産業技術大学院大学紀要 No.4, pp.67－72（2010）〔論文〕

# 受動性に基づく画像ベース視覚フィードバック制御の一考察

村 尾 俊 幸*・河 合 宏 之**・藤 田 政 之***

# A Study on Image-based Visual Feedback Control via Passivity Approach

Toshiyuki Murao*, Hiroyuki Kawai** and Masayuki Fujita***

## Abstract

This paper deals with image-based visual feedback control via passivity approach. Firstly, the relative pose and the pinhole camera model are given. Secondly, we establish the relationship between the control error in the 3-D workspace and the visual feature error in the image space. Next, we derive the passivity of the image-based dynamic visual feedback system by combining the passivity of the control error system and the manipulator dynamics. 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 simulation results.

Keywords: Visual Feedback Control, 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の研究はますます盛んに行われており，工場だけでなくより複雑なシステムや幅広い分野へも適用されるようになってきている [1, 2]. 中でも少子高齢化社会を迎える日本において必要不可欠とされる医療分野では，視覚フィードバック制御による腹腔鏡の制御 [3] や超音波探触子の制御 [4] などが，また生命科学の分野では，細胞注入 [5] などの応用研究が行われている.

古くから提案されている視覚フィードバック制御則は, 主に位置ベース法と画像 (特徴) ベース法という二つの制御手法に分類できることがよく知られている [1, 2]. 位置ベース法はカメラから観測対象の相対位置姿勢を元に, 目標値入力を与える制御手法である. そのため, この手法では画像特徴量から相対位置姿勢の復元が最初に必要になるのだが, 相対位置姿勢の復元とフィードバック制御則はそれぞれ個別に考えられ, おもにノイズに対してロバストかつ高速な相対位置姿勢の検出法が研究の対象となることが多かった. それに対して文献 [6] は, 通常の位置ベース法が各時点における静的な画像情報を用いて相対位置姿勢を推定するのに対して，動きのモデルを用いて位置姿勢を推定し, かつ推定と制御を含めた全体の安定性について議論するという点で新しい制御アプローチとなっている. 一方, 最も初期の研究として文献 [7] が挙げられる画像ベース法は, 画像上の特徴量をフィードバックさせる制御則であり, 3 次元的な復元を行わず画像特徴量をそのまま扱うために比較的ロバストな制御則を設計できる手法となる. 近年では, 画像ベース法と位置ベース法の両手法を切り替える制御手法も提案されている [8]. また, 最新の視覚フィードバック制御に関する研究が文献 [9] にまとめられている.

本稿では, 受動性に基づいた画像ベース法の安定化視覚フィードバック制御則を提案する. 文献 [6] と同様のアプローチとなるが, 制御入力は相対位置姿勢の偏差ではなく, 特徴量の偏差のフィードバックをそのまま制御入力として与えるものとなる. 受動性に基づくアプローチで制御則は提案され, 安定性と $L_2$ ゲイン制御性能解析について議論し, 制御則の有効性をシミュレーション結果により検証する.

## 2 視覚カメラモデル

### 2.1 剛体運動の表現

本論文では，図 1 に示すような，三つの座標系によって表される Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムについて考える. 図中の座標系をマニピュレータの台座に基準座標系 $\Sigma_w$，カメラにカメラ座標系 $\Sigma_c$，観測対象に観測対象座標系 $\Sigma_o$ として定義する.

