修 士 論 文

マニピュレータの動特性を考慮した視覚サーボに関する研究

指導教官　藤田 政之

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専攻

置田 宏幸

1997 年 2 月 14 日

目 次

要 旨

本研究では、産業用マニピュレータをもちい、動特性を考慮した視覚サーボシステムを構築した。また、転置ヤコビアンを用いた重力補償つき PD 制御則を実装し、この制御則の有用性を検証した。

ロボットと視覚の研究の中に、動特性を考慮した視覚フィードバック制御が考えられているが、実際のマニピュレータをもちいて検証した例は少なく、実用するには検証が不十分であると思われる。

そこで本研究では、カメラの設置方法としてアイ·イン·ハンド方式を採用し、特徴ベース法、ダイレクトビジュアルサーボ構造、リアプノフベース法をもちいた視覚サーボシステムの構築をおこなう。また、構成した視覚サーボシステムをもちいて転置ヤコビアンをもちいて重力補償つき PD 制御則の有効性を検証する。

視覚サーボ問題の解として転置ヤコビアンをもちいた重力補償つき PD 制御視覚サーボシステムに実装し、実験をおこなうことによりその制御則の有効性を検証した。実験は、カメラ前方に設置した目標物に対して位置合わせを行なう。実験の結果、エラーは 0 に向かって収束した。これにより、制御則の漸近安定性が実験的に示された。

結論として本研究において、提案されている転置ヤコビアンをもちいた重力補償付 PD 制御則を実装し、有効性を検証した。その結果、視覚サーボシステムの漸近安定性が証明された。これにより、転置ヤコビアンをもちいた重力補償付 PD 制御則は視覚サーボ問題の実装可能な解としての有効性が証明された。

第 1 章

はじめに

1.1　本研究の動機と背景

現在工場にあるロボットの多くは内界センサのみをもちいており、あらかじめ与えられた動作については正確に実行することが可能であるが、変化する状況に対応し的確な動作を行なうことは困難である。これを改善する方法の 1 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もちいる利点としては非接触で情報が得られる、人間との情報の共有が可能であることがあげられる。ロボットと視覚の研究の中に、リアルタイムでのマニピュレータ制御と視覚処理をおこなう視覚サーボ問題があり、近年盛んに研究されている。視覚サーボシステムはループ内にマニピュレータを含むため、その動特性を無視できない。動特性を考慮した視覚フィードバック制御が考えられているが、実際のマニピュレータをもちいて検証した例は少なく、実用するには検証が不十分であると思われる。したがって、実際にマニピュレータをもちいた検証をおこなう意義は大きく、そのためには視覚サーボシステムを構築する必要がある。視覚サーボにおける画像情報の取り扱い方としては

- 位置ベース法
- 特徴ベース法

の 2 つの方法に分けられる。位置ベース法は画像情報をいったん 3 次元の位置情報に変換し、変換された情報を基にしてマニピュレータの制御をおこなう方法で、従来から良くもちいられてきた。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

使用する方法である。特徴ベース法は三次元情報を生成しないので、位置ベース法に比べて、計算誤差が少ないなどの特徴を有し、現在盛んに使用されている [1]。

1.2 従来研究

マニピュレータの制御構造の点から見た場合、Corke らはダイナミック·ルックアンドムーブシステムをもちいて視覚サーボ系を構成している [2]。これに対して橋本、Kellyらの研究では、ダイレクトビジュアルサーボをもちいて視覚サーボ系を構成している [3][4]。ダイレクト·ビジュアルサーボは直接関節にトルク指令を与えることが可能であるため、マニピュレータの動特性を直接補償できる利点がある。次に、動特性の補償方法の点から見た場合、橋本らは逆動力学法をもちいて動特性を補償しており、それに対して Kellyらはリアプノフベース法をもちいている [3][4]。リアプノフベース法は、マニピュレータの性質をうまく利用し、逆動力学法ほど厳密な動特性成分の導出を必要としない利点を持つ。しかし、Kellyらの研究ではカメラの設置方法として固定カメラ方式をもちいているため、以下の点について問題がある [4]。固定カメラ方式は作業空間にカメラを設置し、マニピュレータと対象物体を観測するため、マニピュレータ、対象双方に対するカメラレンズの焦点距離、ピクセル長のキャリブレーションが必要となる。また、カメラが絶対座標に固定されているため、カメラの観測可能範囲でしかマニピュレータの作業がおこなえない制限が生ずる。これに対する方式としてアイ·イン·ハンド方式がある。これは、マニピュレータの手先効果器部分にカメラを搭載する方法となっており、マニピュレータとカメラが組となっているため、カメラの観測可能範囲によるマニピュレータの作業範囲の限定は緩和される。カメラのキャリブレーションについてはカメラと対象物に関するもののみとなり、固定カメラ方式と比べ容易となる。

1.3 本研究の目的と構成

本研究では、カメラの設置方法としてアイ·イン·ハンド方式をもちい、画像情報の取り扱い方法として計算誤差を抑えるために特徴ベース法をもちいる。そして、動特性を直接補償可能なシステムとするためにダイレクトビジュアルサーボ及びリアプノフベース法をもちいた視覚サーボシステムを構築する。また、$\boldsymbol{J}^T$を用いた重力補償つき PD 制御則を視覚サーボシステムに実装し、有効性を検証する。

本論文の構成を述べる第 2 章では、視覚サーボシステムの機器の構成を述べる。そして、マニピュレータ、カメラのそれぞれについてのモデルを求め、視覚サーボシステムの定式化を第 3 章にておこなう。第 4 章では視覚サーボ問題を定義し、提案されている制御則の安定性の証明をおこない、実装、実験を第 5 章にておこなう。そして結論を第 6 章で述べる。

第 2 章

システム構成

2.1　系の構成

ハンドアイシステムのハード構成を図 2.1に示す。マニピュレータ、DSP システム、サーボアンプ、カメラ、イメージプロセッサ、ホストコンピュータで構成されている。

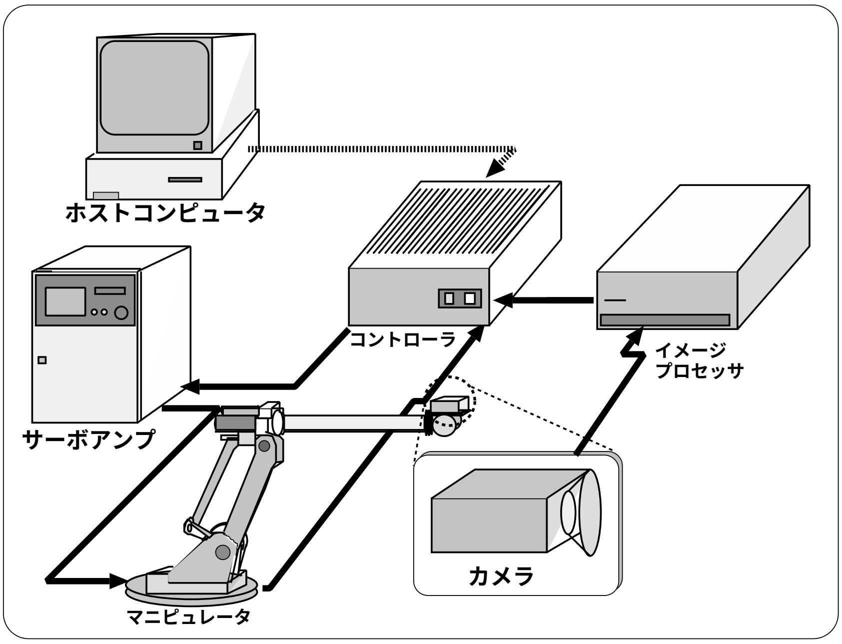

図 2. 1: システムの構成

2.1.1 DSP システム

DSP システムは、dSPACE 製を使用しており、以下のボードで構成される。

表 1:DSP システムのボード構成

名 称	型 番	枚 数
プロセッサボード	DS1003	1
マルチプロセッサボード	DS1201	2
マルチ I/O ボード	DS2201	3
エンコーダインタフェースボード	DS3001	4

このDSPシステムはプロセッサが9台 (DS1003に1台、DS1201に4台づつ) 存在し、複数個のDSPでシステムのディジタルコントローラを構成する。

本研究ではDS1003上のDSPを「BIOS-DSP」とし、DS1201上のDSPを「Application-DSP」として区別する。

このDSPシステムには次のような特徴がある。

- Application-DSPとエンコーダインタフェースボード (DS1003) あるいはマルチ I/O ボード DS2201 は直接データの受渡しができない。
  したがって、BIOS-DSP にデータを渡す時は Application-DSP を経由させる必要がある。
  このため、BIOS-DSP、Application-DSPと2段構造をとる。

- 本研究ではマニピュレータを直接制御するBIOS-DSP、制御式の計算を行なうApplication-DSP共に1000Hz で動作する。しかし、目標値が必ずしも1000Hz で与えられると保証されているわけではない。(実際のシステムでは画像情報の入力が120Hz であり、結果的にマルチサンプリングシステムとなっている。)
- C 言語でプログラムを開発する時、SG15 制御用のコマンドを使用している。

2.1.2 サーボアンプ

サーボアンプは、DSPから出力されるトルク信号に対し、マニピュレータのアクチュエータ (AC サーボモータ) をドライブ出来るように増幅を行なう装置である。サーボア

ンプは既存の制御装置 (「AP 制御装置」:不ニ越製) に組み込まれているものを使用する。
このサーボアンプの起動を行なうためには、制御盤に対する操作と、外部からの信号によるシーケンスを必要とする。[8], [9]。

1. **「トルク制御」の切り換え**
   AP 制御装置の操作パネルにあるトルク制御切り換えスイッチを「通常」から「トルク制御」に切り換える。「通常」の場合、DSP システムからの起動ができない。次に、AP 制御装置の操作パネルにあるモード切り換えスイッチを「再生」モードにする。
2. **「運転準備」の制御**
   「運転準備」とはトルク指令電圧を加えるとマニピュレータが動く状態 (インバータ回路に電源が供給されている状態) である。
   安全の為、次のことは最低限守らなければならない。

   - 運転準備「入」の状態でマニピュレータの動作範囲内に入らない。
   - トルク制御の切り換えは必ず運転準備「切」の状態で行う。(制御がかけられていない場合、重力によりアームが落下する。)
   - 運転準備を「入」にする時は、非常停止ボタンに手をかけておく。

3. **「運転準備入切操作」**

運転準備の入切操作は次の手順で行う。

(a) AP 制御装置の外部操作を有効にする。(AP 制御装置のパネル上に「EX-ST」の表示が現れる。)

(b) DSP システムから DIO 信号を一定のシーケンスに従って出力する。マニピュレータは正論理の立上りエッジで起動する (図 2.2参照)。ジョイスティックは負論理となっている。

表 2:起動シーケンス

DS2201#1の I/O割付	信号名
アーム#1 の運転準備「入」	IOP0
アーム#1 の運転準備「切」	IOP1
アーム#2 の運転準備「入」	IOP3
アーム#2 の運転準備「切」	IOP4
DS2201#2 の I/O 割付	信号名
ハンド #1 の開閉	IOP0
ハンド #2 の開閉	IOP1
ハンドおよびジョイスティックの運転準備「入」	IOP2
ハンドおよびジョイスティックの運転準備「切」	IOP3

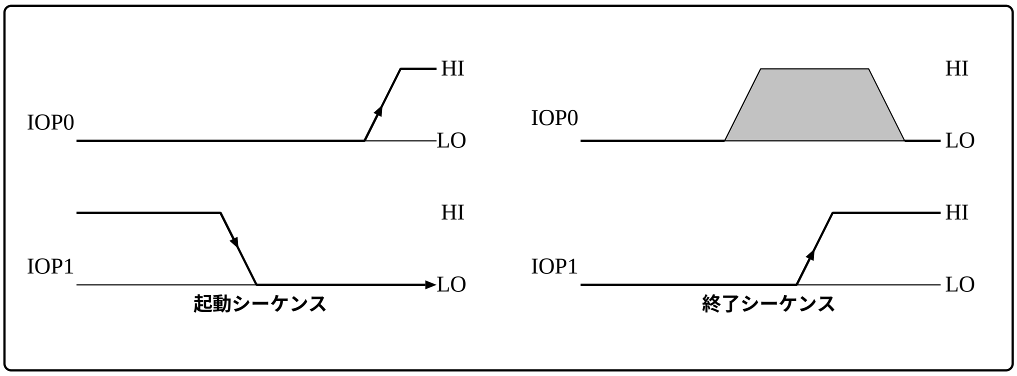

図 2.2: アーム#1 の起動シーケンスと終了シーケンス

2.1.3　6DOF マニピュレータ

6 自由度、回転関節型の産業用マニピュレータ SC-15(不二越製)。
並行リンク構造を有する。本研究に必要なサーボモータの各パラメータ値 (公称値)、及びリンクのパラメータ値を以下に示す [8]。

