Title	ロボットマニピュレータのロバスト視覚サーボ --- 厳密なリアプノフ関数によるアプローチ ---
Author(s)	齊藤，亜紀
Citation	
Issue Date	1998-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1110
Rights	
Description	Supervisor:藤田 政之，情報科学研究科，修士

修 士 論 文

ロボットマニピュレータのロバスト視覚サーボ
— 厳密なリアプノフ関数によるアプローチ —

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

齊藤 亜紀

平成 10 年 2 月 13 日

目 次

第 1 章

はじめに

1.1　研究の背景

現在，画像情報をフィードバックすることによりマニピュレータを制御する視覚サーボの研究が注目を浴びている [?]．視覚サーボ制御が可能となったのは，近年の計算機の発展やカメラの進歩などにより，画像処理の高速化が実現されてきたためである．視覚サーボによるマニピュレータ制御の目的は作業環境や目標物の配置などが未知な場合においても視覚センサ（カメラ，レーザセンサなど）を用いてロボットの自律的な制御を行なえるようにすることである。

視覚サーボは目標値の入力方法の違いによって，位置ベース法と画像ベース法の 2 種類に大別される [?]．位置ベース法はカメラからの視覚情報に基づいて対象物体の 3 次元位置・姿勢を計算し，それをロボット制御の目標値入力として与える．対象の位置の計算は 2 次元の画像出力から 3 次元情報に変換されるため，画像ノイズの影響を受けやすく，それによって，位置・姿勢の推定精度が悪くなる．相対姿勢について考える場合には計算時間が二つ目の欠点として挙げられる。しかし、最近の研究では Kalman filter などを用いることによって推定精度の向上が行なわれている．一方，画像ベース法は画像面上の特徴量を直接利用し，それをフィードバックすることによりロボットを制御する．画像ベース法は対象の位置・姿勢の推定を必要としないため、高速処理が可能であり，対象の特徴量（線分の長さ，面積など）を直接利用するため，対象およびマニピュレータのモデルの不確かさには影響されにくい．画像情報からさらに対象物の位置を求める必要がないために，計算時間などを考えた場合には，画像ベース法の方が実時間制御を行なうのに適し

た方法といえる．位置ベース法，画像ベース法の両方において様々な研究が行なわれている [?, ?].

視覚サーボ制御を行なう場合，フィードバックループにマニピュレータがはいっているために視覚サーボシステムは必然的にマニピュレータの動特性の影響を受ける．したがって，動特性を考慮する必要がある．また，マニピュレータのキネマティクスもヤコビアンの導出などのために同様に重要となる．Brockett [?] は群論に基づき，剛体の回転運動および並進運動を行列の指数関数で表すという新しい表現形式を提案し，マニピュレータのキネマティクスの指数関数表現によるモデル化を行なった．これにより，キネマティクスやダイナミクスがより数学的に公式化され，計算の簡素化や運動の幾何学的な理解などのいくつかの利点が得られることが知られている．

これまでの視覚サーボの多くの研究においては，視覚サーボ制御を行なうさいに重要となるマニピュレータダイナミクスは無視され，線形で非干渉なシステムを対象に考察が行なわれてきた．橋本ら [?] はフィードバック線形化に基づき，特徴量空間でのマニピュレータダイナミクスを考慮した視覚サーボ制御法を提案した．また，線形化されたシステムは本質的に指数安定であるといえる．しかし，フィードバック線形化による制御則は構造が複雑で，計算量が増大することが従来から指摘されている．

最近になり，Kelly ら [?] は固定カメラの平面マニピュレータに対して，また，丸山ら [?] は eye-in-hand 構造のマニピュレータに対して，リアプノフ法に基づく視覚サーボ制御法を提案した．この制御法はフィードバック線形化に基づくものに比べて構造が単純であり，また，マニピュレータダイナミクスの非線形項の正確な消去を必要としないため，ダイナミクスに存在する不確かさに対してロバストとなることが知られている．しかし，安定性の解析には LaSalle の定理を必要とするため収束の速度などの厳密な安定性の解析を行うことができない．

また，リアプノフ法に基づく方法は正確なマニピュレータのモデルを必要とする．しかし，一般にマニピュレータは理想的な仮定をおいてモデル化が行なわれ，実際のシステムへの実現を考えた場合，多くの問題が生じてしまう．マニピュレータモデルにはリンク質量や慣性モーメント，質量中心位置などのパラメータが含まれており，また，カメラモデルには焦点距離などのパラメータが含まれるが，理想的なモデルにはそれらのパラメータ誤差やモデル化できない動特性などが存在している．したがって，これらの不確かさが存在する場合に対してもロバストな制御を行なう必要がある．

一方，関節空間でのマニピュレータの制御に関する研究においてもマニピュレータのダイナミクスを補償する研究が古くから行なわれているが，特に近年，リアプノフ法に基づく方法が注目されている．一般的にリアプノフ関数としてはシステムの総エネルギー関数が用いられているが，有本 [?] はそのリアプノフ関数に交差項を加えた新たなスカラー関数を用いることによって，漸近安定性ををリアプノフの直接法によって証明しており，さらには指数安定性までも証明している．Kelly らもまた，交差項を加えたリアプノフ関数を適応制御法の設計に適用している．この交差項を加えたリアプノフ関数はそれ自体でシステムの漸近安定性を証明でき，さらには指数安定性までも証明可能である．このことから，“厳密なリアプノフ関数” と呼ばれている．

また，モデルの不確かさを考慮した場合にも，Spong [?] はダイナミクスの各項の線形性を利用して，不確かさをパラメータベクトルで表して，その取り扱いを容易にする方法を提案している．そして，ダイナミクス全体をリグレッサとそのパラメータベクトルとによる線形表現を行ない，それを含むロバス制御則を構成し，モデルの不確かさに対処するロバスト制御法の提案を行なっている．有本 [?] は DD ロボットの制御に重力補償付きの PD 制御を用いて，重力項のパラメトリックな不確かさを考え，Spong と同様にリグレッサ表現を用いて，不確かさの補償に対して適応制御法を用いることによって，不確かさが存在するモデルに対処している．

この関節空間において提案された方法を視覚サーボにも適用することによって，リアプノフの直接法による指数安定性までの証明およびモデルの不確かさを考慮した場合でのロバストな制御が可能になることが期待される．

1.2　研究の目的

本研究では，回転関節のみを有した 2 自由度の平面マニピュレータの画像ベース法による視覚サーボ制御について考察する．システムはカメラがマニピュレータの手先効果器上に取り付けられた eye-in-hand 構造をしているものとする．マニピュレータに与える制御目標をマニピュレータの手先位置，すなわちカメラの位置が静止目標対象物の画像面上の位置に一致するようにマニピュレータを平面上で移動させることとする．

マニピュレータのキネマティクスやカメラモデルの指数関数表現を用いたモデリングを行ない，マニピュレータのダイナミクスを考慮した制御が行なえるリアプノフ法に基づいた視覚サーボ制御法を提案し，安定性の証明を行なう．その際には，“厳密なリアプノフ

関数” を用いる．そして，漸近安定性のみならず指数安定性を示す．また，理想的なモデルに対してだけではなく，モデルのパラメトリックな不確かさを考慮した場合についても考察し，ロバストな制御法の提案を行なう．

さらに，各制御法に関してシミュレーションを行なうことにより，システムの妥当性の検証を行なう．

マニピュレータのキネマティクスやカメラモデルを指数関数表現を用いて表すことにより，指数関数の性質および 2 次元回転群などを含むリー群論に基づいた考察が可能となる．

1.3 構成

本論文の構成はつぎのようになっている．

第 2 章では，視覚サーボシステムの各モデルについて述べる．マニピュレータダイナミクスはラグランジュの方程式に基づいてモデル化されており，その性質もラグランジュの方程式からくるものである．この性質を活かして，第 3 章で制御則の提案を行なうこととなる．マニピュレータキネマティクスは従来的な Denavit-Hertenberg の表記法を用いずに，Brckett の提案による指数関数表現法を用いてモデル化を行なう．この表現法を用いることにより，指数関数の性質やリー群の性質を利用した安定性解析が行なえる．視覚サーボ制御で重要となるカメラモデルには透視変換モデルを採用することとする．

第 3 章では，視覚サーボ問題の定式化を行ない，視覚サーボ制御則の提案を行なう．また，その制御則がシステムに対して，漸近安定であることの証明をリアプノフ法に基づいて行なう．

第 4 章では，第 3 章で用いたリアプノフ関数に交差項を導入することにより，LaSalle の定理を用いずに，リアプノフの直接法のみで安定性の証明を行なう．交差項を導入した “厳密なリアプノフ関数” を用いることにより，平衡点への収束の速度を取り扱うことが可能となり，指数安定性の証明が行なえる．

第 5 章では，モデルの不確かさ，特にマニピュレータダイナミクスの重力項の不確かさを考慮した場合についてのロバスト制御について考える．モデルの不確かさとしては，マニピュレータのリンク質量，リンク長さ，慣性モーメントなどのパラメトリックな不確かさとする．この時，重力項の不確かさが容易に取り扱うことができるように，リグレッサと物理パラメータを用いた重力項の線形表現を行なう．また，制御則に補助的な付加入

力を加えることにより，不確かさの影響を抑え，システムの一様終局有界性を保証する制御を行なう．

第 4 章，5 章では，それぞれの場合において，シミュレーションを行ない，システムに対する妥当性を検証している．

最後に，第 6 章において本研究のまとめと考察を行なう．

第 2 章

視覚サーボシステム

本研究では，図 2.1 で与えられるような 2 自由度の平面マニピュレータについて考える．視覚サーボシステムに対して以下の仮定をおく．

- マニピュレータはワールド座標系$\Sigma_w = [\ X_w\ Y_w\ Z_w\ ]$に固定され，2 次元平面 X_w-Y_w 上を動くものとする．したがって，静止対象物との Z_w方向の距離は一定に保たれる．
- カメラ構造は eye-in-hand 構造と呼ばれるマニピュレータの手先効果器上にカメラが取り付けられた構造をしている．したがって，手先効果器とカメラの座標系は同一のものとみなすことができる．$\Sigma_c = [\ X_c\ Y_c\ Z_c\ ]$でカメラ座標系および，手先効果器の座標系を表すものとする．Z_cはカメラの光軸であり，Z_w軸と一致している．
- カメラの画像面上の座標系を$\Sigma_i = [\ X_i\ Y_i\ ]$で表す．座標系$\Sigma_i$の原点は光軸と画像面との交点とし，$X_i$-$Y_i$平面は X_w-Y_w平面と平行で，その間の距離は焦点距離λである．
- 目標とする対象物はワールド座標系に対して$[\ p_o^T\ \ z_o\ ]^T$において静止している．ここで，$p_o^T = [\ p_{ox}\ p_{oy}\ ]^T$，$z_o > \lambda$である．
- 静止対象物は透視変換を用いて，3 次元情報から 2 次元情報へと変換されるが，画像処理された後の対象物の座標は図 2.1 にあるようにカメラ画像面上の $f(q) \in \Re^2$ となる．
- eye-in-hand 構造をしているために，カメラの座標はマニピュレータの手先効果器の座標と一致し，ワールド座標系に対して，$[\ p_r^T\ \ z_r\ ]^T$で与えられる．ここで，$p_r^T = [\ p_{rx}\ p_{ry}\ ]^T$，$z_r = 0$ である．

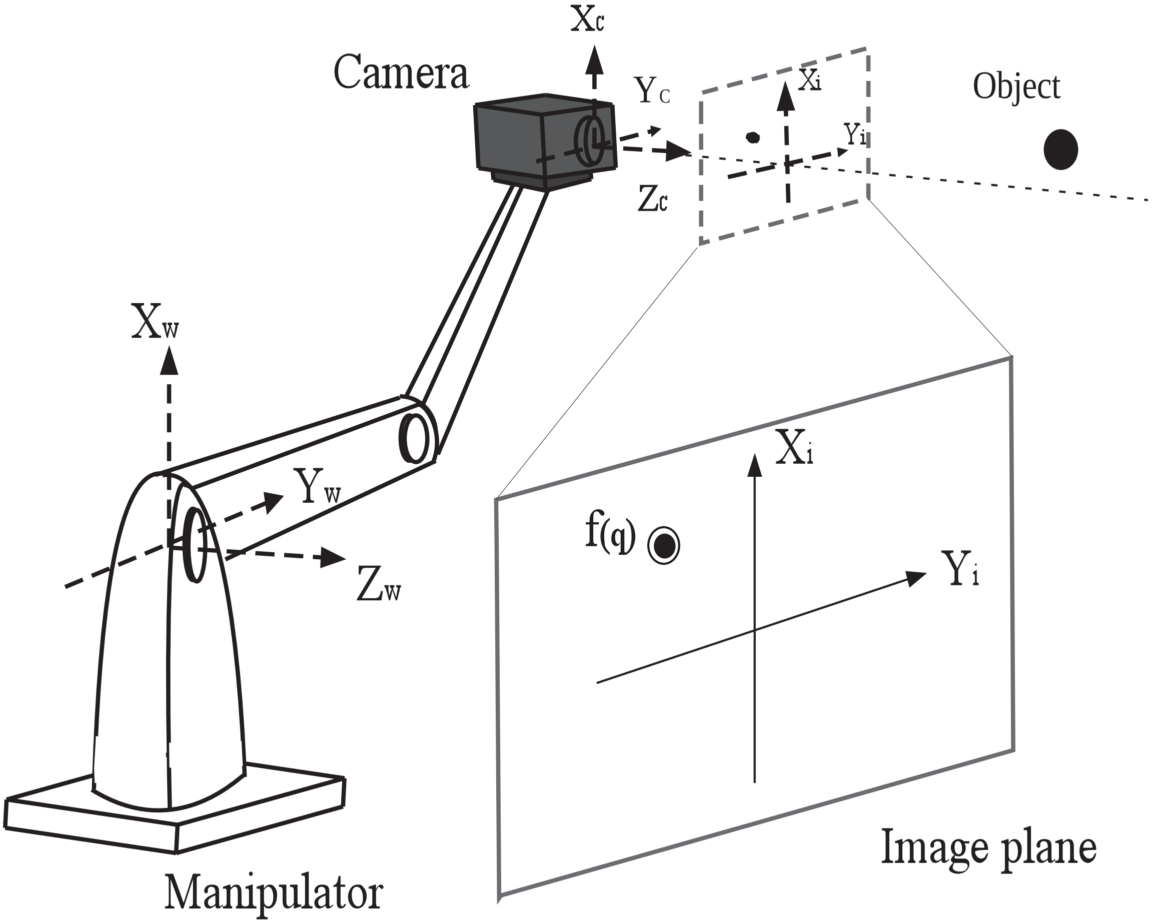

図 2.1: Visual Servo System

2.1 ロボットマニピュレータ

本節では，マニピュレータの制御を行なうときに重要となるマニピュレータのダイナミクスについて説明する．ダイナミクスを表す運動方程式は，ラグランジュの運動方程式に基づくものである．また，カメラモデルの導出を行なうときに必要となるマニピュレータのキネマティクスの説明も同様に行なう．ここでは，キネマティクスの表現形式にDenabit-Hartenberg 形式ではなく，リー群論に基づく指数関数表現形式を用いる．

2.1.1 マニピュレータダイナミクス

一般にマニピュレータのダイナミクスはつぎのような非線形微分方程式で表すことができる [?].

