随伴写像を用いた剛体運動の視覚フィードバック制御の一考察

○河 合 宏 之*・藤 田 政 之*
*金 沢 大 学

An Interpretation of Vision-based Control for Rigid Body Motion using Adjoint Transformation

○ Hiroyuki Kawai* and Masayuki Fujita*
*Kanazawa University

This paper investigates vision–based control for the relative rigid body motion (positions and rotations) using the adjoint transformation. Firstly the relation between the rigid body velocity and the adjoint transformation is stated. Secondly the model of the relative rigid body motion and the nonlinear observer with the adjoint transformation are considered in order to derive the visual feedback system. The property of estimated error dynamics can be derived using the energy function. Finally stability and L_2-gain performance analysis are discussed based on the property of the estimated error dynamics which is similar to passivity.

1　はじめに

視覚フィードバック制御とは, ロボットをはじめとするダイナミカルシステムに対して, 視覚情報をフィードバックループに組み込んだ制御のことである [1,2]. 本研究で取り扱う Eye–in–Hand 構造の視覚フィードバックシステムの制御目的は, 視覚情報を用いて 3 次元空間内を運動する観測対象にカメラを追従させることである. 近年ではこの制御目的の達成に加え, 安定性の大域的化やカメラ視野を議論した研究 [3,4,5], 3 次元空間でのカメラ軌道を決定する軌道計画問題の研究 [6] などがおこなわれている.

一方で, 視覚フィードバックシステムは生物に近いメカニカルシステムであると考えることができる [7,8]. これは, 生物がなんらかの形で光に基づく知覚を備えており, 視覚が有機体の脳のかなりの部分を占めていることに起因している. そのため, 視覚フィードバックシステムにおいても生物が視覚情報から 3 次元空間での物体との位置姿勢関係などを認識して行動するように, 制御目的を達成するために 3 次元空間での位置姿勢制御を考えることは重要なことである. しかしながら, 従来研究の多くは画像面上での偏差を状態としており, 3 次元空間での位置姿勢を状態とみなした研究は少なく, その安定性や制御性能解析をおこなった研究はほとんどなされていない.

本稿では, 視覚フィードバックシステムを生物に近いメカニカルシステムであるとみなし, 3 次元空間での位置姿勢を状態ととらえるために随伴写像 [9,10] や同次表現を用いて視覚フィードバックシステムを表現する. そして, 推定偏差システムの有する性質を示したあと, 随伴写像を用いた視覚フィードバックシステムに対する安定性と L_2 ゲイン制御性能解析をおこなう.

2　随伴写像と速度表現

ここでは, 準備として随伴写像と剛体の速度表現 [9] について簡単にまとめる. 2 つの座標系 Σ_A と Σ_B を考える. Σ_A の原点から Σ_B の原点への位置ベクトルを $p_{ab} \in \mathcal{R}^3$ で表し, Σ_A を基準とした Σ_B の姿勢を指数関数表現 [9] を用いて $e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} \in SO(3)$ (ただし $\xi_{ab} \in \mathcal{R}^3$, $\theta_{ab} \in \mathcal{R}$ であり, 簡単化のため混乱がない限り添え字は θ のみにつけて表記する) と表す. 3 次元ベクトルに対する演算子 $\wedge$(wedge) は 3×3 の歪対称行列への写像であり, その逆写像は $\vee$(vee) で定義される [9]. このとき $g_{ab} = (p_{ab}, e^{\hat{\xi}\theta_{ab}}) \in SE(3)$ の同次表現は

$$g'_{ab} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} & p_{ab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{4\times4} \tag{1}$$

で表される. 以下では, 混同しない限り g_{ab} を 4×4 行列の同次表現として表記する.

