

ナビゲーション関数を用いた視覚フィードバック制御の 目標値生成に対する一考察

村 尾 俊 幸*・河 合 宏 之**

A Study on Path Planning for Visual Feedback Control via Navigation Function

Toshiyuki Murao* and Hiroyuki Kawai**

Abstract

This paper investigates passivity-based pose control via a navigation function for three-dimensional (3-D) eye-in-hand visual feedback systems. Firstly, we describe the representation of a relative pose and a camera model. Next, a passivity-based stabilizing pose control law for the 3-D visual motion error system which the time-varying desired pose can be applied to is proposed. Moreover, a path planner to be appropriate for the visual motion error system is designed through a navigation function. Finally, we present simulation results in order to verify the validity of the proposed control scheme.

Keywords: visual feedback control, navigation function, passivity, stability

1. はじめに

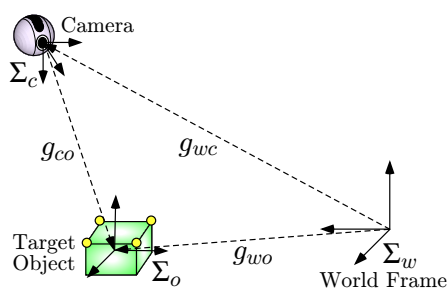


図 1: Visual feedback system with an eye-in-hand configuration.

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。

視覚フィードバック制御則は、従来より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よく知られている。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、固定カメラ構造とも言われるカメラとハンドが別々に配置された Eye-to-Hand 構造である[1, 2]。文献[6]は、位置ベース法のようにカメラから目標となる対象物（以下、目標対象と呼ぶ）への相対位置姿勢をもとに入力を与える制御手法となっているが、通常的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、かつ受動性を巧みに扱うことにより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。この受動性に基づく視覚フィードバック制御の手法は、Eye-in-Hand 構造[6]だけでなく、Eye-to-Hand 構造[7]に対しても同様のアプローチで制御則を提案できる。

本論文では、図 1 で示す Eye-in-Hand システムの受動性に基づく視覚フィードバック制御[6]に対する目標値生成手法について議論する。著者らは文献[8]にて、常に障害物が見えているという仮定のもと、カメラから得られる視覚情報を用いて障害物を回避できるような目標値生成手法をナビゲーション関数を用いることで提案している。しかし実システムにおいては、全方位カメラ等を用いない限り、カメラが障害物を回避した後は障害物が見えなくなることが多い。そこで本論文では、障害物をかわした後に切り替えるための目標値生成手法について提案する。具体的

Received on October 22, 2012.

* 産業技術大学院大学, Advanced Institute of Industrial Technology

** 金沢工業大学, Kanazawa Institute of Technology

には、障害物を回避した後は再びその障害物には衝突しないという仮定をおき、カメラがある作業範囲内から外に出ることなく最終目標位置姿勢へ収束することのみを目的とした目標値生成手法を提案する。

本論文の構成は以下のとおりである。2節では、従来研究[6]で提案している Eye-in-Hand 構造の3次元視覚フィードバック制御について述べる。3節では、2節で述べた制御のための目標値生成手法について議論する。4節でシミュレーション結果を示した後、最後に5節でまとめをおこなう。

2. 受動性に基づく安定化視覚フィードバック制御

2.1. 剛体運動の表現とカメラモデル

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。基準とする座標系として基準座標系 Σ_w 、カメラにカメラ座標系 Σ_c 、目標対象に目標対象座標系 Σ_o を定義する。また、任意の二つの座標系 Σ_a から Σ_b の位置 $p_{ab} \in \mathcal{R}^3$ と姿勢を表す回転行列 $e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} \in SO(3)$ を要素に持つ同次表現 g_{ab} を以下のように定義する。

$$g_{ab} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} & p_{ab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{4 \times 4} \quad (1)$$

ただし、演算子 $\wedge$ (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 $\vee$ (vee) で定義される[9]。