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \tag{2.1}$$

ここで，$q = [\ q_1 \quad q_2\ ]^T$は関節変数ベクトル，$M(q) \in \Re^{2\times 2}$ は対称かつ正定な慣性行列，$C(q, \dot{q})\dot{q} \in \Re^2$はコリオリ・遠心力ベクトル，$g(q) \in \Re^2$は重力ベクトル，$\tau \in \Re^2$ は制御入力ベクトルである．ここでは摩擦力は存在しないと仮定する．

ラグランジュの運動方程式の持つ性質より，ダイナミクスはその性質としてはつぎのものをもつ．

Property 2.1: 行列 $M(q)$ は任意のベクトル $x \in \Re^2$に対して

$$x^T M(q)x \leq \lambda_M \|x\|^2 \tag{2.2}$$

を満足する．ここで，λ_Mは qに依存しない正のスカラー値である．

Property 2.2: 行列 $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ は歪対象行列である．つまり，任意のベクトル $x \in \Re^2$に対して，

$$x^T(\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q}))x = 0 \tag{2.3}$$

となる．

Property 2.3: 適当な定数 C_M ,G_Mが存在し，すべての q ,$\dot{q}$に対し，つぎの関係が成立する．

$$||C(q, \dot{q})|| \quad \leq \quad C_M||\dot{q}|| \tag{2.4}$$

$$||g(q)|| \ \leq \ G_M \tag{2.5}$$

Property 2.4: $M(q)$ の時間微分はつぎの関係を満足する．

$$||\dot{M}(q)|| \ \leq \ \lambda_{Md}\|\dot{q}\| \tag{2.6}$$

ここで，λ_{Md}は正のスカラー値である．

2.1.2 マニピュレータキネマティクス

ワールド座標系Σ_wに対する 2 自由度のマニピュレータのキネマティクスは指数関数表現を用いたとき，つぎのように与えられる [?]．

$$g_{wc}(q_1, q_2) = e^{\hat{\xi}_{r1}} e^{\hat{\xi}_{r2}} g_{wc}(0) \tag{2.7}$$

ここで，$\xi_{ri} = [\ p_{ri}^T \ \ q_i\ ]^T$は各関節軸を規定するベクトルである．$p_{ri} = [\ p_{rxi} \ \ p_{ryi}\ ]^T$は X_w-Y_w平面における各関節軸の位置を，$q_i \in \Re$は各関節角を表す．

また，ワールド座標系Σ_wに対するカメラの位置・姿勢を規定するベクトル$\xi_{wc}(q)$ はつぎのように与えられる．

$$\xi_{wc}(q) := \begin{bmatrix} p_{rx}(q) \\ p_{ry}(q) \\ \theta_r(q) \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

ここで，$p_r = [p_{rx} \ \ p_{ry}]^T$はカメラのワールド座標系の X_w-Y_w平面における位置を表し，θ_rは z_w軸に関する回転角を表す．

上述のパラメータを用いることにより，ワールド座標Σ_w に対するマニピュレータのキネマティクス $g_{wc}(q) \in SE(2)$ は

$$g_{wc}(q) = \begin{bmatrix} e^{\hat{\theta}_r(q)} & p_r(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

のように，同次変換表現で表すことができる [?]．

ここで以下の定義を行なう．

Definition 2.1: 任意のスカラー $a \in \Re$に対して，

$$\hat{a} := \begin{bmatrix} 0 & -a \\ a & 0 \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

とする．

Definition 2.2: 2 次元回転群はつぎのように定義される．

$$SO(2) := \{R \in \Re^{2\times 2} \ \mid \ RR^T = R^T R = I \ \ , \ \ \det(R) = +1\} \tag{2.11}$$

また，スカラー a に対して，

$$so(2) := \{\hat{a} \in \Re^{2\times 2} \ \mid \ \hat{a}^T = -\hat{a}\} \tag{2.12}$$

となる．ここで$\hat{a}$は歪対称行列を表す．

また，$SO(2)$ にはつぎの性質がある．

Property 2.5: $SO(2)$ の任意の元 Rは

$$\dot{R}R^T \ \in \ so(2) \ \ , \ \ R^T\dot{R} \ \in \ so(2) \tag{2.13}$$

を満足する．また，任意のスカラー a に対して

$$e^{\hat{a}} \ \in \ SO(2) \tag{2.14}$$

が成立する．

行列 $R \in SO(2)$ とベクトル $p \in \Re^n$が与えられたとき，写像 $g : \Re^n \rightarrow \Re^n$の集合として

$$SE(2) := \{ \ (R, p) \ \mid \ R \in SO(2) \ \ , \ \ p \in \Re^2 \ \} \tag{2.15}$$

が定義できる．

マニピュレータの手先の速度と関節変数との関係は次のようになる．

$$\dot{p_r}(q) \ = \ \frac{\partial p_r}{\partial q}\dot{q} := J_r(q)\dot{q} \tag{2.16}$$

$$\dot{\theta}_r(q) \ = \ \frac{\partial \theta_r(q)}{\partial q}\dot{q} := J_\theta(q)\dot{q} \tag{2.17}$$

ヤコビアンの各要素は関節角度 qの三角関数で構成されていることより次の性質を満足することは明らかである．

Property 2.6: ヤコビアン J_rおよびその時間微分の最大特異値には qによらない上限値が存在する．すなわち，

$$\bar{\sigma}(J_r(q)) \ \leq \ j_M, \tag{2.18}$$

$$\bar{\sigma}(\frac{d}{dt}J_r(q)) \ \leq \ j_{Md}\|\dot{q}\| \tag{2.19}$$

が成立する．ここで，j_M，j_{Md}はある有限なスカラー値である

2.2　カメラモデル

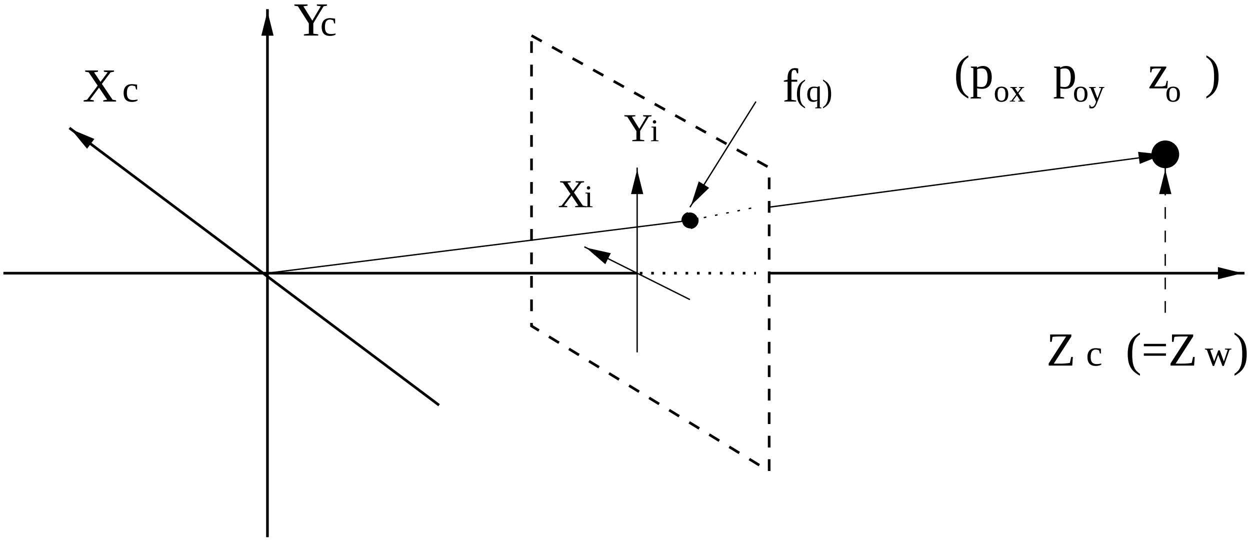

図 2.2: The coordinate frame for the camera system

カメラのモデルを図 2.2 に示す．カメラ焦点を原点におき，カメラの視線方向に Z_c軸をおいた．座標系Σ_cに対して，画像面 X_iY_iを $z_c = \lambda$なる平面にとる．

カメラの写像変換モデルとして，透視変換モデルを利用する．まず，静止対象点の座標系をワールド座標系からカメラ座標系への変換を行なう必要がある．カメラ座標系Σ_cにおける対象点の位置 $[\ p_{ro}^T\ z_{ro}\ ]^T$は，

$$p_{ro} = e^{-\hat{\theta}_r}(\,p_o - p_r(q)\,) \tag{2.20}$$

$$z_{ro} = z_o \tag{2.21}$$

となる．

対象点の画像面Σ_iにおける座標 p_iは，透視変換の関係式より，

$$p_i = \frac{\lambda}{z}\,p_{ro} \tag{2.22}$$

となる．ここで，$z = z_{ro} = z_o > 0$ は一定値である．Σ_i上での座標から画像処理された点像への変換は

$$f = \begin{bmatrix} \epsilon_x & 0 \\ 0 & \epsilon_y \end{bmatrix} p_i \tag{2.23}$$

となる．ここで，$\epsilon_x > 0$, $\epsilon_y > 0$ はそれぞれ X_i, Y_i軸方向のスケーリングファクタである．簡単化のためにカメラパラメータ$\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon > 0$ とする．

式 (2.20)，(2.22)，(2.23) より，対象点の画像処理後の座標 $f(q)$ は

$$f(q) = se^{-\hat{\theta}_r}(\, p_o - p_r(q)\,) \quad , \quad s := \frac{\epsilon\lambda}{z} \tag{2.24}$$

となる．

第 3 章

視覚サーボシステムを用いた定置制御

ここでは，視覚サーボ問題を定式化し，その問題を解くための制御則の提案を行なう．さらに，リアプノフ法に基づいて安定性の解析を行なう．

3.1 視覚サーボ問題

本章および次章で取り扱う視覚サーボ問題としては，ワールド座標系Σ_wに対して静止している対象物の X_w-Y_w平面上の位置にマニピュレータの手先効果器，つまり，カメラの X_w-Y_w平面上の位置が一致するようマニピュレータを移動させることを目的とする．すなわち，

$$p_o - p_r \rightarrow 0, \tag{3.1}$$

$$\dot{p}_o - \dot{p}_r \rightarrow 0 \tag{3.2}$$

を $t \rightarrow \infty$ で達成させることと等価である．

式 (3.1) を満足するには，カメラの透視変換モデルの式（2.24）からも，$f(q) \rightarrow 0$ を達成すればよいことは明らかである．

また，式 (3.2) を満足するには，対象の静止を仮定していることから，

$$\dot{p}_o - \dot{p}_r = -\frac{\partial p_r}{\partial q}\dot{q} = -J_r(q)\dot{q} \tag{3.3}$$

となり，$\dot{q} \rightarrow 0$ を達成すればよいことがわかる．

以上から，制御目標として，$f(q) \to 0$，$\dot{q} \to 0$ を設定すればよい．よって，以下のように制御問題を定式化する．

[視覚サーボ問題]

モデル化した eye-in-hand 構造において，$t\to\infty$ としたときに

$$f(q) \to 0, \ \ \dot{q} \to 0 \tag{3.4}$$

を達成する制御入力τを求めよ．

3.2 リアプノフ法に基づく安定性解析

前節で与えた視覚サーボ問題に対して，次のような制御則を提案する．

$$\tau = k_p J_r^T(q) e^{\hat{\theta}_r} f(q) - k_v \dot{q} + g(q) \tag{3.5}$$

ここで，ヤコビアン J_rはすべての qに対してフルランクであると仮定しており，また，k_p，k_vは正のスカラーである．この制御則は構造の非常に簡単な重力補償付きの PD 制御則からなっており，実機への実装を行なうときには非常に容易であるという利点がある．

制御則 (3.5) を用いた場合のシステムの閉ループ系は，式 (2.1) および式 (3.5) より，

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + k_v\dot{q} - k_p J_R^T(q) e^{\theta_r} f(q) = 0 \tag{3.6}$$

となる．

制御則 (3.5) に対して，視覚サーボシステムが安定であるか議論を行なう前に，まず LaSalle の定理について述べておく．

[LaSalle の定理]

