

モバイルロボットにおける Eye-to-Hand システムの 動的視覚オブザーバに関する一考察

村 尾 俊 幸*・河 合 宏 之**

A Study on Visual Motion Observer for Eye-to-hand Systems with mobile robot

Toshiyuki Murao* and Hiroyuki Kawai**

Abstract

This paper investigates passivity-based visual feedback control with a visual motion observers for eye-to-hand systems with a mobile robot. Firstly, relative rigid body motions and a pinhole camera model are given. Secondly, we present a visual motion observer for eye-to-hand systems with a mobile robot. Next, we derive a passivity property of an eye-to-hand visual feedback error system. Then, a control law for eye-to-hand visual feedback systems is proposed. Based on the passivity, stability and L_2 -gain performance analysis are discussed. Finally validity of the proposed control law can be confirmed through a simulation result.

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。

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、また画像ベース法 [8] に対しても同様のアプローチで制御則を提

案できる。

この受動性に基づくアプローチ手法において、**Eye-in-Hand** 構造ではカメラは目標対象のみを観測し、カメラから目標対象への相対位置姿勢を推定するのみで制御則を構成できる。それに対して、**Eye-to-Hand** 構造ではカメラから目標対象への相対位置姿勢に加え、カメラから制御する対象物への相対位置姿勢も必要となる。文献 [7] では、マニピュレータの関節角度を用いて、カメラから制御する対象物への相対位置姿勢を計算しているが、扱う制御対象によっては常にマニピュレータのように外部センサから測れるとは限らない。また、このように他のセンサを用いる場合には、カメラの外部パラメータが正確に測れていなければならないという問題も生じる。

この問題を回避するために、文献 [9] では制御する対象物がマニピュレータであるにも関わらず、関節角度を用いる代わりに、制御対象となるマニピュレータの手先をカメラに観測させ相対位置姿勢を推定する手法を提案している。文献 [9] の手法は、カメラの外部パラメータの不確かさに対してロバストとなり、さらにはモバイルロボットのように通常自分自身の位置を直接測定できない制御対象に対しても有効になる。しかし、文献 [9] では目標対象の相対位置姿勢を推定するためのオブザーバと同じ運動モデルを用いて、制御対象の相対位置姿勢を推定するためのオブザーバを構成していた。その結果、推定入力に制御偏差に干渉されてしまう問題や制御入力にフィードバックする偏差と直接的には対応しないという問題が生じ、制御入力を調整するためのゲイン設定を複雑にさ

Received on September 5, 2011.

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

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

せていた。

そこで、本稿ではモバイルロボットにおける **Eye-to-Hand** 構造の視覚フィードバックシステムを想定し、制御対象の相対位置姿勢を推定することを目的とした動的視覚オブザーバを再構築する。そして、推定入力に制御偏差に対して非干渉となるような、受動性に基づく視覚フィードバック制御則を提案する。提案した制御則に対して安定性と L_2 ゲイン制御性能解析をおこない、シミュレーションにて制御則の検証をおこなう。

2 剛体運動の表現とカメラモデル

2.1 剛体運動の表現

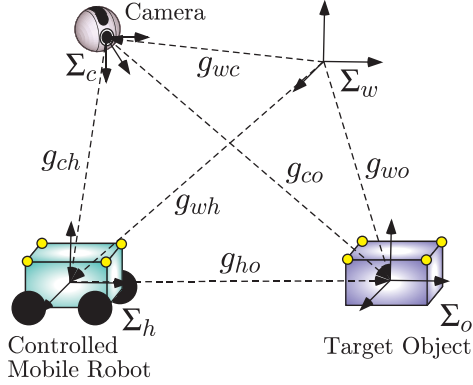


図 1: モバイルロボットにおける **Eye-to-Hand** 構造の視覚フィードバックシステム

本稿では、図 1 に示すような四つの座標系によって表される、モバイルロボットにおける **Eye-to-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、制御対象となるモバイルロボットにロボット座標系 Σ_h 、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 、さらに基準座標系 Σ_w を定義する。

