Title	積分動作をもつロバスト視覚サーボに関する研究
Author(s)	中尾，好伸
Citation	
Issue Date	1998-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1150
Rights	
Description	Supervisor:藤田 政之，情報科学研究科，修士

修 士 論 文

積分動作をもつロバスト視覚サーボに関する研究

指導教官　藤田 政之 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

中尾 好伸

1998 年 2 月 13 日

目 次

1 はじめに **3**

1.1 本研究の動機と背景 3

1.2 本研究の目的 4

1.3 本論文の構成 5

2 制御対象と実験環境 **7**

2.1 実験装置の説明 7

2.1.1 システムの構成 7

2.2 マニピュレータの同定法とその結果 17

3 制御対象のモデリング **21**

3.1 視覚サーボシステムのモデリング 21

3.1.1 カメラモデル 23

3.1.2 マニピュレータキネマティクス 25

3.1.3 マニピュレータダイナミクス 25

3.2 本研究における視覚サーボ問題の設定 26

4 視覚サーボ制御則 **27**

4.1 SP-D 視覚サーボ制御則 27

4.2 画像空間において積分動作をもつ SP-D 制御則 30

5 制御実験と考察 **33**

5.1 実験方法 33

5.2 実験結果 35

5.2.1 位置ゲインを減少した場合 35
5.2.2 定常トルク外乱を加えた場合 37
5.3 考察 38
5.3.1 位置ゲインを減少した場合の実験結果の考察 38
5.3.2 定常トルク外乱を加えた場合の実験結果の考察 38

6 結論 **39**

第 1 章

はじめに

1.1 本研究の動機と背景

現在工場で用いられている産業用マニピュレータの多くは, 内界センサのみを用いてあらかじめ与えられた動作を正確に実行することができる.

しかし, このような動作により目的の作業を正確にこなすためには, 作業対象が正確に想定する位置にある事が必要となる. これを改善する方法の一つに外界センサとしてカメラによる画像情報をもちいることが挙げられる [1]. カメラによる視覚情報を用いる利点としては非接触で情報が得られ, 人間との情報共有が容易であることが挙げられるが, カメラの撮像素子が非常に小さく, その位置が正確であることから高精度の位置決めセンサとしての働きが期待できる. これまでのロボットと視覚の研究の中にリアルタイムでマニピュレータの制御と視覚処理を行なう視覚サーボと呼ばれる問題があり, この視覚サーボ問題は画像情報の取扱によって位置ベース法と特徴ベース法の二つの方法に分けられる. 位置ベース法は画像情報を一旦 3 次元の位置情報に変換し, その情報をもとにマニピュレータの制御を行なう方法で, 従来から良く用いられてきた. それに対して特徴ベース法は画像情報を直接マニピュレータの制御に使用する方法で, 3 次元情報を生成しないので位置ベース法に比べて計算誤差が少なく, 画像のノイズにも強いという特徴を有し, 現在盛んに使用されている [1].

さらにこの視覚サーボ問題は作業空間にカメラを固定する固定カメラ方式とマニピュレータの手先効果器にカメラを取り付ける $eye\text{-}in\text{-}hand$ 方式の二つに分ける事ができる. 固定カメラ方式では, 作業空間内でのカメラの正確な位置情報が必要となり, カメラの観測範囲の

制限により作業範囲が限定される. それに対して *eye-in-hand* 方式では, カメラを位置決めセンサとして効果的に使用でき, 作業範囲の制限も緩和され, カメラの位置情報のキャリブレーションも固定カメラ方式に比べて容易となる. しかし, 視覚フィードバックループ中にマニピュレータが存在するためにマニピュレータの特性を含めた視覚サーボシステムの安定性の解析が行なわれている.

近年関節空間での制御では, 比例制御部に飽和を考慮したSP-D (Saturated Proportional and Differential) 制御則が有本 [2] により提案されている. この制御則は比例制御部に飽和特性をもつため, 望ましくない高トルクの発生を抑制し, 摩擦力による影響を軽減できるという実用的な特徴が報告されている.

しかし, これだけでは定常トルク外乱がある場合の安定性を保証できないことから, 田中ら [3] によりSP-D に基づくロバストトラッキング制御則が提案されている. その中で積分動作を加えた制御則が定常トルク外乱がある場合にも安定性が示され, 定常トルク外乱の減少に効果があることが報告されている.

また視覚サーボにおいても画像空間の位置誤差に飽和特性をもつ制御則の研究が丸山ら [4] によってなされており, 関節空間での制御同様の効果が報告されている.

しかし, 丸山らの研究では定常トルク外乱が存在する場合の安定性が示されておらず, 実際の利用を考慮すると手先に重量物を積載するような場合に問題が発生する. また定常偏差の減少がハイゲイン化によって実現されているため, 外乱がある場合には出力が振動的になりやすいという問題点を内飽しており, 比較的外乱の多い画像情報を用いる視覚サーボではハイゲイン化による定常偏差の減少には限度がある.

そこで視覚サーボにおいても, 積分動作を加えたSP-D 視覚サーボ制御則はハイゲイン化を避けて定常偏差を減少し, 定常トルク外乱の影響を減少するために有効であると考えられる.

1.2 本研究の目的

本研究では対象を平面上で動作する 2 自由度マニピュレータに限定し, カメラを手先に取り付ける *eye-in-hand* 構造において, 画像情報を直接フィードバックする特徴ベース法を利用し, 制御法としてはリアプノフの安定論に基づく方法とする.

制御則としては, 従来提案されている重力補償付き SP-D 視覚制御則を用いた場合, 定常トルク外乱に対して安定性が保証できないことを示し, 積分動作をもつ重力補償付き SP-D

視覚サーボ制御則を提案する. これは関節空間で田中らにより提案されている, 積分動作をもつ SP-D 制御則 [3] の手法を視覚サーボに応用したものである. また今回提案する制御則の有効性を確認するために, 産業用マニピュレータを用いた実験を行なう.

1.3 本論文の構成

本論文の構成は次のようになっている. 第2章では, 対象とするシステムについて述べる. また, 実験の際に必要となる産業用マニピュレータやカメラなど, 対象とするシステムの構成とそれぞれの機器のパラメータ, それにマニピュレータヤコビアンを示す. また今回用いたマニピュレータのパラメータの同定法について述べる.

第3章において, 視覚サーボシステムのモデル化のために必要なマニピュレータモデルとカメラモデルの定式化を行ない, 今回扱う視覚サーボ問題の設定を行なう.

第4章では, 丸山ら [4] によって提案された視覚サーボ制御則では, 定常トルク外乱が存在する場合の安定性を保証できないことを示す. そして, 定常トルク外乱のある場合にも安定性を保証するために, 積分動作をもつ重力補償付き SP-D 視覚サーボ制御則を提案し, その安定性の証明を行なう. また, この制御則は目標までの距離やカメラに取り付けられたレンズの焦点距離のパラメータを必要としないため, これらのパラメータの変化に対してロバストな制御則となっていることを示す.

第5章では, この制御則の有効性を確認するために実機を用いた 2 つの実験を行なう. 一つは積分動作をもつ制御則は位置ゲインを小さく設定しても定常偏差を減少できることを確認するもの. もう一つは定常トルク外乱がある場合にも制御目的を達成できることを確認するものである. そして, これら二つの実験の結果を示し, その考察の中で制御則が本研究の目的を達成していることを確認した.

最後に第6章で本研究の結論を述べる. 本研究では, 従来提案されている SP-D 視覚制御則では定常トルク外乱のある場合に安定性の保証ができないことを示し, その解決法として積分動作をもつ重力補償付き SP-D 視覚サーボ制御則を提案した. また定常トルク外乱のある場合の安定性の証明を行なった. これは関節空間で田中らにより提案されている, 積分動作をもつ SP-D 制御則 [3] の手法を視覚サーボに応用したものである. 実験に必要となる産業用マニピュレータのダイナミクスモデルを実機を用いた実験により求め, 提案した制御則を実装した. そして, 制御則の有効性を調べるために, 実機を用いた実験を行なった. その結果, 位置ゲインを比較的小さく設定しても定常偏差が減少できること, また定常トルク

外乱がある場合の収束を確認した. これらの結果から, 制御則が本研究の目的を達成しており, 定常偏差の減少に大きな効果があることが確認できた.

第 2 章

制御対象と実験環境

2.1　実験装置の説明

2.1.1　システムの構成

　実験に用いるシステムは図 2.1に示すように画像処理装置, DSP システム, サーボアンプ, マニピュレータ, ホストコンピュータで構成されている.

　以下にそれぞれの装置の概要を述べる.

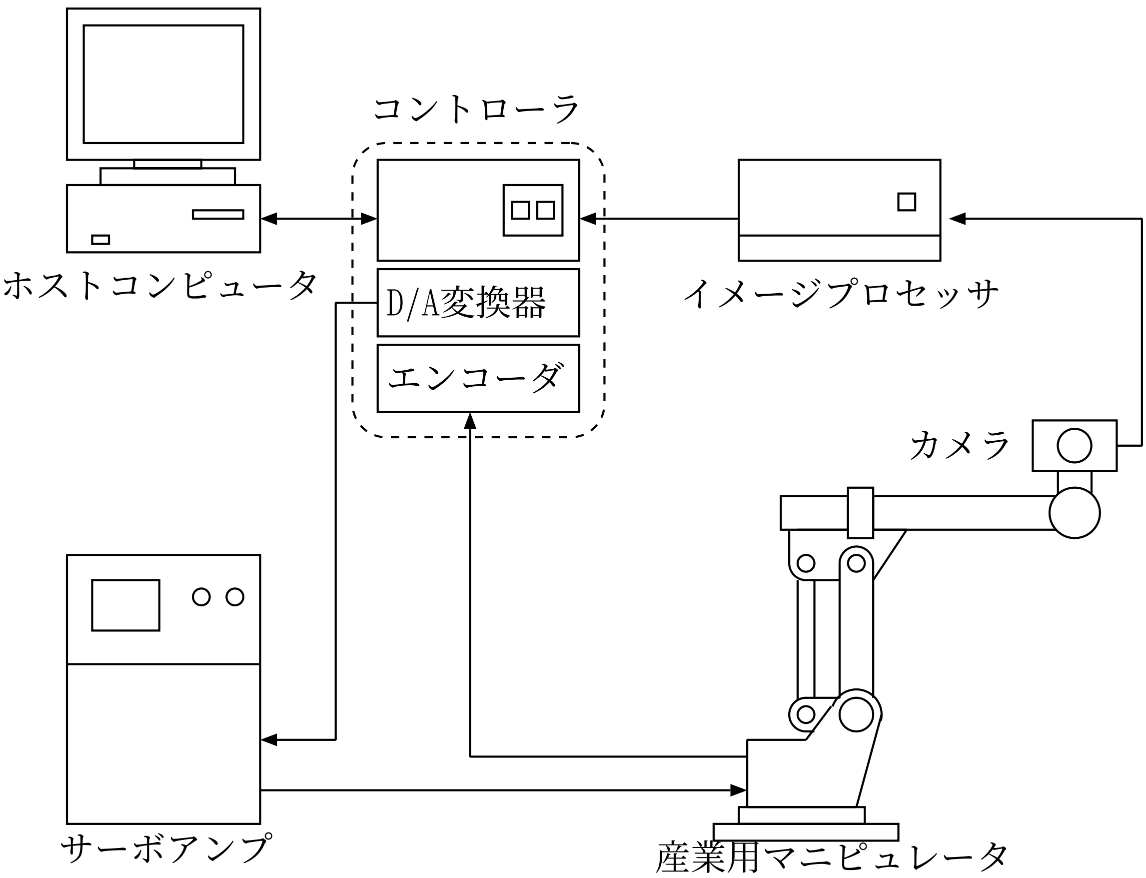
コントローラ
ホストコンピュータ
D/A変換器
エンコーダ
イメージプロセッサ
カメラ
サーボアンプ
産業用マニピュレータ

図 2.1: システムの構成

画像処理装置

画像処理装置として, リアルタイム動作解析システムを使用する. この装置は計測装置本体 (QuickMag:(株) 応用計測研究所製) と専用 CCD カメラ (CAM120:(株) 応用計測研究所製) で構成されており, カメラからの画像信号の明度差を利用して目標物をとらえ, とらえた画像の重心を目標物の位置として 1/120 秒毎にディジタル出力する装置であり, 以下のような仕様となっている [5].