表 3:サーボモータのパラメータ

	トルク定数 $[Nm/A]$	電圧 – 電流変換係数 $[A/V]$	ACサーボモータ 慣性モーメント $[Kgm^2]$	ギア比
第 2 軸	6.2×10^{-2}	2.21	1.6384	160
第 3 軸	6.2×10^{-2}	2.21	1.6384	160

表 4:マニピュレータのリンクパラメータ

$L_1[m]$	$L_2[m]$	$D_c[m]$
0.60	0.693	0.398

2. 1. 4　画像装置

画像装置として、リアルタイム動作解析システム (応用計測研究所製) を使用する。この装置はカメラとイメージプロセッサで構成されており、カメラで取り込んだ画像信号をイメージプロセッサが解析を行ない、明度差を利用し物体の画像中での重心を出力するものである。

表 5:QuickMag

入力信号	複合映像信号 2 系統
出力信号	RGB 2 系統
入出力インターフェイス	GP-IB
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	739×430
有効範囲	640×416
測定周期	1/120 秒
測定点数	8 点
最大窓寸法	649×416
窓形状	短形

表 6:カメラ

射影素子	2/3 インチ CCD
画素数	H769×V493

第 3 章

視覚サーボ系の定式化

3.1 マニピュレータのモデル

3.1.1 マニピュレータの運動学

マニピュレータの機構を数式で取り扱うために、運動学による定式化を行なう。ロボットマニピュレータの機構を図 3.1に示す。これはマニピュレータを横から見ており、手先の効果器部にカメラが横向きに取り付けてある。今回はこのマニピュレータを平面 2 自由度マニピュレータとしてもちいる。カメラの移動は、第2, 3関節を変化させることにより実現させる。ここで、第2, 3関節をそれぞれ第1, 2関節と置き直し、今後は第1, 2関節と表記する。

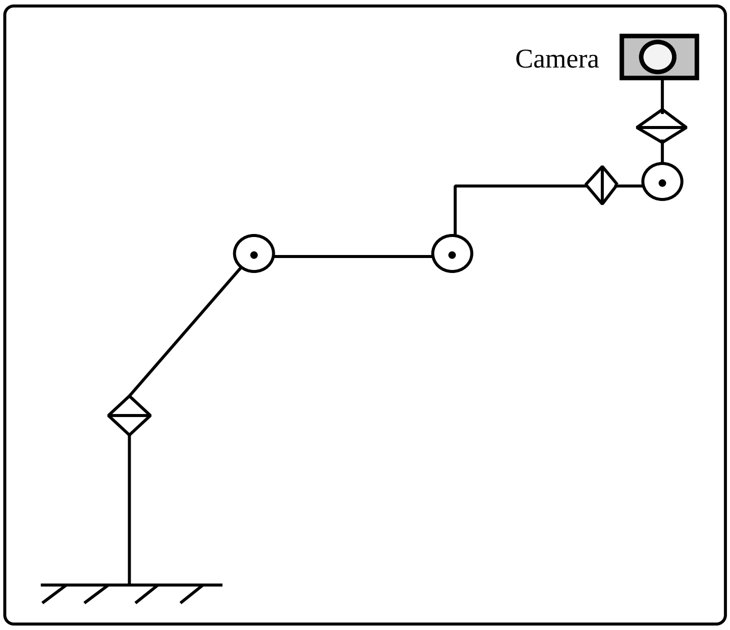

図 3.1: SC-15 の機構モデル

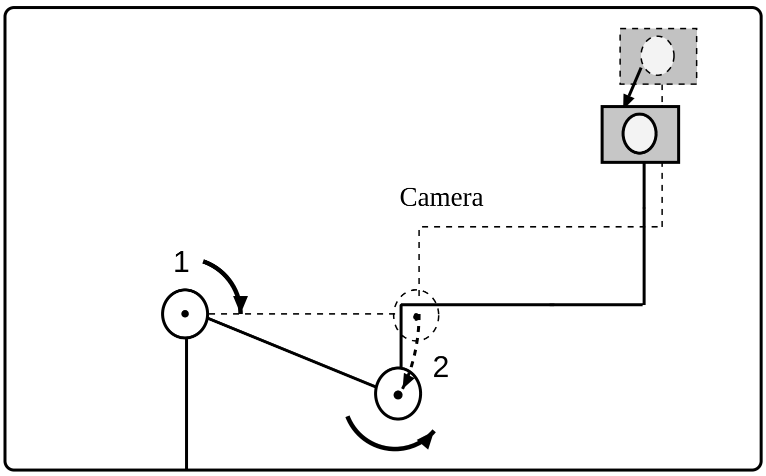

図 3. 2: カメラの移動方法

SC-15 には直列リンク機構ではなく並行リンク機構が使用されている。可動範囲は狭くなってしまうが、重いモータを台座部分に配置できるため、2 軸に対する負担が軽くなり、軽量化が行なえる。また、並行リンクの機構上、直列リンク型と比べて剛性が良く、リンク間干渉が減少する利点がある。以下に直列リンク機構と並行リンク機構の関節角のとりかたを図 3.3 に示す。q_1, q_2は直列リンク機構での関節角度を表している。直列リンク

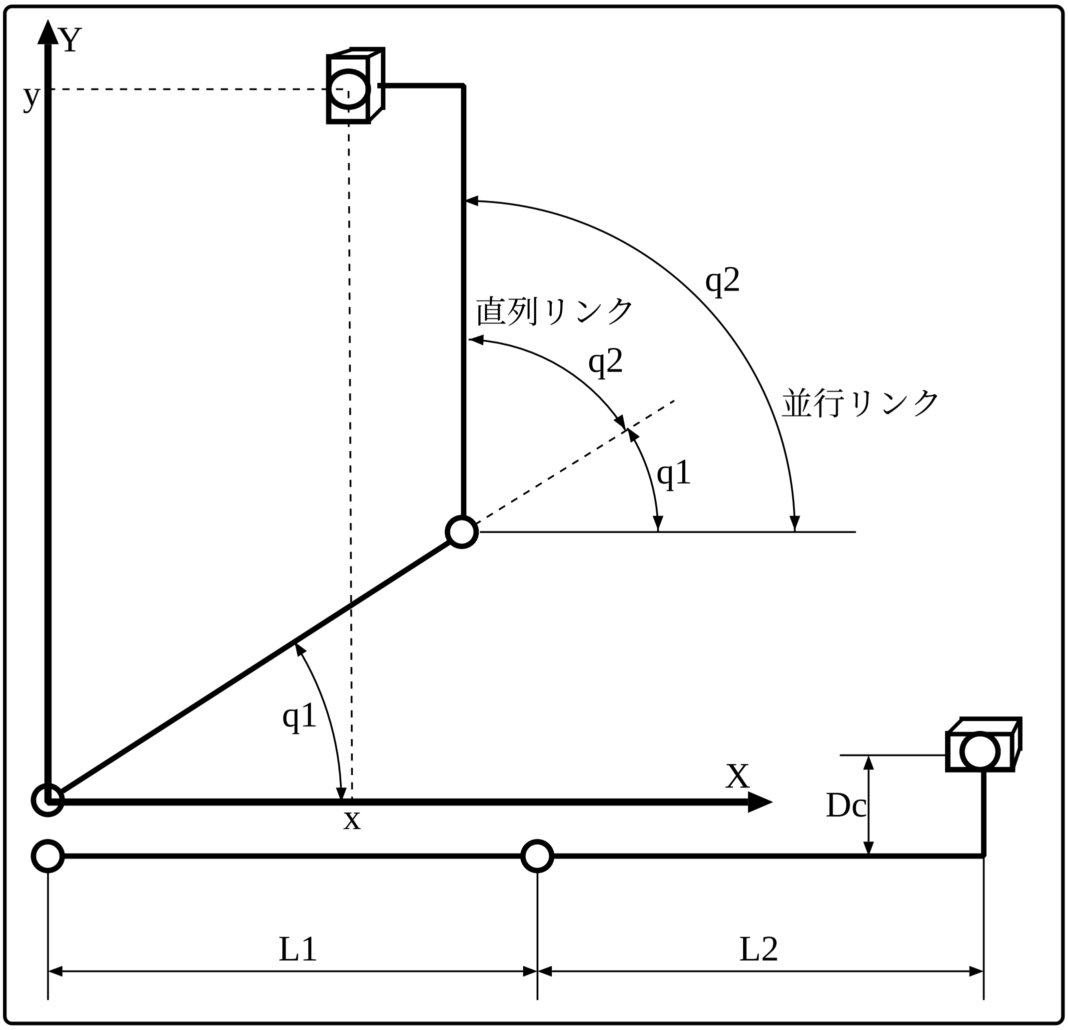

図 3. 3: 直列リンク機構での関節角と並列リンク機構での関節角

では第 2 リンクの姿勢は $q_1 + q_2$となり、第 1 関節角角度の影響をうける。しかし、並行リンク機構では第 2 リンクの姿勢は第 1 関節角角度の影響は受けず、独立となる。

図 3.3を基にし、幾何学的に関節角と手先に固定されているカメラの姿勢との関係を式に表す。ここで、

$$C_i \equiv \cos(q_i) \quad C_{ij} \equiv \cos(q_i - q_j)$$
$$S_i \equiv \sin(q_i) \quad S_{ij} \equiv \sin(q_i - q_j)$$

と定義しておく。$i(i = 1, 2), j(j = 1, 2)$

$$\begin{aligned} x &= L_1C_1 + L_2C_2 - D_cS_2 \\ y &= L_1S_1 + L_2S_2 + D_cC_2 \\ \omega &= q_2 \end{aligned} \tag{3.1}$$

ここで求めた x, yは、台座部分に対する手先の位置、ωは姿勢を表わしている。

3.1.2 マニピュレータのヤコビアン

ここまでに関節角と手先位置姿勢の関係を求めた。つぎに関節角速度と手先位置、姿勢の変化速度を求めたい。そこで、先ほど求めた運動学に対し時間微分を施してみる。式 (3.1) に時間微分をおこなったものが下記の式である。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -L_1S_1\dot{q}_1 - L_2S_2\dot{q}_2 - D_cC_2\dot{q}_2 \\ \dot{y} &= L_1C_1\dot{q}_1 + L_2C_2\dot{q}_2 - D_cS_2\dot{q}_2 \\ \dot{\omega} &= \dot{q}_2 \end{aligned} \tag{3.2}$$

式 (3.2) の右辺を$\dot{q}_1, \dot{q}_2$ でくくりまとめると、

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1S_1 & -L_2S_2 - D_cC_2 \\ L_1C_1 & L_2C_2 - D_cS_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

となる。ここで、式 (3.3) の右辺第 2 項を次のように定義する。

$$\boldsymbol{J}_{robot} \equiv \begin{bmatrix} -L_1S_1 & -L_2S_2 - D_cC_2 \\ L_1C_1 & L_2C_2 - D_cS_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

式 (3.4) をもちいると、式 (3.3) は

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \boldsymbol{J}_{robot} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