つぎに, 同次表現を用いた速度表現について述べる. 剛体運動の速度は, 基準とする座標系の違いにより空間速度 (spatial velocity)

$$\hat{V}^s_{ab} = \dot{g}_{ab}g_{ab}^{-1} = \begin{bmatrix} \hat{\omega}^s_{ab} & v^s_{ab} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad V^s_{ab} = \begin{bmatrix} v^s_{ab} \\ \omega^s_{ab} \end{bmatrix} \tag{2}$$

とボディ速度 (body velocity)

$$\hat{V}^b_{ab} = g_{ab}^{-1}\dot{g}_{ab} = \begin{bmatrix} \hat{\omega}^b_{ab} & v^b_{ab} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad V^b_{ab} = \begin{bmatrix} v^b_{ab} \\ \omega^b_{ab} \end{bmatrix} \tag{3}$$

が定義される [9]. $v_{ab} \in \mathcal{R}^3$ は並進速度, $\omega_{ab} \in \mathcal{R}^3$ は角速度を表す. また, 空間速度とボディ速度はその定義より

$$\hat{V}^s_{ab} = g_{ab}\hat{V}^b_{ab}g_{ab}^{-1} \tag{4}$$

で関係づけられる.

このとき, 次式で定義される同次表現 g_{ab} の随伴写像

$$\mathrm{Ad}_{(g_{ab})} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} & \hat{p}_{ab}e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} \\ 0 & e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} \end{bmatrix} \tag{5}$$

を用いると, (4) 式は

$$V^s_{ab} = \mathrm{Ad}_{(g_{ab})}V^b_{ab} \tag{6}$$

で表される．(5) 式において，$p_{ab}=0$ の場合は $\mathrm{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}})}$ と表記し，$e^{\hat{\xi}\theta_{ab}}=I$ の場合は $\mathrm{Ad}_{(p_{ab})}$ と表記する．この随伴写像 $\mathrm{Ad}_{(g)}$ を用いることで，それぞれの速度表現を関係づけることが可能となる．

3　剛体運動モデルと推定モデル

3.1　剛体運動モデルの表現

本節では，前節で述べた随伴写像と速度表現を用いて，Fig. 1 に示す Eye–in–hand 構造の視覚フィードバックシステムの剛体運動モデルを表現する．

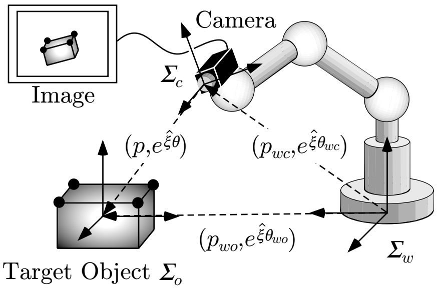

Fig. 1:視覚フィードバックシステム

座標系は Fig. 1 に示すように，基準座標系 Σ_w，カメラ座標系 Σ_c および観測対象座標系 Σ_o の 3 つを考える．このとき，基準座標系からみたカメラの位置姿勢および観測対象の位置姿勢をそれぞれ $g_{wc}=(p_{wc},e^{\hat{\xi}\theta_{wc}})$，$g_{wo}=(p_{wo},e^{\hat{\xi}\theta_{wo}})$ で表すと，カメラからみた観測対象の相対的な位置姿勢 $g=(p,e^{\hat{\xi}\theta})$ は

$$g=g_{wc}^{-1}g_{wo} \tag{7}$$

で表される．

一方，マニピュレータの手先速度を決定可能であると仮定しカメラのボディ速度を入力と考え $u_c=(v_{wc}^b,\omega_{wc}^b)$ と表記し，観測対象のボディ速度を $V_{wo}^b=(v_{wo}^b,\omega_{wo}^b)$ と表す．このとき相対的な位置姿勢に対するボディ速度 $V^b=(v^b,\omega^b)$ は，(3) 式と各ボディ速度の定義および (7) 式の関係から，

$$V^b=-\mathrm{Ad}_{(g^{-1})}u_c+V_{wo}^b \tag{8}$$

で表される．これが随伴写像を用いて表現される，カメラからみた観測対象の相対位置姿勢の運動モデルである．

つぎに，Fig. 2 に示すようなピンホールカメラを考え，視覚情報を得るためのカメラモデルを導出する．ここで，観測対象に取り付けられた n 点 $(n\geq 3)$ の特徴点の x 座標と y 座標を特徴量と考える．観測対象座標の原点から各特徴点までのベクトルを $p_{oi}\in\mathcal{R}^3(i=1,\cdots,n)$ とすると，カメラからみた相対的な特徴点 $p_{ci}\in\mathcal{R}^3(i=1,\cdots,n)$ は

$$p_{ci}=gp_{oi} \tag{9}$$

で表される．ただし，特徴点 p_{oi} はすべて既知であるとし，上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) により表したものである．p_{ci} の各要素を $p_{ci}=[x_{ci}\ y_{ci}\ z_{ci}]^T$，カメ

