

# 受動性に基づく可動カメラ構造の 3次元動的視覚フィードバック制御

正員 村尾 俊幸\*      非会員 河合 宏之\*\*  
非会員 藤田 政之\*\*\*

## Passivity-based Control of Dynamic Visual Feedback Systems with Movable Camera Configuration

Toshiyuki Murao\*, Member, Hiroyuki Kawai\*\*, Non-member, Masayuki Fujita\*\*\*, Non-member

This paper deals with control of dynamic visual feedback systems with a movable camera configuration. This configuration consists of a robot manipulator and a camera that is attached to the end-effector of another robot manipulator. This system which can be interpreted the dynamic visual feedback system with an eye-in-hand configuration and a fixed camera one as a special case, can enlarge the field of view. Firstly the dynamic visual feedback system with an eye-to-hand configuration is given with the fundamental representation of a relative rigid body motion. Secondly we construct the dynamic visual feedback system with a movable camera configuration by combining the camera control error system. Next, we derive the passivity of the dynamic visual feedback system. Based on the passivity, stability and  $L_2$ -gain performance analysis are discussed. Finally the validity of the proposed control law can be confirmed by comparing the experimental results.

**キーワード：**視覚フィードバック制御，マニピュレータダイナミクス，受動性，リアプノフ安定， $L_2$  ゲイン性能解析

**Keywords:** Visual feedback control, Manipulator dynamics, Passivity, Lyapunov stability,  $L_2$ -gain performance analysis

### 1. はじめに

近年，視覚フィードバック制御は，工場だけでなく医療分野などへも応用され始めており，より複雑なシステムや幅広い分野へ適用されるようになってきている。この視覚フィードバック制御は，よく知られているように二つの制御方法と二つのカメラ構造に大別できる。すなわち，制御方法は位置ベース法と画像ベース法，カメラ構造はカメラがハ

ンドの手先に取り付けられた Eye-in-Hand 構造と，カメラとハンドが別々に配置された固定カメラ構造である<sup>(1)(2)</sup>。

さらに，Eye-in-Hand 構造では作業スペースを全て観察するにはカメラ視野が限定され，固定カメラ構造では作業スペースを探索するには不十分であるという理由から，二つのカメラ構造を発展させたシステムが研究され始めている。その中の一つが，Eye-in-Hand 構造と固定カメラ構造を組み合わせた複数のカメラを用いる構造である。例えば，Eye-in-Hand カメラと固定カメラに回転方向と並進方向に関するタスクを分業させる手法<sup>(3)</sup>，Eye-in-Hand カメラの位置を固定カメラで測る手法<sup>(4)</sup>，両構造のカメラを複数用いることで位置姿勢の推定偏差を減少させる手法<sup>(5)</sup>などが提案されている。

また複数のカメラを用いないものとしては，固定カメラ構造のようにカメラとハンドが別々に配置されているが，カメラが固定されているとは限らない Eye-to-Hand 構造が挙げられる（固定カメラ構造はこの特殊ケースとなる）。実際，工場では溶接作業や車の塗装のような散乱した場所における繰り返しの多い作業が頻繁に行われており，可動カメラを用いた Eye-to-Hand 構造により積極的に視野を得

\* 産業技術大学院大学 産業技術研究科

〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40

School of Industrial Technology, Advanced Institute of Industrial Technology

1-10-40 Higashi-Ohi Shinagawa-ku, Tokyo 140-0011

\*\* 金沢工業大学 工学部

〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1

College of Engineering, Kanazawa Institute of Technology

7-1 Ohgigaoka Nonoichi, Ishikawa 921-8501

\*\*\* 東京工業大学 大学院理工学研究科

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

2-12-1 Ookayama Meguro-ku, Tokyo 152-8550

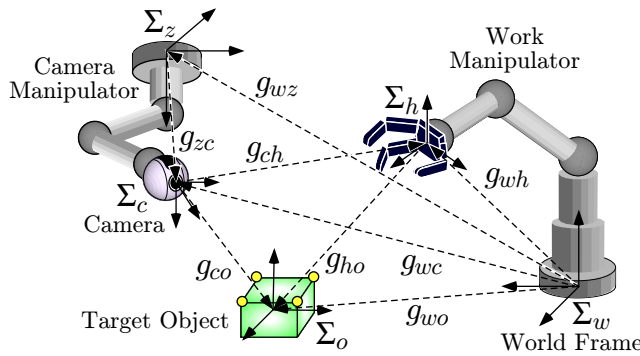


Fig. 1. Visual feedback system with a movable camera configuration

る手法が効果的となる<sup>(6)</sup>。また、医療分野では穿刺手術マニピュレータなどのメディカルロボットの開発が近年特に望まれており、作業するマニピュレータの位置制御を行いながら、視野を確保するために腹腔鏡などを用いて広範囲をモニタリングする必要がある<sup>(7)</sup>。

このような可動カメラを用いた研究としては、可視度を用いた可動カメラの位置決め<sup>(6)</sup>、カメラ視野などの指標を用いた制御<sup>(8)</sup>、リアルタイム性を強く意識した手法<sup>(9)</sup>などが挙げられる。しかし、これらの論文はマニピュレータダイナミクスを無視できると仮定し、さらに安定性や観測対象が運動する場合における議論も十分にされていない。

そこで本研究では、Fig. 1 に示すようなマニピュレータダイナミクスを考慮した可動カメラ構造の動的視覚フィードバックシステムに対して、手先にカメラを取り付けたマニピュレータ（カメラマニピュレータ）と、作業を行うマニピュレータ（作業マニピュレータ）を一つのシステムとして捉え、安定性や制御性能解析について議論する。本論文で提案するシステムは、我々が提案している Eye-in-Hand 構造<sup>(10)(11)</sup>と固定カメラ構造<sup>(12)</sup>の両構造を特殊な場合として含んだシステムとなっている。

本論文の構成は以下のとおりである。2 節では固定カメラ構造も含まれる Eye-to-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステムについて述べる。3 節では、カメラ制御偏差システムを組み合わせることにより可動カメラ構造の動的視覚フィードバックシステムを構成した後に、制御則を提案し安定性と  $L_2$  ゲイン制御性能解析を行う。4 節で 2 自由度マニピュレータによる実験結果を示し、最後に 5 節でまとめを行う。

## 2. Eye-to-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** 本論文では、Fig. 1 に示すような、カメラマニピュレータと作業マニピュレータの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。図中の五つの座標系をそれぞれ作業マニピュレータの台座に基準座標系  $\Sigma_w$ 、手先に手

