

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*

河合 宏之[†]・村尾 俊幸[‡]・東 剛人[‡]・藤田 政之[‡]

Passivity-based 3D Dynamic Visual Feedback Control with a Fixed Camera*

Hiroyuki KAWAI[†], Toshiyuki MURAO[‡], Takehito AZUMA[‡] and Masayuki FUJITA[‡]

In this paper, we investigate the control and the estimation of dynamic visual feedback systems with a fixed camera. Firstly the fundamental representation of the visual feedback system with four coordinate frames is established by using the homogeneous representation and adjoint transformation. Secondly we consider the observer which is reproduced from the fundamental representation of relative rigid body motion just as Luenberger observer for linear systems. Then, the relationship between the estimation error in the 3D workspace and in the image plane is established. Next, we derive the passivity of the dynamic visual feedback system by combining the passivity of both the visual feedback system and the manipulator dynamics. The stability via Lyapunov method for the full 3D dynamic visual feedback system is discussed based on the passivity. The L_2 -gain performance analysis for the disturbance attenuation problem is considered via the dissipative systems theory. Finally simulation results are shown to verify the stability and L_2 -gain performance of the dynamic visual feedback system.

1. はじめに

ロボットやメカニカルシステムに自律的な振舞いをさせるには多くの情報が必要となる。特に視覚情報は未知環境下において周囲の状況を認識させるために有用であり、視覚情報をダイナミカルシステムのフィードバックループに組み込んだ制御は視覚フィードバック制御とよばれる [1]。

ロボットの視覚フィードバックシステムの制御目的のひとつは、移動する観測対象にロボットの手先やカメラを追従させることである。この制御目的を達成させるために、安定性の大域化 [2] や軌道計画問題 [3] が研究されている。これら多くの従来研究では、視覚フィード

バックシステムについて深い議論がなされているのに対し、ロボットは単なる位置決めをするための装置ととらえられている。一方、マニピュレータダイナミクスまで考慮した研究としては文献 [4–6] などが挙げられる。これらの研究は、平面マニピュレータに限定されてはいるが、Lyapunov の安定定理に基づき安定性を保証する制御則が提案されている。Kelly ら [7] は、観測対象までの距離が既知であるとの仮定が必要であるが、平面マニピュレータに限定しない制御則を提案しており、Cowan ら [8] は Navigation 関数を用いてカメラ視野を考慮した制御則について議論している。いずれの研究も、観測対象が静止している場合の安定性解析まではおこなっているが、観測対象が運動する場合や制御性能解析については十分な議論がなされていない。筆者らは文献 [9,10] で、カメラがロボットの手先に取り付けられた Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムに対して、安定性と制御性能解析を議論している。しかし、実システムでは必ずしもカメラとロボットの手先が一致しているとは限らない。たとえば、文献 [11] でみられるような DNA 細胞に核を自動注入するシステムは固定カメラ構造の視覚フィードバックシステムとして表されるため、文献 [9,10] の議論だけでは十分ではない。

* 原稿受付 2004 年 4 月 22 日

[†] 法政大学 情報技術 (IT) 研究センター Information Technology Research Center, Hosei University; 2-17-1 Fujimi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8160, JAPAN

[‡] 金沢大学 大学院 自然科学研究科 Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University; 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa city, Ishikawa 920-8667, JAPAN

Key Words: visual feedback control, manipulator dynamics, passivity, Lyapunov stability, L_2 -gain performance analysis.

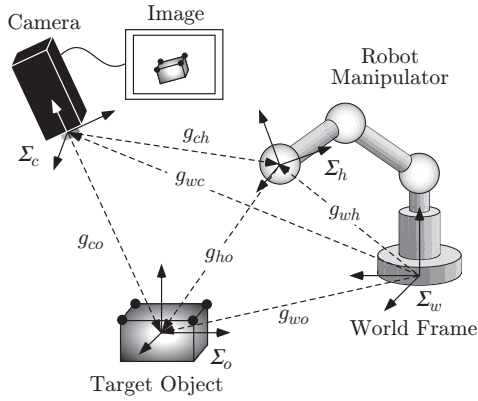


Fig. 1 Visual feedback system with a fixed camera

本論文では、Fig. 1 に示すような四つの座標系を有するシステムとして固定カメラ構造の動的視覚フィードバックシステムを構成する。そして、マニピュレータダイナミクスを考慮したうえで Lyapunov の安定定理に基づき安定性解析をおこなう。さらに、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、 L_2 ゲイン制御性能解析をおこなう。文献 [9,10] では、三つの座標系を有する Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムに対して、安定性と制御性能解析を議論している。本論文では、座標系の数を三つから四つへ拡張することで、固定カメラ構造における動的視覚フィードバックシステムの構成法を、従来研究の手法に基づいて提案している。

