

# 受動性に基づく動的可動カメラを用いた視覚フィードバック制御

村尾 俊幸\*・河合 宏之\*\*・藤田 政之\*  
\*金沢大学,\*\*法政大学

Visual Feedback Control with a Dynamic Movable Camera based on Passivity Approach

Toshiyuki Murao\*, Hiroyuki Kawai\*\* and Masayuki Fujita\*  
\*Kanazawa University,\*\*Hosei University

This paper deals with control of visual feedback system with a dynamic movable camera. This system consists of a robot manipulator and a camera that is attached to the end-effector of another robot manipulator. Firstly the brief summary of the dynamic visual feedback system with an eye-in-hand configuration is given. Next we construct the visual feedback system with a dynamic movable camera by combining the hand control error system. Based on the passivity, stability and  $L_2$ -gain performance analysis are discussed.

## 1 はじめに

ロボットやメカニカルシステムに自律的な振る舞いをさせるには、多くの情報が必要となる。特に視覚情報は未知環境下において周囲の状況を認識させるために有用であり、この視覚情報をダイナミカルシステムのフィードバックループに組み込んだ制御のことを視覚フィードバック制御という<sup>1)</sup>。

ロボットの視覚フィードバック制御には二つの制御方法と二つのカメラ構造に大別できることが知られている。二つの制御方法とは、位置ベース法と特徴ベース法であり、二つのカメラ構造とは、Eye-in-Hand 構造と固定カメラ構造である<sup>1)</sup>。二つの制御方法については、カメラ視野の問題に対応するために多くの議論がなされている。Malis ら<sup>2)</sup>はキャリブレーション偏差に対してもロバスト性を保証するために、位置ベース法と特徴ベース法の利点を組み合わせた制御法を提案している。Corke ら<sup>3)</sup>の方法は  $z$  軸の並進と回転の制御方法を分けることによって、カメラ画像内に全ての特徴点を維持しておくことを可能にしている。また文献<sup>4)</sup>では位置ベース法と後方への動きを切り替えることによってカメラ視野の問題を解決している。このように制御方法に関しては様々な制御則が提案されている。しかしその一方で、カメラ構造に対して議論されている論文は少ない。

そこで本稿では Fig. 1 に示すような動的可動カメラを用いた視覚フィードバックシステムについて考える。本システムは二台のマニピュレータによって構成され、カメラを有しているマニピュレータをカメラマニピュレータ、もう一方をワークマニピュレータとそれぞれ定義する。カメラマニピュレータとワークマニピュレータをそれぞれ“目”と“手”と捉えることによって、この動的可動カメラを用いた視覚フィードバックシステムは Fig. 2 に示すような人間の上半身としてみなすことが可能であると考えられる。またカメラ構造の点においては、本システムは Eye-in-Hand 構造<sup>5)</sup>と固定カメラ構造<sup>6)</sup>の両方の構造を特殊な場合として含

