

平成 26 年度 卒業論文

画像処理による人工衛星追尾装置の研究Ⅱ

福岡工業大学 工学部

知能機械工学科

11E1017 北村 拓也

11E2027 嶽本 武幸

指導教員 河村 良行 教授

第1章 緒言	4
第2章 実験装置	
2.1. 装置概要	6
2.2. 経緯台	6
2.3. 画像処理装置	7
2.4. CCD カメラ	7,8
2.5. 電流制御器	8,9
2.6. DA 変換器(USB-6211)	9
2.7. DC モータ	10
第3章 制御プログラム	
3.1. LabVIEW について	12
3.2. 追尾制御プログラム	12
3.2.1 P 制御	12
3.2.2 PD 制御	13
3.2.3 PID 制御	13
第4章 ステップ応答実験	
4.1 実験目的	17
4.2 実験概要	17
4.3 実験方法	17
4.4 実験結果	17
4.4.1 P 制御	17
4.4.2 PD 制御	17
4.5 実験結果からの考察	20
4.5.1 考察	20
4.6 問題点解決	20
第5章 遅れ時間補正	
5.1 遅れ時間	24
5.2 実験方法	24
5.3 実験結果	24
5.4 遅れ時間補正	25,27
第6章 遅れ時間補正を入れたステップ応答実験	
6.1 実験目的	29
6.2 実験概要	29
6.3 実験方法	29
6.4 実験結果	31
第7章 追尾実験	
7.1 実験目的	33
7.2 実験概要	33

7.3 実験方法	33
7.4 実験結果	34
7.5 PID 制御による追尾実験	32
7.5.1 実験目的	35
7.5.2 実験概要	35
7.5.3 実験方法	35
7.5.4 実験結果	36
第 8 章 結言	38

第 1 章 緒言

近年、宇宙工学への関心が高まっており様々な衛星が宇宙へと送り出されている。本校でも2012年に福岡工業大学で小型人工衛星「FITSAT-1」が開発され、2013年7月にその役目を終えた。その際、衛星を見失わないよう追尾ができる環境が必要であると思われた。

それを踏まえて昨年度は光衛星を追尾する装置が制作され、ISS(国際宇宙ステーション)を観測目標として実験が行われた。自ら発光している訳ではないが太陽光の反射で十分な等級があるので追尾目標とした。観測実験の問題点として経緯台の駆動にステッピングモーターを使用した。衛星観測の仰角が50度以上の高いときに、追尾速度が追いつかなくなり、脱調現象がしばしば現れたことが挙げられた。本年度は、この問題を改善するために、ステッピングモーターに代えてDCモーターを用いた実験を行い、追尾装置として使用できるかの性能評価をおこなった。

第 2 章 実験装置

2.1 装置概要

図 2.1 に観測装置の全体構成図を示す. CCD カメラから取得した座標位置を画像処理装置で読み込む. 位置データをコンピュータに送り DC モータ操作電圧を計算する. D/A コンバータから電流制御器に電圧を入力し DC モータ X 軸 Y 軸のトルク制御を行う.

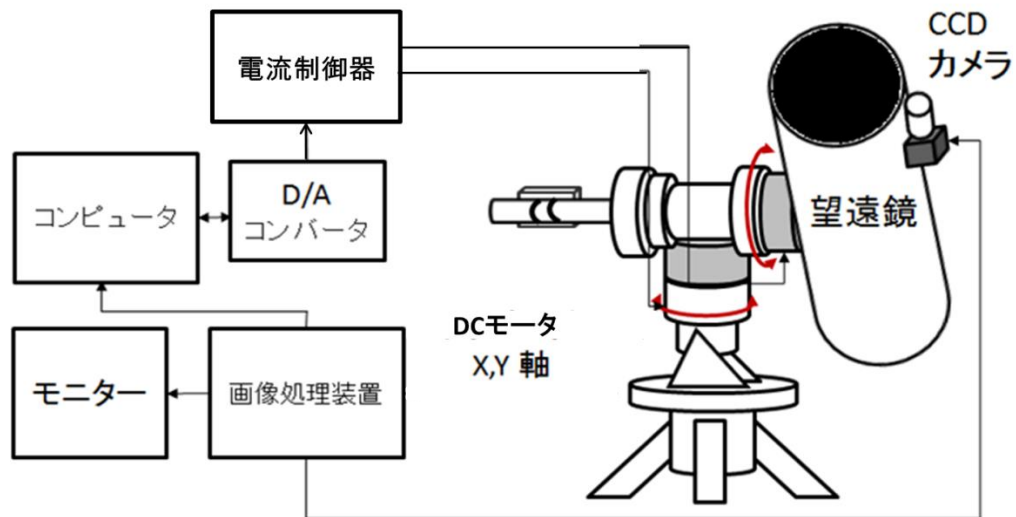


図 2.1 実験装置構成

2.2 経緯台

使用している機材は、天文分野で用いられる経緯台（(有)とみた:MC-500AL）を輸入し、使用している. Y 軸モータ固定部を NC フライス盤により 0.02 [mm] 切削加工した. 図 2.2 に経緯台の外観を示す.

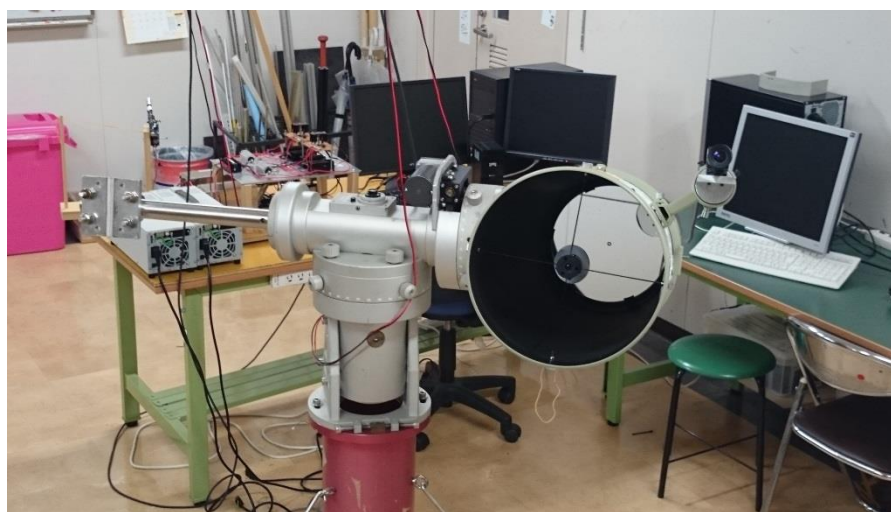


図 2.2 経緯台

2.3 画像処理装置

画像処理措置⁽¹⁾ (株式会社キーエンス : CV-3000) の外観を図 2.3 に示す. 色の認識や形状、濃淡の違い等での画像認識を行うことができる. これらを組み合わせることにより対象の場所や大きさを数値として認識することができる. 読み込んだ位置データをモニターに写す.



図 2.3 画像処理装置

2.4 CCD カメラ

CCD カメラ(株式会社キーエンス:CV-35C)の外観を図 2.4 に示す. 望遠鏡に備えられている位置合わせ用の小型望遠鏡を載せる位置に CCD カメラを設置している. 使用している CCD カメラは、CV-35C で電子シャッター数値入力指定 0.05~9000msec の設定ができる. レンズは終点距離 8mm のものを使用. このカメラで観測を行った.



図 2.4 CCD カメラ (CV-35C)

カメラの視野角 θ [deg]は壁の映像を読み込み実測したところ図 2.5 のようになった。式は

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{b}{2a} \quad (3.1)$$

となる。計算したカメラの視野角度は 50.4 [deg]である。しかし、実際にグラフに表示するのは画像位置範囲(512, 480)のものである。

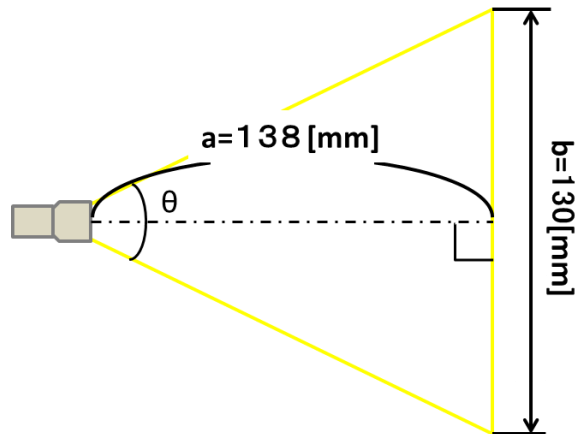


図 2.5 CCD カメラの視野角の測定

2.5 電流制御器

図 2.6 に電流制御器の外観を示す。操作電圧を受けて電源出力の値に比例した電流操作を行う。コイルを使用して求めた動作特性実験を図 2.7 に示す。

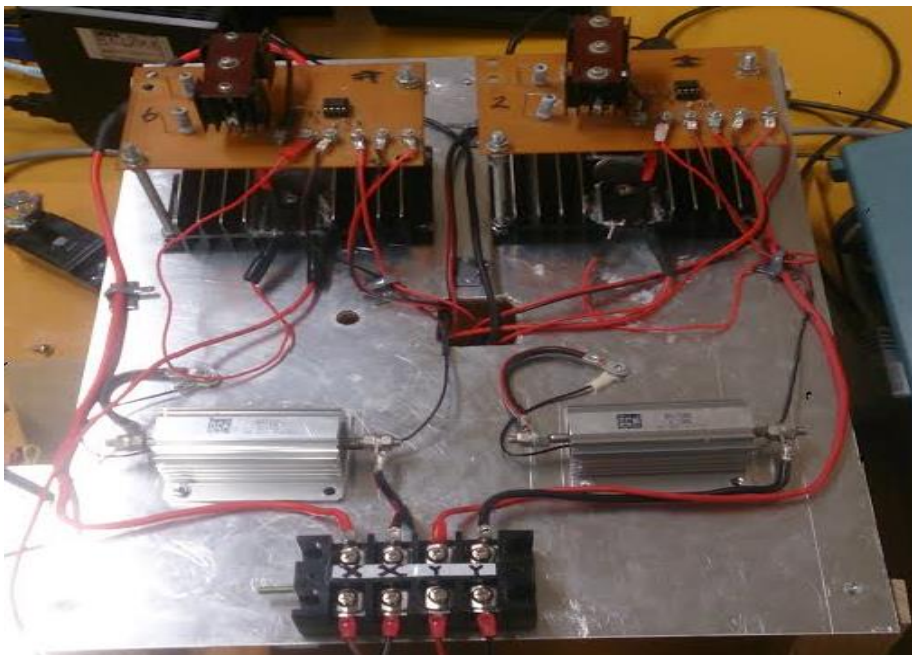


図 2.6 電流制御器

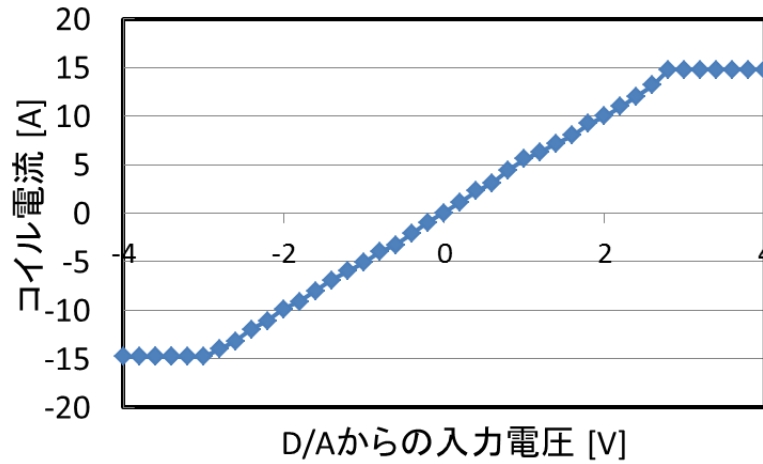


図 2.7 コイルを使用した動作特性

表 2.1 電流制御器使用部品図

部品名	仕様
R ₁ , R ₂ , R ₃ , R ₇	抵抗(10KΩ, 1/4W)
R ₄ , R ₅	抵抗(50Ω, ±5%, 3W)
R ₆	シャント抵抗(0.1Ω)
OPアンプ	LM741C OPアンプ(±15V)
C ₁	コンデンサ(0.01μF)
C ₂	コンデンサ(0.1μF)
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)
L	コイル(2.5Ω)