本システムの制御目的は目標対象にモバイルロボットを追従させることである。言い換えると、ロボット座標系 Σ_h からみた目標対象座標系 Σ_o の相対位置姿勢 g_{ho} を目標位置姿勢 g_d (本稿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 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 $e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} \in SO(3)$ から構成され、 4×4 行列として以下のように定義される。

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

ただし、演算子 $\wedge(\text{wedge})$ 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 $\vee(\text{vee})$ で定義される [10]。

この相対位置姿勢 g_{ho} 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。

$$g_{ec} := g_d^{-1} g_{ho} \quad (2)$$

さらに、この制御偏差に対する制御偏差ベクトルを $e_c := [p_{ec}^T r_{ec}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ と定義する。ただし $r_{ec} := \text{sk}(e^{\hat{\xi}\theta})^\vee \in \mathcal{R}^3$, $\text{sk}(e^{\hat{\xi}\theta}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}\theta} - e^{-\hat{\xi}\theta})$ である。

制御目的を達成するために必要になる g_{ho} は、同次表現の合成則から以下のように導かれる。

$$g_{ho} = g_{ch}^{-1} g_{co} \quad (3)$$

g_{co} と g_{ch} は同次表現の合成則から同様に

$$g_{co} = g_{wc}^{-1} g_{wo} \quad (4)$$

$$g_{ch} = g_{wc}^{-1} g_{wh} \quad (5)$$

で表される。また、カメラ座標系からみた目標対象とモバイルロボットの相対速度は、(4), (5) 式をそれぞれ時間微分すること、

$$V_{co}^b = -\text{Ad}_{(g_{co}^{-1})} V_{wc}^b + V_{wo}^b \quad (6)$$

$$V_{ch}^b = -\text{Ad}_{(g_{ch}^{-1})} V_{wc}^b + V_{wh}^b \quad (7)$$

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 [10]。

本稿では **Eye-to-Hand** 構造の視覚フィードバックシステム (カメラのボディ速度が 0, すなわち $V_{wc}^b = 0$) を考えるため、(6), (7) 式で表された相対速度はそれぞれ以下になる。

$$V_{co}^b = V_{wo}^b \quad (8)$$

$$V_{ch}^b = V_{wh}^b \quad (9)$$

2.2 ピンホールカメラモデル

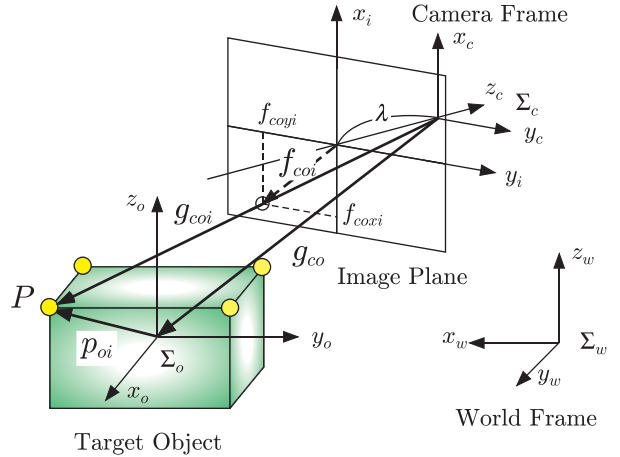


図 2: ピンホールカメラモデル

上述の相対位置姿勢 g_{co} および g_{ch} は目標対象の位置姿勢 g_{wo} 、モバイルロボットの位置姿勢 g_{wh} が測定不可能であるために未知情報となる。本稿では、観測出力として得られる情報はピンホールカメラから得られる画像特徴量とし、目標対象とモバイルロボットにそれぞれ取り付けられた $m(>4)$ 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。ここで、目標対象とモバイルロボットにそれぞれ取り付けられた特徴点は全て観測できるとする。図 2 に目標対象を観測しているときのピンホールカメラモデルの図を示す。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 $p_{oi} \in \mathcal{R}^3 (i = 1, \dots, m)$ 、またロボット座標系 Σ_h の原点から各特徴点まで