と表せる。$\boldsymbol{J}_{robot}$はロボッヤコビアンと呼ばれ、モニピュレータの手先速度と関節角速度の関係を表している。

3.1.3 マニピュレータの動特性

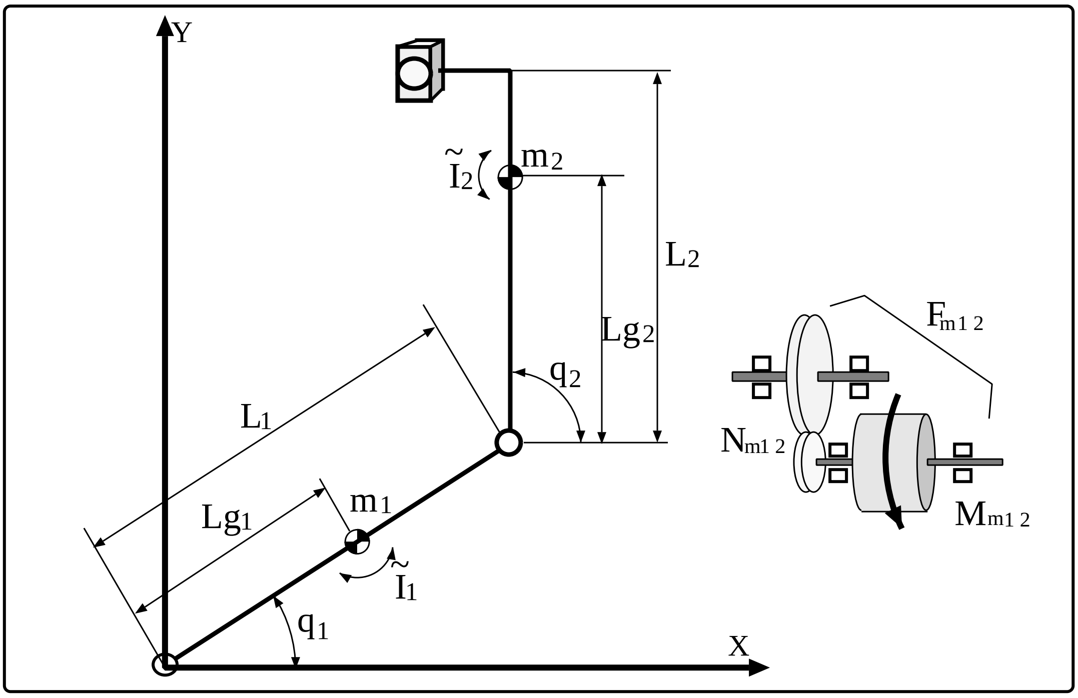

図 3.4: SC-15 の物理モデル

- Lg_1:リンク 1 の質量重心までの距離
- Lg_2:リンク 2 の質量重心までの距離
- m_1:リンク 1 の質量
- m_2:リンク 2 の質量
- $\tilde{I}_1$:リンク 1 の質量中心を通り回転軸に平行な軸まわりの慣性モーメント
- $\tilde{I}_2$:リンク 2 の質量中心を通り回転軸に平行な軸まわりの慣性モーメント
- N_{m12}:モータ 1 及び 2 が持つ減速器の減速比
- F_{m12}:モータ 1 及び 2 の摩擦
- M_{m12}:モータ 1 及び 2 の慣性モーメント

マニピュレータはリンクとアクチュエータであるモータによって構成されている。よって、マニピュレータの動特性はリンクの動特性とモータの動特性を結合させたものとなる。モータの動特性モデルは、一般に以下の式で表せられる。[6]

$$\begin{bmatrix} M_{m1} & 0 \\ 0 & M_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_{m1} \\ \ddot{q}_{m2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{m1} & 0 \\ 0 & F_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_{m1} \\ \dot{q}_{m2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{load} \\ \tau_{load} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{m1} \\ \tau_{m2} \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

$\boldsymbol{\tau}_m \in R^{2\times 1}$： モータが発生するトルク

$\boldsymbol{\tau}_{load} \in R^{2\times 1}$： モータ側から見た負荷トルク

$\boldsymbol{M}_m \in R^{2\times 2}$： モータの慣性項

$\boldsymbol{F}_m \in R^{2\times 2}$： モータの摩擦項

ただし、$\boldsymbol{M}_m$、$\boldsymbol{F}_m$は正定の対角行列である。

$$\begin{bmatrix} q_{m1} \\ q_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{load\ 1} \\ \tau_{load\ 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1^{-1} & 0 \\ 0 & N_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{l1} \\ \tau_{l2} \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

$\boldsymbol{N} \in R^{2\times 2}$： 減速比

式 (3.6) の左辺第 3 項はアクチェータ側から見た負荷トルクであり、リンクの関節トルクが減速器を介してアクチェータ側に伝えられる。式 (3.8) より減速比を$\boldsymbol{N}$とすると、関節側からみた負荷トルク$\boldsymbol{\tau}$は、アクチェータ側から見た場合$\boldsymbol{N}^{-1}$倍される。リンク側から見た負荷トルクをもちいて式 (3.6) を表し直すと、

$$\begin{bmatrix} M_{m1} & 0 \\ 0 & M_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_{m1} \\ \ddot{q}_{m2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{m1} & 0 \\ 0 & F_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_{m1} \\ \dot{q}_{m2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1^{-1} & 0 \\ 0 & N_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{l1} \\ \tau_{l2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{m1} \\ \tau_{m2} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

$\boldsymbol{\tau} \in R^{2\times 1}$： リンク側から見た負荷トルク

次にリンクの動特性を示す。一般に、マニピュレータのリンクの動特性モデルは以下の式で表される。[6]

$$\begin{bmatrix} M_l(\boldsymbol{q})_{11} & M_l(\boldsymbol{q})_{12} \\ M_l(\boldsymbol{q})_{21} & M_l(\boldsymbol{q})_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})_{11} & C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})_{12} \\ C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})_{21} & C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g(\boldsymbol{q})_1 \\ g(\boldsymbol{q})_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{l1} \\ \tau_{l2} \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{q} \in R^{2\times1} &: \text{関節角} \\ \boldsymbol{\tau} \in R^{2\times1} &: \text{関節にかかるトルク} \\ \boldsymbol{M}_l(\boldsymbol{q}) \in R^{2\times2} &: \text{リンクの慣性項} \\ \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) \in R^{2\times2} &: \text{リンクのコリオリ、遠心項} \\ \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \in R^{2\times1} &: \text{重力項} \end{aligned}$$

各行列の中身については、

$$\begin{aligned} \tau_{l1} &= [m_1Lg_1^2+\tilde{I}_1+m_2L_1^2]\ddot{q}_1+m_2L_1Lg_2C_{(2-1)}\ddot{q}_2-m_2L_1Lg_2S_{(2-1)}\dot{q}_2^2+(m_1Lg_1+m_2L_1)\hat{g}C_1 \\ \tau_{l2} &= m_2L_1Lg_2C_{(2-1)}\ddot{q}_1+[m_2Lg_2^2+\tilde{I}_2]\ddot{q}_2+m_2L_1Lg_2S_{(2-1)}\dot{q}_1^2+m_2Lg_2\hat{g}C_2 \end{aligned} \tag{3.11}$$

式(3.10),(3.11)より、

$$\boldsymbol{M}_l(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} m_1Lg_1^2+\tilde{I}_1+m_2L_1^2 & m_2L_1Lg_2C_{(2-1)} \\ m_2L_1Lg_2C_{(2-1)} & m_2Lg_2^2+\tilde{I}_2 \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = \begin{bmatrix} 0 & -m_2L_1Lg_2S_{(2-1)}\dot{q}_2 \\ m_2L_1Lg_2S_{(2-1)}\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} (m_1Lg_1+m_2L_1)\hat{g}C_1 \\ m_2Lg_2\hat{g}C_2 \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

となる。

式 (3.10) の$\boldsymbol{\tau}_l$を式 (3.6) の$\boldsymbol{\tau}$に代入し、$\boldsymbol{q}_m = \boldsymbol{N}\boldsymbol{q}$の関係をもちいてマニピュレータシステムの動特性モデルを導出すると、

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} M(\boldsymbol{q})_{11} & M(\boldsymbol{q})_{12} \\ M(\boldsymbol{q})_{21} & M(\boldsymbol{q})_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} &+ \begin{bmatrix} C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})_{11} & C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})_{12} \\ C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})_{21} & C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} F_1 & 0 \\ 0 & F_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{q}_{m1} \\ \dot{q}_{m2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1(\boldsymbol{q}) \\ g_2(\boldsymbol{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.15}$$

ただし、

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} M(\boldsymbol{q})_{11} & M(\boldsymbol{q})_{12} \\ M(\boldsymbol{q})_{21} & M(\boldsymbol{q})_{22} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} M_{m1} & 0 \\ 0 & M_{m2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} M_l(\boldsymbol{q})_{11} & M_l(\boldsymbol{q})_{12} \\ M_l(\boldsymbol{q})_{21} & M_l(\boldsymbol{q})_{22} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\begin{bmatrix} F_1 & 0 \\ 0 & F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} F_{m1} & 0 \\ 0 & F_{m2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \tau_{l1} \\ \tau_{l2} \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

とする。

3.2 カメラモデル

3.2.1 透視変換

特徴ベース法でもちいるカメラと物体の相対距離の 3 次元空間座標が、カメラの画像平面とどのような関係をもつかについて、ピンホールカメラモデルをもとに述べる。fはカメラの焦点距離である。カメラにフレームΣ_cを配置すると、${}^c\boldsymbol{X}_o = [\,{}^cX_o,\ {}^cY_o,\ {}^cZ_o]^T$

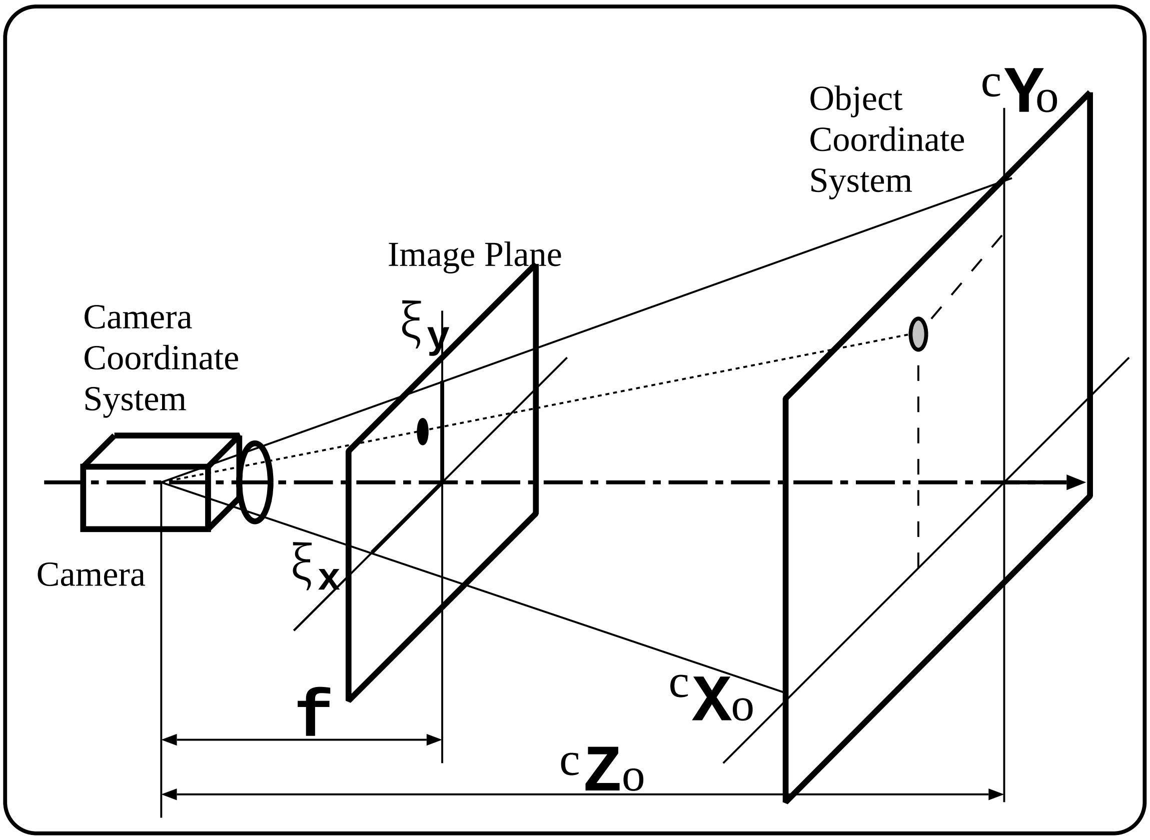

図 3.5: 透視変換

はカメラフレームに対する物体の 3 次元空間での位置ベクトル。$\boldsymbol{\xi} = [\xi_x, \xi_y]^T$ はカメラの画像面上での位置ベクトルを表す。