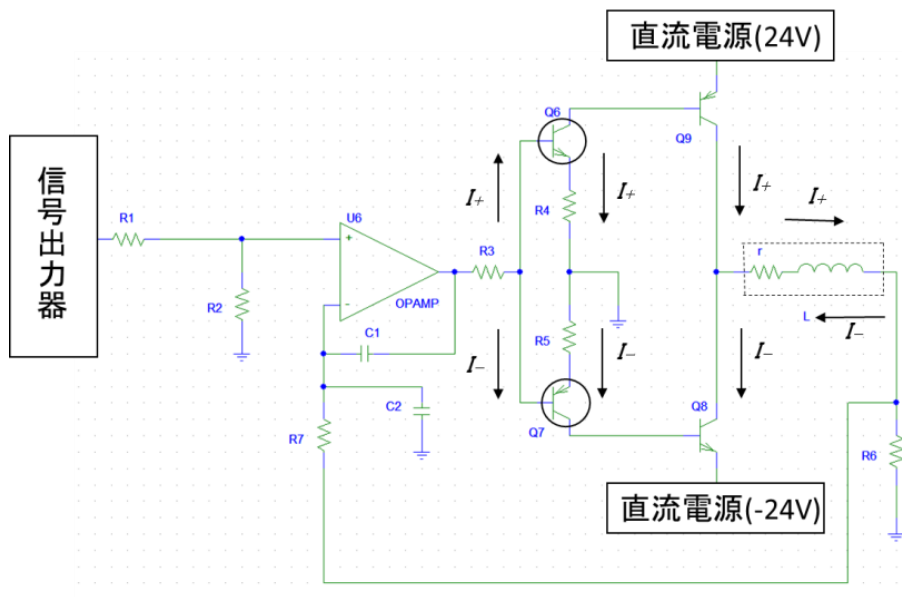


図 2.8 電流制御器回路図

2.6 DA 変換器

図 2.9 に DA 変換器 (National Instruments Corporation : USB-6211) の外観を示す. パソコンから出力されるデジタル信号をアナログ信号に変換する装置である. 電流制御器にパソコンからの信号を出力するために用いられる. パソコンとの通信には USB ケーブルを用いている.



図 2.9 DA 変換器

2.7 DC モータ

DC モータ⁽²⁾ (ツカサ電工株式会社 : TG-77) の外観を図 2.10 に示す. 使用するのは DC モータ, 定格電圧 24[V], 減速比 1/5, のものを使用した. 図の円柱部分が DC モータで, 上の黒い部分の中身がウォームギアとなっている. 左側にあるプーリベルトによって仰角・方位角の動作を行う.

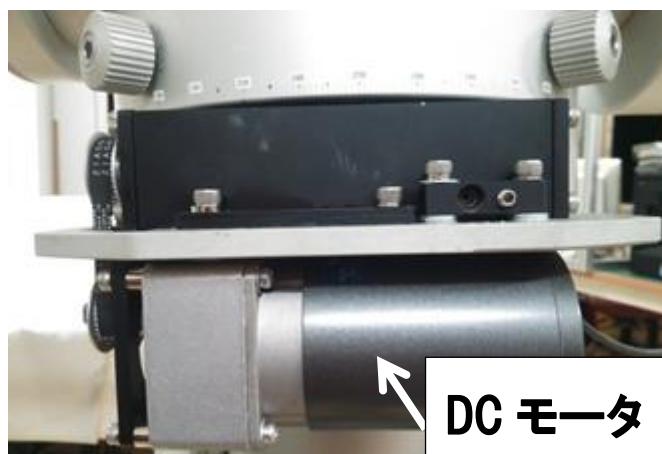


図 2.10 DC モータ

第3章 制御プログラム

3.1 LabVIEW について

LabVIEW⁽³⁾とはVI (Virtual Instrument : グラフィカルプログラミング言語) と呼ばれるアイコン同士を組み合わせ接続することによって、プログラムを製作することのできるソフトである。プログラムを視覚的に理解することができ、簡単に修正などを行うことができるメリットがある。(National Instruments Corporation : LabVIEW) を使用している。

3.2 追尾制御プログラム

主な制御の流れを図 3.1 に示す。このフローチャートは閉ループプログラムになっている。開始によりスタートし座標読み取りで現在位置を取得する。取得した位置と目標位置との差を制御量 $e(t)$ として制御式に代入する。操作量 $u(t)$ を電圧として出力する、これが大まかな流れである。

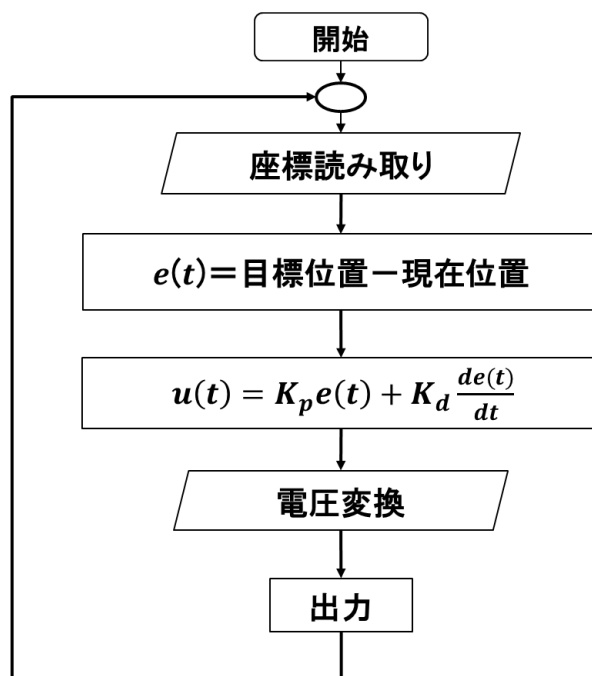


図 3.1 追尾制御フローチャート

3.2.1 P 制御

最も基礎的なフィードバックとして比例制御を使用する。入力値の制御を出力値と目標値の偏差を求めることで行う。P 制御は中心 (256, 240) を基準にそこから目標位置座標を引いた制御偏差を $e(t)$ とし、そこに比例ゲイン k_p をかけることで DC モータを制御している。

$$u(t) = k_p e(t) \quad (3.1)$$

3.2.2 D 制御

急な変化が起こった際にその速度に比例した修正出力を出すことで、その変化に抗しようとする役割を持つ。この偏差の微分に比例して入力値を変化させる動作を D 制御と言う。PD 制御は

$$u(t) = k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.2)$$

となる。

3.2.3 I 制御

目標に対して動作を行うと定常偏差が出てしまう。偏差を無くす為積分ゲインを入れた計算を行う。偏差のある状態が長い時間続けばそれだけ入力値の変化を大きくして目標値に近づけようとする。偏差の時間積分に比例して入力値を変化させる動作をさせる。PID 制御の式は

$$u(t) = k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt} + k_i \int_{t-\tau}^t e(t) dt \quad (3.3)$$