先座標系  $\Sigma_h$ 、カメラマニピュレータの台座に台座座標系  $\Sigma_z$ 、手先にカメラ座標系  $\Sigma_c$  また観測対象に観測対象座標系  $\Sigma_o$  を定義する。ここで、 $g_{ij}$  は同次表現と呼ばれ、任意の二つの座標系  $\Sigma_i$  から  $\Sigma_j$  の位置  $p_{ij} \in \mathcal{R}^3$  と姿勢を表す回転行列  $e^{\hat{\xi}\theta_{ij}} \in SO(3)$  から構成され、 $4 \times 4$  行列として以下のように定義される。

$$g_{ij} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\xi}\theta_{ij}} & p_{ij} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、演算子  $\wedge$  (wedge) は 3 次元ベクトルを  $3 \times 3$  の歪対称行列へ写像する演算子であり、その逆写像は  $\vee$  (vee) で定義される<sup>(13)</sup>。例えば、基準座標系  $\Sigma_w$  からみた手先座標系  $\Sigma_h$  の位置姿勢は  $g_{wh}$  となる。

本システムにおいて順運動学により各マニピュレータの関節角度から  $g_{wh}$ ,  $g_{zc}$  が得られ、また各マニピュレータの台座は動かないことから  $g_{wz}$  が同定可能である。さらに、同次表現の合成則から  $g_{wc}$ ,  $g_{ch}$  を求めることが可能であり<sup>†</sup>、以上の五つの位置姿勢が既知情報となる。逆に、観測対象が未知な運動をするために、 $g_{wo}$ ,  $g_{ho}$ ,  $g_{co}$  は未知情報となる。

本節では準備として Eye-to-Hand 構造の視覚フィードバックシステムについて議論する。Eye-to-Hand 構造の制御目的は手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢  $g_{ho}$  をその目標位置姿勢  $g_{hd}$  に常に一致させておくことである。しかし前述したように、手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢  $g_{ho}$  を直接観測することはできない。そこでまずはカメラからみた観測対象  $g_{co}$  の運動について考える。

カメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢  $g_{co}$  は

$$g_{co} = g_{wc}^{-1} g_{wo} \dots\dots\dots (2)$$

で表される。また、カメラ座標系からみた観測対象の相対速度は (2) 式を時間微分することで、 $g_{co}$  の基本式として

$$V_{co}^b = -\text{Ad}_{(g_{co}^{-1})} V_{wc}^b + V_{wo}^b \dots\dots\dots (3)$$

のように導かれる。ここで、 $V_{ij}^b \in \mathcal{R}^6$  は剛体運動のボディ速度を表しており、 $\text{Ad}_{(g_{ij})} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$  は同次表現  $g_{ij}$  の随伴写像である<sup>(13)</sup>。この (3) 式は、カメラ座標系からみた観測対象の相対速度  $V_{co}^b$  がカメラの速度  $V_{wc}^b$  と観測対象の速度  $V_{wo}^b$  の差として表されていると解釈できる。(3) 式において、 $V_{wc}^b = 0$  と考えると固定カメラ構造となる。導出の詳細は文献 (12) を参照。

**2.2 非線形オブザーバと推定偏差システム** 本節は推定偏差システムについて述べる。本システムでは一台のピンホールカメラから画像特徴量を得ることを考えている。しかし、カメラから得られる視覚情報  $f \in \mathcal{R}^{2m}$  は相対位置姿勢  $g_{co}$  を含んではいるが、二次元情報であるため直接  $g_{co}$  を得ることはできない<sup>††</sup>。そこで、相対位置姿勢

<sup>†</sup> 三つの座標系間の関係を用いて  $g_{wc} = g_{wz} g_{zc}$ ,  $g_{ch} = g_{wc}^{-1} g_{wh}$  とそれぞれ導出される。

<sup>††</sup> カメラモデルの詳細は文献 (12) 参照。本論文では画像特徴量として観測対象上に  $m$  点 ( $m \geq 4$ ) の特徴点を取り付けている。

の推定値  $\bar{g}_{co}$  を得るために、非線形オブザーバを構成する。  
(3) 式に基づき、推定値  $\bar{g}_{co}$  の運動モデルをつぎのように構成する。

$$\bar{V}_{co}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} V_{wc}^b + u_e \cdots \cdots \cdots (4)$$

$u_e \in \mathcal{R}^6$  は推定偏差の振舞いを安定にするために加えられる入力であり、後に制御則の一部として提案する。

ここで、相対位置姿勢の真値と推定値の偏差  $g_{ee}$  を

$$g_{ee} := \bar{g}_{co}^{-1} g_{co} \cdots \cdots \cdots (5)$$

と定義する。さらに、この推定偏差に対する推定偏差ベクトルを  $e_e := [p_{ee}^T \ e_R^T(e^{\hat{\xi}_{\theta ee}})]^T \in \mathcal{R}^6$  と定義する。ただし  $e_R(e^{\hat{\xi}_{\theta}}) := \text{sk}(e^{\hat{\xi}_{\theta}})^\vee \in \mathcal{R}^3$ ,  $\text{sk}(e^{\hat{\xi}_{\theta}}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}_{\theta}} - e^{-\hat{\xi}_{\theta}})$  であり、 $\text{sk}(e^{\hat{\xi}_{\theta}})$  は回転行列に対して歪対称成分を抽出する関数となっている。この推定偏差ベクトル  $e_e$  は、カメラから得られる視覚情報  $f$  と推定モデルにより得られる視覚情報  $\bar{f}$ , さらに画像ヤコビアン<sup>†</sup>の擬似逆行列  $J^\dagger(\bar{g}_{co}) \in \mathcal{R}^{6 \times 2m}$  を用いることで

$$e_e = J^\dagger(\bar{g}_{co})(f - \bar{f}) \cdots \cdots \cdots (6)$$

として導かれる<sup>(12)</sup>。この推定偏差ベクトル  $e_e$  が 0 になれば、相対位置姿勢の真値と推定値が一致することとなる。

剛体運動の基本式 (3) と相対位置姿勢の推定モデル (4) を用いて、推定偏差システムを構成する。(5) 式を時間微分し (3), (4) 式を用いることで、推定偏差システムとして

$$V_{ee}^b = -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} u_e + V_{wo}^b \cdots \cdots \cdots (7)$$

が導出される。

**2.3 手先制御偏差システム** つぎに実際に制御目的を達成するための手先制御偏差について述べる。手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢  $g_{ho}$  も、 $g_{co}$  が直接求められないために得ることができない。したがって、その推定値  $\bar{g}_{ho}$  を求めることを考え、 $\bar{g}_{co}$  を用いてつぎのように表す<sup>†</sup>。

$$\bar{g}_{ho} = g_{ch}^{-1} \bar{g}_{co} \cdots \cdots \cdots (8)$$

相対位置姿勢  $\bar{g}_{ho}$  の基本式は、手先の速度を  $V_{wh}^b$  とすると、(8) 式より以下の式のように導かれる。

$$\bar{V}_{ho}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{wh}^b + u_e \cdots \cdots \cdots (9)$$

