^2}\right) + b \right\} \Delta x \times \frac{T}{\tau} \quad (4-6)$$

となる。さらに、PI 制御で算出した電圧をパルス化する制御プログラムも作成した。制御式は

$$V = \left(K_p \Delta x + K_i \int_0^t \Delta x dt \right) \times \frac{T}{\tau} \quad (4-7)$$

となる。また、ブロックダイアグラムについては図 4-8 に示す。

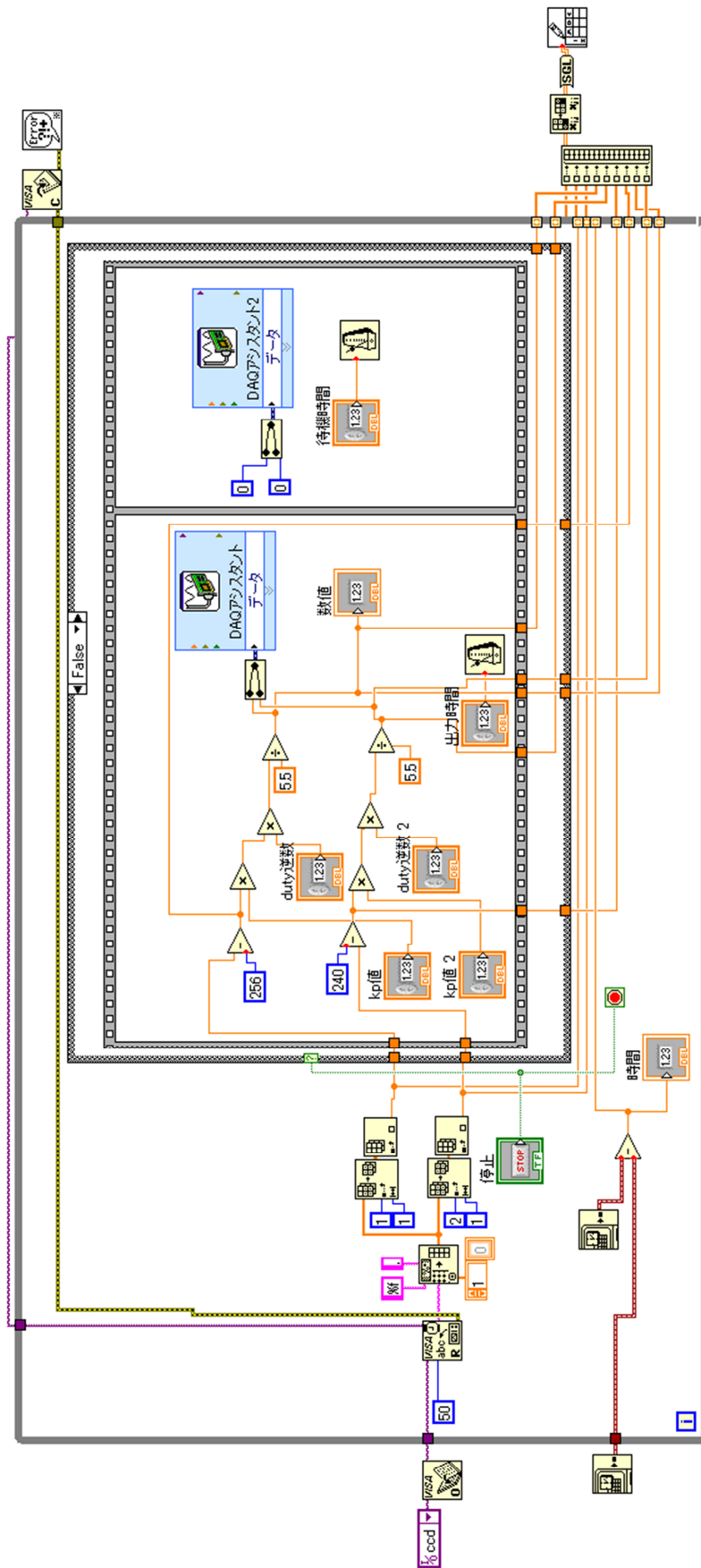


図4-8 パルス化制御ブロックダイアグラム

第 5 章 実験

5.1 ステップ応答実験

停止した追尾対象をどれだけ画面の中心に捉えることが可能か確認しプログラムの評価を行った。上記のプログラムを K_p 値を固定する制御, K_p 値を関数により変化させるプログラム, 電圧をパルスにより出力するプログラムの 3 つに分け比較を行った。また, K_p 値は各プログラムを最適化した K_p 値を使用している。