本論文の構成は以下のとおりである。2. で視覚フィードバックシステムにおける剛体運動の基本となる式を導出したあと、非線形オブザーバを構成する。そして、四つの座標系を有する視覚フィードバックシステムの入出力間の関係を示す。3. では、マニピュレータダイナミクスを考慮した動的視覚フィードバック制御則を提案し、安定性と L_2 ゲイン制御性能解析をおこなう。4. で 2 自由度マニピュレータによるシミュレーション結果を示し、最後に 5. でまとめをおこなう。

2. 受動性に基づく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 に示すような四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。図中の四つの座標系をそれぞれ基準座標系 Σ_w 、手先座標系 Σ_h 、カメラ座標系 Σ_c および観測対象座標系 Σ_o と定義する。このとき、基準座標系からみた手先の位置姿勢、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 $g_{wh} = (p_{wh}, e^{\hat{\xi}\theta_{wh}})$, $g_{wc} = (p_{wc}, e^{\hat{\xi}\theta_{wc}})$, $g_{wo} = (p_{wo}, e^{\hat{\xi}\theta_{wo}})$ で表す。ここで、任意の二つの座標系を Σ_A , Σ_B としたとき、 $p_{ab} \in \mathcal{R}^3$ は Σ_A の原点から Σ_B の原点への位置ベクトルを表し、 $e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} \in SO(3)$ (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) は Σ_A を基準とした Σ_B の姿勢を意味する [12]。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。 g_{ab} は混同しない限り、よく知られた 4×4 行列の同次表現

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

として用いる [12]。同様に、カメラ座標系からみた手先の位置姿勢と観測対象の位置姿勢をそれぞれ $g_{ch} = (p_{ch}, e^{\hat{\xi}\theta_{ch}})$, $g_{co} = (p_{co}, e^{\hat{\xi}\theta_{co}})$ とし、手先座標系からみた観測対象の位置姿勢を $g_{ho} = (p_{ho}, e^{\hat{\xi}\theta_{ho}})$ と表す。

これらの座標系から、視覚フィードバックシステムにおける三つの座標系間に成り立つ剛体運動の表現を導出する¹。まず、カメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢 g_{co} は

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

で表される。ここで、速度表現のひとつについて述べる。剛体運動のボディ速度を $V_{ab}^b = [v_{ab}^T \ \omega_{ab}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ (ただし、 $v_{ab} \in \mathcal{R}^3$ は並進速度、 $\omega_{ab} \in \mathcal{R}^3$ は角速度を表す) と定義するとき、カメラの速度と観測対象の速度は $V_{wc}^b = [v_{wc}^T \ \omega_{wc}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ と $V_{wo}^b = [v_{wo}^T \ \omega_{wo}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ で定義される。

このとき (2) 式を微分することで、 g_{co} の基本式として

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

が導かれる²。ただし $V_{co}^b = [v_{co}^T \ \omega_{co}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ であり、導出の詳細は付録 1. を参照。

2.2 カメラモデル

つぎに、視覚情報を得るために、Fig. 2 に示すようなピンホールカメラのモデルを示す。画像特徴量として観

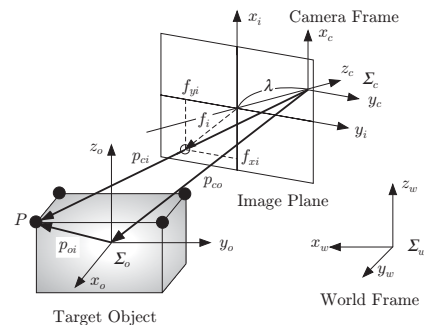


Fig. 2 Pinhole camera

¹ここでは、基準座標系、観測対象座標系およびカメラ座標系の関係を示すが、他の座標系間においても同様の関係が導出可能である。

²三つの座標系間の関係 (2) と基本式 (3) は、文献 [9] の (3)(4) 式と (11) 式 (および文献 [10] の (1) 式と (2) 式) と表現は異なるが同一の式を表している。