となる。ただし、 τ は積分時間である。

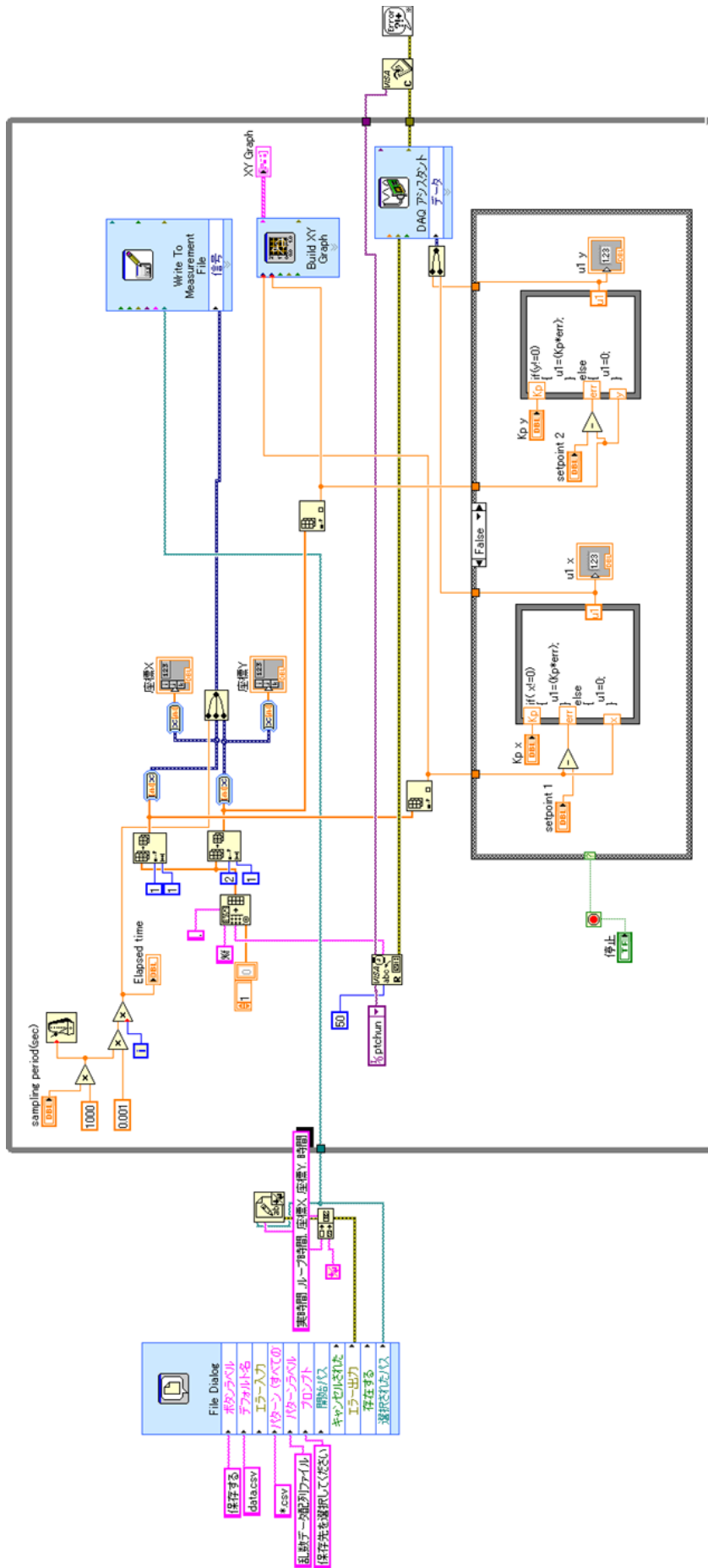


図 3.2 P 制御ブロックダイアグラム

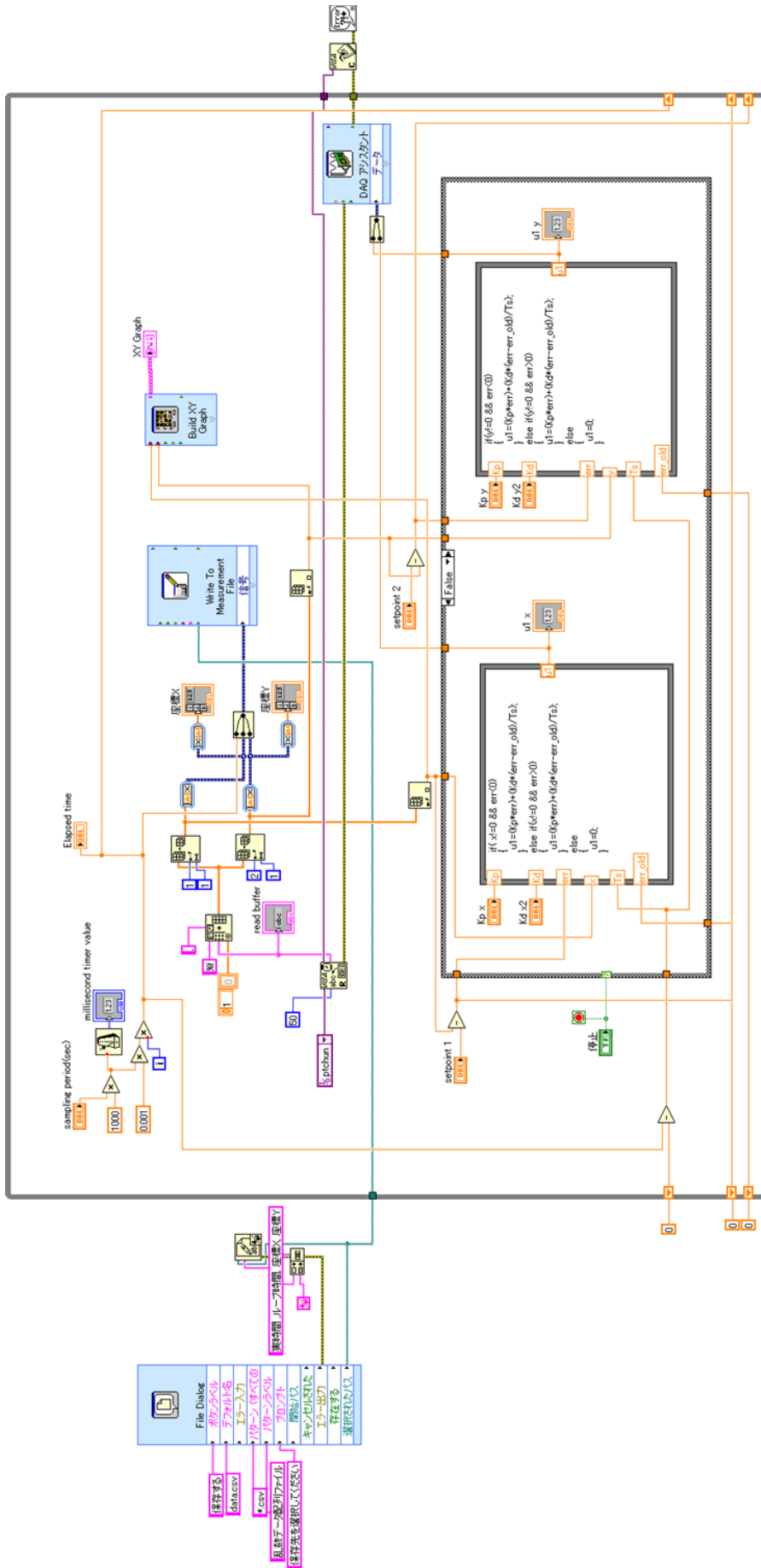


図 3.3 PD 制御ブロックダイアグラム

第4章 ステップ応答実験

4.1 実験目的

目標点を捉えることができ、目標点到収束できるかの性能評価を行った。P制御は比例係数 k_p の数値を変えての性能評価をおこない、PD制御は比例係数 k_p 、微分ゲイン k_d の数値を変えての性能評価をおこなった。

4.2 実験概要

実験場所は河村研究室で行った。ターゲット光を目標点としてステップ応答実験を行った。今回はレーザーポイント(赤)をターゲット光とした。経緯台を目標点から直線距離 3.5 [m] 離し、二点の直線上の経緯台側から 0.5 [m] の位置にレーザーポインターを設置する。

ターゲット光を CCD カメラ(焦点距離 8mm)で捉え現在位置と目標位置(256, 240)から偏差を求めた。求めた偏差を計算し電圧に変換、D/A 変換器で出力した。電流制御器により DC モータをトルク制御し実験を行った。

4.3 実験方法

実験の手順を①から④まで以下に示す。

- ① 望遠鏡の取り付け、CCDカメラの起動、出力電源装置の起動、等の装置の準備を行った。
- ② 画像処理装置のターゲット光判定を行った。色抽出によりターゲット光を選別し、プロブを使用して目標を検出した。
- ③ コンピュータ上で LabVIEW を起動しフロントパネルを開く。パネルの画面上で目標位置、比例ゲイン k_p 、微分ゲイン k_d 、ループ周期を入力した。
- ④ フロントパネル上でスタートさせ、壁にターゲット光を当てた。追尾をはじめ収束するかを確認し、プログラムを切った。この時プログラムの延長で電圧が出ている場合があるので注意した。

4.4 実験結果

4.4.1 P 制御

実験結果を図 4.1, 図 4.2 に示す。ループ周期 0.1[sec]でおこない k_p を 0.01 から 0.04 まで変えて行ったが、いずれも目標位置(256, 240)に対して目標を捕らえてはいるが収束しないことがわかった。0.04 から数値を上げても 0.04 の時と反応は変わらなかった。X 軸・Y 軸ともに座標位置 170 から 330 の付近にてハンチングを起こしていた。

4.4.2 PD 制御

実験結果を図 4.3, 図 4.4 に示す。 $k_p=0.01$ として $k_d=0.01$ から変化させたものをまとめた。P 制御と同じく目標位置(256, 240)で行ったが同様の結果が得られた。しかし、数値によっては P 制御とは違いよい結果と悪い結果が現れた。 $k_p=0.01$, $k_d=0.002$ の時にハンチングの値が 190 から 310 で一番小さくなった。

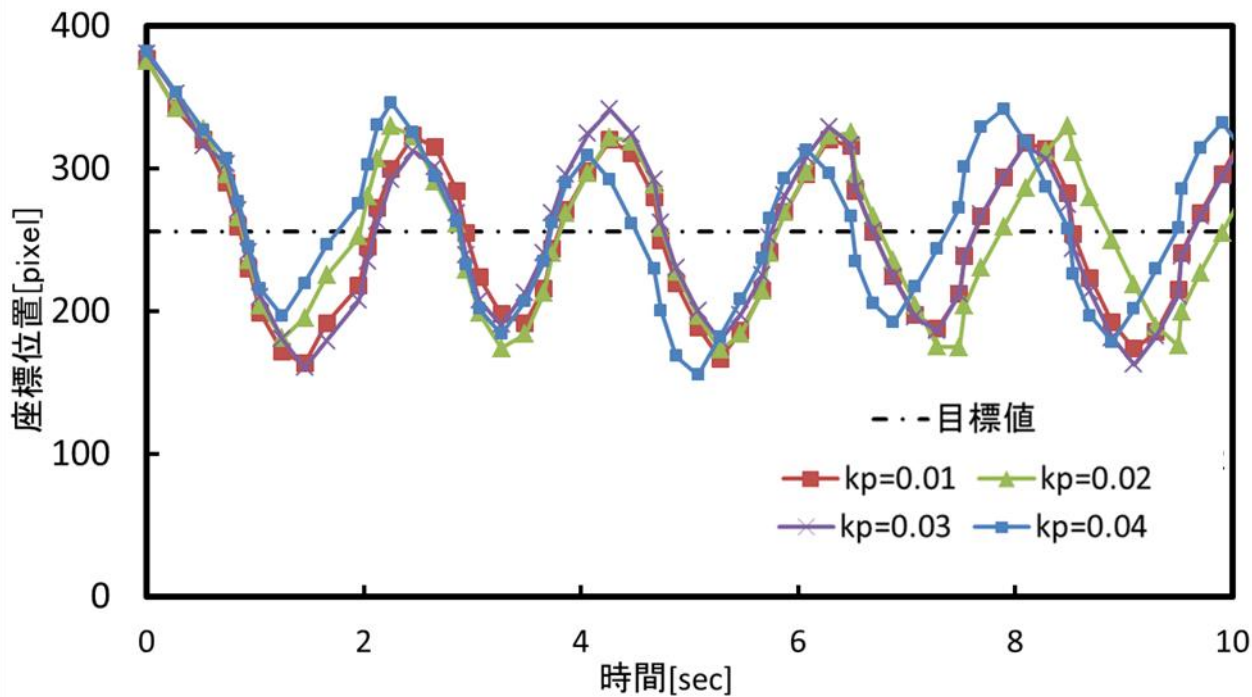


図 4.1 画像処理における P 制御の k_p を変化したステップ応答
(X 軸, モータ電圧 : 24[V])

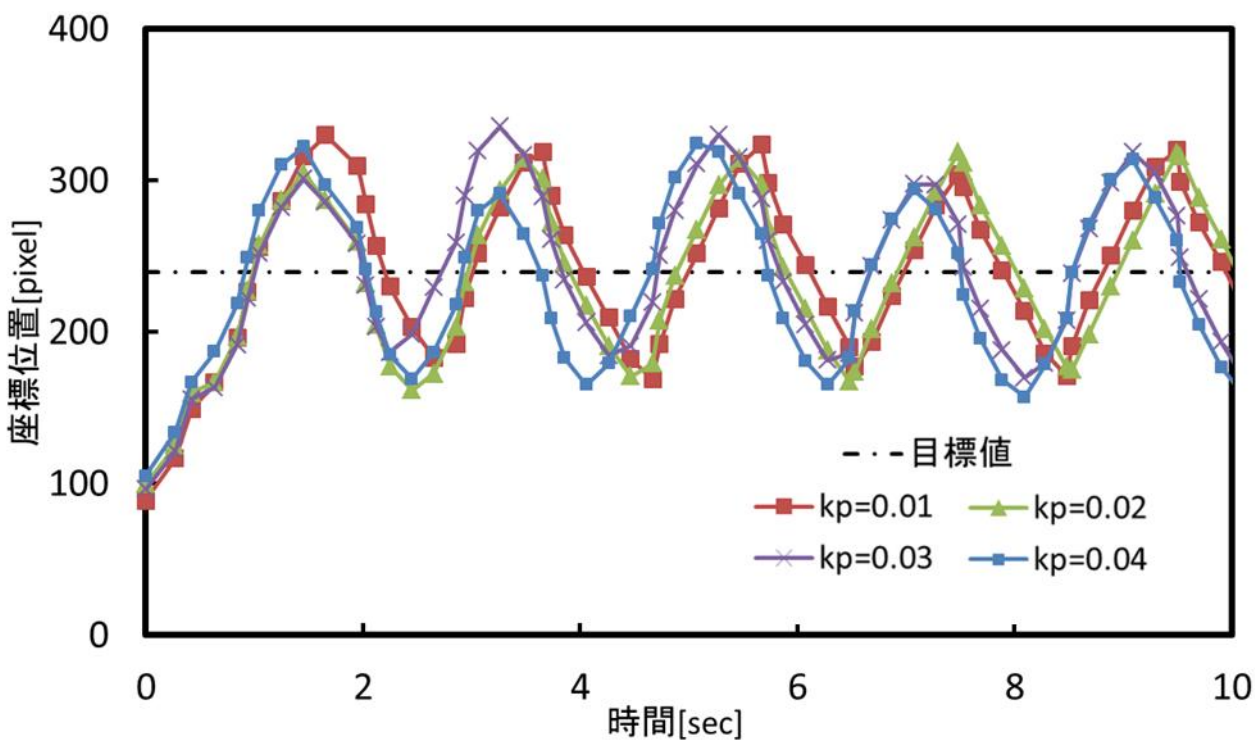


図 4.2 画像処理における P 制御の k_p を変化したステップ応答
(Y 軸, モータ電圧 : 24[V])