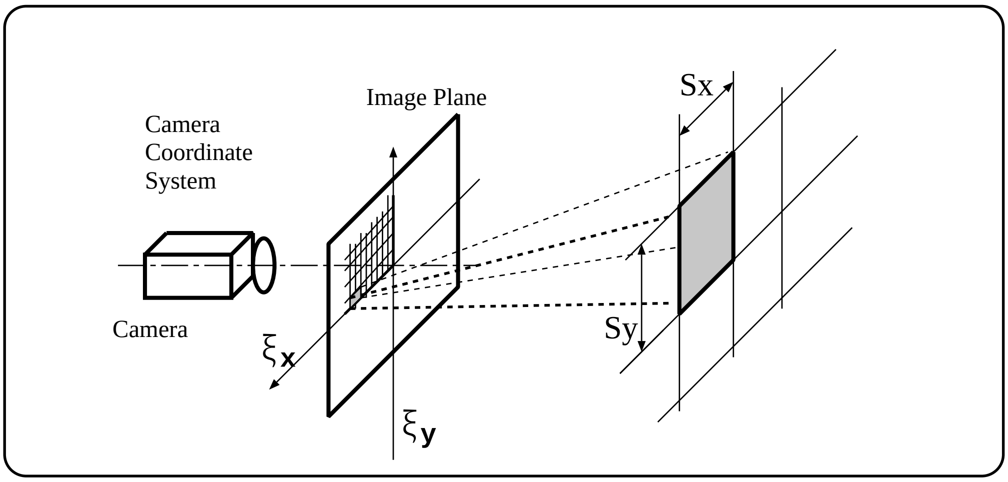

図 3.6: カメラのピクセル長

図 3. 6中の $\{S_x, S_y\}$ は画像を構成する素子の大きさを表す。この素子の縦横の比をアスペクト比と呼び、$\alpha(=\frac{S_x}{S_y})$ で定義される。Σ_cを基準にした特徴点の 3 次元空間での位置 ${}^c\boldsymbol{X}_o$と画像平面での位置ベクトル$\boldsymbol{\xi}$との関係は、以下のような透視変換で定義される。

$$\xi_x = \frac{f}{s_x}\frac{1}{{}^cZ_o}\,{}^cX_o \qquad \xi_y = \frac{f}{s_y}\frac{1}{{}^cZ_o}\,{}^cY_o \tag{3.19}$$

まとめて表記すると、

$$\begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{bmatrix} = \frac{1}{{}^cZ_o}\begin{bmatrix} \frac{f}{s_x} & 0 \\ 0 & \frac{f}{s_y} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} {}^cX_o \\ {}^cY_o \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

$\alpha = \frac{s_x}{s_y}$より式 (3 . 20) の右辺第 2 項目を分解すると、

$$\begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{bmatrix} = \frac{f}{s_x}\frac{1}{{}^cZ_o}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} {}^cX_o \\ {}^cY_o \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

となる。さらに、基準フレームをゼロフレームΣ_0からカメラフレームΣ_cへ回転行列 ${}^cR_0$をもちいて変換すると、

$$\begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{bmatrix} = \frac{f}{s_x}\frac{1}{{}^0Z_o}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}{}^cR_0\begin{bmatrix} {}^0X_o \\ {}^0Y_o \end{bmatrix} \tag{3.22}$$

3.2.2 カメラのヤコビアン

まず、式 (3.22) を次のように変形る。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{bmatrix} = \frac{f}{s_x} \frac{1}{{}^0Z_o} {}^cR_0 \begin{bmatrix} {}^0X_o \\ {}^0Y_o \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

式 (3. 23)に対し時間微分をおこない、ヤコビアンを導出する。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{bmatrix} \right) &= \frac{f}{s_x} \frac{1}{{}^0Z_o} \frac{d}{dt}\left({}^cR_0 \begin{bmatrix} {}^0X_o \\ {}^0Y_o \end{bmatrix} \right) \\ &= \frac{f}{s_x} \frac{1}{{}^0Z_o} \left({}^c\dot{R}_0 \begin{bmatrix} {}^0X_o \\ {}^0Y_o \end{bmatrix} + {}^cR_0 \begin{bmatrix} {}^0\dot{X}_o \\ {}^0\dot{Y}_o \end{bmatrix} \right) \\ &= \frac{f}{s_x} \frac{1}{{}^0Z_o} \left({}^c\dot{R}_0\, {}^cR_0^{-1}\, {}^cR_0 \begin{bmatrix} {}^0X_o \\ {}^0Y_o \end{bmatrix} + {}^cR_0 \begin{bmatrix} {}^0\dot{X}_o \\ {}^0\dot{Y}_o \end{bmatrix} \right) \\ &\quad \text{右辺の第 2 項に式 (3.23) を代入すると} \\ &= {}^c\dot{R}_0\, {}^cR_0^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{bmatrix} + \frac{f}{s_x} \frac{1}{{}^0Z_o} {}^cR_0 \begin{bmatrix} {}^0\dot{X}_o \\ {}^0\dot{Y}_o \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.24}$$

ここで、${}^c\dot{R}_0\, {}^cR_0^{-1} \equiv \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} ({}^0\dot{\omega}_o)$ とする。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\xi}_x \\ \dot{\xi}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} ({}^0\dot{\omega}_o) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{bmatrix} + \frac{f}{s_x} \frac{1}{{}^0Z_o} {}^cR_0 \begin{bmatrix} {}^0\dot{X}_o \\ {}^0\dot{Y}_o \end{bmatrix} \tag{3. 25}$$

両辺に$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}$をかける。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\xi}_x \\ \dot{\xi}_y \end{bmatrix} &= \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \frac{f}{s_x} \frac{1}{{}^0Z_o} {}^cR_0 \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} {}^0\dot{X}_o \\ {}^0\dot{Y}_o \\ {}^0\dot{\omega}_o \end{bmatrix} \\ &= \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \frac{f}{s_x} \frac{1}{{}^0Z_o} {}^cR_0 \quad \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{\alpha} \\ \alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} {}^0\dot{X}_o \\ {}^0\dot{Y}_o \\ {}^0\dot{\omega}_o \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$= \left[\frac{f}{s_x} \frac{1}{{}^0Z_o} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} {}^cR_0 \quad \begin{bmatrix} -\frac{1}{\alpha}\xi_y \\ \alpha\xi_x \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} {}^0\dot{X}_o \\ {}^0\dot{Y}_o \\ {}^0\dot{\omega}_o \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

ここで、${}^cR_0 = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 \\ -S_2 & C_2 \end{bmatrix}$ より、

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_x \\ \dot{\xi}_y \end{bmatrix} = \left[\frac{f}{s_x} \frac{1}{{}^0Z_o} \begin{bmatrix} C_2 & S_2 \\ -S_2\alpha & C_2\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{\alpha}\xi_y \\ \alpha\xi_x \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} {}^0\dot{X}_o \\ {}^0\dot{Y}_o \\ {}^0\dot{\omega}_o \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

ここで式(3. 27)の右辺第 2 項を次のように定義する。

$$J_{image} \equiv \left[\frac{f}{s_x} \frac{1}{{}^0Z_o} \begin{bmatrix} C_2 & S_2 \\ -S_2\alpha & C_2\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{\alpha}\xi_y \\ \alpha\xi_x \end{bmatrix} \right] \tag{3.28}$$

となる。式(3.28) をもちいると、式(3.27) は

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_x \\ \dot{\xi}_y \end{bmatrix} \equiv \boldsymbol{J}_{image} \begin{bmatrix} {}^0\dot{X}_o \\ {}^0\dot{Y}_o \\ {}^0\dot{\omega}_o \end{bmatrix} \tag{3.29}$$

と表せる。式(3.28) はイメージヤコビアンと呼ばれており、3 次元空間の速度と画像空間の速度の関係を表す。ここで J_{image}を構成要素のうち、ξ_x, ξ_y, q_1, q_2 については、観測可能。${}^0Z_o$は既知であり、$\alpha, \frac{f}{s_x}$については未知である。よって、イメージヤコビアンを使用するには$\alpha, \frac{f}{s_x}$を求める必要がある。これについては、実験の章で求める。 (3.4),(3.28)式を組み合わせることにより、関節角空間での角速度から 3 次元空間でのカメラ座標系の並進速度、回転速度の関係式を得ることができる。

$$J \equiv J_{image} J_{robot} \tag{3.30}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_x \\ \dot{\xi}_y \end{bmatrix} = \boldsymbol{J} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \tag{3.31}$$

実際に展開すると

$$J = \frac{f}{s_x} \frac{1}{{}^0Z_o} \begin{bmatrix} L_1S_{21} & -D_c - \xi_y/\alpha \\ L_1C_{21}\alpha & (L_2 + \xi_x)\alpha \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

今後は、この Jをたんにヤコビアンと呼ぶことにする

第 4 章

視覚サーボコントローラの設計

4.1　視覚サーボ問題

ここでは、本研究で取り扱う特徴ベース法に基づく視覚サーボ問題を定式化する。まず、画像面上の対象物像の目標値$\boldsymbol{\xi}_d \in R^2$を与える。ここで、$\boldsymbol{\xi}_d \equiv 0$とする。特徴ベース法に基づく視覚サーボ問題とは、$t \to \infty$で$\boldsymbol{\xi} \to \boldsymbol{\xi}_d, \dot{\boldsymbol{\xi}} \to 0$を達成するトルク制御則を与える問題とする。この視覚サーボ問題の本質をとらえるため、次のような仮定をおく。

- 対象物は静止している。つまりマニピュレータは対象に対しある相対位置でポジショニングする。
- $\boldsymbol{\xi}_d$を達成させるマニピュレータの関節角は存在する。これは、実際に$\boldsymbol{\xi}$を$\boldsymbol{\xi}_d$に一致させるために最低限必要となる仮定である。
- $\boldsymbol{J}$が任意の$\boldsymbol{q}, \boldsymbol{\xi}$に対し、フルランクである。この仮定は他の特徴ベース視覚サーボの研究において、すべてにもちいられている自然な仮定である [3]。

4.2　リアプノフの定理

動特性を考慮した視覚サーボコントローラを設計する前にその基礎となる安定性に関する定義とリアプノフの定理を紹介する [7][11]。本節では次のような微分方程式であらわされるシステムを考える。

$$\dot{x} = f(x) \tag{4.1}$$

ここで x は状態と呼ぶ。

安定性理論の定義において本論文で使用するものは以下の通りである。

Definition 1 ある状態 x^*がシステム式 (4.1) の平衡点であるとは,

$$f(x^*) = 0 \tag{4.2}$$

Definition 2 ある平衡点 $x = 0$ が安定であるとは任意の$\rho > 0$ に対して、$\|x(0)\| < r$ならば $\|x(t)\| < 0,\ \forall t \geq 0$ となる $r > 0$ が存在することである。

Definition 3 ある平衡点 $x = 0$ が漸近安定であるとは安定であり、かつ、$\|x(0)\| < r$ならば $t \to \infty$ で $x(t) \to 0$ となる $r > 0$ が存在することである。

またあるスカラ関数 $V(x)$ を考えたとき次の定義を紹介する。

Definition 4 連続なスカラ関数 $V(x)$ が正定 (準正定) であるとは、$V(0) = 0$ かつ $x \neq 0$ である場合、$V(x) > 0(V(x) \geq 0)$ を満足する関数である。同様に負定 (準負定) であるとは$-V(x)$ が正定 (準正定) 関数である。

Definition 5 $V(x)$ がシステム式 (4.1) のリアプノフ関数であるとは $V(x)$ が正定関数でその時間微分$\dot{V}(x)$ が存在し半負定関数である場合である。

以上の定義に対して次のような安定性に関する定理 (リアプノフの定理) がある [7][11]。

Theorem 1 システム式 (4.1) の平衡点が大域的に漸近安定である十分条件は、リアプノフ関数 $V(x)$ が存在し、$\dot{V}(x)$ が負定関数でありかつ $\|x\| \to \infty$ で $V(x) \to \infty$ である。

定理 1 において$\dot{V} \leq 0$ に条件を緩めたものがラサールの不変集合の定理である。 まず不変集合は次のように定義される。

Definition 6 集合 Sから出発した任意の軌跡は S にとどまり続けるとき、Sがシステムの不変集合である。

この不変集合をもちいて次の安定性に関する定理 (ラサールの定理) が導出できる [7]。

Theorem 2 システム式 (4.1) に関してリアプノフ関数 $V(x)$ が存在し、$\|x\| \to \infty$ で $V(x) \to \infty$ である。また、$\dot{V}(x) = 0$ を満足する状態の集合をΩとして、その最大不変集合を Mとする。ならばシステム式 (4.1) の状態は $t \to \infty$ で Mに大域的に漸近収束する。