状態ベクトルを $x \in \Re^m$として，つぎの微分方程式を考える．

$$\dot{x} = h(x) \tag{3.7}$$

空間$\Re^m$のなかにあるコンパクトな集合Ωがあって，Ωから出発する解はずっとΩにとどまっているとする．また，連続な偏微分をもつような正定値関数

$$V(x) \ > \ 0 \ (x\neq 0), \ \ V(0) = 0 \tag{3.8}$$

があって，式 (3.7) の解軌道にそった時間微分がΩにおいて正にはならないとする．すなわち，

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^{m} \frac{\partial V}{\partial x_i} h_i(x) \leq 0 \tag{3.9}$$

とする．つぎに，$\dot{V} = 0$ を満足するΩの点の集まりを Eで表し，Eにおける最大不変集合を Mで表す．そのとき，Ωの中から出発する式 (3.7) のすべての解は，$t \to \infty$ のときかぎりなく集合 Mに近づく．ここに，Mが式 (3.7) の不変集合であるとは，M の任意の点から出発した解軌道はすべて Mに含まれることをいう．

制御則 (3.5) を用いたシステムの安定性を証明するために用いるリアプノフ関数の候補として，つぎのものを考える．

$$V(x) = \frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q} + \frac{k_p}{2s}\|f(q)\|^2 \tag{3.10}$$

この関数は $x{\neq}0$ で $V(x) > 0$，$x = 0$ で $V(0) = 0$ となっている．また，

$$x = [\ \dot{q}^T \quad f^T(q)\ ]^T \tag{3.11}$$

は状態変数である．

式 (3.10) を用いて安定性の解析を行なう前に，式 (2.24) の時間微分を行なっておく．

$$\begin{aligned} \dot{f}(q) &= -se^{-\hat{\theta}_r}\dot{p}_r + (\frac{d}{dt}e^{-\hat{\theta}_r})e^{\hat{\theta}_r}f(q) && (3.12) \\ &= -se^{-\hat{\theta}_r}J_r(q)\dot{q} + (\frac{d}{dt}e^{-\hat{\theta}_r})e^{\hat{\theta}_r}f(q) && (3.13) \end{aligned}$$

式 (3.10) を閉ループ系 (3.6) の解軌道にそって，時間微分すると，

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \dot{q}^T M(q)\ddot{q} + \frac{1}{2}\dot{q}^T \dot{M}(q)\dot{q} + \frac{k_p}{2s}f(q)^T\dot{f}(q) && (3.14) \\ &= \dot{q}(\,-C(q,\dot{q})\dot{q} - k_v\dot{q} + k_pJ_r^T(q)e^{\hat{\theta}_r}f(q)\,) + \frac{1}{2}\dot{q}^T\dot{M}(q)\dot{q} && (3.15) \\ &\quad +\frac{k_p}{s}f(q)^T(\,-se^{-\hat{\theta}_r}J_r(q)\dot{q} + (\,\frac{d}{dt}e^{-\hat{\theta}_r})\,e^{\hat{\theta}_r}f(q)\,) && (3.16) \\ &= -k_v||\dot{q}||^2 + k_p\dot{q}J_r^T(q)e^{\hat{\theta}_r}f(q) - k_pf(q)^Te^{-\hat{\theta}_r}J_r(q)\dot{q} && (3.17) \\ &= -k_v||\dot{q}||^2 \leq 0 && (3.18) \end{aligned}$$

となることから，式 (3.10) はリアプノフ関数である．ここで，LaSalle の定理を用いて，平衡点 $x = 0$ は漸近安定であることが証明される． □

Remark： 制御則（3.5）に対して，式（3.10）のリアプノフ関数を考えた場合，直接漸近安定性を示すことができず，LaSalle の定理を用いた．また，LaSalle の定理を用いた解析では収束の速度を扱うことができない．したがって，式（3.10) のスカラー関数は厳密な意味でのリアプノフ関数とはいえない．

第 4 章

厳密なリアプノフ関数を用いた安定性解析

3 章では，リアプノフ関数 (3.7) を用いた安定性解析で収束速度を議論することができなかった．したがって，どのように平衡点に収束するのかはわからない．そこで，本章ではリアプノフ関数 (3.7) にあらたに交差項の導入を行ない，新しいリアプノフ関数を設定する．交差項を加えることにより，LaSalle の定理を用いずに直接，漸近安定性を示すことができ，さらに，指数安定性を示すことが可能となる．

4.1 厳密なリアプノフ関数の提案

式 (3.7) に交差項を加えて，つぎのような新しいリアプノフ関数の候補を考える．

$$\begin{aligned} W(x) &= V(x) + \alpha\frac{k_v}{2s}\|f(q)\|^2 - \alpha f(q)^T e^{-\hat{\theta}_r} J_r(q)M(q)\dot{q} \\ &= \frac{1}{2}x^T P x \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$P = \begin{bmatrix} M(q) & -\alpha M(q) J_r^T(q) e^{\hat{\theta}_r} \\ -\alpha e^{-\hat{\theta}_r} J_r(q) M(q) & \frac{k_p + \alpha k_v}{s} I \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

ここで$\alpha > 0$ は十分小さなスカラ値とする．なお，$W(x)$ は $k_v > \alpha s j_M^2 \lambda_M$が成り立つ場合に正定関数となる．

閉ループ系 (3.6) の解軌道に沿って $W(x)$ の時間微分を行うと，つぎのようになる．

$$\dot{W}(x) = \dot{V}(x) + \alpha\frac{k_v}{s} f^T(q)\dot{f}(q) - \alpha \dot{f}^T(q) e^{-\hat{\theta}_r} J_R(q) M(q)\dot{q}$$

$$
\begin{aligned}
& -\alpha f^T(q)\frac{d}{dt}(\, e^{-\hat{\theta}_r}J_R(q)M(q)\,)\dot{q} - \alpha f^T(q)e^{-\hat{\theta}_r}J_R(q)M(q)\ddot{q} \\
= \; & -k_v\|\dot{q}\|^2 + \alpha\frac{k_v}{s}f^T(q)(\,-se^{-\hat{\theta}_r}J_r(q)\dot{q} + \underline{(\,\frac{d}{dt}e^{-\hat{\theta}_r}\,)e^{\hat{\theta}_r}}f(q) \\
& -\alpha(-s\dot{q}^TJ_r^T(q)e^{\hat{\theta}_r} + f^T(q)e^{-\hat{\theta}_r}(\,\frac{d}{dt}e^{\hat{\theta}_r})\,)e^{-\hat{\theta}_r}J_r(q)M(q)\dot{q} \\
& -\alpha f^T(q)\frac{d}{dt}(\, e^{-\hat{\theta}_r}J_r(q)M(q)\,)\dot{q} \\
& -\alpha f^T(q)e^{-\hat{\theta}_r}J_r(q)(\,-C(q,\dot{q})\dot{q} - k_v\dot{q} + k_pJ_r^T(q)e^{\hat{\theta}_r}f(q)\,) \\
= \; & -k_v\|\dot{q}\|^2 + \alpha s\dot{q}^TJ_r^T(q)J_r(q)M(q)\dot{q} - \alpha f^T(q)e^{-\hat{\theta}_r}(\,\frac{d}{dt}e^{\hat{\theta}_r}\,)e^{-\hat{\theta}_r}J_r(q)M(q)\dot{q} \\
& -\alpha f^T(q)\frac{d}{dt}(\, e^{-\hat{\theta}_r}J_r(q)M(q)\,)\dot{q} + \alpha f^T(q)e^{-\hat{\theta}_r}C(q,\dot{q})\dot{q} \\
& -\alpha k_pf^T(q)e^{-\hat{\theta}_r}J_r(q)J_r^T(q)e^{\hat{\theta}_r}f(q) \\
\leq \; & -k_v\|\dot{q}\|^2 + \alpha s\dot{q}^TJ_r^T(q)J_r(q)M(q)\dot{q} \\
& -\alpha k_pf^T(q)e^{-\hat{\theta}_r}J_r(q)J_r^T(q)e^{\hat{\theta}_r}f(q) + \alpha\beta\|f(q)\|\|\dot{q}\|^2 \\
\leq \; & -\dot{q}^T(\,k_v - \alpha(\,sj_M^2\lambda_M - \beta||f(q)||\,)\,)\dot{q} \\
& -\alpha k_pf^T(q)e^{-\hat{\theta}_r}J_R(q)J_r^T(q)e^{\hat{\theta}_r}f(q)
\end{aligned}
\tag{4.3}
$$

$$
\beta \;:=\; 2j_M\lambda_M\sqrt{n} + j_MC_M + j_{Md}\lambda_M + j_M\lambda_{Md} \tag{4.4}
$$

つぎに，すべての qに対して

$$
\frac{1}{2}k_v \geq \alpha(sj_M^2\lambda_M + \beta f_{max}) \tag{4.5}
$$

が成り立つとすると，

$$
\dot{W}(x) \leq \; -\frac{1}{2}(\,k_v\|\dot{q}\|^2 + \alpha k_pj_m^2\|f(q)\|^2\,) \leq 0 \tag{4.6}
$$

となる．ここで，J_rの最小特異値に qによらない下限値 j_mが存在すると仮定していることに注意する．以上から，漸近安定性がリアプノフの直接法のみで示せることがわかる．

4.2 指数安定性

前節までの結果からつぎの定理が考えられる．

Theorem 4.1: つぎの制御則について考える．

$$\tau = k_p J_r^T(q) e^{\hat{\theta}_r} f(q) - k_v \dot{q} + g(q) \tag{4.7}$$

このとき，J_rがフルランクであり，$\|f(q)\| \leq \frac{k_v - 2\alpha s j_M^2 \lambda_M}{2\alpha\beta}$，$k_v > 2\alpha s j_M^2 \lambda_M$が満足される場合に閉ループ系の平衡点 $x = 0$ は局所的に指数安定となる．ここで，k_pは正のスカラーである． □

ここで，指数的安定とは自律システムを対象とした場合に次のように定義されるものである [?].

Definition 4.1 指数安定 ： 時間に依存しない２つの正の数αとλが存在し，原点の周りのある領域において，次のような初期状態が存在するならば，平衡点は指数安定である．

$$\|x(t)\| \leq \alpha \exp(-\lambda t) \|x(0)\| \tag{4.8}$$

□

この指数安定の定義をふまえて，**Theorem 4.1** の証明を行なう．

Proof ： $W(x)$ が指数関数的に収束する，つまり，$W(x)$ がある値の指数をとったものでおさえられることを調べる．(4.6) および，条件式より，$\dot{W}(x)$ が $V(x)$ のある係数倍でおさえられることがわかる．そこで$\dot{W}(x)$，$W(x)$ と $V(x)$ の関係を考えたとき，

$$-\dot{W}(x) \ \geq \ \alpha s j_m^2 V \ \geq \ \frac{2}{3} \alpha s j_m^2 W(x) \tag{4.9}$$

となる．ただし，

$$\frac{1}{2} V(x) - \alpha(\frac{k_v}{2s} \|f\|^2 - f^T e^{-\hat{\theta}_r} J_r(q) M(q) \dot{q}) \ \geq \ 0 \tag{4.10}$$

が成り立つように k_vが選ばれているとする．式 (4.9) より，

$$W(x) \ \leq \ e^{-\frac{2}{3}\alpha s j_m^2 t} W(0) \tag{4.11}$$

となり，$W(x)$ がその初期値より指数関数的に収束することから指数安定性が示される．
□

4.3 シミュレーション

図 4.1 のように各物理パラメータの設定された 2 自由度の平面マニピュレータに対して，本章で提案した制御則が妥当なものであるかを検証するためにシミュレーションを行なう．シミュレーションツールとして，SPARK Station 上の行列演算ソフトウェアである MATLAB（ The Math Works Inc. ）を用いた．図 4.1 にはマニピュレータのみを示した．ここで，m_1, m_2はリンク質量，l_1, l_2はリンク長さ，r_1, r_2はリンクの質量中心までの長さ，I_1, I_2は慣性モーメントである

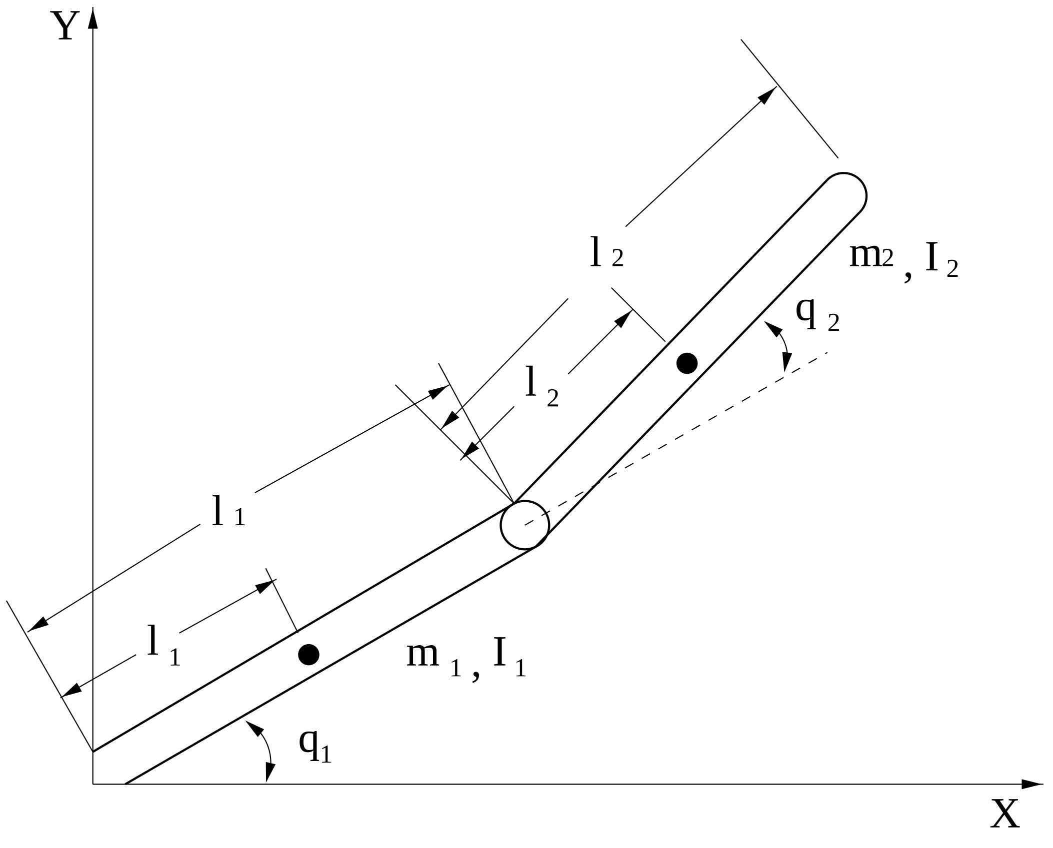

図 4.1: Two-link planar robot

4.3.1　パラメータ設定

SICE 標準マニピュレータを例にとり，各パラメータの値を表 4.1 のように定める [?].

