

動的視覚フィードバックシステムの非線形 \mathcal{H}_∞ 制御

不二越 丸山 章 金沢大学 河合 宏之 藤田 政之

Dynamic Visual Feedback Control of Nonlinear Mechanical Systems

Akira Maruyama[†], Hiroyuki Kawai[‡] and Masayuki Fujita[‡]

[†]Nachi Fujikoshi Corporation, [‡]Kanazawa University

Abstract: This paper considers a robot motion control problem with visual information. Relying on the relative motion dynamic model, the nonlinear observer, and the error function on the rotational matrix group, $SO(3)$, we propose a design algorithm for the 3-D visual feedback control problem composed by the manipulator dynamics. The stability and the L_2 gain performance analysis of the proposed controller are treated via the dissipative system theory.

1 はじめに

メカニカルシステムに視覚情報を利用する制御は、視覚フィードバック制御と呼ばれ、さまざまな研究が行われている [1], [2]. また、実際にメカニカルシステムを使用する環境においても、視覚情報を用いた制御は非常に重要である。

本稿では図 1 に示されるような、カメラを有するマニピュレータの視覚フィードバック制御について考える。制御の目的は、3次元空間におけるカメラと対象の相対位置姿勢を、画像情報を用いることにより、目標の位置姿勢と一致させるような制御入力を、マニピュレータに与えることである。したがって、状態空間は $SE(3)$ 上で定義される非線形システムとなる [3]. しかしながら、従来研究において、3次元視覚フィードバックシステムを厳密に非線形システムとしてとらえた研究は少なく、また、リアプノフ関数を用いたものは、対象を平面マニピュレータに限定した研究 [4]–[8] でのみ行われている。

そこで本稿では、3次元空間での非線形マニピュレータダイナミクスを考慮に入れた、視覚フィードバックシステムの制御系の設計、解析を行う。その際に文献 [9] で示された、マニピュレータダイナミクスを考慮にいれない、視覚フィードバックシステムに対する安定性および L_2 ゲイン制御性能解析の結果を利用し発展させている。

2 準備

まず、動的視覚フィードバックの制御問題および制御則を示す為の準備として、相対位置姿勢の運動モデルと $SO(3)$ の誤差関数、 $SE(3)$ 上での消散システム理論の 3 点について述べておく。

2.1 相対位置姿勢運動モデル

カメラを有するマニピュレータの制御システムにおいて、各座標系の位置姿勢は、基準座標系 Σ_W を基準にして図 1 のように表現される。それぞれの位置姿勢は、カメラ座標系 Σ_C では $g_{wc} = (p_{wc}, R_{wc}) \in SE(3)$ で、対象座標系 Σ_O では $g_{wo} = (p_{wo}, R_{wo}) \in SE(3)$ で与えられる。 $p_{wc}, p_{wo} \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ、 Σ_W における Σ_C, Σ_O の原点位置であり、 $R_{wc}, R_{wo} \in SO(3)$ はそれぞれ、 Σ_W における

Σ_C および Σ_O の姿勢をあらわす回転行列である。

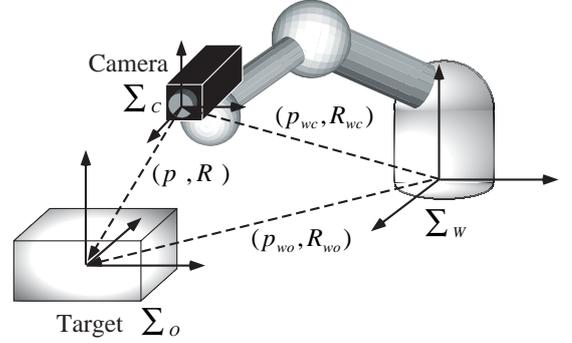


図 1: Eye-in-Hand Visual Feedback System

この g_{wc} と g_{wo} を利用することにより、 Σ_C から見た Σ_O の相対位置姿勢 $g = (p, R) \in SE(3)$ は、つぎのように与えられる。