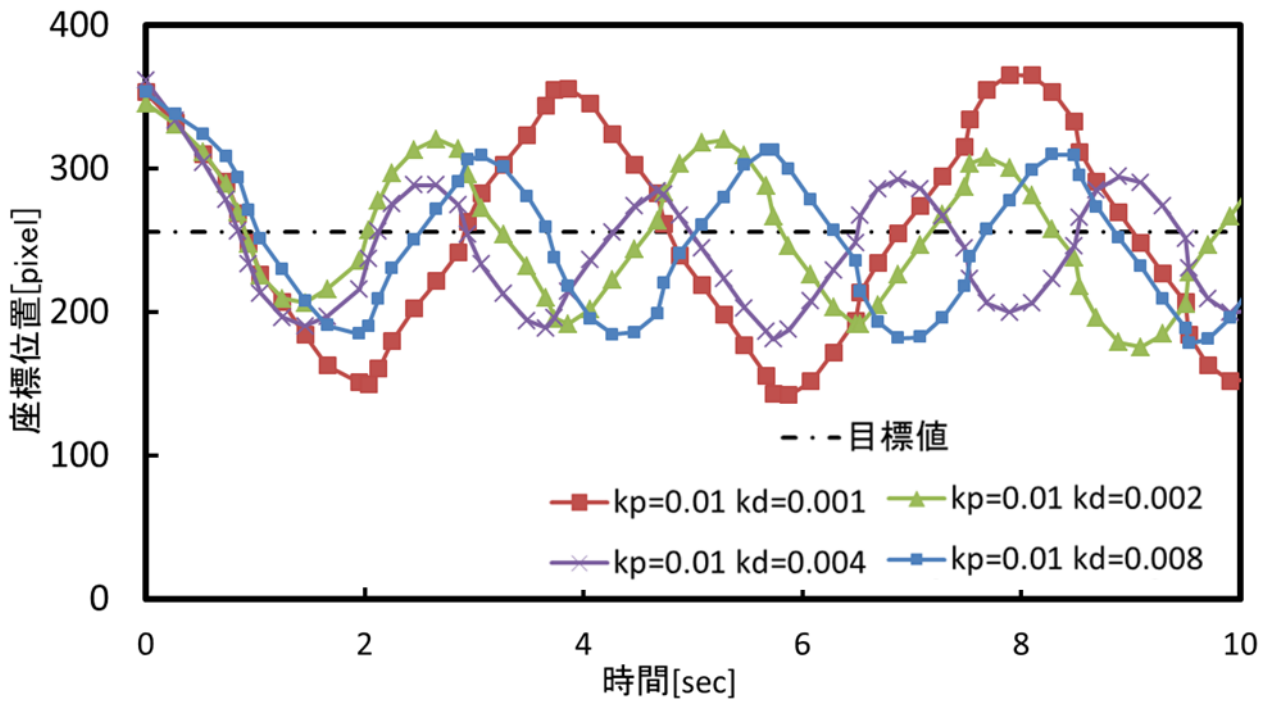


図 4.3 画像処理における PD 制御の k_d を変化させたステップ応答
(X 軸, モータ電圧 : 24[V])

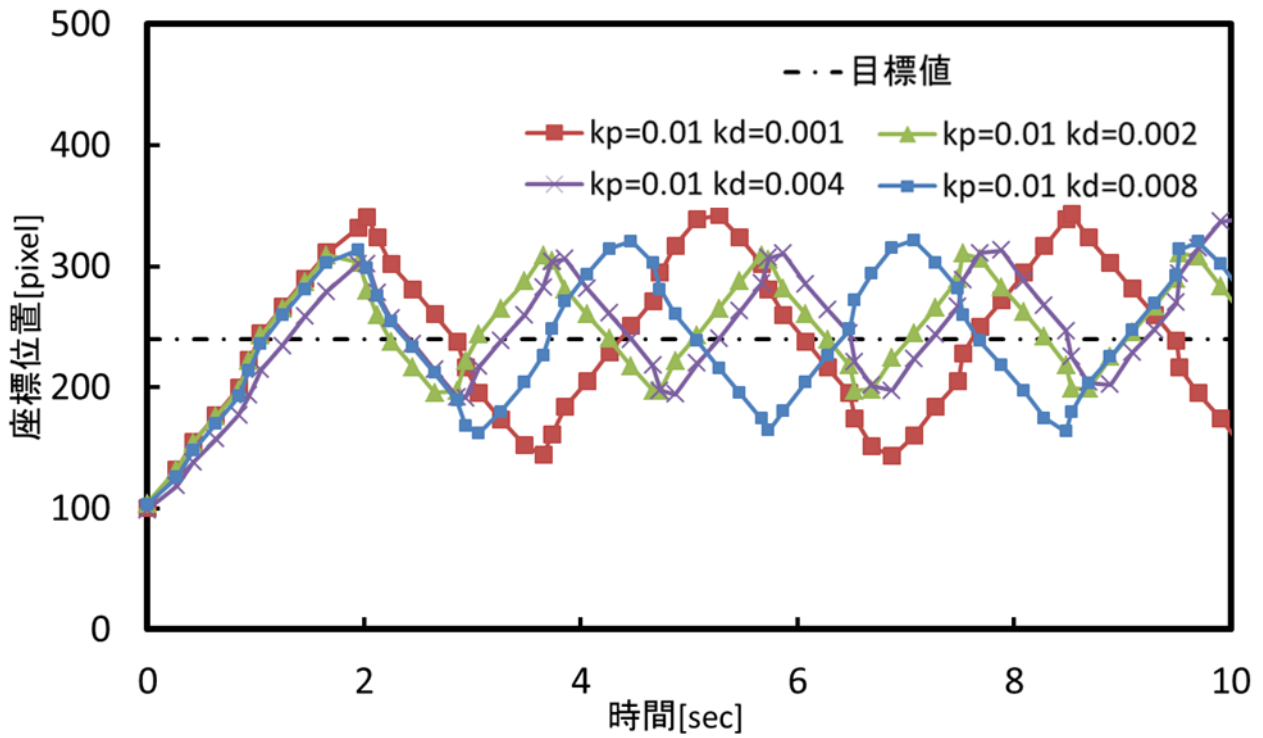


図 4.4 画像処理における PD 制御の k_d を変化させたステップ応答
(Y 軸, モータ電圧 : 24[V])

4.5 実験結果からの考察

4.5.1 考察

今回の実験では目標捉えることはできたが収束はしなかった。収束しない原因として D/A 変換器の出力と電流制御器のシャント抵抗を調べたところ 2 つの信号に差が見られた。 $k_p=0.01$, $k_d=0.001$ で出力したものを図 4.5 に示す。反応が正確に出ていれば操作電圧は信号電圧と重なって表示される。しかし、2 つの電圧には差があり操作電圧は途中で信号が下がっていた。これは、逆起電力によるモータ電流がきちんと流れていないことが考えられる。この他にこの信号と装置の間で時間のずれがあることが考えられる。この 2 つの問題点を改善することにした。

信号と装置でのズレは時間の遅れとして次の章に記す。逆起電力は出力電源を下げることで対応した。

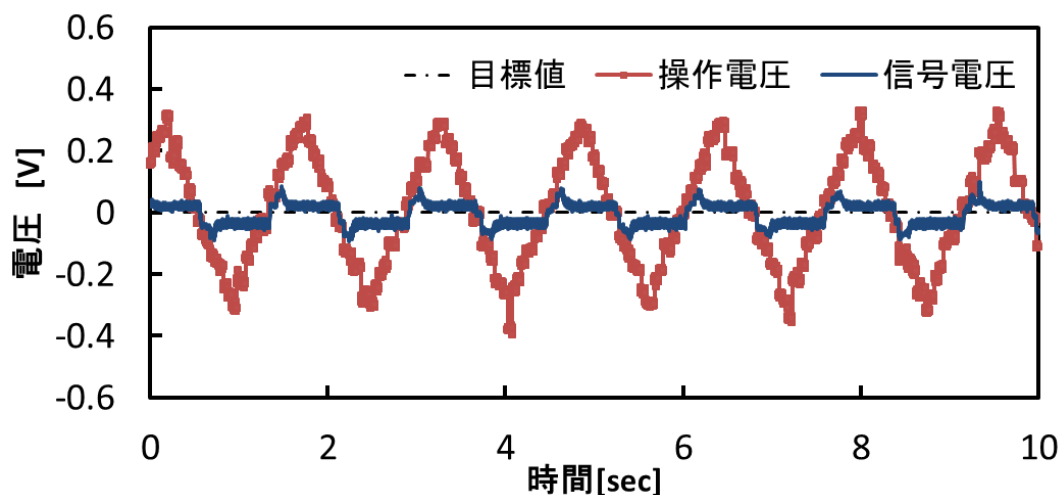


図 4.5 電流制御器の信号と操作の電圧のズレ (モータ電圧 : 24[V])

4.6 逆起電力

逆起電力の対策として 24 [V] で出力していたものを 5 [V] に変更した。先ほどと値を同じ $k_p=0.01$, $k_d=0.001$ 変更したものを下の図 4.6 に示す。5 [V] のものは 2 つの信号がほぼ重なっている。この電源出力 5 [V] でループ時間を 0.1 [sec] から 0.05 [sec] にし、PD 制御ステップ応答実験と同じ比例係数・比例ゲインで行ったものを図 4.8, 図 4.9 に示す。

こちらは先ほどと違い画像位置 230 から 280 とハンチングが大幅に小さくなった。しかし依然として収束しなかった。

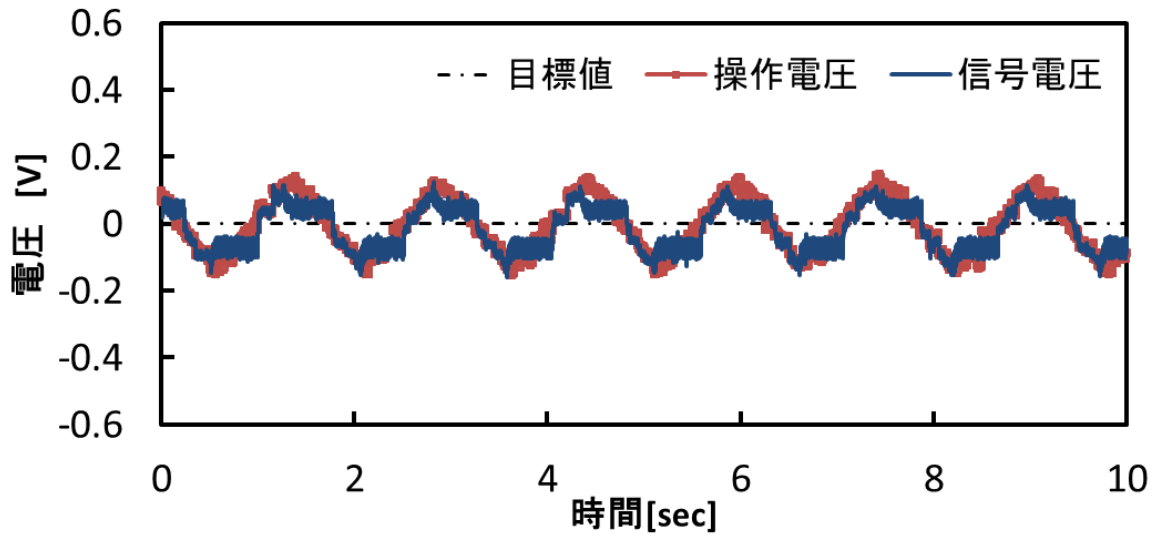


図 4.6 電流制御器の信号と操作の電圧のズレ (モータ電圧 : 5[V])