ここで、相対位置姿勢の推定値  $\bar{g}_{ho}$  と手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢の目標値  $g_{hd}$  との偏差を手先制御偏差  $g_{eh}$  として

$$g_{eh} := \bar{g}_{hd}^{-1} \bar{g}_{ho} \cdots \cdots \cdots (10)$$

<sup>†</sup> 本論文ではカメラキャリブレーションが正確に行われていると仮定し、 $g_{ch} = g_{zc}^{-1} g_{wz}^{-1} g_{wh}$  が正確に計算できるとする。またマニピュレータの手先に特徴点をつけ、手先の位置姿勢も視覚情報を用いて別途推定することにより、外部パラメータに対する不確かさを軽減させることができる<sup>(14)</sup>。

で定義する。また、推定偏差ベクトルと同様に、手先制御偏差ベクトルを  $e_h := [p_{eh}^T \ e_R^T(e^{\hat{\xi}_{\theta eh}})]^T$  と定義する。

導出した相対位置姿勢  $\bar{g}_{ho}$  の運動モデルおよび相対位置姿勢の目標値を用いて、手先制御偏差システムを構成する。(7) 式の推定偏差システムの導出と同様に、(10) 式を時間微分することで、手先制御偏差システムは

$$V_{eh}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{wh}^b + u_e - \text{Ad}_{(g_{eh}^{-1})} V_{hd}^b \cdots \cdots (11)$$

と導出される。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。

**2.4 Eye-to-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステム** 本節では、作業マニピュレータのダイナミクスを考慮することで、Eye-to-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステムを構成する。

作業マニピュレータは  $n_h$  自由度を有するものとし、マニピュレータダイナミクスを次式で表す<sup>(15)</sup>。

$$M_h(q_h) \ddot{q}_h + C_h(q_h, \dot{q}_h) \dot{q}_h + g_h(q_h) = \tau_h + \tau_{hd} \cdots (12)$$

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

また、マニピュレータの手先の速度はボディマニピュレータヤコビアン  $J_{hb}(q_h) \in \mathcal{R}^{6 \times n_h}$  を用いることでつぎのように表される<sup>(13)</sup>。

$$V_{wh}^b = J_{hb}(q_h) \dot{q}_h \cdots \cdots \cdots (13)$$

一方、手先の速度の目標値を  $u_{hd}$  とし、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、(13) 式と同様にしてボディ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。ここで、作業マニピュレータの関節角速度に関する偏差を  $r_h := \dot{q}_h - \dot{q}_{hd} \in \mathcal{R}^{n_h}$  と定義する。この関節角速度偏差  $r_h$  が 0 になるとマニピュレータの手先の速度がその目標値に一致することとなる。

このとき、作業マニピュレータへの入力トルクとして

$$\tau_h = M_h(q_h) \ddot{q}_{hd} + C_h(q_h, \dot{q}_{hd}) \dot{q}_{hd} + g_h(q_h) + J_{hb}^T(q_h) \text{Ad}_{(g_{hd}^{-1})}^T e_h + u_{rh} \cdots (14)$$

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。 $u_{rh}$  は関節角速度偏差をなくすための新たな入力であり、後に提案する。このとき、(7), (11), (12), (14) 式を用いることで Eye-to-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステムは

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_h \\ V_{eh}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_h^{-1} C_h r_h + M_h^{-1} J_{hb}^T \text{Ad}_{(g_{hd}^{-1})}^T e_h \\ -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} J_{hb} r_h \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_h^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(g_{eh}^{-1})} & I \\ 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u_{fix} + \begin{bmatrix} M_h^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{hd} \\ V_{wo}^b \end{bmatrix}$$

$$\dots\dots\dots (15)$$

で表される。ただし,

$$u_{fix} := \begin{bmatrix} u_{rh} \\ \text{Ad}_{(g_{hd}^{-1})} u_{hd} + V_{hd}^b \\ u_e \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

で定義される。Eye-to-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステムにおける制御目的は, 運動する観測対象に作業マニピュレータの手先を追従させることであり, 状態  $r_h$ ,  $e_h$  および  $e_e$  を 0 にとどめておくことで制御目的が達成される。

(注意) 本節ではカメラの動きについては議論していない。カメラの動きを考えない場合, Eye-to-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステム (15) は, 文献 (12) の固定カメラ構造の動的視覚フィードバックシステムと一致する。

### 3. 可動カメラ構造の動的視覚フィードバック制御

前節では Eye-to-Hand 構造の視覚フィードバック制御について述べてきた。しかし前節のシステムでは, カメラ速度  $V_{wc}^b$  を入力として考慮していなかったため, 観測対象が視野から外れてしまう可能性がある。例えば文献 (12) では  $V_{wc}^b = 0$  とした Eye-to-Hand 構造の特殊ケースである固定カメラ構造に対して議論した。一般的に固定カメラ構造は Eye-in-Hand 構造に比べて大域的な視野を得ることができるものとされているものの, 観測対象が大きく動くようなシステムにおいてはより広いカメラ視野が必要となる。

本節では可動カメラの利点を活かし, カメラ速度  $V_{wc}^b$  を決め, システムの入力とすることでカメラが観測対象を視野から外さないようにする。そこで Fig. 1 に示すように, カメラをマニピュレータの手先に取り付け制御することを考える。なお, 可動カメラ構造と固定カメラ構造の性能比較については 4 節の実験検証にて詳しく行う。

**3.1 カメラ制御偏差システム** 本論文の制御目的は前述の  $g_{ho}$  を  $g_{hd}$  に常に一致させておくことに加え, カメラが観測対象を外さないように, カメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢  $g_{co}$  をその目標位置姿勢  $g_{cd}$  に常に一致させておくことである。しかし, 前節で述べたように  $g_{co}$  を直接得ることはできないため, 制御目的を達成するためにその推定値  $\bar{g}_{co}$  を用いる。相対位置姿勢の推定値  $\bar{g}_{co}$  とカメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢の目標値  $g_{cd}$  との偏差をカメラ制御偏差  $g_{ec}$  として

$$g_{ec} := g_{cd}^{-1} \bar{g}_{co} \dots\dots\dots (17)$$

で定義する。また, カメラ制御偏差ベクトルを  $e_c := [p_{ec}^T \ e_R^T(e^{\hat{\theta}_{ec}})]^T$  と定義する。

(11) 式の手先制御偏差システムの導出と同様に, (17) 式を時間微分することで, カメラ制御偏差システムは

$$V_{ec}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} V_{wc}^b + u_e - \text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} V_{cd}^b \dots\dots\dots (18)$$