次節では視覚サーボ問題の解となる制御則を提案し、安定性に関する証明を行なう。

4.3 リアプノフの定理に基づくコントローラの設計

4.3.1 画像空間でのダイナミクス

本節では前章で紹介した関節空間でのロボットダイナミクス式 (3.15) をヤコビアンをもちいて画像空間のダイナミクスに変換する。まずヤコビアン Jはフルランクの仮定をおく。本仮定は特徴ベース法を用いた場合の様々な研究 [3] において必要となる自然な仮定である。また本研究ではヤコビアン Jは正方行列 $R^{2\times2}$であるので J^{-1}が存在するということと等価である。この仮定と式 (3.30) から

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}^{-1}\dot{\boldsymbol{\xi}} \tag{4.3}$$

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = \dot{\boldsymbol{J}}^{-1}\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{J}^{-1}\ddot{\boldsymbol{\xi}} \tag{4.4}$$

式 (4.3)(4.4) を式 (3.15) に代入して、さらに左から$\boldsymbol{J}^{-T}$をかける。

$$\boldsymbol{J}^{-T}\tau = \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})(\dot{\boldsymbol{J}}^{-1}\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{J}^{-1}\ddot{\boldsymbol{\xi}}) + \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{J}^{-1}\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{F}\boldsymbol{J}^{-1}\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \tag{4.5}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{J}^{-T}\tau &= \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{J}}^{-1}\dot{\boldsymbol{\xi}} + (\boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{J}^{-1} + \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{J}^{-1}\dot{\boldsymbol{J}}\boldsymbol{J}^{-1})\dot{\boldsymbol{\xi}} \\ &\quad + \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{F}\boldsymbol{J}^{-1}\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})\end{aligned} \tag{4.6}$$

ここで、

$$\boldsymbol{M}_\xi(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{q}) \equiv \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{J}}^{-1} \tag{4.7}$$

$$\boldsymbol{C}_\xi(\boldsymbol{\xi},\dot{\boldsymbol{\xi}},\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) \equiv \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{J}^{-1} + \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{J}^{-1}\dot{\boldsymbol{J}}\boldsymbol{J}^{-1} \tag{4.8}$$

$$\boldsymbol{F}_\xi \equiv \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{F}\boldsymbol{J}^{-1} \tag{4.9}$$

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{q}) \equiv \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \tag{4.10}$$

と置くと、(4.6) 式は

$$\boldsymbol{J}^{-T}\tau = \boldsymbol{M}_\xi(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{C}_\xi(\boldsymbol{\xi},\dot{\boldsymbol{\xi}},\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{F}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{q}) \tag{4.11}$$

となる。ここで、次の補題が成立する [6] 。

Lemma 1 任意の$\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{\xi}},\dot{\boldsymbol{q}}$に対し、

- $\boldsymbol{M}_\xi > 0$
- $\dot{\boldsymbol{M}}_\xi - 2\boldsymbol{C}_\xi$が歪み対象行列である。

4.3.2 制御則の提案と安定性の証明

式 (4.11) のシステムに対し制御目的$\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d \to 0, \dot{\boldsymbol{q}} \to 0$ を達成させるための制御入力として任意の正定対角行列$\boldsymbol{K}_p > 0, \boldsymbol{K}_v > 0$ をもちいて以下の重力補償付きの PD 制御を提案する。

$$\boldsymbol{\tau} = -\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{K}_p(\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d) - \boldsymbol{K}_v\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \tag{4.12}$$

式 (4. 11)の制御システムからなる閉ループ系の動特性は、

$$\boldsymbol{J}^{-T}(-\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{K}_p(\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d) - \boldsymbol{K}_v\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})) = \boldsymbol{M}_\xi(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{C}_\xi(\boldsymbol{\xi},\dot{\boldsymbol{\xi}},\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{F}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{q}) \tag{4.13}$$

$$\boldsymbol{M}_\xi\ddot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{C}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{F}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{K}_p(\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d) + \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{K}_v\dot{\boldsymbol{q}} = 0 \tag{4.14}$$

となる。

4. 3. 3 閉ループ系の安定性

次にこの閉ループ系の平衡点 $[(\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d)^T, \dot{\boldsymbol{q}}^T]^T = [0,0]^T$ での漸近安定性を証明する。

リアプノフ関数の候補として

$$V = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{M}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d)^T\boldsymbol{K}_p(\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d) \tag{4.15}$$

を提案する。$V \geq 0$ は常にである。ここで、$\boldsymbol{M}_\xi > 0, \boldsymbol{K}_p > 0$ であるので、$\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d = 0, \dot{\boldsymbol{q}} = 0$ のときのみ $V=0$、それ以外は $V>0$ である。次に Vを時間微分することにより、

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \frac{1}{2}\ddot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{M}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} + \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\xi}}^T\dot{\boldsymbol{M}}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} + \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{M}_\xi\ddot{\boldsymbol{\xi}} \\ &\quad + \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{K}_p(\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d) + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d)^T\boldsymbol{K}_p\dot{\boldsymbol{\xi}} \\ &= \dot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{M}_\xi\ddot{\boldsymbol{\xi}} + \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\xi}}^T\dot{\boldsymbol{M}}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} + \dot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{K}_p(\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d)\end{aligned} \tag{4.16}$$

(4.14) 式を代入すると、

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\xi}}^T\dot{\boldsymbol{M}}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} - \dot{\boldsymbol{\xi}}^T(\boldsymbol{C}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{F}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{K}_p(\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d) + \boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{K}_V\dot{\boldsymbol{q}}) + \dot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{K}_p(\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\xi}_d) \\ &= \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\xi}}^T\dot{\boldsymbol{M}}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} - \dot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{C}_f\dot{\boldsymbol{\xi}} - \dot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{F}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} - \dot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{K}_V\dot{\boldsymbol{q}} \\ &= -\dot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{F}_\xi\dot{\boldsymbol{\xi}} - \dot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{K}_V\dot{\boldsymbol{q}}\end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\dot{\boldsymbol{V}}^T = \dot{\boldsymbol{\xi}}^T \boldsymbol{J}^{-T} \tag{4.18}$$

をもちいると式 (4.17) は、

$$\dot{V}(t) = -\dot{\boldsymbol{\xi}}^T \boldsymbol{F}_{\xi} \dot{\boldsymbol{\xi}} - \dot{\boldsymbol{q}}^T \boldsymbol{K}_V \dot{\boldsymbol{q}} \tag{4.19}$$

ここで、$\dot{\boldsymbol{V}}$は$\boldsymbol{F} > 0$、$\boldsymbol{K}_v > 0$ より$\dot{\boldsymbol{V}} \geq 0$、つまり準不定である。$\dot{V} = 0$ とする状態 $[(\boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\xi}_d)^T, \dot{\boldsymbol{q}}^T]^T$ を満足する集合Ωは、

$$\Omega = \{[(\boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\xi}_d)^T, \dot{\boldsymbol{q}}^T]^T | \dot{\boldsymbol{q}} = 0\} \tag{4.20}$$

となる。Ω内の最大不変集合 Mは、閉ループ (4.14) より

$$M = \{[(\boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\xi}_d)^T, \dot{\boldsymbol{q}}^T]^T | (\boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\xi}_d) = 0, \dot{\boldsymbol{q}} = 0\} \tag{4.21}$$

である。
よって、ラサールの定理より、式 (4.14) のシステムの状態は $t \to \infty$ で$\boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\xi}_d = 0$,$\dot{\boldsymbol{q}} = 0$ となる。

Theorem 3 視覚サーボ問題の解となる制御則の 1 つは

$$\boldsymbol{\tau} = -\boldsymbol{J}^T \boldsymbol{K}_p (\boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\xi}_d) - \boldsymbol{K}_v \dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \tag{4.22}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} &= -\frac{f}{s_x}\frac{1}{{}^0Z_o} \begin{bmatrix} L_1 S_{21} & -D_c \\ L_1 C_{(1+2)}\alpha & L_2\alpha \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 \\ 0 & K_{p2} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \xi_{d1} \\ \xi_{d2} \end{bmatrix} \right) \\
&\quad - \begin{bmatrix} K_{v1} & 0 \\ 0 & K_{v2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1(\boldsymbol{q}) \\ g_2(\boldsymbol{q}) \end{bmatrix} \\
&= -\frac{f}{s_x}\frac{1}{{}^0Z_o} \begin{bmatrix} K_{p1} L_1 S_{21} & K_{p2} L_1 C_{(1+2)}\alpha \\ -K_{p1} D_c & K_{p2} L_2 \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} \\
&\quad - \begin{bmatrix} K_{v1} & 0 \\ 0 & K_{v2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1(\boldsymbol{q}) \\ g_2(\boldsymbol{q}) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.23}$$

ここで、$\boldsymbol{K}_p > 0, \boldsymbol{K}_v > 0$ とする。

Remark 1 導出した制御則は以上のような特徴を持つ

- マニピュレータの動特性 $\{\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau}\}$ における貫性行列$\boldsymbol{M}(q)$とコリオリ、遠心力項$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})$ の情報を必要としない、$\boldsymbol{g}(q)$ のみの制御則となっている。

- Jの逆行列 (疑似逆行列) の計算を必要とせず、Jの転置のみで良い。

以上の特徴により、導出した制御則を計算機上で実現する場合、逆動力学による方法 [3] などに比べて、非常に容易なものとなる。

第 5 章

実装と実験

ここでは、前章までで得られた制御則を実装する。視覚サーボシステムを実装する前に、まず J_{image} の構成に必要なパラメータα:ピクセル比、$\frac{f}{s_x}$:焦点距離とピクセル長の比を求める。

5.1 画像パラメータを求める

受光器の一画素 (1 ピクセル) の形は正方形でなく長方形なので (図 5.1)、実際の 3 次元中の物体に対して受光器上の像は$\frac{f}{{}^cZ_o}$の拡大、縮小をうける。そこで、ピクセルの縦横比α、焦点距離とピクセル長の比である$\frac{f}{s}$を求める必要がある。

5.1.1 アスペクト比を求める

はじめにαを求める。方法は 2 つの目標物をある距離をとって置いたものを 2 組用意し、図 5. 2のように直角に組み合わせる。目標物間の距離はそれぞれ$L_1, L_2 (L_1 : L_2 = 1 : 1)$である。これをカメラで取り込んだときに、$L_1$と$L_2$の比がいくらになるかを調べる。実際には対象と画像面の間にはある程度の回転が生じているので、L_1のx成分L_{1x}とL_2のy成分L_{2y}との比より、アスペクト比を求めることになる。実験では$L_1 = L_2 = 2\,00$ mmの対象をもちいて、カメラの固定ねじ穴の位置から対象までの距離を3170mm 離し、その位置を中心として 5 つの距離についてL_1, L_2の各頂点をそれぞれ 3 回ずつ測定し、αの全体の平均を求めた。計測値を表 2 に表す。L_{1x}, L_{2y}の単位は 1 ピクセルである。