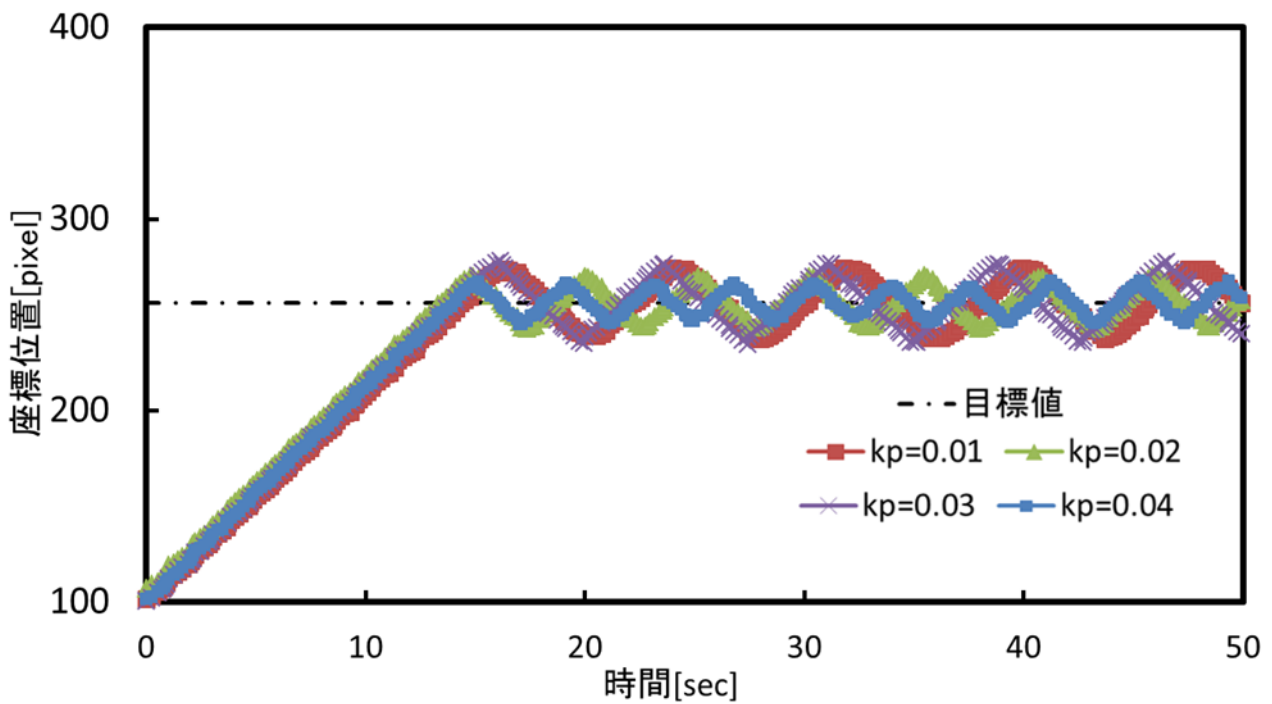


図 4.7 画像処理における PD 制御の k_p を変化させたステップ応答 (X 軸, モータ電圧 : 5 [V])

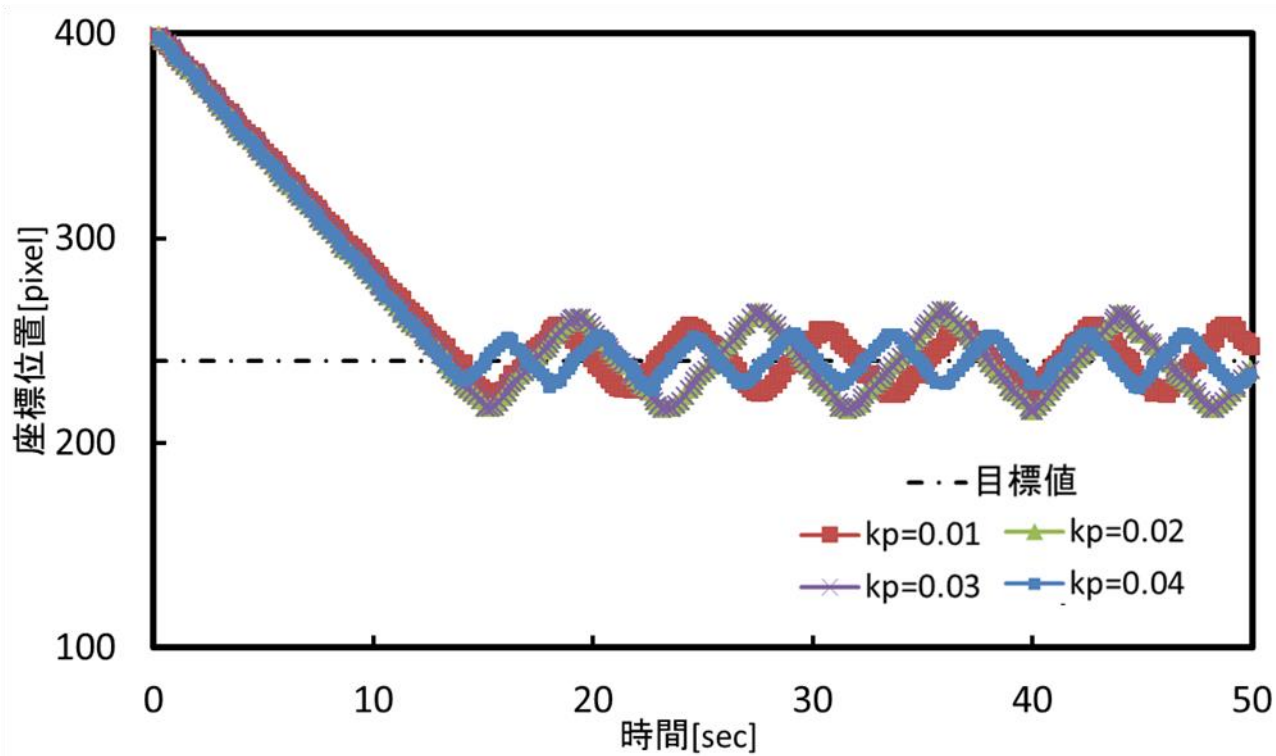


図 4.8 画像処理における PD 制御の k_p を変化させたステップ応答の反応
(X 軸, モータ電圧 : 5[V])

第 5 章 遅れ時間補正

5.1 遅れ時間

コンピュータと画像処理装置で時間のズレがあると考えられる．そこでどの程度の時間のズレがあるかを実験により測定することにした．

5.2 実験方法

コンピュータに電池からの電圧と電池につけた目印の位置データを読み込む．金槌で電池たたき飛ばす．この時，装置にズレがなければコンピュータ上では電圧と位置データ同時にデータが途切れているはずである．

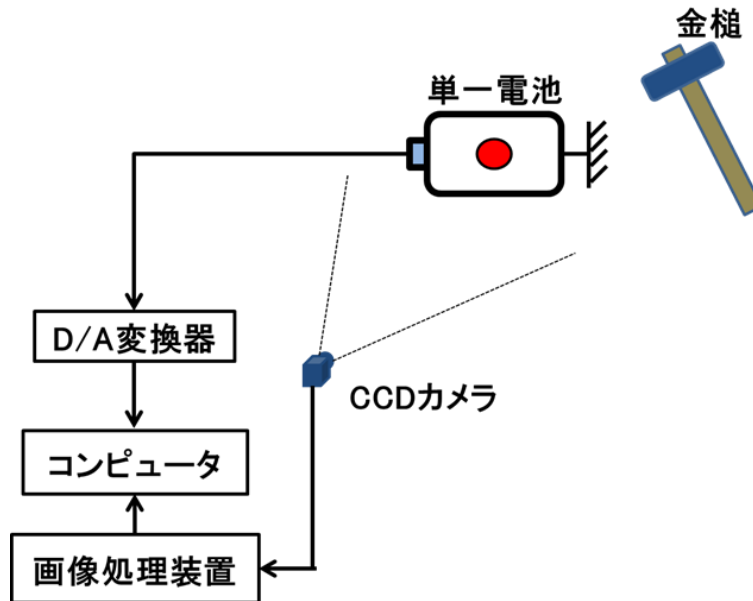


図 5.1 時間のズレ確認実験の概要

5.3 実験結果

実験の結果を図 5.2 に示す．電圧と座標位置にズレが見られた．座標のほうが時間的に 0.3[sec]遅れていた．この差を遅れ時間とする．

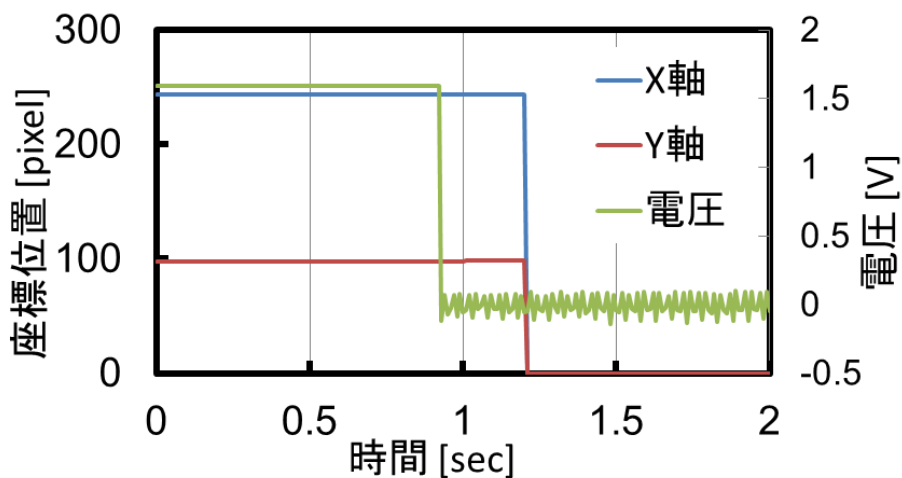


図 5.2 画像処理と電圧の時間差による遅れ時間

5.4 遅れ時間補正

この遅れ時間を少しでも無くす為に補正することにした。図 5.3 にグラフを示す。CCD カメラは T_3 の値を読み込んでいるがコンピュータ上では時間遅れから T_2 の値を読み込んでいる。この差を無くす為に T_1 の値を使用して一次式を入力することにした。一次式を利用して遅れ補正を式にしたものが

$$e(t) \doteq e_n = 2e_{n-1} - e_{n-2} \quad (5.1)$$

である。この式をプログラム内にある偏差 $e(t)$ として使用することで遅れ補正を行った。(5.1)の式を入れた遅れ時間を入れたプログラムを図 5.4 に示す。

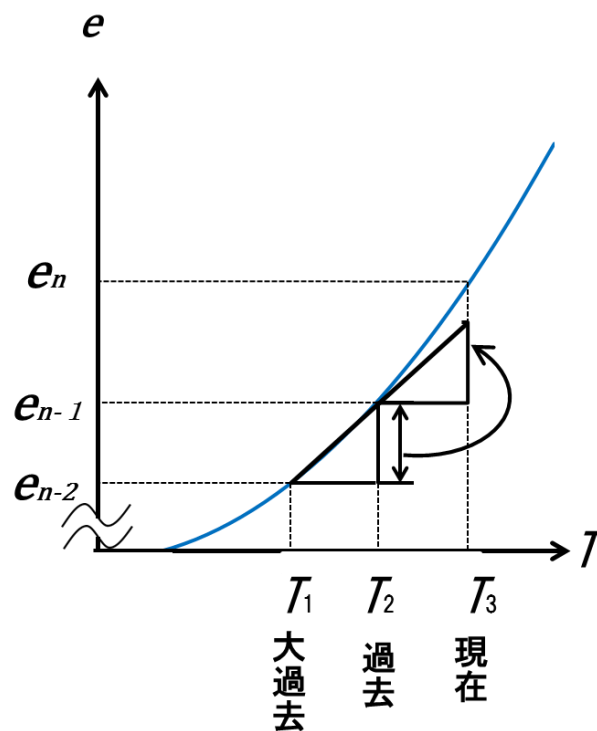


図 5.3 時間の移行に対する画像位置の変化を遅れ時間補正した考え方

この他にも、3つの直近の値から2次曲線で現在の値を外挿する二次式を利用した補正また、4つの直近の値から3次曲線で現在の値を外挿する三次式を用いた補正を行った。二次式を用いた遅れ補正は、

$$e(t) \doteq e_n = 3(e_{n-1} - e_{n-2}) + e_{n-3} \quad (5.2)$$

となる。

さらに、三次式を用いた遅れ補正は、

$$e(t) \doteq e_n = (60e_{n-1} + 18e_{n-2} + 4e_{n-3} - 3e_{n-4}) / 41 \quad (5.3)$$

となる。

なお、手計算でミスが出ないように数式解析プログラムMathematica⁽⁴⁾ (Wolfram Research : wolfram mathematica 10.0 日本語版)を使用した。

