論 文

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,L₂ ゲイン性能解析 **Keywords:** Visual feedback control, Manipulator dynamics, Passivity, Lyapunov stability, L₂-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八

*	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 Indus-						
	trial 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						

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⁽¹⁾⁽²⁾。 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⁽³⁾, Eye-in-Hand カメラの 位置を固定カメラで測る手法⁽⁴⁾,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⁽⁵⁾ 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



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

る手法が効果的となる⁽⁶⁾。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出てくる⁽⁷⁾。

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⁽⁶⁾,カメラ視野などの指標を 用いた制御⁽⁸⁾,リアルタイム性を強く意識した手法⁽⁹⁾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なされていない。

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⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾と固定カメラ構造⁽¹²⁾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 L₂ 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。

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 Σ_w , 手先に手 先座標系 Σ_h ,カメラマニピュレータの台座に台座座標系 Σ_z ,手先にカメラ座標系 Σ_c また観測対象に観測対象座標 系 Σ_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 Σ_i から Σ_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, 4×4 行列と して以下のように定義される。

ただし,演算子 \land (wedge) は 3 次元ベクトルを 3 × 3 の 歪対称行列へ写像する演算子であり,その逆写像は \lor (vee) で定義される ⁽¹³⁾。例えば,基準座標系 Σ_w からみた手先 座標系 Σ_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[†],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

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

 $V_{co}^{b} = -\operatorname{Ad}_{(q_{co}^{-1})}V_{wc}^{b} + V_{wo}^{b} \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots (3)$

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, $\operatorname{Ad}_{(g_{ij})} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ は同次表現 g_{ij} の随伴 写像である⁽¹³⁾。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^{††}。そこで,相対位置姿勢

[†] 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。

^{††} 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 $m \perp (m \ge 4)$ 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。

 $u_e \in \mathcal{R}^6$ 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 gee を

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 $e_R(e^{\hat{\xi}\theta}) := \operatorname{sk}(e^{\hat{\xi}\theta})^{\vee} \in \mathcal{R}^3$, $\operatorname{sk}(e^{\hat{\xi}\theta}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}\theta} - e^{-\hat{\xi}\theta})$ であ り, $\operatorname{sk}(e^{\hat{\xi}\theta})$ 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} , さらには画像ヤコビアンの擬似逆行列 $J^{\dagger}(\bar{g}_{co}) \in \mathcal{R}^{6\times 2m}$ を用いることで

として導かれる⁽¹²⁾。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

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[†]。

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。

$$\bar{V}_{ho}^b = -\operatorname{Ad}_{(\bar{a}_{-1})} V_{wh}^b + u_e \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (9)$$

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

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

 $V_{eh}^b = -\operatorname{Ad}_{(\bar{q}_{h}^{-1})} V_{wh}^b + u_e - \operatorname{Ad}_{(\bar{q}_{h}^{-1})} V_{hd}^b \cdots \cdots (11)$

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⁽¹⁵⁾。

 $M_{h}(q_{h})\ddot{q}_{h} + C_{h}(q_{h}, \dot{q}_{h})\dot{q}_{h} + g_{h}(q_{h}) = \tau_{h} + \tau_{hd} \cdot (12)$

 $q_h, \dot{q}_h, \ddot{q}_h \in \mathcal{R}^{n_h}$ 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, $M_h(q_h) \in \mathcal{R}^{n_h imes n_h}$ 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・コリオリカ項, $g_h(q_h) \in \mathcal{R}^{n_h}$ 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 ⁽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

$$\tau_{h} = M_{h}(q_{h})\ddot{q}_{hd} + C_{h}(q_{h},\dot{q}_{h})\dot{q}_{hd} + g_{h}(q_{h}) + J_{hb}^{T}(q_{h}) \mathrm{Ad}_{(g_{hd}^{-1})}^{T}e_{h} + u_{rh}$$
(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



[†]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⁽¹⁴⁾。

 $\cdots \cdots (15)$

で表される。ただし,

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^b_{wc} 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

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

 $V_{ec}^{b} = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})}V_{wc}^{b} + u_{e} - \text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})}V_{cd}^{b}$ ······(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。