表 2.1: 計測装置本体 (QuickMag) 仕様

入力信号	複合映像信号 2 系統
出力信号	RGB 2 系統
入出力インタフェイス	GP-IB, ディジタル I/O
物体抽出能力	背景と物体の映像信号レベルに 0.3V 以上差があること
全画面範囲	736×480
有効範囲	640×416
測定周期	1/120 秒
計測窓数 (測定点数)	8 点
最大窓寸法	649×416
窓形状	矩形

表 2.2: 専用カメラ (CAM120) 及びレンズ仕様

撮像素子	2/3 インチ CCD
出力信号	複合映像信号出力 (120 フィールド /秒)
画素数	649×491
レンズ焦点距離	25mm
レンズ F 値	1.4-16
レンズ合焦範囲	0.6m-∞
レンズマウント	C マウント

ディジタル制御装置

ディジタル制御装置は DSP システム (DSP-CIT:dSPACE 社製) を使用している.
この DSP システムは以下のボードで構成されている.

表 2.3: DSP システムのボード構成

名 称	ボードの仕様	型 番	個数
プロセッサボード	TMS320C40 プロセッサを 1 台搭載	DS1003	1
マルチプロセッサボード	TMS320C40 プロセッサを 4 台搭載	DS1201	2
マルチ I/O ボード	12bit D/A 変換器 8ch, 16bit ディジタル I/O	DS2201	3
エンコーダインタフェイスボード	24bit カウンタ 5ch	DS3001	4

この DSP システムではプロセッサ (TMS320C40) が計 9 台が搭載されており, 複数個の DSP によるマルチプロセッサシステムとしてディジタルコントローラを構成する.

本研究ではマニピュレータや画像処理装置との入出力を行なう DS1003 上の DSP を BIOS-DSP, 制御則の演算を行なう DS2201 上の DSP を Application-DSP とし, この 2 個の DSP をディジタルコントローラとして用いる.

このディジタルコントローラには次のような特徴がある.

- 入出力を行なう BIOS-DSP, 制御則の演算を行なう Application-DSP というように役割を分担しているのは, マルチ I/O ボード (DS2201) やエンコーダインタフェイスボード (DS3001) とデータの受渡しができるのが DS1003 ボードの DSP に限られるという制約のためである.

- BIOS-DSP も Application-DSP も 1ms の計算周期で動作する. しかし, 目標値が必ずしも 1ms で与えられると保証されているわけではなく, 実際のシステムでは画像情報の入力が 8.3ms 毎に与えられるため, 結果的にマルチサンプリングシステムとなっている.

- 制御則を実装するのに C 言語を用いる場合, SC-15 制御コマンドを利用している.

サーボアンプ

サーボアンプはディジタル制御装置から出力されるトルク信号に対応してマニピュレータのアクチュエータ (AC サーボモータ) をドライブできるように増幅を行なう装置で, 本研究では AP 制御装置:(株) 不二越製を用いる. このサーボアンプはアクチュエータダイナミクスを適切に補償するサーボループが組まれており, それぞれの関節に直接トルク信号を指令する事が可能となっている.

マニピュレータ

マニピュレータには並行リンク構造を有する回転関節型 6 自由度産業用マニピュレータ (SC-15:(株) 不二越製) を用いる. 本マニピュレータは本来, 図 2.2のような 6 軸のマニピュレータであるが, 2 番目と 3 番目の関節のみを駆動させ, 他の軸は物理的に拘束する.

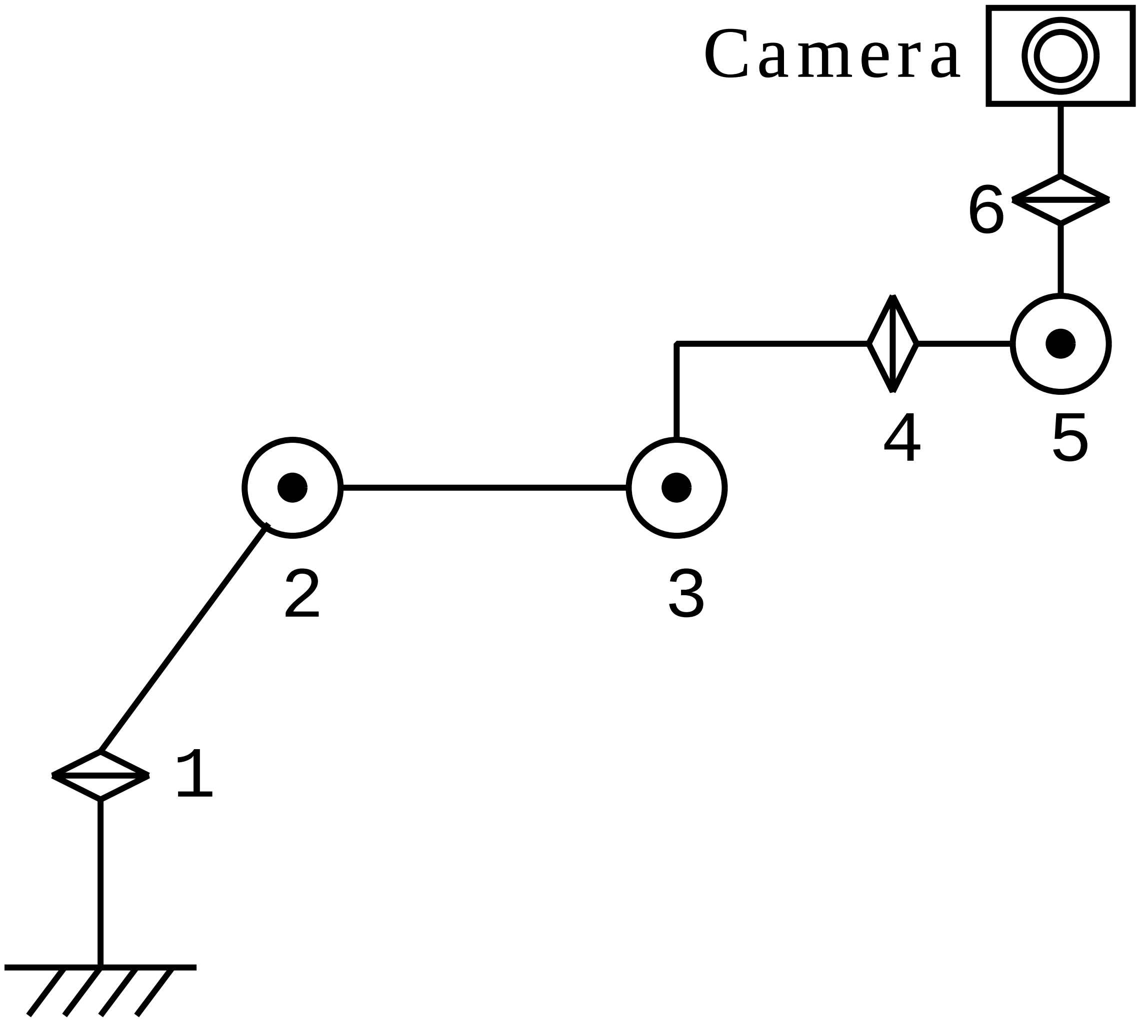

図 2.2: SC-15 本来の機構モデル

つまり図 2.3で黒く塗りつぶした関節は固定し, 台座に近い側から 1 軸, 2 軸と読み変えれば, 平面上を運動する並行 2 リンクマニピュレータとみなすことができる.

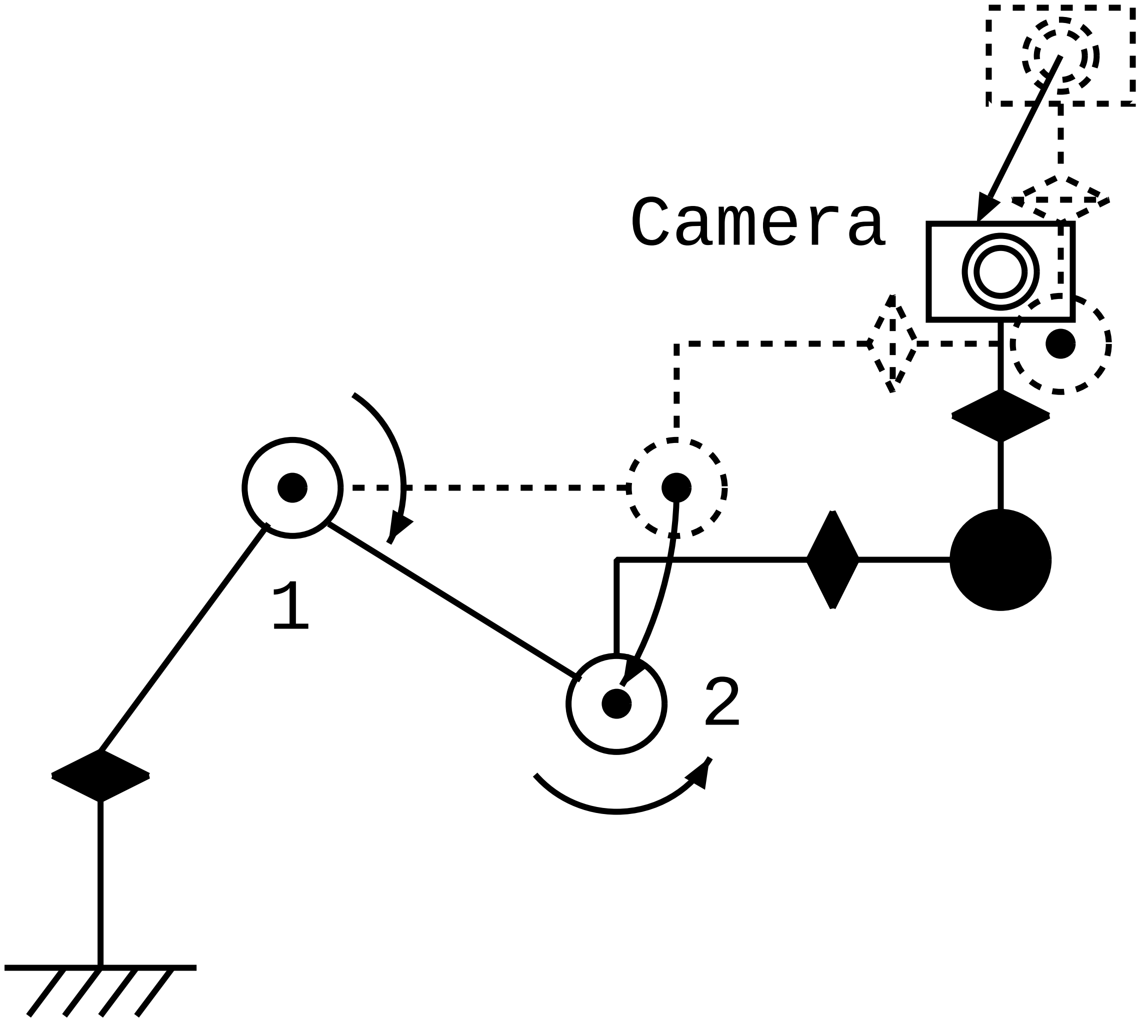

図 2.3: SC-15 を平面 2 自由度マニピュレータとした場合の機構モデル

手先の位置と各関節角度との関係を考えるために図 2.3をさらに簡素化した図 2.4を示す.