のベクトルを $p_{hi} \in \mathcal{R}^3 (i = 1, \dots, m)$ とすると、カメラからみたそれぞれの相対的な特徴点 $p_{coi} \in \mathcal{R}^3 (i = 1, \dots, m)$, $p_{chi} \in \mathcal{R}^3 (i = 1, \dots, m)$ は $p_{coi} = g_{co} p_{oi}$, $p_{chi} = g_{ch} p_{hi}$ としてそれぞれ表される。ただし、特徴点 p_{oi} , p_{hi} 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 [10]) により表したものである。

目標対象に対する画像特徴量を $f_{coi} := [f_{coxi} \ f_{coyi}]^T (i = 1, \dots, m)$, またモバイルロボットに対する画像特徴量を $f_{chi} := [f_{chxi} \ f_{chyi}]^T (i = 1, \dots, m)$ と定義すると、特徴量は透視変換を用いることで、

$$f_{coi} = \frac{s\lambda}{z_{coi}} \begin{bmatrix} x_{coi} \\ y_{coi} \end{bmatrix}, f_{chi} = \frac{s\lambda}{z_{chi}} \begin{bmatrix} x_{chi} \\ y_{chi} \end{bmatrix} \quad (10)$$

で表される。ただし、 $\lambda \in \mathcal{R}$ はカメラの焦点距離、 $s \in \mathcal{R}$ は 1 画素の実質的な縦横の大きさの逆数であり、 p_{coi} の各要素を $p_{coi} = [x_{coi} \ y_{coi} \ z_{coi}]^T$, 同様に p_{chi} の各要素を $p_{chi} = [x_{chi} \ y_{chi} \ z_{chi}]^T$ として表した。この f_{coi} と f_{chi} を縦に並べたベクトル $f_{co} = [f_{co1}^T \ \dots \ f_{com}^T]^T \in \mathcal{R}^{2m}$ および $f_{ch} = [f_{ch1}^T \ \dots \ f_{chm}^T]^T \in \mathcal{R}^{2m}$ が実際にカメラから得られる視覚情報となる。

3 モバイルロボットにおける Eye-to-Hand システムに対する動的視覚オブザーバ

本節では目標対象とモバイルロボットに対して、異なる動的視覚オブザーバを構築する。

3.1 目標対象に対する動的視覚オブザーバ

上述のカメラ座標系からみた目標対象の相対位置姿勢 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。そこで、相対位置姿勢 g_{co} を含んでいる視覚情報 $f_{co} \in \mathcal{R}^{2m}$ を利用し、非線形オブザーバを構成することで相対位置姿勢の推定値 $\bar{g}_{co}$ を得ることを考える。(8)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。

$$\bar{V}_{co}^b = u_{eo} \quad (11)$$

$u_{eo} \in \mathcal{R}^6$ は目標対象に対する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、カメラ座標系からみた目標対象の相対位置姿勢の真値 g_{co} とその推定値 $\bar{g}_{co}$ の偏差を、目標対象に対する推定偏差 g_{eeo} として

$$g_{eeo} := \bar{g}_{co}^{-1} g_{co} \quad (12)$$

と定義する。さらに、その推定偏差ベクトルを $e_{eo} := [p_{eeo}^T \ r_{eeo}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ と定義する。姿勢推定偏差の回転量 θ_{eeo} を十分に小さいとし、さらにカメラの画像特徴量をその推定値の周りで 1 次テーラー展開することで、この推定偏差ベクトル e_{eo} は、カメラから得られる視覚情報 f_{co} と推定モデルにより得られる視覚情報 $\bar{f}_{co}$, さらに画像ヤコビアン^{の擬似}

逆行列 $J^\dagger(\bar{g}_{co}) \in \mathcal{R}^{6 \times 2m}$ を用いることでつぎのように導かれる [6].