と導出される。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。

**3.2 可動カメラ構造の動的視覚フィードバックシステム** 本節では, 作業マニピュレータ同様, カメラマニピュレータにもダイナミクスを考慮する。  $n_c$  自由度を有するカメラマニピュレータのダイナミクスは次式で表される。

$$M_c(q_c) \ddot{q}_c + C_c(q_c, \dot{q}_c) \dot{q}_c + g_c(q_c) = \tau_c + \tau_{cd} \dots (19)$$

ただし, カメラマニピュレータの各記号は (12) 式の作業マニピュレータの各記号と同じ意味を表している。

また, カメラ速度はボディマニピュレータヤコビアン  $J_{cb}(q_c) \in \mathcal{R}^{6 \times n_c}$  を用いることでつぎのように表される。

$$V_{wc}^b = J_{cb}(q_c) \dot{q}_c \dots\dots\dots (20)$$

一方, カメラ速度の目標値を  $u_{cd}$  とし, 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, 両者の間には  $u_{cd} = J_{cb}(q_c) \dot{q}_{cd}$  が成り立つ。カメラマニピュレータの関節角速度に関する偏差を  $r_c := \dot{q}_c - \dot{q}_{cd} \in \mathcal{R}^{n_c}$  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

$$\tau_c = M_c(q_c) \ddot{q}_{cd} + C_c(q_c, \dot{q}_c) \dot{q}_{cd} + g_c(q_c) + J_{cb}^T(q_c) \text{Ad}_{(g_{cd}^{-1})}^T e_c + u_{rc} \quad (21)$$

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。このとき, (15), (18), (19), (21) 式を用いることで可動カメラ構造の動的視覚フィードバックシステムは

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_h \\ \dot{r}_c \\ V_{eh}^b \\ V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_h^{-1} C_h r_h + M_h^{-1} J_{hb}^T \text{Ad}_{(g_{hd}^{-1})}^T e_h \\ -M_c^{-1} C_c r_c + M_c^{-1} J_{cb}^T \text{Ad}_{(g_{cd}^{-1})}^T e_c \\ -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} J_{hb} r_h \\ -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} J_{cb} r_c \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_h^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_c^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{eh}^{-1})} & 0 & I \\ 0 & 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} & I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} M_h^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & M_c^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} w \dots\dots\dots (22)$$

で表される。ただし,

$$u := \begin{bmatrix} u_{rh} \\ u_{rc} \\ \text{Ad}_{(g_{hd}^{-1})} u_{hd} + V_{hd}^b \\ \text{Ad}_{(g_{cd}^{-1})} u_{cd} + V_{cd}^b \\ u_e \end{bmatrix}, \quad w := \begin{bmatrix} \tau_{hd} \\ \tau_{cd} \\ V_{wo}^b \end{bmatrix} \quad (23)$$

で定義される。可動カメラ構造の動的視覚フィードバック

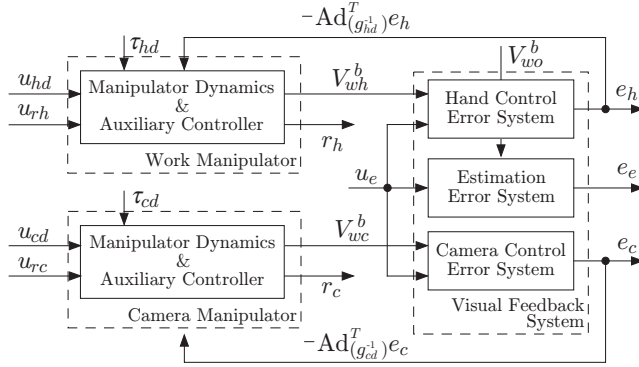


Fig. 2. Block diagram of dynamic visual feedback system with a movable camera configuration

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それぞれの目標位置姿勢に一致させておくことであり、状態  $x := [r_h^T \ r_c^T \ e_h^T \ e_c^T \ e_e^T]^T$  を 0 に留めておくことで制御目的が達成される。

本システムはカメラが可動式であるために、固定カメラ構造に比べてカメラ視野を広くすることが可能であり、それによりロボットの作業スペースをより広げることができる。従来研究<sup>(12)</sup>では広域を見渡せる位置にカメラを固定させなければ作業スペースを広げることができなかったのに対して、本システムでは近い距離を保ちながら可動カメラを観測対象に追従させることでそれが可能となり、不必要に広域を見る必要がなくなる。その結果、観測対象以外の不適切な特徴点の抽出を避ける効果もあると考えられる。また (7), (11), (18) 式のみ、マニピュレータダイナミクスを考慮しない可動カメラ構造の視覚フィードバックシステムも構成でき、モバイルロボットなどの制御システムに対しても適用可能となる。Fig. 2 に可動カメラ構造の動的視覚フィードバックシステムのブロック図を示す。

**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** 制御則を提案するために、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

$$\nu = Nx \dots\dots\dots (24)$$

$$N := \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ 0 & 0 & Ad_{(e-\hat{\xi}\theta_{eh})} & Ad_{(e-\hat{\xi}\theta_{ec})} & -I \end{bmatrix}$$

とすると、(22) 式の動的視覚フィードバックシステムの入出力間に

$$\int_0^T u^T \nu d\tau \geq -\beta_0, \forall T > 0 \dots\dots\dots (25)$$

が成り立つ。ただし  $\beta_0$  はある非負の定数である。

(証明) エネルギー関数として

$$V = \frac{1}{2} r_h^T M_h r_h + \frac{1}{2} r_c^T M_c r_c + E(g_{eh}) + E(g_{ec}) + E(g_{ee}) \dots\dots\dots (26)$$

を考える。ここで  $E(g_{ij}) := \frac{1}{2} \|p_{ij}\|^2 + \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ij}})$  であり、関数  $\phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ij}})$  は回転行列に対する誤差関数を表す正定関数である<sup>(16)</sup>。視覚フィードバックシステムとマニピュレータダイナミクスのもつ歪対称性から、エネルギー関数  $V$  の時間微分は

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} r_h^T (\dot{M}_h - 2C_h) r_h + \frac{1}{2} r_c^T (\dot{M}_c - 2C_c) r_c + x^T N^T u \\ &= u^T \nu \dots\dots\dots (27) \end{aligned}$$