表 3.1　ロボットパラメータ

$m_1(kg)$	$m_2(kg)$	$l_1(m)$	$l_2(m)$	$r_1(m)$	$r_2(m)$	$I_1(kgm^2)$	$I_2(kgm^2)$
12.27	2.083	0.200	0.200	0.063	0.080	0.1149	0.0144

カメラの内部パラメータからなる s の値を $s = 1172$ とする．

マニピュレータのダイナミクスが式 (2.1) で与えられたとき，各項はつぎのようになる．

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_1r_1^2 + m_2(l_1^2 + r_2^2 + 2l_1r_2\cos q_2) + I_1 + I_2 & m_2(r_2^2 + l_1r_2\cos q_2) + I_2 \\ m_2(r_2^2 + l_1r_2\cos q_2) + I_2 & m_2r_2^2 + I_2 \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2l_1r_2\dot{q}_2\sin q_2 & -m_2l_1r_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)\sin q_2 \\ m_2l_1r_2\dot{q}_2\sin q_2 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

$$g(q) = \begin{bmatrix} (m_1r_1\cos q_1 + m_2l_1\cos q_1 + m_2r_2\cos(q_1 + q_2))g \\ m_2r_2\cos(q_1 + q_2)g \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

4.3.2　シミュレーション結果

目標対象物の位置を

$$\begin{bmatrix} p_{ox} \\ p_{oy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.30 \\ 0.25 \end{bmatrix}$$

とする．これは，$||f||$ の条件を満足する値である．また，カメラと目標物との距離を $d = 1.86[m]$ とする．設定した目標位置に対して，制御目標が達成されるように，つぎの 1．〜 3．のようにゲインを変化させてシミュレーションを行なった.

1. $k_p = 0.20$，$k_v = 5.0$ （図 4.2）
2. $k_p = 0.20$，$k_v = 10$ （図 4.3）
3. $k_p = 0.25$，$k_v = 10$ （図 4.4）

各図は，それぞれのゲインでの画像面上の位置誤差（実線：x 座標，一点鎖線：y 座標）および各関節の角速度（実線：第 1 軸の角速度，一点鎖線：第 2 軸の角速度）である．

速度ゲイン k_vが最小である 1．のシミュレーションは，位置誤差が 0 付近のところで振動しており，これは，位置ゲイン k_pの変化が小さいうちは，あまり改善がみられない．一方，2．および 3．のシミュレーションは位置ゲイン k_pに関係なく指数関数的に収束している．このことから，わかるように，位置ゲイン k_pに関係なく，速度ゲイン k_vがある程度以上であれば，指数関数的に収束するのがわかる．このことは提案した制御則が妥当なものであることを示している．

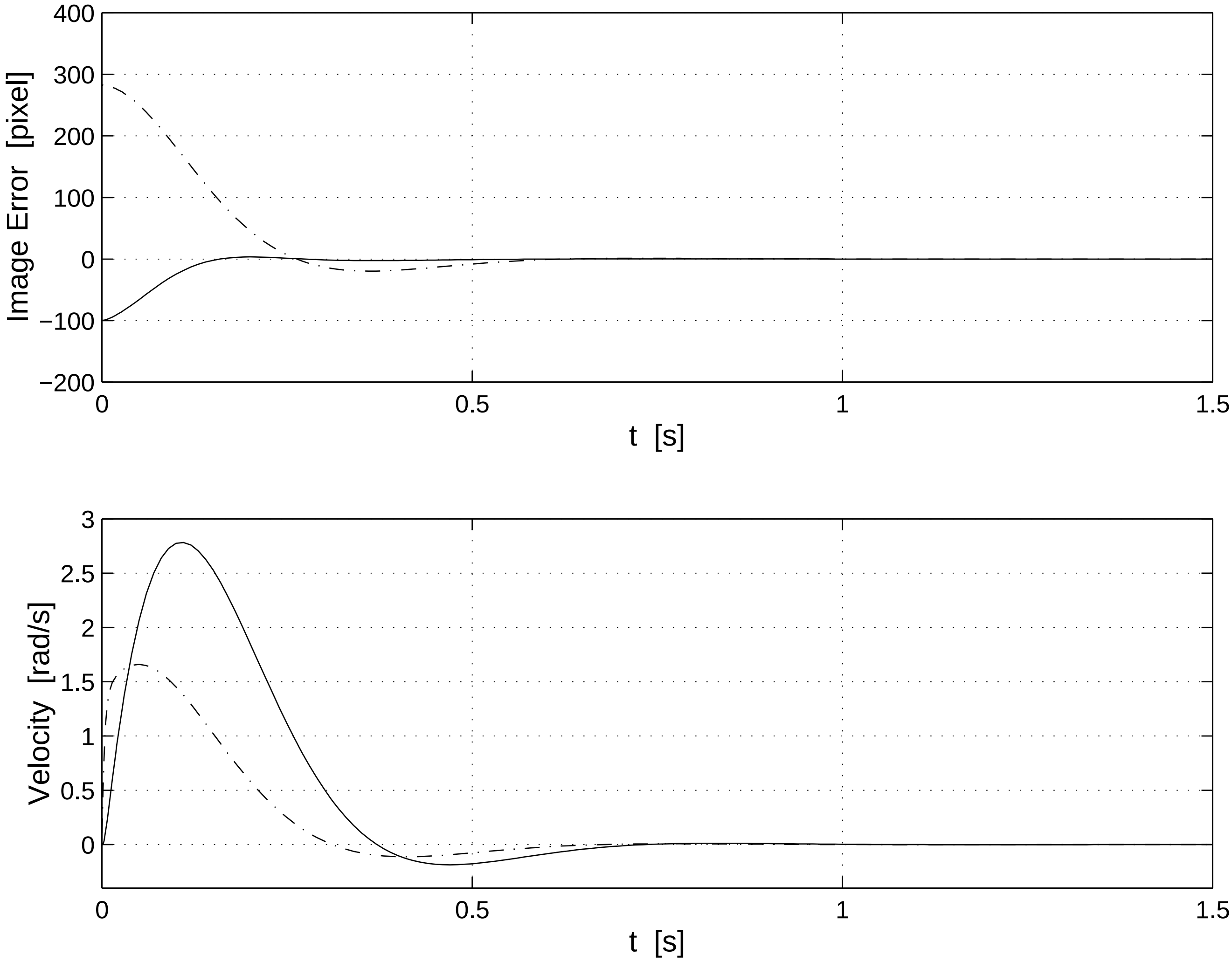

図 4.2: Image Error and Velocity ($k_p = 0.20$, $k_v = 5.0$)

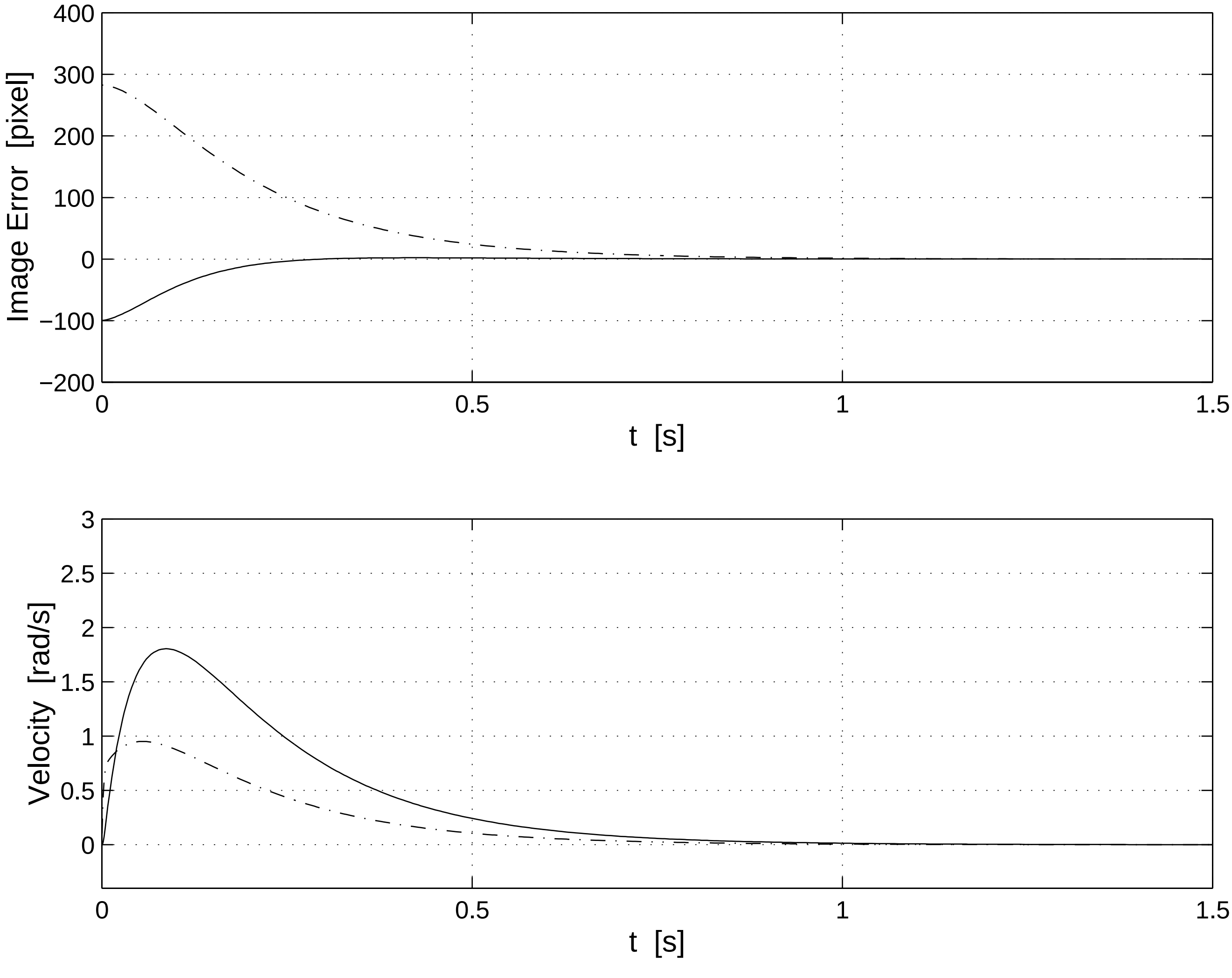

図 4.3: Image Error and Velocity ($k_p = 0.20$, $k_v = 10$)

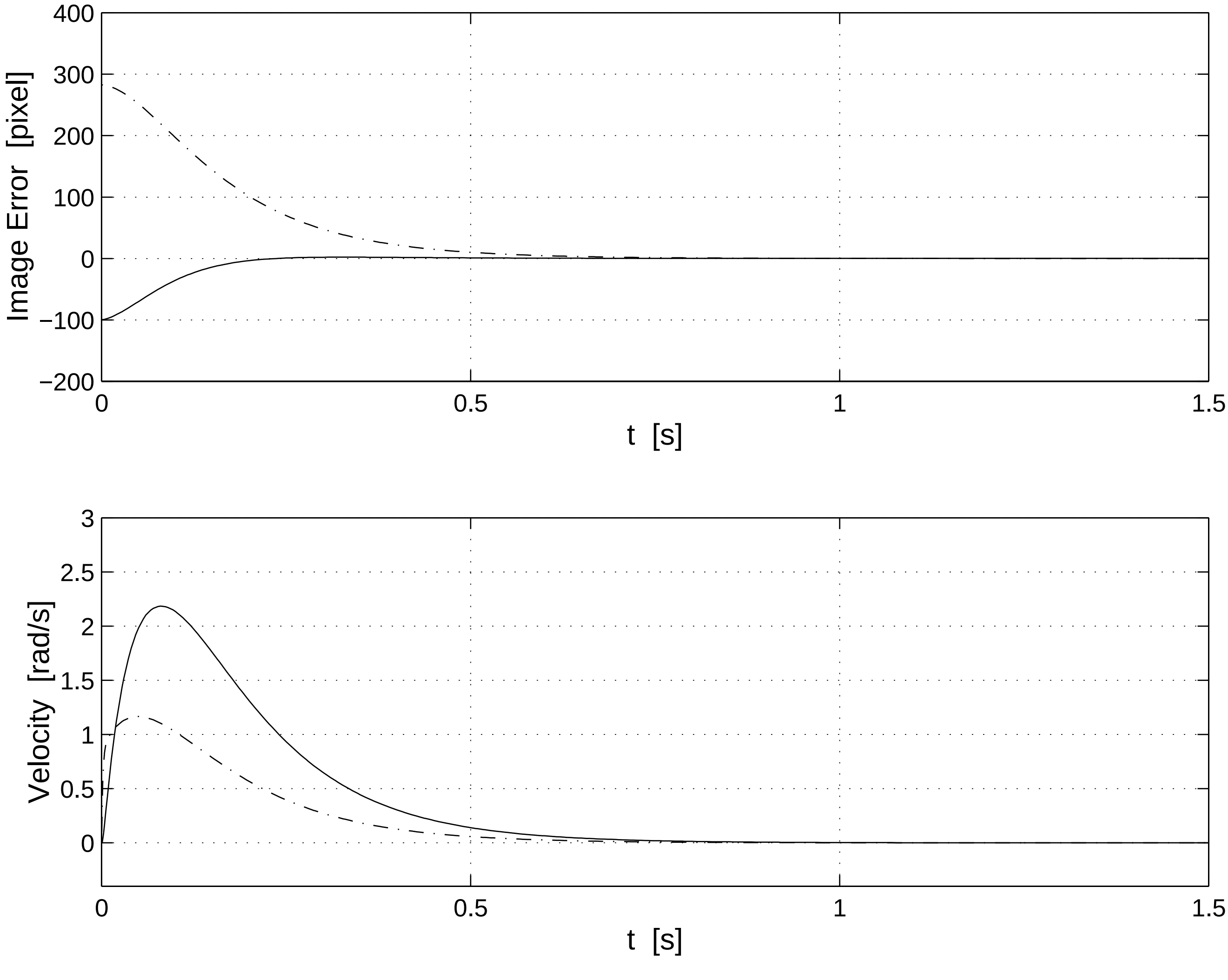

図 4.4: Image Error and Velocity ($k_p = 0.25$, $k_v = 10$)