$$e_{eo} = J^\dagger(\bar{g}_{co})(f_{co} - \bar{f}_{co}) \quad (13)$$

この推定偏差ベクトル e_{eo} が 0 になれば、目標対象に対する相対位置姿勢の真値と推定値が一致することとなる。

(12) 式を時間微分し、(8), (11) 式を用いることで、目標対象に対する推定偏差システムは以下のように導出される。

$$\dot{V}_{eeo}^b = -\text{Ad}_{(g_{eeo}^{-1})} u_{eo} + V_{wo}^b \quad (14)$$

3.2 モバイルロボットに対する動的視覚オブザーバ

本節では、カメラ座標系からみたモバイルロボットの相対位置姿勢 g_{ch} を含んでいる視覚情報 $f_{ch} \in \mathcal{R}^{2m}$ を利用し、推定値 $\bar{g}_{ch}$ を得ることを考える。文献 [9] では、モバイルロボットを推定するための運動モデルにモバイルロボットの速度 V_{wh}^b を組み込まず、前節で述べた目標対象に対する運動モデルと同様 $\bar{V}_{ch}^b = u_{eh}$ を推定値 $\bar{g}_{ch}$ の運動モデルとして構成していた。それに対して、本稿ではモバイルロボットのような制御対象の相対位置姿勢を推定するための動的視覚オブザーバを、文献 [9] とは異なる運動モデルを用いて新たに提案する。

はじめに、前節と同様にカメラ座標系からみたモバイルロボットの相対位置姿勢の真値 g_{ch} とその推定値 $\bar{g}_{ch}$ の偏差を、モバイルロボットに対する推定偏差 g_{eeh} として

$$g_{eeh} := \bar{g}_{ch}^{-1} g_{ch} \quad (15)$$

と定義する。また、その推定偏差ベクトルを $e_{eh} := [p_{eeh}^T \ r_{eeh}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ と定義する。モバイルマニピュレータに対する推定偏差ベクトル e_{eh} は前節の議論と同様にして、つぎのように導かれる。

$$e_{eh} = J^\dagger(\bar{g}_{ch})(f_{ch} - \bar{f}_{ch}) \quad (16)$$

ここで、推定値 $\bar{g}_{ch}$ の運動モデルを (9) 式に基づき、つぎのように構成する。

$$\bar{V}_{ch}^b = \text{Ad}_{(g_{eeh})} V_{wh}^b + u_{eh} \quad (17)$$

$u_{eh} \in \mathcal{R}^6$ は u_{eo} と同様に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。目標対象に対する運動モデル (11) は目標対象の速度が完全に未知情報となるために、目標対象の情報を運動モデルに組み込むことはできなかった。それに対して、モバイルロボットの場合には、モバイルロボットの速度 V_{wh}^b が提案する制御入力であるために、運動モデルの中にモバイルロボットの速度情報 V_{wh}^b を組み込むことができる。推定値 $\bar{g}_{ch}$ の運動モデル (17) には未知情報となる g_{ch} の情報を含む g_{eeh} が必要になるが、 g_{eeh} の計算方法については次節で述べる。

(15) 式を時間微分し、(9), (17) 式を用いることで、モバイルロボットに対する推定偏差システムは以下のように導出される。

$$\dot{V}_{eeh}^b = -\text{Ad}_{(g_{eeh}^{-1})} u_{eh} \quad (18)$$

4 モバイルロボットにおける Eye-to-Hand 構造の視覚フィードバック偏差システム

4.1 制御偏差システム

つぎに制御目的を達成するための制御偏差システムについて議論する. (2) 式で定義した制御偏差 g_{ec} は, 二つの推定偏差 $g_{e eo}$, $g_{e eh}$ を用いて以下のように表すことができる.

$$g_{ec} = g_d^{-1} g_{ho} = g_d^{-1} g_{ch}^{-1} g_{co} = g_d^{-1} g_{e eh}^{-1} \bar{g}_{co} g_{e eo} \quad (19)$$

(19) 式において, 二つの推定偏差 $g_{e eo}$, $g_{e eh}$ のみが未知情報となるため, それらが得られれば制御偏差 g_{ec} は求まる. ここで, $-\frac{\pi}{2} \leq \theta_{e eo} \leq \frac{\pi}{2}$, $-\frac{\pi}{2} \leq \theta_{e eh} \leq \frac{\pi}{2}$ の範囲内で, 以下の関係式 [7] が成り立つことに着目する.