カメラ座標系からみた目標対象の相対位置姿勢 g_{co} は同次表現の合成則から以下のように導かれる。

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

また、カメラ座標系からみた目標対象の相対速度は、 g_{co} を時間微分することで、

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

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、 $\text{Ad}_{(g_{ab})} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ は同次表現 g_{ab} の随伴写像である[9]。

一方、上述の相対位置姿勢 g_{co} は目標対象の位置姿勢 g_{wo} が測定不可能であるために未知情報となる。本論文では、目標出力として得られる情報はピンホールカメラ(図2参照)から得られる画像特徴量とし、目標対象に取り付けられた $m(\geq 4)$ 点の特徴点の画像面上における x 座標と y 座標を考える。このとき、目標対象座標系 Σ_o の原点から各特徴点までのベクトルを $p_{oi} \in \mathcal{R}^3 (i=1, \dots, m)$ とすると、カメラからみた相対的な特徴点 $p_{coi} \in \mathcal{R}^3$ は $p_{coi} = g_{co} p_{oi}$ で表される。ただし、特徴点 p_{oi} はすべて既知であるとし、同次表現でよく用いられる表記法 $[p_{ab}^T \ 1]^T$ を p_{ab} と表記[9])により表したものである。

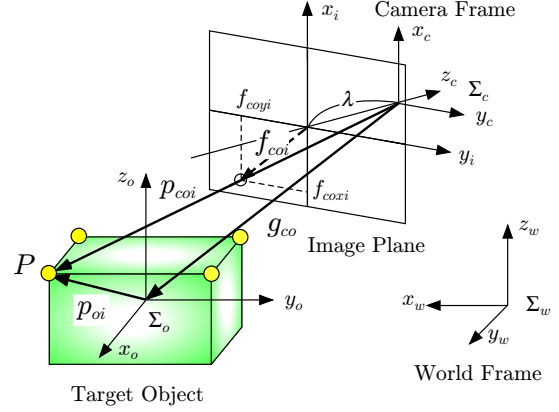


図 2: Pinhole camera model.

画像特徴量を $f_{coi} := [f_{coxi} \ f_{coyi}]^T$ と定義すると、特徴量は透視変換を用いることで、

$$f_{coi} = \frac{\lambda}{z_{coi}} \begin{bmatrix} x_{coi} \\ y_{coi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

で表される。ただし、 $\lambda \in \mathcal{R}$ はカメラの焦点距離であり、 p_{coi} の各要素を $p_{coi} = [x_{coi} \ y_{coi} \ z_{coi}]^T$ として表した。この f_{coi} を縦に並べたベクトル $f_{co} = [f_{co1}^T \ \dots \ f_{co4}^T]^T \in \mathcal{R}^{2m}$ が実際にカメラから得られる視覚情報となる。

2.2. 視覚フィードバック偏差システム

一般的な位置ベース法の視覚フィードバックシステムの制御目的は、カメラ座標系 Σ_c からみた目標対象座標系 Σ_o の相対位置姿勢 g_{co} を目標位置姿勢 g_{cd} に常に一致させておくことである。ただし、目標位置姿勢 g_{cd} は時変とするが、実システムを考慮に入れ、最終値は一定値とする。制御則を構成するにあたり g_{co} を直接得ることができないため、 g_{co} の推定値 $\bar{g}_{co}$ を得るために(3)式に基づいたつぎの視覚オブザーバを構成する。