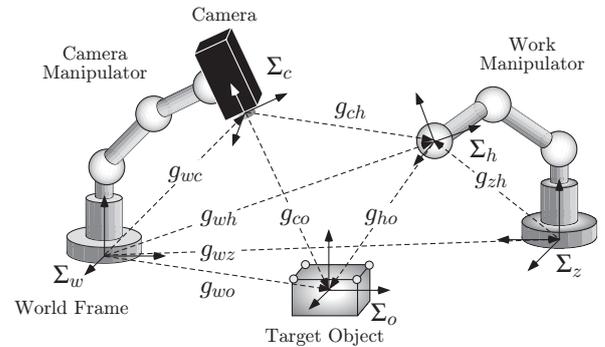


Fig. 1: 視覚フィードバックシステム

んでいる。本稿では動的視覚フィードバックシステムを構成し、閉ループ系の漸近安定性と  $L_2$  ゲイン制御性能解析をおこなう。

## 2 Eye-in-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステム

### 2.1 視覚フィードバックシステムにおける剛体運動の表現

本稿では、Fig. 1 に示すような二台のマニピュレータを有し、五つの座標系によって表される視覚フィードバックシステムについて考える。カメラマニピュレータの台座に基準座標系  $\Sigma_w$ 、手先にカメラ座標系  $\Sigma_c$ 、ワークマニピュレータの台座に台座座標系  $\Sigma_z$ 、手先に手先座標系  $\Sigma_h$ 、また観測対象に観測対象座標系  $\Sigma_o$  を五つの座標系として定義する。このとき、基準座標系からみたカメラの位置姿勢、台座の位置姿勢、手先の位置姿勢および観測対象の位置姿勢をそれぞれ  $g_{wc}$ ,  $g_{wz}$ ,  $g_{wh}$ ,  $g_{wo}$  で表す。同様に、カメラ座標系からみた手先の位置姿勢と観測対象の位置姿勢をそれぞれ  $g_{ch}$ ,  $g_{co}$  とし、台座座標系からみた手先の位置姿勢を  $g_{zh}$ 、手先座標系からみた観測対象の位置姿勢を  $g_{ho}$  と表す。本システムの視覚フィードバックシステムの制御目的は、カメラ

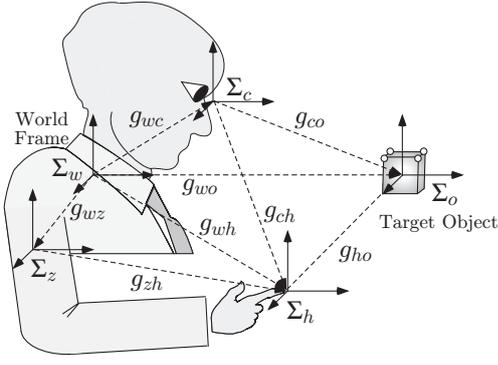


Fig. 2: 視覚フィードバックシステム

座標系からみた観測対象の相対位置姿勢  $g_{co}$  と手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢  $g_{ho}$  を、それぞれの目標相対位置姿勢である  $g_{cd}$  と  $g_{hd}$  に常に一致させておくことである。ここで、同次表現  $g_{ab}$  や 演算子  $\wedge$  (wedge) の詳しい説明については文献<sup>7)</sup>を参照していただきたい。

はじめに視野をより広く得るために Eye-in-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステムについて議論する。Eye-in-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステムはカメラマニピュレータと  $\Sigma_w, \Sigma_c, \Sigma_o$  の三つの座標系のみが用いられ、制御目的は  $g_{co}$  を  $g_{cd}$  に常に一致させておくこととなる。視覚フィードバックシステムにおける三つの座標系間に成り立つ剛体運動の表現を導出する。まず、カメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢  $g_{co}$  は

$$g_{co} = g_{wc}^{-1} g_{wo} \quad (1)$$

で表される。一方、カメラの速度を  $V_{wc}^b$ 、観測対象の速度を  $V_{wo}^b$  と定義すると、カメラ座標系からみた観測対象の相対的な位置姿勢に対する速度  $V_{co}^b$  は、(1) 式を時間微分することで、 $g_{co}$  の基本式として

$$V_{co}^b = -\text{Ad}_{(g_{co}^{-1})} V_{wc}^b + V_{wo}^b \quad (2)$$

と導かれる。ここで  $\text{Ad}_{(g_{ab})}$  は同次表現  $g_{ab}$  の随伴写像である<sup>7)</sup>。

## 2.2 推定偏差システムとカメラ制御偏差システム

本節は推定偏差システムとカメラ制御偏差システムについて述べる<sup>5)</sup>。カメラから得られる視覚情報  $f$  は、相対位置姿勢  $g_{co}$  を直接得ることができないため、その推定値  $\bar{g}_{co}$  を得るためにオブザーバを構成する。(2) 式の基本式に基づき、推定値  $\bar{g}_{co}$  の運動モデルを

$$\dot{\bar{V}}_{co}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} V_{wc}^b + u_e \quad (3)$$

と構成する。 $u_e$  は推定偏差の振る舞いを安定にするために加えられる入力である。

つぎに、カメラ座標系から観測対象への相対位置姿勢の真値と推定値の偏差を推定偏差とし、 $g_{ee} := \bar{g}_{co}^{-1} g_{co}$  と定義する。この推定偏差に対する推定偏差ベクトルを  $e_e := [p_{ec}^T \ e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})]^T$

と定義する。このとき、推定偏差ベクトル  $e_e$  を状態とした推定偏差システムは次式のように表される。

$$\dot{V}_{ee}^b = -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} u_e + V_{wo}^b \quad (4)$$