$$\xi_{\theta_{e eo}} = \frac{\sin^{-1} \|r_{e eo}\|}{\|r_{e eo}\|} r_{e eo}, \quad \xi_{\theta_{e eh}} = \frac{\sin^{-1} \|r_{e eh}\|}{\|r_{e eh}\|} r_{e eh} \quad (20)$$

これらの関係式を用いることで, 推定偏差ベクトル $e_{eo} = [p_{e eo}^T r_{e eo}^T]^T$, $e_{eh} = [p_{e eh}^T r_{e eh}^T]^T$ から推定偏差 $g_{e eo} = (p_{e eo}, e^{\xi_{\theta_{e eo}}})$, $g_{e eh} = (p_{e eh}, e^{\xi_{\theta_{e eh}}})$ が求められ, 制御偏差 g_{ec} を導出することが可能となる. この過程で, モバイルロボットに対する運動モデル (17) に必要となる $g_{e eh}$ が導出されることにも注意されたい.

(2) 式で定義した制御偏差 g_{ec} を時間微分することで, 制御偏差システムは以下のように導出される.

$$\dot{V}_{ec}^b = -\text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} \text{Ad}_{(g_d^{-1})} V_{wh}^b + V_{wo}^b \quad (21)$$

4.2 視覚フィードバック偏差システム

このとき, (14), (18), (21) 式を用いることで, モバイルロボットにおける **Eye-to-Hand** 構造の視覚フィードバック偏差システムは (22) 式のように表される.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ec}^b \\ \dot{V}_{e eo}^b \\ \dot{V}_{e eh}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} & 0 & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(g_{e eo}^{-1})} & 0 \\ 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{e eh}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} I \\ I \\ 0 \end{bmatrix} V_{wo}^b \quad (22)$$

ただし, 入力, 状態をそれぞれ

$$u := \begin{bmatrix} \text{Ad}_{(g_d^{-1})} V_{wh}^b \\ u_{eo} \\ u_{eh} \end{bmatrix}, \quad x := \begin{bmatrix} e_c \\ e_{eo} \\ e_{eh} \end{bmatrix} \quad (23)$$

と定義する. モバイルロボットにおける **Eye-to-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 を 0 にとどめておくことで制御目的が達成される.

この視覚フィードバック偏差システム (22) に対して, つぎの補題が成立する.

補題 1. 目標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 , 出力を $-x$ とするとき, モバイルロボットにおける **Eye-to-Hand** 構造の視覚フィードバック偏差システム (22) の入出力間に

$$\int_0^T u^T(-x) d\tau \geq -\beta, \quad \forall T > 0 \quad (24)$$

が成り立つ. ただし β はある非負の定数である.

証明: エネルギー関数として

$$V = E(g_{ec}) + E(g_{e eo}) + E(g_{e eh}) \quad (25)$$

を考える. ただし, $E(g_{ab}) := \frac{1}{2} \|p_{ab}\|^2 + \phi(e^{\xi_{\theta_{ab}}})$ であり, $\phi(e^{\xi_{\theta_{ab}}})$ は回転行列に対する誤差関数を表す正定関数である [11]. 視覚フィードバック偏差システムのもつ歪対称性 $\hat{p}_{ec}$, $\hat{p}_{e eo}$, $\hat{p}_{e eh}$ を用いることで, エネルギー関数 V の時間微分は

$$\begin{aligned} \dot{V} &= x^T \begin{bmatrix} \text{Ad}_{(e^{\xi_{\theta_{ec}}})} & 0 & 0 \\ 0 & \text{Ad}_{(e^{\xi_{\theta_{e eo}}})} & 0 \\ 0 & 0 & \text{Ad}_{(e^{\xi_{\theta_{e eh}}})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ec}^b \\ V_{e eo}^b \\ V_{e eh}^b \end{bmatrix} \\ &= (-x)^T u, \end{aligned} \quad (26)$$