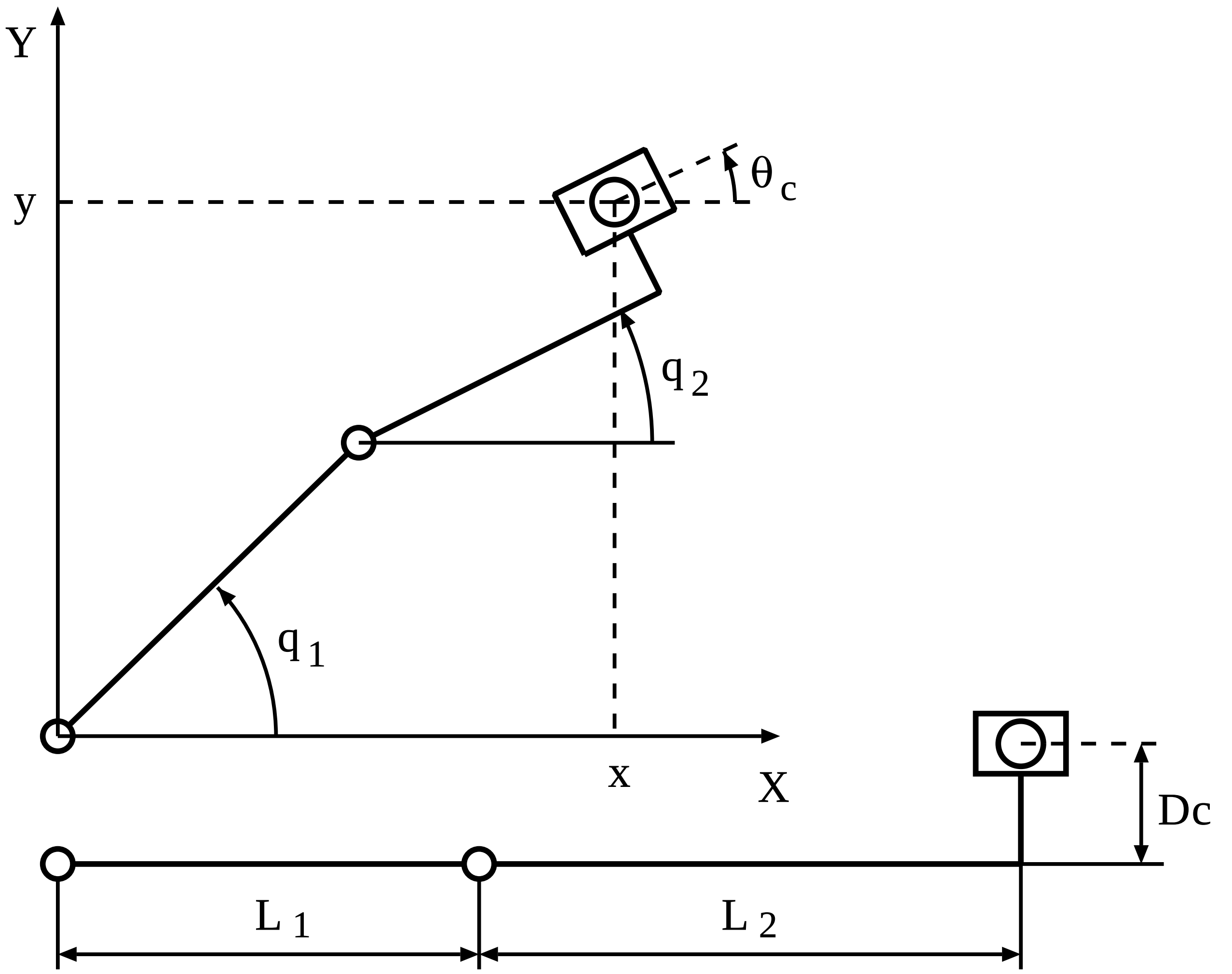

図 2.4: SC-15 の関節角度とカメラの位置関係

SC-15 は 2 軸において並行リンク機構が採用されているため, 直列リンクと違い 2 軸の水平面との角度は 1 軸の影響を受ける事なく, 常に 2 軸の角度のみで決定される.

図 2.4に基づき幾何学的に関節角度とカメラの中心位置と姿勢の関係を式に表すと,

$$\begin{aligned} x &= L_1 \cos q_1 + L_2 \cos q_2 - D_c \sin q_2 && (2.1) \\ y &= L_1 \sin q_1 + L_2 \sin q_2 + D_c \cos q_2 && (2.2) \\ \theta_c &= q_2 && (2.3) \end{aligned}$$

となる.

次に関節角速度とカメラの中心, 姿勢の変化速度を求めるために, 先ほど求めた関係式に時間微分を施して次式を得る.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -L_1 \sin(q_1)\dot{q}_1 - (L_2 \sin q_2 + D_c \cos q_2)\dot{q}_2 && (2.4) \\ \dot{y} &= L_1 \cos(q_1)\dot{q}_1 + (L_2 \cos q_2 - D_c \sin q_2)\dot{q}_2 && (2.5) \\ \dot{\theta}_c &= \dot{q}_2 && (2.6) \end{aligned}$$

これらの関係式より今回実験で用いる SC-15 のロボットヤコビアン$\boldsymbol{J}_c$は

$$\boldsymbol{J}_c = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(q_1) & -L_2 \sin q_2 - D_c \cos q_2 \\ L_1 \cos(q_1) & L_2 \cos q_2 - D_c \sin q_2 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

となる.

本研究に必要となるサーボモータやリンクの各パラメータを以下に示す [6].

表 2.4: サーボモータのパラメータ

パ ラ メ ー タ の 名 称	2 軸のパラメータ	3 軸のパラメータ
モータ軸のトルク定数 [Nm/A]	0.61	0.61
電圧-電流変換係数 [A/V]	2.21	2.21
ギ ア 比	160	160
出力軸トルク-電圧変換係数 [Nm/V]	215	215
モータ軸でのサーボモータの慣性モーメント [Kgm^2]	6.4×10^{-5}	6.4×10^{-5}
出力軸でのサーボモータの慣性モーメント [Kgm^2]	1.64	1.64
推奨入力電圧上限値 [V]	± 4.03	± 3.26
推奨入力トルク上限値 [Nm]	± 866	± 701

表 2.5: マニピュレータのリンクパラメータ

L_1[m]	L_2[m]	D_c[m]
600×10^{-3}	750×10^{-3}	398×10^{-3}

また動特性及び重力項の記述に必要なパラメータは試験運動による方法 [7] に基づいた実験により求め, その方法と結果は第 2.2 節に示す.

ホスト コンピュータ

ホストコンピュータ (PC-AT 互換機:GateWay2000 社製) はディジタル制御装置で実行される C 言語のプログラム作成, コンパイル, ダウンロードを行なう. また実験中はゲイン等のパラメータの設定, マニピュレータや画像処理装置から制御装置への入力や制御装置での演算結果の記録を行なう.

2.2 マニピュレータの同定法とその結果

重力項及び動特性の記述に必要なパラメータは試験運動による方法 [7] に基づいた実験により求めた. 試験運動による方法とは

- 静止試験
- 等角速度運動試験
- 角加速度運動試験

の 3 つを順に行なう事でマニピュレータの各パラメータを求める方法であり, 以下にその手順を述べる.

理想化されたマニピュレータダイナミクスのモデルは

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau}$$

のように表され, 今回用いる並行 2 リンクマニピュレータでは$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}), \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$ は

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) &= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12}\cos(q_2 - q_1) \\ M_{12}\cos(q_2 - q_1) & M_{22} \end{bmatrix} \\
\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) &= \begin{bmatrix} 0 & -M_{12}\sin(q_2 - q_1)\dot{q}_2 \\ -M_{12}\sin(q_2 - q_1)\dot{q}_2 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

となる [8].

しかし実際のマニピュレータでは関節に摩擦が存在するため, 実験でパラメータを同定するには粘性摩擦項$\boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}}$やクーロン摩擦項$\boldsymbol{E}(\dot{\boldsymbol{q}},\boldsymbol{q})$ を加えたマニピュレータのダイナミクスを用いる必要があり, それらを加えたマニピュレータダイナミクスは

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{D}\dot{q} + \boldsymbol{E}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = \boldsymbol{\tau} \tag{2.8}$$

のようになる. ここで,

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) &= \begin{bmatrix} g_{11}\cos q_1 + g_{12}\sin q_1 \\ g_{21}\cos q_2 + g_{22}\sin q_2 \end{bmatrix} \\
\boldsymbol{D} &= \begin{bmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & D_2 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{E}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) &= \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \\
E_i &= \begin{cases} f_{ci}\mathrm{sgn}(\dot{q}_i) & \text{if} \quad \dot{q}_i \neq 0 \\ \pm F_i & \text{if} \quad \dot{q}_i = 0 \end{cases} \quad (i=1,2)
\end{aligned}$$

静止試験 マニピュレータを適当な姿勢で静止させ, その時の角度と釣合いトルクとを測定する試験法であり, パラメータ $F_1, F_2, g_{11}, g_{12}, g_{21}, g_{22}$が同定できる.

今, 式 (2.8) で$\dot{\boldsymbol{q}}=0, \ddot{\boldsymbol{q}}=0$ とすると,

$$g_{11}\cos q_1 + g_{12}\sin q_1 \pm F_1 = \tau_1 \tag{2.9}$$

$$g_{21}\cos q_2 + g_{22}\sin q_2 \pm F_2 = \tau_2 \tag{2.10}$$

が得られるので, これより次のような同定手順が考えられる.

- 第 1 関節を静止させ, τ_2に適当なトルクを加えると, マニピュレータはある姿勢で静止する. この時 q_{2_1}で第 2 関節が静止したとすると式 (2.10) より, 釣合い方程式は

  $$g_{21}\cos q_{2_1} + g_{22}\sin q_{2_1} - F_2 = \tau_{21}$$

  となる. ここで, 第 2 関節が静止状態から始めて$+q_2(-q_2)$ 方向に徐々にトルクを加え, 動き出す時のトルクを測定し, それを$\tau_2^+(\tau_2^-)$ とすると, 式 (2.10) より

  $$\begin{aligned}
  g_{21}\cos q_{2_1} + g_{22}\sin q_{2_1} + F_2 &= \tau_2^+ \\
  g_{21}\cos q_{2_1} + g_{22}\sin q_{2_1} - F_2 &= \tau_2^-
  \end{aligned}$$

  となる. これらより

  $$F_2 = \frac{\tau_2^+ - \tau_2^-}{2}$$

  となる. 異なった姿勢での角度 q_{2_2}と釣合いトルクを測定することで

  $$\begin{aligned}
  g_{21}\cos q_{2_1} + g_{22}\sin q_{2_1} + F_2 &= \tau_{21} \\
  g_{21}\cos q_{2_2} + g_{22}\sin q_{2_2} + F_2 &= \tau_{22}
  \end{aligned}$$

  が得られ, 次式から g_{21}, g_{22}が求められる.

  $$\begin{bmatrix} g_{21} \\ g_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos q_{2_1} & \sin q_{2_1} \\ \cos q_{2_2} & \sin q_{2_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tau_{21} - F_1 \\ \tau_{22} - F_1 \end{bmatrix}$$

- 続いて同様に第 2 関節を静止させ, 第 1 関節について先ほどの第 2 関節と同様の実験を行なうことで, F_1, g_{11}, g_{12}が得られる.