同様に、カメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢の推定値と目標相対位置姿勢の偏差をカメラ制御偏差とし、 $g_{ec} := g_{cd}^{-1} g_{co}$  と定義する。カメラ制御偏差に対するカメラ制御偏差ベクトルを  $e_c := [p_{ec}^T \ e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})]^T$  と定義するとき、カメラ制御偏差ベクトル  $e_c$  を状態にもつカメラ制御偏差システムは

$$\dot{V}_{ec}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} V_{wc}^b + u_e - \text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} V_{cd}^b \quad (5)$$

として表される。ここで  $V_{cd}^b$  はカメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢  $g_{co}$  の目標速度である。

## 2.3 Eye-in-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステム

$n_c$  自由度を有するカメラマニピュレータのマニピュレータダイナミクスを次式のように表すこととする。

$$M_c(q_c) \ddot{q}_c + C_c(q_c, \dot{q}_c) \dot{q}_c + g_c(q_c) = \tau_c + \tau_{cd} \quad (6)$$

$q_c, \dot{q}_c, \ddot{q}_c \in \mathcal{R}^{n_c}$  はそれぞれの各関節の角度、角速度、角加速度を表し、 $\tau_c \in \mathcal{R}^{n_c}$  は入力トルク、 $\tau_{cd} \in \mathcal{R}^{n_c}$  はトルク外乱、 $M_c(q_c) \in \mathcal{R}^{n_c \times n_c}$  は正定な慣性行列、 $C_c(q_c, \dot{q}_c) \dot{q}_c \in \mathcal{R}^{n_c}$  は遠心力・コリオリ力項、 $g_c(q_c) \in \mathcal{R}^{n_c}$  は重力項を表す。

また、カメラの速度はマニピュレータヤコビアン  $J_{cb}(q_c)$  を用いることでつぎのように表される。

$$V_{wc}^b = J_{cb}(q_c) \dot{q}_c \quad (7)$$

一方、カメラの速度の目標値を  $u_{cd}$  とし、カメラマニピュレータの関節角速度の目標値を  $\dot{q}_{cd}$  で表すとすると、(7) 式と同様にマニピュレータヤコビアンを用いることで  $u_{cd} = J_{cb}(q_c) \dot{q}_{cd}$  と表すことができる。カメラマニピュレータの関節角速度に関する偏差を  $\xi_c := \dot{q}_c - \dot{q}_{cd}$  と定義する。

このとき、カメラマニピュレータへの入力トルクとして

$$\tau_c = M_c(q_c) \ddot{q}_{cd} + C_c(q_c, \dot{q}_c) \dot{q}_{cd} + g_c(q_c) + J_{cb}^T(q_c) \text{Ad}_{(g_{cd}^{-1})}^T e_c + u_{\xi_c} \quad (8)$$

を考える。 $\dot{q}_{cd}, \ddot{q}_{cd}$  はそれぞれ関節角速度と関節角加速度の目標値である。また、このとき、(4)–(8) 式を用いることで、Eye-in-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステムは

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_c \\ V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_c^{-1} C_c \xi_c + M_c^{-1} J_{cb}^T \text{Ad}_{(g_{cd}^{-1})}^T e_c \\ -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} J_{cb} \xi_c \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_c^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} & I \\ 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u_{eye} + \begin{bmatrix} M_c^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{cd} \\ V_{wo}^b \end{bmatrix} \quad (9)$$

で表される。ただし、

$$u_{eye} := \begin{bmatrix} u_{\xi_c} \\ u_{cd} + \text{Ad}_{(g_{cd})} V_{cd}^b \\ u_e \end{bmatrix} \quad (10)$$

で定義される。詳細は省略するが Eye-in-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステム (9) は入力  $u_{eye}$  からある出力  $v_{eye}$  に対して受動性を有する<sup>5)</sup>。