第 5 章

重力項に対するロバスト制御

3 章，4 章で行なった議論はモデルのパラメトリックな不確かさを無視して理想的なモデルのもとに考察を行なったものであった．しかし，厳密にはモデルにはパラメトリックな不確かさが存在していると考えられる．したがって，それらの不確かさに対してのロバスト性が要求される．本章では，重力項に存在する不確かさに対してロバスト性を保証するロバスト制御法の提案を行なう．

5.1 不確かさの表現

5.1.1 重力項の線形表現

重力項に含まれる不確かさを考慮した制御を行なうために，まず，物理パラメータ $\mu \in R^{2\times 1}$，リグレッサ $Y(q) \in \Re^{2\times 2}$を用いてつぎのように重力項を表すこととする [?].

$$g(q) = Y(q)\mu \tag{5.1}$$

これは，重力項の線形性からくるものである．このように表現することにより，不確かさの範囲をパラメータの大きさとしてとらえることができ，その取り扱いが容易となる．本研究では，物理パラメータの不確かさをつぎのように表す [?].

$$\tilde{\mu} = \hat{\mu} - \mu \tag{5.2}$$

ここで，$\hat{\mu}$は公称パラメータ，$\tilde{\mu}$は物理パラメータの不確かさである．$g(q)$ の有界性 (Property3) より，式 (5.2) の不確かさの大きさも同様に評価することができ，つぎのように適

当な正の定数 ρ によってパラメータの不確かさが抑えられているものとする．

$$||\tilde{\mu}|| = ||\hat{\mu} - \mu|| \leq \rho \tag{5.3}$$

リグレッサ $Y(q)$ と物理パラメータベクトルμによる線形表現を用いると，マニピュレータダイナミクス (2.1) は，重力項が式 (5.1) で置き換えられ，つぎのようになる．

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + Y(q)\mu = \tau \tag{5.4}$$

ここでは，モデル化した視覚サーボシステムに対して，パラメトリックな不確かさが存在する場合において，閉ループ系が一様終局有界となることを制御目標とする．

5.1.2 制御則の提案

制御則としては，つぎのような重力項をリグレッサ $Y(q)$ と物理パラメータベクトルμによる線形表現で表した重力補償付き PD 制御則を考える．

$$\tau = k_p J_r^T(q) e^{\hat{\theta}_r} f - k_v \dot{q} + Y(q)(\hat{\mu} + u) \tag{5.5}$$

ここで，u は不確かさの影響を押え込むための付加入力である．式（5.4）,（5.5）より，閉ループ系は，

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + k_v\dot{q} - k_p J_r^T(q) e^{\hat{\theta}_r} f = Y(q)(\tilde{\mu} + u) \tag{5.6}$$

となる．

制御則 (5.5) は 3 章および 4 章で用いられている制御則にリグレッサ表現と，付加入力を加えた形をしており，閉ループ系 (5.6) の右辺に不確かさがあらわれている．

5.2 一様終局有界性

3 章では漸近安定性が，4 章では局所的な指数安定性が示されたが，不確かさを考慮しても，システムの安定性が保証されるかどうかの解析を行なう必要がある．そのために，リアプノフ関数として，4 章で用いたものと同じ，つぎのスカラー関数を考える．

$$W(x) \ = \ \frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q} \ + \ \frac{k_p}{2s}||f||^2 \ + \ \alpha\frac{k_v}{2s}\|f\|^2 - \alpha f^T e^{-\hat{\theta}_r} J_r(q) M(q)\dot{q} \tag{5.7}$$

Remark: 3 章では漸近安定性を LaSalle の定理を用いて証明したが，一様終局有界性を示す場合，LaSalle の定理を用いることができないため，$\dot{q}$の範囲はわかっても，fの範囲をいうことができない.

閉ループ系（5.6）の解軌道にそって，$W(x)$ の時間微分を行なうとつぎのようになる.

$$\dot{W}(x) \leq -\dot{q}^T(k_v - \alpha(sj_M^2\lambda_M + \beta f_{max}))\dot{q} - \alpha k_p J_m^2||f(q)||^2 + \sigma^T Y(q)(\tilde{\mu} + u) \tag{5.8}$$

ここで，$\sigma = \dot{q} - \alpha J_r^T(q)e^{\hat{\theta}_r}f(q)$ とおいた．条件式 (4.5) が成り立つとすると，

$$\begin{aligned}\dot{W}(x) &\leq -\frac{1}{2}k_v||\dot{q}||^2 - \alpha k_p j_m^2||f(q)||^2 + \sigma^T Y(q)(\tilde{\mu} + u)\\ &\leq -\frac{1}{2}(k_v||\dot{q}||^2 + \alpha k_p j_m^2||f(q)||^2) + \sigma^T Y(q)(\tilde{\mu} + u)\\ &= -x^T Q x + \sigma^T Y(q)(\tilde{\mu} + u)\end{aligned} \tag{5.9}$$

ここで，

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}k_v I & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\alpha k_p j_m^2 I \end{bmatrix} \ , \quad x = [\ \dot{q}^T \quad f(q)^T\ ]^T \tag{5.10}$$

である.

本研究では，式 (5.9) の右辺に不確かさの影響が現われている．したがって，不確かさの影響が抑えられるように，付加入力 u をどのように定めればよいかが問題となる.

Theorem 5.1 **:** 制御則 (5.5) に対して，付加入力 u を

$$u = \begin{cases} -\rho\frac{\xi}{||\xi||} & (||\xi|| > \kappa \text{ のとき}) \\ -\frac{\rho}{\kappa}\xi & (||\xi|| \leq \kappa \text{ のとき}) \end{cases} \tag{5.11}$$

としたとき，閉ループ系は一様終局有界となる．ここで，$\xi := Y^T(q)\sigma$ ，κは正の定数である. □

Proof **:** 式 (5.9) に$\xi := Y^T(q)\sigma$を用いて，

$$\begin{aligned}\dot{W}(x) &= -x^T Q x + \xi^T(\tilde{\mu} + u)\\ &\leq -x^T Q x + ||\xi||||\tilde{\mu}|| + \xi^T u\\ &\leq -x^T Q x + \rho||\xi|| + \xi^T u\\ &= -x^T Q x + \xi^T(\rho\frac{\xi}{||\xi||} + u)\end{aligned} \tag{5.12}$$

$||\xi|| > \kappa$のとき，

$$\dot{W}(q) \leq -x^TQx \tag{5.13}$$

Q が正定であることから，$\dot{W}(q)$ は負定である．

$||\xi|| \leq \kappa$のとき，

$$\begin{aligned}
\dot{W}(x) &\leq -x^TQx + \xi^T(\rho\frac{\xi}{||\xi||} - \frac{\rho}{\kappa}\xi) \\
&= -x^TQx + \frac{\rho}{\kappa}||\xi||(\kappa - ||\xi||) \\
&= -x^TQx - \frac{\rho}{\kappa}(||\xi||^2 - \kappa||\xi||) \\
&= -x^TQx - \frac{\rho}{\kappa}(||\xi|| - \frac{\kappa}{2})^2 + \frac{\kappa\rho}{4} \\
&\leq -x^TQx + \frac{\kappa\rho}{4}
\end{aligned} \tag{5.14}$$

ここで，

$$r := (\frac{\kappa\rho}{4\lambda_{min}(Q)})^{\frac{1}{2}} \tag{5.15}$$

とおく．$\lambda_{min}(Q)$ は Q の最小固有値である．

$||x|| > r$のとき，

$$\begin{aligned}
||x||^2 &> r^2 = \frac{\kappa\rho}{4\lambda_{min}(Q)} \\
\frac{\kappa\rho}{4} &< \lambda_{min}(Q)||x||^2 \leq x^TQx \\
\dot{W}(x) &\leq -x^TQx + \frac{\kappa\rho}{4} < 0
\end{aligned} \tag{5.16}$$

以上より，一様終局有界であることが示された． □

以上までの考察はパラメータベクトルの不確かさの大きさが各要素ごとに同じであると考えて，行なったものであったが，さらに不確かさの大きさを詳細に記述するために，つぎのようにパラメータの不確かさが各要素ごとに表されるものとする．

$$|\tilde{\theta}_i| \leq \rho_i, \quad i = 1, 2 \tag{5.17}$$

このとき，ベクトル$\xi = Y^T(q)\rho$の第 i 要素をξ_i，$i = 1, 2$ とし，これに対応して十分に小さな定数κ_i，$i = 1, 2$ を選べば，u の第 i 要素 u_i，$i = 1, 2$ をつぎのように与えればよい．

$$u = [u_1, u_2]^T$$

$$u_i = \begin{cases} -\rho_i \frac{\xi}{||\xi||} & (||\xi|| > \kappa_i \text{ のとき}) \\ -\frac{\rho_i}{\kappa_i}\xi & (||\xi|| \leq \kappa_i \text{ のとき}) \end{cases} \tag{5.18}$$

5.3 シミュレーション

本章でも，図 4.1 のようにパラメータの設定された平面マニピュレータに対して，制御則（5.5）の妥当性を検証するために，MATLAB を用いてシミュレーションを行なう．

5.3.1 パラメータ設定

重力項に対するロバスト制御を行なうために，まず，重力項をリグレッサと物理パラメータに分解する．物理パラメータμのとりかたには，いくつかあるが，ここでは，μをつぎのようにとることにする．

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_2 r_1 \\ m_2 l_1 \\ m_2 r_2 \end{bmatrix} \tag{5.19}$$

このとき，リグレッサ $Y(q)$ は，

$$Y(q) = \begin{bmatrix} g\mathrm{cos}q_1 & g\mathrm{cos}q_1 & g\cos(q_1+q_2) \\ 0 & 0 & g\cos(q_1+q_2) \end{bmatrix} \tag{5.20}$$

となる．また，物理パラメータμの各値は表 5.1 のように与えられる．

表 5.1　物理パラメータ（ロード未装着）

μ_1	μ_2	μ_3
0.7730	0.4166	0.1666

ここで，いま第 2 リンクの質量中心に未知重量のロードが装着されたとする．これにより，第 2 リンクのパラメータ m_2が $m_2 + \tilde{m}_2$に変動すると考える．ただし，変動の大きさは

$$0 \ \leq \ \tilde{m}_2 \ \leq \ 6.0 \tag{5.21}$$

とする．ロードを装着した場合の物理パラメータベクトルの値の最大値は表 5.2 で与えられる．

表 5.2　物理パラメータ（ロード装着）

μ_1	μ_2	μ_3
0.7730	1.617	0.6466

公称パラメータベクトル$\hat{\mu}$の値としては表 5.1 の値をとることとする．したがって，対応する不確かさの大きさの上限ρ_iは，表 5.3 のようになる．表 5.3　不確かさの上限 ρ_i

表 5.3　不確かさの上限 ρ_i

ρ_1	ρ_2	ρ_3
0	1.200	0.4800

5.3.2　シミュレーション結果

目標対象物の位置および対象物とカメラとの間の距離を 4 章と等しくとり，表 5.3 のように，ゲインおよび付加入力の切替えを行なう境界値κ_i を変化させて，式 (5.18) にしたがってシミュレーションを行なう．その結果を図 5.1〜図 5.6 に示す．

表 5.4　ゲインおよび境界値 ($k_v = 10$)

κ_i	0.1	0.5	1.0
k_p	0.15	0.15	0.15
	0.25	0.25	0.25

また，付加入力を加えない場合のシミュレーション結果を図 5.7 と図 5.8 に示す．ゲインはつぎのように設定する．

- $k_p = 0.15$，$k_v = 10$　（図 5.7）

- $k_p = 4.0$，$k_v = 140$　（図 5.8）

κ_iの値を変えて，シミュレーションを行なってみたが，位置ゲイン k_p，速度ゲイン k_v が同じであれば，ほとんどシミュレーション結果に違いはあらわれなかった．しかし，κ_i の値および速度ゲイン k_v が同じでも，位置ゲイン k_pを変化させると，シミュレーション結果が違ってくる．位置ゲイン k_pを大きくすると，収束時間が短縮され，また，関節速度はある時間において急速に落ち込んでいることがわかる．

図 5.1 と図 5.7 を比較すればわかるように，付加入力を加えることによって，制御目標を達成できていることがわかる．一方，付加入力を加えない場合には，画像面上の位置誤差がほとんど小さくならず，関節速度も一定の値になかなか収束しない．明らかに，付加入力によって不確かさによる影響がおさえられている．しかし，付加入力を加えない場合においても，図 5.8 のようにゲインを大きくとることによって，位置誤差および関節角速度を収束させることができている．シミュレーション上においては各制御値を収束させることはできるが，実機に実装する場合，位置ゲインをかなり大きくとるために，各関節にかかる制御入力トルクが非常に大きくなってしまうという問題が生じてしまう．しかし，付加入力を加えた場合には，その付加入力が飽和するために，ある値以上には制御入力が大きくなることがない．