等角速度運動試験 これはマニピュレータに等角速度運動を行なわせ, その時の角速度とトルクを測定する試験方法であり, パラメータ D_1, D_2, f_{c1}, f_{c2}が同定できる.

- 先ほどの静止試験において重力項が既知となっているので, 第 2 関節に対してステップ入力 $T_2 u(t)$ に重力項を加えたトルク

$$\tau_2 = T_2 u(t) - (g_{21}\cos q_2 + g_{22}\sin q_2)$$

を加えることが可能であり, 関節は粘性摩擦により等角速度運動が実現され, 次式が得られる.

$$D_2\dot{q_2} + f_{c2}\mathrm{sgn}(\dot{q_2}) = T_2$$

これより, 適当な 2 種類の T_2, すなわち T_{2a}, T_{2b}を選んでやれば, 次式から D_2, f_{c2} が求められる.

$$\begin{bmatrix} D_2 \\ f_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q_{2a}} & \mathrm{sgn}(\dot{q_{2a}}) \\ \dot{q_{2b}} & \mathrm{sgn}(\dot{q_{2b}}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T_{2a} \\ T_{2b} \end{bmatrix}$$

- 第 1 関節についても先ほど同様の方法によりパラメータ D_1, f_{c1}を求めることができるが, この時 $q_2 - q_1$が一定となる必要があり, 今回は第 2 軸にサーボをかけて $q_2 - q_1$が一定となるようにして実験を行なった.

角加速度運動試験 これはマニピュレータの各関節に角加速度運動を行なわせ, その時の角度, 角速度, トルクを測定する試験法で, パラメータ M_{11}, M_{12}, M_{22}が同定できる.

- 第 1 関節を固定し, 第 2 関節に各加速度が生じるような適当なトルクを加えると,

$$M_{22}\ddot{q_2} + D_2\dot{q_2} + E_2 + g_{21}\cos q_2 + g_{22}\sin q_2 = \tau_2 \tag{2.11}$$

となる. そこで, 上式の両辺を時間積分すると次式のようになる.

$$M_{22} = \frac{1}{\dot{q_2}(t_1) - \dot{q_2}(t_0)} \int_{t_0}^{t_1} \{\tau_2 - E_2 - D_2\dot{q_2} + g_{21}\cos q_2 + g_{22}\sin q_2\} \tag{2.12}$$

ここで式 (2.12) の右辺に現れるパラメータはこれより前の手順ですべて既知になっているので, t_0, T_1が決まれば M_{22}が計算できる. ただし t_0は実験開始時間, t_1は実験終了時間を表し, $q_2(t_0) \neq q_2(t_1)$ とする.

- さきほどの第 2 関節同様に第 2 関節を固定し, 第 1 関節に各加速度が生じるような適当なトルクを加え, 同様な計算により M_{22}が求められる.
- 最後に $q_2 - q_1$が一定となるように第 1 軸, 第 2 軸に角加速度運動を行なわせると

  $$(M_{12} + M_{22})\ddot{q}_2 + D_2\dot{q}_2 + E_2 + g_{21}\cos q_2 + g_{22}\sin q_2 = \tau_2$$

  となる. 上式の両辺を時間積分することで

  $$M_{12} + M_{22} = \frac{1}{\dot{q}_2(t_1) - \dot{q}_2(t_0)}\int_{t_0}^{t_1}\{\tau_2 - E_2 - D_2\dot{q}_2 + g_{21}\cos q_2 + g_{22}\sin q_2\} \quad (2.13)$$

  となり, 右辺のパラメータ及び M_{22}はすでに既知であるので, M_{12}を求めることができる. ただし t_0は実験開始時間, t_1は実験終了時間を表し, $q_2(t_0) \neq q_2(t_1)$ とする.

これらの方法により以下の値を得た.

表 2.6: 逐次同定法によるマニピュレータのパラメータ

M_{11}[Nm^2]	M_{12}[Nm^2]	M_{22}[Nm^2]	g_{11}[Nm]	g_{12}[Nm]	g_{21}[Nm]	g_{22}[Nm]
1.60×10^2	-1.32×10^2	1.18×10^2	2.30×10^2	-4.34	-7.68×10	-3.70×10

これより

$$\begin{aligned} M_{11} &= 160 \\ M_{11}M_{22} - (M_{12}\cos(q_2 - q_1))^2 &= 118880 - 17424\cos^2(q_2 - q_1) \end{aligned}$$

M_{11}が正の値で, 行列式の値も正の値となるので$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$ は正定対称行列であり, $\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q}) - 2\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})$ は

$$\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q}) - 2\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = \begin{bmatrix} 0 & -M_{12}\sin(q_2 - q_1)(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) \\ M_{12}\sin(q_2 - q_1)(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) & 0 \end{bmatrix}$$

で歪み対称行列となるので, M_{11}, M_{12}, M_{22}の値がマニピュレータダイナミクスの性質に合致している事が確認できる.

第 3 章

制御対象のモデリング

3.1 視覚サーボシステムのモデリング

本稿では平面マニピュレータを仮定し，マニピュレータの手先に取り付けられたカメラ (eye-in-$hand$ 構造) の運動と対象点の位置は平行な二つの平面にそれぞれ拘束されているとする．つまり基準座標系$\Sigma_w = \{X_w \ Y_w \ Z_w\}$ に対してマニピュレータの動作は座標系Σ_wの $X_w - Y_w$平面に拘束されており，カメラの視線方向は Z_w軸と一致していると仮定する．またカメラには座標系$\Sigma_c = \{X_c \ Y_c \ Z_c\}$ が取り付けられており，これをカメラ座標系とよぶ．画像面上において座標系$\Sigma_i = \{X_i \ Y_i\}$ を以下の条件を満足するように定義する．

- 画像面と光軸の交点が原点となる．
- 軸 X_iと Y_iが X_cと Y_cにそれぞれ平行になる．

そして $X_c - Y_c$平面と $X_i - Y_i$平面の間の距離，つまり焦点距離は $l > 0$ とする．以上の座標系を図 3.1に示す．

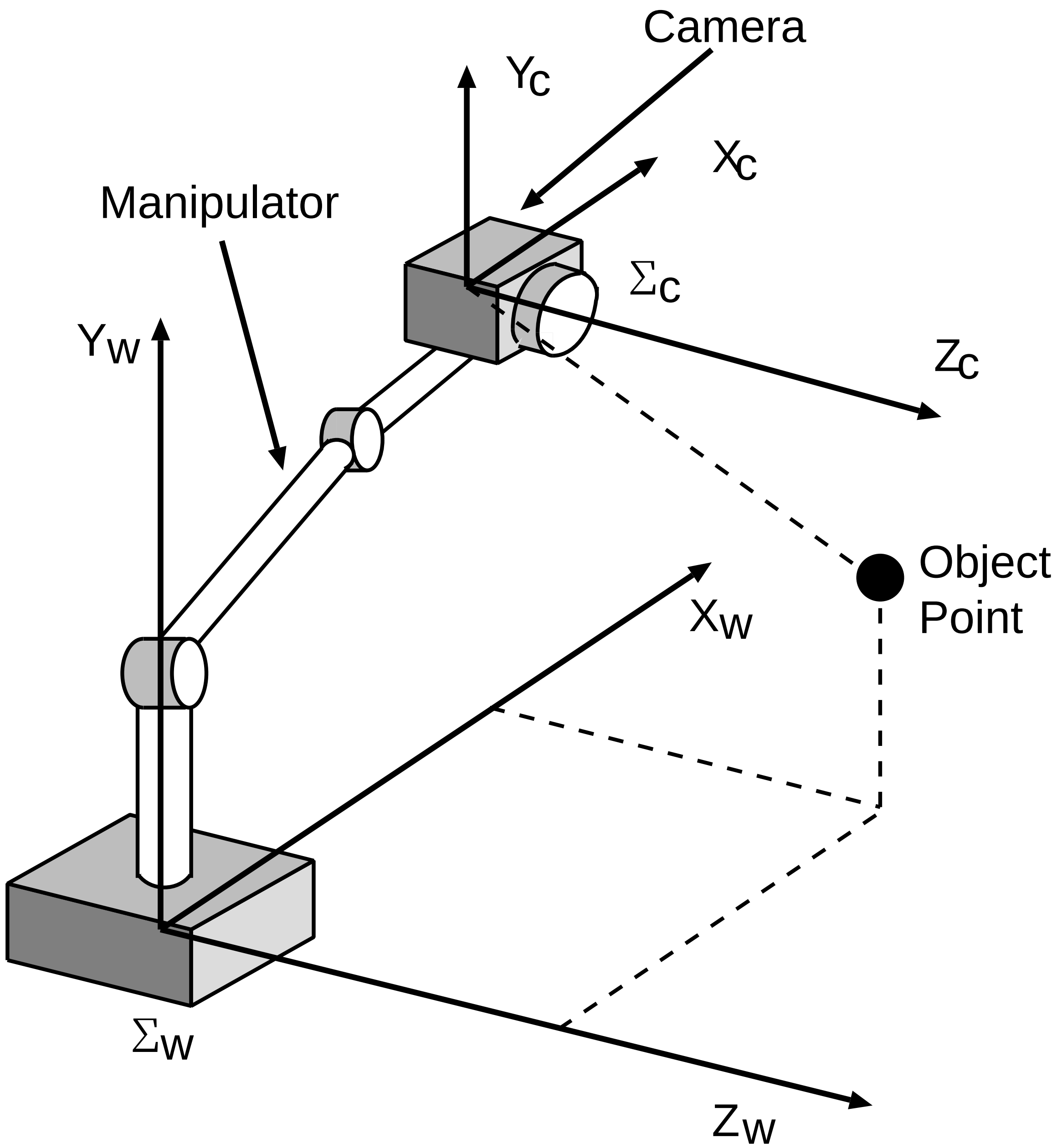

図 3.1: 視覚サーボシステム

3.1.1 カメラモデル

カメラモデルとして図 3.2で示すような理想的なピンホールカメラを考える.

