

平成 27 年度卒業論文

画像処理を用いた自動追尾装置の開発

福岡工業大学 工学部

知能機械工学科

12E2064 牟田 拳斗

12E2072 吉田 健祐

指導教員 河村 良行

- 1 章 緒言
- 2 章 実験装置
 - 2.1 経緯台
 - 2.2 望遠鏡
 - 2.3 画像処理装置
 - 2.4 CCD カメラ
 - 2.5 制御装置
 - 2.5.1 制御回路
 - 2.5.2 D/A-A/D 変換器
 - 2.5.3 スイッチング電源(*PBA/PBW50F*)
 - 2.6 一眼レフカメラ
 - 2.7 DC モータ
 - 2.8 多出力直流安定化電源
 - 2.9 二軸ステージコントローラー
 - 2.10 バッテリー
 - 2.11 DC/AC インバータ
- 3 章 制御プログラム
 - 3.1 LabVIEW
 - 3.2 PID 制御
 - 3.3 追尾制御プログラム
- 4 章 屋内実験
 - 4.1 実験目的
 - 4.2 実験概要
 - 4.3 屋内収束実験
 - 4.3.1 屋内収束実験方法
 - 4.4 電流制御収束実験
 - 4.4.1 電流制御電源電圧変更収束実験
 - 4.4.2 電流制御時間補正収束実験結果
 - 4.5 電圧制御収束実験
 - 4.6 屋内収束実験結果からの考察
 - 4.7 屋内追尾実験
 - 4.7.1 屋内追尾実験方法
 - 4.7.2 電流制御追尾実験結果
 - 4.7.3 電圧制御追尾実験結果
 - 4.7.4 屋内追尾実験結果からの考察

- 4.8 レンズ変更屋内追尾実験
 - 4.8.1 レンズ変更
 - 4.8.2 レンズ変更屋内追尾実験結果
 - 4.8.3 レンズ変更屋内追尾実験からの考察
- 4.9 ISS 疑似追尾実験
 - 4.9.1 ISS 疑似追尾実験準備
 - 4.9.2 高速追尾実験方法
 - 4.9.3 ISS 疑似追尾実験結果
 - 4.9.4 ISS 疑似追尾実験結果からの考察
- 4.10 積分項のプログラム最適化
 - 4.10.1 実験場所変更
 - 4.10.2 積分項プログラム最適化後の追尾実験結果
 - 4.10.3 実験結果からの考察

5章 実験シミュレーション

- 5.1 シミュレーション目的
- 5.2 シミュレーション概要
- 5.3 シミュレーションで使用した式
- 5.4 シミュレーション結果
- 5.5 シミュレーション結果からの考察

6章 屋外実験

- 6.1 実験目的
- 6.2 実験概要
 - 6.2.1 アライメント方法
- 6.3 一眼レフの設定
- 6.4 制御装置パッケージ化
- 6.5 屋外実験方法
- 6.6 屋外実験における天候不良
- 6.7 屋外追尾実験結果
 - 6.7.1 実験結果からの考察

7章 結言

謝辞

参考文献

第 1 章

緒言

宇宙工学への関心が近年高まっている中、様々な衛星が宇宙に送られている。本校でも小型人工衛星「FITSAT-1」が打ち上げられ現在は役目を終え、人工衛星プロジェクトにて新たな衛星の開発を行っている。その際、追尾観測を行うことのできる環境が必要だと思われた。

それを踏まえ昨年度は、ISS(国際宇宙ステーション)の観測を目標とし追尾装置の開発が行われた。今年度は追尾装置の完成と実際の追尾を行い一眼レフカメラにて衛星写真を撮影して画像処理を施し鮮明な写真を撮ることを目標とし追尾性能の評価と屋外実験を行った。



図 1.1 実験風景

第 2 章 実験装置

図 2.1 に実験装置の概要を示す。壁にレーザーポインタを照射し追尾目標とし、CCD カメラにて、撮影した画像データをもとに画像処理装置 (CV-3000) により現在の座標を算出する。座標データをコンピュータに送り LabVIEW にて目標 (追尾物体) の座標を計算し、目標の座標に移動する為に必要な電圧信号を計算にて出力する。信号は D/A-A/D 変換器を介して制御回路にて増幅を行い経緯台の DC モータを制御している。

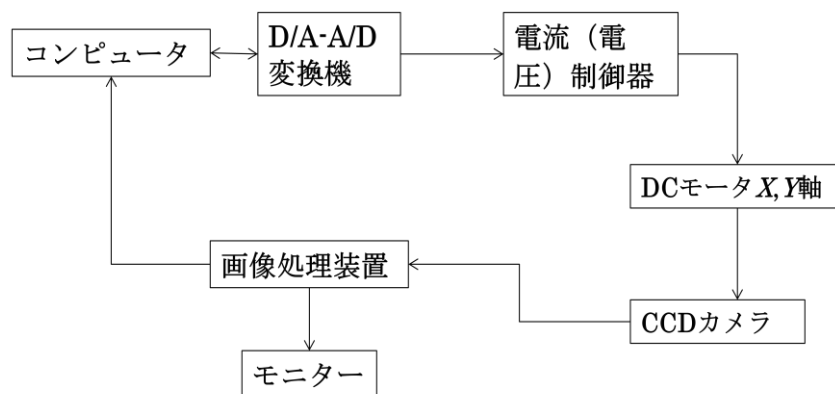


図 2.1 装置概要

2.1 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

経緯台は歯車によって動力を伝達している為バックラッシが存在する。y軸, x軸それぞれにおいてモータを停止させた状態でプログラムを動かし経緯台を軽く揺らし, どの程度のバックラッシが存在するのか焦点距離 50[mm]のレンズを用いて調べた。結果を図 2.3, 図 2.4 に示す。Y軸においては約 20[pixel], X軸においても約 20[pixel]程度のバックラッシによる誤差が出ることが分かった。角度にしてどちらも約 0.16[deg]程度のバックラッシが確認できた。

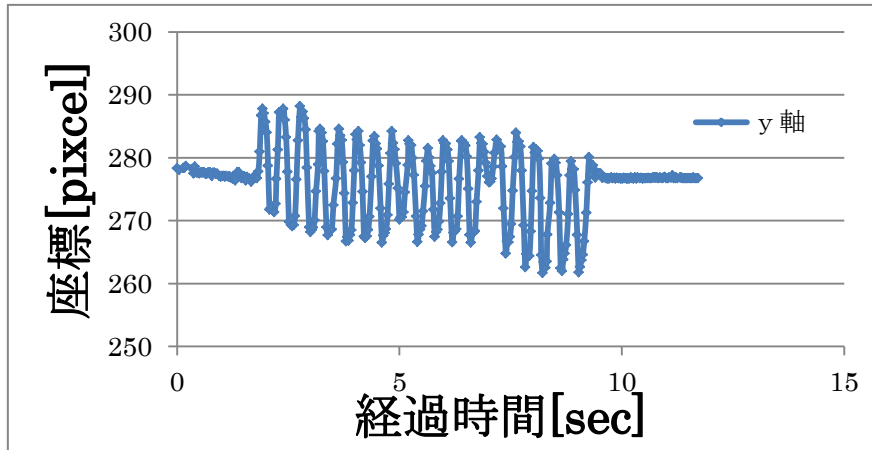


図 2.3 経緯台における y 軸バックラッシ

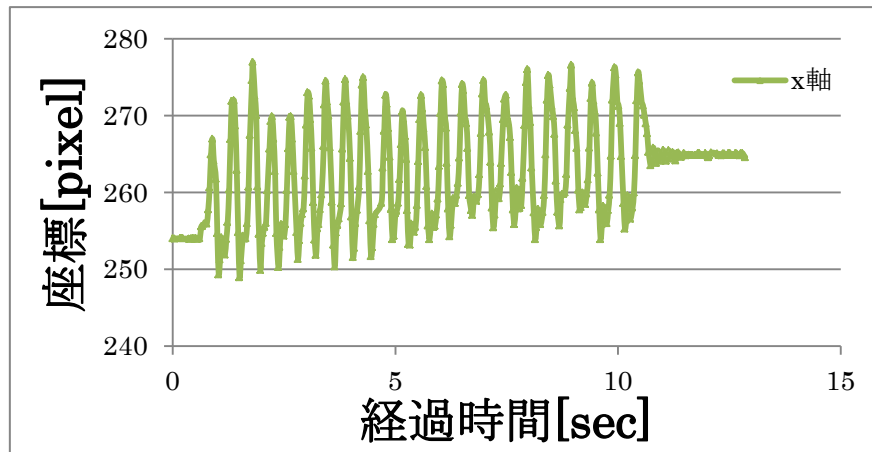


図 2.4 経緯台における x 軸バックラッシ

2.2 望遠鏡

望遠鏡の外観を図 2.5 に示す。KenkoTokina 社製の SkyExplorerSE250N を使用している。有効径 254[mm]，焦点距離 1200[mm]であり経緯台に取り付け，衛星の写真撮影の際望遠のためレンズの代わりとして使用している。



図 2.5 望遠鏡

2.3 画像処理装置

画像処理装置の外観を図 2.6 に示す。KEYENCE 社製の CCD カメラを使用する事ができる。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物の場所，大きさを数値データとして表すことができる。今回の実験では画像処理装置に認識したい追尾対象を画像登録し，プロブ計測にて画像を色抽出しカラー二値化し色相，彩度，抽出感度を設定することによって追尾対象の認識をおこなっている。

プロブとは二値画像内で同一の濃度を持つ画素の集合の事であり，プロブ計測とは面積の大きさ順に識別管理する事である。



図 2.6 画像処理装置

2.4 CCD カメラ

CCD カメラの外観を図 2.7 に示す。CCD カメラ (CV-35V) を使用し、電子シャッターの速度を 0.05 ~ 9000[msec] の範囲で設定変更を行うことができる。レンズは焦点距離 8[mm] と 50[mm] の二つを使用し実験と観測を行った。



図 2.7 CCD カメラ

レンズごとの視野角の計算を行った。

計算方法

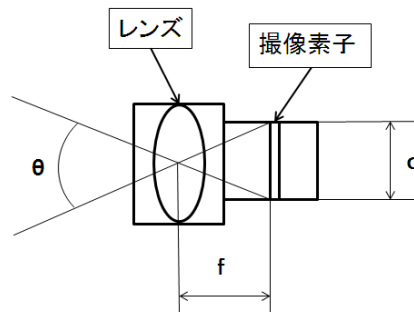


図 2.8 カメラ内部

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{d}{2f} \quad (2-1)$$

を用いて視野角の計算を行った。

表 2.1 レンズの視野角

	8[mm]	50[mm]
X 軸視野角	26.02[deg]	4.28[deg]
Y 軸視野角	24.65[deg]	4.00[deg]

2.5 制御装置

制御装置の外観を図 2.9 に示す。内部にはスイッチング電源、D/A-A/D 変換器(USB-6211)、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

2.5.1 制御回路

制御回路図を図 2.10 に示す。コンピュータからの操作電圧を受けて操作電圧に比例した電圧操作を行い、モータの印加電圧をフィードバックしている。

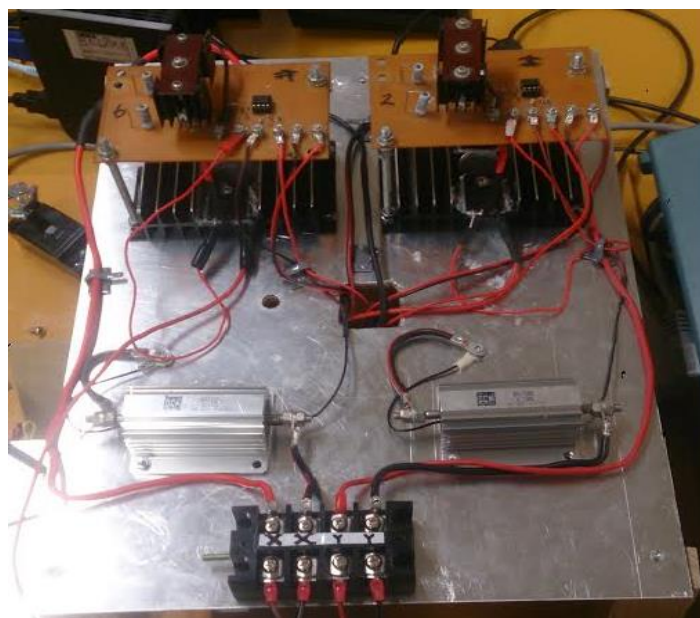


図 2.10 制御回路

電流制御，電圧制御回路の使用部品を以下の表 2.2，表 2.3 に示す。

表 2.2 電流制御使用部品

電流制御回路	部品名	仕様
R ₁ , R ₂ , R ₅		抵抗 (10KΩ, ±5%)
R ₃		抵抗 (1KΩ, ±5%)
R ₄		シャント抵抗 (0.1Ω)
OP アンプ	UA741CP	OP アンプ (±15V)
C ₁		コンデンサ (0.01 μF)
C ₂		コンデンサ (0.1 μF)
Q ₆	2SD880	トランジスタ (30A, 30W)
Q ₇	2SB834	トランジスタ (-30A, 30W)