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

$u_e \in \mathcal{R}^6$ 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、制御偏差 g_{ec} と推定偏差 g_{ee} をつぎのように定義する。

$$g_{ec} = g_{cd}^{-1} g_{co} \quad (6)$$

$$g_{ee} = \bar{g}_{co}^{-1} g_{co} \quad (7)$$

また、 $r_{ei} := \text{sk}(e^{\hat{\xi}\theta_{ei}})^\vee \in \mathcal{R}^3$, $\text{sk}(e^{\hat{\xi}\theta_{ei}}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}\theta_{ei}} - e^{-\hat{\xi}\theta_{ei}})$ を用いて、制御偏差ベクトルを $e_c := [p_{ec}^T \ r_{ec}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ と、推定偏差ベクトルを $e_e := [p_{ee}^T \ r_{ee}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ と定義する。推定偏差ベクトル e_e は視覚情報 f_{co} と推定値 $\bar{g}_{co}$ からつぎのように得ることができる。

$$e_e = J_e^T(\bar{g}_{co})(f_{co} - \bar{f}_{co}) \quad (8)$$

ここで、 $\bar{f}_{co}$ は画像特徴量 f_{co} の推定値を表し、 $J_e(\cdot)$ は画像ヤコビアン的一种である[6]。また、目標値 g_{cd} と推定偏

差ベクトル e_e を用いると、制御偏差ベクトル e_c は計算可能である [7] .

視覚フィードバック偏差システムは (6)(7) 式を時間微分することで下記のように導出することができる .

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ec}^b \\ \dot{V}_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix} V_{wo}^b \quad (9)$$

ただし、入力を

$$u := [u_c^T \ u_e^T]^T, \quad u_c := \text{Ad}_{(g_{cd}^{-1})} V_{wc}^b + V_{cd}^b \quad (10)$$

と定義している . 目標位置姿勢を時不変としていた文献 [6] の視覚フィードバック偏差システムと本論文の偏差システム (9) は同じ形となっているが、(10) 式にあるように、入力 u の一部に目標位置姿勢の速度 (以下では、目標速度とする) V_{cd}^b が陽に入るところが異なる . Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバック偏差システムにおいて、状態 $x := [e_c^T \ e_e^T]^T$ を 0 にとどめておくことで相対位置姿勢 g_{co} が目標位置姿勢 g_{cd} に一致することになる . この視覚フィードバック偏差システム (9) は目標対象が静止 (すなわち $V_{wo}^b = 0$) しているとき、入力 u から出力 $-x$ に対して受動性を有することを、以下のエネルギー関数を用いることで証明することができる .

$$V(x) = E(g_{ec}) + E(g_{ee}) \quad (11)$$

ここで $E(g_{ab}) := \frac{1}{2} \|p_{ab}\|^2 + \phi(e^{\hat{\theta}_{ab}})$ であり、関数 $\phi(e^{\hat{\theta}_{ab}})$ は回転行列に対する誤差関数を表す正定関数である [10] .

2.3. 安定化視覚フィードバック制御

Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバック偏差システム (9) に対し、受動性に基づくことで、目標対象が静止している場合に平衡点 $x = 0$ を安定とする制御則として次式を提案する .

$$u = -K(-x) = Kx \quad (12)$$

$$K := \text{diag}\{K_c, K_e\}$$

$K_c := \text{diag}\{k_{c1}, \dots, k_{c6}\}$ 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 . このとき安定性に関してつぎの定理が導かれる .

定理 1. [6] 目標対象が静止している ($V_{wo}^b = 0$) とき、Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバック偏差システム (9) と (12) 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 : (11) 式のエネルギー関数をリアプノフ関数候補とすると、(9)、(12) 式の解軌道に沿った時間微分は

$$\dot{V} = u^T(-x) = -x^T Kx \quad (13)$$

と導かれる . したがって、システムの平衡点 $x = 0$ は漸近安

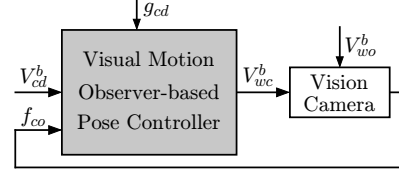


図 3: Block diagram of visual motion observer-based pose control.

定となる . $\square$

本節ではカメラ座標系からみた目標対象の相対位置姿勢 g_{co} を目標値 g_{cd} に一致させるための安定化制御則を提案した . 紙面の都合上省略するが、外乱が存在する場合に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とが可能である [6]. 図 3 に受動性に基づく安定化視覚フィードバック制御のブロック図を示す .