Received on September 30, 2010.
* 産業技術大学院大学, Advanced Institute of Industrial Technology
** 金沢工業大学, Kanazawa Institute of Technology
*** 東京工業大学, Tokyo Institute of Technology

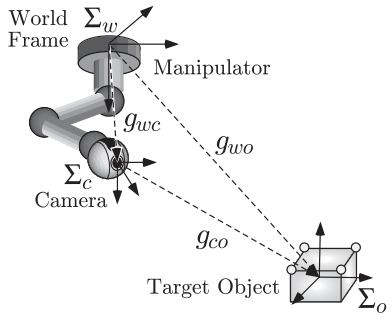


図 1: Eye-in-hand visual feedback system

本システムの制御目的は運動する観測対象にカメラを追従させることである．言い換えると，カメラ座標系 $\Sigma_c$ からみた観測対象座標系 $\Sigma_o$ の相対位置姿勢 $g_{co}$ を目標位置姿勢 $g_d$ (本論文では一定値であるとする) に常に一致させておくこととなる．ここで，$g_{ab}$ は同次表現と呼ばれ，任意の二つの座標系 $\Sigma_a$ から $\Sigma_b$ の位置 $p_{ab} \in \mathcal{R}^3$ と姿勢を表す回転行列 $e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} \in SO(3)$ 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．

$$g_{ab} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} & p_{ab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

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 [10].

本システムにおいて, 基準座標系 $\Sigma_w$ からみたカメラ座標系 $\Sigma_c$ の相対位置姿勢は $g_{wc}$ は順運動学によりマニピュレータの関節角度から既知情報となる．しかし, 観測対象が未知な運動をするため, 観測対象座標系 $\Sigma_o$ に関する相対位置姿勢 $g_{wo}$, $g_{co}$ は未知情報となってしまう．

この相対位置姿勢 $g_{co}$ と目標値 $g_d$ の偏差を，制御偏差 $g_{ec}$ としてつぎのように定義する．

$$g_{ec} := g_d^{-1} g_{co} \tag{2}$$

さらに，この制御偏差に対する制御偏差ベクトルを

$$e_c := \begin{bmatrix} p_{ec} \\ e_R(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^6 \tag{3}$$

と定義する． ただし $e_R(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}}) := \mathrm{sk}(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}})^\vee \in \mathcal{R}^3$, $\mathrm{sk}(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} - e^{-\hat{\xi}\theta_{ab}})$ である．

制御目的を達成するためには $g_{co}$ が必要になるが，$g_{co}$ は同次表現の合成則から以下のように導かれる．

$$g_{co} = g_{wc}^{-1} g_{wo} \tag{4}$$

また，カメラ座標系からみた観測対象の相対速度は，$g_{co}$ を時間微分することで，

$$V_{co}^b = -\mathrm{Ad}_{(g_{co}^{-1})} V_{wc}^b + V_{wo}^b \tag{5}$$

のように導かれる [6]. ここで，$V_{ab}^b = (g_{ab}^{-1}\dot{g}_{ab})^\vee \in \mathcal{R}^6$ は剛体運動のボディ速度を表しており，$\mathrm{Ad}_{(g_{ab})} \in \mathcal{R}^{6\times 6}$ は同次表現 $g_{ab}$ の随伴写像として，

$$\mathrm{Ad}_{(g_{ab})} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} & \hat{p}_{ab} e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} \\ 0 & e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} \end{bmatrix}. \tag{6}$$

で表される [10].

### 2.2　ピンホールカメラモデル

上述の相対位置姿勢 $g_{co}$ は観測対象の位置姿勢 $g_{wo}$ が測定不可能であるために未知情報となる. そこで, カメラの視覚情報を利用することを考え, 本節ではまずカメラモデルを導出する．

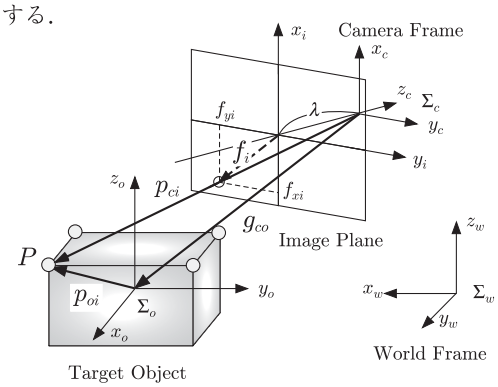


図 2: Pinhole camera model

本論文では, 図 2 に示すようなピンホールカメラを考え, そのモデルを示す. 画像特徴量として観測対象に取り付けられた $m$ 点 ($m \geq 4$) の特徴点の画像面上における $x$ 座標と $y$ 座標を考える [11]. このとき, 観測対象座標系 $\Sigma_o$ の原点から各特徴点までのベクトルを $p_{oi} \in \mathcal{R}^3 (i = 1, \cdots, m)$ とすると, カメラからみた相対的な特徴点 $p_{ci} \in \mathcal{R}^3 (i = 1, \cdots, m)$ は