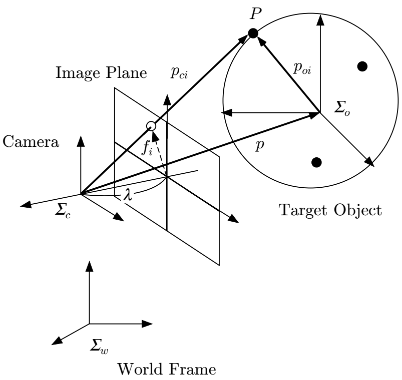

Fig. 2:ピンホールカメラと座標系

ラの焦点距離を λ と表す．このとき，画像面上での特徴点の座標を $[X_i\ Y_i]^T(i=1,\cdots,n)$ として特徴量を $f_i:=[X_i\ Y_i]^T(i=1,\cdots,n)$ とすると，特徴量は透視変換を用いることで

$$f_i=\frac{\lambda}{z_{ci}}\begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \end{bmatrix} \tag{10}$$

と表される．

3.2　相対位置姿勢の推定モデル

カメラから得られる視覚情報は，(9)(10) 式より相対位置姿勢 $g=(p,e^{\hat{\xi}\theta})$ を含んではいるが，視覚情報から $(p,e^{\hat{\xi}\theta})$ を直接得ることはできない．そこで，オブザーバを構成し相対位置姿勢の推定値 $\bar{g}=(\bar{p},e^{\hat{\bar{\xi}}\bar{\theta}})$ を推定することを考える．(8) 式の運動モデルに基づき，推定値 $\bar{g}$ の運動モデルを

$$\bar{V}^b=-\mathrm{Ad}_{(\bar{g}^{-1})}u_c+u_e \tag{11}$$

とする．u_e は推定偏差の振る舞いを改善するために加えられる入力である．また，(9)(10) 式と同様にして推定値 $\bar{g}$ を用いた特徴量を

$$\bar{f}_i=\frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}}\begin{bmatrix} \bar{x}_{ci} \\ \bar{y}_{ci} \end{bmatrix} \tag{12}$$

とする．

ここで，相対的な位置姿勢の真値と推定値の偏差 $g_{ee}=(p_{ee},e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})$ を

$$g_{ee}:=\bar{g}^{-1}g=\begin{bmatrix} e^{-\hat{\bar{\xi}}\bar{\theta}}e^{\hat{\xi}\theta} & e^{-\hat{\bar{\xi}}\bar{\theta}}(p-\bar{p}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

と定義する．$e^{\hat{\xi}\theta}$ と $e^{\hat{\bar{\xi}}\bar{\theta}}$ はともに 3 次元の回転行列であることから $(p,e^{\hat{\xi}\theta})=(\bar{p},e^{\hat{\bar{\xi}}\bar{\theta}})\iff(p_{ee},e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})=(0,I)$ が成り立つ．回転行列 $e^{\hat{\xi}\theta}$ の偏差ベクトルを与える関数を

$$e_R(e^{\hat{\xi}\theta}):=\mathrm{sk}(e^{\hat{\xi}\theta})^{\vee} \tag{14}$$

と定義しておく．ただし $\mathrm{sk}(e^{\hat{\xi}\theta})=\frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}\theta}-e^{-\hat{\xi}\theta})$ である．このとき，推定偏差 $(p_{ee},e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})$ の推定偏差ベクトルは

$$e_e:=\begin{bmatrix} p_{ee}^T & e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}}) \end{bmatrix}^T \tag{15}$$

で定義される．

つぎに, カメラから得られる視覚情報と推定モデルにより得られる視覚情報との関係について述べる. f_i, $\bar{f}_i (i = 1 \cdots n)$ をそれぞれ順に縦に並べたベクトルを f, $\bar{f}$ とすると, f と $\bar{f}$ の間につぎの関係が成り立つ [11].