 $M_{c}(q_{c})\ddot{q}_{c} + C_{c}(q_{c},\dot{q}_{c})\dot{q}_{c} + g_{c}(q_{c}) = \tau_{c} + \tau_{cd} \cdot \cdot (19)$

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。

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

$$\tau_{c} = M_{c}(q_{c})\ddot{q}_{cd} + C_{c}(q_{c},\dot{q}_{c})\dot{q}_{cd} + g_{c}(q_{c}) + J_{cb}^{T}(q_{c})\mathrm{Ad}_{(q^{-1})}^{T}e_{c} + u_{rc} (21)$$

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

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_{h} \\ \dot{r}_{c} \\ V_{eh}^{b} \\ V_{ec}^{b} \\ V_{ee}^{b} \\ V_{ee}^{b} \\ V_{ee}^{b} \\ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_{h}^{-1}C_{h}r_{h} + M_{h}^{-1}J_{hb}^{T}\operatorname{Ad}_{(g_{hd}^{-1})}^{T}e_{h} \\ -M_{c}^{-1}C_{c}r_{c} + M_{c}^{-1}J_{cb}^{T}\operatorname{Ad}_{(g_{cd}^{-1})}^{T}e_{c} \\ -\operatorname{Ad}_{(\overline{g}_{ho}^{-1})}J_{hb}r_{h} \\ -\operatorname{Ad}_{(\overline{g}_{co}^{-1})}J_{cb}r_{c} \\ 0 \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} M_{h}^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{c}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\operatorname{Ad}_{(g_{eh}^{-1})} & 0 & I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\operatorname{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} & I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\operatorname{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} \end{bmatrix} u \\ + \begin{bmatrix} M_{h}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & M_{c}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} w \cdots \cdots \cdots (22)$$

で表される。ただし,

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

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⁽¹²⁾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)式のみの,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

$\nu = N x \cdots \cdots$								
	I 0	0	0	0]				
	0 I	0	0	0				
N :=	0.0	-I	0	0				
	0.0	0	-I	0				
	00A	$d_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{eh}})}$	$\operatorname{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{ec}})}$	-I				
とするとき,(22)式の動的視覚フィードバックシステム								
の入出力間に								
$\int_{0}^{T} u^{T} \nu d\tau \ge -\beta_0 , \forall T > 0 \cdots \cdots \cdots \cdots (25)$								
が $ec{D}$ 立つ。ただし eta_0 はある非負の定数である。								

(証明) エネルギー関数として

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

を考える。ここで $E(g_{ij}) := \frac{1}{2} ||p_{ij}||^2 + \phi(e^{\xi \theta_{ij}})$ であり, 関数 $\phi(e^{\xi \theta_{ij}})$ は回転行列に対する誤差関数を表す正定関数である ⁽¹⁶⁾。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

となる。(27) 式の両辺を積分することで

$$\int_{0}^{T} u^{T} \nu d\tau = V(T) - V(0) \ge -V(0) := -\beta_{0} (28)$$

が成り立つ。 β_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 $V^b_{wh}=0$,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⁽¹²⁾が含ま れていることは明らかである。したがって可動力メラ構造 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。

 $u = -K\nu = -KNx , \dots \dots \dots (29)$ $K := \text{diag}\{K_{rh}, K_{rc}, K_h, K_c, K_e\}$

 $K_{rh} := \operatorname{diag}\{k_{rh1}, \dots, k_{rhn_h}\} と K_{rc} := \operatorname{diag}\{k_{rc1}, \dots, k_{rcn_c}\}$ 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, $K_h := \operatorname{diag}\{k_{h1}, \dots, k_{h6}\}$, $K_c := \operatorname{diag}\{k_{c1}, \dots, k_{c6}\} と K_e := \operatorname{diag}\{k_{e1}, \dots, k_{e6}\}$ 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(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

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

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 $k_c \ge k_e$ 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 γ を用いてつぎの条件を与える。

$$K_{rc} - \frac{1}{2\gamma^2}I - \frac{1}{2}I > 0$$
(32)
$$K_h - \frac{1}{2}I - \frac{(2k_c - 1)l}{2(1 - 1)l}I > 0$$
(33)

$$k_{c} - \frac{1}{2} - l > 0$$

$$k_{e} - \frac{1}{2\gamma^{2}} - \frac{1}{2} > 0$$
(34)