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での x 座標と y 座標を考える [13]. このとき、観測対象座標系 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 $p_{ci} \in \mathcal{R}^3 (i=1, \dots, m)$ は

$$p_{ci} = g_{co} p_{oi} \quad (4)$$

で表される。ただし、特徴点 p_{oi} はすべて既知であるとし、(4) 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 $p_{ci} = [x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}]^T$ 、カメラの焦点距離を λ と表す。三次元情報である p_{ci} はカメラから直接得られないため、カメラから得られる画像特徴量 f について考える。画像面上での特徴点の座標を $[X_i \ Y_i]^T (i=1, \dots, m)$ として特徴量を $f_i := [X_i \ Y_i]^T (i=1, \dots, m)$ とすると、特徴量は透視変換を用いることで

$$f_i = \frac{\lambda}{z_{ci}} \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \end{bmatrix} \quad (5)$$

で表される。

2.3 視覚フィードバックシステムにおける非線形オブザーバ

カメラから得られる視覚情報は、(4), (5) 式より相対位置姿勢 g_{co} を含んでいるが、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、相対位置姿勢の推定値 $\bar{g}_{co} = (\bar{p}_{co}, e^{\hat{\xi}_{\bar{\theta}_{co}}})$ を得るために、オブザーバを構成する。本論文では固定カメラ構造の視覚フィードバックシステム (すなわち $V_{wc}^b = 0$) を考えるため、(3) 式で表された g_{co} の基本式は

$$V_{co}^b = V_{wo}^b \quad (6)$$

となる。そこで、(6) 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。

$$\bar{V}_{co}^b = u_e \quad (7)$$

$u_e \in \mathcal{R}^6$ 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。また、(4), (5) 式と同様にして推定値 $\bar{g}_{co}$ を用いた特徴量を

$$\bar{p}_{ci} = \bar{g}_{co} p_{oi} \quad (8)$$

$$\bar{f}_i = \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} \begin{bmatrix} \bar{x}_{ci} \\ \bar{y}_{ci} \end{bmatrix} \quad (9)$$

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

$$g_{ee} := \bar{g}_{co}^{-1} g_{co} \quad (10)$$

と定義する。この推定偏差に対する推定偏差ベクトルを e_e としてつぎのように定義する。

$$e_e := \begin{bmatrix} p_{ee}^T & e_R^T(e^{\hat{\xi}_{\theta_{ee}}}) \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

ただし $e_R(e^{\hat{\xi}_{\theta}}) := \text{sk}(e^{\hat{\xi}_{\theta}})^\vee$, $\text{sk}(e^{\hat{\xi}_{\theta}}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}_{\theta}} - e^{-\hat{\xi}_{\theta}})$ である。

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。特徴量 $f_i, \bar{f}_i (i=1, \dots, m)$ をそれぞれ順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 [9].

$$f - \bar{f} = J(\bar{g}_{co}) e_e \quad (12)$$

ただし

$$J(\bar{g}_{co}) := \begin{bmatrix} J_1^T(\bar{g}_{co}) & \dots & J_m^T(\bar{g}_{co}) \end{bmatrix}^T$$

$$J_i(\bar{g}_{co}) := \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} & 0 & -\frac{\lambda \bar{x}_{ci}}{\bar{z}_{ci}^2} \\ \bar{z}_{ci} & \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} & -\frac{\lambda \bar{y}_{ci}}{\bar{z}_{ci}^2} \end{bmatrix} e^{\hat{\xi}_{\bar{\theta}_{co}}} \begin{bmatrix} I & -\hat{p}_{oi} \end{bmatrix} \quad i=1, \dots, m$$

である。 $J(\bar{g}_{co})$ が列フルランクを満たすように 4 点以上の特徴点を取り、その擬似逆行列 $J^\dagger(\bar{g}_{co})$ を用いることで

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

が導かれる。したがって視覚フィードバックシステムの非線形オブザーバは、(7)~(9) 式と、後に e_e とオブザーバゲインを用いて提案する入力 u_e によって構成される。

2.4 推定偏差システム

剛体運動の基本式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。(3) 式の導出と同様にして、(10) 式を時間微分し (6), (7) 式を代入することで、推定偏差システムは

$$\bar{V}_{ee}^b = -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} u_e + V_{wo}^b \quad (14)$$

と導出される。ただし $V_{ee}^b = [v_{ee}^T \ \omega_{ee}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ である。

2.5 制御偏差システム

手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢 g_{ho} は

$$g_{ho} = g_{ch}^{-1} g_{co} \quad (15)$$

で表される。しかしながら、 g_{co} は直接求められないため、その推定値 $\bar{g}_{co}$ を用いたときの手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢 $\bar{g}_{ho}$ を

$$\bar{g}_{ho} = g_{ch}^{-1} \bar{g}_{co} \quad (16)$$

と表す。相対位置姿勢 $\bar{g}_{ho}$ の基本式は、手先の速度を $V_{wh}^b = [v_{wh}^T \ \omega_{wh}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ とすると、(3) 式の導出と同様にして、(16) 式より

$$\bar{V}_{ho}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{ch}^b + \bar{V}_{co}^b$$

$$= -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{wh}^b + u_e \quad (17)$$