$$f - \bar{f} = J(\bar{g}) e_e \tag{16}$$

ただし

$$J(\bar{g}) := \begin{bmatrix} J_1(\bar{g}) \\ \vdots \\ J_n(\bar{g}) \end{bmatrix} \mathrm{Ad}_{(e^{\hat{\bar{\xi}}\bar{\theta}})} \tag{17}$$

$$J_i(\bar{g}) := \begin{bmatrix} \dfrac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} & 0 & -\dfrac{\lambda \bar{x}_{ci}}{\bar{z}_{ci}^2} \\ 0 & \dfrac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} & -\dfrac{\lambda \bar{y}_{ci}}{\bar{z}_{ci}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & -(e^{\hat{\bar{\xi}}\bar{\theta}} p_{oi})^{\wedge} \end{bmatrix}$$

$$i = 1, \cdots, n$$

である. 3 点以上の特徴点を $J(\bar{g})$ が列フルランクを満たすようにとり, その擬似逆行列 $J(\bar{g})^{\dagger}$ を用いることで

$$J(\bar{g})^{\dagger}(f - \bar{f}) = e_e \tag{18}$$

が導かれる.

3.3 推定偏差システムにおける入出力の性質

前節までに導出した剛体運動モデルとカメラモデルおよび相対位置姿勢の推定モデルを用いて, 推定偏差システムを構成する. (8)–(13) 式より, 相対位置姿勢の推定値における偏差系は

$$V_{ee}^b = -\mathrm{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} u_e + V_{wo}^b \tag{19}$$

と導出される. 構成された推定偏差システムのブロック図を Fig. 3 に示す. ただし, 図中の RRBM, Estimated RRBM はそれぞれ相対位置姿勢の運動モデル (8) 式とその推定モデル (11) 式を表す.

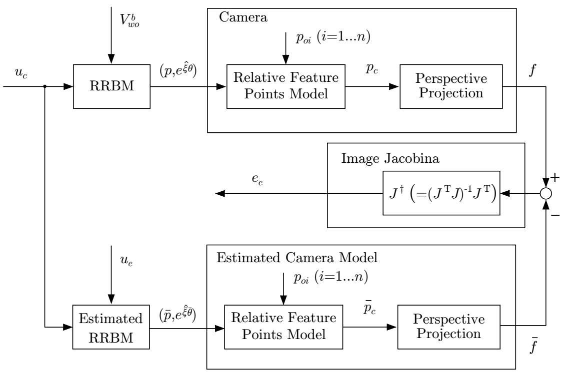

Fig. 3:推定偏差システムのブロック図

この推定偏差システムにおいて, u_e を入力とみなし $-e_e$ を出力とみなすとその入出力間に対してつぎの補題が成り立つ.

補題 1 観測対象が運動していない ($V_{wo}^b = 0$) 場合, 入力 u_e から出力 $-e_e$ に対して

$$\int_0^T u_e^T(-e_e) d\tau \geq -\gamma_e^2 \tag{20}$$

が成り立つ. ただし γ_e はある正の数である.

(証明) エネルギー関数として

$$V_e = \frac{1}{2}\|p_{ee}\|^2 + \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}}) \tag{21}$$

を考える. ここで, 関数 $\phi(e^{\hat{\xi}\theta})$ は回転エネルギーを表す正定関数であり, 以下の性質を有している [10].

1. $\phi(e^{\hat{\xi}\theta}) = \phi(e^{-\hat{\xi}\theta}) \geq 0$, $\phi(e^{\hat{\xi}\theta}) = 0 \Longleftrightarrow e^{\hat{\xi}\theta} = I$
2. $\dot{\phi}(e^{\hat{\xi}\theta}) = e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta}) \cdot \omega^s = e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta}) \cdot \omega^b$

エネルギー関数 V_e の時間微分は, $e^{\hat{\xi}\theta}e^{-\hat{\xi}\theta} = I$, $\omega_{ee}^s = e^{\hat{\xi}\theta_{ee}}\omega_{ee}^b$ の性質および $\hat{p}_{ee}$ の歪対称性を利用することで

$$\begin{aligned} \dot{V}_e &= p_{ee}^T e^{\hat{\xi}\theta_{ee}} e^{-\hat{\xi}\theta_{ee}} \dot{p}_{ee} + e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}}) \cdot \omega_{ee}^s \\ &= e_e^T \mathrm{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})} V^b = -e_e^T \mathrm{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})} \mathrm{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} u_e \\ &= -e_e^T \mathrm{Ad}_{(p_{ee})} u_e = u_e^T(-e_e) \end{aligned} \tag{22}$$

と導かれる. 両辺を積分することで

$$\int_0^T u_e^T(-e_e) d\tau = V_e(T) - V_e(0) \geq -\gamma_e^2 \tag{23}$$

が成り立つ. □

この補題により, 推定偏差ベクトル e_e をゲイン倍したものを推定偏差の入力 u_e として用いれば, (19) 式の推定偏差システムは安定となり相対位置姿勢が推定されることが示される.