5.1.1 ステップ応答実験方法

ステップ応答の実験を行う手順を下記に示す。

- ① モニタにてレーザを認識するように画像処理の設定を行う。
- ② レーザを固定しモニタの画面で $x=50, y=50$ の位置に合わせる。
- ③ プログラムを起動させ, 目標値に近づき経緯台が停止するまでのデータを測定する。

5.1.2 実験結果

K_p 値を固定し制御するプログラムを使い, ステップ応答にて実験を行った結果を図 5-1 に示す。

P 制御は, 目標値に近づくほど偏差が減り電圧が減少する。それにより, 目標値付近で定常偏差を残し停止する結果となった。PI 制御はオーバーシュートした後に目標値に近づこうとするが, 停止した。しかし積分項により, 定常偏差を無くすため少しずつ電圧を上げていき 3.5 秒付近でもう一度動きだし 3 つの中で目標値に一番近づく結果となった。 K_p 値場合分け制御は, K_p 値を座標により変化させるため, 条件式によっては P 制御より集束することも可能だが, 今回モータの減速ギアを外したことにより K_p 値の調整がシビアとなり, この実験では収束値が P 制御とほぼ同じになった。

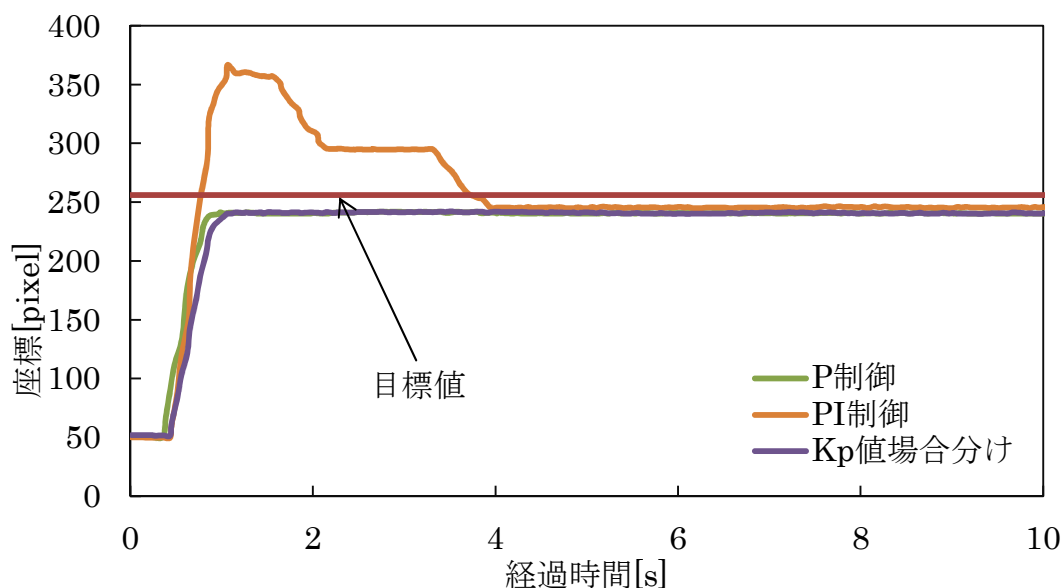


図 5-1 K_p 値固定時のステップ応答実験

次に K_p 値を関数により変化させる制御プログラムを使い、ステップ応答にて実験を行った。結果を図 5-2 に示す。ローレンツ関数を用いたプログラムは、目標値付近でハンチングが行った。理由として、ローレンツ型の関数はガウス関数に比べると、 K_p 値の変化が緩やかなため目標値から離れても K_p 値が減少しにくいためであると考えられる。ガウス関数はローレンツ関数に比べ立ち上がりで勢いよく収束値に向かいオーバーシュートが大きくなった。それは、 K_p 値の最小値をローレンツ関数に比べ大きく設定していたため、駆動し初めの電圧が高くなり勢いよく近づいた事が原因だと考えられる。