### 3 動的可動カメラを用いた視覚フィードバック制御

#### 3.1 手先制御偏差システム

本章ではカメラマニピュレータに加えてワークマニピュレータも考慮に入れた動的可動カメラ構造の視覚フィードバックシステムに対して議論する。

手先から観測対象への相対位置姿勢の推定値はカメラから観測対象への相対位置姿勢の推定値を用いることにより次式のように表すことができる。

$$\bar{g}_{ho} = g_{ch}^{-1} \bar{g}_{co} \quad (11)$$

ここで  $g_{ch} = g_{wc}^{-1} g_{wz} g_{zh}$  である。  $g_{wc}$ ,  $g_{zh}$  が各マニピュレータの関節角度から、また  $g_{wz}$  がシステムの構造上の特徴から得ることができるために  $g_{ch}$  も観測可能となる。(11) 式を時間微分することで手先からみた観測対象の速度の推定値は

$$\bar{V}_{ho}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{wh}^b + u_e \quad (12)$$

と導かれる。ここで  $V_{wh}^b$  はワークマニピュレータの手先の速度である。

手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢の推定値と目標相対位置姿勢の偏差を手先制御偏差とし、  $g_{eh} := g_{hd}^{-1} \bar{g}_{ho}$  と定義する。手先制御偏差に対する手先制御偏差ベクトルを  $e_h := [p_{eh}^T \ e_R^T(e^{\xi\theta_{eh}})]^T$  と定義するとき、手先制御偏差ベクトル  $e_h$  を状態にもつ手先制御偏差システムは

$$V_{eh}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{wh}^b + u_e - \text{Ad}_{(g_{eh}^{-1})} V_{hd}^b \quad (13)$$

として表される。ここで  $V_{hd}^b$  は手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢  $g_{ho}$  の目標速度である。

#### 3.2 動的可動カメラを用いた視覚フィードバックシステム

$n_h$  自由度を有するワークマニピュレータのマニピュレータダイナミクスを次式のように表すこととする。

$$M_h(q_h) \ddot{q}_h + C_h(q_h, \dot{q}_h) \dot{q}_h + g_h(q_h) = \tau_h + \tau_{hd} \quad (14)$$

マニピュレータこそ異なるが、ワークマニピュレータの各記号は、カメラマニピュレータの各記号と同じ意味をそれぞれ表している。

また、手先の速度はマニピュレータヤコビアン  $J_{hb}(q_h)$  を用いることでつぎのように表される。

$$V_{wh}^b = J_{hb}(q_h) \dot{q}_h \quad (15)$$

一方、手先の速度の目標値を  $u_{hd}$  とし、ワークマニピュレータの関節角速度の目標値を  $\dot{q}_{hd}$  で表すとすると、(15) 式と同様にしてマニピュレータヤコビアンを用いることで  $u_{hd} = J_{hb}(q_h) \dot{q}_{hd}$  と表すことができる。ワークマニピュレータの関節角速度に関する偏差を  $\xi_h := \dot{q}_h - \dot{q}_{hd}$  と定義する。

このとき、ワークマニピュレータへの入力トルクとして

$$\begin{aligned} \tau_h = & M_h(q_h) \ddot{q}_{hd} + C_h(q_h, \dot{q}_h) \dot{q}_{hd} + g_h(q_h) \\ & + J_{hb}^T(q_h) \text{Ad}_{(g_{hd}^{-1})}^T e_h + u_{\xi_h}. \end{aligned} \quad (16)$$

を考える。  $\dot{q}_{hd}$ ,  $\ddot{q}_{hd}$  はそれぞれ関節角速度と関節角加速度の目標値である。また、  $u_{\xi}$  は後に提案する新たな入力である。このとき、(9)(13)–(16) 式を用いることで、動的可動カメラを用いた視覚フィードバックシステムは

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\xi}_c \\ \dot{\xi}_h \\ V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \\ V_{eh}^b \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -M_c^{-1} C_c \xi_c + M_c^{-1} J_{cb}^T \text{Ad}_{(g_{cd}^{-1})}^T e_c \\ -M_h^{-1} C_h \xi_h + M_h^{-1} J_{hb}^T \text{Ad}_{(g_{hd}^{-1})}^T e_h \\ -\text{Ad}_{(g_{co}^{-1})} J_{cb} \xi_c \\ 0 \\ -\text{Ad}_{(g_{ho}^{-1})} J_{hb} \xi_h \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} M_c^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_h^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{co}^{-1})} & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & -\text{Ad}_{(g_{ho}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} M_c^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & M_h^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} w \end{aligned} \quad (17)$$