$$p_{ci} = g_{co} p_{oi} \tag{7}$$

で表される． ただし, 特徴点 $p_{oi}$ はすべて既知であるとし, (7) 式は同次表現でよく用いられる表記法 ($[p^T\ 1]^T$ を $p$ と表記 [10]) により表したものである． $p_{ci}$ の各要素は $p_{ci} = [x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}]^T$ とする．

しかし, 相対的な特徴量 $p_{ci}$ も三次元情報であるため, カメラから直接得ることができない．したがって, カメラから得られる画像特徴量 $f(g_{co})$ について考える．この画像特徴量である $f(g_{co})$ は 2 次元情報ではあるが, 3 次元情報である $g_{co}$ の情報を含んでいる．画像面上での特徴点の座標を $[f_{xi}\ f_{yi}]^T (i = 1, \cdots, m)$ とし, 特徴量を $f_i(g_{co}) := [f_{xi}\ f_{yi}]^T (i = 1, \cdots, m)$ と定義すると, 特徴量は透視変換を用いることで

$$f_i(g_{co}) = \frac{s\lambda}{z_{ci}} \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \end{bmatrix} \tag{8}$$

で表される．ただし，$\lambda$ はカメラの焦点距離，$s$ は [meter] を [pixel] に換算するスケーリングパラメータである．この $f_i(g_{co})$ を縦に並べたベクトルを $f$ とすると

$$f(g_{co}) = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix} \tag{9}$$

となり，この $f(g_{co})$ が実際にカメラから得られる視覚情報となる．本節では $f$ が三次元情報を含んでいることをより明示的に示すために $f(g_{co})$ と示したが，次節からは簡略化のために $f$ と示す．

## 3　受動性に基づく画像ベース視覚フィードバック制御

### 3.1　画像面上における目標値

本制御手法では目標値は相対位置姿勢 $g_d$ として与えられる．本節でははじめに，目標値 $g_d$ に対して，画像面上における目標値 $f_d$ を求めることとする．図 3 に目標値を生成するためのカメラモデルを示す．

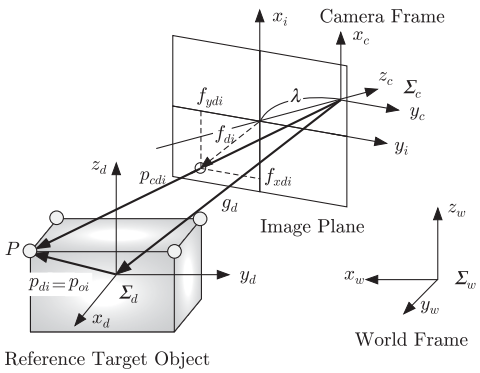


図 3: Reference camera model

カメラからみた相対的な特徴点の目標値 $p_{cdi} \in \mathcal{R}^3 (i = 1, \cdots, m)$ は

$$p_{cdi} = g_d p_{oi} \tag{10}$$

で表される．　ここで，$p_{cdi}$ の各要素は $p_{cdi} = [x_{cdi}, y_{cdi}, z_{cdi}]^T$ とする．

画像面上での特徴量の目標値を $f_{di} := [x_{di}\ y_{di}]^T (i = 1, \cdots, m)$ とすると，透視変換を用いることで $f_{di}$ は

$$f_{di} = \frac{s\lambda}{z_{cdi}} \begin{bmatrix} x_{cdi} \\ y_{cdi} \end{bmatrix} \tag{11}$$