4 視覚フィードバックシステムと制御則

相対的な位置姿勢 g の目標値を $g_d = (p_d, e^{\hat{\xi}\theta_d})$ で表し, 一定値であるとする. このとき, 相対位置姿勢の推定値と目標値との偏差を制御偏差 $g_{ec} = (p_{ee}, e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})$ として

$$g_{ec} := g_d^{-1}\bar{g} = \begin{bmatrix} e^{-\hat{\xi}\theta_d} e^{\hat{\bar{\xi}}\bar{\theta}} & e^{-\hat{\xi}\theta_d}(\bar{p} - p_d) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{24}$$

と定義する. このとき制御偏差ベクトルは, (15) 式の推定偏差ベクトルと同様にして

$$e_c := \begin{bmatrix} p_{ec}^T & e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) \end{bmatrix}^T \tag{25}$$

と定義される. (11)(24) 式より相対位置姿勢の推定値と目標値における制御偏差システムは

$$V_{ec}^b = -\mathrm{Ad}_{(\bar{g}^{-1})} u_c + u_e \tag{26}$$

と導出される.

(19)(26) 式を用いて視覚フィードバックシステムを行列表現すると

$$\begin{bmatrix} V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathrm{Ad}_{(\bar{g}^{-1})} & I \\ 0 & -\mathrm{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u_{ce} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} V_{wo}^b \tag{27}$$

となる. ただし, $u_{ce} := [u_c^T \ u_e^T]^T$ であり, システムの偏差ベクトルを $x = [e_c^T \ e_e^T]^T$ と定義しておく.

(27) 式の視覚フィードバックシステムに対して制御問題をつぎのように定式化する.

(制御問題) 定数 $\gamma > 0$ が与えられている. このとき (27) 式において, 観測対象が静止しているとき (すなわち $V_{wo}^b = 0$ のとき)

$t \to \infty$ で $x=0$ を達成し, 任意の時刻 $T \in [0,\infty]$ と $V_{wo}^b \in L_2$ に対して, つぎの不等式

$$\int_0^T (\gamma^2 \|V_{wo}^b\| - \|x\|^2) dt \geq -\beta$$

を満たす制御入力 u_{ce} を決定せよ. ただし β はある正の定数である.

ここで,

$$\nu_{ce} := \left[\begin{array}{cc} -\mathrm{Ad}_{(-\bar{p})}^T \mathrm{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_d})} & 0 \\ \mathrm{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{ec}})} & -I \end{array} \right] x \tag{28}$$

と定義する. このとき, 安定性に関するつぎの定理が導かれる.

定理 1 $V_{wo}^b = 0$ のとき, (27) 式と入力

$$u_{ce} = -\left[\begin{array}{cc} K_c & 0 \\ 0 & K_e \end{array} \right] \nu_{ce} \tag{29}$$

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. ただし, ゲイン K_c, $K_e \in \mathcal{R}^{6\times 6}$ は正定行列とする.

(証明) エネルギー関数

$$V = \frac{1}{2}\|p_{ec}\|^2 + \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) + \frac{1}{2}\|p_{ee}\|^2 + \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}}) \tag{30}$$

をリアプノフ関数候補とする. (27)(29) 式の解軌道に沿った時間微分は $e^{\hat{\xi}\theta}e^{-\hat{\xi}\theta} = I$, $\omega^s = e^{\hat{\xi}\theta}\omega^b$ の性質および $\hat{p}_{ee}$ の歪対称性を利用することで

$$\begin{aligned} \dot{V} &= p_{ec}^T \dot{p}_{ec} + e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) \cdot \omega_{ec}^s + p_{ee}^T \dot{p}_{ee} + e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}}) \cdot \omega_{ee}^s \\ &= u_{ce}^T \left[\begin{array}{cc} -\mathrm{Ad}_{(-\bar{p})}^T \mathrm{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_d})} & 0 \\ \mathrm{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{ec}})} & -I \end{array} \right] x \\ &= -x^T K x \end{aligned} \tag{31}$$

$$\text{ただし} \quad K := \left[\begin{array}{cc} -\mathrm{Ad}_{(-e^{\hat{\xi}\theta_d})} \mathrm{Ad}_{(-\bar{p})} & \mathrm{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})} \\ 0 & -I \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc} K_c & 0 \\ 0 & K_e \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc} -\mathrm{Ad}_{(-\bar{p})}^T \mathrm{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_d})} & 0 \\ \mathrm{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{ec}})} & -I \end{array} \right]$$