で表される。ただし、

$$u := \begin{bmatrix} u_{\xi_c} \\ u_{\xi_h} \\ u_{cd} + \text{Ad}_{(g_{cd})} V_{cd}^b \\ u_e \\ u_{hd} + \text{Ad}_{(g_{hd})} V_{hd}^b \end{bmatrix}, \quad w := \begin{bmatrix} \tau_{cd} \\ \tau_{hd} \\ V_{wo}^b \end{bmatrix} \quad (18)$$

で定義される。動的視覚フィードバックシステムにおける制御目的は、カメラから観測対象への相対位置姿勢と手先から観測対象への相対位置姿勢を常に一致させておくことであり、状態  $x := [\xi_c^T \ \xi_h^T \ e_c^T \ e_e^T \ e_h^T]^T$  を 0 に留めておくことで制御目的が達成される。

#### 3.3 動的視覚フィードバックシステムの入出力間の関係

制御目的を達成するための制御則を提案するまえに、制御則の構成に対して重要な役割を果たす動的視覚フィードバックシステムの有する性質を示す。

補題 1 外乱がない (すなわち  $w = 0$ ) とする。このとき、出力を

$$\nu := Nx, \quad N := \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{cd}^{-1})}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{ec}})} & -I & \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{eh}})} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{hd}^{-1})}^T \end{bmatrix} \quad (19)$$

とすると、動的視覚フィードバックシステム (17) の入出力間に

$$\int_0^T u^T \nu d\tau \geq -\beta_0, \quad \forall T > 0 \quad (20)$$

が成り立つ。ただし  $\beta_0$  はある非負の定数である。

補題 1 はエネルギー関数

$$V = \frac{1}{2} \xi_c^T M_c \xi_c + \frac{1}{2} \xi_h^T M_h \xi_h + E(g_{ec}) + E(g_{ee}) + E(g_{eh}) \quad (21)$$

を用いて、  $\dot{M}_c - 2C_c$ ,  $\dot{M}_h - 2C_h$  の歪対称性と  $\hat{p}_{ec}$ ,  $\hat{p}_{ee}$  と  $\hat{p}_{eh}$  の歪対称性を利用して証明される。ここで  $E(g) := \frac{1}{2} \|p\|^2 + \phi(e^{\xi\theta})$  であり、関数  $\phi(e^{\xi\theta})$  は回転行列に対する誤差関数を表す

正定関数である。この補題は、(17) 式の動的視覚フィードバックシステムが受動性を有していることを示唆している。

この動的可動カメラを用いた視覚フィードバックシステム (17) は、カメラ速度  $V_{wc}^b = 0$ 、カメラ速度の目標値  $u_{cd} = 0$ 、基準座標系からみた台座の相対位置姿勢  $g_{wz} = I$ 、さらにカメラ制御偏差  $e_c$  とカメラマニピュレータを考慮しなかったとき、文献<sup>6)</sup>で示した固定カメラ構造の動的視覚フィードバックシステムと同一のものとなる。また 2 章より Eye-in-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステム<sup>5)</sup>が含まれていることは明らかである。したがって Eye-in-hand 構造と固定カメラ構造の動的視覚フィードバックシステムは、動的可動カメラを用いた視覚フィードバックシステム (17) の特殊な場合となる。

### 3.4 動的視覚フィードバック制御則と安定性

動的視覚フィードバックシステム (17) に対し、外乱がない (すなわち  $w = 0$ ) 場合に平衡点  $x = 0$  を安定とする制御則として次式を提案する。

$$u = -Kv = -KNx, \quad K := \text{diag}\{K_{\xi_c}, K_{\xi_h}, K_c, K_e, K_h\} \quad (22)$$

$K_{\xi_c} := \text{diag}\{k_{\xi_{c1}}, \dots, k_{\xi_{cn_c}}\}$  と  $K_{\xi_h} := \text{diag}\{k_{\xi_{h1}}, \dots, k_{\xi_{hn_h}}\}$  はカメラマニピュレータとワークマニピュレータの各関節に対するゲインであり、 $K_c := \text{diag}\{k_{c1}, \dots, k_{c6}\}$ 、 $K_e := \text{diag}\{k_{e1}, \dots, k_{e6}\}$  と  $K_h := \text{diag}\{k_{h1}, \dots, k_{h6}\}$  は  $x$  軸、 $y$  軸、 $z$  軸の並進と回転におけるカメラ制御偏差と推定偏差と手先制御偏差に対するゲインである。ただし、ゲインにおける各要素はすべて正とする。このとき、補題 1 で示した動的視覚フィードバックシステムの受動性に基づくことで、安定性に関してつぎの定理が導かれる。