で表される．この $f_{di}$ を縦に並べたベクトルを $f_d$ とすると

$$f_d = \begin{bmatrix} f_{d1} \\ \vdots \\ f_{dm} \end{bmatrix} \tag{12}$$

となる．この $f_d$ が目標相対位置姿勢 $g_d$ に対する，画像面上における特徴量の目標値となる．

### 3.2　画像ヤコビアン

つぎに，画像特徴量 $f$ と，目標相対位置姿勢 $g_d$ から透視変換して得られる画像特徴量の目標値 $f_d$ との関係式を導出する．

$f_i$ を推定値 $p_{cdi}$ のまわりで 1 次テーラー展開することで次式が得られる．

$$f_i - f_{di} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{z_{cdi}} & 0 & -\frac{s\lambda x_{cdi}}{z_{cdi}^2} \\ 0 & \frac{s\lambda}{z_{cdi}} & -\frac{s\lambda y_{cdi}}{z_{cdi}^2} \end{bmatrix} (p_{ci} - p_{cdi}) \tag{13}$$

ここで，画像特徴点 $p_{ci}$ とその目標値 $p_{cdi}$ の間の関係が必要になるが，その関係式を導出するために，制御偏差の回転量 $\theta_{ec}$ は十分に小さいと仮定する．この仮定により姿勢に関する制御偏差が以下のように近似できる．

$$e^{\hat{\xi}\theta_{ec}} \simeq I + \mathrm{sk}(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) \tag{14}$$

この近似を用いることで，(7) 式の真値と (10) 式の目標値との偏差は

$$p_{ci} - p_{cdi} = e^{\hat{\xi}\theta_d} \begin{bmatrix} I & -\hat{p}_{oi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{ec} \\ e_R(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) \end{bmatrix} \tag{15}$$

と関係づけられる．ここで，実際の画像特徴量 $f$ とその目標値 $f_d$ との差を $f_e := f - f_d$ として定義する．このとき，$f_e$ はつぎのように関係づけられる．

$$f_e = J(g_d) e_c \tag{16}$$

ただし，

$$J(g_d) := [J_1^T(g_d)\ \ J_2^T(g_d)\ \ \cdots\ \ J_m^T(g_d)]^T \tag{17}$$

$$J_i(g_d) := \begin{bmatrix} \frac{s\lambda}{z_{cdi}} & 0 & -\frac{s\lambda x_{cdi}}{z_{cdi}^2} \\ 0 & \frac{s\lambda}{z_{cdi}} & -\frac{s\lambda y_{cdi}}{z_{cdi}^2} \end{bmatrix} e^{\hat{\xi}\theta_d} \begin{bmatrix} I & -\hat{p}_{oi} \end{bmatrix} \quad (i = 1, \cdots, m) \tag{18}$$

である．この画像ヤコビアン $J(g_d)$ は 3 次元上の制御偏差と画像平面上の制御偏差を関係づける行列となっている．

$J(g_d)$ が列フルランクを満たすように 4 点以上の特徴点をとり，その逆行列 $J^\dagger(g_d) = (J^T J)^{-1} J^T$ を用いると，

$$e_c = J^\dagger(g_d) f_e \tag{19}$$

が導かれる．したがって，制御偏差ベクトルは相対位置姿勢 $g_{co}$ が未知でも，画像特徴量 $f$ のみで構成することができる．

### 3.3　制御偏差システムと制御則

(2) 式の制御偏差 $g_{ec}$ を時間微分することにより，制御偏差システムを導出する．制御偏差システムは

$$V_{ec}^b = -\mathrm{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} \mathrm{Ad}_{(g_d^{-1})} V_{wc}^b + V_{wo}^b \tag{20}$$