と導かれる. ゲイン K_c, K_e の正定性より, 行列 K が正定となるため, システムの平衡点 $x=0$ は漸近安定となる. □

観測対象が運動する場合については, その運動を外乱と捉えることで制御性能解析をおこなう. ここで, ある正の数を γ としてつぎの行列を定義する.

$$P := K - \frac{1}{2} \left[\begin{array}{cc} I & 0 \\ 0 & \left(1 + \frac{1}{\gamma^2} I\right) \end{array} \right] \tag{32}$$

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 $V_{wo}^b \neq 0$ の場合, $P > 0$ を満たすようにゲイン K_c, K_e を選ぶとき, (27)(29) 式で構成される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 (30) 式を考える. その解軌道に沿った時間微分は

$$\dot{V} = -x^T K x + e_e^T \mathrm{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})} V_{wo}$$

となる. 上式に対して平方完成を用いて, 最悪外乱として

$$V_{wo}^b = \frac{1}{\gamma^2} \mathrm{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{ee}})} e_e \tag{33}$$

を考えると

$$\dot{V} \leq \frac{\gamma^2}{2} \|V_{wo}^b\|^2 - \frac{1}{2}\|x\|^2 - x^T P x \tag{34}$$

が導かれる. さらに両辺を積分することで

$$\int_0^T (\gamma^2 \|V_{wo}^b\| - \|x\|^2) dt \geq 2V(T) - 2V(0) \geq -\beta \tag{35}$$

が成り立つ. したがって, $P > 0$ のとき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. □

定理 1, 2 は, 補題 1 で示した推定偏差システムの性質を利用することで導かれた結果であり, (21) 式のエネルギー関数を含む (30) 式のエネルギー関数が重要な役割をはたしている.

5 おわりに

本稿では, 3 次元空間での位置姿勢を考慮するために, 随伴写像と同次表現を用いて視覚フィードバックシステムを表現した. そして, 推定偏差システムの有する性質を示したあと, 随伴写像を用いて表現した視覚フィードバックシステムに対して, エネルギー関数をそれぞれリアプノフ関数と蓄積関数とみなすことで安定性と L_2 ゲイン制御性能解析をおこなった.

参考文献

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) ミニ特集, "ビジュアルサーボイング," 計測と制御, Vol. 40, No. 9, 2001.

3) E. Malis, F. Chaumette, and S. Boudet, "2-1/2-D Visual Servoing," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 2, pp. 238–250, 1999.

4) 橋本, 田中, 則次, "視覚サーボにおけるポテンシャル切り替え制御," 計測自動制御学会論文集, Vol. 36, No. 8, pp. 660–667, 2000.

5) N. J. Cowan, J. D. Weingarten and D. E. Koditschek, "Visual Servoing via Navigation Functions," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 4, pp. 521–533, 2002.

6) Y. Mezouar and F. Chaumette, "Path Planning for Robust Image–Based Control," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 4, pp. 534–549, 2002.

7) David J. Kriegman, G. D. Hager and A. S. Morse (Eds.), *The Confluence of Vision and Control*, Springer, 1997.

8) 橋本, "視覚と制御," SICE 制御部門大会前日のワークショップテキスト, pp. 37–68, 2001.

9) R. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press, 1994.

10) F. Bullo and R. Murray, "Tracking for Fully Actuated Mechanical Systems: a Geometric Framework," *Automatica*, Vol. 35, No. 1, pp. 17–34, 1999.

11) A. Maruyama, H. Kawai and M. Fujita, "Passivity-based Visual Feedback Control of Nonlinear Mechanical Systems – Stability and L_2-Gain Performance Analysis," システム制御情報学会論文誌, Vol. 15, No. 12, pp. 627–635, 2002.