$$p = R_{wc}^T (p_{wo} - p_{wc}) \quad (1)$$

$$R = R_{wc}^T R_{wo} \quad (2)$$

ここで、それぞれの座標系でのボディ速度を $V_{wc} = [v_{wc}^T \omega_{wc}^T]^T$, $V_{wo} = [v_{wo}^T \omega_{wo}^T]^T$ とする。 $v_{wc} \in \mathbb{R}^3$, $v_{wo} \in \mathbb{R}^3$ は、 Σ_W に対して、 Σ_C と Σ_O の原点の速度ベクトルを、それぞれの座標系を基準にみたベクトルであり、 $\omega_{wc} \in \mathbb{R}^3$, $\omega_{wo} \in \mathbb{R}^3$ は、基準座標に対する回転速度ベクトルを、それぞれの座標系を基準にみたベクトルである。このボディ速度 V_{wc}, V_{wo} を利用すると、 g_{wc}, g_{wo} が満たす微分方程式は

$$\dot{p}_{wc} = R_{wc} v_{wc} \quad \dot{R}_{wc} = R_{wc} \hat{\omega}_{wc} \quad (3)$$

$$\dot{p}_{wo} = R_{wo} v_{wo} \quad \dot{R}_{wo} = R_{wo} \hat{\omega}_{wo} \quad (4)$$

で与えられる [3]. これより、 (p, R) の微分方程式を導出すると、つぎようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ (\dot{R}R^T)^\vee \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I & \hat{p} \\ 0 & -I \end{bmatrix} V_{wc} + \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} V_{wo} \quad (5)$$

ここで、 \wedge (wedge) は $\mathbb{R}^3 \rightarrow so(3)$ (3×3 の歪対称行列の集合) であり、任意の 3 次元ベクトル $a = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T$ に対して

$$a^\wedge = \hat{a} = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

であり、 \vee (vee) : $so(3) \rightarrow \mathbb{R}^3$ は \wedge の逆写像である。

本稿では、カメラを手先効果器に取り付けた、アインハンド構造をもつシステムを対象としているので、 g_{wc} と V_{wc} はそれぞれ、マニピュレータの関節角度 q の関数となる。 V_{wc} はボディマニピュレータヤコビアン $J_b(q) \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ により

$$V_{wc} = J_b(q)\dot{q} \quad (6)$$

で与えられることが知られている [3].

また、カメラから得られる視覚情報を $f \in \mathbb{R}^{2n}$ とすると、 f はカメラと対象の相対位置姿勢により変化することから

$$f = \pi(p, R) \quad (7)$$

と記述できる。ここで $\pi : SE(3) \rightarrow \mathbb{R}^{2n}$ である。

2.2 $SO(3)$ の誤差関数

本研究の目的は、相対位置姿勢 (p, R) が目標位置姿勢 (p_d, R_d) と近づくように、マニピュレータへの制御入力を、視覚情報より決定する制御アルゴリズムを与えることである。

そこで、3次元空間での対象の相対位置姿勢を制御、推定するためには、回転群 $SO(3)$ 上での誤差を考える必要がある。本節では、任意の (p, R) の $SE(3)$ の単位元 $(0, I)$ からの誤差を示す。位置ベクトルに対してはユークリッドノルムを利用し、回転行列 $R \in SO(3)$ に対しては、誤差関数 $\phi : SO(3) \rightarrow \mathbb{R}$ と回転誤差ベクトル e_R が

$$\phi(R) := \frac{1}{2} \text{tr}(I - R) \quad (8)$$

$$e_R := \text{sk}(R)^\vee := \frac{1}{2}(R - R^T)^\vee \in \mathbb{R}^3 \quad (9)$$

で与えられる [9]。この関数 ϕ と誤差ベクトル e_R に対して、つぎの補題が成立する [10].

Lemma 1 $R \in SO(3)$ を与える。

1. $\phi(R) \geq 0$ であり、 $\phi(R) = 0 \Leftrightarrow R = I$ である。
2. $\dot{\phi} = e_R^T(R)(R^T \dot{R})^\vee = e_R^T(R)(\dot{R}R^T)^\vee$.
3. $\phi(R) < 1$ を満足する R に対して、

$$b_2 \|e_R(R)\|^2 \leq \phi(R) \leq b_1 \|e_R(R)\|^2 \quad (10)$$

を満足する $b_1 \geq \frac{1}{2} \geq b_2 > 0$ が存在する。

2.3 $SE(3)$ の消散システム理論

本稿で対象としているシステムは、状態空間が $SE(3)$ であるので、指数安定性と L_2 ゲインに関する定義 [11] を、状態空間が $SE(3)$ の場合に対して拡張したものを示す。