表 2.3 電圧制御使用部品

電圧制御回路	部品名	仕様
R ₁ , R ₂ , R ₇		抵抗 (10KΩ, ±5%)
R ₃ , R ₈		抵抗 (1KΩ, ±5%)
R ₄ , R ₅		抵抗 (50Ω, ±5%)
R ₆		シャント抵抗 (0.1Ω)
OP アンプ	UA741CP	OP アンプ (±15V)
C ₁		コンデンサ (0.01 μF)
C ₂		コンデンサ (1.1 μF)
Q ₆	2SD880	トランジスタ (30A, 30W)
Q ₇	2SB834	トランジスタ (-30A, 30W)
Q ₈	2SA1943	トランジスタ (15A, 150W)
Q ₉	2SC5200	トランジスタ (-15A, 150W)

2.5.2 D/A-A/D 変換器

D/A-A/D 変換器の外観を図 2.11 に示す。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、電圧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 $\pm 10[V]$ のものを使用している。



図 2.11 D/A-A/D 変換器

2.5.3 スイッチング電源(PBA/PBW50F)

スイッチング電源の外観を図 2.12 に示す。コーセル株式会社製（電圧 $\pm 15[V]$ ，電流 $\pm 1.7[A]$ ）の物を使用しており，モータを動かす為の電圧の出力を担っている。

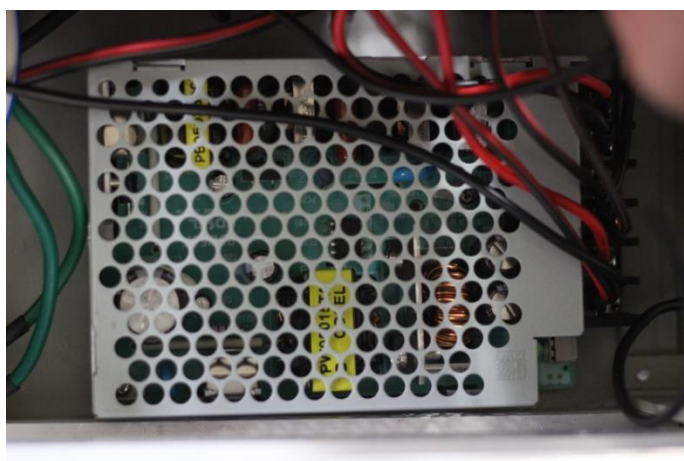


図 2.12 スイッチング電源

2.6 一眼レフカメラ

一眼レフカメラの外観を図 2.13 に示す。CANON 製の *EOS Kiss X6i* (1790 万画素) を使用し、望遠鏡に取り付け衛星の撮影に使用している。



図 2.13 一眼レフカメラ

2.7 DC モーター

DC モーターの外観を図 2.14 に示す。ツカサ電工株式会社製の TG-77A (定格電 24[V], 定格トルク 98[mN·m], 減速比 1/5, インダクタンス 3.3[mH]) を使用し、プーリーベルトによる伝達によって経緯台の方位角, 仰角を動かすために使用している。

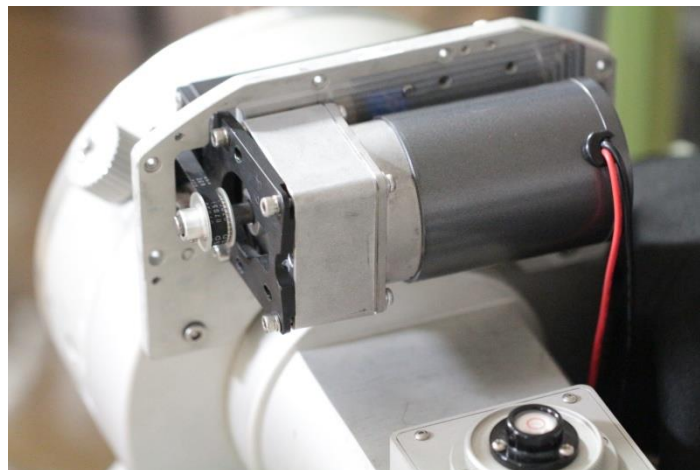


図 2.14 DC モーター

2.8 多出力直流安定化電源

多出力直流安定化電源の外観を図 2.15 に示す。KENWOOD 社（現 TEXIO 社）製の PW36-1.5AD（最大電圧±36[V]，最大電流±1.5[A]）を使用し，スイッチング電源を使用するまでの間モータを動かす為の電圧出力として使用した。



図 2.15 多出力直流安定化電源

2.9 二軸ステージコントローラー

二軸ステージコントローラーの外観を図 2.16 に示す。シグマ光機株式会社製の MINI-5P を屋内追尾実験にて使用した。コントローラーと自動ステージがあり，屋内追尾実験でレーザーポインタから照射される目標光を x 軸方向へ移動させるために使用した。ステッピングモータで動いており 5[pps]~10k[pps]の間で 4 段階の速度変更が可能であり今回の実験では 50[pps]と 500[pps]の速度にて実験を行った。



図 2.16 二軸ステージコントローラー

2.10 バッテリー

バッテリーの外観を図 2.17 に示す。Panasonic 製 BlueBatterycaos (12[V]) を屋外実験の際、家庭用電源の代わりとして使用した。



図 2.17 屋外実験時に使用したカーバッテリー

2.11 DC/AC インバータ

DC/AC インバータの外観を図 2.18 に示す。セルスター工業株式会社製の HG-350/12V(入力電圧 DC12[V], 出力電圧 AC100[V], 最大出力 350[W], 定格出力 280[W]) を屋外実験にてバッテリーの DC を AC に変換しパソコンなどの電源として使用する為に使用した。



図 2.18 DC/AC インバータ

第 3 章

制御プログラム

3.1 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もある。今回の研究ではプログラム製作に使用した。

3.2 PID 制御

自動制御方式の中でもっとも良く使われる制御方式でありスムーズな制御が可能である。目標値と現在値との差に比例した操作を行う P 制御、偏差の時間積分に比例して操作を行う I 制御、急激な変化が起こった場合その速度に比例して対抗しようとする操作を行う D 制御、これらの組み合わせで制御するものである。

$$U = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_{t-\tau}^t e(t) dt \quad (3-1)$$

が PID 制御の制御式である。

3.3 追尾制御プログラム

流れとして図 3.1 にフローチャートを示す。制御として閉ループプログラムを利用している。現在の座標を読み取り目標位置と比較し差を制御量 err として制御式に代入し PID 制御を行っている。