と導かれる。ただし、

$$g_{ch} = g_{wc}^{-1} g_{wh} \quad (18)$$

より導かれる $V_{ch}^b = V_{wh}^b$ の関係¹ と (7) 式を用いている²。

ここで、手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢の目標値を $g_d = (p_d, e^{\hat{\theta}_d})$ 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} とよび $g_{ec} = (p_{ec}, e^{\hat{\theta}_{ec}})$ を

$$g_{ec} := g_d^{-1} \bar{g}_{ho} \quad (19)$$

で定義する。また、推定偏差ベクトルと同様に、制御偏差ベクトル e_c を

$$e_c := \begin{bmatrix} p_{ec}^T & e_R^T(e^{\hat{\theta}_{ec}}) \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

と定義する。

導出した推定相対位置姿勢モデルおよび相対位置姿勢の目標値を用いて、制御偏差システムを構成する。(14) 式の推定偏差システムの導出と同様に、(19) 式を時間微分し (17) 式を代入することで、制御偏差システムは

$$V_{ec}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{wh}^b + u_e \quad (21)$$

と導出される。ただし $V_{ec}^b = [v_{ec}^T \ \omega_{ec}^T]^T \in \mathbb{R}^6$ である。

2.6 視覚フィードバックシステムの入出力間の関係

剛体運動の視覚フィードバックシステムを (14), (21) 式より

$$\begin{bmatrix} V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} & I \\ 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u_{ce} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} V_{wo}^b \quad (22)$$

と構成する。ただし、 $u_{ce} := [(V_{wh}^b)^T \ u_e^T]^T$ であり、システムの状態を $e := [e_c^T \ e_e^T]^T$ と定義しておく。このとき、視覚フィードバックシステムに対して以下の補題が成り立つ。

【補題 1】 観測対象が運動していない (すなわち $V_{wo}^b = 0$) とする。出力を

$$v_{ce} := \begin{bmatrix} -\text{Ad}_{(g_d^{-1})} & 0 \\ \text{Ad}_{(e^{-\hat{\theta}_{ec}})} & -I \end{bmatrix} e \quad (23)$$

とするとき、(22) 式の視覚フィードバックシステムの入出力間に

$$\int_0^T u_{ce}^T v_{ce} d\tau \geq -\beta_{ce}, \quad \forall T > 0 \quad (24)$$

が成り立つ。ただし β_{ce} はある非負の定数である。

証明は以下のエネルギー関数を用いておこなわれる。

$$V_{ce} = \frac{1}{2} \|p_{ec}\|^2 + \phi(e^{\hat{\theta}_{ec}}) + \frac{1}{2} \|p_{ee}\|^2 + \phi(e^{\hat{\theta}_{ee}}) \quad (25)$$

ここで、関数 $\phi(e^{\hat{\theta}})$ は回転行列に対する誤差関数を表す正定関数である [14]。証明の詳細は付録 2. を参照。

この補題は、(22) 式の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おり、出力 v_{ce} をネガティブフィードバックしたものを入力 u_{ce} として用いれば、視覚フィードバックシステムが安定となることが示される [15]。Fig. 3 に視覚フィードバックシステムのブロック図を示す。図中の OMFC と Estimated OMFC はそれぞれカメラからみた観測対象の運動と推定モデルを表しており、HMFC はカメラからみた手先の運動を表している。

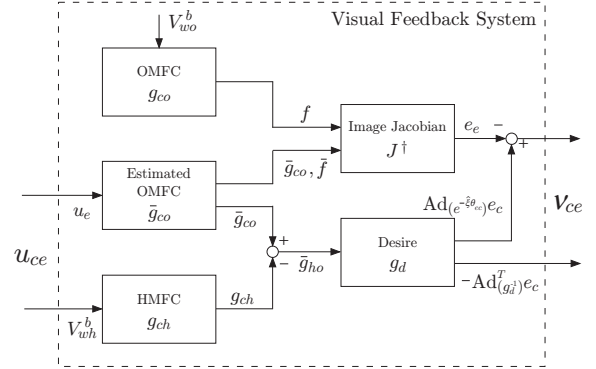


Fig. 3 Block diagram of visual feedback system

3. 動的視覚フィードバック制御

3.1 動的視覚フィードバックシステム

本節では、剛体運動の視覚フィードバックシステムにマニピュレータダイナミクスを加えることで、動的視覚フィードバックシステムを構成する。

n 自由度のマニピュレータダイナミクスは次式で表される [16]。

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

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

また、マニピュレータの手先の速度はマニピュレータ

¹ここで $g_{ch} = I$ とすると、カメラ座標系が手先座標系と一致していることになり、さらにカメラの速度と手先の速度を一致、すなわち $V_{wc}^b = V_{wh}^b$ とすれば、Eye-in-Hand 構造での議論が可能となる。