Definition 1 状態空間 $SE(3)$ において、システム Σ が与えられている。システム Σ の解が、 $(p, R) = (0, I)$ において指数安定であるとは、ある正の数 $k, m > 0$ と $(0, I)$ を含む領域 $\Omega \subset SE(3)$ において、すべての初期状態 $g(0) \in \Omega \subset SE(3)$ に対して、 $W(g(t)) \leq me^{-kt}W(g(0))$ を満足する正定関数 $W : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ かつ $W((0, I)) = 0$ が存在する場合をいう。

Definition 2 状態空間 $SE(3)$ において、システム Σ が与えられている。そのシステムの入力を u 、出力を y とする。状態 $g = (p, R) \in SE(3)$ に対して、正定関数 $V : SE(3) \rightarrow \mathbb{R}$ が存在して、供給率 $s(u(t), y(t)) = \frac{1}{2}\gamma^2 \|u\|^2 - \frac{1}{2}\|y\|^2$ と任意の時刻 T 、ある正の数 $\gamma > 0$ に対して、消散不等式

$$V(g(T)) < V(g(0)) + \int_0^T s(u(t), y(t)) dt \quad (11)$$

を満足する場合、システム Σ は γ 以下の L_2 ゲインを有する。

3 相対位置姿勢の制御問題

3.1 状態方程式と観測方程式

3次元空間を運動する対象を追従することを目的とする、視覚フィードバックにおいて、対象との相対位置や相対姿勢を知ることは、非常に重要となる。しかし、相対位置姿勢を直接画像情報から得ることは困難であるため、非線形オブザーバを構成して、視覚情報から相対位置姿勢の推定値 $\bar{g} = (\bar{p}, \bar{R})$ を利用し、制御アルゴリズムを構成する。

まず、相対位置姿勢の推定値 (\bar{p}, \bar{R}) は、(5) 式にもとづいて、つぎの微分方程式で求められるものとする。

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{p}} \\ (\dot{\bar{R}}\bar{R}^T)^\vee \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I & \hat{\bar{p}} \\ 0 & -I \end{bmatrix} u_c + \begin{bmatrix} -I & 0 \\ 0 & -\bar{R} \end{bmatrix} u_e \quad (12)$$

ここで、カメラ速度 V_{wc} をオブザーバを制御するための制御入力と考え、 $V_{wc} = u_c$ としており、推定値の初期値としては $(\bar{p}(0), \bar{R}(0)) = (\bar{p}_0, \bar{R}_0)$ とする。また、 $u_e \in \mathbb{R}^6$ は、真値 (p, R) と推定値の初期値 (\bar{p}_0, \bar{R}_0) の誤差や、未知信号 V_{wo} や観測ノイズ w の影響を減衰させるために、観測量 y から構成される推定入力ベクトルである。

制御システムの状態として、制御誤差 $(p_{ec}, R_{ec}) \in SE(3)$ 、推定誤差 $(p_{ee}, R_{ee}) \in SE(3)$ を、つぎのように与える。

$$p_{ec} = \bar{p} - p_d \quad R_{ec} = \bar{R}R_d^T \quad (13)$$

$$p_{ee} = p - \bar{p} \quad R_{ee} = \bar{R}^T R \quad (14)$$

つぎに、(7) 式のカメラモデルを、推定位置姿勢 (\bar{p}, \bar{R}) 近傍で近似することで、観測出力ベクトル y は

$$y := J^\dagger(\bar{p}, \bar{R})(f - \pi(\bar{p}, \bar{R})) \quad (15)$$

で与えられる [9]。ここで、 J は $SE(3) \rightarrow \mathbb{R}^{6 \times 6}$ である、画像ヤコビアンと呼ばれる行列である [2]。観測出力ベクトル y を、画像処理の結果得られるデータと考え、次式の観測方程式が得られる。

$$y = \begin{bmatrix} p_{ee} \\ e_R(R_{ee}) \end{bmatrix} + w \quad (16)$$

ただし、 e_R は (9) 式で定義した回転誤差ベクトルであり、 $w \in \mathbb{R}^6$ は近似誤差や量子化誤差などからなる観測雑音とする。

ここで、マニピュレータダイナミクスを考慮した 3 次元視覚フィードバック制御では、つぎの仮定をおく。

Assumption 1 マニピュレータのヤコビアン J_b は正則行列である。

この仮定により, (6) 式と $V_{wc} = u_c$ の関係から, マニピュレータの関節角速度 \dot{q} は

$$\dot{q} = J_b^{-1} u_c \quad (17)$$

で求めることができる. しかし, \dot{q} を直接操作することはできず, 制御入力, マニピュレータのアクチュエータへ入力するトルクであり, トルクと関節速度 \dot{q} の間には, 次式のマニピュレータダイナミクスの関係がある.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + d \quad (18)$$