ただし

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 γ に対して , $(31) \sim (35)$ 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 γ 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

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

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

となる。ただし

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

とした。 $P \ge 0$ とし,両辺を積分すると

$$\int_{0}^{T} (\gamma^{2} \|w\|^{2} - \|x\|^{2}) d\tau \ge 2V(T) - 2V(0)$$
$$\ge -2V(0) := -\beta \cdots (40)$$

が成り立つ。 β は初期状態にのみ依存する非負の定数で ある。

$$\mathcal{DS}_{o}$$

$$\mathcal{CCC} P \text{ Id}$$

$$P = \begin{bmatrix} K_{rh} - \frac{1}{2\gamma^{2}}I - \frac{1}{2}I & 0 & 0 \\ 0 & K_{rc} - \frac{1}{2\gamma^{2}}I - \frac{1}{2}I & 0 \\ 0 & 0 & K_{h} + k_{e}I - \frac{1}{2}I \\ 0 & 0 & k_{e}\text{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{eh}})}\text{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{eh}})} \\ 0 & 0 & -k_{e}\text{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{eh}})} \\ 0 & 0 \\ k_{e}\text{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{eh}})}\text{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{ec}})} & -k_{e}\text{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{eh}})} \\ (k_{c} + k_{e} - \frac{1}{2})I & -k_{e}\text{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{eh}})} \\ -k_{e}\text{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{ec}})} & \left(k_{e} - \frac{1}{2\gamma^{2}} - \frac{1}{2}\right)I \end{bmatrix}$$

$$(41)$$

と変形できるので、シューア補元を計算することで $P \ge 0$ となる十分条件は $(31) \sim (35)$ 式を満たすこととなる[†]。

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, γ 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_{∞} 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。

[†] 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しかない。



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⁽¹⁵⁾ 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ィジタル制御装置 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 γ 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⁽¹²⁾との性能比較実験を行う。

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を示す。それぞれの初期設定は $p_{wh} = [0.4732 \ 0.1 \ 0]^T$,



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

 $\xi \theta_{wh} = [0 \ 0 \ 0]^T$, $p_{wz} = [0 \ 0 \ -1.16]^T$, $\xi \theta_{wz} = [0 \ 0 \ 0]^T$, $p_{wc} = [0.4732 \ 0.1 \ -1.16]^T$, $\xi \theta_{wc} = [0 \ 0 \ 0]^T$ 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 $p_{hd} = [0 \ 0 \ -2]^T$, $e^{\hat{\xi} \theta_{hd}} = I$, $p_{cd} = [0 \ 0 \ -0.84]^T$, $e^{\hat{\xi} \theta_{cd}} = I$ 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 γ 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 : $\gamma = 0.388$, $k_c = 10$, $k_e = 20$ $K_h = \text{diag}\{20, 20, 10, 10, 10, 20\}$, $K_{rh} = \text{diag}\{5, 5\}$, $K_{rc} = \text{diag}\{5, 5\}$

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

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

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

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からも明らかなように,外乱 がある場合, γ 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



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, Right: fixed camera)

制御則の有効性が検証実験によって示された。

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。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ーを示す。左図が可動 カメラ,右図が固定カメラの場合の実験結果である。両図



Fig. 9. Value of the feild of view measure (Solid: movable camera, Dashed: fixed camera)

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⁽¹⁷⁾が 以下の指標を提案している。

$$fov = \frac{1}{\prod_{i=1}^{m} \left(1 - \frac{f_{x_i}^2}{f_{xM}^2}\right) \left(1 - \frac{f_{y_i}^2}{f_{yM}^2}\right)} \dots \dots \dots (42)$$

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。 図中の実線が可動カメラ,破線が固定カメラの場合の実験 結果を示している。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, L₂ ゲイン制御性能解析を行っ た。最後に,検証実験によりL₂ 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7年7月20日受付,平成15年1月14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 Automa*tion, 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/Eyeto-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/Eyeto-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 Eyein-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 Dynamic 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 L₂-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:ロボット制御の実際, 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

 $I\!E\!E\!E$ 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終了, 同年金沢大学大学院博士後期課程私学,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。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。ロバ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。