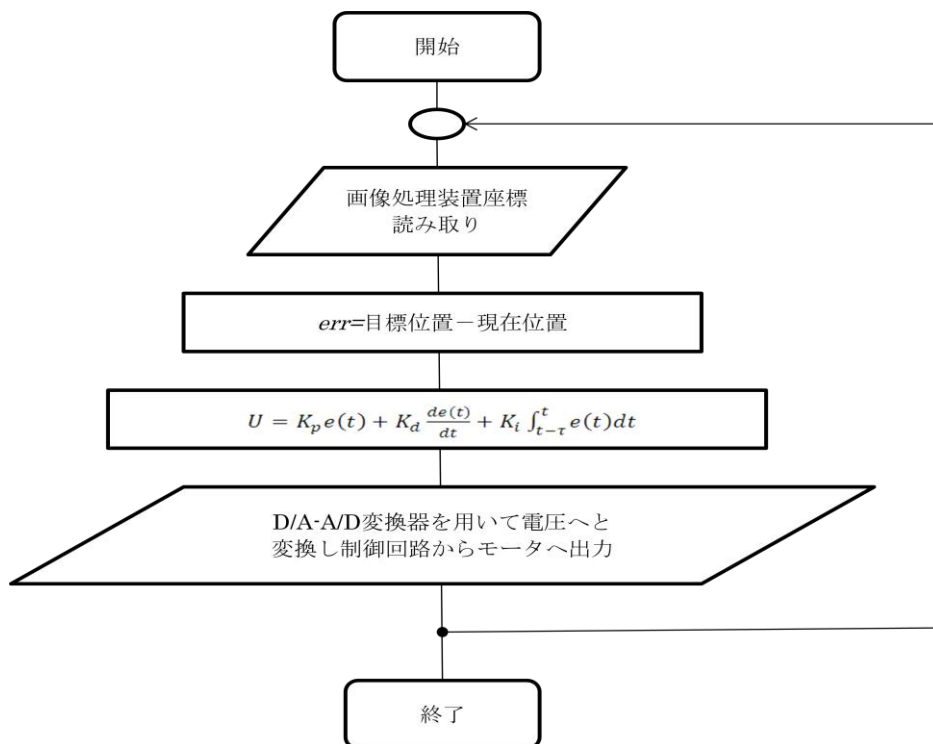


図 3.1 追尾制御フローチャート

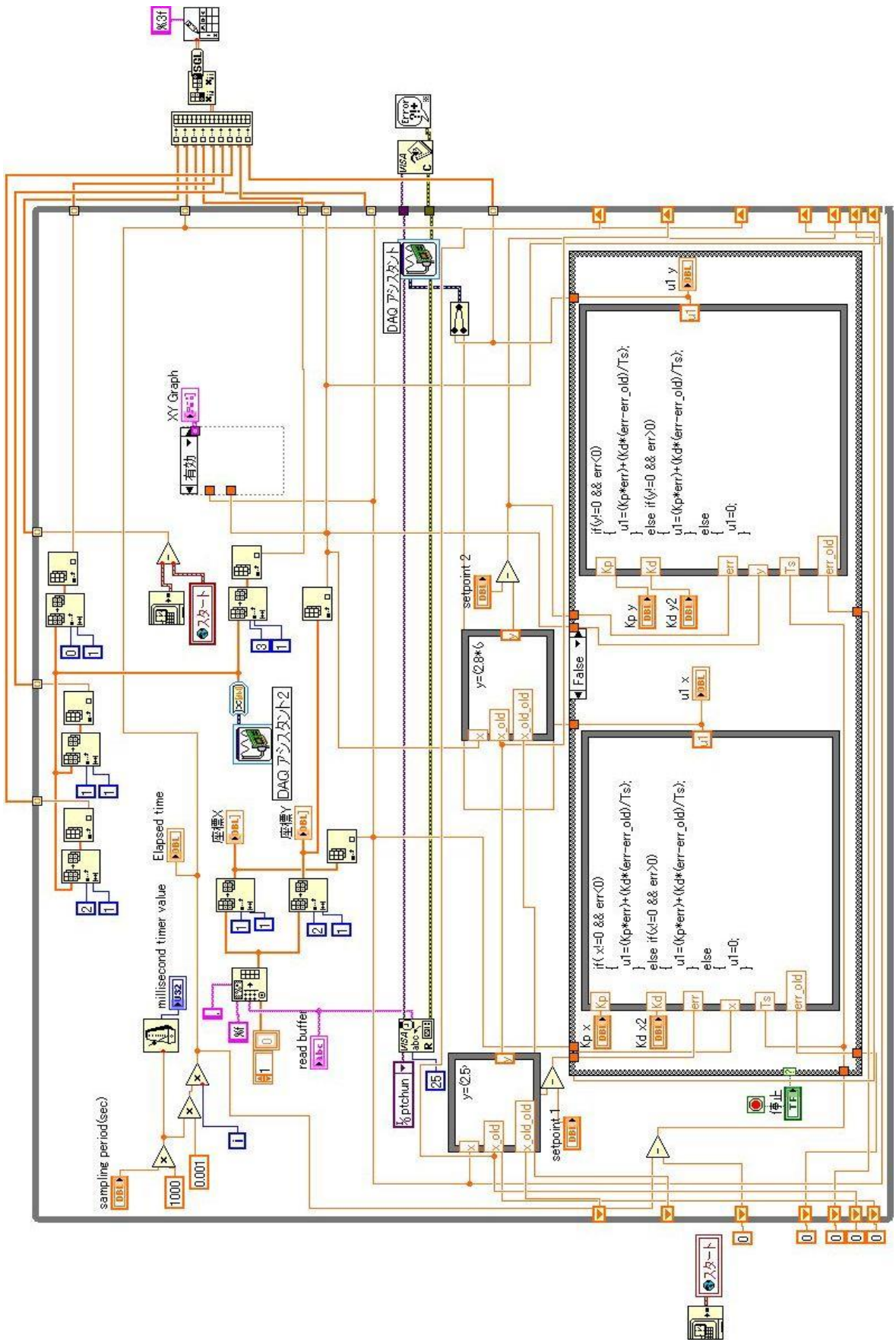


図 3.2 電流制御プログラム

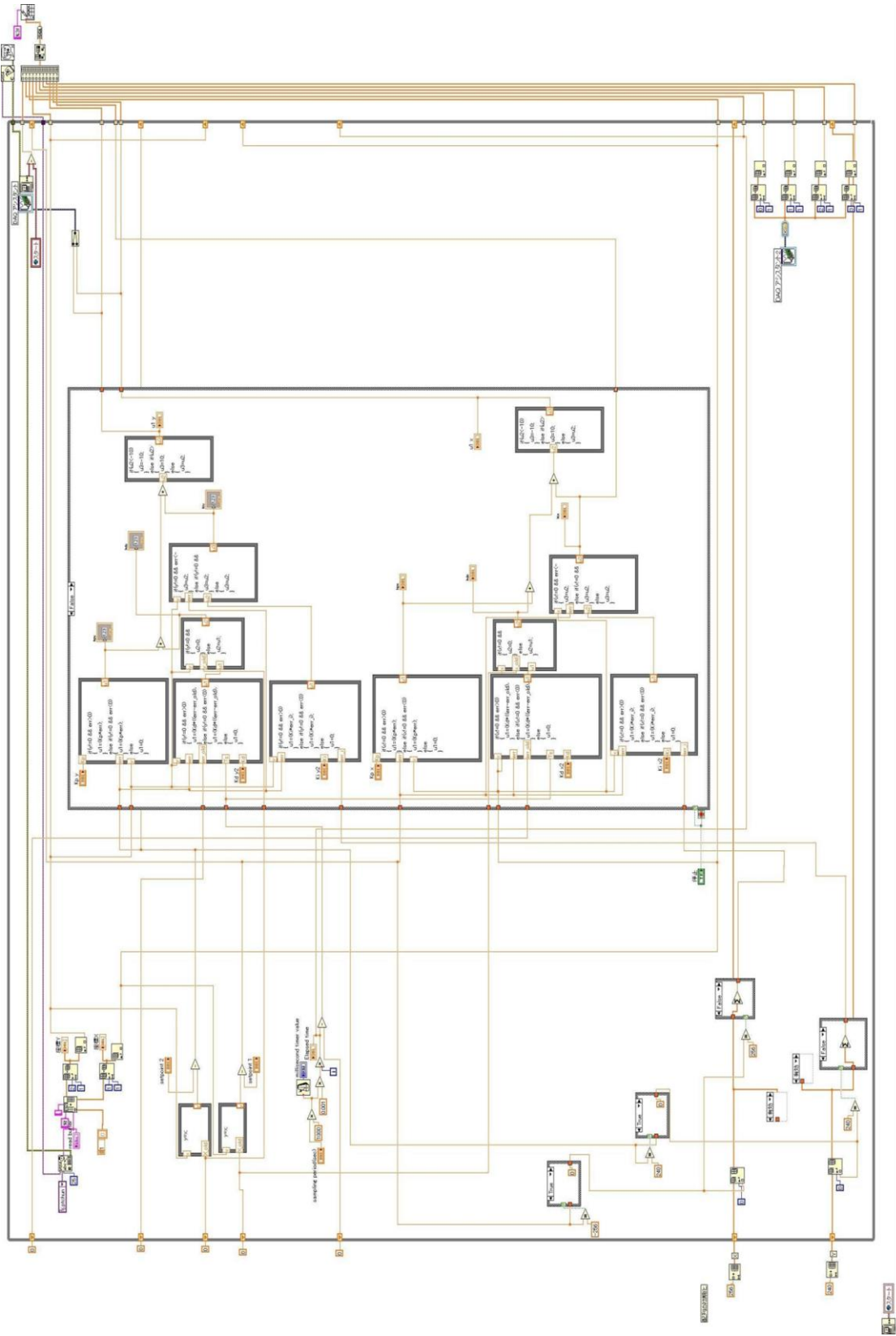


図3.3 電圧制御プログラム

第 4 章

屋内実験

4.1 実験目的

追尾目標を捉え、収束実験では追尾目標に収束することができるのか、また追尾実験では収束し追尾することができるのか電流制御、電圧制御の二つの制御を用い性能評価実験を行った。電流制御では PD 制御の比例ゲインの変更と時間補正プログラムの追加を行った。電圧制御では PID 制御の比例ゲインの変更と追尾目標の移動速度変更を行った。

4.2 実験概要

実験場所は卒研室 15 と製図室にて行った。収束実験では、壁に壁からの距離を固定したレーザーポインタを照射し追尾目標として CCD カメラ（焦点距離 8 [mm]と焦点距離 50 [mm]）に認識させ、その光を目標値であるカメラの中心で捉えられるようモータを制御する実験を行った。

追尾実験では、レーザーポインタを自動ステージに取り付け壁からの距離を固定し X 軸方向にのみ左右に移動させ目標光を追尾する追尾実験を行った。

追尾速度変更実験では、ISS の速度に近づけるためレーザーポインタと壁との距離を変更して目標光の移動速度の変更を行い追尾実験を行った。

4.3 屋内収束実験

4.3.1 屋内収束実験方法

概要を図 4.1 に示し手順を①から⑤に示す。

- ①前準備として画像処理装置にレーザー光である赤い光を認識するように画像の登録と認識の設定を行う。
- ②壁にレーザー光を照射し、CCD カメラに照射したレーザー光を観測用モニターの端で認識させる。この際、他の光などで認識が不安定にならないよう CCD カメラのピント及び絞りを調整する。
- ③プログラムを起動し、制御装置、多出力直流安定化電源の順に起動させていく。
- ④モータが駆動し観測用モニター上で (256, 240) [pixel]の点付近に方向角が収束しモータが停止したことを確認後、プログラム、出力直流安定化電源、制御装置の順で停止させる。
- ⑤レーザー光を切り実験終了。

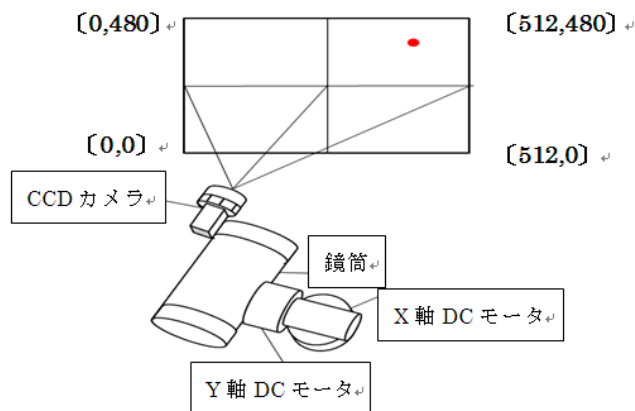


図 4.1 収束実験概要図

4.4 電流制御収束実験

実験結果を図 4.2 に示す。電流制御収束実験では昨年度からの問題点である制御ができておらずハンチングを起こし目標点に収束しないという現状を踏まえ二つの方法か y 軸の収束実験を試みた。一つは逆起電力の影響により制御に影響が出ているのではないかと考え逆起電力の影響を抑える実験を行い、もう一つはループ時間の遅れが制御に影響を与えているのではないかと考え遅れ時間補正を行う実験を行った。

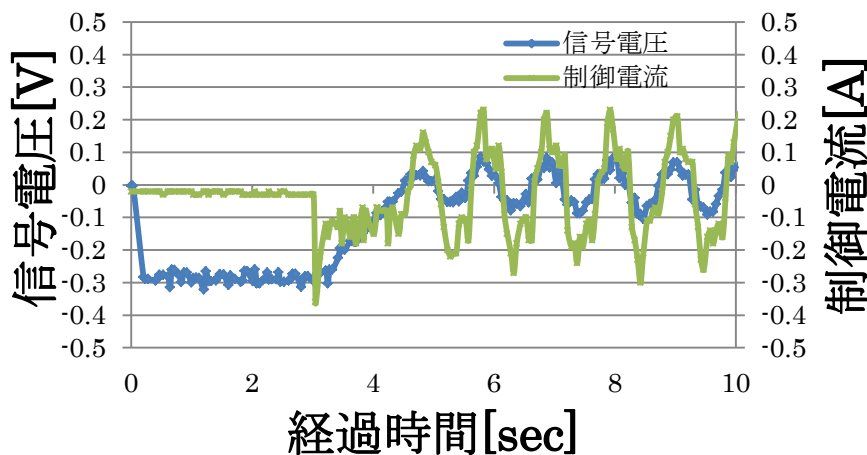


図 4.2 電流制御 信号電圧と制御電流の不一致

4.4.1 電流制御電源電圧変更収束実験

実験結果を図 4.3, 図 4.4 に示す。逆起電力の影響を抑える実験では、逆起電力によって信号電圧に対して正しい制御電圧が出力されていないのではと考え、電源電圧を 15[V]から 8[V]へ下げ逆起電力が発生しにくい状態を作りハンチングが収まるのかを実験によって確認した。実験の結果電源電圧を下げても逆起電力を抑えてもハンチングには影響がないことが分かった。これにより逆起電力の影響によって制御ができていないわけではないことが分かった。

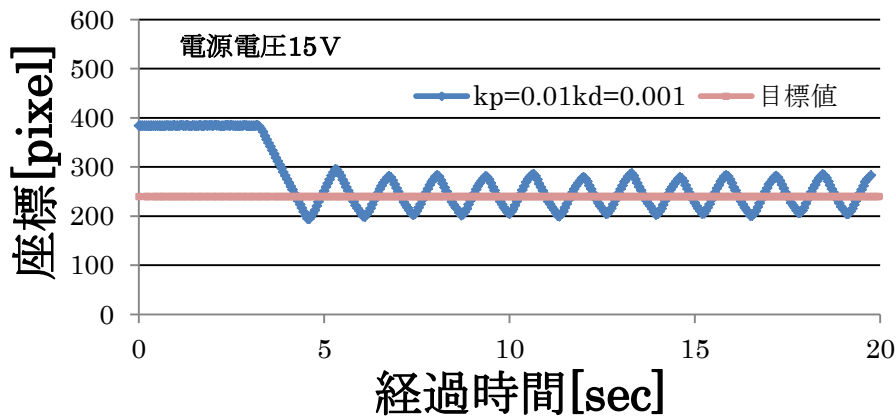


図 4.3 電流制御 15[V]収束実験

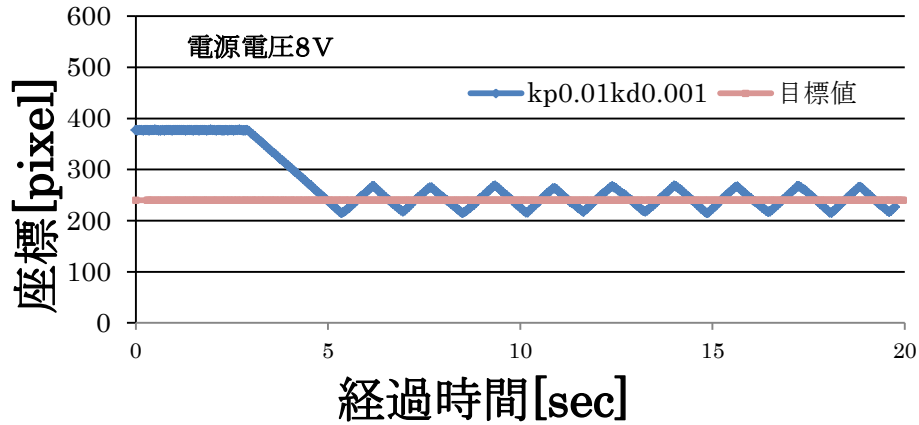


図 4.4 電流制御 8[V] 収束実験

4.4.2 電流制御時間補正収束実験結果

実験結果を図 4.5, 図 4.6 に示す. 時間補正を行う実験では, ループ時間の遅れにより画像処理から送られてくるデータが遅れ, 正しい座標が送られてこないために制御ができてのではないかと考え, プログラムに時間補正を行うプログラムを加えハンチングの改善が見られないかを実験により確認した. 実験の結果時間補正プログラムを加えることでハンチングを抑え 10[pixel]程度に収束させることができた. これにより時間遅れが制御に影響を与えている可能性があることが分かった.