q, \dot{q}, \ddot{q} はそれぞれ各関節の角度, 角速度, 角加速度を表し, τ は入力トルク, d はトルク外乱入力である. そこで, (17) 式で計算される角速度を目標値として, その誤差ベクトルを

$$\xi := \dot{q} - J_b^{-1} u_c \quad (19)$$

とすると ξ の時間微分は

$$\dot{\xi} = \ddot{q} + J_b^{-1} \dot{J}_b J_b^{-1} u_c - J_b^{-1} \dot{u}_c \quad (20)$$

となる.

そこでつぎの制御則

$$\tau = u_\xi + M(q)(J_b^{-1} \dot{u}_c - J_b^{-1} \dot{J}_b J_b^{-1} u_c) + C(q, \dot{q}) J_b^{-1} u_c + g(q) \quad (21)$$

を考える. このとき, 制御則と (18) 式のマニピュレータダイナミクスとの閉ループ系は

$$M(q)\dot{\xi} + C(q, \dot{q})\xi = u_\xi + d \quad (22)$$

となる. ここで, u_ξ が制御目的を達成するための制御入力となる. (13), (14) 式の制御誤差および推定誤差の微分方程式を導出し, 観測出力 y と閉ループ系 (22) からなるシステムを構成すると, つぎのようになる.

$$M(q)\dot{\xi} = -C(q, \dot{q})\xi + u_\xi + d \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_{ec} \\ (R_{ec}^T \dot{R}_{ec})^\vee \\ \dot{p}_{ee} \\ (\dot{R}_{ee} R_{ee}^T)^\vee \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I & \hat{p} \\ 0 & -I \\ 0 & \hat{p}_{ee} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} J_b(q)\xi + \begin{bmatrix} -I & \hat{p} & -I & 0 \\ 0 & -I & 0 & -\bar{R} \\ 0 & \hat{p}_{ee} & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ u_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ R & 0 \\ 0 & R_{ee} \end{bmatrix} V_{wo} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} u_c \\ u_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_c & 0 \\ 0 & K_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -B(p_d) & 0 \\ R_2^T & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_c \\ y \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$y = e_e + w \quad (26)$$

ここで, (25) 式の $u = [u_c^T \ u_e^T]^T$ は, ダイナミクスを考慮しない場合に, システムの内部安定性が満たされるように定められた, 非線形オブザーバへの制御入力である [9]. このとき, $B(p_d), R_2, e_c, e_e$ はそれぞれ

$$B(p_d) := \begin{bmatrix} -I & 0 \\ -\hat{p}_d & -I \end{bmatrix} \quad R_2 := \text{diag}(I, \bar{R})$$

$$e_c := [p_{ec}^T \ e_R^T(R_{ec})^T]^T \quad e_e := [p_{ee}^T \ e_R^T(R_{ee})^T]^T$$

とする.

Remark 1 (17) 式より前に示された, ダイナミクスを含まない相対位置姿勢や非線形オブザーバについては, すでに文献 [9] で述べられている.

3.2 3次元視覚フィードバック制御問題

(23) 式から (26) 式のシステムに関して, ある定数 $\gamma > 0$ を与えたとき, 制御入力 u_ξ を決定する, マニピュレータダイナミクスを考慮した 3次元視覚フィードバック制御問題を, つぎのように設定する.

1. 外乱として, トルク外乱入力 d と対象の未知な運動 V_{wo} および観測雑音 w を考え, $r = [d^T \ V_{wo}^T \ w^T]^T$ とする. 外乱が存在しない, つまり $r = 0$ の場合に, 状態 $(\xi, p_{ec}, R_{ec}, p_{ee}, R_{ee}) = (0, 0, I, 0, I)$ が指数安定な平衡点となる.
2. 外乱 $r \in L_2$ の場合に, r から制御出力 $[\xi^T \ e_c^T \ e_e^T]^T$ への L_2 ゲインを γ 以下にする.