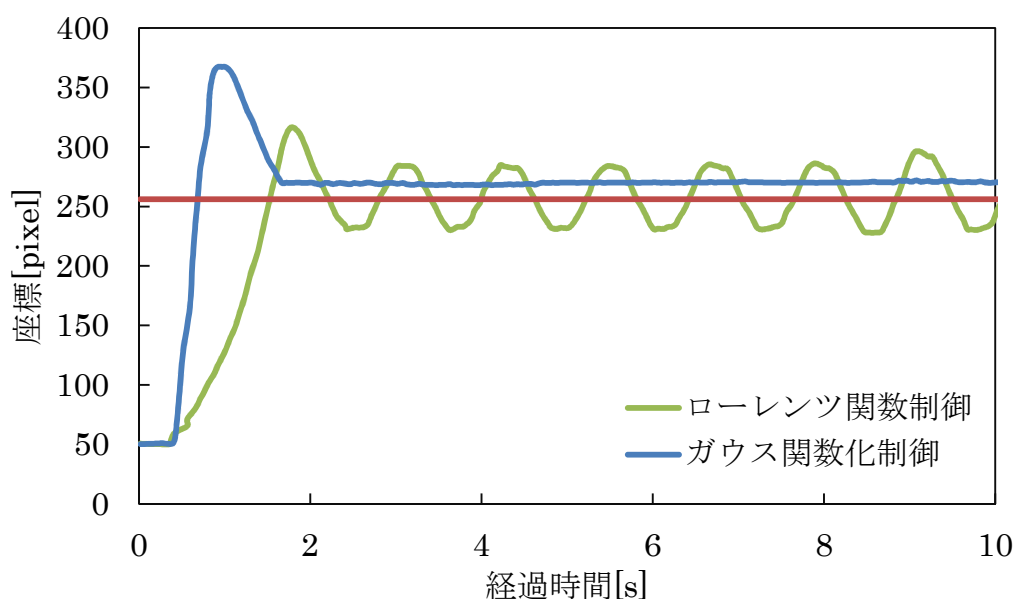


図 5-2 K_p 値関数化時のステップ応答実験

電圧をパルスによって出力し制御を行うプログラムでの実験結果を図 5-3 に示す。P 制御の電圧をパルスにて出力するインパルス制御では、収束は早いけど定常偏差が残る。これは偏差が少なくなったために電圧が下がり起こったと考えられる。そのため、 K_p 値の値をさらに大きくすると定常偏差を無くすることができると考えられる。PI 制御をパルス化した制御は、収束までに時間が掛かるが平均定常偏差は 1[pixel]に収束することが出来た。また積分項が効きだすまでの時間が短くなっている。これは積分項もパルス化の効果を受け 10 倍の値で定常偏差を取り除こうとしたためであると考えられる。ガウス関数の制御をパルス化する制御では、PI 制御をパルス化したものより収束までの時間が短い。しかし平均定常偏差は 1.4[pixel]程に大きくなってしまった。