となる．この制御偏差システムには以下の性質が成立する．

**補題 3.1.** 観測対象が静止している (すなわち $V_{wo}^b = 0$) とする．このとき, 入力を $u_c := \mathrm{Ad}_{(g_d^{-1})} V_{wc}^b$, 出力を $\nu_c := -e_c$ とするとき, (20) 式の制御偏差システムの入出力間に

$$\int_0^T u_c^T \nu_c d\tau \geq -\beta_c, \ {}^\forall T > 0 \tag{21}$$

が成り立つ. ただし $\beta_c$ はある非負の定数である．

この補題 3.1 はつぎのエネルギー関数を用いることで証明される．

$$V_c = \frac{1}{2}\|p_{ab}\|^2 + \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}}) \tag{22}$$

ここで関数 $\phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}}) := \frac{1}{2}\mathrm{tr}(I - e^{\hat{\xi}\theta_{ab}})$ は回転行列に対する誤差関数を表す正定関数である [12].

制御偏差システム (20) に対し，補題 3.1 の受動性に基づくことで次式の制御則を提案する．

$$u_c = -K_c \nu_c = K_c e_c \tag{23}$$

ただし，$K_c := \mathrm{diag}\{k_{c1}, \cdots, k_{c6}\}$ は $x$ 軸，$y$ 軸，$z$ 軸の並進と回転におけるゲインであり, 各要素はすべて正とする．このとき安定性に関してつぎの定理が導かれる．

**定理 3.1.** $V_{wo}^b = 0$ のとき，制御偏差システム (20) と (23) 式の入力で構成される閉ループ系の平衡点 $e_c = 0$ は漸近安定である．

証明 : (22) 式のエネルギー関数を Lyapunov 関数候補とし, 解軌道に沿って時間微分を行うと，提案した (23) 式の制御則を用いることで,

$$\dot{V}_c = u_c^T \nu_c = -e_c^T K_c e_c \tag{24}$$

が導かれる．行列 $K_c$ が正定であるため，システムの平衡点 $e_c = 0$ は漸近安定となる．　□

提案した制御則は (19),(23) 式より

$$u_c = K_c J^\dagger(g_d)(f - f_d) \tag{25}$$

と変形される．したがって, 画像ベース法のように特徴量の偏差のフィードバックをそのまま制御入力として与えるような安定化視覚フィードバック制御則となっていることがわかる．また, 文献 [6] では制御偏差システムと推定偏差システムを合わせて視覚フィードバックシステムとしていたが, 本手法では制御偏差システムのみで視覚フィードバックシステムを構成していることになる．

次節ではさらにカメラを把持するマニピュレータのダイナミクスを考慮した上で制御則を提案する．

## 4　受動性に基づく画像ベース動的視覚フィードバック制御

### 4.1　画像ベース動的視覚フィードバックシステムと受動性

本節では，前節で構成したシステムに対して，つぎのマニピュレータダイナミクスを考慮する [13].

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + \tau_d \tag{26}$$

$q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathcal{R}^n$ はそれぞれの各関節の角度，角速度，角加速度を表し，$\tau \in \mathcal{R}^n$ は入力トルク，$\tau_d \in \mathcal{R}^n$ はトルク外乱，$M(q) \in \mathcal{R}^{n\times n}$ は正定な慣性行列，$C(q,\dot{q})\dot{q} \in \mathcal{R}^n$ は遠心力・コリオリ力項，$g(q) \in \mathcal{R}^n$ は重力項を表す．

また，マニピュレータの手先に取り付けられているカメラの速度は, ボディマニピュレータヤコビアン $J_b(q) \in \mathcal{R}^{6\times n}$ を用いることで $V_{wc}^b = J_b(q)\dot{q}$ として表される [10]. 一方，手先の速度の目標値を $u_d$ とし，マニピュレータの関節角速度の目標値を $\dot{q}_d$ で表すと，$u_d = J_b(q)\dot{q}_d$ と表すことができる．ここで，関節角速度に関する偏差を

$$r := \dot{q} - \dot{q}_d \in \mathcal{R}^n \tag{27}$$

と定義する．この関節角速度偏差 $r$ が 0 になると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，マニピュレータへの入力トルクとして

$$\begin{aligned}\tau = {} & M(q)\ddot{q}_d + C(q,\dot{q})\dot{q}_d + g(q) \\ & + J_b^T(q)\mathrm{Ad}_{(g_d^{-1})}^T e_c + u_r\end{aligned} \tag{28}$$