となる。(27) 式の両辺を積分することで

$$\int_0^T u^T \nu d\tau = V(T) - V(0) \geq -V(0) := -\beta_0 \quad (28)$$

が成り立つ。 $\beta_0$  は初期状態のみに依存するある非負の定数である。□

この補題は、(22) 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。この可動カメラ構造の動的視覚フィードバックシステム (22) は、作業マニピュレータを考慮しないとき、Eye-in-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステムとみなすことができる。具体的には、手先速度  $V_{wh}^b = 0$ 、手先速度の目標値  $u_{hd} = 0$ 、基準座標系からみた台座の相対位置姿勢  $g_{wz} = I$ 、さらに手先制御偏差  $e_h$  と作業マニピュレータを考慮しない特別な場合が、文献 (10) (11) で示した Eye-in-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステムとなる。また 2 節より固定カメラ構造の動的視覚フィードバックシステム<sup>(12)</sup>が含まれていることは明らかである。したがって可動カメラ構造の動的視覚フィードバックシステム (22) は Eye-in-Hand 構造と固定カメラ構造という一般的によく知られている二つのカメラ構造の動的視覚フィードバックシステムを特殊な場合として含んだ形となる。

**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 (22) 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。

$$u = -K\nu = -KNx, \dots\dots\dots (29)$$

$$K := \text{diag}\{K_{rh}, K_{rc}, K_h, K_c, K_e\}$$

$K_{rh} := \text{diag}\{k_{rh1}, \dots, k_{rh6}\}$  と  $K_{rc} := \text{diag}\{k_{rc1}, \dots, k_{rc6}\}$  は作業マニピュレータとカメラマニピュレータの各関節に対するゲインであり、 $K_h := \text{diag}\{k_{h1}, \dots, k_{h6}\}$ 、 $K_c := \text{diag}\{k_{c1}, \dots, k_{c6}\}$  と  $K_e := \text{diag}\{k_{e1}, \dots, k_{e6}\}$  は  $x$  軸、 $y$  軸、 $z$  軸の並進と回転における手先制御偏差とカメラ制御偏差と推定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入出力間に (25) が成り立つ。したがって、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 (22) と (29) 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。

(証明) (26) 式のエネルギー関数をリアプノフ関数候補とすると、(22), (29) 式の解軌道に沿った時間微分は (27) 式より

$$\dot{V} = u^T \nu = -x^T N^T K N x \dots \dots \dots (30)$$

と導かれる。ゲイン  $K_{rh}, K_{rc}, K_h, K_c, K_e$  の正定性より行列  $K$  が正定であり、 $N$  が正則であるため、システムの平衡点  $x = 0$  は漸近安定となる。□

定理 1 では、カメラマニピュレータと作業マニピュレータを一つのシステムとして含めた可動カメラ構造の動的視覚フィードバックシステムに対し、リアプノフの安定定理によりその安定性を示した。この安定性解析は補題 1 で示した受動性に基づいて行われている。

**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、本論文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行う。

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  $\gamma$  を用いてつぎの条件を与える。

$$K_{rh} - \frac{1}{2\gamma^2} I - \frac{1}{2} I > 0 \dots \dots \dots (31)$$

$$K_{rc} - \frac{1}{2\gamma^2} I - \frac{1}{2} I > 0 \dots \dots \dots (32)$$

$$K_h - \frac{1}{2} I - \frac{(2k_c - 1)l}{2k_c - 1 - 2l} I > 0 \dots \dots \dots (33)$$

$$k_c - \frac{1}{2} - l > 0 \dots \dots \dots (34)$$

$$k_e - \frac{1}{2\gamma^2} - \frac{1}{2} > 0 \dots \dots \dots (35)$$

ただし

$$l = \frac{k_e(\gamma^2 + 1)}{\gamma^2(2k_e - 1) - 1} \dots \dots \dots (36)$$

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、(31) ~ (35) 式を満たすようにゲイン  $K_{rh}, K_{rc}, K_h, k_c, k_e$  を選ぶとき、(22), (29) 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。

(証明) 蓄積関数として (26) 式のエネルギー関数を考える。(22), (29) 式の閉ループ系の解軌道に沿って時間微分し、平方完成を用いると

$$\begin{aligned} \dot{V} + \frac{1}{2} \|x\|^2 - \frac{\gamma^2}{2} \|w\|^2 \\ = -\frac{\gamma^2}{2} \left\| w - \frac{1}{\gamma^2} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{ee}})} \end{bmatrix} x \right\|^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} + \frac{1}{2\gamma^2} \left\| \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{ee}})} \end{bmatrix} x \right\|^2 \\ + x^T N^T u + \frac{1}{2} \|x\|^2 \\ \leq \frac{1}{2\gamma^2} W \|x\|^2 + x^T N^T u + \frac{1}{2} \|x\|^2 \dots \dots \dots (37) \end{aligned}$$

という関係式が成り立つ。ここで  $W := \text{diag}\{I, I, 0, 0, I\}$  である。(29) 式の制御則を代入すると

$$\begin{aligned} \dot{V} + \frac{1}{2} \|x\|^2 - \frac{\gamma^2}{2} \|w\|^2 \\ \leq -x^T N^T K N x + \frac{1}{2\gamma^2} W \|x\|^2 + \frac{1}{2} \|x\|^2 \\ = -x^T P x \dots \dots \dots (38) \end{aligned}$$

となる。ただし

$$P := N^T K N - \frac{1}{2\gamma^2} W - \frac{1}{2} I \dots \dots \dots (39)$$

とした。 $P \geq 0$  とし、両辺を積分すると

$$\begin{aligned} \int_0^T (\gamma^2 \|w\|^2 - \|x\|^2) d\tau \geq 2V(T) - 2V(0) \\ \geq -2V(0) := -\beta \dots \dots (40) \end{aligned}$$

が成り立つ。 $\beta$  は初期状態にのみ依存する非負の定数である。

ここで  $P$  は

$$P = \begin{bmatrix} K_{rh} - \frac{1}{2\gamma^2} I - \frac{1}{2} I & 0 & 0 \\ 0 & K_{rc} - \frac{1}{2\gamma^2} I - \frac{1}{2} I & 0 \\ 0 & 0 & K_h + k_e I - \frac{1}{2} I \\ 0 & 0 & k_e \text{Ad}_{(e^{\xi\theta_{ec}})} \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{eh}})} \\ 0 & 0 & -k_e \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{eh}})} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ k_e \text{Ad}_{(e^{\xi\theta_{eh}})} \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{ec}})} & -k_e \text{Ad}_{(e^{\xi\theta_{eh}})} & \\ (k_c + k_e - \frac{1}{2}) I & -k_e \text{Ad}_{(e^{\xi\theta_{ec}})} & \\ -k_e \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{ec}})} & (k_e - \frac{1}{2\gamma^2} - \frac{1}{2}) I & \end{bmatrix} \cdot (41)$$

と変形できるので、シュア補元を計算することで  $P \geq 0$  となる十分条件は (31) ~ (35) 式を満たすこととなる<sup>†</sup>。□