²この関係はカメラキャリブレーションが正確に行われているという仮定のもとで成り立つ。カメラキャリブレーションの問題はそれ自体がひとつの研究課題であり、いくつか解が提案されているため (たとえば、文献 [5, 6])、本論文ではキャリブレーション誤差はないとして議論を進める。

ヤコビアン $J_b(q)$ を用いることでつぎのように表される.

$$V_{wh}^b = J_b(q)\dot{q} \quad (27)$$

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, (27) 式と同様にしてマニピュレータヤコビアンを用いることで $u_d = J_b(q)\dot{q}_d$ と表すことができる. マニピュレータの関節角速度に関する偏差 $\xi \in \mathcal{R}^n$ を

$$\xi := \dot{q} - \dot{q}_d \quad (28)$$

と定義する. また, 提案する制御則に設計の自由度を与えるために, つぎのような重み行列 $W_c, W_e \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ を定義する.

$$W_c := \begin{bmatrix} w_{pc}I_3 & 0 \\ 0 & w_{rc}I_3 \end{bmatrix}, W_e := \begin{bmatrix} w_{pe}I_3 & 0 \\ 0 & w_{re}I_3 \end{bmatrix}$$

ただし $w_{pc}, w_{pe}, w_{rc}, w_{re} \in \mathcal{R}$ は正の定数とする.

このとき, マニピュレータへの入力トルクとして

$$\tau = M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q}_d + g(q) + J_b^T(q)\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T W_c e_c + u_\xi \quad (29)$$

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¹. $J_b^T(q)\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T W_c e_c$ は, 視覚フィードバックシステムにおける制御偏差 e_c を含んだ新たな偏差のフィードバック項である². u_ξ は後に提案する新たな入力である. このとき, (22), (26), (29) 式を用いることで動的視覚フィードバックシステムは

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M(q)^{-1}(C(q, \dot{q})\xi - J_b^T(q)\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T W_c e_c) \\ -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} J_b(q)\xi \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M(q)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} & I \\ 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} M(q)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} w \quad (30)$$

で表される. ただし, $u := [u_\xi^T \ u_d^T \ u_e^T]^T$, $w := [\tau_d^T \ (V_{wo}^b)^T]^T$ で定義される. 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マニピュレータの手先を追従させることであり, 状態 ξ, e_c 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.

¹ 手先の速度の目標値の時間微分である $\dot{u}_d$ を $K_c, g_d, W_c, \dot{g}_{ho}$ を用いて得ることにより, 関節角加速度の目標値 $\ddot{q}_d$ は得られる.

² 動的視覚フィードバックシステムでは, 関節角度の目標値 q_d は逆運動学問題を解くことで求めなければならないが, 提案する制御則では $J_b^T(q)\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T W_c e_c$ を偏差 $e_q := q - q_d$ のフィードバック項の代わりとして用いているため, 逆運動学問題を解く必要はない.

3.2 動的視覚フィードバックシステムの入出力間の関係

制御則を提案するまえに, 制御則の構成に対して重要な役割をはたす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 2】 外乱がない (すなわち $w=0$) とする. このとき, 出力を

$$\nu = Nx \quad (31)$$

$$N := \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T W_c & 0 \\ 0 & \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{ec}})} W_c & -W_e \end{bmatrix}, x := \begin{bmatrix} \xi \\ e_c \\ e_e \end{bmatrix}$$

とするとき, (30) 式の動的視覚フィードバックシステムの入出力間に

$$\int_0^T u^T \nu d\tau \geq -\beta_0, \forall T > 0 \quad (32)$$

が成り立つ. ただし β_0 はある非負の定数である.