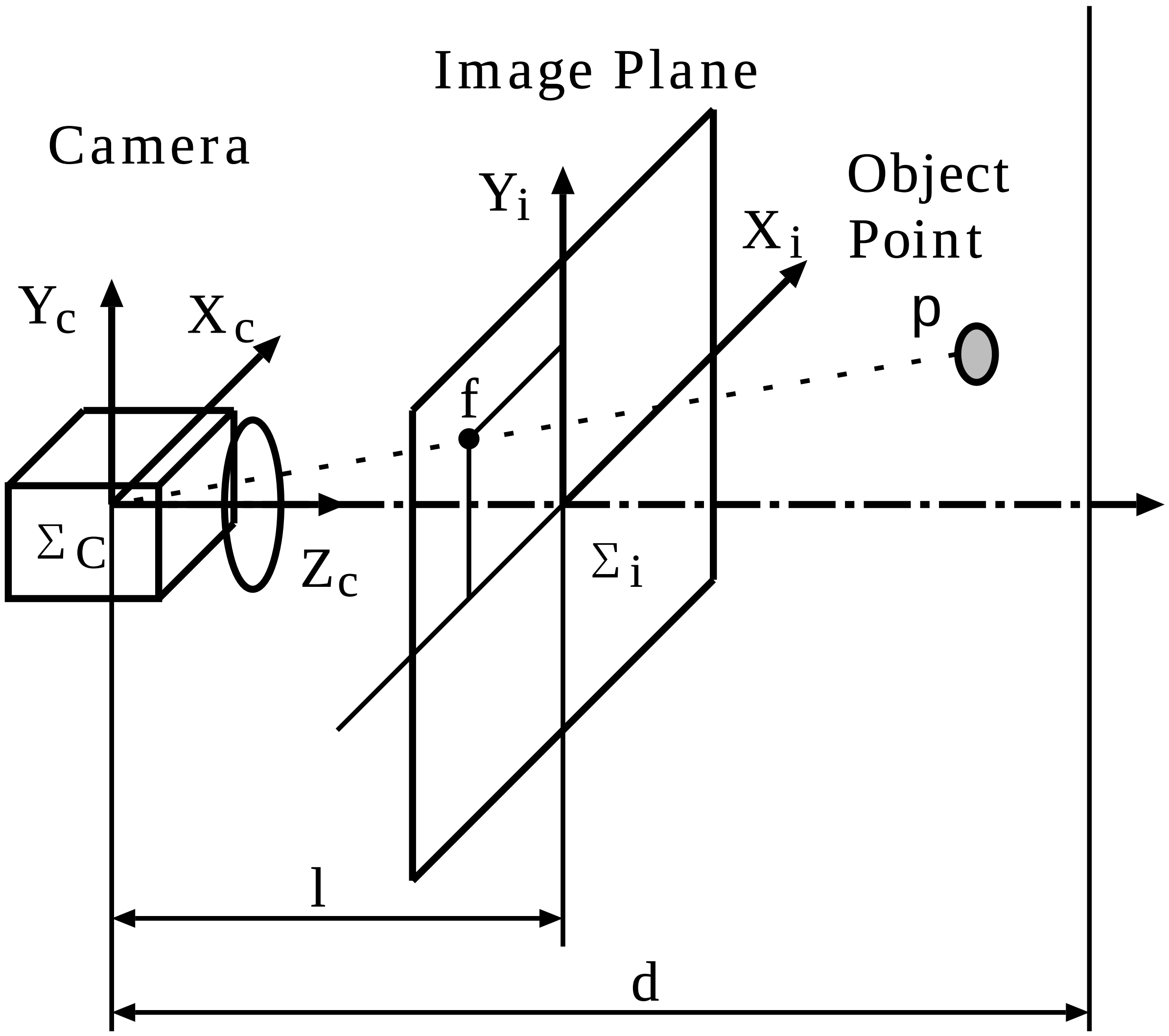

図 3.2: 透視変換

対象点 Pの位置を座標系Σ_wにおいて $\boldsymbol{p} = [x_p \ y_p \ z_p]^T$であたえると, 画像面$\Sigma_i$での位置 $\boldsymbol{f} = [x_i \ y_i]^T$との関係は図 3.1と図 3.2のモデルに基づいて透視変換を利用することで

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{c}, \theta_c) = \frac{sl}{d} e^{-\hat{\theta}_c} (\boldsymbol{p} - \boldsymbol{c}) \tag{3.1}$$

という関係式が得られる [4].

ここで $s > 0$ は画像面の計算機処理により生じるスケーリングファクタ (pixel/m), $l > 0$ は焦点距離を表す定数, $d = z_p > l$は奥行きの距離をあらわす定数とする. ベクトル $\boldsymbol{p} \in \Re^2$ は $\boldsymbol{p} := [x_p \ y_p]^T$, $\boldsymbol{c} \in \Re^2$はカメラの $X_w - Y_w$平面上の位置をあらわし, $\theta_c \in \Re$はカメラの Z_w軸回りの回転をしめす. また行列 $\hat{a}$は任意のスカラ値 $a \in \Re$に対して定義されるつぎの歪み対称行列とする.

$$\hat{a} := \begin{bmatrix} 0 & -a \\ a & 0 \end{bmatrix}$$

ここでつぎの集合を定義する.

$$\begin{aligned} SO(2) &:= \{\boldsymbol{R} | \det(\boldsymbol{R}) = +1, \\ &\qquad \boldsymbol{R}\boldsymbol{R}^T = \boldsymbol{R}^T\boldsymbol{R} = \boldsymbol{I}\} \subset \Re^{2\times 2} \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$so(2) := \{\hat{a} | a \in \Re\} \subset \Re^{2\times 2} \tag{3.3}$$

$SO(2)$ は次のような性質をもつ [9].

性質 1: $SO(2)$ は行列の積の演算に関して群をなしており, その任意の元$\boldsymbol{R} \in SO(2)$ は

$$\boldsymbol{R}\dot{\boldsymbol{R}}^T \in so(2) \tag{3.4}$$

$$\dot{\boldsymbol{R}}^T\boldsymbol{R} \in so(2) \tag{3.5}$$

を満足する. また任意の実数 $a \in \Re$に対して

$$e^{\hat{a}} \in SO(2) \tag{3.6}$$

が成立する.

次に対象点 Pは静止している, つまり$\dot{\boldsymbol{p}} = 0$ として式 (3.1) を微分すると,

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{f}} &= -\frac{sl}{d}e^{-\hat{\theta}_c}\dot{\boldsymbol{c}} + \frac{sl}{d}\frac{d}{dt}e^{-\hat{\theta}_c}(\boldsymbol{p} - \boldsymbol{c}) \\ &= -\frac{sl}{d}e^{-\hat{\theta}_c}\dot{\boldsymbol{c}} + \frac{sl}{d}\frac{d}{dt}e^{-\hat{\theta}_c}e^{\hat{\theta}_c}e^{-\hat{\theta}_c}(\boldsymbol{p} - \boldsymbol{c}) \\ &= -\frac{sl}{d}e^{-\hat{\theta}_c}\dot{\boldsymbol{c}} + \boldsymbol{S}\boldsymbol{f} \end{aligned} \tag{3.7}$$

が得られる.

ここで$\boldsymbol{S} := (\frac{d}{dt}e^{-\hat{\theta}})e^{\hat{\theta}}$ とし, 性質 1 より$\boldsymbol{S}$は歪み対称行列の集合 $so(2)$ の元である.

3.1.2 マニピュレータキネマティクス

本稿では *eye-in-hand* 構造の平面マニピュレータを仮定しているため, カメラの位置 $\boldsymbol{c}$と姿勢 θ_cはそれぞれマニピュレータの関節角度$\boldsymbol{q} \in \Re^2$の関数となる.

ここでマニピュレータの関節角速度 $\dot{\boldsymbol{q}}$とマニピュレータの手先に取り付けられたカメラの速度の関係を求めるために, $\boldsymbol{c}$と θ_Cの時間微分を計算すると,

$$\dot{\boldsymbol{c}} = \boldsymbol{J}_c(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} \tag{3.8}$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_c = \boldsymbol{J}_{\theta_c}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} \tag{3.9}$$

をえる. ここで$\boldsymbol{J}_c(\boldsymbol{q})$ は 2×2 行列, $\boldsymbol{J}_{\theta_c}(\boldsymbol{q})$ は 1×2 ベクトルであり, 一般にマニピュレータヤコビアンと呼ばれるものである. 今回実験で用いたマニピュレータヤコビアンは第 2.1.1 節で述べたものを用いる.

式 (3.7) に式 (3.8) を代入すると, 最終的にカメラモデルとして次式をえる.

$$\dot{\boldsymbol{f}} = -\frac{sl}{d}e^{-\hat{\theta}_c}\boldsymbol{J}_c(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{S}\boldsymbol{f} \tag{3.10}$$

3.1.3 マニピュレータダイナミクス

よく知られているように n 関節のマニピュレータダイナミクスは次の非線形微分方程式であらわされる.

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{d} \tag{3.11}$$

ここで $\boldsymbol{\tau} \in \Re^n$は入力トルクベクトル, $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$は $n \times n$ のマニピュレータ慣性行列, $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}$ は n 次のコリオリ・遠心力トルクベクトル, $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})$ は n 次の重力トルクベクトルである. また, $\boldsymbol{d} \in \Re^n$は摩擦力などにより生じる定常トルク外乱ベクトルとする.

マニピュレータダイナミクス (3.11) は次のような性質を持つことが知られている.

性質 2: 行列 $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$ はすべての $\boldsymbol{q} \in \Re^n$に対して正定対称行列である.

性質 3: 行列 $\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q}) - 2\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})$ はすべての $\boldsymbol{q} \in \Re^n$と $\dot{\boldsymbol{q}} \in \Re^n$に対して歪み対称行列であり, 任意のベクトル $\boldsymbol{x} \in \Re^n$に対して

$$\boldsymbol{x}^T(\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q}) - 2\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}))\boldsymbol{x} = 0$$

となる.

今回実験で用いたこれらマニピュレータに依存するパラメータは第 2.2節で得たものを用いる.

3.2 本研究における視覚サーボ問題の設定

本節では, 本稿で取り扱う視覚フィードバック制御問題を定式化する. 制御の目的は

- 視覚情報および関節角度, 関節角速度をフィードバックすることで $X_w - Y_w$ 平面における対象との相対位置$\boldsymbol{p} - \boldsymbol{c}(\boldsymbol{q}) = 0$, すなわち画像面上の点像位置 $\boldsymbol{f}$を 0 へ近づけること
- 関節角速度 $\dot{\boldsymbol{q}} = 0$ を達成すること

とする.

これらの条件に基づき, 本稿で取り扱う視覚フィードバック制御問題を次のように定式化する.

視覚フィードバック制御問題: 先にモデル化した *eye-in-hand* 構造の平面マニピュレータにおいて $t \to \infty$ としたときに,

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{c}, \theta_c) \quad \to \quad 0 \tag{3.12}$$

$$\dot{\boldsymbol{q}} \quad \to \quad 0 \tag{3.13}$$

を達成する制御入力 $\boldsymbol{\tau}$を求める.

また, 次のようないくつかの仮定を行なう.

- 目標点 Pは移動しない, つまり $\dot{\boldsymbol{p}} = 0$ である.
- $\boldsymbol{J}_c(\boldsymbol{q})$ はフルランクである.

第 4 章

視覚サーボ制御則

4.1　SP-D 視覚サーボ制御則

視覚サーボ問題において, 次式のような画像面上の位置誤差に飽和特性をもたせた制御則が丸山ら [4] により提案されている.

$$\boldsymbol{\tau} = \alpha(\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{\eta}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) - k_d\boldsymbol{\omega} + k_p\boldsymbol{\eta} \tag{4.1}$$

ここでα, k_d, k_p は正の数, ベクトル$\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\omega}$は

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta} &:= \boldsymbol{J}_c^T(\boldsymbol{q})e^{\hat{\theta}_c}\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) && (4.2) \\ \boldsymbol{\omega} &:= \dot{\boldsymbol{q}} - \alpha\boldsymbol{\eta} && (4.3) \end{aligned}$$

で定義される. また$\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f})$ は飽和をあらわす関数であり適当なスカラー値 $\gamma > 0$ を用いて

$$\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x}) := \frac{\boldsymbol{x}}{1 + \gamma||\boldsymbol{x}||} \tag{4.4}$$

と定義される. この関数には次のような性質がある [4].