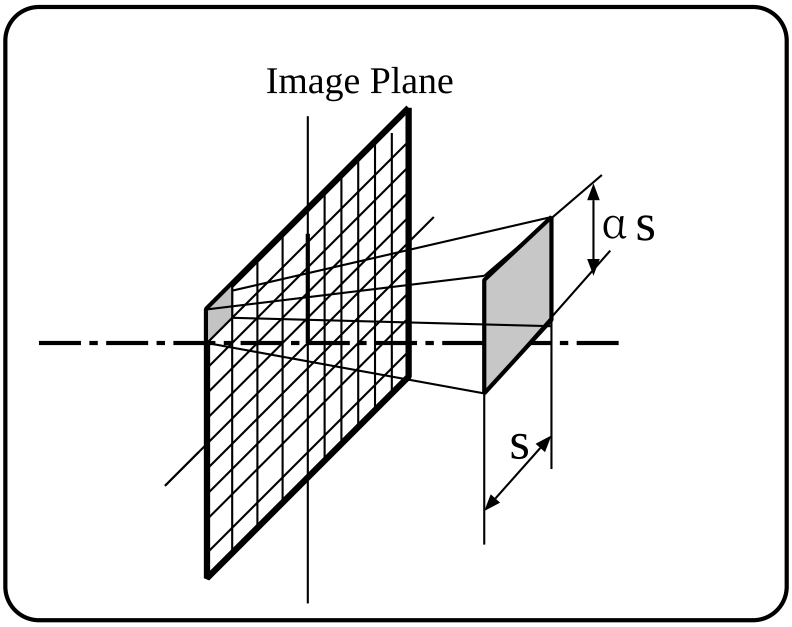

図 5.1: 画像面での縦横比

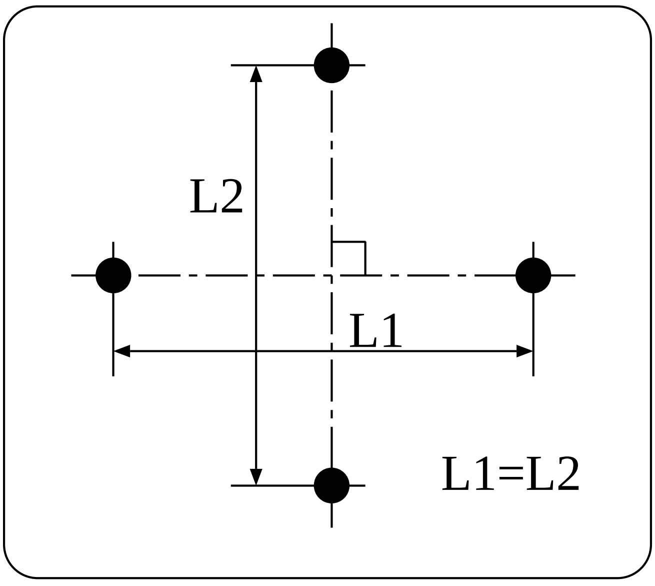

図 5. 2: 対象物

表 7: **アスペクト比実験の計測値**

	1			2			3		
距離	L_{1x}	L_{2y}	$\frac{L_{1x}}{L_{2y}}$	L_{1x}	L_{2y}	$\frac{L_{1x}}{L_{2y}}$	L_{1x}	L_{2y}	$\frac{L_{1x}}{L_{2y}}$
0	142	122	0.859	142	122	0.859	142	121	0.852
-250	155	132	0.852	154	133	0.864	154	133	0.864
250	132	113	0.856	131	113	0.863	131	113	0.863
-500	169	145	0.857	169	145	0.857	169	145	0.857
500	122	105	0.861	122	105	0.861	122	105	0.861
小平均			0.857			0.861			0.859
平均									0.859

以上の結果より、アスペクト比を$\alpha = 0.859$とする。

5.1.2 焦点距離とピクセル長の比を求める

次に$\frac{f}{s}$を求める。

$$l_1 \cos\theta = \frac{f}{S}\frac{L\cos\Theta}{Z_0} \tag{5.1}$$

$$l_2 \cos\theta = \frac{f}{S}\frac{L\cos\Theta}{Z_0 - Z_1} \tag{5.2}$$

$$l_1 \sin\theta = \alpha\frac{f}{S}\frac{L\sin\Theta}{Z_0} \tag{5.3}$$

$$l_2 \sin\theta = \alpha\frac{f}{S}\frac{L\sin\Theta}{Z_0 - Z_1} \tag{5.4}$$

$l_1, l_2, L, \theta, \Theta$はそれぞれ、初期の対象位置に対する画像面上での目標物間距離、Z_1動かした後での画像面上の目標物間距離、3 次元空間での目標物間距離、画像面上での回転角度、3 次元中での回転角度を表す。L, Z_1, αは既知l_1, l_2, θは観測可能、$\frac{f}{s}, Z_0, \Theta$は未知である。$\frac{f}{S}$を求めるには式 (5.1) 、(5.3) を変形して

$$\frac{f}{S}\cos\Theta = \frac{l_1\cos\theta Z_0}{L} \tag{5.5}$$

$$\frac{f}{S}\sin\Theta = \frac{l_1\sin\theta Z_0}{\alpha L} \tag{5.6}$$

双方を 2 乗して加えると

$$\frac{f^2}{S^2} = \frac{l_1^2\cos^2\theta Z_0^2}{L^2} + \frac{l_1^2\sin^2\theta Z_0^2}{\alpha^2 L^2} \tag{5.7}$$

$$\frac{f^2}{S^2} = \frac{Z_0^2}{L^2}(l_1^2 \cos^2\theta + \frac{l_1^2 \sin^2\theta}{\alpha^2}) \tag{5.8}$$

ここで、$l_1 \cos\theta$はl_1のx成分l_{1x}、$l_1 \sin\theta$はl_1のy成分l_{1y}とすると

$$\frac{f}{S} = \frac{Z_0}{L}\sqrt{l_{1x}^2 + \frac{l_{1y}^2}{\alpha^2}} \tag{5.9}$$

となる

Z_0に関しては、式 (5.1),(5.2) より

$$l_1 Z_0 = \frac{f}{S}\frac{L\cos\Theta}{\cos\theta} \tag{5.10}$$

$$l_2(Z_0 - Z_1) = \frac{f}{S}\frac{L\cos\Theta}{\cos\theta} \tag{5.11}$$

上式の差をとると

$$l_1 Z_0 = l_2(Z_0 - Z_1) \tag{5.12}$$

$$Z_0 = -\frac{l_2 Z_1}{l_1 - l_2} = \frac{l_2 Z_1}{l_2 - l_1} \tag{5.13}$$

となる。これを、(5.9)式に代入すると,

$$\frac{f}{S} = \frac{l_2}{l_2 - l_1}\frac{Z_1}{L}\sqrt{l_{1x}^2 + \frac{l_{1y}^2}{\alpha^2}} \tag{5.14}$$

となり、先ほど求めたαを使って焦点距離とピクセル長の比を求めることができる。

実験ではL_1, L_2の各両端の座標を測定し、α、Z_1の値と式 (22) をもちいて、$Z_0, \frac{F}{S}$を求める。アスペクト比を求めた時と同様に、カメラの固定ねじ穴の位置から対象までの距離を3170mm 離し、その位置を中心として$\pm 250, \pm 500$mm ($Z_1 = 50, 100$mm) の 2 つの距離についてそれぞれ 3 回づつ、これを対象の中心が画像面上の中心と一致するものと、その位置から対象を100mm 下げたものの 2 通りについて測定した。以下の表 3, 4に測定値より求めた$Z_0, \frac{F}{S}$を表す。

表 8: 対象の中心と画像の中心が一致している時の$Z_0, \frac{F}{S}$

	1		2		3		**小平均**	
Z_1	Z_0	$\frac{F}{S}$	Z_0	$\frac{F}{S}$	Z_0	$\frac{F}{S}$	Z_0	$\frac{F}{S}$
$500L_1$	308	2180	309	2190	305	2170	307	2180
$500L_2$	303	2140	295	2090	300	2130	299	2120
$1000L_1$	310	2190	310	2200	310	2200	305	2170
$1000L_2$	305	2160	315	2230	315	2230	312	2210
平均							306	2170

表 9: 対象の中心を100mm 下げた時の$Z_0, \frac{F}{S}$

	1		2		3		小平均	
Z_1	Z_0	$\frac{F}{S}$	Z_0	$\frac{F}{S}$	Z_0	$\frac{F}{S}$	Z_0	$\frac{F}{S}$
$500L_1$	313	2220	311	2200	314	2220	313	2210
$500L_2$	315	2190	305	2160	306	2170	305	2170
$1000L_1$	306	2190	311	2200	310	2200	309	2200
$1000L_2$	309	2190	307	2160	312	2220	309	2190
平均							309	2190

以上の結果より、$\frac{F}{S} = 2180$とする。

5.2 実装

理論式実装に先だって、DSP とイメージプロセッサを繋ぐためのインターフェイスを作成する。

5.2.1 バッファボード の作成

イメージプロセッサからは、8.3m[s] を一周期としてデータを出力している。この信号を DS Pで受けとるにはイメージプロセッサの動作に同期する必要があり、DS P側の負担が大きくなってしまう。そこで、間にバッファを設けることで非同期に読み出しをできるようにする。以下にボード の詳細を表す。図 5. 3,5. 4はそれぞれ、ボード の概略図、イメージプロセッサから出ている信号のタイムチャートである。 ボード はイメージプロセッサから送られてくるデータを一旦 RMA に記憶し、DS P側が要求するデータを引き渡す役割をもつ。詳しく述べると、シンク信号が 1 周期のタイミングを表しており、ストローブ信号がデータの区切りを表している。ただし、ビジー信号が High になっているとストローブ信号およびデータは出力されない。

ボード ではストローブ信号をカウントしてアド レスを生成し、送られてくるデータをアド レスが指し示す場所に格納する。カウンタで生成されたアド レスがある定められた値になると比較器が DS P側に対して読みだし許可の信号を出す。その後 DS P側からは、次のシンク信号が来るまでの間 RAM の内容を読み出すことができる。読み出す方法はカウントアップ信号でアド レスのカウントアップを行ない、カウンタクリア信号でアド レスを 0

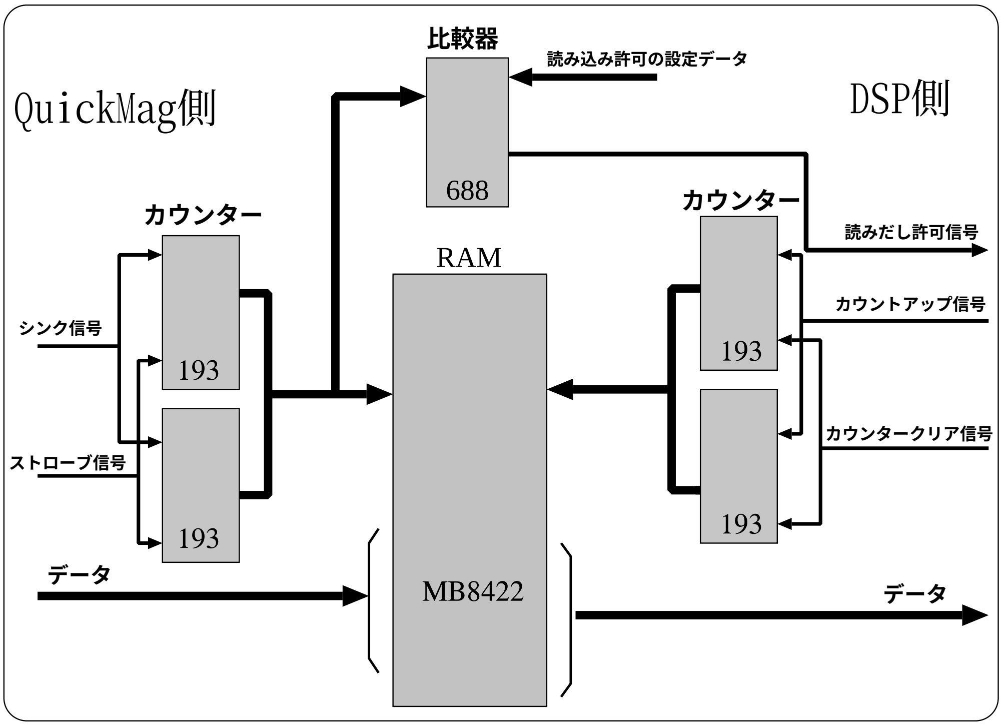

図 5.3: バッファボード

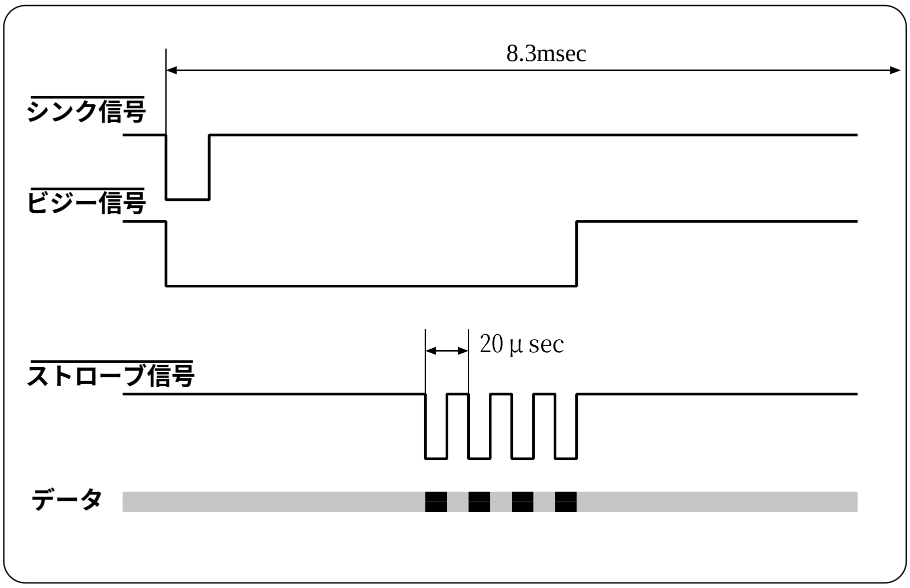

図 5. 4: イメージプロセッサの出力信号

番地に戻す。データはその時に指定されているアドレスの内容を随時出力する。次のシンク信号が送られてくるとイメージプロセッサ側のカウンタは 0 番地にもどされ、DSP 側の読み出しは禁止される。