時間補正プログラムは過去の座標偏差を用いて現在の座標偏差を二次近似式にて予測し制御に用いる..

$$e(t) \cong e_n = 2e_{n-1} - e_{n-2} \quad (4-1)$$

が制御式である.

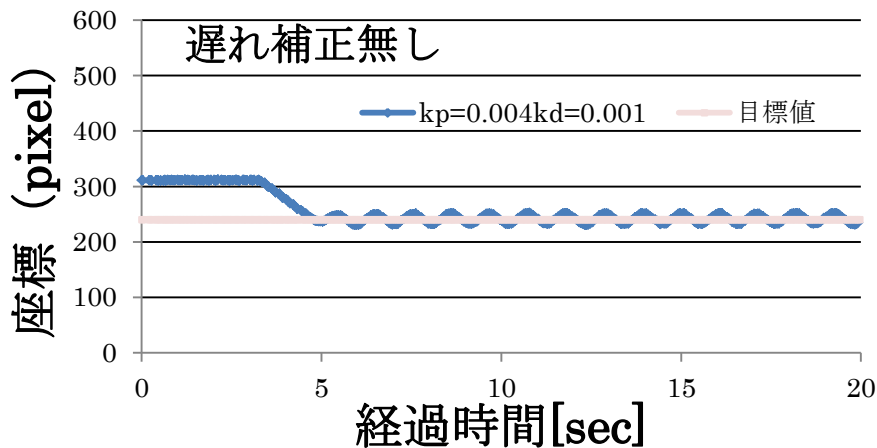


図 4.5 電流制御時間補正無し収束実験

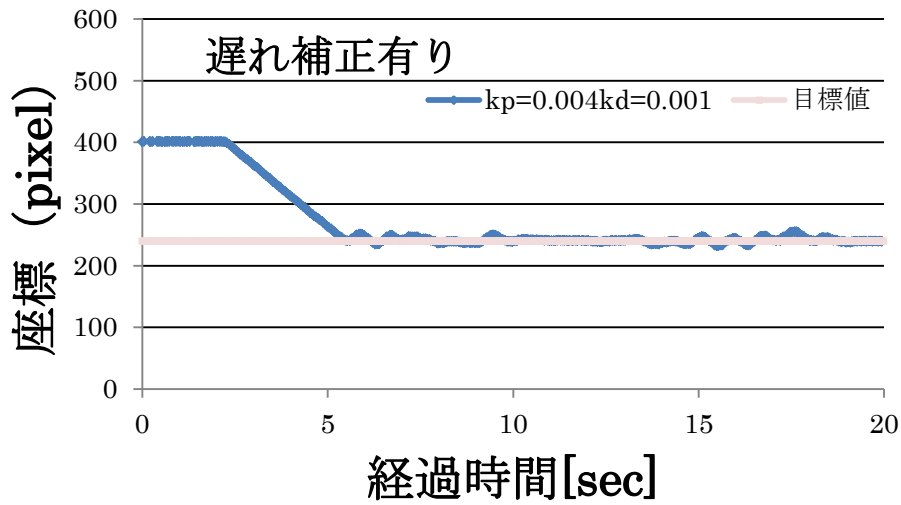


図 4.6 電流制御時間補正有り収束実験

4.5 電圧制御収束実験

電流制御では信号電圧に対して制御電圧が正しく出力されておらず制御が出来ていない問題があり制御方法そのものが間違っているのではないのかと考え、モータ印加電圧をフィードバックし制御を行うよう、回路を変更して電圧制御の実験を行った。制御が正しく出来ているのかを確認する為、P 制御、PI 制御、PID 制御それぞれの y 軸の実験データを取得し確認を行った。回路変更の際、増幅率が足りず制御が正しく出来ない可能性を考え一段増幅から二段増幅に回路変更を行った。

4.5.1 電圧制御収束実験結果

実験結果を図 4.7、図 4.8、図 4.9 に示す。制御の確認を行った結果 P 制御では、信号電圧通りの動きを示し定常偏差が 5[pixel]程度残る結果となった。PI 制御では、信号電圧通りの動きを示しオーバーシュートするが定常偏差が無くなる結果となった。PID 制御では、信号電圧通りの動きを示しオーバーシュートを少なくしつつ定常偏差を取り除くことができる結果となった。この結果から電圧制御では正しく制御ができていた事が確認できた。

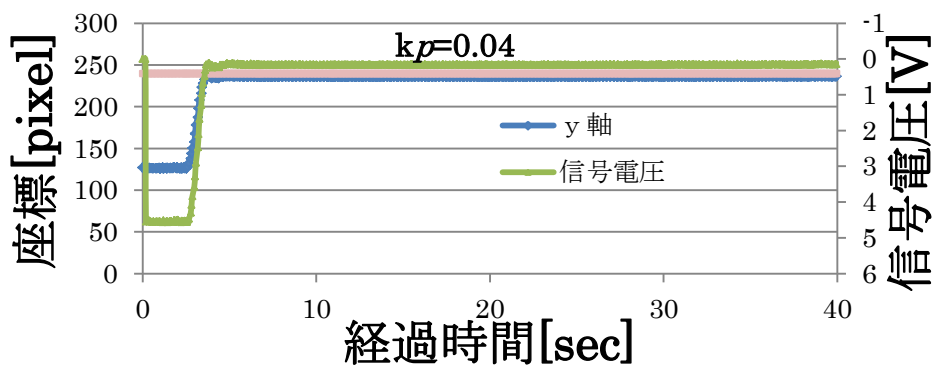


図 4.7 電圧制御 P 制御動作確認

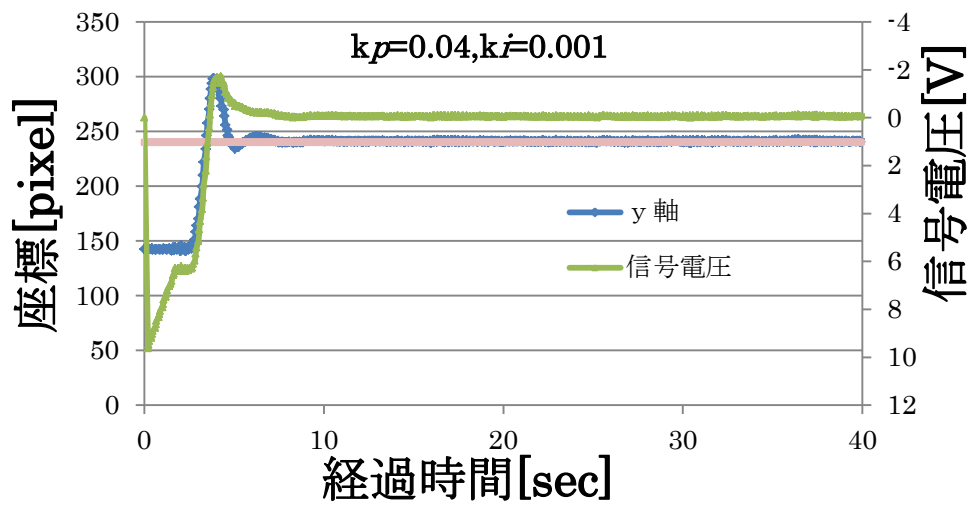


図 4.8 電圧制御 PI 制御動作確認

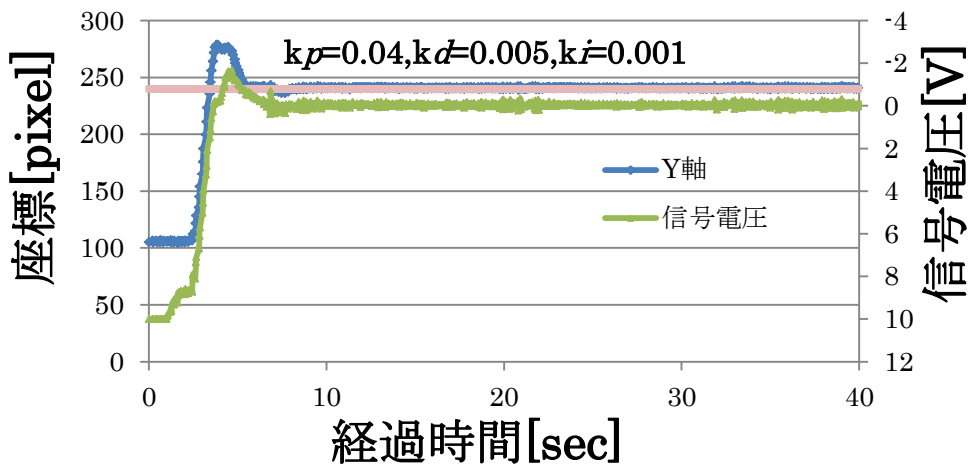


図 4.9 電圧制御 PID 制御動作確認

4.6 屋内収束実験結果からの考察

今回の実験では電流制御，電圧制御の二つの制御を用いて収束実験を行った．電流制御では時間補正プログラムの追加によって，ハンチングを防ぎ方向角を収束させることができたが時間補正プログラムが近似値となるため不規則な動きをする場合があった．電圧制御では P, I, D それぞれの確認を行い制御が正しく出来ている事が分かり，定常偏差もなく方向角を収束させることができた．追尾実験を行い電圧制御での不規則な動きが追尾にどのような影響を及ぼすのか，また電圧制御は追尾を行った場合でも正しく制御できるのか確認を行う必要がある．

4.7 屋内追尾実験

4.7.1 屋内追尾実験方法

概要を図 4.10 に示し手順を①から⑦に示す.

- ①前準備として画像処理装置にレーザー光である赤い光を認識するように画像の登録と認識の設定を行う.
- ②レーザーポインタを二軸ステージコントローラーへ取り付け二軸ステージコントローラーの電源を入れる.
- ③壁にレーザー光を照射し、CCD カメラに照射したレーザー光を観測用モニターで認識させる. この際、他の光などで認識が不安定にならないよう CCD カメラのピント及び絞りを調整する.
- ④レーザー光を x 軸方向に移動させ CCD カメラの認識範囲外に出した状態でプログラムを起動し、制御装置、多出力直流安定化電源の順に起動させていく.
- ⑤二軸ステージコントローラーを操作し x 軸方向へレーザー光を動かす.
- ⑥CCD カメラがレーザー光を認識しモーターが駆動して観測用モニター上で (256, 240) [pixel]の点付近に方向角が収束しながら追尾を行っている事を確認し、二軸ステージコントローラーの操作を止めその後、プログラム、出力直流安定化電源、制御装置、二軸ステージコントローラーの順で停止させる.
- ⑦レーザー光を切り実験終了.

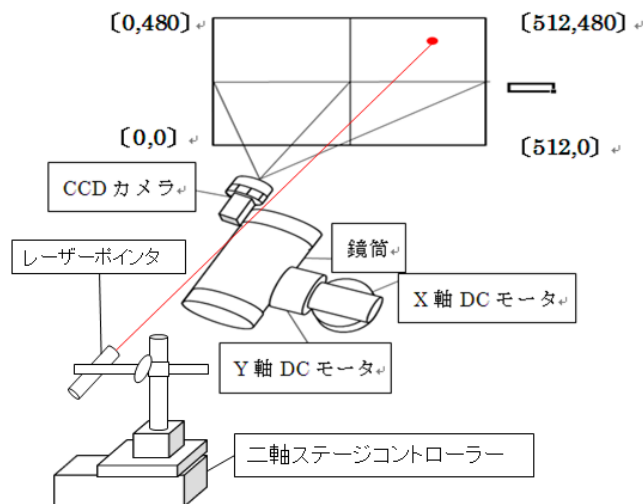


図 4.10 追尾実験概要図

4.7.2 電流制御追尾実験結果

実験結果を図 4.11, 図 4.12 に示す. 収束実験の結果から, 時間補正のプログラムを入れて $K_p=0.004$, $K_d=0.001$ の値を変更せずに x 軸, y 軸を動かし追尾実験を行った. 実験結果 x 軸, y 軸共に追尾は可能であったが, 時間補正プログラムが入っている事で不規則な動きが残る結果となった.