この制御性能解析では観測対象の運動を外乱としてとらえているために、 $\gamma$  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いる。本論文では、 $H_\infty$  制御における最も基本となる外乱抑制問題を考えた。本論文で提案した手法は、適切な一般化プラントを構成することで、外乱抑制問題以外にも拡張可能である。

<sup>†</sup> これは  $P > 0$  となる条件式であり、最悪外乱も考えていることから、この条件式は十分条件ではない。

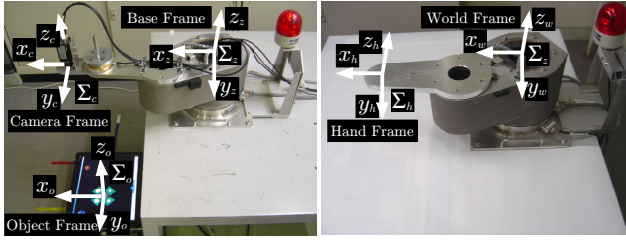


Fig. 3. Experimental arm (Left: camera manipulator, Right: work manipulator)

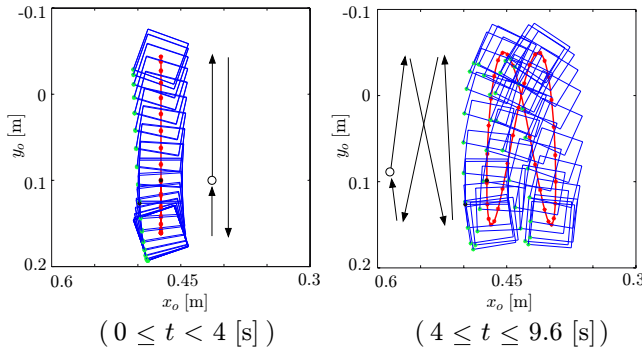


Fig. 4. Trajectory of the target object

#### 4. 検証実験

**4.1 実験設定** 本稿では 3 次元の動的視覚フィードバック制御則を提案したが、検証実験では、簡単のために水平 2 自由度マニピュレータである SICE-DD アーム<sup>(15)</sup>を 2 台用いて実験を行った。

Fig. 3 にマニピュレータと座標系を示す。手先にカメラが取り付けられた左のマニピュレータをカメラマニピュレータ、右のマニピュレータを作業マニピュレータとし、それぞれ五つの座標系を定める。両マニピュレータは台座に近いリンク 1 (0.2[m]) とリンク 2 (0.3[m]) によって構成されている。これらのマニピュレータはデジタル制御装置として dSPACE 社の DS1005(PowerPC 750 processor, 480MHz) を使用し制御する。カメラは CCD カメラとして SONY 社の XC-HR57(60[fps]) を使用し、カメラから画像を入力するボードとして、PCI バスモノクロ画像入力ボードの PicPort-Stereo-H4D(60[fps]) を使用する。また、画像処理は画像処理用ソフトウェア HALCON を使用して、観測対象上に取り付けた 4 点の中心点をそれぞれ算出する。

本論文では紙面の都合上、定理 1 を検証するための外乱が存在しない場合の実験を省略し、観測対象を動かした場合の検証実験のみを行い、異なる  $\gamma$  のゲインを用いることで、 $L_2$  ゲイン制御性能解析に対する検証実験を行う。さらに同じ条件の下、従来研究である固定カメラ構造の視覚フィードバック制御<sup>(12)</sup>との視野に関する比較を行う。

観測対象は 4 秒間直線運動をさせた後、5.6 秒間は 8 の字運動をさせる。Fig. 4 に観測対象のトラジェクトリー

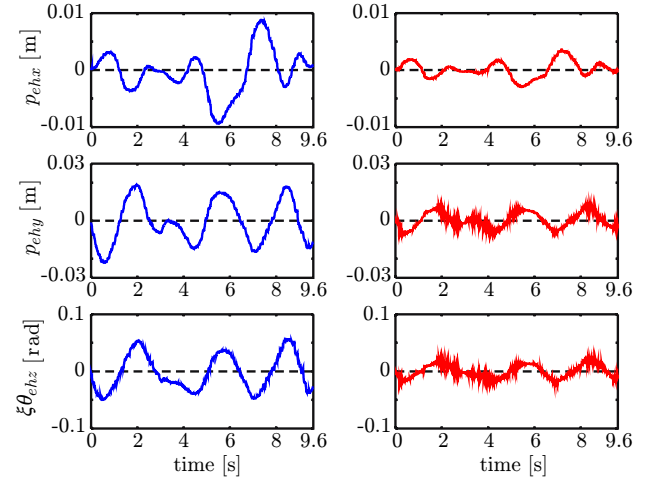


Fig. 5. Hand control error (Left: Gain A, Right: Gain B)

を示す。それぞれの初期設定は  $p_{wh} = [0.4732 \ 0.1 \ 0]^T$ ,  $\xi_{\theta_{wh}} = [0 \ 0 \ 0]^T$ ,  $p_{wz} = [0 \ 0 \ -1.16]^T$ ,  $\xi_{\theta_{wz}} = [0 \ 0 \ 0]^T$ ,  $p_{wc} = [0.4732 \ 0.1 \ -1.16]^T$ ,  $\xi_{\theta_{wc}} = [0 \ 0 \ 0]^T$  とする。また本実験ではマニピュレータの追従問題を考え、目標相対位置姿勢は時不変とし  $p_{hd} = [0 \ 0 \ -2]^T$ ,  $e^{\xi_{\theta_{hd}}} = I$ ,  $p_{cd} = [0 \ 0 \ -0.84]^T$ ,  $e^{\xi_{\theta_{cd}}} = I$  とした。初期状態では偏差は 0 とする。

**4.2  $L_2$  ゲイン制御性能解析に対する実験結果** 本実験の外乱抑制問題に対するゲインは以下の手順で決定する。

- Step 1:** 手先制御偏差に対するゲイン  $K_h$  とカメラ制御偏差に対するゲイン  $k_c$  を設定する。
- Step 2:** 推定偏差に対するゲイン  $k_e$  を (33) ~ (35) 式が満足するように設定する。
- Step 3:** それぞれの角速度偏差に対するゲイン  $K_{rh}$  と  $K_{rc}$  が与えられた  $\gamma$  と (31), (32) 式を満足するように決める。