5.3 実験

カメラをもちいた視覚フィードバックの実験を行なう。現在実装している制御入力を次式に示す。

$$\boldsymbol{\tau} = -\boldsymbol{J}^T \boldsymbol{k}_p(\boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\xi}_d) - \boldsymbol{k}_v \dot{q} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \tag{5.15}$$

図 (5.5) は現在のシステムのブロック図である。$\boldsymbol{\xi}$は画像面上での位置ベクトル、$\boldsymbol{\xi}_d$は目

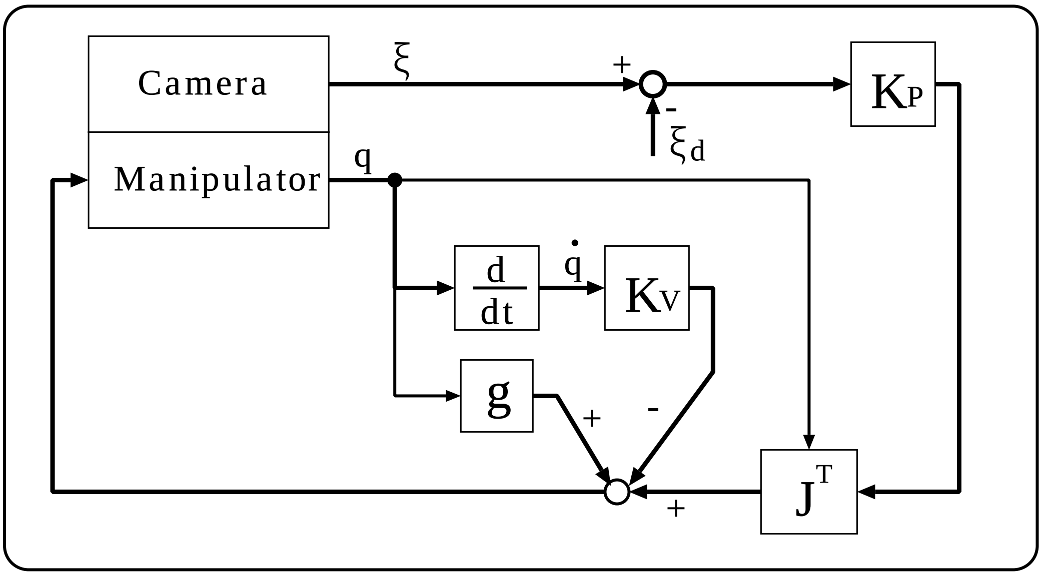

図 5. 5: PD 制御系

標位置ベクトル。$\boldsymbol{q}$はマニピュレータの各関節角、$\dot{\boldsymbol{q}}$はマニピュレータの各関節角速を表す。$\boldsymbol{k}_p, \boldsymbol{k}_v$はそれぞれ、位置ゲイン速度ゲイン$\boldsymbol{g}$は重力補償項、$\boldsymbol{J}$はヤコビアンである。

5.3.1　実験方法

実験は、カメラ前方に設置した目標物に対して位置合わせを行なう。目標物は板の上に5個設置されており、縦、横に $10cm$ 間隔で取り付けてある。解りやすいように、目標物に番号をふっておく。通常、マニピュレータが初期状態であれば、中央にある1番の目標物とカメラの中心が一致する。図5.6は実験に使用するマニピュレータの初期状態を表している。

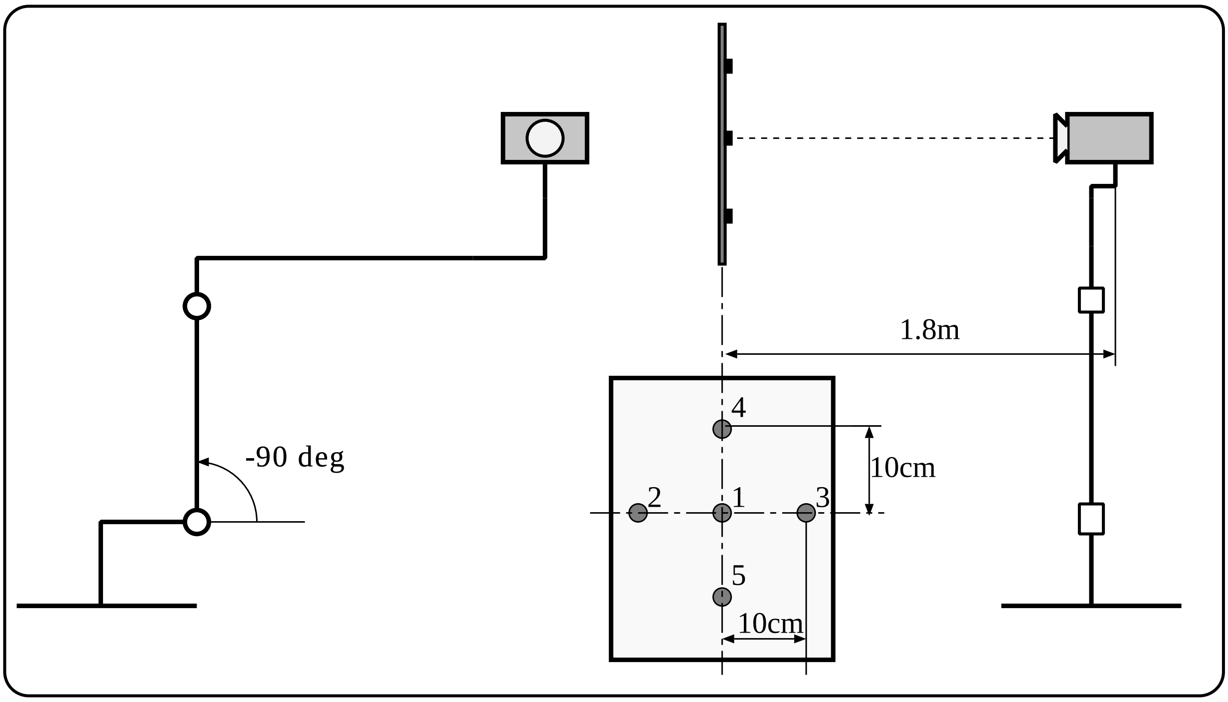

図 5. 6: 実験での初期姿勢と対象物

5. 3. 2 実験

まず、実装した制御則が動作するか否かの確認を行ない、その後位置ゲイン、速度ゲインの変化に対する過渡応答調べる。これには3番の目標物に対して視覚サーボを行ない、DSPに対しリアルタイムでモニタを行なうトレースというプログラムをもちい、$1m[s]$ のサンプリング周期にて $10[s]$ 間サンプリングを行なう。取得する情報は、画像上での誤差、出力トルクである。取得した情報はMATLABをもちいて編集した。

5.3.3 実験結果

3 番目標物に対して視覚サーボをかけた結果を示す。

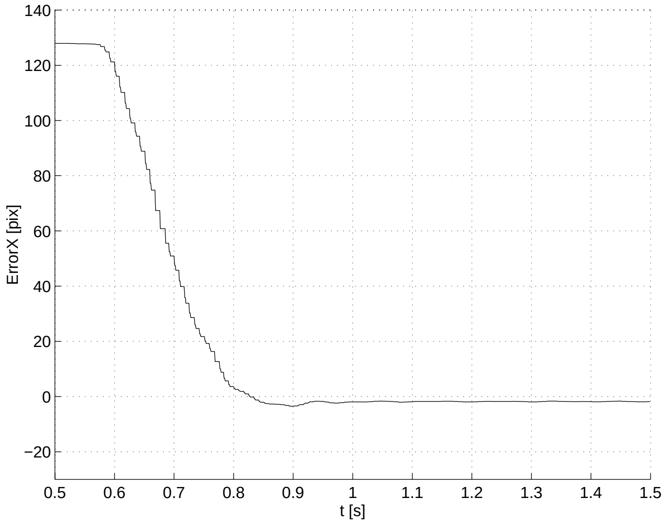

図 5.7: 実験結果ξ_x $K_p = 11e-3, k_p = 55$

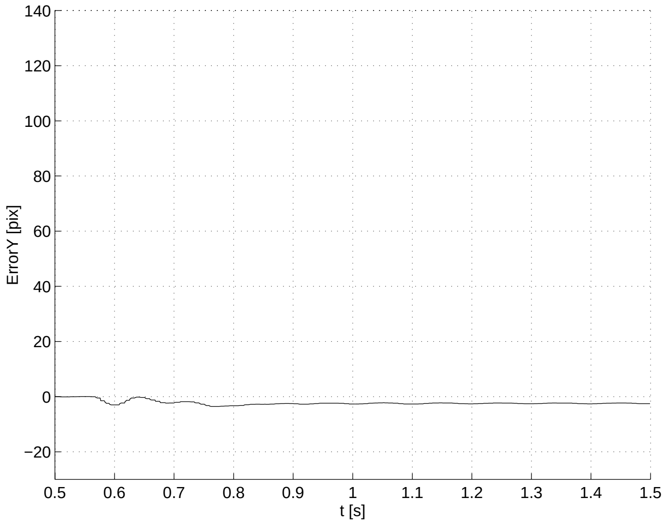

図 5. 8: 実験結果ξ_y $K_p = 11e-3, k_p = 55$

ゲインの変化に対する視覚サーボ結果は以下のとうりである。$k_p = \{7e{-}4, 9e{-}4, 11e{-}4\}$ のそれぞれに対して $k_v = \{35, 45, 55\}$ の場合を 3 回測定し平均を出した。グラフは位置ゲインごとにまとめてある。