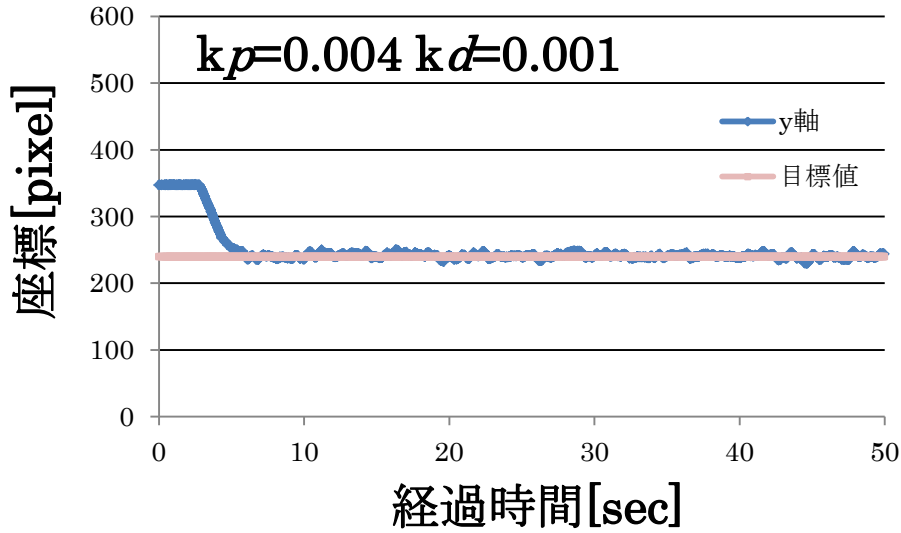


図 4.11 y 軸電流制御追尾実験

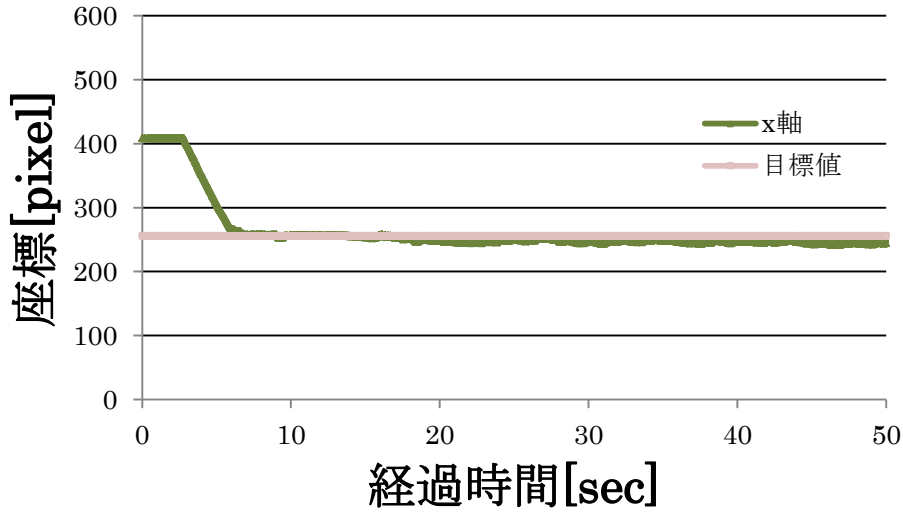


図 4.12 x 軸電流制御追尾実験

4.7.3 電圧制御追尾実験結果

実験結果を図 4.13, 図 4.14 に示す. 収束実験の結果から, $K_p=0.04$, $K_i=0.001$, $K_d=0.005$ の値を変更せずに x 軸, y 軸を動かし追尾実験を行った. 実験結果 x 軸, y 軸共に収束し追尾は可能であった. 定常偏差も残らなかった.

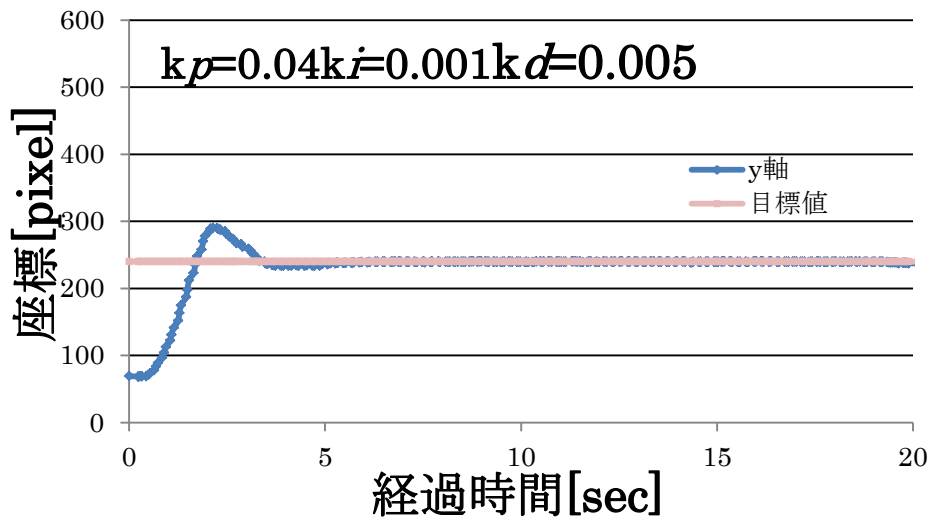


図 4.13 y 軸電圧制御追尾実験

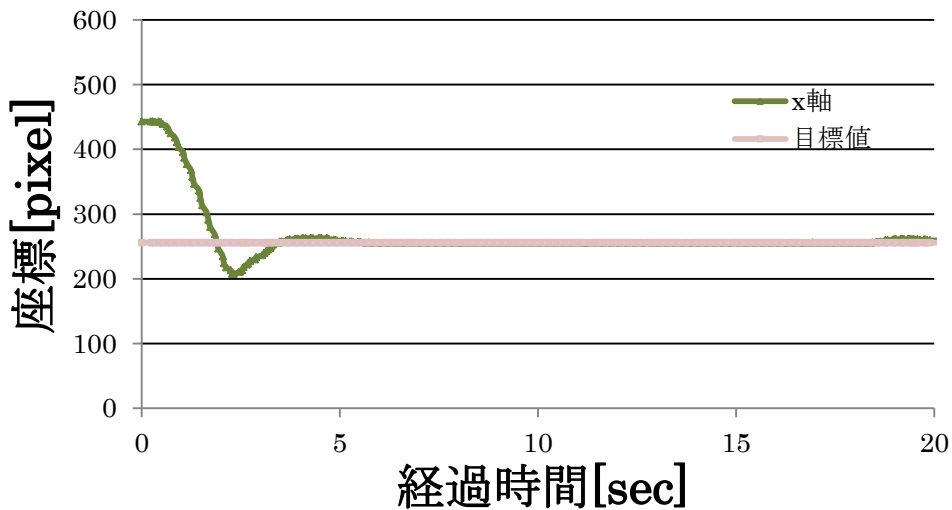


図 4.14 x 軸電圧制御追尾実験

4.7.4 屋内追尾実験結果からの考察

今回の実験では電流制御，電圧制御の二つの制御を用いて追尾実験を行った．電流制御では時間補正プログラムを入れて追尾を行った．収束実験同様，時間補正プログラムが近似である為の不規則な動きが追尾に影響を与え正確な追尾は出来ないことが分かった．電流制御では目標値を境に±が入れ替わることで目標値を捕えている為ばらつきが残ってしまう結果となり，このことから電流制御ではPID制御ではなくオンオフ制御になってしまっているのではないかと考えられた．電圧制御では収束実験同様，オーバーシュートが起こってはいるが電流制御のような不規則な動きはせずに追尾ができています．今後の実験ではより正確な追尾を行う為，電流制御を止め電圧制御にて実験を行うことにした．

4.8 レンズ変更屋内追尾実験

4.8.1 レンズ変更

屋内電圧制御追尾実験の結果から、ゲイン数の変更を行ってもこれ以上の精度向上は難しいと考えより精度の高い追尾を行う為にレンズの焦点距離を8[mm]から50[mm]に変更することで視野角をx軸において26.02[deg]から4.28[deg]へ、y軸において24.65[deg]から4.00[deg]へと変更しより精度の高い追尾実験を行った。

4.8.2 レンズ変更屋内追尾実験結果

実験結果を図4.15, 図4.16に示す。レンズを変更したことによって座標は離されているように見えるが視野角が狭くなっている為、平均値、標準偏差共により良い精度での追尾が行えた。レンズ変更による評価の方法として[pixel]による評価では不適切な為、1[pixel]が視野角の何[deg]であるか計算で求め[pixel]を[deg]に変換して[deg]での評価を行っている。焦点距離8[mm]のレンズについての表4.1は図4.13, 図4.14を基に制作している。

表 4.1 焦点距離 8 [mm]での誤差

8[mm]	平均 [deg]	標準偏差 [deg]
x 軸	-0.46459	2.060844
y 軸	0.378619	1.875834

表 4.2 焦点距離 50 [mm]での誤差

50[mm]	平均 [deg]	標準偏差 [deg]
x 軸	0.217445	0.450644
y 軸	0.116066	0.351569

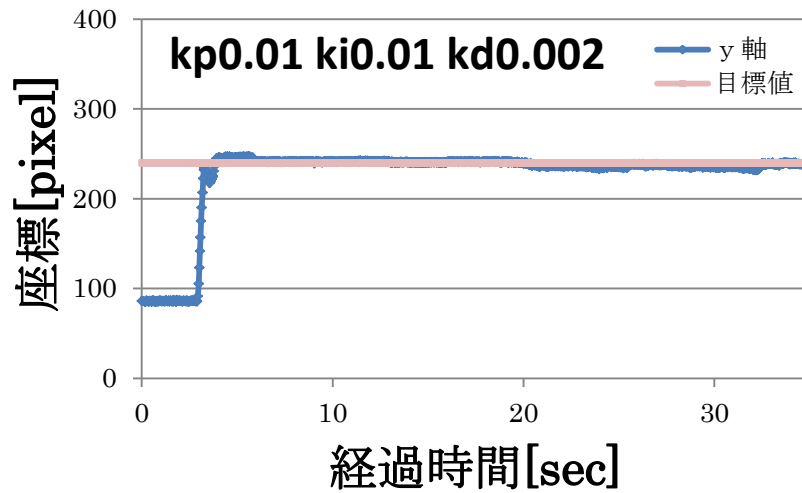


図 4.15 レンズ変更後の y 軸電圧制御追尾実験

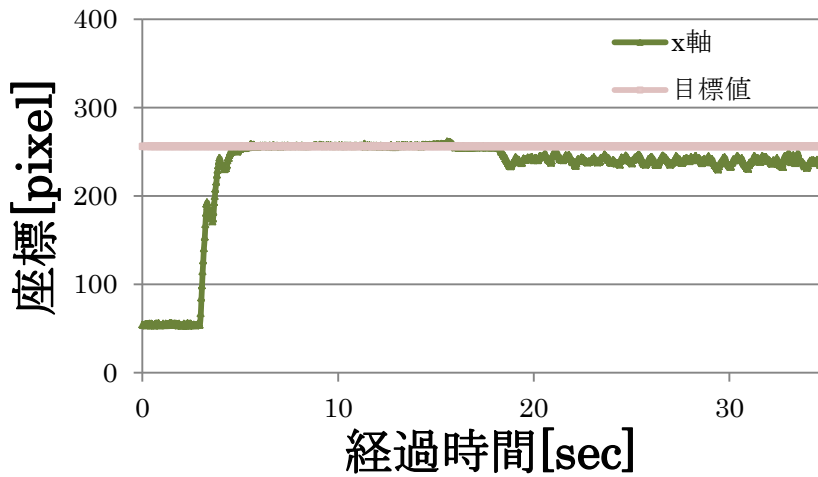


図 4.16 レンズ変更後の x 軸電圧制御追尾実験

4.8.3 レンズ変更屋内追尾実験からの考察

レンズの変更を行ったことによってより精度の高い追尾実験を行うことができた。だが追尾する物体の速度が ISS より遅いため、ISS の追尾が可能であるかが分からない。今後は追尾物体の速度を ISS に近づけ実験を行い追尾が可能であるか確認を行う。

4.9 ISS 疑似追尾実験

4.9.1 ISS 疑似追尾実験準備

ISS 疑似追尾実験を行うにあたってレーザー光の移動速度を変更する必要がある。現在レーザー光の移動に用いている二軸ステージコントローラーでは速度の変更が 4 段階しかなく細かい速度変更ができず ISS に近い速度が出せなかった。そこで 1.5[m] の板を用意してその板から望遠鏡の距離は固定しレーザー光の距離のみを変更することでレーザー光の速度を ISS に近づけた。