性質 4:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varphi}(0) &= 0 && (4.5) \\ \lim_{||x||\to\infty} \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x}) &= \frac{1}{\gamma} && (4.6) \\ \boldsymbol{x} \neq 0 &\Rightarrow \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x}) \neq 0 && (4.7) \end{aligned}$$

$\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x})$ の上限値$\frac{1}{\gamma}$が存在するため, 制御則 (4.17) の比例制御部は飽和関数により構成されている. また次のような関数 $\boldsymbol{U}(\boldsymbol{x})$を定義する.

$$\boldsymbol{U}(\boldsymbol{x}) := \frac{1}{\gamma}(||\boldsymbol{x}|| - \frac{1}{\gamma}\log(1 + ||\boldsymbol{x}||)) \tag{4.8}$$

この関数$\boldsymbol{U}(\boldsymbol{x})$は次のような性質を持つ.

$$\boldsymbol{U}(0) = 0 \tag{4.9}$$

$$\boldsymbol{x} \neq 0 \Rightarrow \boldsymbol{U}(0) > 0 \tag{4.10}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial \boldsymbol{x}} = \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x}) \tag{4.11}$$

また (4.8) は連続な関数である [4].

これらの関数を用いて制御則 (4.1) と視覚モデル (3.1) そして理想化されたマニピュレータダイナミクス

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau} \tag{4.12}$$

の作る閉ループ系において, $\boldsymbol{J}_c(\boldsymbol{q})$ がすべての$\boldsymbol{q}$に対してフルランクであるならば, 平衡点 $\boldsymbol{f} = 0, \dot{\boldsymbol{q}} = 0$ が漸近安定であることを導出する.

式 (4.1), 式 (4.12) より閉ループ系

$$\begin{aligned} \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) &= \alpha(\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{\eta}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) - k_d\boldsymbol{\omega} + k_p\boldsymbol{\eta} \\ \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{\omega} + k_d\boldsymbol{\omega} - k_p\boldsymbol{\eta} &= 0 \end{aligned} \tag{4.13}$$

をえる.

リアプノフ関数の候補を

$$V_1 = \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\omega} + \frac{k_p d}{sl}\boldsymbol{U}(\boldsymbol{f}) \tag{4.14}$$

とすると, $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$が正定なので, (4.10), (4.11) より $V_1 \geq 0$ であり, 等号が成立するのは平衡点である $\boldsymbol{f} = 0$ かつ$\dot{\boldsymbol{q}} = 0$ のときのみである. 関数 V_1を閉ループ系 (3.10), (4.13) にそって時間微分をおこなうと

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \boldsymbol{\omega}^T\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{\omega}} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{q} + \frac{k_p d}{sl}\dot{\boldsymbol{f}}^T\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) \\ &= \boldsymbol{\omega}^T(-\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{\omega} - k_d\boldsymbol{\omega} + k_p\boldsymbol{\eta}) + \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{q} + \frac{k_p d}{sl}\dot{\boldsymbol{f}}^T\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) \\ &= \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T(\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q}) - 2\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}))\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega}^T k_d\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\omega}^T k_p\boldsymbol{\eta} + \frac{k_p d}{sl}\dot{\boldsymbol{f}}^T\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) \end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&= -\boldsymbol{\omega}^T k_d \boldsymbol{\omega} + (\dot{\boldsymbol{q}} - \alpha\boldsymbol{\eta})^T k_p \boldsymbol{\eta} + \frac{k_p d}{sl}(-\frac{sl}{d} e^{\hat{\theta}_c} \boldsymbol{J}_c(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{S}\boldsymbol{f})^T \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) \\
&= -\boldsymbol{\omega}^T k_d \boldsymbol{\omega} - \alpha\boldsymbol{\eta}^T k_p \boldsymbol{\eta} + \dot{\boldsymbol{q}} k_p \boldsymbol{\eta} - k_p \dot{\boldsymbol{q}}^T e^{\hat{\theta}_c} \boldsymbol{J}_c^T(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) + \frac{k_p d}{sl} \boldsymbol{f}^T \boldsymbol{S}^T \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) \\
&= -\boldsymbol{\omega}^T k_d \boldsymbol{\omega} - \alpha\boldsymbol{\eta}^T k_p \boldsymbol{\eta} + \frac{k_p d}{sl} \frac{1}{1+\gamma||\boldsymbol{f}||} \boldsymbol{f}^T \boldsymbol{S}^T \boldsymbol{f} \\
&= -\boldsymbol{\omega}^T k_d \boldsymbol{\omega} - \alpha\boldsymbol{\eta}^T k_p \boldsymbol{\eta}
\end{aligned}
$$

となる.

よって$\dot{V}_1$は負定関数であり, $\dot{V}_1 = 0$ となるのは $[\boldsymbol{\omega}^T\ \boldsymbol{\eta}^T]^T = 0$ の時のみである.

$$
[\boldsymbol{\omega}^T\ \boldsymbol{\eta}^T]^T = 0 \Leftrightarrow [\boldsymbol{f}^T\ \dot{\boldsymbol{q}}^T]^T = 0
$$

であるので平衡点 $[\boldsymbol{f}^T\ \dot{\boldsymbol{q}}^T]^T = 0$ の漸近安定性を示すことができる.

ここで定常トルク外乱が存在した場合を想定してみる. 定常トルク外乱が存在する場合のマニピュレータダイナミクスは (3.11) のような式で表される. ここであらためてマニピュレータダイナミクス (3.11) を示す.

$$
\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{d} \tag{3.11}
$$

ここで, 制御則 (4.1) と定常トルク外乱を含むマニピュレータダイナミクス (3.11), 視覚モデル (3.1) によって作られる閉ループ系は

$$
\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{\omega} + k_d\boldsymbol{\omega} - k_p\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{d} = 0 \tag{4.16}
$$

となる.

先ほどと同じ関数をリアプノフ関数の候補とし, を閉ループ (3.10), (4.16) にそって時間微分をおこなうと

$$
\begin{aligned}
\dot{V}_1 &= \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{\omega}} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T \dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{q} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\xi}^T k_i^{-1}\dot{\boldsymbol{\xi}} + \frac{k_p d}{sl}\dot{\boldsymbol{f}}^T \varphi(\boldsymbol{f}) \\
&= \boldsymbol{\omega}^T(-\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{\omega} - k_d\boldsymbol{\omega} + k_p\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{d}) + \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T \dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{q} + \frac{k_p d}{sl}\dot{\boldsymbol{f}}^T \varphi(\boldsymbol{f}) \\
&= \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T(\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q}) - 2\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}))\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega}^T k_d \boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\omega}^T k_p \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{d} + \frac{k_p d}{sl}\dot{\boldsymbol{f}}^T \varphi(\boldsymbol{f}) \\
&= -\boldsymbol{\omega}^T k_d \boldsymbol{\omega} + (\dot{\boldsymbol{q}} - \alpha\boldsymbol{\eta})^T k_p \boldsymbol{\eta} + \frac{k_p d}{sl}(-\frac{sl}{d} e^{\hat{\theta}_c} \boldsymbol{J}_c(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{S}\boldsymbol{f})^T \varphi(\boldsymbol{f}) + \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{d} \\
&= -\boldsymbol{\omega}^T k_d \boldsymbol{\omega} - \alpha\boldsymbol{\eta}^T k_p \boldsymbol{\eta} + \dot{\boldsymbol{q}} k_p \boldsymbol{\eta} - k_p \dot{\boldsymbol{q}}^T e^{\hat{\theta}_c} \boldsymbol{J}_c^T(\boldsymbol{q})\varphi(\boldsymbol{f}) + \frac{k_p d}{sl} \boldsymbol{f}^T \boldsymbol{S}^T \varphi(\boldsymbol{f}) + \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{d}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&= -\boldsymbol{\omega}^T k_d \boldsymbol{\omega} - \alpha \boldsymbol{\eta}^T k_p \boldsymbol{\eta} + \frac{k_p d}{sl} \frac{1}{1+\gamma||\boldsymbol{f}||} \boldsymbol{f}^T \boldsymbol{S}^T \boldsymbol{f} + \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{d} \\
&= -\boldsymbol{\omega}^T k_d \boldsymbol{\omega} - \alpha \boldsymbol{\eta}^T k_p \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{d}
\end{aligned}
$$

となる.

先ほどと異なり, $\boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{d}$という項が存在するために $\dot{V}_1$の負定性を示すことができない. そのため, 定常トルク外乱が存在する場合の安定性を保証することができないことが分かる.

4.2 画像空間において積分動作をもつ SP-D 制御則

先ほど述べたように, 丸山らの制御則 [4] では定常トルク外乱がある場合の安定性を保証することができない. この問題の一つの解決法として, 関節空間では, 田中ら [3] によりSP-D 制御則に積分動作を加えたトラッキング制御則が提案されている.

そこで, 画像空間においてもこの制御則の手法を利用し, 定常トルク外乱が存在する場合にも安定性が保証できるよう, つぎのような制御則を考える

$$
\boldsymbol{\tau} = \alpha(\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{\eta}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) - k_d \boldsymbol{\omega} + k_p \boldsymbol{\eta} - k_i \int_0^t \boldsymbol{\omega}\ dt \tag{4.17}
$$

ここでα, k_d, k_p, k_i は正の数, ベクトル$\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\eta}$は先ほど同様に

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{\omega} &:= \dot{\boldsymbol{q}} - \alpha \boldsymbol{\eta} \\
\boldsymbol{\eta} &:= \boldsymbol{J}_c^T(\boldsymbol{q}) e^{\hat{\theta}_c} \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f})
\end{aligned}
$$

で定義される. また$\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f})$ も先ほどと同じ飽和をあらわす関数である.

これらの関数を用いて制御則 (4.17) と定常トルク外乱が存在する場合のマニピュレータダイナミクス (3.11), 視覚モデル (3.1) の作る閉ループ系において, $\boldsymbol{J}_c(\boldsymbol{q})$ がすべての$\boldsymbol{q}$に対してフルランクであるならば, 平衡点 $\boldsymbol{f} = 0, \dot{\boldsymbol{q}} = 0$ が漸近安定であることを導出する.

式 (3.11), 式 (4.17) より

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) &= \alpha(\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{\eta}}+\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{\eta})+\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \\
&\quad -k_d\boldsymbol{\omega}+k_p\boldsymbol{\eta}-k_i\int_0^t \boldsymbol{\omega}\ dt+\boldsymbol{d} \\
\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{\omega}}+\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{\omega}+k_d\boldsymbol{\omega}-k_p\boldsymbol{\eta}+\boldsymbol{\xi} &= 0 \qquad (4.18)
\end{aligned}$$

ここで$\boldsymbol{\xi} := k_i\int_0^t \boldsymbol{\omega}\ dt+\boldsymbol{d}$ とする.

ここでも, すでに述べた制御目的 $[\boldsymbol{f}^T\ \dot{\boldsymbol{q}}^T]^T=0$ を達成する事は, すなわち式 (4.18) で表される閉ループ系において $[\boldsymbol{\omega}^T\ \boldsymbol{\eta}^T\ \boldsymbol{\xi}^T]^T=0$ を達成する事にほかならない.

リアプノフ関数の候補を

$$V_2=\frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\omega}+\frac{1}{2}\boldsymbol{\xi}^Tk_i^{-1}\boldsymbol{\xi}+\frac{k_pd}{sl}\boldsymbol{U}(\boldsymbol{f}) \qquad (4.19)$$

と定める.