4 動的制御の安定性と L_2 ゲイン性能

提案する制御則 u_ξ が内部安定条件を満たすことを示し, 制御ゲインを適切に調整することで, L_2 ゲイン外乱減衰特性を制御則にもたせることが可能であることを示す.

視覚フィードバック制御則 u_ξ の構造を, つぎのように与える.

$$u_\xi = -J_b^T B(p_d) e_c - K_\xi \xi \quad (27)$$

ここで, 制御ゲイン $K_\xi \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は正定対称行列とする. リアプノフ関数候補として

$$W = \frac{1}{2} \xi^T M(q) \xi + \frac{1}{2} \|p_{ec}\|^2 + \phi(R_{ec}) + \frac{1}{2} \|p_{ee}\|^2 + \phi(R_{ee}) \quad (28)$$

の正定関数を考える. 提案する制御則についてつぎの定理が成立する.

Theorem 1 (安定性) 任意の 3 つの正定対称行列 $K_\xi \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ と $K_c \in \mathbb{R}^{6 \times 6}, K_e \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ を考える. $r = 0$ のとき, (23) 式から (26) 式のシステムと, (27) 式の制御則からなる閉ループ系において, $W(0) < 1$ となる初期状態から出発するすべての解は, 平衡点 $\xi = 0, p_{ec} = 0, R_{ec} = I, p_{ee} = 0, R_{ee} = I$ へ指数的に収束する.

Proof: $r = 0$ の場合に, 正定関数 W を, (23) 式から (26) 式のシステムの解軌道に沿って時間微分すると

$$\dot{W} = -\xi^T K_\xi \xi - e^T K e \quad (29)$$

となる. ただし, $e := [e_c^T \ e_e^T]^T$ とし,

$$K := \begin{bmatrix} B^T(p_d) & -R_2 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_c & 0 \\ 0 & K_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B(p_d) & 0 \\ -R_2^T & I \end{bmatrix}$$

とする. ここで K は任意の p_d と \bar{R} に対して, 正定行列となることから, 正定関数 W の時間微分は, 任意の $[\xi^T \ e_c^T \ e_e^T]^T$ に関して 0 以下であるので, W は非増加関数である. よって, 任意の時刻において $W < 1$, つまり $\phi(R_{ee}) < 1$ と

$\phi(R_{ee}) < 1$ を満足する. さらに, マニピュレータダイナミクス
の性質 $b_m I \leq M(q) \leq b_M I$ を用いると, 関数 W は

$$W \leq \beta \|x\|^2 \quad (30)$$

を満足する有界な定数 $\beta > 0$ が存在する. ここで, $x := [\xi^T e_c^T e_e^T]^T \in \mathbb{R}^{18}$ である. また, 行列 K に関して, R_2 が特殊直交行列の元であることから, 状態 ξ , p_{pc} , R_{ec} , p_{ee} , R_{ee} に関して, 無関係な定数ベクトル $\beta_w > 0$ が存在し, K の最小特異値 $\sigma_m(K)$ に対して

$$\sigma_m(K) \geq \beta_w \quad (31)$$

が成り立つ. このことから

$$\frac{\dot{W}}{W} \leq -\frac{\min(\sigma_m(K_\xi), \beta_w) \|x\|^2}{\beta \|x\|^2} = -\eta \quad (32)$$

を満足する有界な正の定数 η が存在する. この両辺を, 0 から t まで積分すると

$$W(t) \leq W(0)e^{-\eta t} \quad (33)$$

が成立する. (Q.E.D.)
以上で, Definition 1 より提案する制御則の安定性が示された.

つぎに, ゲイン K_ξ , K_c , K_e を調節することで, 制御問題 2 の外乱減衰特性に関する解を与える.

Theorem 2 (L_2 ゲイン性能) 適当な定数 $\gamma > 0$ を与える. (27) 式の制御則のゲインとして, K_ξ , K_c および K_e を, $P \geq 0$ および $Q \geq 0$ が成立するように選択するならば, (23) 式から (26) 式のシステムと, (27) 式の制御則からなる閉ループ系は, 外乱 r から出力 $[\xi^T e_c^T e_e^T]^T$ に関して γ 以下の L_2 ゲインを有する.