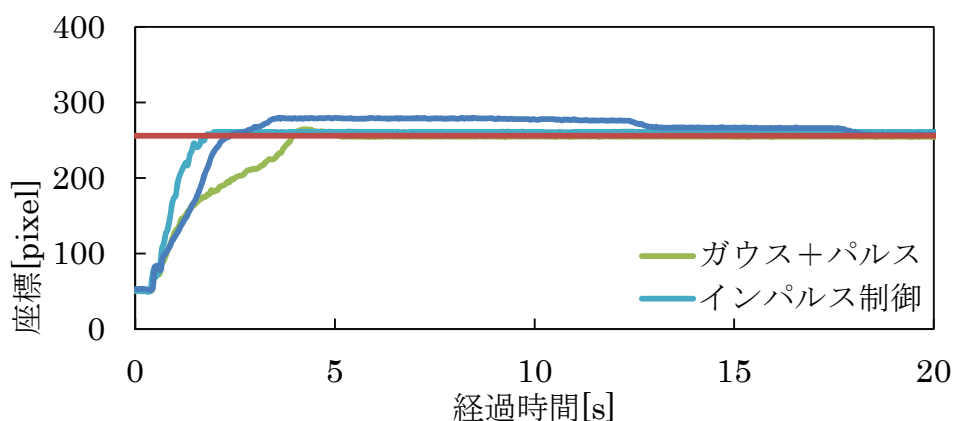


図 5-3 パルス化制御時のステップ応答実験

5.1.3 考察

ステップ応答では、目標値に近づくほど摩擦により止まってしまう。しかし、 K_p 値を上手く調節すると目標値で止めることも可能となる。また、パルス化による制御ではどれも瞬間的な電圧が大きくなるため目標値への収束は良くなり定常偏差が小さくなる。しかし、D/A-A/D 変換器の最大出力電圧に制限があるため、インパルス制御での収束には限界がある。

5.2 屋内追尾実験

飛行体の追尾を目標とするため、レーザを動かし追尾対象物と仮定し追尾させることでプログラムの評価を行った。使用したプログラムはステップ応答と同じものを使用した。実験手順は以下に示す。

5.2.1 屋内追尾実験方法

追尾実験を行う手順を下記に示す。

- ① モニタにてレーザを認識するように画像処理の設定を行う。
- ② レーザを回転ステージに取り付けモニタの画面で $x=0, y=0$ の位置に合わせる。
- ③ プログラムを起動させ、ステージコントローラを斜めに動かす。この時のレーザの速度は壁を 10 秒で 50cm 動くように調整した。

5.2.2 実験結果

K_p 値を固定し制御するプログラムを使い、屋内追尾にて実験を行った結果を図 5-4 に示す。

P 制御は目標値に収束することなく定常偏差が残ったまま追尾していたが、10 秒付近から目標値から離れていった。PI 制御は途中までは目標値から離れていたが徐々に目標値に向かいハンチングを起こした。これは積分項が入っているためだと考えられる。また、 K_p 値場合分け制御では P 制御と同様に定常偏差を残したまま追尾を行っている。しかし、P 制御のように目標値から離れ続けることはなく標準偏差は 12[pixel]程で 3 つの中では安定した追尾ができた。