一次式、二次式、三次式の遅れ補正をを比較したものを X 軸, Y 軸とも同じ結果が出たため、X 軸を図 5.5 に示す。第 4 章の PD 制御実験と条件はすべて同じである。結果一次式が一番安定した。これは、目標値近くで算出される値の変動が激しすぎて目標点を越え切れていないことが原因だと考えられる。一次式は直線の値を予測しているためそこまで値の変動が激しく起こっていないのだと考えられる。

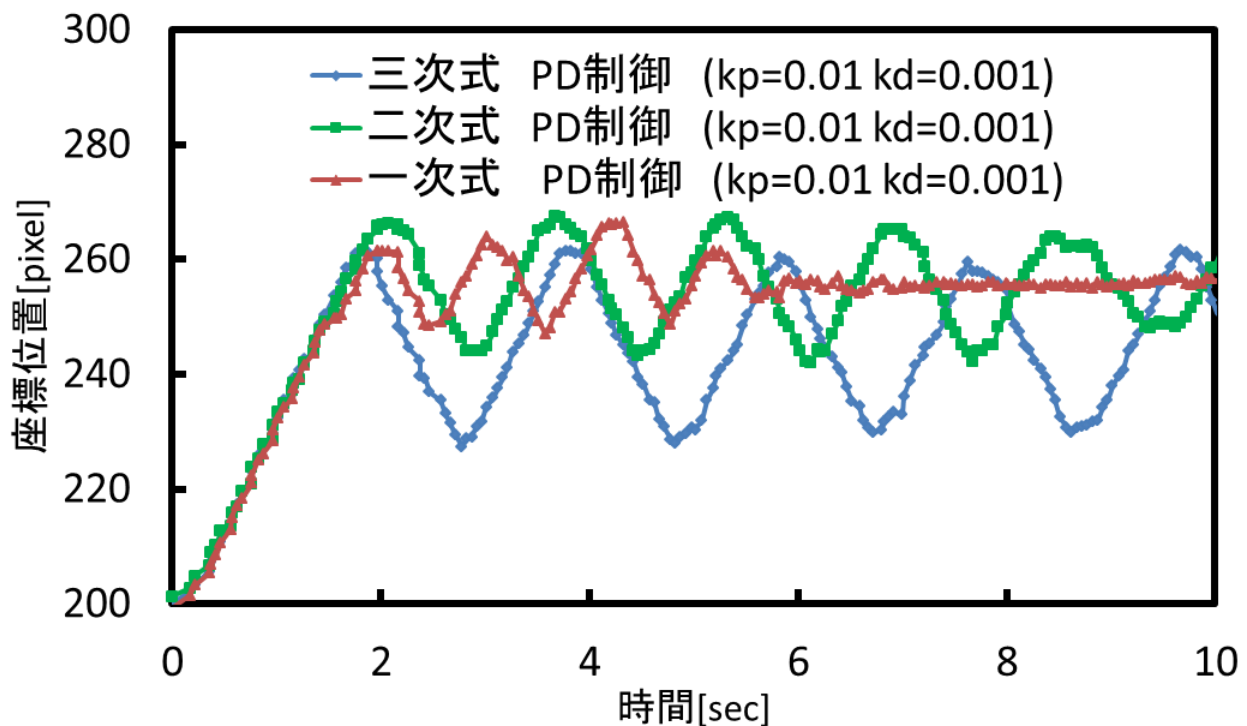


図 5.5 一次式、二次式、三次式遅れ補正の収束性能比較 (X 軸, モータ電圧 : 5[V])

第 6 章 遅れ時間補正を入れた ステップ応答実験

6.1 実験目的

1次式補正をプログラムに入れ,目標点に収束することができるか性能評価を行った. PD制御を行い k_d, k_d 数値を変えての性能評価.

6.2 実験概要

第4章ステップ応答実験PD制御と同じく実験場所は河村研究室で行った.ターゲット光を目標点としてステップ応答実験を行った.目標点をCCDカメラで捉え,目標位置(256,240)と現在位置の偏差を求めた.求めた偏差で電圧を計算し,電流制御器に出力した.この時の出力電源は5[V]で行った.電流制御器でDCモータを制御,動作させる.ループ周期は0.05[sec]で行った.

6.3 実験方法

実験方法は第4章ステップ応答実験PD制御と同じ手順で行った.

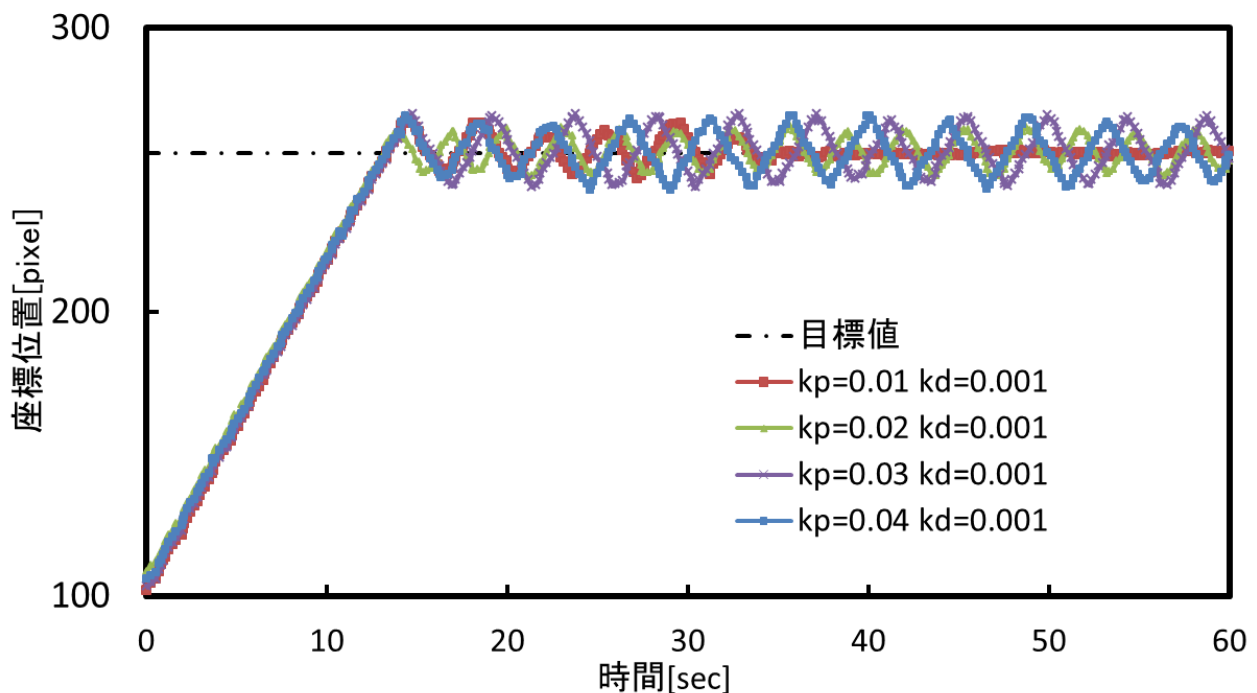


図 6.1 画像処理における PD 制御の k_p を変化させたステップ応答
(X 軸, モータ電圧 : 5[V])

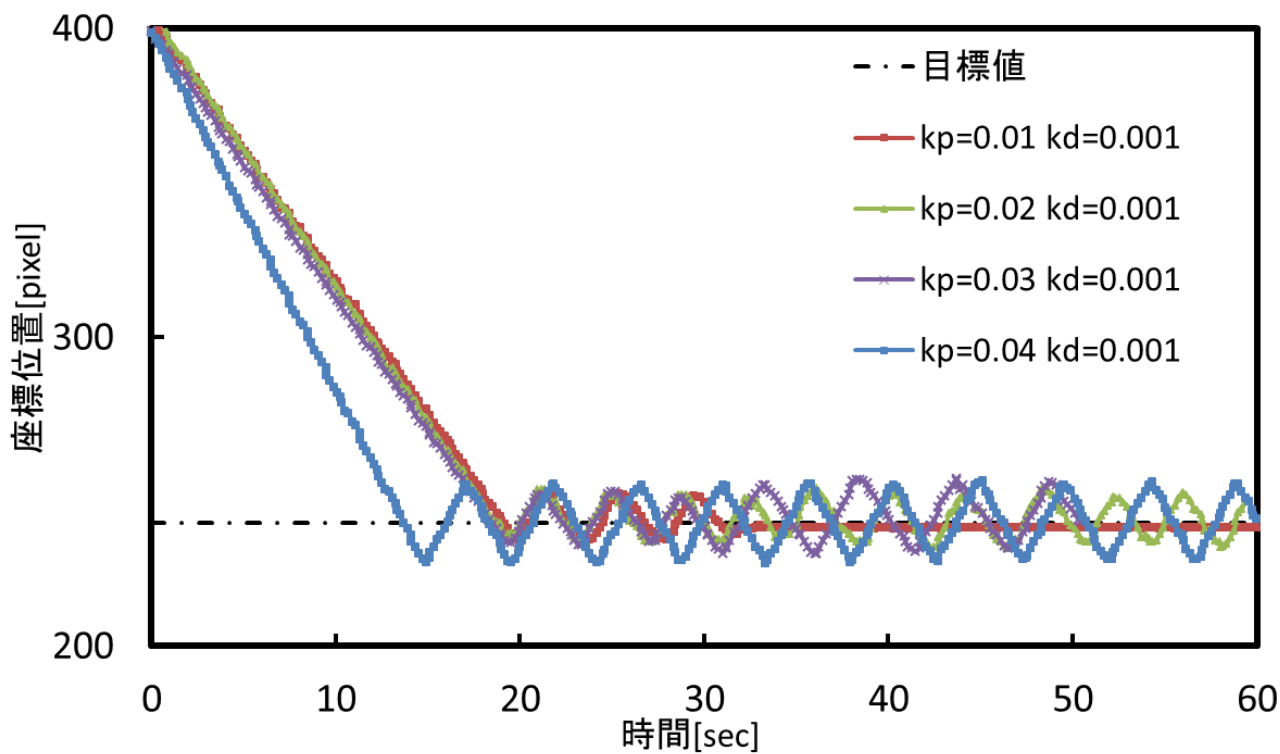


図 6.2 画像処理における PD 制御の k_p を変化させたステップ応答
(Y軸, モータ電圧 : 5[V])

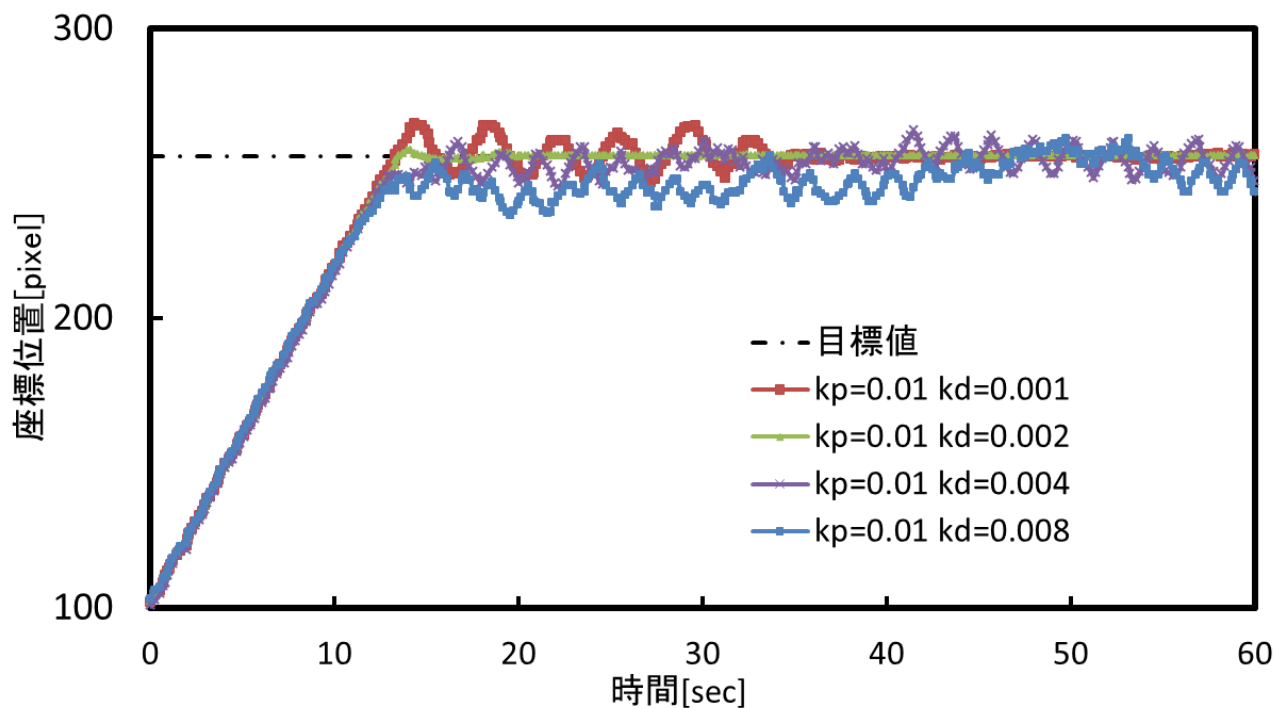


図 6.3 画像処理における PD 制御の k_d を変化させたステップ応答
(X軸, モータ電圧 : 5[V])