またレンズ変更屋内追尾実験の結果を踏まえて高精度の追尾を行う為今後の実験では焦点距離 50[mm]のものを使用する。

4.9.2 高速追尾実験方法

概要を図 4.17 に示し手順を①から⑧に示す。

- ①前準備として画像処理装置にレーザー光である赤い光を認識するように画像の登録と認識の設定を行う。
- ②レーザーポインタを二軸ステージコントローラーへ取り付け二軸ステージコントローラーの電源を入れる。
- ③レーザー光を板に照射しその距離を計測し、レーザー光の移動速度が ISS の速度に近づくように調整する。
- ④板にレーザー光を照射し、CCD カメラに照射したレーザー光を観測用モニターで認識させる。この際、他の光などで認識が不安定にならないよう CCD カメラのピント及び絞りを調整する。
- ⑤レーザー光を CCD カメラの認識範囲外へ x 軸方向に移動させプログラムを起動し、制御装置、多出力直流安定化電源の順に起動させていく。
- ⑥二軸ステージコントローラーを操作し x 軸方向へレーザー光を板の端から端まで動かす。
- ⑦CCD カメラがレーザー光を認識しモータが駆動して観測用モニター上で (256, 240) [pixel]の点付近に方向角が収束しながら追尾を行っている事を確認し、板の端から端までレーザー光を移動させたら二軸ステージコントローラーの操作を止めその後、プログラム、出力直流安定化電源、制御装置、二軸ステージコントローラーの順で停止させる。
- ⑧レーザー光を切り実験終了。

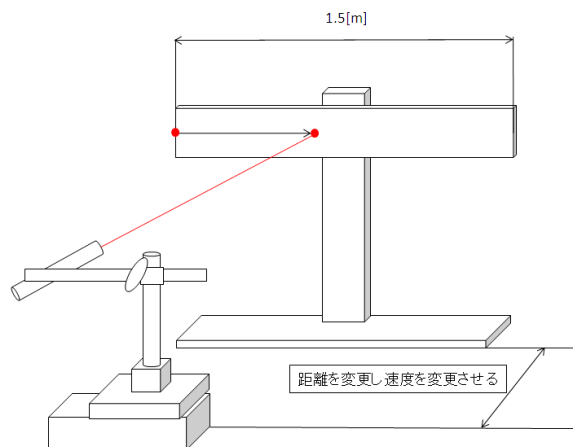


図 4.17 ISS 疑似追尾実験概要

4.9.3 ISS 疑似追尾実験結果

実験結果を図 4.18 に示す。ループ時間 0.03[sec]にて実験を行い。Ki=0.001, Kd=0.0025, に固定し Kp の値を 0.008 から 0.014 まで 0.002 ごとに変化させて実験を行った。Kp を上げることによって目標値(256)に近づく傾向にあるが、いずれの結果も目標値 (256) より 60[pixel]以上離され定常偏差が残る結果となった。

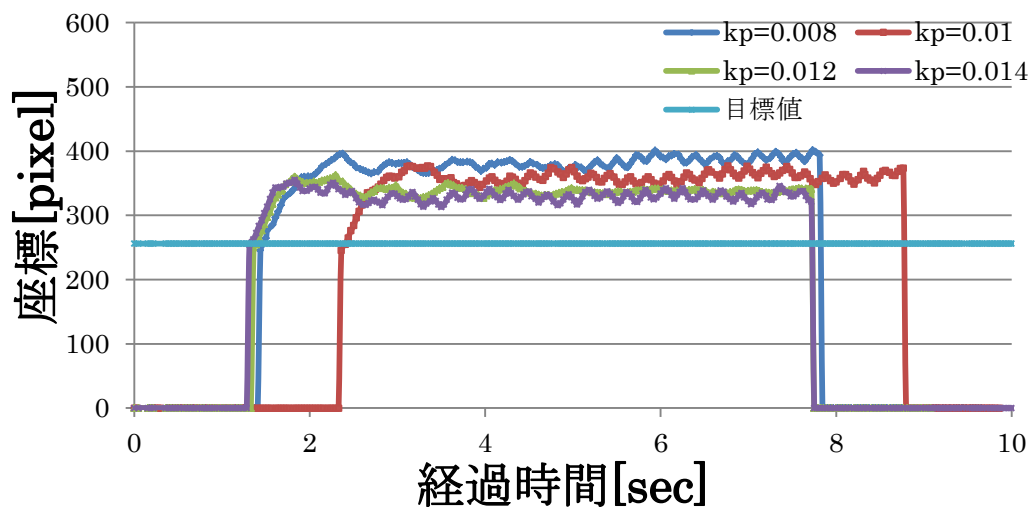


図 4.18 x 軸 ISS 疑似追尾実験

4.9.4 ISS 疑似追尾実験結果からの考察

今回の実験では実際の ISS 追尾を想定して行い収束し追尾は可能であった，しかし大きな定常偏差が残る結果となった．定常偏差が残る原因としては，積分項のプログラムにおいて積分区間に上限を設けてオーバーシュートを抑えていたため積分項があまり効果を発揮していない可能性が考えられた．そのため積分項のプログラムを最適化し問題解決を試みた．

4.10 積分項のプログラム最適化

ISS 疑似追尾実験の結果，今までの積分項のプログラムでは定常偏差を取り除くことができないことが分かった．原因としては先程述べたとおり今までの積分項のプログラムでは積分区間に上限を設けてオーバーシュートを少なくするようにしていたため，積分項の計算結果が小さな値となり定常偏差を取り除けていなかった．このことから積分区間の上限を取り除き積分を無限に行えるように積分項のプログラムを変更した．

$$K_i \int_{t-\tau}^t e(t) dt \quad \rightarrow \quad K_i \int_0^t e(t) dt \quad (4-2)$$

が変更した積分項プログラムである。

4.10.1 実験場所変更

積分項のプログラム最適化をおこなった際，積分を無限に行うようになったためオーバーシュートを少なくするには積分項がゆっくりと働かなければならない．そこで定常偏差が無くなっているのかを確認する為には長時間の追尾が必要となる．その際，卒研室 15 では狭すぎて不可能なため教室が大きく壁の長い製図室にて実験を行った．

4.10.2 積分項プログラム最適化後の追尾実験結果

実験結果を図 4.19 と図 4.20 に示す。ISS 疑似追尾実験の結果を踏まえて $K_p=0.0015$ 、 K_i の値は無限に積分を行うように変更したためオーバーシュートを抑えるため $K_i=3E-5$ と小さな値にし、 $K_d=0.001$ と変更し製図室にて実験を行った。積分項のプログラムの最適化を行ったことにより時間はかかるが x 軸の定常偏差を 30[pixel]程度に小さくすることができた。 y 軸の定常偏差は 10[pixel]程度にすることができた。

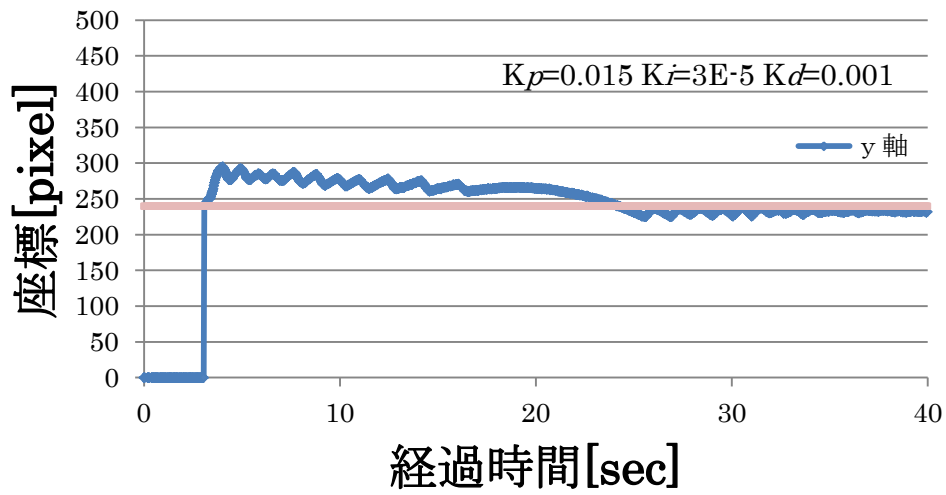


図 4.19 積分項最適化後の Y 軸 ISS 疑似追尾実験

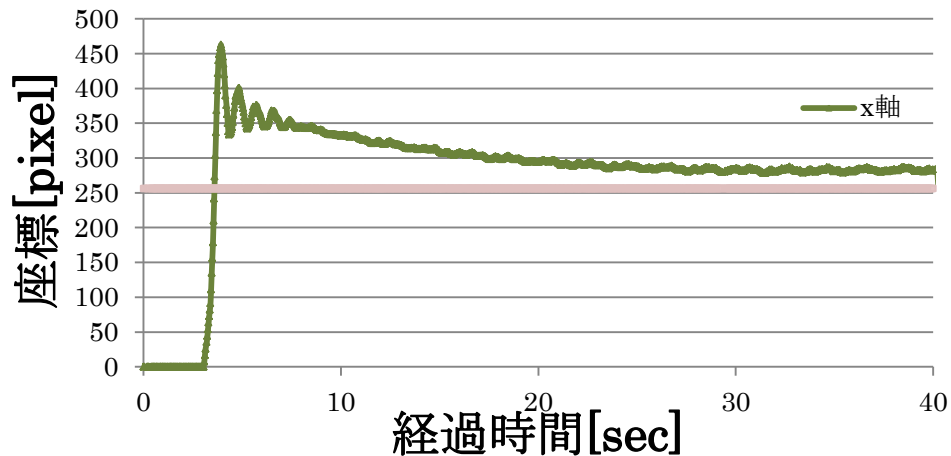


図 4.20 積分項最適化後の X 軸 ISS 疑似追尾実験

表 4.3 積分項最適化後の ISS 疑似追尾誤差

50[mm]	平均 [deg]	標準偏差 [deg]
x 軸	-0.16214	0.206082
y 軸	0.057195	0.032913

4.10.3 実験結果からの考察

今回の実験結果から疑似 ISS を中心に捕えつつ追尾を行うことが可能であることがわかった。これによって追尾可能な装置，プログラムの製作が完了した。屋外にて実際の ISS 追尾実験を今後は行っていく。

第5章

実験シミュレーション

5.1 シミュレーション目的

収束実験では電流制御，電圧制御に大きな違いが出た．電流制御では収束せずにハンチングを起こし，電圧制御ではハンチングは起こらなかった．この原因を解析するためモータの運動をモデル化しモータの運動方程式を立て動的シミュレーションを行った．

5.2 シミュレーション概要

LabVIEW にてモデル化したモータの運動について，電流制御，電圧制御両方のシミュレーションプログラムを製作し動的シミュレーションを行った．電源電圧，摩擦トルクなどを任意に変更できるように設定し，パラメータの変更を行い電流制御，電圧制御それぞれの違いを確認した．

5.3 シミュレーションで使用した式

シミュレーションを行うにあたりモータについての運動方程式を考え，そこから角速度や角度を求めて実際の装置の動きとシミュレーション結果が酷似しているかを比較した．シミュレーションで使用した運動方程式が

$$J\ddot{\theta} = T + f(\dot{\theta}) \quad (5-1)$$

である．ここで，現在電流制御で起きているハンチングなどの現象は，電氣的応答速度と比べ非常にゆっくりとした動きであり，実際のモータが動作するときに発生するリアクタンス $L \frac{di}{dt}$ の計算を行ったところ $1.65 \times 10^{-3} [V]$ となった．この結果が電源電圧値 $15[V]$ と比較して非常に小さいため今回は無視できるものとした．また J は慣性力であり，モータの慣性力が望遠鏡の慣性力と比較し約 9 千倍の値を示した．この結果から望遠鏡の慣性力も無視してシミュレーションを行った． f はギアなどから発生する摩擦であり，その実測値による摩擦トルクの変化を図 5.1 に示す．