3. ナビゲーション関数を用いた目標位置姿勢生成

前節では、カメラからみた目標対象の相対位置姿勢を目標値に一致させる安定化制御則を提案したが、目標値に対する議論はなかった . 本研究の視覚フィードバック制御の制御目的は、ある作業範囲内に留まりつつ、目標位置姿勢の最終値 $g_{cd_f} = (p_{cd_f}, e^{\hat{\theta}_{cd_f}})$ に収束するような時変の目標位置姿勢 $g_{cd} = (p_{cd}, e^{\hat{\theta}_{cd}})$ を生成し、それにカメラからみた目標対象の相対位置姿勢 $g_{co} = (p_{co}, e^{\hat{\theta}_{co}})$ を一致させることとなる .

そこで本節では、目標位置姿勢 g_{cd} がある範囲に留まりながら最終値 g_{cd_f} へ収束するような g_{cd} のボディ速度 $V_{cd}^b = [(v_{cd}^b)^T (\omega_{cd}^b)^T]^T$ を設計する . 目標速度 V_{cd}^b が設計されれば、 g_{cd} はつぎの微分方程式を解くことで生成できることに注意されたい .

$$\dot{g}_{cd} = g_{cd} \hat{V}_{cd}^b \quad (14)$$

前節で提案した視覚フィードバック制御則 (12) と (10) 式で表される偏差システムの入力により、カメラ入力 V_{wc}^b は

$$V_{wc}^b = \text{Ad}_{(g_{cd})} (K_c e_c - V_{cd}^b) \quad (15)$$

のように構成されるが、目標速度 V_{cd}^b と目標位置姿勢 g_{cd} を用いることで生成できるようになる .

3.1. 目標軌道生成のための姿勢偏差

目標速度 V_{cd}^b を設計するにあたり、本節では姿勢に対して議論する . 作業範囲内の維持は、位置成分を用いて達成させるために、姿勢成分は目標姿勢 $e^{\hat{\theta}_{cd}}$ をその最終値 $e^{\hat{\theta}_{cd_f}}$ に収束させることのみを目的とする . はじめに、つぎの姿勢偏差を定義する .

$$e^{\hat{\theta}_{ed}} = e^{-\hat{\theta}_{cd_f}} e^{\hat{\theta}_{cd}} \quad (16)$$

また、偏差ベクトルを $r_{ed} := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}_{\theta_{ed}}} - e^{-\hat{\xi}_{\theta_{ed}}})^\vee$ として定義する。目標位置姿勢の最終値 g_{cdf} が時不変であることを考慮すると、(16) 式を時間微分することで、姿勢偏差速度の関係式はつぎのように導出することができる。

$$\omega_{ed}^b = \omega_{cd}^b \quad (17)$$

3.2. ナビゲーション関数

本節では、作業範囲内に留まりながら最終目標位置へ収束させるためのナビゲーション関数 $\varphi(p_{cd})$ を設計する。

ナビゲーション関数はつぎで定義される特殊人工ポテンシャル関数である。

定義 3.1. [11, 12] 滑らかなモース関数 $\varphi(p_{cd}): D \rightarrow [0, 1]$ が以下の性質を有するとき、 φ はナビゲーション関数である。

1. $p_{cdf} \in D$ のとき唯一の最小値が存在する。
2. D の境界で最大値を持つ。

ここで、 D はカメラが移動可能な領域を中心 p_0 、半径 ρ_0 の球体で定義した集合である*。

ナビゲーション関数を具体的に設計していく。はじめに目標位置 p_{cd} とその最終値 p_{cdf} との間の偏差に関するつぎの関数を定義する。

$$s(p_{cd}) = \|p_{cd} - p_{cdf}\|^{2\kappa} \quad (18)$$

ここで、 κ は形成されるポテンシャル場を変化させるためのパラメータである。つぎに、移動可能領域 D の内部にカメラを維持させるための関数 η をつぎのように定義する。

$$\eta(p_{cd}) = \rho_0^2 - \|p_{cd} - p_0\|^2 \quad (19)$$

この関数 (19) は 0 に近づくほど領域の端に近くなることを示している。また、パラメータ κ を用いたモデル空間上のナビゲーション関数 $\tilde{\varphi}(x) \in \mathcal{R} \rightarrow [0, 1]$ をつぎのように定義する。

$$\tilde{\varphi}(x) = \left(\frac{x}{\mu + x} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (20)$$