(証明) エネルギー関数として

$$V = \frac{1}{2}\xi^T M(q)\xi + \frac{1}{2}w_{pc}\|p_{ec}\|^2 + w_{rc}\phi(e^{\xi\theta_{ec}}) + \frac{1}{2}w_{pe}\|p_{ee}\|^2 + w_{re}\phi(e^{\xi\theta_{ee}}) \quad (33)$$

を考える. $\hat{p}_{ec}$ と $\hat{p}_{ee}$ の歪対称性と $\dot{M} - 2C$ の歪対称性から, エネルギー関数 V の時間微分は

$$\dot{V} = \frac{1}{2}\xi^T (\dot{M} - 2C)\xi + x^T N^T u = u^T \nu \quad (34)$$

となる. (34) 式の両辺を積分することで

$$\int_0^T u^T \nu d\tau = V(T) - V(0) \geq -V(0) := -\beta_0 \quad (35)$$

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. $\square$

この補題は, (30) 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. したがって動的視覚フィードバックシステムは, (22) 式の視覚フィードバックシステムの受動性を保存しているとみなすことができる. また $\dot{M} - 2C$ の歪対称性と $\hat{p}_{ec}$ と $\hat{p}_{ee}$ の歪対称性は, 視覚フィードバックシステムの受動性とマニピュレータダイナミクスの受動性の類似点のひとつと考えられる. Fig. 4 に示す閉ループ系のブロック図からも, 動的視覚フィードバックシステムがマニピュレータと Fig. 3 で示した視覚フィードバックシステムを結合したシステムであると解釈できる.

3.3 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 (30) 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.

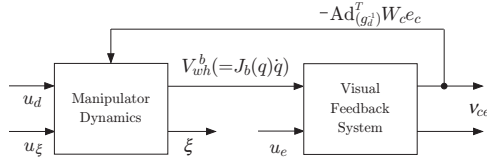


Fig. 4 Block diagram of dynamic visual feedback system

$$u = -K\nu = -KNx, \quad K := \begin{bmatrix} K_\xi & 0 & 0 \\ 0 & K_c & 0 \\ 0 & 0 & K_e \end{bmatrix} \quad (36)$$

$K_\xi := \text{diag}\{k_{\xi 1}, \dots, k_{\xi n}\}$ は各関節に対するゲインであり, $K_c := \text{diag}\{k_{c1}, \dots, k_{c6}\}$ 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, 補題 2 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 (30) と (36) 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) (33) 式のエネルギー関数を Lyapunov 関数候補とすると, (30), (36) 式の解軌道に沿った時間微分は (34) 式より

$$\dot{V} = u^T \nu = -x^T N^T K N x \quad (37)$$

と導かれる。ゲイン K_ξ , 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。□

マニピュレータダイナミクスを考慮した 3 次元動的視覚フィードバックシステムに対し, Lyapunov 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 2 で示した受動性に基づいておこなわれている。

3.4 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おこなう。

ここで, ある正の数 γ としてつぎの行列を定義する。

$$P := N^T K N - \frac{1}{2\gamma^2} W - \frac{1}{2} I \quad (38)$$

ただし $W := \text{diag}\{I, 0, W_e^2\}$ 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, $P \geq 0$ を満たすようにゲイン K_ξ , K_c , K_e および重み W_c , W_e を選ぶとき, (30), (36) 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 (33) 式のエネルギー関数を考える。(30), (36) 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

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{\gamma^2}{2} \|w\|^2 - \frac{1}{2} \|x\|^2 + \frac{1}{2} \|x\|^2 \\ &\quad - x^T N^T K N x + \frac{1}{2\gamma^2} x^T W x \\ &\quad - \frac{\gamma^2}{2} \left\| w - \frac{1}{\gamma^2} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{ee}})} W_e \end{bmatrix} x \right\|^2 \end{aligned} \quad (39)$$

となる。このとき最悪外乱として w は

$$w = \frac{1}{\gamma^2} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{ee}})} W_e \end{bmatrix} x \quad (40)$$

で与えられる。したがって, 任意の w に対して以下の不等式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \dot{V} &+ \frac{1}{2} \|x\|^2 - \frac{\gamma^2}{2} \|w\|^2 \\ &\leq -x^T N^T K N x + \frac{1}{2\gamma^2} x^T W x + \frac{1}{2} \|x\|^2 \\ &= -x^T P x \end{aligned} \quad (41)$$

$P \geq 0$ とし, 両辺を積分すると

$$\begin{aligned} \int_0^T (\gamma^2 \|w\|^2 - \|x\|^2) d\tau &\geq 2V(T) - 2V(0) \\ &\geq -2V(0) := -\beta \end{aligned} \quad (42)$$

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。したがって, $P \geq 0$ のとき動的視覚フィードバックシステムは外乱 w から状態 x に関して γ 以下の L_2 ゲインを有する。□

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。

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション設定

本節のシミュレーションでは, マニピュレータとして水平 2 自由度マニピュレータである SICE-DD アーム [16] を考える。しかし, 提案する制御則自体は 3 次元空間を運動する観測対象 (並進 3 自由度, 回転 3 自由度) に追従する 3 次元の動的視覚フィードバック制御則である。