Proof: 外乱 $r \neq 0$ の場合, 正定関数 W の閉ループ系の解軌道に沿った時間微分は

$$\begin{aligned} \dot{W} = & -\xi^T K_\xi \xi - e^T K_e e + \xi^T d \\ & + e^T \begin{bmatrix} 0 & R_2 \\ R_1 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & K_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{wo} \\ w \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (34)$$

となる. ただし, $R_1 := \text{diag}(R, R_{ee})$ である. \dot{W} を平方完成を利用して変形すると任意の外乱 r に関して,

$$\dot{W} + \frac{1}{2} \|x\|^2 - \frac{\gamma^2}{2} \|r\|^2 \leq -\xi^T Q \xi - e^T P e \quad (35)$$

が成立する. 行列 P , Q は, 制御ゲイン K_ξ , K_c および K_e を利用して, それぞれ

$$P = \begin{bmatrix} B^T(p_d)K_c B(p_d) + R_2 K_e R_2^T & R_2 K_e \\ K_e R_2^T & K_e \end{bmatrix} - \frac{1}{2} I - \frac{1}{2\gamma^2} \begin{bmatrix} R_2 K_e^2 R_2^T & -R_2 K_e^2 \\ -K_e^2 R_2^T & I + K_e^2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$Q = K_\xi - \frac{1}{2} I - \frac{1}{2\gamma^2} I \quad (37)$$

で定義される.

ここで, 不等式 (35) に, ゲイン条件 $P \geq 0$, $Q \geq 0$ を代入することにより

$$\dot{W} + \frac{1}{2} \|x\|^2 - \frac{\gamma^2}{2} \|r\|^2 \leq 0 \quad (38)$$

が成立する. これを積分することにより, 消散不等式 (11) を満足することから, このシステムは, 外乱 r から出力 $[\xi^T e_c^T e_e^T]^T$ に関して γ 以下の L_2 ゲインを有する. (Q.E.D.)

以上で, Definition 2 より提案する制御則の L_2 ゲイン性能解析が示された.

5 おわりに

本稿では, マニピュレータダイナミクスを考慮した 3 次元視覚フィードバック制御の安定性解析, および L_2 ゲインによる制御性能解析をおこなった. 3 次元の位置姿勢をあらゆる多様体 $SE(3)$ 上の誤差関数と, 視覚情報から相対位置姿勢を推定する非線形オブザーバを利用することにより, システムを構成した. とくに, 解析の際に重要となるリアプノフ関数は, ダイナミクスを考慮していない, 従来のキネマティクスのリアプノフ関数 [9] と, マニピュレータの運動エネルギーを結合することで求めることが可能となった.

References

- [1] S. Hutchinson, G. Hager and P. Corke, "A Tutorial on Visual Servo Control," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 651–670, 1996.
- [2] P. Corke and G. Hager, "Vision-based Robot Control," *Control Problems in Robotics and Automation*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, 230, Springer-Verlag, pp. 177–192, 1998.
- [3] R. Murray, Z. Li and S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press, 1994.
- [4] R. Kelly, "Robust Asymptotically Stable Visual Servoing of Planar Robots," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 759–766, 1996.
- [5] A. Maruyama and M. Fujita, "Robust Visual Servo Control for Planar Manipulators with the Eye-in-Hand Configuration," *Proc. of 36th IEEE CDC*, pp. 2551–2552, 1997.
- [6] A. Maruyama and M. Fujita, " L_2 Gain Performance Analysis for Nonlinear Robust Visual Servo Control," *Proc. of 1998 ACC*, pp. 2932–2936, 1998.
- [7] A. Maruyama and M. Fujita, "Adaptive H_∞ Control for Robust Visual Feedback System," *Proc. of 37th IEEE CDC*, pp. 2283–2288, 1998.
- [8] E. Zergeroglu, D. M. Dawson, M. S. de Queiroz and S. Nagarkatti, "Robust Visual-Servo Control of Robot Manipulators in the Presence of Uncertainty," *Proc. of 38th IEEE CDC*, pp. 4137–4142, 1999.
- [9] A. Maruyama and M. Fujita, "Visual Feedback Control of Rigid Body Motion Base on Dissipation Theoretical Approach," *Proc. of 38th IEEE CDC*, pp. 4161–4166, 1999.
- [10] F. Bullo and R. Murray, "Tracking for fully actuated mechanical systems," *Automatica*, vol. 35, no. 1, pp. 17–34, 1999.
- [11] A. van der Schaft, *L_2 -Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control* (2nd ed.), Springer-Verlag, 2000.