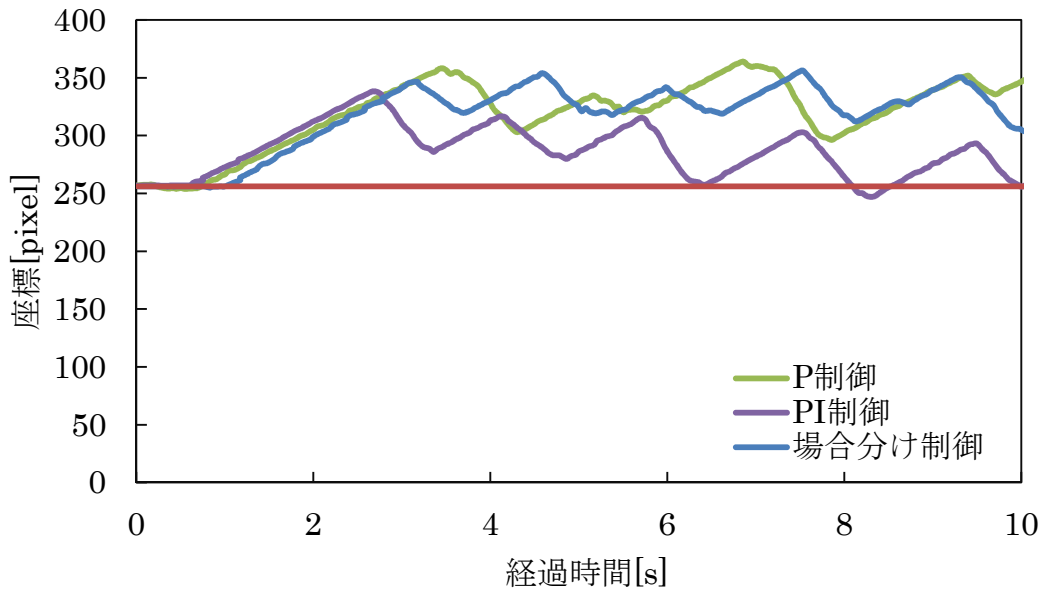


図 5-4 K_p 値固定時の屋内追尾実験

K_p 値を関数により変化させる制御プログラムを使い，屋内追尾にて実験を行った．結果を図 5-5 に示す．ローレンツ関数化制御ではハンチングを起こし追尾を行っている．これは K_p 値の変化が緩やかな山の形をしているため少し目標値から離れても中心に戻る事が可能となっている．しかし，ガウス関数化制御では K_p 値の変化が急峻なため一度目標値から離れてしまうと中心に戻る事が困難となる．そのため 8 秒付近で目標値から大きく離れていくこととなった．

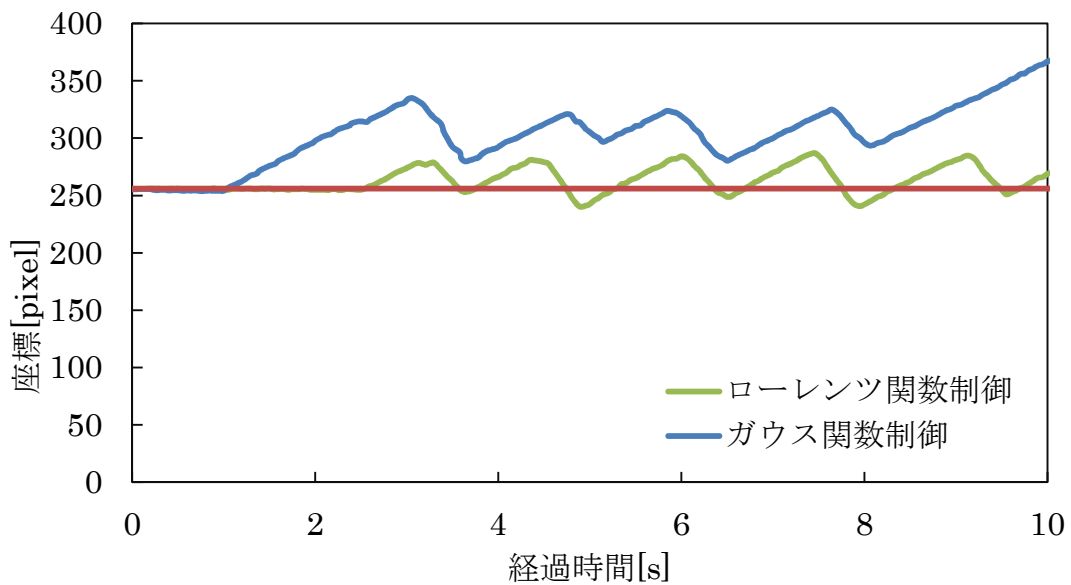


図 5-5 K_p 値関数化時の追尾実験

電圧をパルスによって出力し制御を行うプログラムでの屋内追尾実験の結果を図 5-6 に示す。

インパルス制御は定常偏差が残っているものの標準偏差が 2[pixel]に収束している。ガウス関数化制御をパルス化したものでは、定常偏差は小さくなっているが、標準偏差は 5[pixel]になっている。PI 制御をパルス化したものは定常偏差と標準偏差の両方が小さくなると予想されたがハンチングを起こし標準偏差が 11[pixel]と大きくなった。これは、積分項もパルス化し電圧が通常より 10 倍ずつ増えるため目標値を超えハンチングを起こしたと考えられる。したがって、パルス化制御の中では標準偏差がもっとも小さなインパルス制御が追尾に向いている。