グラフ中では実線:$k_v = 35$、一点破線:$k_v = 45$、破線:$k_v = 55$ となっている。以下に実験結果を示す。

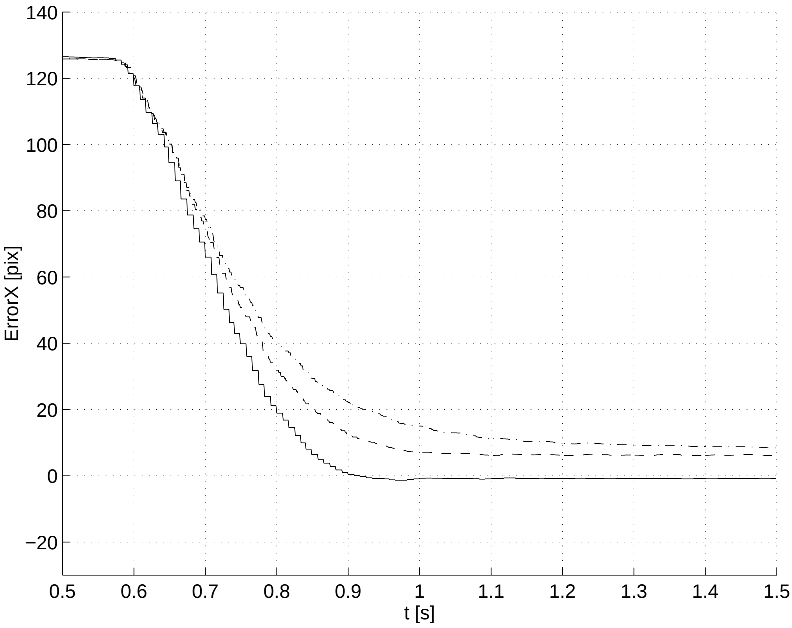

図 5.9: ξ_xの偏差 $k_p = 7e - 4$

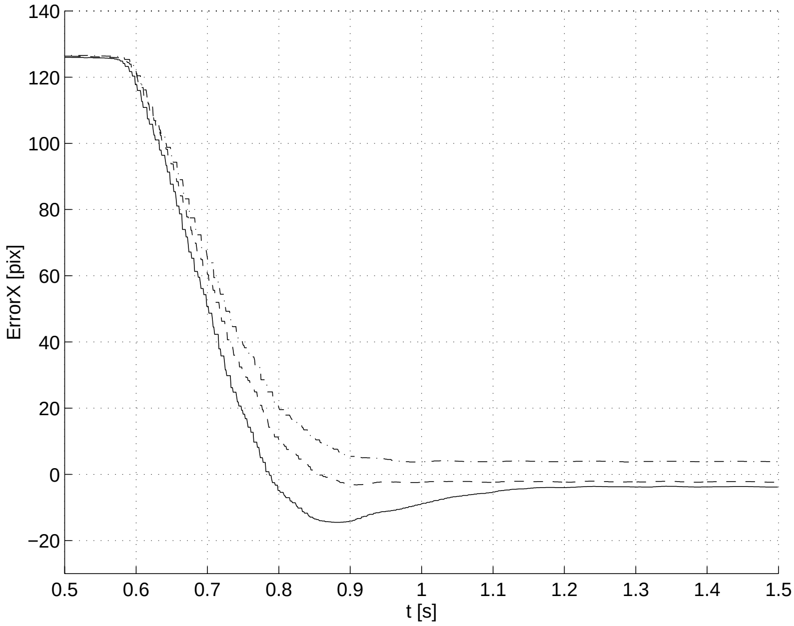

図 5.10: ξ_xの偏差 $k_p = 9e - 4$

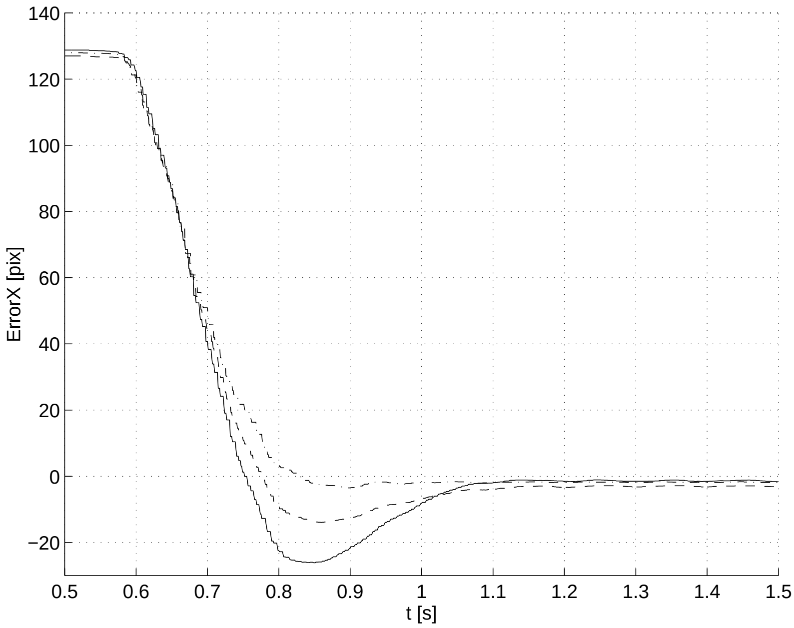

図 5. 11: ξ_xの偏差 $k_p = 11e - 4$

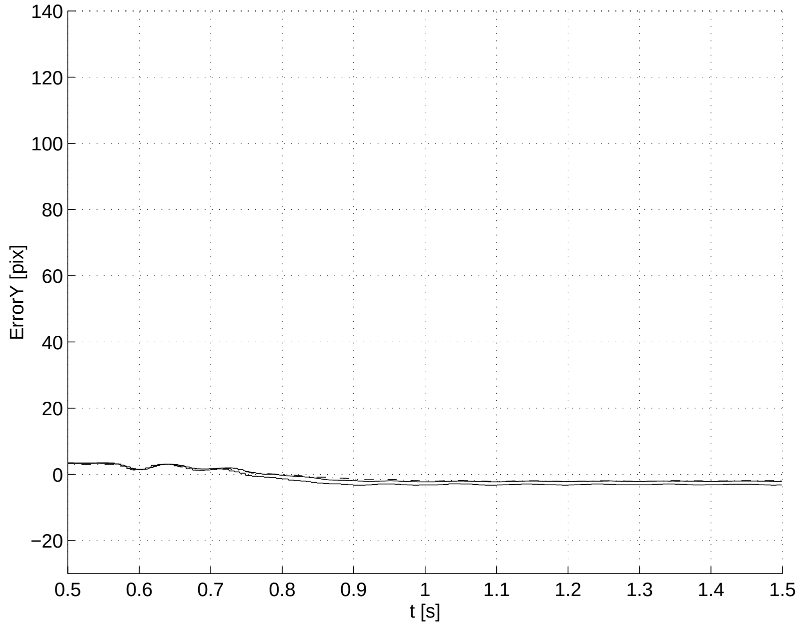

図 5.12: ξ_yの偏差 $k_p = 7e - 4$

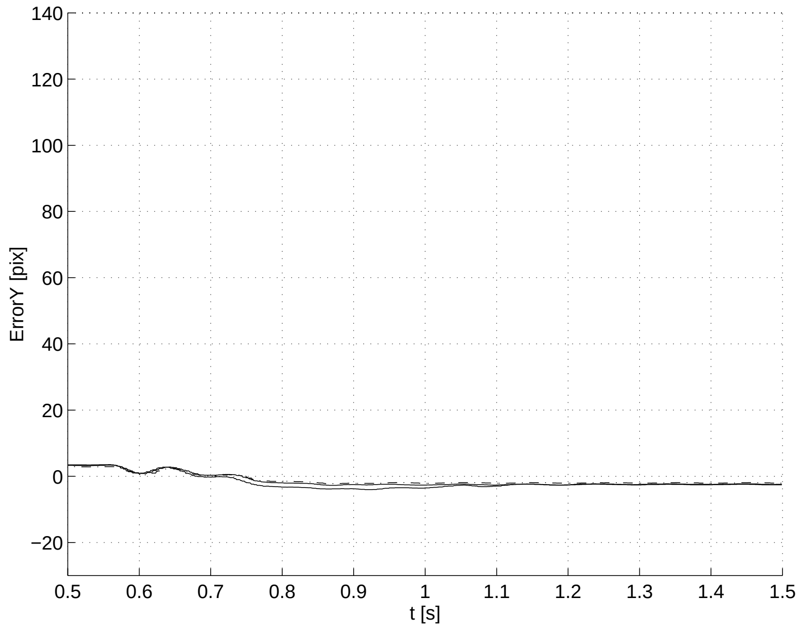

図 5. 13: ξ_yの偏差 $k_p = 9e - 4$

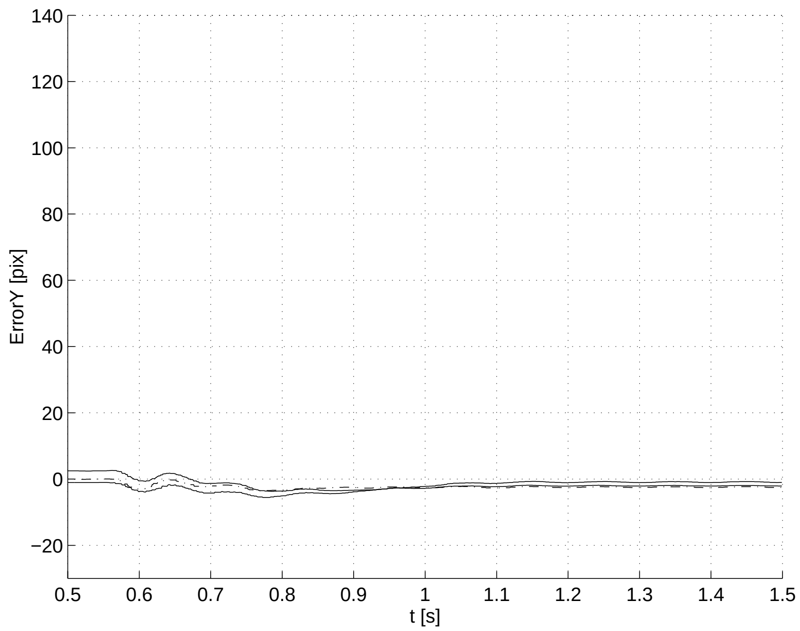

図 5.14: ξ_yの偏差 $k_p = 11e - 4$

5.3.4　考察

今回、3 番を目標としたために、2 軸に関してはほとんど動かず 1 軸が主に変化した。実装した制御則の実証実験の結果、図 5. 7、 5. 7より、ξ_xのエラーは、初期状態 128[pix] で始まり、0.4[s]後には−2[pi x]に落ち着いた。ξ_yのエラーは、初期状態 0[pi x]で始まり、0.4[s]後には−2[pi x]に落ち着いた。ξ_x、ξ_y 方向共に発散せずに$\xi_{xd} = 0$、$\xi_{yd} = 0$ に向けて収束している。これにより、$\boldsymbol{J}^T$ をもちいた制御則の漸近安定性が実験により証明された。

ゲインの影響については、全体の傾向として位置ゲインが低い場合は定常偏差が大きく位置ゲインが大きくなるとオーバーシュートが大きくなってしまう。逆に速度ゲインが小さい場合はオーバーシュートが大きくなり、速度ゲインが大きい場合は定常偏差が大きくなる。プロットしたデータを見てみると、主に画面上での誤差ξ_xに階段上の軌跡が表れている。このステップの周期を調べると約 $8.3m[s]$ となっており、画像のサンプリング時間に一致していることがわかる。これは、現在でのシステムでは関節に指令を出すループが $1m[s]$ で動作しているのに対し、画像のループが $8.3m[s]$ ごとに動作するマルチサンプリングシステムをもちいているためと考えられる。

第 6 章

結論

本研究では、以下のことを行なった。

- 産業用マニピュレータと DSP システム、カメラ、イメージプロセッサをもちいて視覚サーボの実験環境を構築した。
- 提案されている転置ヤコビアンをもちいた重力補償付 PD 制御則を実装し、有効性を検証した。
  - 検証をおこなった結果、視覚サーボシステムの漸近安定性が証明された。これにより、転置ヤコビアンをもちいた重力補償付 PD 制御則は視覚サーボ問題の実装可能な解としての有効性が証明された。

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, 1996.

[2] P. Corke, and M. Good, “Dynamic Effects in Visual Closed-Loop System”, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 5, 1996.

[3] 橋本, 井上, 木村, “ビジュアルサーボイング -非線形制御アプローチ-”, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 2, pp. 263-269, 1995.

[4] R. Kelly, “Robust Asymptotically Stable Visual Servoing of Planar Robots”, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 5, 1996.

[5] 丸山 章, “ロボットダイナミクスを考慮した視覚サーボ”, SFL-E20-1, 1996.

[6] 吉川 恒夫, “ロボット制御基礎論”, コロナ社, pp. 76-78, 1988.

[7] C. Canudas de Wit, B. Siciliano and G. Bastin (Eds), “*Theory of Robot Control*”, Springer, pp. 365-368, 1996.

[8] (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.

[9] (株) 不二越, “分離 BOX 図面”.

[10] 橋本 浩一, “ビジュアル·サーボイング”, 計測と制御, Vol. 35, No. 4, pp. 282-285, 1996.

[11] J. ラ サール, S. レフシェッツ著, 山本 稔 訳, “リアプノフの方法による安定性理論”, 産業図書, 1975.

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, 金沢大学から度々来て御指導頂いた滑川徹助手に心より感謝致します.

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, 御助言を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, 同講座生として同じ日々を過ごし, 共に励まし学んできた博士前期過程 2 年の浅田幸則氏, 大滝直人氏, 菅原健人氏, 奥村雅彦氏, 塩田良治氏, 田中敏氏, 内藤浩行氏, 花房聡人, 松尾誠一氏, Budi Rachmanto 氏, そして同 1 年の皆さんの今後の発展を祈って謝辞と致します.