実際に設計したゲインを以下に示す。

Gain A :  $\gamma = 0.388$ ,  $k_c = 10$ ,  $k_e = 20$

$$K_h = \text{diag}\{20, 20, 10, 10, 10, 20\},$$

$$K_{rh} = \text{diag}\{5, 5\}, \quad K_{rc} = \text{diag}\{5, 5\}$$

Gain B :  $\gamma = 0.241$ ,  $k_c = 30$ ,  $k_e = 30$

$$K_h = \text{diag}\{50, 50, 25, 25, 25, 50\},$$

$$K_{rh} = \text{diag}\{10, 10\}, \quad K_{rc} = \text{diag}\{10, 10\}$$

Figs. 5 ~ 7 にこれら二つのゲインを比較した実験結果を示す。Figs. 5, 6 は 3 次元空間での  $x$ ,  $y$  軸の位置偏差と  $z$  軸の回転偏差を示す。Fig. 5 が手先制御偏差, Fig. 6 がカメラ制御偏差である。また, Fig. 7 には状態  $x$  のユークリッドノルム  $\|x\|$  を示す。Figs. 5, 6 において, 左図が Gain A の場合を, 右図が Gain B の場合を示している。Fig. 7 では上図が Gain A の場合を, 下図が Gain B の場合を示している。Figs. 5 ~ 7 から明らかなように, 外乱

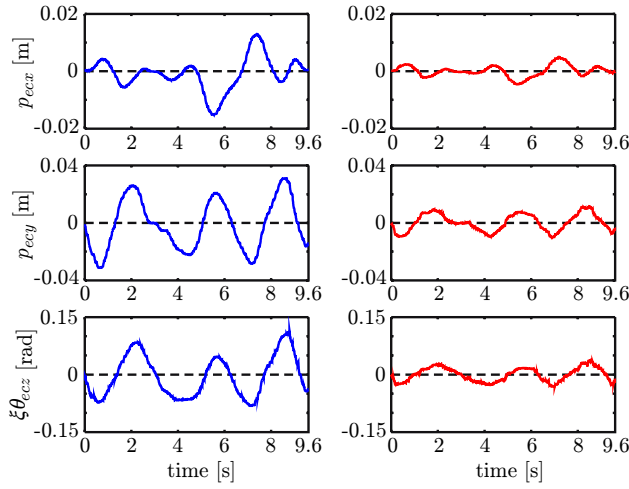


Fig. 6. Camera control error (Left: Gain A, Right: Gain B)

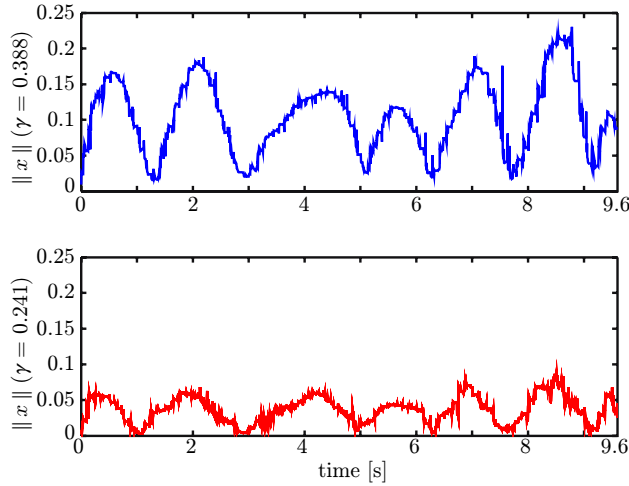


Fig. 7. Norm of the state (Top: Gain A, Bottom: Gain B)

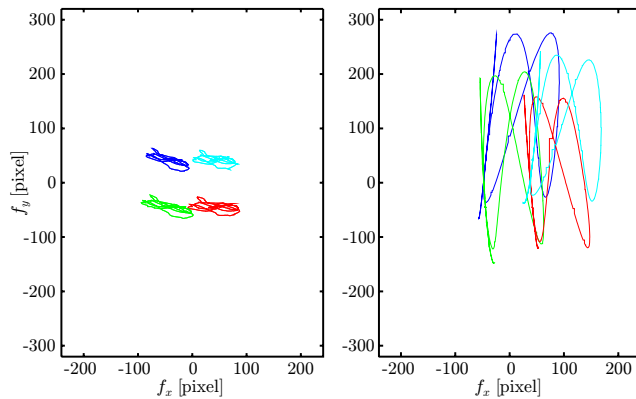


Fig. 8. Trajectory of the feature points (Left: movable camera (Gain B), Right: fixed camera)

がある場合、 $\gamma$  の小さい Gain B のほうが偏差が少なく追従性能が高いことが示されている。したがって、提案する制御則の有効性が検証実験によって示された。

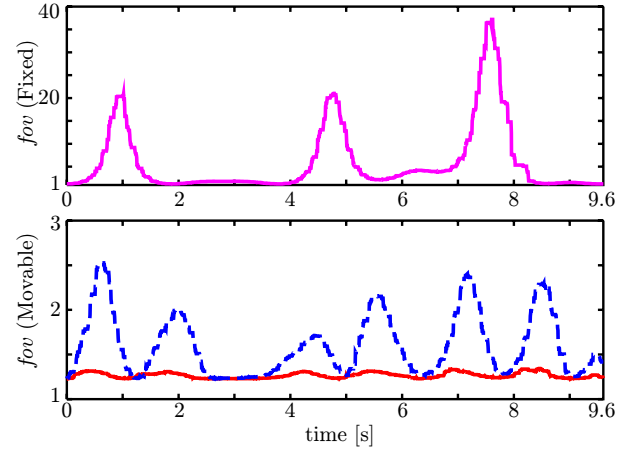


Fig. 9. Value of the field of view measure (Top: fixed camera, Bottom: movable camera (Dashed: Gain A, Solid: Gain B))

**4.3 カメラ構造の違いに対する実験結果** つぎに本研究の可動カメラ構造と従来研究の固定カメラ構造とで得られる視野に関する比較を行う。3.3 節で述べたように、本論文で提案している可動カメラ構造の動的視覚フィードバックシステムは、我々の従来研究である固定カメラ構造の動的視覚フィードバックシステムを特殊ケースとして理論的に含んだシステムとなっている。しかし本論文では、可動カメラのシステムが従来研究の固定カメラシステムに対してどのように優れているかを定量的には述べてこなかった。そこで本節では、実験を通して可動カメラと固定カメラで得られる視野を定量的に示すことで比較を行う。本節の実験結果は、可動カメラシステムに関するゲインは Gain A, Gain B を用い、固定カメラシステムに関するゲイン<sup>(12)</sup>は Gain B の  $k_e, K_h, K_{rh}$  を用いる。

Fig. 8 に観測対象の特徴点 4 点の実測値のトラジェクトリを示す。左図が Gain B を用いたときの可動カメラ、右図が固定カメラの場合の実験結果である。紙面の都合上、Gain A を用いたときの可動カメラの実験結果については省略する。両図で示されている  $f_x$  と  $f_y$  の範囲が、実験で用いたカメラが実際に観測できる範囲に相当する。両者を比較すると、固定カメラでは観測対象が動いた際に特徴点が視野の境界まで近づくのに対し、可動カメラでは特徴点の値がカメラの中央に留まっているのがわかる。これは、観測対象をカメラの中心で捉えるようにカメラが動いていることを意味している。