以上の考察から，本章で提案した制御則が妥当なものであるといえる．

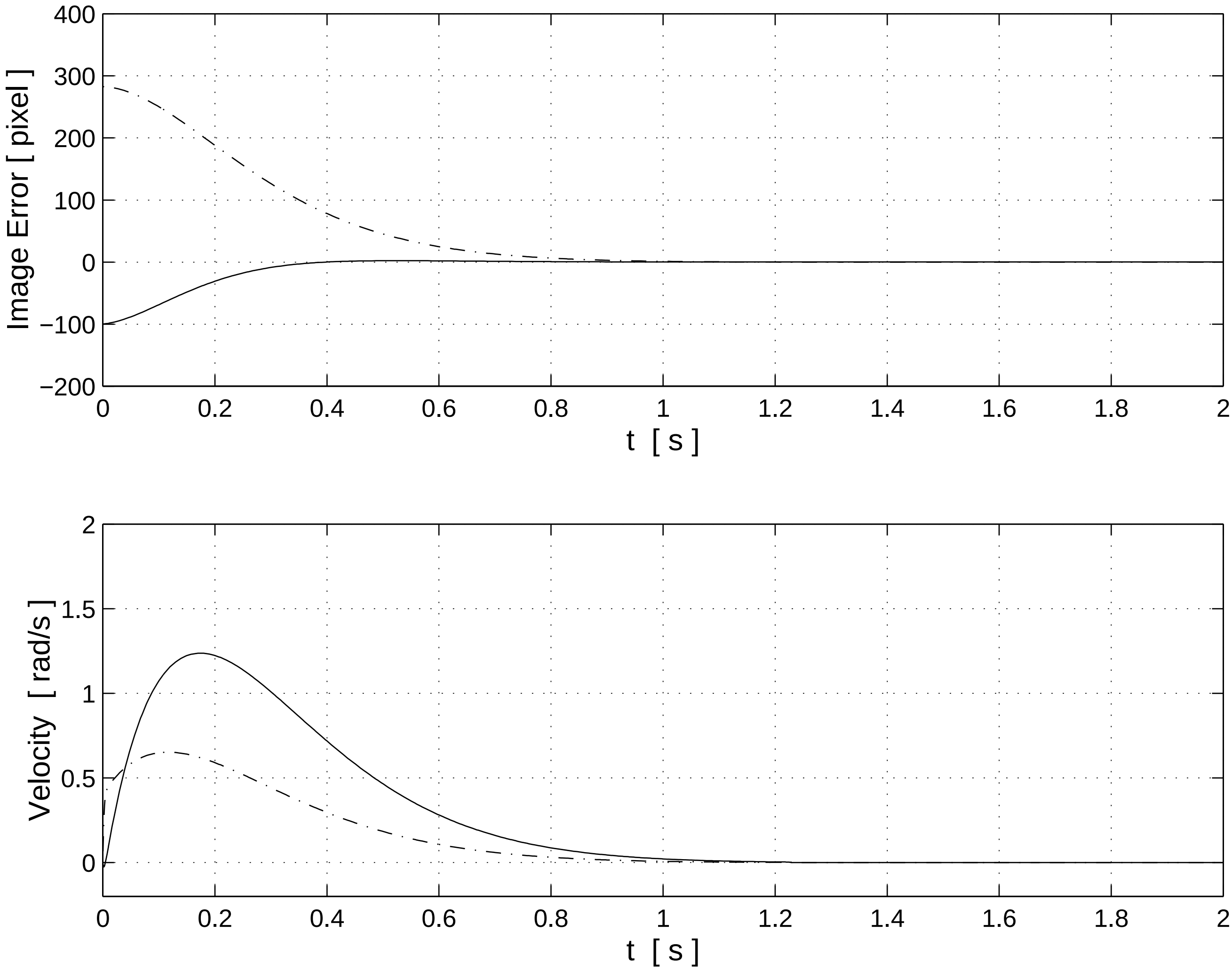

図 5.1: Image Error and Velocity

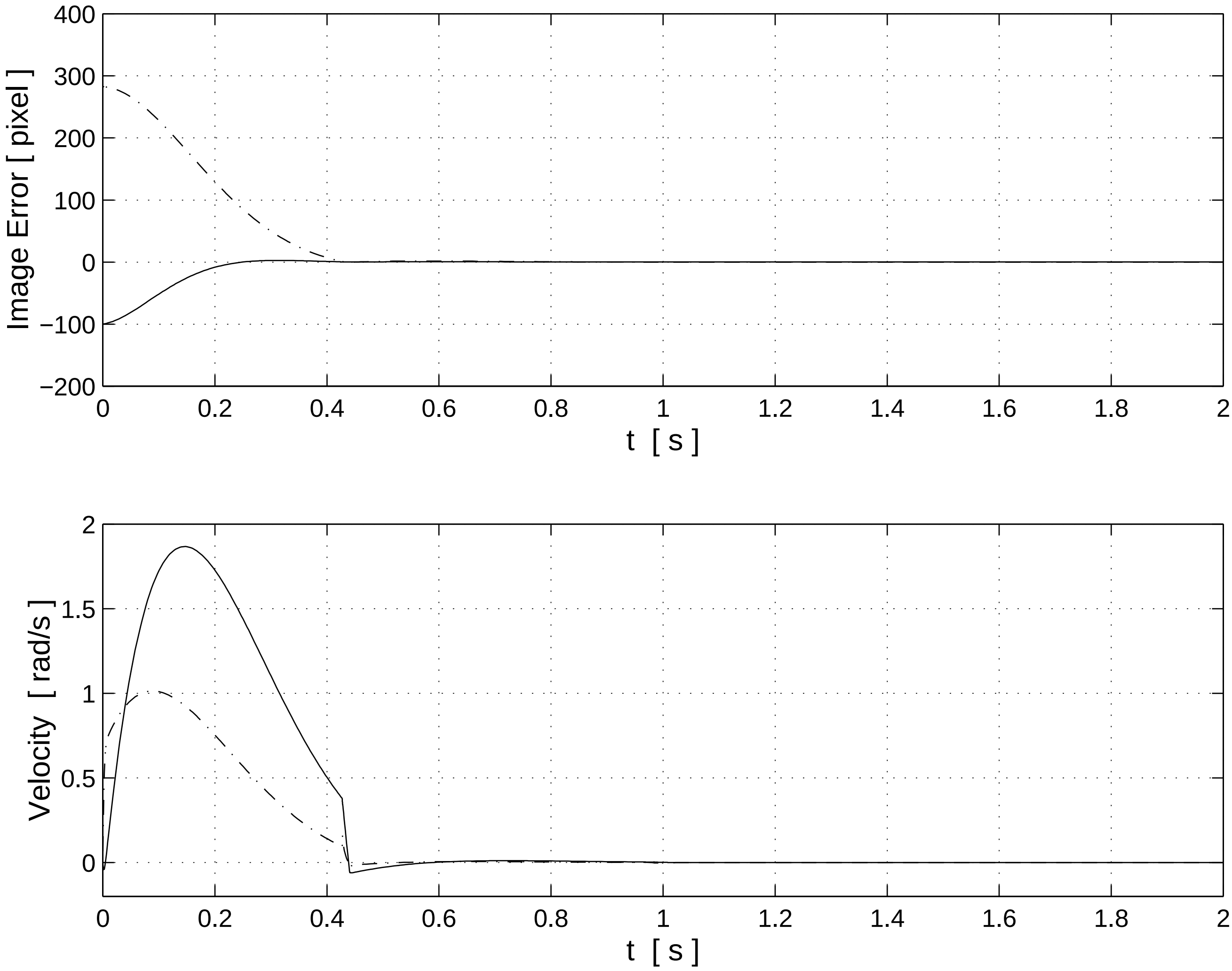

図 5.2: Image Error and Velocity

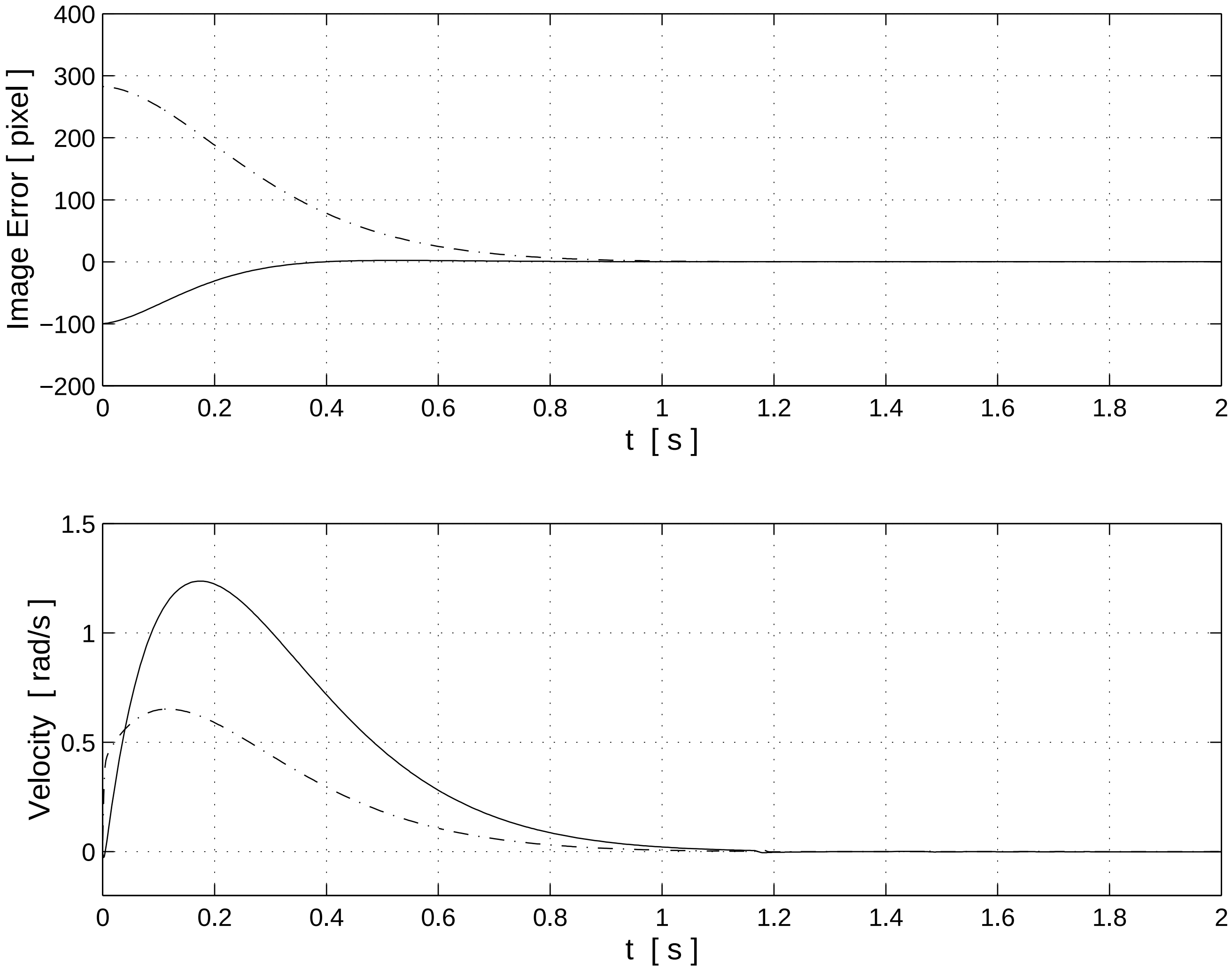

図 5.3: Image Error and Velocity

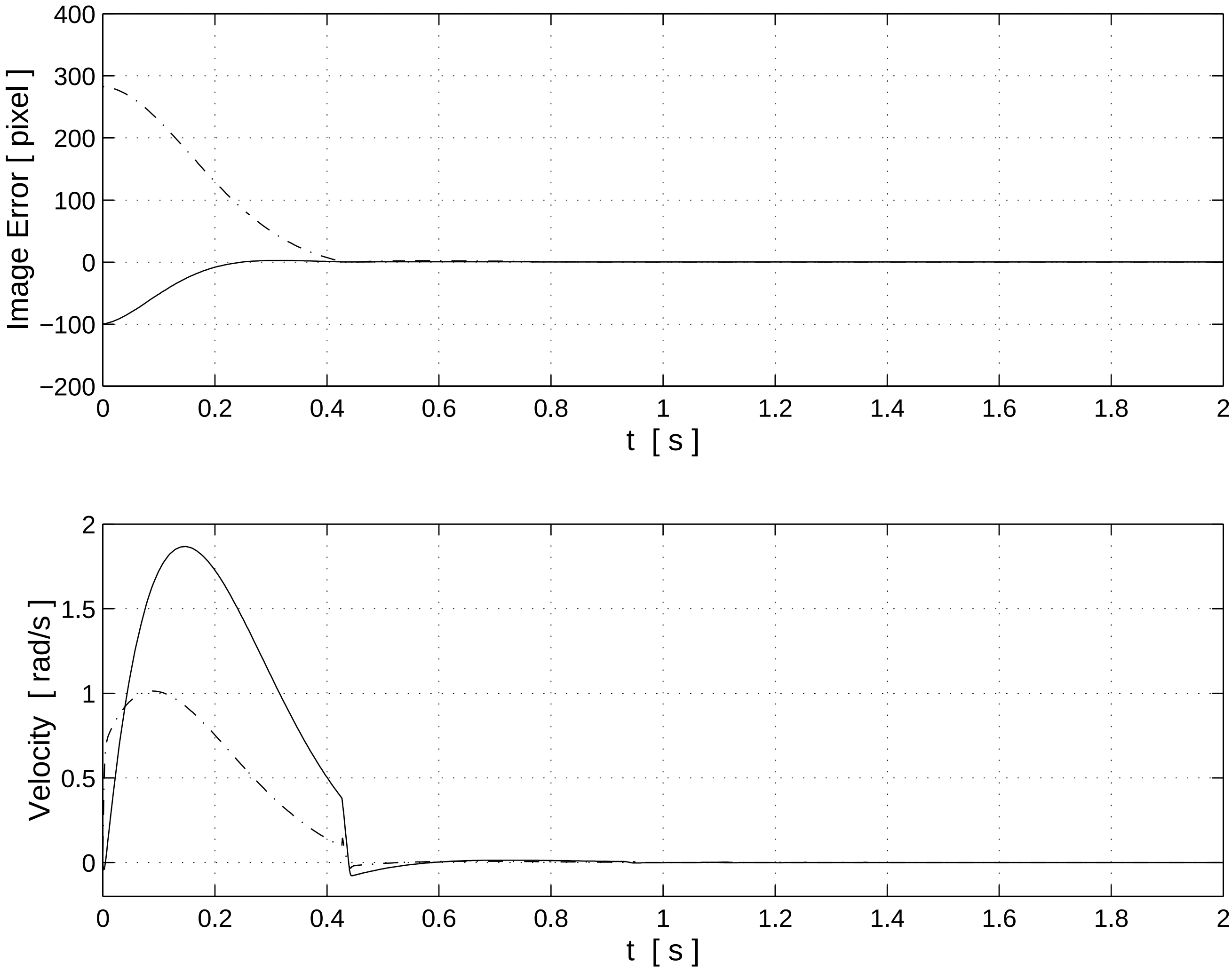

図 5.4: Image Error and Velocity

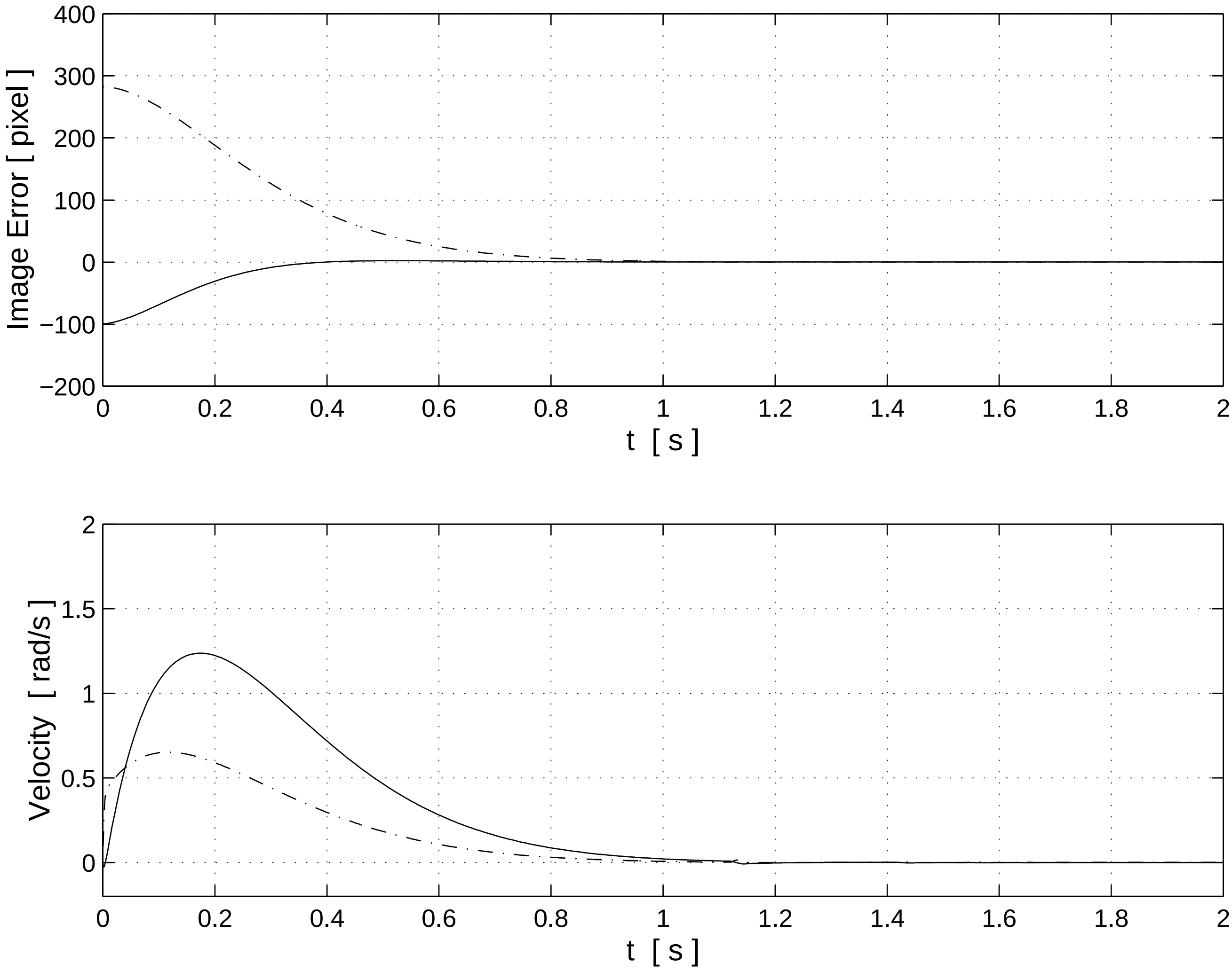

図 5.5: Image Error and Velocity

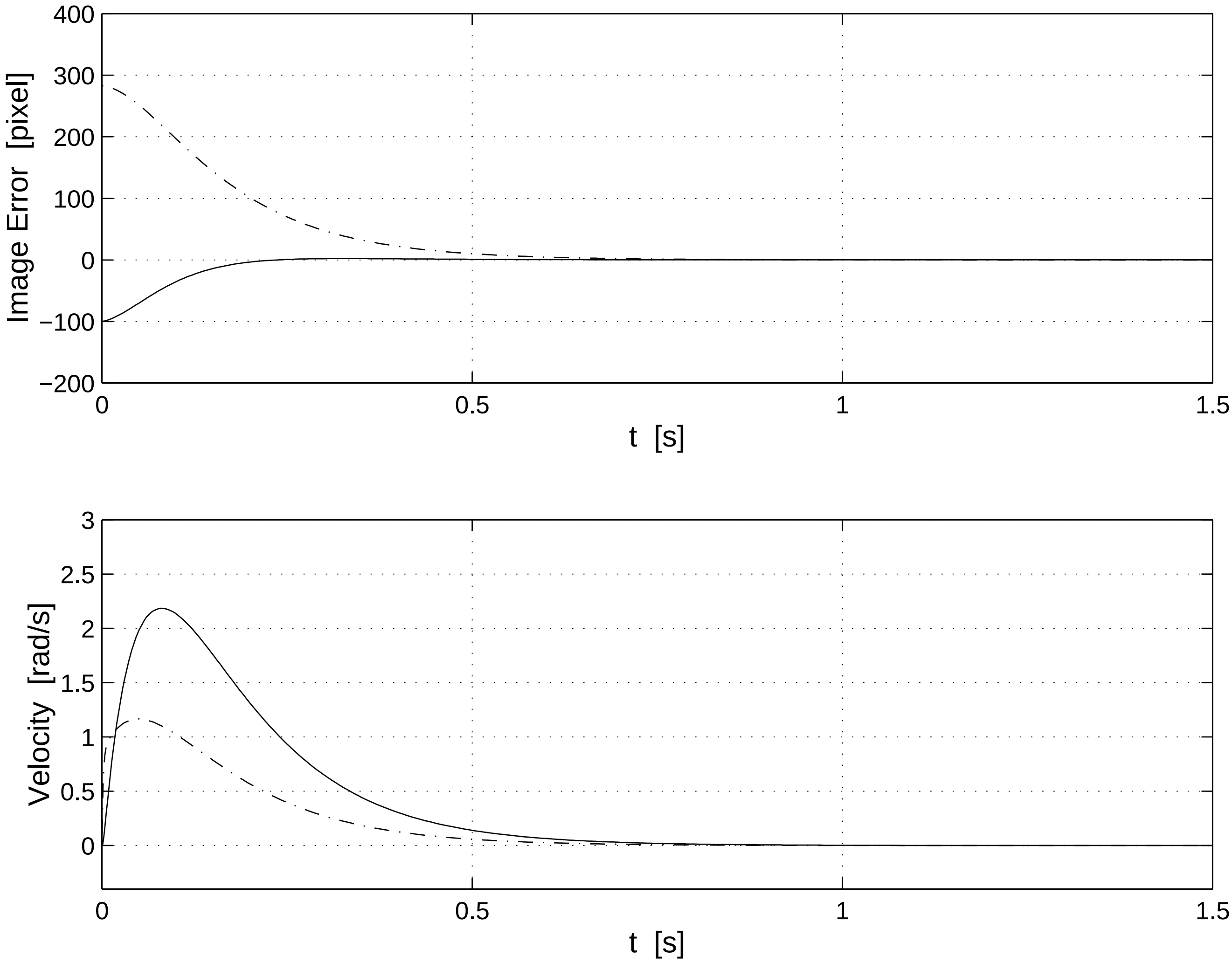

図 5.6: Image Error and Velocity

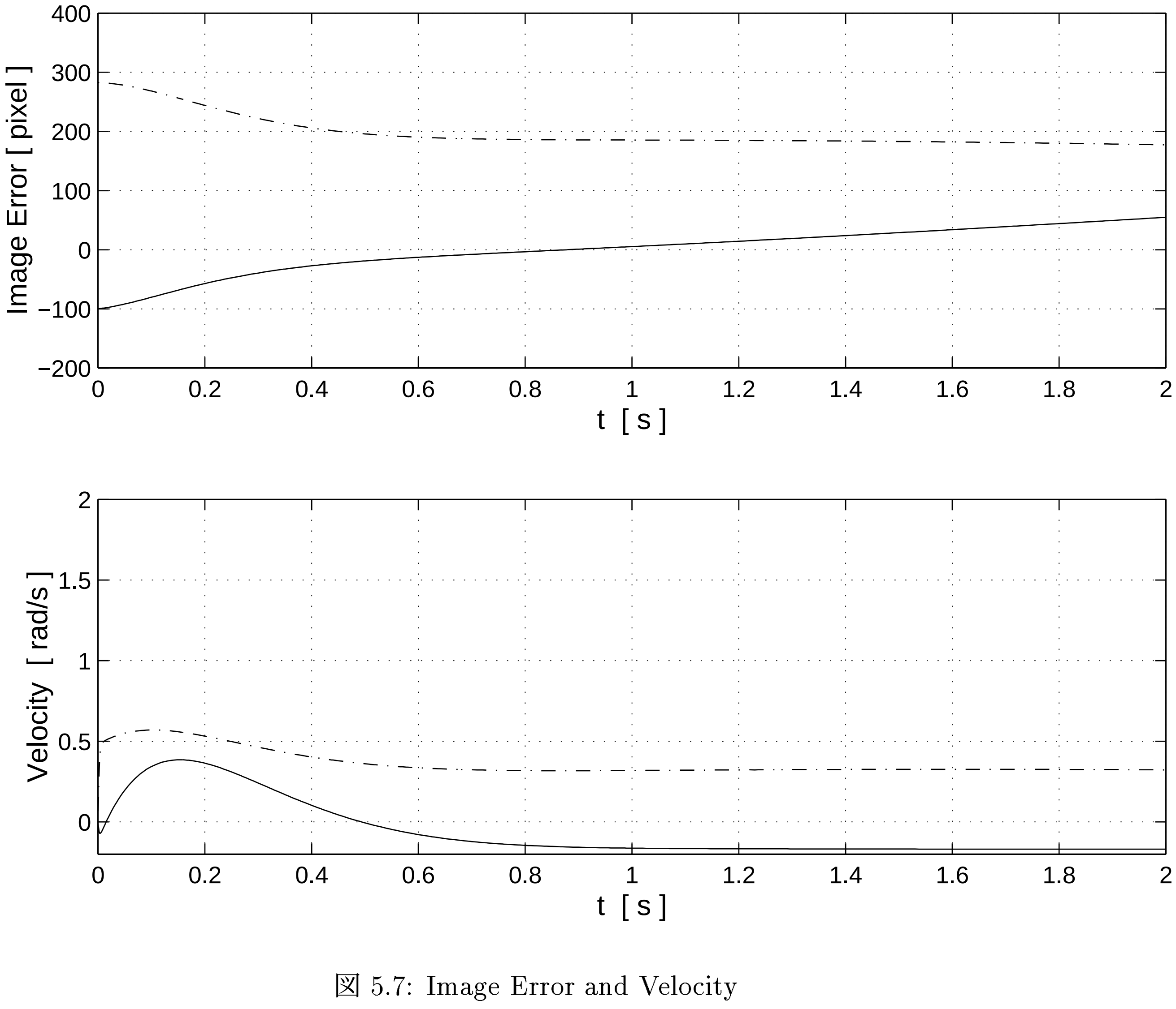

図 5.7: Image Error and Velocity

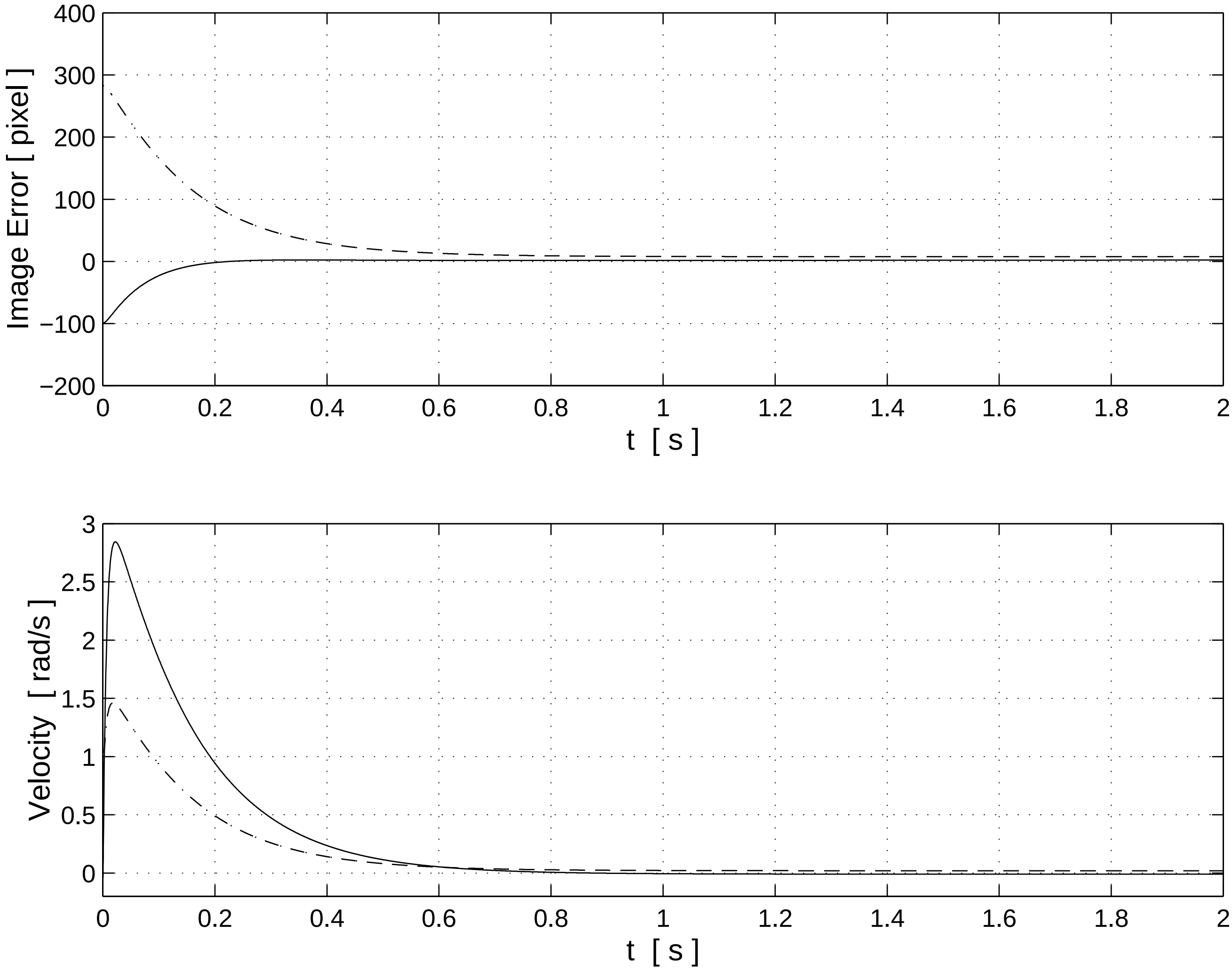

図 5.8: Image Error and Velocity

第 6 章

おわりに

6.1　本研究のまとめ

ここでは，本研究のまとめおよび考察を行なう．

- eye-in-hand 構造をした 2 自由度の平面マニピュレータを制御対象として，マニピュレータのダイナミクス，キネマティクスおよびカメラのモデル化を行なった．
- 視覚サーボ問題の設定，制御則の提案を行ない，リアプノフ法に基づいて 2 つのリアプノフ関数を用いて，安定性の解析を行なった．
- 解析に用いた２つのリアプノフ関数のどちらが対象システムの安定性解析に適しているかの比較・検討を行なった．
- リアプノフ関数の比較・検討結果から，交差項を導入したリアプノフ関数を対象システムの安定性解析に対して，より適していると判断し，そのリアプノフ関数を用いて，指数安定性の証明を行なった．
- モデルのダイナミクスに不確かさが存在することを考慮し，特に重力項に対して，リグレッサと物理パラメータによる線形表現を用いたロバスト制御法を提案し，システムの一様終局有界性を証明した．
- 提案した２つの制御則に対して，シミュレーションを用いて，その妥当性を検証した．

今後の課題としては，より一般的な視覚サーボ問題への拡張が考えられる．例えば，以下のような拡張が考えられる．

- 3 次元空間内を動く物体を対象にした追従問題への拡張
- 多自由度への拡張

本研究は 2 自由度平面マニピュレータの定置制御問題という限定したものであった．これは，限られたなかでマニピュレータダイナミクスを考慮した，より厳密な安定性の解析を行なうためであった．しかし，実際に現実的な応用を考えた場合には，上で述べたような視覚サーボ問題への拡張が必要である．

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課程の川端昭弘氏, 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，博士前期課程 3 年の内藤浩行氏, 花房聡人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課程 2 年の伊藤知規氏，久米彩登氏，小柳隆氏，勝谷泰三氏，田中直人氏，中尾好伸氏，畑彰賢氏，藤原雅之氏，吉田昌弘氏，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.

参考文献

[1] S.Hutchinson, G.D.Hager, and P.I.Corke, “A Tutorial on Visual Servo Control,” *IEEE Trans.* Robotics and Automation, Vol.12, No.5, October 1996.