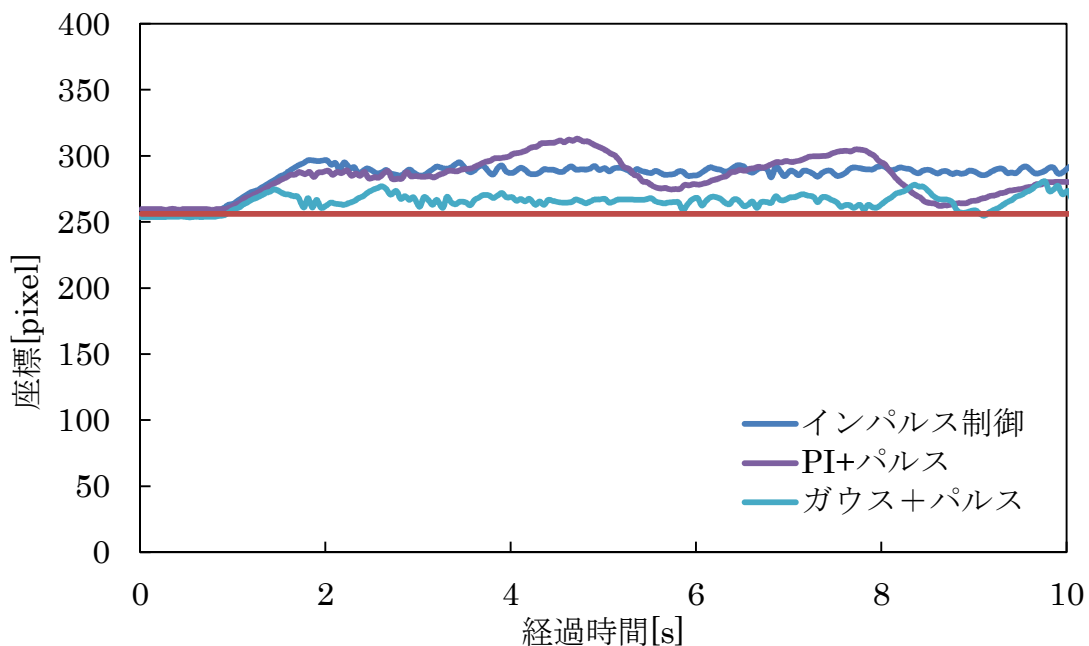


図 5-6 パルス化制御時の屋内追尾実験

5.2.3 考察

追尾を行う際はモニタにてブレが少ない制御が向いている。しかし、 K_p 値固定や、関数化による制御はハンチングを起こすものが多かった。原因として目標値に向かうほど偏差が減少し信号電圧が減少したことが考えられる。また、1 度停止すると再度静止摩擦力を越えなければ動き出さないためハンチングを起こしたと考えられる。インパルス化制御は標準偏差が一番小さく追尾に向いているが、定常偏差がまだ残っている。取り除くには電圧を上げる必要があるが、使用している D/A-A/D 変換器の最大出力電圧が $\pm 10[V]$ のため限界があった。そのため今回の実験では追尾対象の速度は ISS の半分の速度での追尾となった。今後インパルス制御で高速の対象を追尾する場合は D/A-A/D 変換器の再選定が必要となる。

6 章 結言

- [1] 減速ギア外すことで、立ち上がり時間が約1秒短くなる。しかし、微小な比例ゲインの変化でも追尾精度を大きく左右するため比例ゲインの調整が困難となった。
- [2] パルス化制御を用いることで、経緯台の角度毎による負荷の影響を受けにくくなり、標準偏差を約5pixelまで抑えることが出来た。
- [3] 経緯台のウォーム軸の負荷に偏りがあることが分かった。
- [4] PI制御をパルス化したものについては、ステップ応答はほぼ目標値に収束したが追尾実験では定常偏差があり今後 K_p 値の調整を行っていく必要がある。また、D/A-A/D変換器の再選定により最大出力可能電圧を増大させることで精度の向上が期待される。