となる. (26) 式の両辺を積分することで

$$\int_0^T u^T(-x) d\tau = V(T) - V(0) \geq -V(0) = -\beta \quad (27)$$

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

5 モバイルロボットにおける Eye-to-Hand 構造の視覚フィードバック制御

5.1 制御則と安定性解析

モバイルロボットにおける **Eye-to-Hand** 構造の視覚フィードバック偏差システム (22) に対し, 補題 1 の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.

$$u = -K(-x) = Kx \quad (28)$$

$$K := \text{diag}\{K_c, K_{eo}, K_{eh}\}$$

$K_c := \text{diag}\{k_{c1}, \dots, k_{c6}\}$, $K_{eo} := \text{diag}\{k_{eo1}, \dots, k_{eo6}\}$ と $K_{eh} := \text{diag}\{k_{eh1}, \dots, k_{eh6}\}$ は x 軸, y 軸, z 軸の並進と回転における制御偏差とそれぞれの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. 目標対象が静止している ($V_{wo}^b = 0$) とき, モバイルロボットにおける **Eye-to-Hand** 構造の視覚フィードバック偏差システム (22) と (28) 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: (25) 式のエネルギー関数をリアプノフ関数候補とすると, (22), (28) 式の解軌道に沿った時間微分は (26) 式より

$$\dot{V} = u^T(-x) = -x^T Kx \quad (29)$$

と導かれる. したがって, システムの平衡点 $x = 0$ は漸近安定となる. $\square$

ここで, 従来研究 [9] の制御則との比較を行う. 文献 [9] の制御則 $V_{wh}^b = -K_c \text{Ad}_{(e^{-\xi_{\theta_{e eh}}})} e_{eh}$, $u_{eo} = K_{eo}(e_{eo} - \text{Ad}_{(e^{-\xi_{\theta_{ec}}})} e_c)$, $u_{eh} = K_{eh}(e_{eh} + \text{Ad}_{(g_d^{-1})} e_c)$ は, e_c で定義された制御偏差が両推定入力に干渉してしまうために, 制御偏差 e_c が存在する場合, それが推定入力 u_{eo} , u_{eh} に影響を与え

ていた. また, モバイルロボットに対する速度入力 V_{wh}^b は, 制御偏差ではなくモバイルロボットに対する推定偏差をフィードバックする形となっていた. それに対して本稿で提案した制御則 (28) $V_{wc}^b = \text{Ad}_{(g_d)} K_c e_c$, $u_{eo} = K_{eo} e_{eo}$, $u_{eh} = K_{eh} e_{eh}$ は, 各々の偏差が各々の入力に対してのみ直接フィードバックされている. したがって, 本稿の受動性に基づく視覚フィードバック制御則は制御偏差が推定入力に干渉するという影響を回避することができるため, 制御偏差がある場合, 従来研究 [9] の制御則に比べて性能が向上し, ゲイン設定も容易になる.

このように制御則を提案できるのは, モバイルロボットにおける **Eye-to-Hand** 構造の視覚フィードバック偏差システム (22) の入力に対する行列が対角行列になっているためであり, 構成した視覚フィードバック偏差システムにおいて, 両推定と制御の構造を分離しているためと解釈できる. 入力に対する行列が対角行列となるようにモバイルロボットに対する運動モデルを提案したことが, 本研究の主要な貢献となる.

5.2 L_2 ゲイン制御性能解析

本節では目標対象が運動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行う.

ここで, 正のスカラーの定数 k_{eo} を用いることによって, $K_{eo} = k_{eo}I$ 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.

$$K_c > \frac{(\gamma^2 + 1)(2k_{eo} - 1) - 1}{2\gamma^2(2k_{eo} - 1) - 2} I \quad (30)$$

$$k_{eo} > \frac{\gamma^2 + 1}{2\gamma^2} \quad (31)$$

$$K_{eh} > \frac{1}{2} I \quad (32)$$

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, (30)~(32) 式を満たすようにゲイン K_c , k_{eo} , K_{eh} を選ぶとき, (22), (28) 式で構成されるモバイルロボットにおける **Eye-to-Hand** 構造の視覚フィードバック偏差システムの閉ループ系は γ 以下の L_2 ゲインを有する.