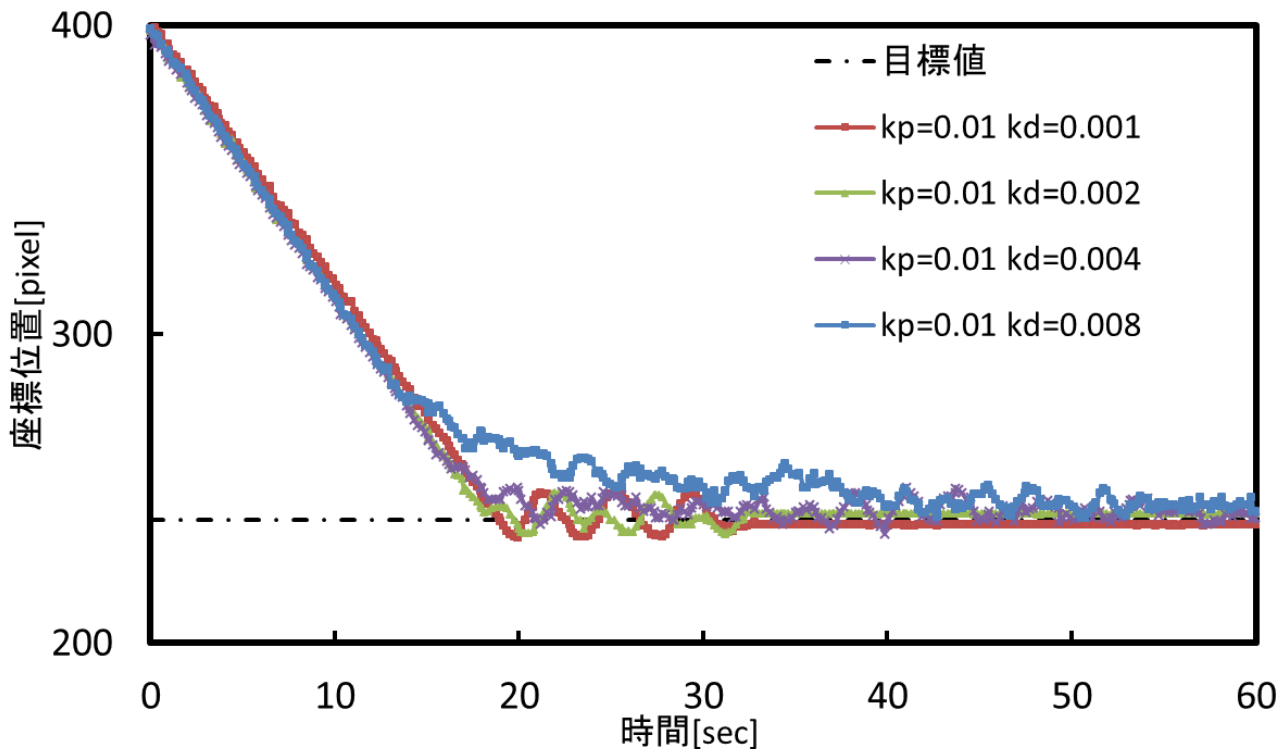


図 6.4 画像処理における PD 制御の k_d を変化したステップ応答
(Y 軸, モータ電圧 : 5[V])

6.4 実験結果

実験は X 軸, Y 軸個別で行った. 出力電源 24[V], 遅れ時間補正なしの時と比べるとハンチングはかなり小さくなっていった. $k_d=0.001$ に固定し, k_p を変えた場合の実験結果を図 6.1, 図 6.2 に示す. X 軸は $k_p=0.01$ では目標位置 (256,240) 近くに収束していたが, $k_p=0.02$, $k_p=0.03$, $k_p=0.04$ では収束せずハンチングしていた. Y 軸は X 軸と同じく $k_p=0.01$ では目標位置に収束していたが $k_p=0.02$, $k_p=0.03$, $k_p=0.04$ では収束せずハンチングしていた.

$k_p=0.01$ に固定し, k_d を変えた場合の実験結果を図 6.3, 図 6.4 に示す. X 軸は $k_d=0.001$, $k_d=0.002$ では目標位置近くに収束し, ハンチングが起こっていなかった. $k_d=0.004$, $k_d=0.008$ では収束せず, ハンチングが起こっていた. Y 軸は $k_d=0.001$ では目標位置に収束しているが $k_d=0.002$, $k_d=0.004$, $k_d=0.008$ では収束せず, ハンチングしていた.

X 軸は目標に対してほぼ収束していたが, Y 軸には定常偏差が見られた. 2 つの比較実験から X 軸, Y 軸ともに $k_p=0.01$, $k_d=0.001$ の値が一番安定することがわかった.

第 7 章 追尾実験

7.1 実験目的

1次遅れ補正を入れたPD制御による追尾実験とPID制御を行い、レーザーポインターの光である目標点を目標位置(256,240)で捉えるか性能評価を行った。

7.2 実験概要

ステップ応答実験と同じくレーザーポインター(赤)を目標点として、経緯台を目標点から3.5[m]離して実験を行った。二点の直線上の経緯台側から1.5[m]の位置にレーザーポインターを設置した。

レーザーポインターを減速比(1301:1)のギアボックスを取り付けたモータで動かす。電源電圧はモータが動く最小値である0.17[V]で行い、Y軸は約45度の角度で固定し、X軸は約30度の範囲で動作させた。目標点の角速度は約0.00035[deg/s]で行った。

経緯台の動作は方位角、仰角ともに約10度の範囲で動作させた。

7.3 実験方法

プログラムを起動させ、目標点を動かす。CCDカメラで捉え、目標位置(256,240)で捉えた。 k_p, k_d の値はステップ応答実験と同じ値で動作させた。プログラムのループ周期は0.05[sec]で行った。

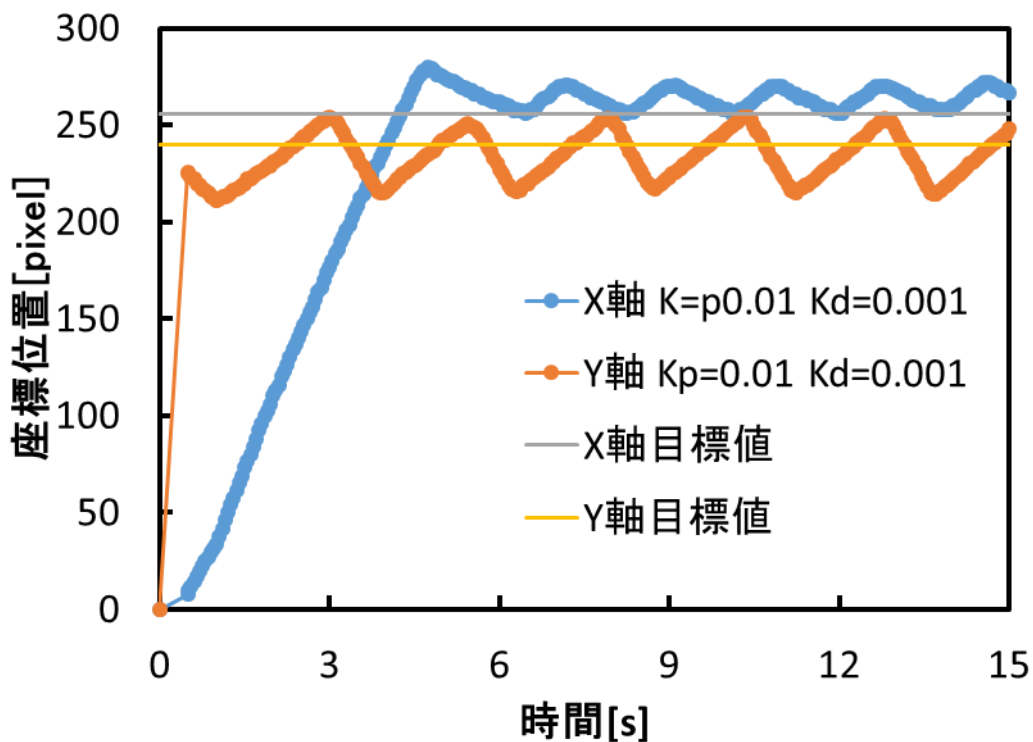


図 7.1 時間ごとの画像処理におけるPD制御 $k_d=0.001$ の時の追尾 (モータ電圧: 5[V])

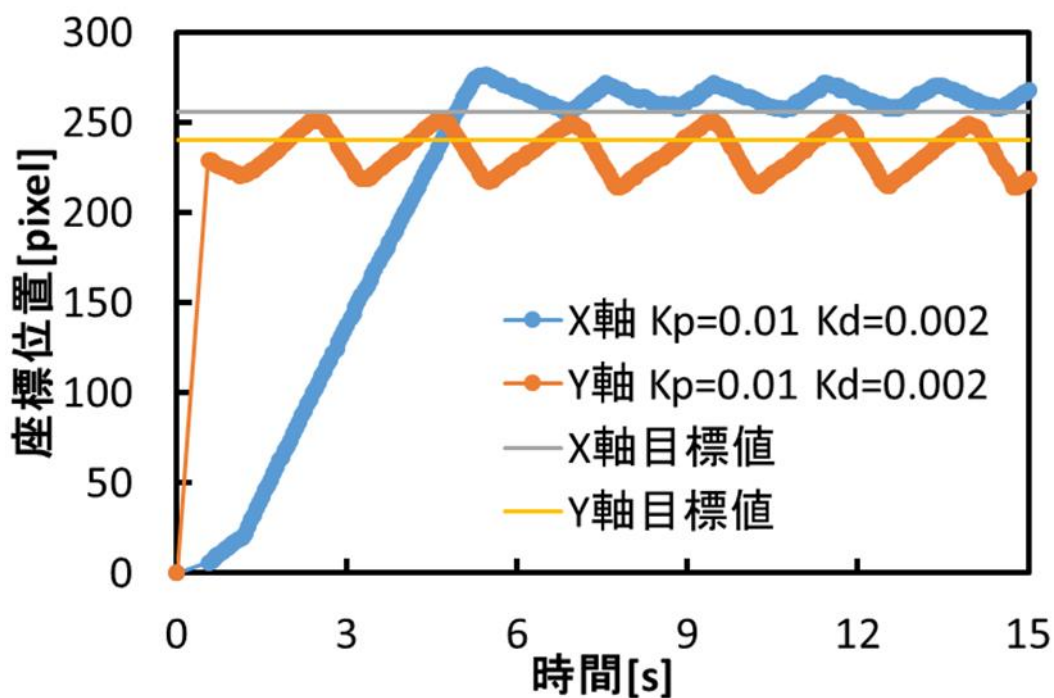


図 7.2 時間ごとの画像処理における PD 制御 $k_d=0.002$ の時の追尾
(モータ電圧 : 5[V])