次に，この運動方程式から導き出されるモータの角度，角速度，角加速度の式は

$$\ddot{\theta} = \frac{T+f(\dot{\theta})}{J} \quad (5-2)$$

$$\dot{\theta}_n = \dot{\theta}_{n-1} + \ddot{\theta}_{n-1} \Delta t \quad (5-3)$$

$$\theta_n = \theta_{n-1} + \dot{\theta}_{n-1} \Delta t \quad (5-4)$$

となる．

ここで運動方程式のトルクを計算するにあたり使用した DC モータの特性図を図 5.2 に示す．

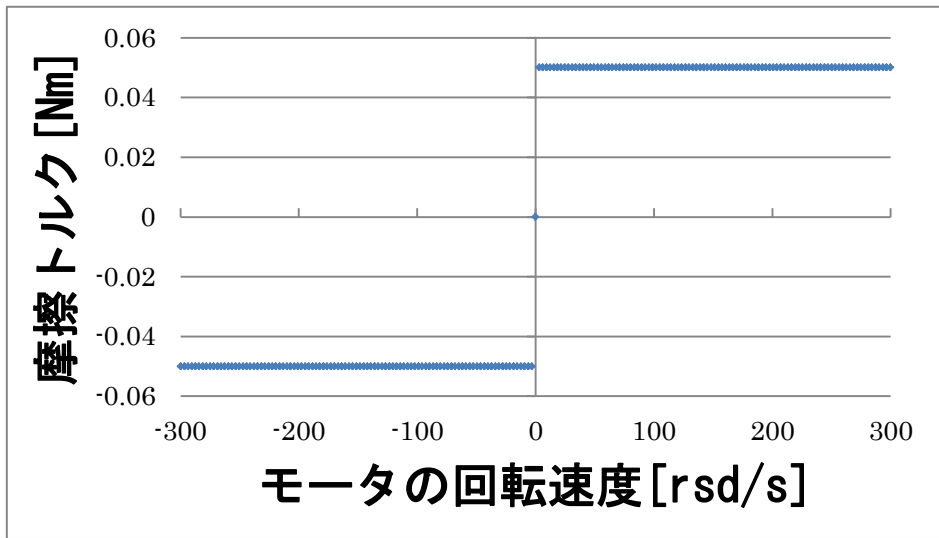


図 5.3 モータの回転速度における摩擦トルクの値

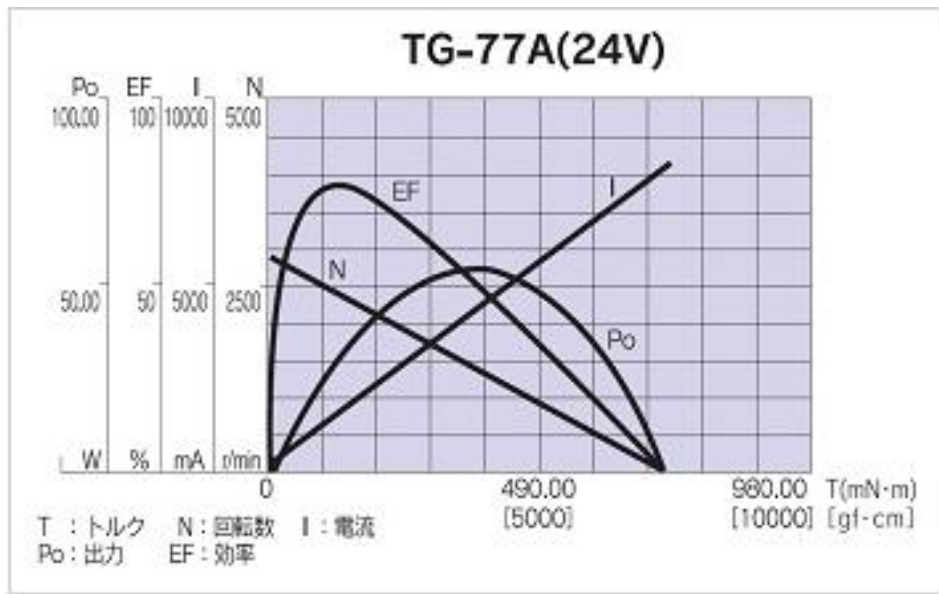


図 5.2 DC モータ特性図

5.4 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 5.3, 図 5.4 に示す。電流制御シミュレーション, 電圧制御シミュレーション共に実験結果と似た性質を示した。パラメータを変化させても電流制御シミュレーションではハンチングが起こり, 電圧制御シミュレーションでは収束する結果となった。

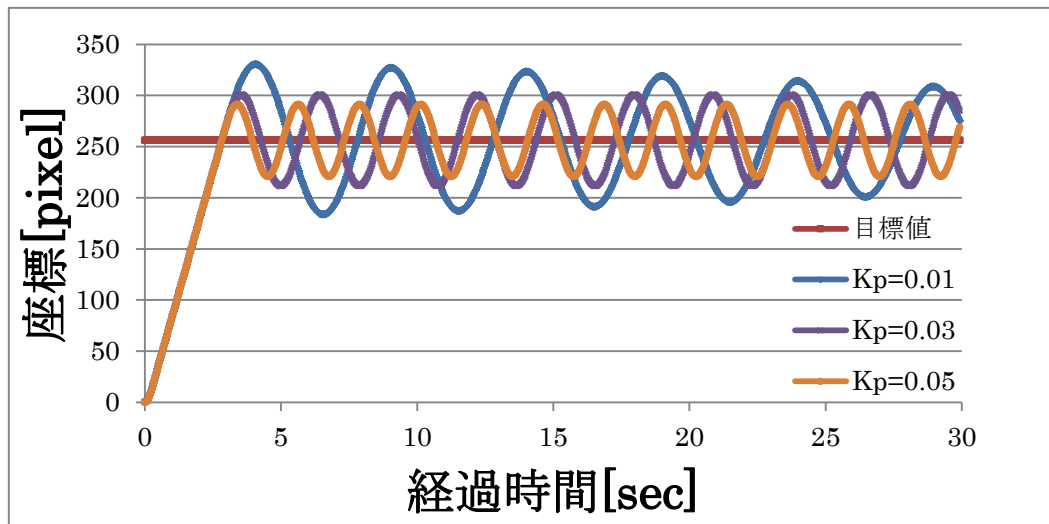


図 5.3 電流制御シミュレーション結果

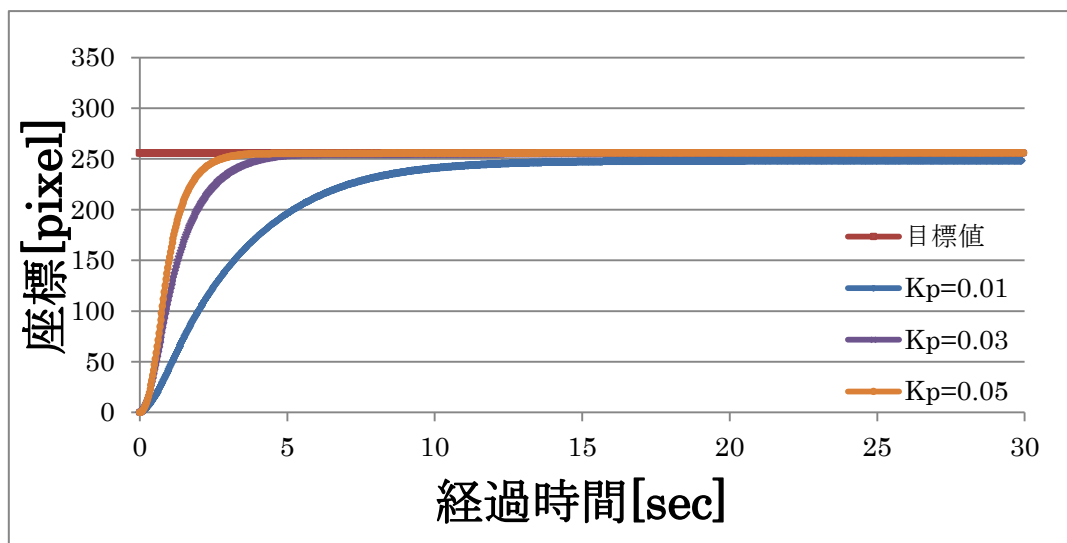


図 5.4 電圧制御シミュレーション結果

5.5 シミュレーション結果からの考察

シミュレーション結果から電流制御では摩擦トルクを疑似的に増やすことで収束はしたがハンチングは起きていた, 逆に電圧制御では摩擦トルクを疑似的に増やしてもハンチングは起こらなかった。モータを含む系で電流制御を行うとハンチングが起こり制御するのが難しいのではないかと考えられた。モータを含む系では電圧制御が適していると考えるので電圧制御で屋外追尾実験を行っていく。

第 6 章

屋外実験

6.1 実験目的

衛星を捕え追尾を行い一眼レフカメラで写真を撮り、その写真を用いてリアルタイムではないが鮮明な衛星の姿を写真に収めることを目標として実験を行った。

6.2 実験概要

実験場所はおとめが池周辺ウッドデッキで行った。実際に飛行している ISS を焦点距離 50[mm] の CCD カメラに認識させ追尾を行い、一眼レフカメラを取り付けた望遠鏡にて撮影を行った。

6.2.1 アライメント方法

アライメントとは経緯台の方位角、仰角の 0 点合わせを行うことであり、衛星を追尾する際予測通過地点の座標に望遠鏡を合わせるために必要不可欠である。視野角の狭い機材で観測するため精度良く合わせなければ衛星を認識することができず観測失敗に終わってしまう。今回の実験では GPS、天体シュミレーションソフトウェアであるステラナビゲータ 9 の情報などを用いてアライメントを行った。以下の①～③に手順を示す。

① 観測位置座標推定

観測地に到着し、その地点における座標を GPS を用いて調べる。

観測位置座標推定ができれば、ステラナビゲータ 9 に調べた座標を入力し天体の座標データを所得する。

② 天体の座標によるアライメント方法

ある一つの天体を望遠鏡の中心に合わせ、その時の天体の座標をステラナビゲータにて確認しそこから 0 点を逆算する。ここで用いる天体は精度向上のため 2 等級以上の明るさを持ち方位角・仰角共に分散している天体 3 つ以上を用いて行う。(代表例：北極星・シリウス・カルストなど)

③ 衛星出現位置への調整

アライメントが終了したら衛星が通過する座標を、ドイツ航空宇宙センター (DLR) が公表している **Heavens-Above** というサイトで調べ、その方向に経緯台を固定しておく。ドイツ航空宇宙センターの衛星進路予想を図 5.1 に示す。

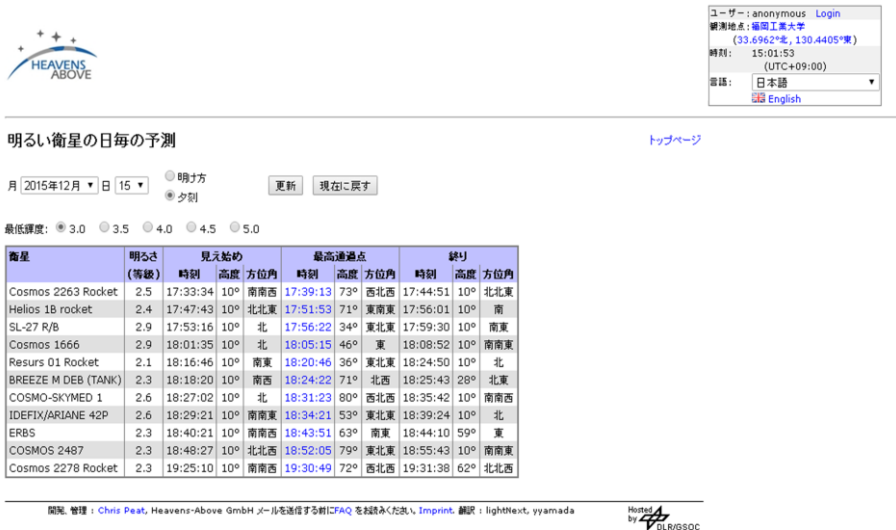


図 6.1 ドイツ航空宇宙センターの衛星進路予想

6.3 一眼レフの設定

屋外実験において一眼レフの ISO やシャッタースピードを正確に設定しなければ被写体がハレーションをおこすことなどの問題が生じてしまうため、実験を複数回行い被写体ごとの正確な設定値を割り出し、写真撮影を行った。また被写体のピントが合っているのかの確認は撮影中には行うことができないので、撮影終了後画像を拡大し拡大レンズにて確認を行った。

6.4 制御装置パッケージ化

屋外実験において制御回路がむき出しの状態では結露やゴミの付着などで問題が起こるため、装置のパッケージ化を行った。パッケージ化に合わせて多出力直流安定化電源では重く屋外実験では持ち運びが困難なため小型のスイッチング電源を用いてモータを動かす電源とし、スイッチング電源を含めパッケージ化を行った。

6.5 屋外実験方法

手順を①から⑧まで以下に示す。

- ①実験場所の使用許可を1週間前までに管財課にて行う。
- ②実験日の天気予報を確認し実験が可能であるか確認する。
- ③実験日に観測点から目視可能な明るさで通過する衛星を **Heavens-Above** というサイトで調べる。
- ④アライメントを行い方位角、仰角の0点合わせを行う。
- ⑤星又は衛星を CCD カメラで捕え、画像を画像処理装置に登録する。画像処理装置が星、衛星を検出できるよう各種設定を行う。
- ⑥一眼レフカメラのピントを1等星にて合わせる。
- ⑦衛星の予測通過地点の座標に望遠鏡を合わせる。