謝辞

本研究を行うにあたりご指導頂いた河村良行教授に深く感謝をいたします。

参考文献

- (1) 株式会社 KEYENCE 「CV-3000 シリーズユーザーズマニュアル」
- (2) 牟田拳斗, 吉田健祐, 「画像処理装置を用いた人工衛星の自動追尾装置の研究Ⅲ 制御方法による追尾精度の違い」, 福岡工業大学知能機械工学科, 卒業論文 (2015)
- (3) 小野剛士, 引地勇人, 「画像処理装置を用いた自動追尾装置の研究Ⅳ ～人工衛星の追尾精度の評価～」, 福岡工業大学知能機械工学科, 卒業論文 (2015)
- (4) オリエンタルモーター株式会社 「5相ステッピングモーターユニット CSK シリーズ取扱説明書」

付録

ウォームギアの調整法

昨年、ウォーム軸とウォームホイールの調整をしっかりと出来ていなかったため経緯台にバックラッシュが起きていた。図 I の赤枠の中のネジを操作して噛み合い調整を行う。昨年はこの部品の高さが足りなかったため調整が出来ていなかった。今年は調整を行うため、アルミ板を加工し高さ調整を行った。締め付ける場合は右のネジを右回転させ左のネジを左回転させる。緩める場合は右のネジを左回転させ左のネジを右回転させる。



図 I ウォーム軸調整ネジ

オペアンプ駆動実験

使用する非反転増幅回路を図 II に示す，オペアンプのフィードバック信号とバーチャルショートが一致しているか比較を行うことで，オペアンプが正しく動作しているか確認を行った．ここで， V_1 を入力電圧， V_2 を反転入力信号， V_{in} を非反転入力信号， V_{out} をモータ印加電圧とする．

また，抵抗値は，表 2-1 に示したものを使用する．モータ印加電圧の抵抗値を $3[\Omega]$ とした理由は，使用している DC モータの巻き線抵抗を疑似したものである．