(証明) 蓄積関数として (25) 式のエネルギー関数を考える. (22), (28) 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

$$\begin{aligned} \dot{V} + \frac{1}{2} \|x\|^2 - \frac{\gamma^2}{2} \|V_{wo}^b\|^2 &= -\frac{\gamma^2}{2} \left\| V_{wo}^b - \frac{1}{\gamma^2} \begin{bmatrix} \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{ec}})} \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{eo}})} & 0 \end{bmatrix} x \right\|^2 \\ &\quad + \frac{1}{2\gamma^2} x^T W x - x^T u + \frac{1}{2} \|x\|^2 \\ &\leq \frac{1}{2\gamma^2} x^T W x - x^T u + \frac{1}{2} \|x\|^2 \end{aligned} \quad (33)$$

という関係式が成り立つ. ただし,

$$W := \begin{bmatrix} I & \text{Ad}_{(e^{\xi\theta_{ec}} e^{-\xi\theta_{eo}})} & 0 \\ \text{Ad}_{(e^{\xi\theta_{eo}} e^{-\xi\theta_{ec}})} & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

とした. したがって,

$$P := K - \frac{1}{2\gamma^2} W - \frac{1}{2} I \quad (35)$$

と定義し, さらにこの P が準正定であると仮定すると, 任意の目標対象の速度 V_{wo}^b に対して (28) 式の制御則を代入することで以下の不等式が成り立つ.

$$\begin{aligned} \dot{V} + \frac{1}{2} \|x\|^2 - \frac{\gamma^2}{2} \|V_{wo}^b\|^2 &\leq -x^T K x + \frac{1}{2\gamma^2} x^T W x + \frac{1}{2} \|x\|^2 \\ &= -x^T P x \leq 0 \end{aligned} \quad (36)$$

$P \geq 0$ とし, 両辺を積分すると

$$\begin{aligned} \int_0^T \|x\|^2 d\tau &\leq \gamma^2 \int_0^T \|V_{wo}^b\|^2 d\tau - 2 \int_0^T \dot{V} d\tau \\ &\leq \gamma^2 \int_0^T \|V_{wo}^b\|^2 d\tau + 2V(0) \end{aligned} \quad (37)$$

が成り立つ. ここで, P は

$$P = \begin{bmatrix} K_c - \frac{1}{2\gamma^2} I - \frac{1}{2} I & -\frac{1}{2\gamma^2} \text{Ad}_{(e^{\xi\theta_{ec}} e^{-\xi\theta_{eo}})} \\ -\frac{1}{2\gamma^2} \text{Ad}_{(e^{\xi\theta_{eo}} e^{-\xi\theta_{ec}})} & \left(k_{eo} - \frac{1}{2\gamma^2} - \frac{1}{2}\right) I \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ K_{eh} - \frac{1}{2} I \end{bmatrix} \quad (38)$$

と変形できるが, この P が準正定となる十分条件はシュア補元を計算することで,

$$K_{eh} - \frac{1}{2} I > 0 \quad (39)$$

$$\begin{aligned} K_c - \frac{1}{2\gamma^2} I - \frac{1}{2} I - \left(-\frac{1}{2\gamma^2} \text{Ad}_{(e^{\xi\theta_{ec}} e^{-\xi\theta_{eo}})}\right) \\ \cdot \left(k_{eo} - \frac{1}{2\gamma^2} - \frac{1}{2}\right)^{-1} \left(-\frac{1}{2\gamma^2} \text{Ad}_{(e^{\xi\theta_{eo}} e^{-\xi\theta_{ec}})}\right)^T > 0 \end{aligned} \quad (40)$$

$$k_{eo} - \frac{1}{2\gamma^2} - \frac{1}{2} > 0 \quad (41)$$

という条件となり, さらにこの条件式を計算すると, (30)~(32) 式を満たすことと等価となる. したがって, (30)~(32) 式が満たされるとき, $P \geq 0$ となるので, モバイルロボットにおける **Eye-to-Hand** 構造の視覚フィードバック偏差システムの閉ループ系は目標対象の速度 V_{wo}^b から被制御出力 x に関して γ 以下の L_2 ゲインを有する. $\square$

この制御性能解析では目標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目標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.