座標系は Fig. 5 に示すように, マニピュレータの台座を基準座標系の原点とし, 四つの座標系を定める。カメラ座標系の原点は $[0.47 \ 0.1 \ 0.19]^T$ [m] とする。また, 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。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。Fig. 6 に観測対象のトラジェクトリーを示す。観測

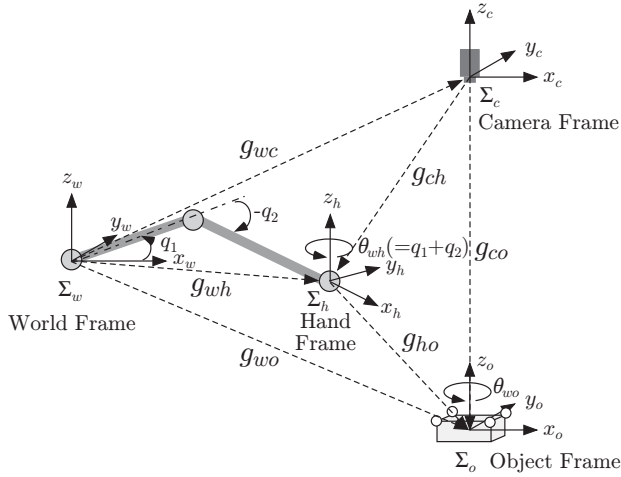


Fig. 5 Coordinate frames for dynamic visual feedback system with two degree of freedom manipulator

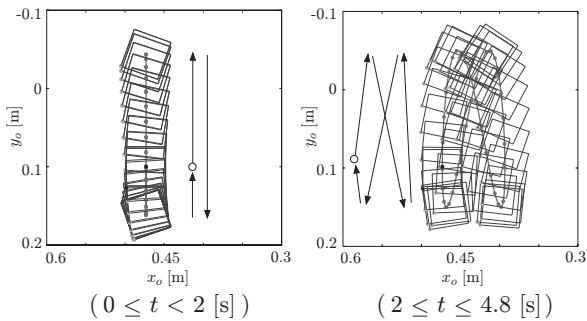


Fig. 6 Trajectory of the target object

対象の特徴点は四角形の四つの頂点とし、その中心が観測対象の座標系の原点である。目標相対位置姿勢は $p_d = [0 \ 0 \ -0.81]^T$, $e^{\hat{\theta}_d} = I$ とし、初期状態では偏差は 0 とする。

4.2 シミュレーション結果

本節では漸近安定性と L_2 ゲイン制御性能解析についてのシミュレーション結果を示す。 $\gamma = 0.437$ を満たすゲインとして、Gain A を $K_c = \text{diag}\{160, 160, 80, 80, 80, 160\}$, $K_e = 25I_6$, $K_\xi = 20I_2$, $W_c = 0.1I_6$, $W_e = I_6$ とした。また、 $\gamma = 0.203$ を満たすゲインとして $K_c = \text{diag}\{200, 200, 100, 100, 100, 200\}$, $K_e = 50I_6$ という Gain B を定めた。ただし、 K_ξ , W_c , W_e は Gain A と同じ値とした。

Figs. 7, 8 にシミュレーション結果を示す。 Fig. 7 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。図中における左図が制御偏差、右図が推定偏差である。また、 Fig. 8 には状態 x のユークリッドノルム $\|x\|$ を示す。 Fig. 7 において、図中の破線が Gain A の場合を、実線が Gain B の場合を示している。 Fig. 8 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. 7, 8 から明らかなように、外乱がある場合（すなわち $0 \leq t \leq 4.8$ ）は、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

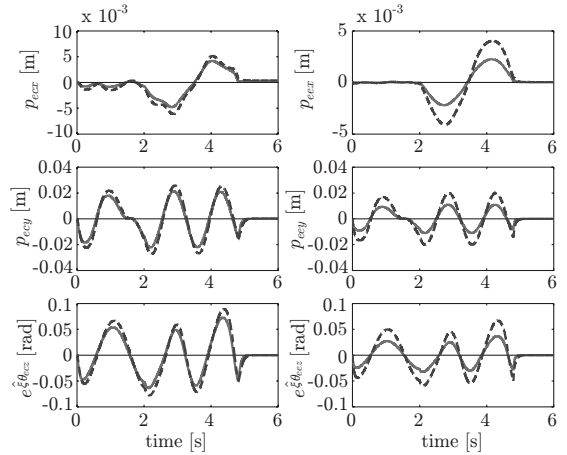


Fig. 7 Control errors and estimation errors (Gain A: dashed, Gain B: solid)