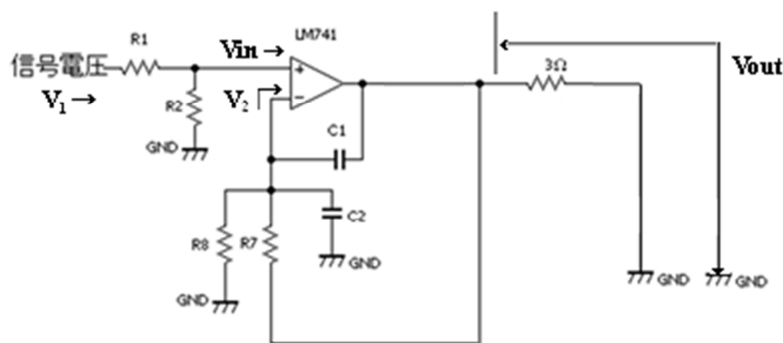


図 II 非反転増幅回路

ここで，非反転増幅回路の理論計算式より，理論モータ印加電圧 V_{out} は，

$$V_{out} = \frac{(R_7 + R_8)}{R_7} \times V_{in} = 5.5 \times V_1$$

となり，反転入力信号 V_2 は， R_7 と R_8 に分圧されて，

$$V_2 = \frac{V_{in}}{11} = \frac{V_1}{22}$$

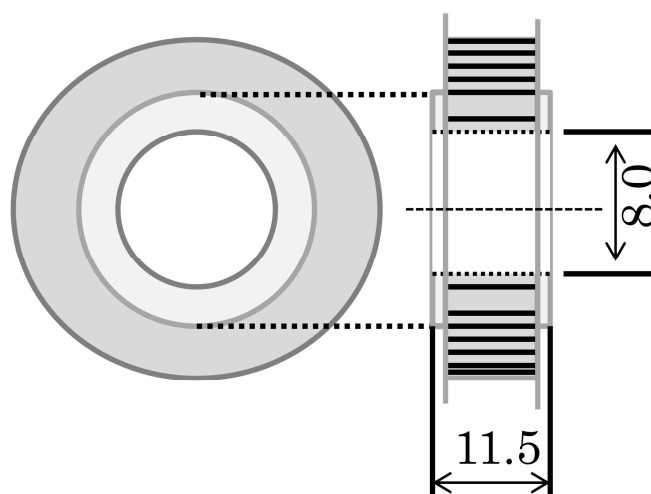
となる．

今回実験データは保存できなく，記載することはできないが，入力電圧 V_1 に対して，ほぼ同じ位相，波形の 5.5 倍の増幅された電圧が測定されたので，オペアンプは無事に駆動出来ていたことがわかった．オペアンプ自体を交換する手段もあるが，配線に問題がある場合も考慮する必要があるので，もし，今後故障が疑われる場合は，動作特性を知るためにも同様の実験を行って欲しい．

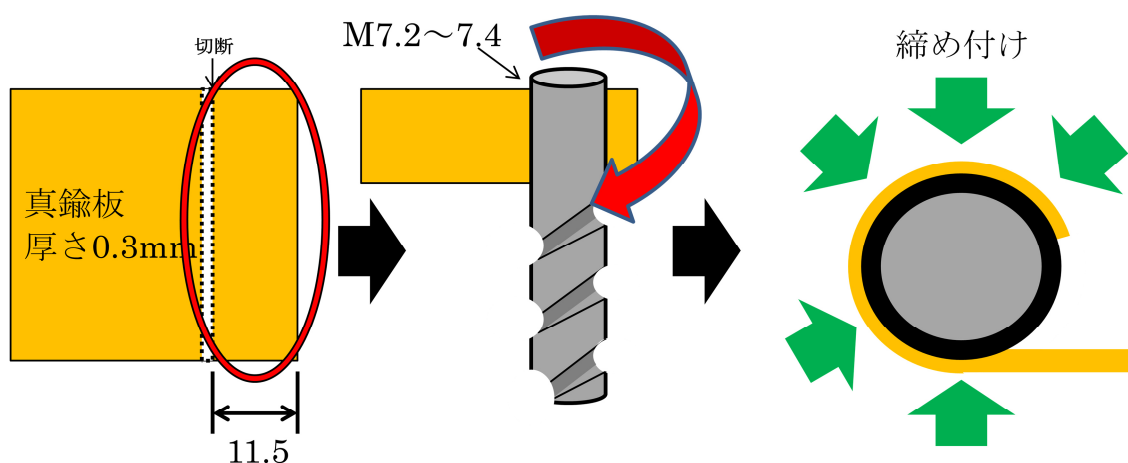
スペーサー加工

減速ギアを取り外すにあたって、ピニオンの外径 7mm とプーリの内径 8mm とサイズが合わない問題があり、スペーサーを作成する必要があった。スペーサーの加工手順を以下に示す。

- (1) まず、図Ⅲに示している、ピニオンの寸法をノギスで測定する。
- (2) 天神カホ・パーツセンターで、厚さ 0.3mm の真鍮板と、厚さ 0.5mm アルミ板を調達する。真鍮板は、丈夫で延性に優れているので加工の行い易さから選定した。アルミ板はモータの固定場所調整に使用（調整が必要な場合）
- (3) 図Ⅳに示している通りに、真鍮板を切断する。
- (4) M7.2~7.4 のドリルなどをあてがって、真鍮板を巻きつける。
- (5) IMPERIAL EASTMAN 社製の cat.no.525-F を用いて全方向から締め付ける。



図Ⅲ ピニオン寸法測定



図Ⅳ スペーサー加工

プログラム作成時の注意点

1. LabVIEWにてプログラムを停止させると、停止直前の電圧を出力し続ける。これを防ぐために停止ボタンを押すと0Vを出力するようにプログラムを作成する必要がある。
2. 追尾対象が認識範囲外へ出た際、不規則な電圧がDCモータに出力され経緯台が暴走してしまう。これを防ぐために認識が外れた際に0Vを出力するプログラムを組む必要がある。