を考える．$\dot{q}_d$，$\ddot{q}_d$ はそれぞれ関節角速度と関節角加速度の目標値である．$u_r$ 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，(20), (26)〜(28) 式を用いることで Eye-in-Hand カメラ構造の 3 次元画像ベース動的視覚フィードバックシステムは

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{r} \\ V_{ec}^b \end{bmatrix} = {} & \begin{bmatrix} -M^{-1}Cr + M^{-1}J_b^T \mathrm{Ad}_{(g_d^{-1})}^T e_c \\ -\mathrm{Ad}_{(g_{co}^{-1})} J_b r \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} M^{-1} & 0 \\ 0 & -\mathrm{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} M^{-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} w\end{aligned} \tag{29}$$

で表される．ただし，入力，外乱，状態をそれぞれ

$$u := \begin{bmatrix} u_r \\ \mathrm{Ad}_{(g_d^{-1})} u_d \end{bmatrix}, \ w := \begin{bmatrix} \tau_d \\ V_{wo}^b \end{bmatrix}, \ x := \begin{bmatrix} r \\ e_c \end{bmatrix} \tag{30}$$

と定義している．Eye-in-Hand 構造の画像ベース動的視覚フィードバックシステムにおいて，状態 $x$ を 0 にとどめておくことで制御目的が達成される．

この画像ベース動的視覚フィードバックシステム (29) に対して，下記に示す受動性が成立する．

**補題 4.1.** 外乱がない (すなわち $w = 0$) とする．このとき，出力を $\nu := Nx$，$N := \mathrm{diag}\{I, -I\}$ とするとき，画像ベース動的視覚フィードバックシステム (29) の入出力間に

$$\int_0^T u^T \nu d\tau \geq -\beta_0, \ {}^\forall T > 0 \tag{31}$$

が成り立つ. ただし $\beta_0$ はある非負の定数である．

この補題 4.1 はつぎのエネルギー関数を用いることで証明される．

$$V = \frac{1}{2} r^T M r + \frac{1}{2}\|p_{ec}\|^2 + \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) \tag{32}$$

### 4.2　動的視覚フィードバック制御則と安定性

画像ベース動的視覚フィードバックシステム (29) に対し，補題 4.1 の受動性に基づくことで次式の制御則を提案する．

$$u = -K\nu = -KNx, \quad K := \mathrm{diag}\{K_r, K_c\} \tag{33}$$

ただし，$K_r := \mathrm{diag}\{k_{r1}, \cdots, k_{rn}\}$ はマニピュレータの各関節に対するゲインであり，ゲインにおける各要素はすべて正とする．このとき安定性に関してつぎの定理が導かれる．

**定理 4.1.** $w = 0$ のとき，画像ベース動的視覚フィードバックシステム (29) と (33) 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 : (32) 式のエネルギー関数を Lyapunov 関数候補とし，解軌道に沿って時間微分を行うと，提案した (33) 式の制御則 $u_k$ を用いることで，

$$\dot{V} = u^T\nu = -x^T N^T K N x \tag{34}$$

が導かれる．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．　□

### 4.3　$L_2$ 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．

ある正の数 $\gamma$ を用いてつぎの条件を与える．

$$K_r > \frac{\gamma^2 + 1}{2\gamma^2} I \tag{35}$$

$$K_c > \frac{\gamma^2 + 1}{2\gamma^2} I \tag{36}$$

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 4.2.** 与えられた $\gamma$ に対して，(35),(36) 式を満たすようにゲイン $K_r$, $K_c$ を選ぶとき，(29), (33) 式で構成される画像ベース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 (32) 式のエネルギー関数を考える．(29), (33) 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