[2] 橋本, “視覚フィードバック制御 -静から動へ-,” システム／制御／情報, Vol.38, No.12, pp.659-665, 1994.

[3] R.W.Brockett, “Robotic Manipulations and the Product Exponentials Formulae,” in *Lecture Note in Control and Information Sciences, Proceedings of the International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, Berlin, Springer-Verlag, pp.120-127, 1984.

[4] K.Hashimoto and H.Kimura, “LQ Optimal and Nonlinear Approaches to Visual Servoing,” *Visual Servoing*,K.Hashimoto Ed, World Scientific, pp.165-197, 1993.

[5] R.Kelly, “Robust Asymptotically Stable Visual Servo Control for Planar Pobots,” *IEEE Trans.* Robotics and Automation, Vol.12, No.5, pp.759-766, Oct, 1996.

[6] A.Maruyama and M.Fujita, “Robust Visual Servo Control for planar Manipurators with the Eyye-in-Hand Comfiguration,” in 2nd ASCC, 1997.

[7] 有本, ロボットの力学と制御, 朝倉書店, 1990.

[8] 有本, “機械システムの知能化 II:受動性，人工ポテンシャル，及び定置制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.2, pp.240-244, 1994.

[9] C. Canudas de Wit, B. Siciliano and G. Bastin Eds., *Theory of Robot Control*, Springer-Verlag, 1996.

[10] M. W. Spong, "On the Robust Control of Robot Manipulators," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 37, No. 11, pp. 1782-1786, 1992.

[11] R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press, 1994.

[12] 小林他, ロボット制御の実際, 初版, 計測自動制御学会, 1997.

本論文に関する発表

1. 藤田, 丸山, 斉藤, “ロバスト視覚サーボ制御に関する厳密なリアプノフ関数を用いた安定性解析”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol.3, pp.1003-1004, 1997.

付録

シミュレーションに利用した MATLAB のファイル

以下のプログラムは MATLAB でのシミュレーションに利用したものである．

1．ddotq.m ： トルクを入力とし，角加速度を出力する

```
function y = ddotq(u)

tau1 = u(1);
tau2 = u(2);
q1 = u(3);
q2 = u(4);
dq1 = u(5);
dq2 = u(6);

parameter_3;

M_11 = m1*r1^2 + I1 + m2*( l1^2 + r2^2 + 2*l1*r2*cos(q2) ) + I2;
M_12 = m2*( r2^2 + l1*r2*cos(q2) ) + I2;
M_21 = m2*( r2^2 + l1*r2*cos(q2) ) + I2;
M_22 = m2*r2^2 + I2;