$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$が正定なので, (4.10), (4.11) より $V_2\geq 0$ であり, 等号が成立するのは平衡点である$\boldsymbol{f}=0$ かつ$\dot{\boldsymbol{q}}=0$ のときのみである. 関数 V_2を閉ループ (3.10), (4.18) にそって時間微分をおこなうと

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= \boldsymbol{\omega}^T\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{\omega}}+\frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{q}+\frac{k_pd}{sl}\dot{\boldsymbol{f}}^T\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) \\
&= \boldsymbol{\omega}^T(-\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{\omega}-k_d\boldsymbol{\omega}+k_p\boldsymbol{\eta}-\boldsymbol{\xi})+\frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{q}+\frac{1}{2}\boldsymbol{\xi}^Tk_i^{-1}\dot{\boldsymbol{\xi}}+\frac{k_pd}{sl}\dot{\boldsymbol{f}}^T\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) \\
&= \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T(\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q})-2\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}))\boldsymbol{\omega}-\boldsymbol{\omega}^Tk_d\boldsymbol{\omega}+\boldsymbol{\omega}^Tk_p\boldsymbol{\eta}-\boldsymbol{\omega}^T\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\omega}^T\boldsymbol{\xi}+\frac{k_pd}{sl}\dot{\boldsymbol{f}}^T\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) \\
&= -\boldsymbol{\omega}^Tk_d\boldsymbol{\omega}+(\dot{\boldsymbol{q}}-\alpha\boldsymbol{\eta})^Tk_p\boldsymbol{\eta}+\frac{k_pd}{sl}(-\frac{sl}{d}e^{\hat{\theta}_c}\boldsymbol{J}_c(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{S}\boldsymbol{f})^T\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) \\
&= -\boldsymbol{\omega}^Tk_d\boldsymbol{\omega}-\alpha\boldsymbol{\eta}^Tk_p\boldsymbol{\eta}+\dot{\boldsymbol{q}}k_p\boldsymbol{\eta}-k_p\dot{\boldsymbol{q}}^Te^{\hat{\theta}_c}\boldsymbol{J}_c^T(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f})+\frac{k_pd}{sl}\boldsymbol{f}^T\boldsymbol{S}^T\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) \\
&= -\boldsymbol{\omega}^Tk_d\boldsymbol{\omega}-\alpha\boldsymbol{\eta}^Tk_p\boldsymbol{\eta}+\frac{k_pd}{sl}\frac{1}{1+\gamma||\boldsymbol{f}||}\boldsymbol{f}^T\boldsymbol{S}^T\boldsymbol{f} \\
&= -\boldsymbol{\omega}^Tk_d\boldsymbol{\omega}-\alpha\boldsymbol{\eta}^Tk_p\boldsymbol{\eta}
\end{aligned}$$

となる.

よって$\dot{V}_2$は負定関数である. ここで $\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\xi}$からなる $\dot{V}_2=0$ となるすべての集合Ωは,

$$\Omega=\{(\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\xi})|\boldsymbol{\omega}=0,\boldsymbol{\eta}=0 \text{ and } \boldsymbol{\xi}\in\Re^2\}, \qquad (4.20)$$

となる. このときの最大不変集合 Mは,

$$M=\{(\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\xi})|\boldsymbol{\omega}=0,\boldsymbol{\eta}=0 \text{ and } \boldsymbol{\xi}=0\}, \qquad (4.21)$$

となり, LaSalle の定理により平衡点 $[\boldsymbol{\omega}^T\ \boldsymbol{\eta}^T\ \boldsymbol{\xi}^T]^T = 0$ の漸近安定性がいえる.

ここで, $\boldsymbol{J}_c(\boldsymbol{q})$ がフルランクであるので$\boldsymbol{\eta} = 0$ であることは$\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{f}) = 0$ となる事の必要十分条件であるため, 性質 4 より$\boldsymbol{f} = 0$ となる. これより $[\boldsymbol{\omega}^T\ \boldsymbol{\eta}^T\ \boldsymbol{\xi}^T]^T = 0$ であることは $[\dot{\boldsymbol{q}}^T\ \boldsymbol{f}^T\ \boldsymbol{\xi}^T]^T = 0$ の必要十分条件である事がいえ, 定常トルク外乱が存在しても, 制御の目的である $t \to \infty$ において $[\boldsymbol{f}^T\ \dot{\boldsymbol{q}}^T\ \boldsymbol{\xi}^T]^T = 0$ が達成される事が証明された.

第 5 章

制御実験と考察

5.1 実験方法

飽和を用いた制御則の有用性を確認するため, 積分動作を持たない制御則に較べて位置ゲインを減少した実験, 定常トルク外乱を加えた実験の二種類を行なった.

どちらの実験も, 図 5.1のようにターゲットボードの中心, 目標点 5 が画面中心に位置し, マニピュレータの関節が $q_1 = \frac{\pi}{2}$[rad], $q_2 = 0$[rad] の状態から実験を開始する.

それぞれの実験の目的及びその方法を以下に述べる.

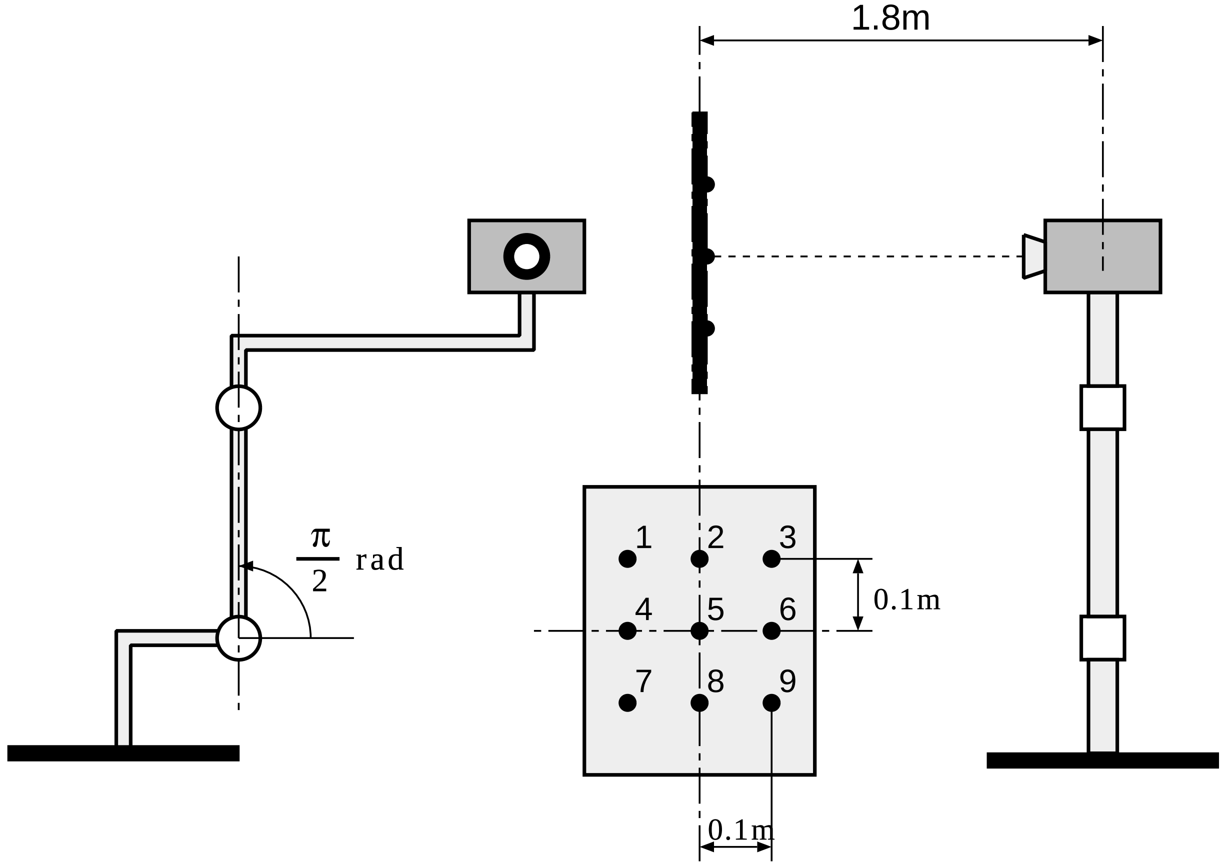

図 5.1: マニピュレータの初期位置

位置ゲインを減少した場合 積分動作をもつ制御則の場合, 積分動作をもたない制御則に較べて位置ゲインを減少しても定常偏差を減少できる事を確認するために, 積分動作をもつ制御則の位置ゲインを減少して実験を行なう. 実験は目標点 2 を目標位置としてサーボをかけ, その収束状況を調べた.

定常トルク外乱を加えた場合 積分動作をもつ制御則では定常トルク外乱が加わった場合にも収束する事を確認するため, 積分動作をもつ制御則と, そうでない制御則の両方に定常トルク外乱を加えた実験を行なう. 実験は目標点 5 をサーボの目標とし, 実験を開始して 0.5[s] 後にソフトウエア的に定常トルク外乱として適度な値をモータトルクの指令値に加え, ある値の定常トルク外乱が加わったものと仮定し, その収束状況を調べた.

5.2 実験結果

5.2.1 位置ゲインを減少した場合

グラフ 5.2では, 積分動作をもつ制御則を実線で示し, 位置ゲイン $K_p = 2.00$, 積分ゲイン $K_i = 20.0$, 積分動作を持たない制御則を破線で示し, 位置ゲイン $K_p = 3.00$ とする. また共通のパラメータとして速度ゲイン $K_v = 70.0$, $\alpha = 0.02$, $\gamma = 0.03$ として実験を行なった.