$$\begin{aligned}
&\dot{V} + \frac{1}{2}\|x\|^2 - \frac{\gamma^2}{2}\|w\|^2 \\
&= -\frac{\gamma^2}{2}\left\| w - \frac{1}{\gamma^2}\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & \mathrm{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{ec}})} \end{bmatrix} x \right\|^2 \\
&\quad + \frac{1}{2\gamma^2}\left\| \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & \mathrm{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{ec}})} \end{bmatrix} x \right\|^2 + x^T N^T u + \frac{1}{2}\|x\|^2 \\
&\le \frac{1}{2\gamma^2}\|x\|^2 + x^T N^T u + \frac{1}{2}\|x\|^2
\end{aligned} \tag{37}$$

という関係式が成り立つ．(33) 式の制御則を代入すると

$$\begin{aligned}
&\dot{V} + \frac{1}{2}\|x\|^2 - \frac{\gamma^2}{2}\|w\|^2 \\
&\le -x^T K x + \frac{1}{2\gamma^2}\|x\|^2 + \frac{1}{2}\|x\|^2 \\
&= -x^T \begin{bmatrix} K_r - \frac{1}{2\gamma^2} I - \frac{1}{2} I & 0 \\ 0 & K_c - \frac{1}{2\gamma^2} I - \frac{1}{2} I \end{bmatrix} x
\end{aligned} \tag{38}$$

となる．(35), (36) 式が満たされるとし，両辺を積分すると

$$\begin{aligned}
\int_0^T (\gamma^2\|w\|^2 - \|x\|^2) d\tau &\ge 2V(T) - 2V(0) \\
&\ge -2V(0) := -\beta
\end{aligned} \tag{39}$$

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．

つぎにシミュレーションにて制御則の有効性の検証をおこなう．

## 5　シミュレーション

本稿では 3 次元の視覚フィードバック制御則を提案したが，シミュレーションでは，簡単のために水平 2 自由度マニピュレータである SICE-DD アームを考える．観測対象は 2 秒間直線運動をさせた後，2.8 秒間は 8 の字運動をさせる．ゲインは以下のものを用いた．

Gain A : $\gamma = 0.302$,

$K_c = \mathrm{diag}\{10, 10, 5, 5, 5, 10\}$, $K_r = \mathrm{diag}\{5, 5\}$

Gain B : $\gamma = 0.219$,

$K_c = \mathrm{diag}\{30, 30, 15, 15, 15, 30\}$, $K_r = \mathrm{diag}\{10, 10\}$

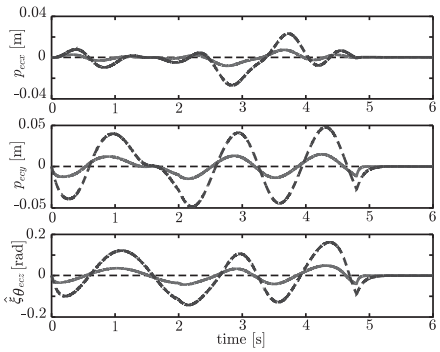


図 4: Control error: dashed; with Gain A: solid; with Gain B.

図 4 にこれら二つのゲインを比較したシミュレーション結果を示す．図 4 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．破線が Gain A の場合を，実線が Gain B の場合のグラフを示している．図 4 からも明らかなように，外乱がある場合，$\gamma$ 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．また，外乱がない場合 ($t > 4.8$) には，状態が平衡点 $x = 0$ に収束して

いることが確認される．したがって，提案する制御則の有効性がシミュレーション結果によって示された．

さらに，ビジュアルモーションオブザーバを用いた制御則とのシミュレーション比較をおこなう．比較する制御則は文献 [14] のものを用いた．両制御則を比較するためゲイン $K_r$, $K_c$ に対しては同じゲインを設定し，文献 [14] の手法に必要となる推定偏差に対するゲインは $K_e = 20I$ を用いた．