定理 1  $w = 0$  のとき、動的視覚フィードバックシステム (17) と (22) 式の入力で構成される閉ループ系の平衡点  $x = 0$  は漸近安定である。

この定理 1 は (21) 式のエネルギー関数をリアプノフ関数候補とすることにより示される。

### 3.5 $L_2$ ゲイン制御性能解析

本節では外乱が存在する場合について考察する。特に、本稿では外乱抑制問題を考えることで  $L_2$  ゲイン制御性能解析をおこなう。

ここで、正のスカラーの定数  $k_c$  と  $k_e$  を用いることによって、 $K_c = k_c I$ 、 $K_e = k_e I$  とゲインを定義しなおす。また、ある正の数  $\gamma$  を用いてつぎの行列を定義する。

$$K_{\xi_h} - \frac{1}{2\gamma^2}I - \frac{1}{2}I > 0 \quad (23)$$

$$K_{\xi_c} - \frac{1}{2\gamma^2}I - \frac{1}{2}I > 0 \quad (24)$$

$$K_h - \frac{1}{2}I - \frac{(2k_c - 1)l}{2k_c - 1 - 2l}I > 0 \quad (25)$$

$$k_c - \frac{1}{2} - l > 0 \quad (26)$$

$$k_e - \frac{1}{2\gamma^2} - \frac{1}{2} > 0 \quad (27)$$

ただし

$$l = \frac{k_e(\gamma^2 + 1)}{\gamma^2(2k_e - 1) - 1} \quad (28)$$

とする。このとき、制御性能解析に関するつぎの定理が示される。

定理 2 与えられた  $\gamma$  に対して、(23)–(27) 式を満たすようにゲイン  $K_{\xi_h}$ 、 $K_{\xi_c}$ 、 $K_h$ 、 $k_c$ 、 $k_e$  を選ぶとき、(17)(22) 式で構成される動的視覚フィードバックシステムは  $\gamma$  以下の  $L_2$  ゲインを有する。

定理 2 は (21) 式のエネルギー関数を蓄積関数とみなすことで証明される。この制御性能解析では観測対象の運動を外乱として捉えているために、 $\gamma$  が小さいコントローラであれば観測対象の運動が状態に与える影響がより少ないことを示しており、 $\gamma$  を外乱抑制レベルを示す指標とみなすことができる。

## 4 おわりに

本稿ではカメラマニピュレータとワークマニピュレータという二つのマニピュレータを用いることにより、従来研究で提案していた Eye-in-Hand 構造と固定カメラ構造の二つの視覚フィードバックシステムを特殊な場合として含むような、動的可動カメラを用いた視覚フィードバックシステムを構成した。さらに閉ループ系の漸近安定性と  $L_2$  ゲイン制御性能解析をおこなった。

## 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, pp. 651–670, 1996.
- 2) E. Malis, F. Chaumette and S. Boudet, "2-1/2-D Visual Servoing," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 2, pp. 238–250, 1999.
- 3) P. I. Corke and S. A. Hutchinson, "A New Partitioned Approach to Image-Based Visual Servo Control," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 4, pp. 507–515, 2001.
- 4) G. Chesi, K. Hashimoto, D. Prattichizzo and A. Vicino, "Keeping Features in the Field of View in Eye-In-Hand Visual Servoing: A Switching Approach," *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 20, No. 5, pp. 908–913, 2004.
- 5) 河合, 村尾, 藤田, "受動性に基づく動的視覚フィードバック制御の安定性と  $L_2$  ゲイン制御性能解析," 第 32 回 制御理論シンポジウム 資料, pp. 23–26, 2003.
- 6) 村尾, 河合, 藤田, "受動性に基づく視覚フィードバック制御の固定カメラ構造への展開," 第 4 回 制御部門大会 資料, pp. 327–330, 2004.
- 7) R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press, 1994.