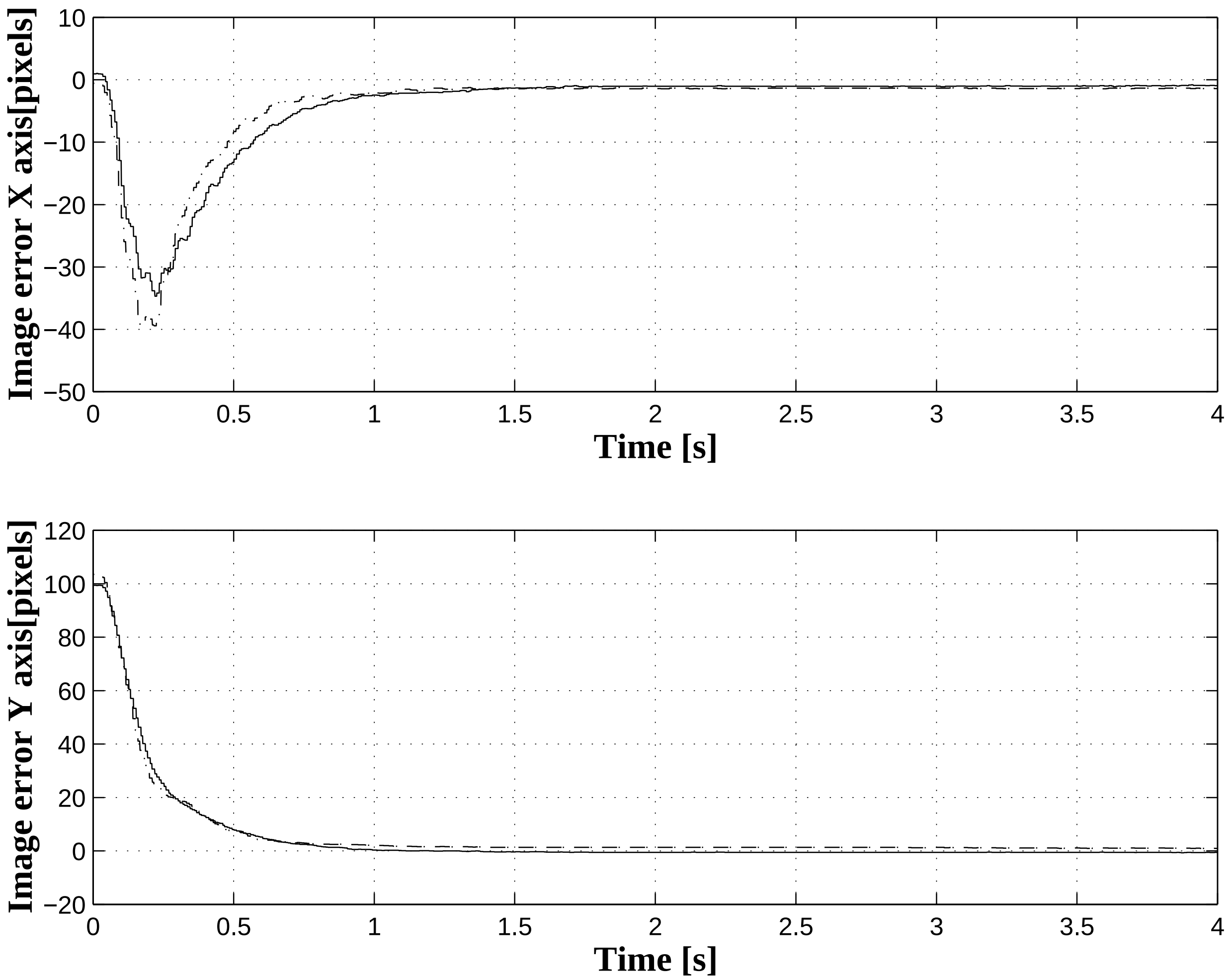

図 5.2: 位置ゲインを減少した場合の定常偏差

5.2.2 定常トルク外乱を加えた場合

グラフ 5.3は定常トルク外乱として 2 軸のモータトルク指令値に上向きに 490[Nm] 相当の値を実験を開始して 0.5[s] 後に加えたものである．グラフ中では積分動作をもつ制御則を実線で示し，積分動作を持たない制御則を破線で示す．どちらの実験もパラメータを同じにするため，積分動作をもつ制御則で積分ゲイン $K_i = 100.0$ とした以外は位置ゲイン $K_p = 3.00$, 速度ゲイン $K_v = 70.0$, $\alpha = 0.02$, $\gamma = 0.03$ とし，どちらも同じ値を用いて実験を行なった．

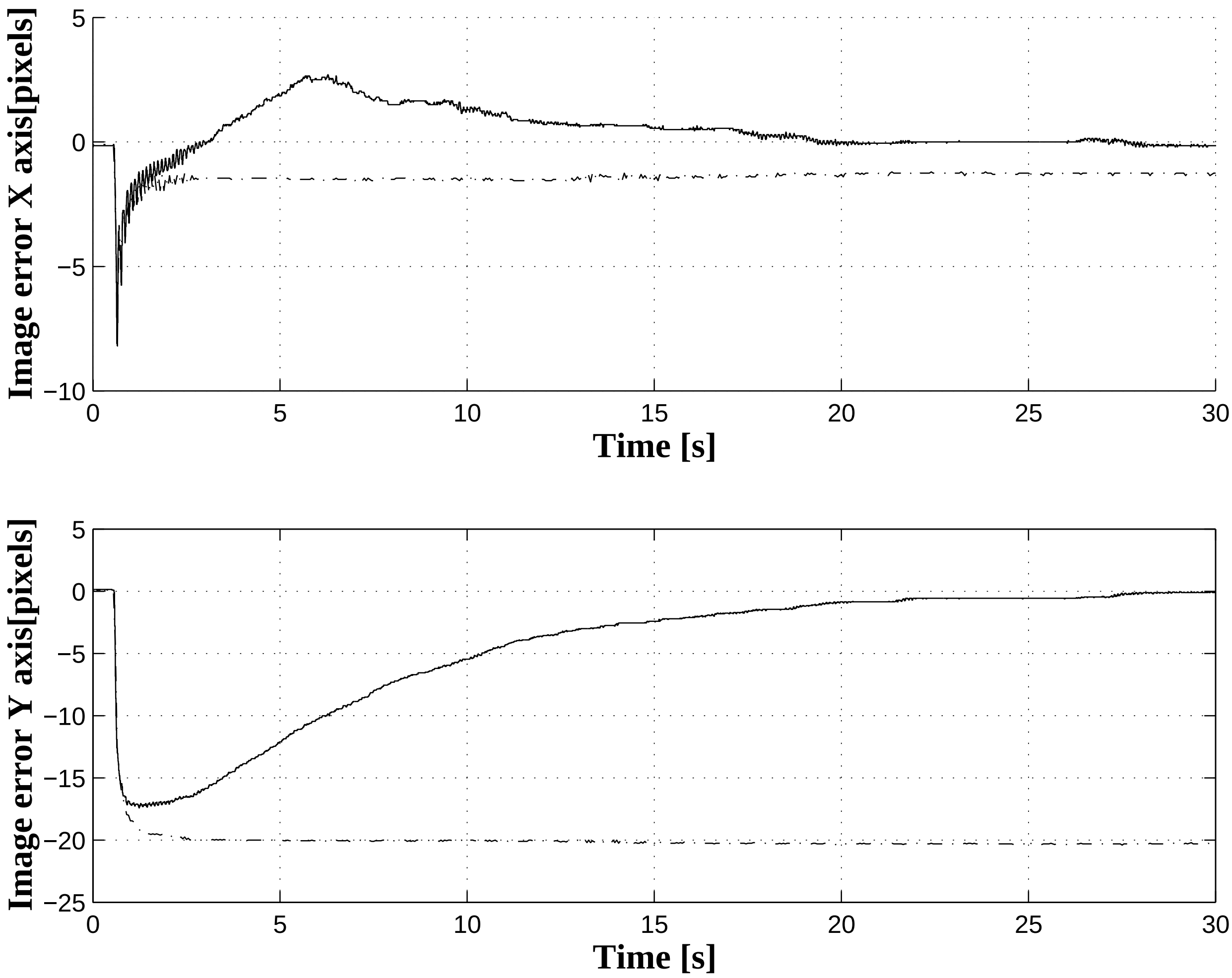

図 5.3: 定常トルク外乱を加えた場合の定常偏差

5.3 考察

5.3.1 位置ゲインを減少した場合の実験結果の考察

図 5.2のグラフを見ると, 積分動作をもつ制御則もそうでない制御則も定常偏差がほぼ 0 になっている事がわかり, 位置ゲインの減少に効果がある事が確認できる. 画像面上の y軸の収束はほぼ同様であるが, 積分動作をもつ制御則では定常偏差がほぼ 0 になっている事が分かる. それに較べて x 軸の方は定常偏差が若干残っている. これは初期位置や途中での偏差が y軸に較べて小さいため, 偏差がほぼ 0 に近付いた状態では有効なトルクを発していないためと考えられ, 積分動作をもっと有効に活用するためにはもっと積分ゲインを高める必要があると考えられる. また, y軸の収束の速度は積分動作をもたない制御則の方が若干速いが, これは位置ゲインが大きいためであると考えられる.

5.3.2 定常トルク外乱を加えた場合の実験結果の考察

定常トルク外乱が加わると, どちらの制御則も大きく誤差が増えている事が分かる. しかし積分動作をもたない制御則の場合は 1[s] ほど経過すると誤差が減少しなくなり, 定常偏差が残っている事がわかる. しかし, 積分動作をもつ制御則の場合は時間の経過とともに誤差が減少し, 実験開始後 28[s] くらいで偏差がほぼ 0 となっており, 目的通り定常トルク外乱がある場合も収束する事が確かめられた. しかし収束に長い時間がかかっており, 積分項の利点をもっと有効に活用するには, 積分ゲインの増加やαの値を増加する必要がある事が分かる.

しかし初期位置での誤差が大きい場合はトルクの上限値を上回る可能性があるため, 積分ゲインはあまり大きな値をとる事ができない. またαの値もダイナミクス補償項にかかるパラメータであり, ダイナミクスの正確なパラメータを得る事は難しく, 不確かさを考えるとあまり大きな値をとる事は難しいため, やはり大きな値をとる事は困難であり, 積分項をより活用するためには制御則の改善が必要であると考えられる.

第 6 章

結論

本研究では, 以下の事を行なった.

- 積分動作をもつ SP-D 制御則の提案と安定性の証明
  視覚サーボシステムにおいて画像面上の位置誤差について飽和特性をもち, 積分動作をともなう視覚フィードバック制御則の提案を行ない, その安定性の証明を行なった.

- マニピュレータのダイナミクスモデルを求めた
  今回提案した制御則の実装に必要となる SC-15 産業用マニピュレータのダイナミクスモデルを実機を用いた実験により求めた.

- 実機を用いた実験
  提案した制御則を実装して実験を行ない, その結果
  - 位置ゲインを減少しても定常偏差が減少できる
  - 定常偏差の減少に効果がある
  - 定常トルク外乱がある場合も収束する

  という事が確認され, 制御則の目的が達成されている事が確認できた.

参考文献

[1] S. Hutchinson, G. Hager and P. Corke, "A Tutorial on Visual Servo Control," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5, pp. 651-670, 1996.

[2] S. Arimoto, *Control Theory of Non-Linear Mechanical Systems : A Passivity-Based and Circuit-Theoretic Approach,* Oxford University Press, 1996.

[3] A. Maruyama and M. Fujita, "Robust Tracking SP-D Control with Integral Action for Robot Manipulators," *2nd Asian Control Conference Proceedings*, Vol. 2, pp. 539-542, 1997.

[4] 丸山章, 藤田政之, "ロバスト視覚サーボシステムの L_2ゲインによる制御性能解析," 電気学会論文集 C. 118 巻 3 号, 平成 10 年

[5] (株) 応用計測研究所, "Quick Mag (G2820) ユーザーズマニュアル," 1994.

[6] (株) 不二越, "トルク制御ロボットシステム用 AP 制御装置 補足説明書," 1995.

[7] 美多 勉, 大須賀 公一, "ロボット制御工学入門", コロナ社, pp. 85-91, 1989.

[8] 加賀谷 博昭, "H_∞制御理論によるロボットマニピュレータのロバスト制御", 金沢大学大学院, 平成 4 年.

[9] 藤田政之, 丸山章, "Eye-in-Hand システムにおける視覚フィードバックについて," 第 26 回制御理論シンポジウム資料, pp. 423-426, 1997.

謝辞

本研究を進めるにあたり, 主指導教官として暖かい御指導と御支援を賜わりました示村悦二郎教授をはじめ, 主テーマ指導教官として懇切丁寧に御指導して頂いた藤田政之助教授, 本講座の助手である増淵泉助手,Julian Christoph Ament 助手に心から感謝致します.

そして, 本講座におきまして研究のみならず日常生活においても御指導, 御助言頂きました博士後期過程の川端昭弘氏, 望山洋氏, 鈴木亮一氏,Hussein Mohammad Jaddu 氏, 平田研二氏, 田中奈津夫氏, 丸山章氏に心からお礼申し上げます. また, 講座の同窓生として研究だけでなく日常生活においても共に過ごし, 共に励まし学んできた博士前期過程の伊藤知規氏, 大滝直人氏, 久米彩登氏, 小柳隆氏, 斉藤亜紀女史, 勝谷泰荘氏, 田中直人氏, 内藤浩行氏, 畑彰賢氏, 花房聡人氏, 藤原雅之氏, 吉田昌弘氏, そして同 1 年生の皆様に感謝を捧げ, 今後の活躍をお祈り致します.

最後に, 影になり日向になり私を支えて下さった母に, そして力強い励ましで支え育ててくださり, 結果を見る事なく他界した父に感謝を捧げ謝辞と致します.