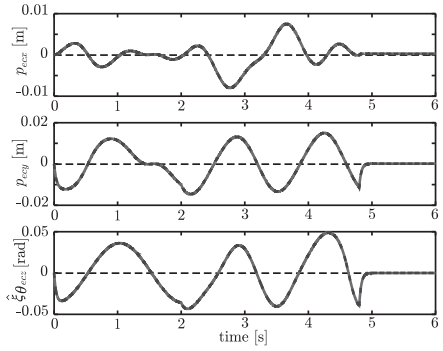


図 5: Control error: solid; with proposed control law: dashed; with previous one[14].

図 5 に両手法を比較したシミュレーション結果を示す．ほぼ同じシミュレーション結果となっているために重なっているが，図 5 には 2 本のグラフが書かれている．つまり，文献 [14] の手法とほぼ同じ制御性能を得られることがわかる．ただし，本稿の制御則はオブザーバを設計していないために，コントローラを設計する際に微分方程式を一つ解く必要がないという利点がある．

## 6　おわりに

本稿では，受動性に基づく画像ベース法の視覚フィードバック制御則として，文献 [6] の手法に対して，ビジュアルモーションオブザーバで相対位置姿勢を推定せずに，画像ベース法のように特徴量の偏差のフィードバックを制御入力として与えるような視覚フィードバック制御則を提案した．安定性と $L_2$ ゲイン制御性能解析について議論した後に，制御則の有効性をシミュレーション結果により示した．

## 参考文献

[1] F. Chaumette and S. Hutchinson, “Visual Servoing and Visual Tracking,” B. Siciliano and O. Khatib (Eds.), *Springer Handbook of Robotics*, Springer-Verlag, pp. 563–583, 2008.

[2] 橋本浩一, (講座) ビジュアルサーボー I～VI, システム/制御/情報, Vol. 53, No. 9, pp. 411–416, No. 11, pp. 476–483, Vol. 54, No. 1, pp. 34–42, No. 3, pp. 117–123, No. 5, pp. 206–213, No. 7, pp. 264–273, 2009–2010.

[3] K. Omote *et al.*, “Self-Guided Robotic Camera Control for Laparoscopic Surgery Compared with Human Camera Control,” *The American Journal of Surgery*, Vol. 177, No. 4, pp. 321–324, 1999.

[4] A. Krupa and F. Chaumette, “Control of an Ultrasound Probe by Adaptive Visual Servoing,” *Proc. of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2007–2012, 2005.

[5] S. Yu and B. J. Nelson, “Autonomous injection of biological cells using visual servoing,” In:D. Rus and S. Singh (Eds.), *Experimental Robotics VII*, Springer-Verlag, pp. 169–178, 2001.

[6] 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.

[7] B. Espiau, F. Chaumette and P. Rives, “A New Approach to Visual Servoing in Robotics,” *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 3, pp. 313–326, 1992.

[8] N. R. Gans and S. A. Hutchinson, “Stable Visual Servoing through Hybrid Switched-System Control,” *IEEE Trans. Robotics*, Vol. 23, No. 3, pp. 530–540, 2007.

[9] G. Chesi and K. Hashimoto (Eds.), *Visual Servoing via Advanced Numerical Methods*, Springer-Verlag, 2010.

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

[11] H. Michel and P. Rives, “Singularities in the determination of the situation of a robot effector from the perspective view of 3 points,” *Technical Report*, INRIA, 1993.

[12] F. Bullo and A. D. Lewis, *Geometric Control of Mechanical Systems*, Springer-Verlag, 2004.

[13] M. W. Spong, S. Hutchinson and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, John Wiley & Sons, 2006.

[14] 村尾俊幸，河合宏之，藤田政之, “受動性に基づく視覚フィードバックにおける推定と制御の内部構造,” 第 36 回 SICE 制御理論シンポジウム 資料, pp. 183-186, 2007.