また、カメラ視野を測る指標としては Nelson ら<sup>(17)</sup> が以下の指標を提案している。

$$fov = \frac{1}{\prod_{i=1}^m \left(1 - \frac{f_{xi}^2}{f_{xM}^2}\right) \left(1 - \frac{f_{yi}^2}{f_{yM}^2}\right)} \quad (42)$$

ここで、 $[f_{xi} \ f_{yi}]$  はカメラから得られる画像面での特徴点の座標であり、 $[f_{xM} \ f_{yM}]$  は画像面でのそれらの最大値を表す。この指標の最小値は 1 であり、1 に近いほど観測対象が画像中心に存在していることに相当する。すなわち、カ

メラ視野に対して観測対象を外しにくい位置にカメラが存在していることになる。

本実験におけるこの指標の時間変化の図を Fig. 9 に示す。上図が固定カメラ、下図が可動カメラの場合であり、下図の中の破線が Gain A, 実線が Gain B の場合の実験結果を示している。上図と下図では、縦軸の値が異なることに注意されたい。Fig. 9 において、可動カメラのほうが値が小さく、観測対象を視野から外さないようにカメラが動いていたのがわかる。したがって、可動カメラ構造の動的視覚フィードバック制御は固定カメラ構造より得ることのできるカメラ視野が広がっていると言える。

## 5. おわりに

本論文では、二台のマニピュレータを用いた可動カメラ構造の3次元動的視覚フィードバックシステムを構成した。ロボットの作業スペースをより広げるために、カメラを固定させずに可動カメラを用いた本システムは、Eye-in-Hand 構造と固定カメラ構造の両構造を特殊な場合として含んでいる。動的視覚フィードバックシステムが有する受動性に基づいて制御則を提案し、リアプノフの安定定理により安定性解析を行った。また、観測対象が運動する場合に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行った。最後に、検証実験により  $L_2$  ゲイン制御性能解析と可動カメラ構造の有効性をそれぞれ示した。

(平成 19 年 3 月 5 日受付, 平成 19 年 10 月 15 日再受付)

## 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) F. Chaumette and S. Hutchinson: "Visual Servo Control, Part I: Basic Approaches", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 13, No. 4, pp. 82–90 (2006)
- (3) G. Flandin, F. Chaumette and E. Marchand: "Eye-in-Hand/Eye-to-Hand Cooperation for Visual Servoing", *Proc. of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2741–2746 (2000)
- (4) M. Elena, M. Cristiano, F. Damiano and M. Bonfe: "Variable Structure PID Controller for Cooperative Eye-in-Hand/Eye-to-Hand Visual Servoing", *Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 989–994 (2003)
- (5) V. Lippiello, B. Siciliano and L. Villani: "Eye-in-Hand/Eye-to-Hand Multi-Camera Visual Servoing", *Proc. of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, pp. 5354–5359 (2005)
- (6) R. Sharma and S. Hutchinson: "Motion Perceptibility and its Application to Active Vision-based Servo Control", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 13, No. 4, pp. 607–617 (1997)
- (7) 下山 勲 ほか: ロボットフロンティア, 岩波書店 (2005)
- (8) B. J. Nelson and P. K. Khosla: "Visually Guided Manipulation using Active Camera-Lens Systems", *Proc. of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 437–442 (1997)
- (9) A. Muis and K. Ohnishi: "Eye-to-Hand Approach on Eye-in-Hand Configuration within Real-Time Visual Servoing", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 10, No. 4, pp. 404–410 (2005)
- (10) H. Kawai, T. Azuma and M. Fujita: "Observer-based Dy-

namic Visual Feedback Control of Robotic Systems", *Trans. the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, Vol. 17, No. 1, pp. 39–47 (2004) (in Japanese)

河合宏之, 東 剛人, 藤田政之: "マニピュレータダイナミクスを考慮したオブザーバ型動的視覚フィードバック制御", *システム制御情報学会論文誌*, Vol. 17, No. 1, pp. 39–47 (2004)

- (11) M. Fujita, H. Kawai and M. W. Spong: "Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking: Stability and  $L_2$ -gain Performance Analysis", *IEEE Trans. Control Systems Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 40–52 (2007)
- (12) H. Kawai, T. Azuma and M. Fujita: "Passivity-based 3D Dynamic Visual Feedback Control with a Fixed Camera", *Trans. the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, Vol. 18, No. 4, pp. 127–135 (2005) (in Japanese)
- 河合宏之, 村尾俊幸, 東 剛人, 藤田政之: "受動性に基づく 3 次元動的視覚フィードバック制御の固定カメラ構造への展開", *システム制御情報学会論文誌*, Vol. 18, No. 4, pp. 127–135 (2005)
- (13) R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry: *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press (1994)
- (14) H. Kawai, T. Murao and M. Fujita: "Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control with Uncertainty of Camera Coordinate Frame", *Proc. of the 2005 American Control Conference*, pp. 3701–3706 (2005)
- (15) H. Kobayashi et al.: *Practical Control of Robot Manipulators*, Corona Publishing Co., Ltd. (1997) (in Japanese)
- 小林尚登 ほか: *ロボット制御の実例*, コロナ社 (1997)
- (16) F. Bullo and A. D. Lewis: *Geometric Control of Mechanical Systems*, Springer-Verlag (2004)
- (17) B. J. Nelson and P. K. Khosla: "Integrating Sensor Placement and Visual Tracking Strategies", *Proc. of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1351–1356 (1994)

村 尾 俊 幸 (正員) 2003 年金沢大学工学部電気・情報工学科卒業。2005 年金沢大学大学院博士前期課程修了, 同年金沢大学大学院博士後期課程入学, 同年東京工業大学大学院博士後期課程転入学, 2006 年産業技術大学院大学研究員, 2007 年同助教。視覚フィードバック制御に関する研究に従事。計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEE の会員。



河 合 宏 之 (非会員) 1999 年金沢大学工学部電気・情報工学科卒業。2001 年金沢大学大学院博士前期課程修了, 2004 年金沢大学大学院博士後期課程修了, 同年法政大学情報技術 (IT) 研究センターポストドクター, 2005 年金沢工業大学講師。視覚フィードバック制御に関する研究に従事。博士 (工学)。計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEE の会員。



藤 田 政 之 (非会員) 1984 年早稲田大学大学院理工学研究科博士前期課程修了 (電気工学専攻), 1985 年同博士後期課程中退。同年金沢大学工学部助手。同講師, 助教授を経て, 1992 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。1999 年金沢大学工学部教授。2005 年東京工業大学大学院理工学研究科教授。ロボパスト制御とその応用に関する研究に従事。工学博士。計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEE などの会員。