ここで、 μ は収束速度を調整するためのパラメータである。(18)–(20) 式の関数を組み合わせることで、ナビゲーション関数を

$$\varphi(p_{cd}) = \tilde{\varphi} \circ \frac{s}{\eta}(p_{cd}) = \left(\frac{s(p_{cd})}{\mu\eta(p_{cd}) + s(p_{cd})} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (21)$$

と設計する。ここで、 $\circ$ は合成演算子を表している。紙面の都合上証明は省略するが、文献 [12] の Theorem 4 と同様の手法で、 κ を適切に設定した (21) 式の関数がナビゲーション関数となることは証明できる。

3.3. 目標速度の提案と収束解析

ナビゲーション関数および姿勢偏差を用いることで、つぎの目標速度を提案する。

$$V_{cd}^b = \begin{bmatrix} -e^{-\hat{\xi}_{\theta_{cd}}} K_{dp} \nabla \varphi(p_{cd}) \\ -K_{dr} e^{-\hat{\xi}_{\theta_{ed}}} r_{ed} \end{bmatrix} \quad (22)$$

ただし、 $K_{dp} := \text{diag}\{k_{dp1}, k_{dp2}, k_{dp3}\}$ と $K_{dr} := \text{diag}\{k_{dr1}, k_{dr2}, k_{dr3}\}$ は、それぞれ x 軸、 y 軸、 z 軸の並進と回転における目標速度に対するゲインである。また、 $\nabla \varphi(p_{cd}) := \left(\frac{\partial \varphi(p_{cd})}{\partial p_{cd}} \right)^T$ は $\varphi(p_{cd})$ の勾配ベクトルを表し、計算すると次ページ下記に示す (23) 式となる。

提案した目標速度 (22) を用いることで、つぎの定理が成立する。

定理 2. $p_{cd}(0) \in D$ かつ目標対象が静止している ($V_{wo}^b = 0$) とする。このとき、(22) 式によって生成される目標トラジェクトリーは $p_{cd}(t) \in D$ であり、かつ目標位置姿勢 $g_{cd}(t)$ は漸近安定な平衡点 g_{cdf} を持つ。

証明：つぎの正定関数を考える。

$$V_n = \varphi(p_{cd}) + \phi(e^{\hat{\xi}_{\theta_{ed}}}) \quad (24)$$

(17)(22) 式を用いると、(24) 式の正定関数を解軌道に沿って時間微分することにより、つぎの関係式が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= (\nabla \varphi)^T \dot{p}_{cd} + r_{ed}^T e^{\hat{\xi}_{\theta_{ed}}} \omega_{ed}^b \\ &= (\nabla \varphi)^T e^{\hat{\xi}_{\theta_{cd}}} v_{cd}^b + r_{ed}^T e^{\hat{\xi}_{\theta_{ed}}} \omega_{cd}^b \\ &= -(\nabla \varphi)^T e^{\hat{\xi}_{\theta_{cd}}} e^{-\hat{\xi}_{\theta_{cd}}} K_{dp} \nabla \varphi \\ &\quad - r_{ed}^T e^{\hat{\xi}_{\theta_{ed}}} K_{dr} e^{-\hat{\xi}_{\theta_{ed}}} r_{ed} \\ &= -(\nabla \varphi)^T K_{dp} \nabla \varphi - (e^{-\hat{\xi}_{\theta_{ed}}} r_{ed})^T K_{dr} e^{-\hat{\xi}_{\theta_{ed}}} r_{ed} \end{aligned} \quad (25)$$