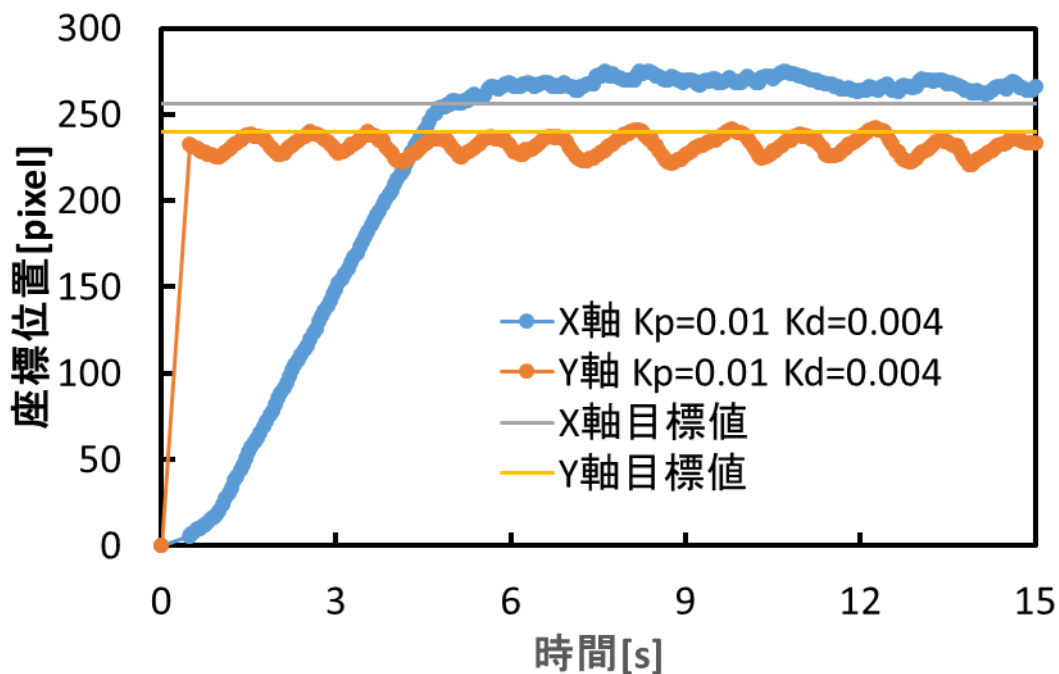


図 7.3 時間ごとの画像処理における PD 制御 $k_d=0.004$ の時の追尾
(モータ電圧 : 5[V])

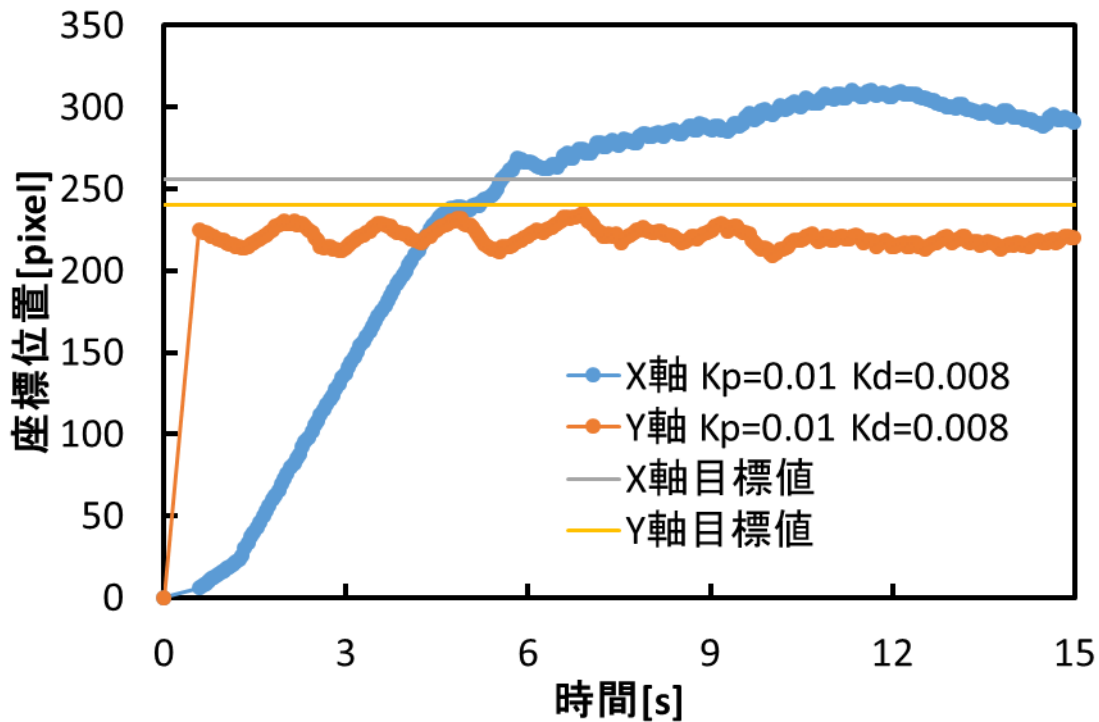


図 7.4 時間ごとの画像処理における PD 制御 $k_d=0.008$ の時の追尾
(モータ電圧 : 5[V])

7.4 実験結果

実験結果を図 7.1, 図 7.2, 図 7.3, 図 7.4 に示す。ステップ応答実験では目標位置(256,240)に収束していたが、 $k_p=0.01$ $k_d=0.001$ と $k_p=0.01$ $k_d=0.002$ の X 軸では目標位置で捉えてはいたが目標位置で収束せず、ハンチングを繰り返していた。Y 軸では目標位置には収束せず、ハンチングを繰り返していた。

$k_p=0.01$ $k_d=0.004$ では X 軸, Y 軸は $k_d=0.001$, $k_d=0.002$ よりハンチングが小さくなっていたが目標位置で捉えることができていなかった。 $k_d=0.008$ では X 軸, Y 軸ともに目標点の速度に追いつけていなかった。

7.5 PID 制御による追尾実験

7.5.1 実験目的

PD 制御による追尾実験で設定した $k_p=0.01$ $k_d=0.004$ に I 制御を入れ行う。 k_i は 0.0001 で行う性能評価実験を行った。

7.5.2 実験概要

PD 制御では目標点を追尾はできていたが、目標位置(256,240)で収束することができていなかった。 $k_d=0.001$, $k_d=0.002$ ではハンチングが起こっており、 $k_d=0.008$ では目標点の速度に追いついていなかった。 $k_d=0.004$ は目標位置にもっとも近く、ハンチングも収まっていた。目標位置に近づいていない原因には定常偏差があると考えた。定常偏差を無くす I 制御を入れて実験を行った。

7.5.3 実験方法

PD 制御での追尾実験と同じ条件で行った。

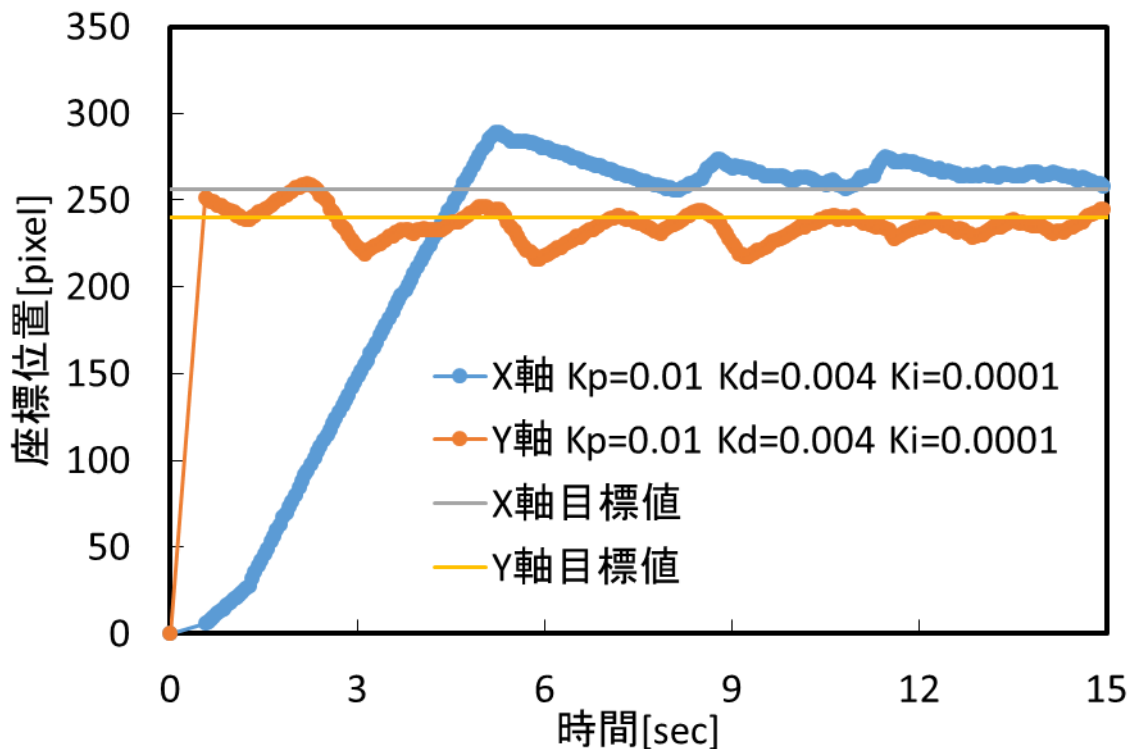


図 7.5 時間ごとの画像処理における PID 制御の時の追尾
(モータ電圧 : 5[V])

7.5.4 実験結果

実験結果を図 7.5 に示す. I 制御を入れ実験を行った.X軸は 6 秒から 12 秒まではハンチングしていたが 12 秒からハンチングが収まり目標位置近くまで収束していた. Y軸でもハンチングが起こっていたが 12 秒後からハンチングが収まっていったが収束することができていなかった.ステップ応答では目標点を目標位置に収束できていた. だが,追尾実験は目標点の速度には追いついていたが,目標位置に収束することができていなかった. 目標位置との標準偏差を下に示す.標準偏差は 12 秒の安定した時間から行った. 標準偏差の値は画像位置[pixel]を角度[deg]に変えたもので行った.

表 1 PID 制御時の目標位置との標準偏差

目標位置との標準偏差[deg]	
X軸	Y軸
0.23	0.40

第 8 章 結言

今回の研究ではステッピングモータから DC モータに代えて追尾できるかの実験を行った。ステップ応答実験では目標に収束することはなかったが、遅れ時間補正を入れることにより収束することができた。追尾実験では一次遅れ補正式を使用して PID 制御($k_p = 0.01$, $k_d = 0.004$, $k_i = 0.0001$)による追尾を行い、目標を補足追尾することができた。

課題として追尾性能が向上が挙げられる。PD 制御により定常偏差がでてしまったので取り除く為に PID を行ったが、ハンチングにより目標に収束することはできなかった。これは2つの原因が考えられる。一つ目は、DC モータによるものではなく電流制御器に問題があると考えられる。二つ目に、遅れ時間による座標位置所得の誤差である。遅れ時間は補正により改善できたが電流制御器についてはまだ改良の余地があると思われる。

参考文献

- (1) 「KEYENCE CV-3000 シリーズ ユーザーマニュアル」, 著者・発行所：株式会社キーエンス
- (2) 「TUKASA DC GEARED MOTOR マニュアル」, 著者・発行所：ツカサ電工株式会社
- (3) 「図解 LabVIEW データ収録プログラミング」, 著者：小沢哲也, 発行所：森北出版株式会社
- (4) 「工学系のための Mathematica 入門」, 著者：小田部荘司, 発行所：科学技術出版
- (5) 「学生実験用小型磁力支持装置の研究」, 著者：鳥井浩平, 松岡伸忠, 発行所：福岡工業大学工学部知能機会工学科論文
- (6) 「画像処理を用いた人工衛星の自動追尾装置の研究」, 著者：松岡幸長, 大塚成也, 発行所：福岡工業大学工学部知能機会工学科論文