- ⑩プログラム，制御装置の電源を入れ衛星が通過するまで待機する．
- ⑪衛星を CCD カメラが捕え追尾を開始したら一眼レフカメラにて衛星の写真を連写撮影する．
- ⑫衛星が検出不可能になったらプログラムを停止し制御装置の電源を切り実験終了．

6.6 屋外実験における天候不良

屋外実験を行う際，天候が悪く衛星が雲に覆われて視認できないことがあった．その際，衛星のみに固執せず多少の雲がかかっても画像処理で認識可能である月，飛行機などの追尾も行った．

6.7 屋外追尾実験結果

最初に月を追尾した場合の実験結果を図 5.2，図 5.3 に示す．この際，一眼レフでの写真撮影では公転速度の遅い月では追尾の状況が分かりにくいので写真ではなく動画モードに切り替え動画撮影も一緒に行った． K_p ， K_i ， K_d の値は屋内 ISS 疑似追尾実験の値から変更せず追尾を行ったが ± 10 [pixel]に収束し定常偏差も無く追尾が可能であった．また収束した後では x 軸， y 軸共に 0.02 [deg]程度の定常偏差に押さえることができた

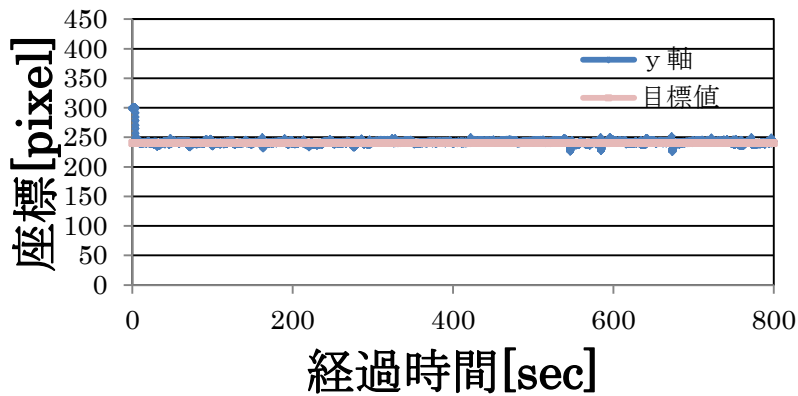


図 6.2 Y軸屋外月追尾

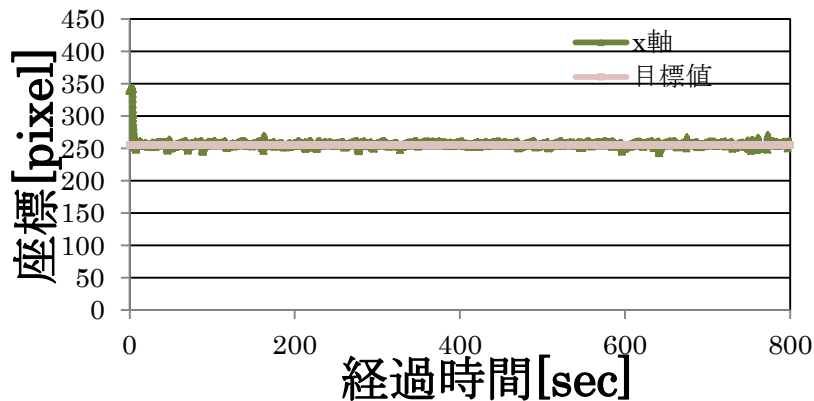


図 6.3 X軸屋外月追尾

表 6.1 月追尾実験誤差

月追尾	平均	標準偏差
x 軸	-0.00856	0.020287
y 軸	-0.01073	0.020212

次に飛行機を追尾した場合の実験結果を図 5.4, 図 5.5 に示す. この際, 追尾途中に飛行機が木の陰に隠れてしまい 2 秒から 12 秒の間追尾することが不可能であった. また飛行機には点滅する光があり, 何度か認識がぶれてしまうこともあった. K_p , K_i , K_d の値は屋内 ISS 疑似追尾実験の値から変更せず追尾を行った. x 軸, y 軸共に認識がぶれなければ ± 10 [pixel] 以内で定常偏差も無く収束し追尾が可能であった. また認識がぶれたにもかかわらず X 軸で 0.05 [deg] 程度 Y 軸で 0.04 [deg] 程度の標準偏差に押さえることができた. 一眼レフにて写真撮影を行い飛行機の姿を写真に収めることにも成功した. 図 5.6 に示す

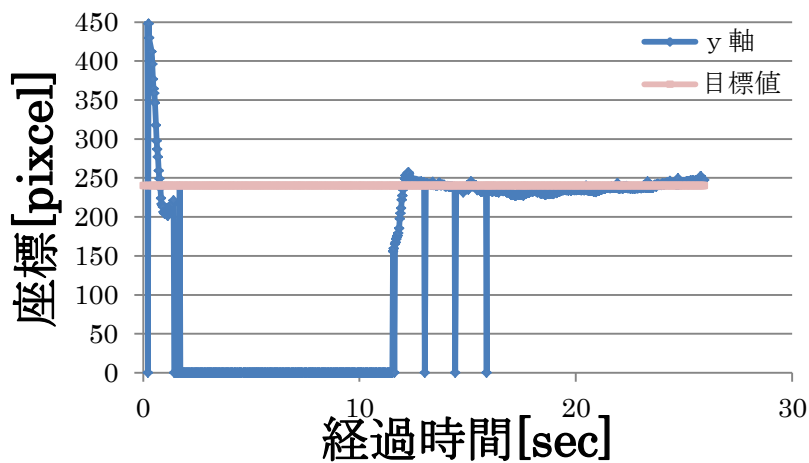


図 6.4 y 軸屋外飛行機追尾

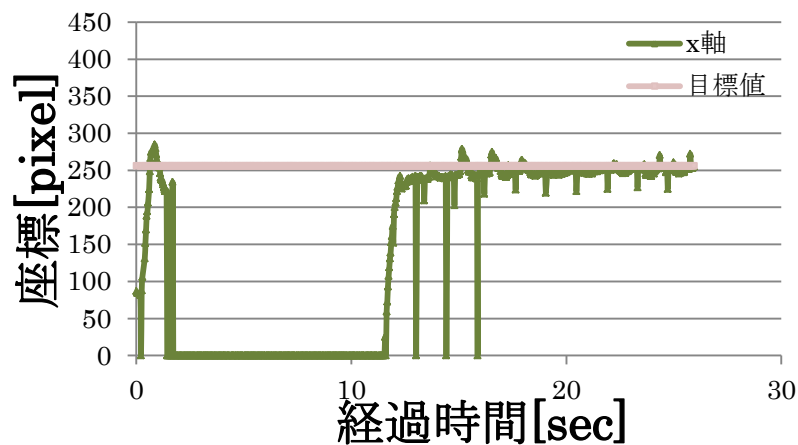


図 6.5 x 軸屋外飛行機追尾

表 6.2 飛行機追尾実験誤差

飛行機追尾	平均	標準偏差
x 軸	0.053091	0.055242
y 軸	0.032234	0.043105



図 6.6 飛行機追尾写真

最後に ISS を追尾した場合の実験結果を図 5.7, 図 5.8 に示す. この際 ISS の通過予測が見え始め, 最高通過点, 見え終わりの三点の予測のみしかサイトに掲載されていないため, 見え始めに仰角と方位角を合わせて実験を行った. また学内の灯りによって見え始め, 見え終わりに, 画像処理の認識が不安定になってしまう場合があった. K_p , K_i , K_d の値は屋内 ISS 疑似追尾実験の値から変更せず追尾を行った. x 軸, y 軸共に ± 5 [pixel] 以内で定常偏差も無く収束し追尾が可能であった. また収束し認識が安定した所では図に示すように標準偏差が x 軸, y 軸共に 0.02 [deg] 以下に抑えることができた. 一眼レフにて写真撮影を行い ISS の写真を収めることができたがカメラの感度の設定が不十分であったため ISS の姿がぼやけた写真となってしまった. 図 5.9 に示す

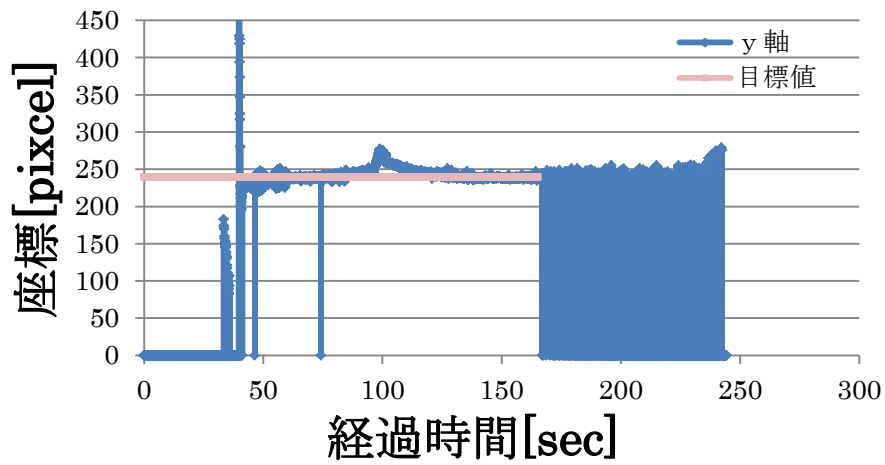


図 6.7 y 軸屋外 ISS 追尾

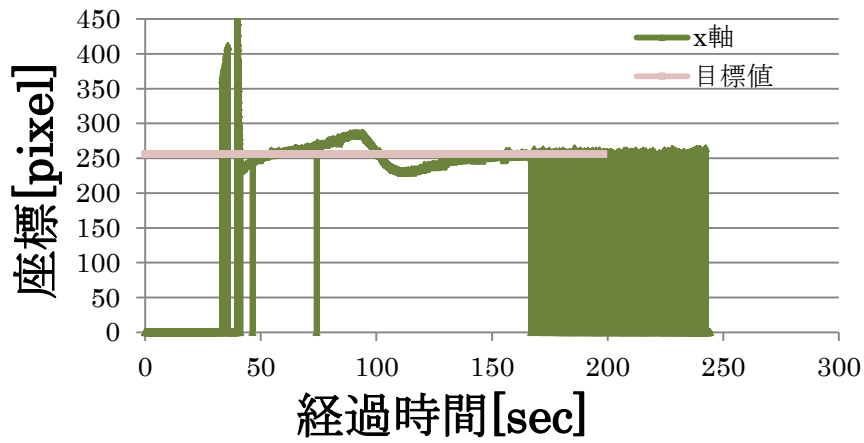


図 6.8 x 軸屋外 ISS 追尾

表 6.3 ISS 追尾実験誤差

ISS 追尾	平均	標準偏差
x 軸	0.026059	0.019774
y 軸	0.01022	0.011791



図 6.9 ISS 追尾写真

6.7.1 実験結果からの考察

今回の実験結果から画像処理装置が認識可能なものであれば、機械的誤差の範囲内で高精度の追尾が可能であることが分かった。だが一眼レフの設定が十分でないため被写体の姿を鮮明に映せない場合があった。今後は実験を複数回繰り返し、カメラの設定適正值を探していきたい。

第 7 章

結言

今回の研究では昨年の研究を引き継ぎ DC モータを用いて電流制御での追尾を行った。昨年度同様遅れ補正プログラムを入れることで追尾は可能だが不規則な動きが残ってしまう問題があった。そこで制御方法を発展させ電圧制御での追尾も行った。これにより不規則な動きはなくなりより高精度での追尾ができたため今年度は電圧制御を軸として屋外実験での ISS 追尾を行った。

今後の課題としては画像処理装置が天候の状態や ISS の明るさにより認識が不安定になる場合が多々あり追尾に支障をきたすことがあるので、今後は安定した認識を行うために目に見えない光も感知できるような光センサなどに変更し装置の改善を行う必要があるのではないかと考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導いただきました河村良行教授、実験に協力して下さった衛星班第二班に深く感謝いたします

参考文献

- (1) 堀桂太郎：[図解 LabVIEW 実習]2006 年発行(森北出版)

- (2) 小澤哲也：[図解 LabVIEW データ収集プログラミング]2008 年発行(森北出版)