したがって、初期状態 $p_{cd}(0) \in D$ に対して、 $p_{cd}(t) \in D$ 、 $\forall t > 0$ となることがわかる。またナビゲーション関数では $\nabla \varphi(p_{cd}) \rightarrow 0$ のときには $p_{cd}(t) \rightarrow p_{cdf}$ となる [12]。さらに、 $e^{-\hat{\xi}_{\theta_{ed}}} r_{ed} \rightarrow 0$ は $r_{ed} \rightarrow 0$ となるために、姿勢偏差の定義より $e^{\hat{\xi}_{\theta_{cd}}}(t) \rightarrow e^{\hat{\xi}_{\theta_{edf}}}$ となる。したがって、 $g_{cd}(t) \rightarrow g_{cdf}$ が導かれる。□

定理 2 はナビゲーション関数をリアプノフ関数候補の一部とすることで証明している。この定理 2 により、提案したナビゲーション関数を用いた軌道生成をおこなうことで、目標位置姿勢 $g_{cd}(t)$ が作業範囲内に留まりつつ最終目標位置姿勢 g_{cdf} に収束することが示された。図 4 にナビゲーション関数を用いた受動性に基づく視覚フィードバック制御のブロック図を示す。

*本稿では目標対象は静止しているとしているため、 p_0 は目標対象座標系 Σ_o を基準として考えることができる。たとえば、 $p_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$ とすると、目標対象を中心に半径 ρ_0 の空間がカメラの移動可能領域となり、 $p_0 = p_{co}(0)$ とするとカメラの初期値が中心の空間となる。

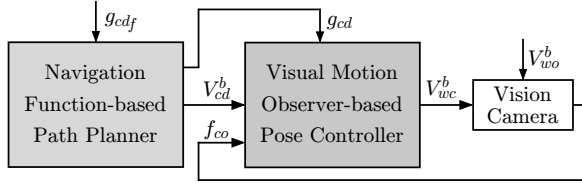


図 4: Block diagram of visual motion observer-based pose control with navigation function-based path planner.

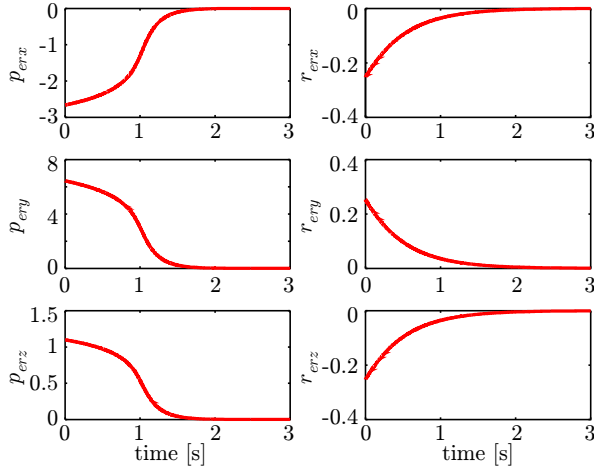


図 5: Pose control error.

4. シミュレーション検証

本節では、提案した制御手法の有効性を確認するために静止している目標対象に対するシミュレーション検証をおこなう。

初期設定は $p_{wc} = [0 \ 0 \ 1]^T \text{ m}$, $\xi\theta_{wc} = [\pi/12 \ -\pi/12 \ \pi/12]^T \text{ rad}$, $p_{wo} = [-5 \ 6.5 \ 3]^T \text{ m}$, $\xi\theta_{wo} = [0 \ 0 \ 0]^T \text{ rad}$ とする。また最終的な目標位置姿勢は $p_{cdf} = [0 \ 1.5 \ 0]^T \text{ m}$, $\xi\theta_{cdf} = [0 \ 0 \ 0]^T \text{ rad}$ とする。さらに、本シミュレーションにおけるゲインの設定や各パラメータは以下のようにした。 $K_c = 5I$, $K_e = 10I$, $K_{dp} = 50I$, $K_{dr} = 2I$, $p_0 = [0 \ 0 \ 0]^T \text{ m}$, $\rho_0 = 10 \text{ m}$, $\kappa = 2$, $\mu = 4$ 。