6 シミュレーション検証

本節では, 目標対象が静止してる状況において, 提案した制御手法のシミュレーション検証をおこなう. 初期設定は $p_{ho} = [1 \ -1 \ -0.5]^T \text{ m}$, $\xi_{ho} = [0 \ 0 \ 1.047]^T \text{ rad}$ とする. また最終的な目標位置姿勢は $p_d = [0 \ 0 \ -0.5]^T \text{ m}$, $\xi_d = [0 \ 0 \ 0]^T \text{ rad}$ とする. また推定に関する初期設定は, 真値を $p_{co} = [0 \ 0 \ -1]^T \text{ m}$, $\xi_{co} = [0 \ 0 \ 0]^T \text{ rad}$, $p_{ch} = [0.366 \ 1.366 \ -0.5]^T \text{ m}$, $\xi_{ch} = [0 \ 0 \ -1.047]^T \text{ rad}$,

推定値を $\bar{p}_{co} = [0.1 \ -0.1 \ -0.9]^T \text{ m}$, $\bar{\xi}\bar{\theta}_{co} = [0 \ 0 \ 0.087]^T \text{ rad}$, $\bar{p}_{ch} = [0 \ 0 \ -0.3]^T \text{ m}$, $\bar{\xi}\bar{\theta}_{ch} = [0 \ 0 \ 0]^T \text{ rad}$ とする. 本シミュレーションにおけるゲインは $K_c = 5I$, $K_{co} = 10I$, $K_{eh} = 10I$ と設定した.

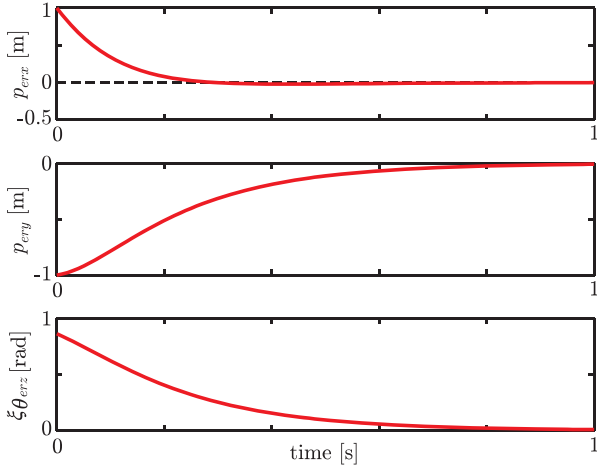


図 3: 制御偏差ベクトル e_r

図 3 に g_{ho} と g_d の間の実際の偏差ベクトルである $e_r := [p_{er}^T \ r_{er}^T]^T$ を示す. 上から 3 次元空間での x, y 軸の位置偏差と z 軸周りの回転偏差を示す. 図 3 において, すべての偏差が 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.

7 おわりに

本稿ではモバイルロボットにおける **Eye-to-Hand** 構造の視覚フィードバックシステムにおいて, 目標対象の運動を推定するためのオブザーバとは異なる運動モデルを用いて, 扱う制御対象の相対位置姿勢を推定するための動的視覚オブザーバを構築した. そして, 推定入力に制御偏差に対して非干渉となるような, 受動性に基づく視覚フィードバック制御則を提案した. 提案した制御則に対して安定性と L_2 ゲイン制御性能解析をおこない, シミュレーションにて制御則の検証をおこなった.

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 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 Hu-

man 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] 村尾俊幸, 河合宏之, 藤田政之, “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,” 産業技術大学院大学紀要, No. 4, pp. 67–72, 2010.
- [9] 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.
- [10] R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press, 1994.
- [11] F. Bullo and A. D. Lewis, *Geometric Control of Mechanical Systems*, Springer-Verlag, 2004.