h11 = -m2*l1*r2*sin(q2)*dq2;
h12 = -m2*l1*r2*sin(q2)*(dq1+ dq2);
```

```
h21 = m2*l1*r2*sin(q2)*dq1;
h22 = 0;

g1 = (m1*r1*cos(q1)+m2*l1*cos(q1)+m2*r2*cos(q1+q2))*grav;
g2 =  m2*r2*cos(q1+q2)*grav;

  M = [ M_11 , M_12;
        M_21 , M_22 ];

tau = [ tau1 ; tau2 ];

h = [ h11 , h12 ;
      h21 , h22 ];

dq = [ dq1 ; dq2 ];

g = [ g1 ; g2 ];

dd_q = inv(M)*( tau - h*dq - g );

y = dd_q;
```

2. camera_model.m ： 目標対象物の位置および関節角度を入力とし，画像面上における対象物の位置を出力する

```
function f = camera_model(u)

px = u(1);
py = u(2);
q1 = u(3);
q2 = u(4);
```

```
parameter_3;

a = 2180/1.860;
E = [   cos(q1+q2)  , -sin(q1+q2);
        sin(q1+q2)  ,  cos(q1+q2)];
p = [ px ; py ];
c = [ l2*cos(q1+q2) + l1*cos(q1);
      l2*sin(q1+q2) + l1*sin(q1)];

f = a*E'*(p - c);
```

3. gravity.m ： 関節角度を入力とし，重力項の値を出力する

```
function y = gravity(u)

q1 = u(1);
q2 = u(2);

parameter_3;

g1 = (m1*r1*cos(q1)+m2*l1*cos(q1)+m2*r2*cos(q1+q2))*grav;
g2 = m2*r2*cos(q1+q2)*grav;

g = [ g1 ; g2 ];

y = g;
```

4. jacobian.m ： 画像面上の対象物位置および関節角度を入力し，制御則の第 1 項目の値を出力する

```
function y = jacobian(u)
```

```
f1 = u(1);
f2 = u(2);
q1 = u(3);
q2 = u(4);

parameter_3;

Jr = [ -l2*sin(q1+q2)-l1*sin(q1) , -l2*sin(q1+q2);
        l2*cos(q1+q2)+l1*cos(q1) ,  l2*cos(q1+q2)];

E = [   cos(q1+q2)  , -sin(q1+q2);
        sin(q1+q2)  ,  cos(q1+q2)];

f = [ f1 ; f2 ];

y = Jr'*E*f;
```

5. parameter_3.m ： シミュレーションで用いる各パラメータ値を定義する

```
mm1 = 12.27;            %リンク1の質量 [kg]
m2 = 2.083;             %リンク2の質量 [kg]
l1 = 0.200;             %リンク1の長さ [m]
l2 = 0.200;             %リンク2の長さ [m]
r1 = 0.063;             %リンク1の質量中心までの長さ [m]
r2 = 0.080;             %リンク2の質量中心までの長さ [m]
I1 = 0.1149;            %リンク1の慣性モーメント [kgm^2]
I2 = 0.0144;            %リンク2の慣性モーメント [kgm^2]
grav = 9.800;           %重力加速度 [m/s^2]
```

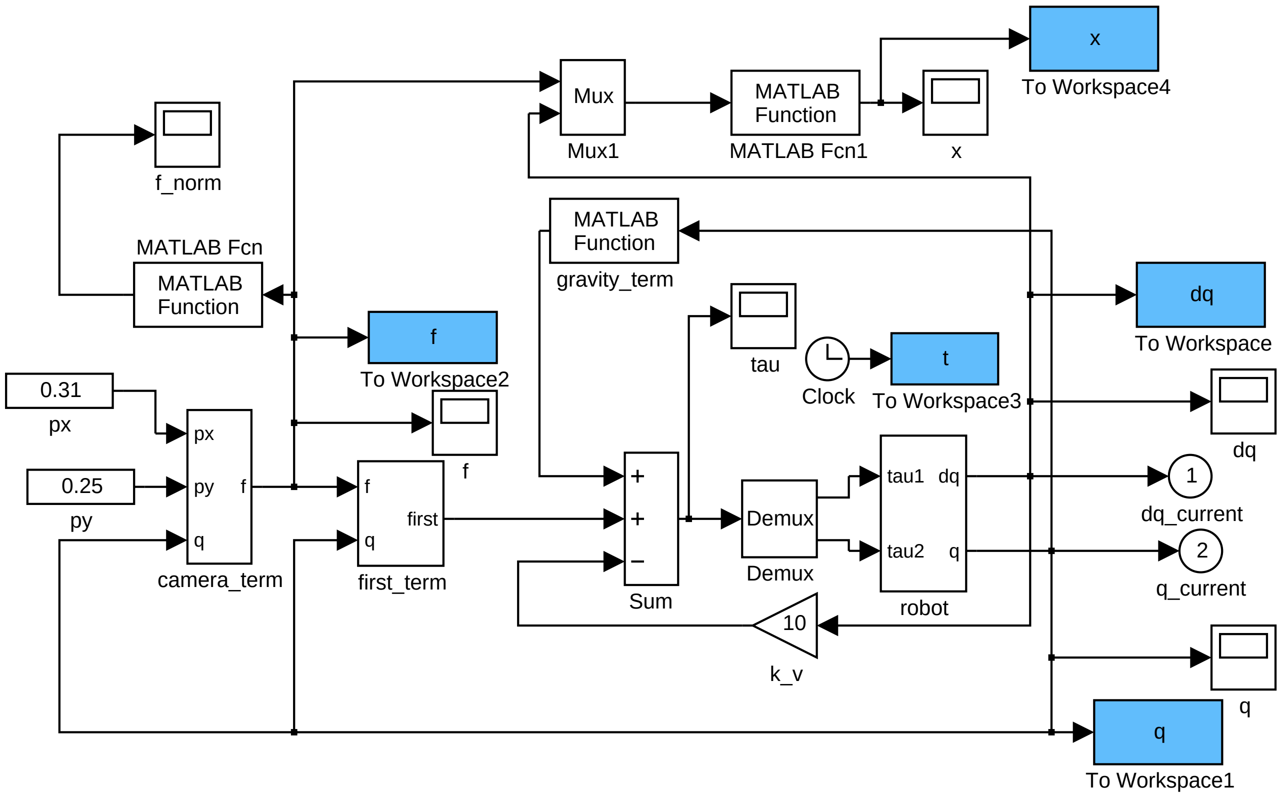

図 6.1: Block diagram of visual servo system