Fig. 5 に相対位置姿勢 $g_{co}(t)$ と最終的な目標位置姿勢 g_{cdf} との間の偏差 e_r を示す。Fig. 5 より、全ての偏差が定常状態において 0 に収束していることが確認できる。また、Fig. 6 にカメラのトラジェクトリーを示す。 $p_{wc}(0)$ と $p_{wc}(3)$ はカメラの初期値と最終値を表しており、また図中の直方体が目標対象を表して

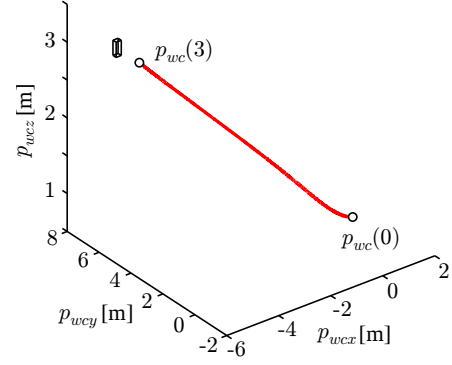


図 6: Trajectory of camera.

いる。Fig. 6 より、目標対象の前へカメラが動いていることが確認できる。また、本シミュレーションでは作業範囲を目標対象を中心とした半径 10 m の球体の内部としたが、 $\rho_0^2 - \|p_{cd} - p_0\|^2$ の最小値が 23.75 であり、常に正の値を維持していることから作業範囲の外に出ていないことがわかる。したがって、ナビゲーション関数を用いた視覚フィードバック制御において、カメラが作業範囲内に留まりつつ最終目標位置姿勢に収束することが示された。

5. おわりに

本論文では 3 次元 Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムに対して、作業範囲内に留ませつつ最終目標位置姿勢へ収束させるためのナビゲーション関数を用いた安定化視覚フィードバック制御手法を提案した。制御則への目標位置姿勢生成をナビゲーション関数を用いて設計し、ナビゲーション関数をリアプノフ関数候補の一部とすることで設計する目標位置姿勢が最終的な目標位置姿勢に収束することを示している。最後にシミュレーションにより、提案した制御手法の有効性を示した。

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.

$$\nabla\varphi = \frac{2\mu \{ \kappa(\rho_0^2 - \|p_{cd} - p_{c0}\|^2)(p_{cd} - p_{cdf}) + \|p_{cd} - p_{cdf}\|^2(p_{cd} - p_{c0}) \}}{\kappa(\mu(\rho_0^2 - \|p_{cd} - p_{c0}\|^2) + \|p_{cd} - p_{cdf}\|^{2\kappa})^{\frac{1+\kappa}{\kappa}}} \quad (23)$$

- [2] 橋本浩一, (講座) ビジュアルサーボ - 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] T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, “Stabilizing Predictive Visual Feedback Control for Fixed Camera Systems,” *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 94, No. 8, pp. 1–11, 2011.
- [8] Y. Tsuruo, T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, “Visual Motion Observer-based Pose Control via Obstacle Avoidance Navigation Function for Eye-in-Hand Systems,” *Proc. of the 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2012(to appear).
- [9] R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press, 1994.
- [10] F. Bullo and A. D. Lewis, *Geometric Control of Mechanical Systems*, Springer-Verlag, 2004.
- [11] E. Rimon and D. E. Koditschek, “Exact Robot Navigation using Artificial Potential Functions,” *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 5, pp. 501–518, 1992.
- [12] D. E. Koditschek and E. Rimon, “Robot Navigation Functions on Manifolds with Boundary,” *Advances in Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 4, pp. 412–442, 1990.