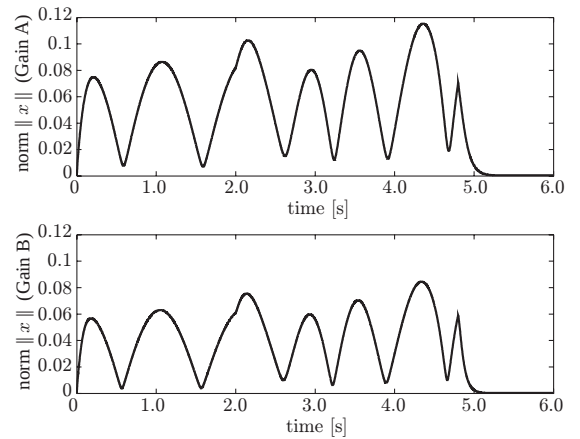


Fig. 8 Euclid norms of x (top: Gain A, bottom: Gain B)

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によって示された。実機による実験は今後の課題であるが、文献 [17] で示した Eye-in-Hand 構造のシステムにおける実験と同様にしておこなうことが可能である。

5. おわりに

本論文では、マニピュレータダイナミクスを考慮し、四つの座標系を有する固定カメラ構造の 3 次元動的視覚フィードバックシステムを構成した。そして、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、Lyapunov の安定定理により安定性解析をおこなった。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、 L_2 ゲイン制御性能解析をおこなった。この L_2 ゲイン制御性能解析は消散性理論に基づいて示されている。最後に、シミュレーションにより安定性と L_2 ゲイン制御性能解析の有効性を検証した。今後の課題は、カメラキャリブレーションの考慮や実機による実験などである。また、四つの座標系を有する視覚フィード

バックシステムにおいて、カメラ座標系を固定せず、従来研究ですでに提案した Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムと併せることで、構造上の特徴を両方有する視覚フィードバックシステムに対して議論可能になると考えられる。

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] 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)
- [3] Y. Mezouar and F. Chaumette: Optimal camera trajectory with image-based control; *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 22, No. 10–11, pp. 781–804 (2003)
- [4] R. Kelly: Robust asymptotically stable visual servoing of planar robots; *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5, pp. 759–766 (1996)
- [5] B. E. Bishop and M. W. Spong: Adaptive calibration and control of 2D monocular visual servo systems; *Control Engineering Practice*, Vol. 7, No. 3, pp. 423–430 (1999)
- [6] E. Zergeroglu, D. M. Dawson, M. S. de Queiroz and A. Behal: Vision-based nonlinear tracking controllers with uncertain robot-camera parameters; *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 6, No. 3, pp. 322–337 (2001)
- [7] R. Kelly, R. Carelli, O. Nasisi, B. Kuchen and F. Reyes: Stable visual servoing of camera-in-hand robotic systems; *IEEE Trans. Mechatronics*, Vol. 5, No. 1, pp. 39–48 (2000)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 河合, 東, 藤田: 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] S. Yu and B. J. Nelson: Autonomous injection of biological cells using visual servoing; *Experimental Robotics VII* (D. Rus and S. Singh (Eds)), Springer-Verlag, pp. 169–178 (2001)
- [12] R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry: *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press (1994)
- [13] 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)
- [14] F. Bullo and R. Murray: Tracking for fully actuated mechanical systems: a geometric framework; *Automatica*, Vol. 35, No. 1, pp. 17–34 (1999)
- [15] A. van der Schaft: *L_2 -Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control* (2nd ed.), Springer-Verlag (2000)
- [16] 小林 ほか: ロボット制御の実例, コロナ社 (1997)
- [17] H. Kawai, T. Murao and M. Fujita: An experimental study of dynamic visual feedback control on SICE-DD arm; *Proc. of the 42nd SICE Annual Conference*, pp. 686–691 (2003)

付 録

付録 1. (3) 式の導出

(2) 式より g_{co} の基本式を導出する. (2) 式を時間微分すると

$$\begin{aligned}\dot{g}_{co} &= \dot{g}_{wc}^{-1}g_{wo} + g_{wc}^{-1}\dot{g}_{wo} \\ &= -g_{wc}^{-1}\dot{g}_{wc}g_{wc}^{-1}g_{wo} + g_{wc}^{-1}g_{wo}g_{wo}^{-1}\dot{g}_{wo}\end{aligned}\quad (A1)$$

が導かれる. ここで, $g_{ab}g_{ab}^{-1} = I_4$ の性質を用いている. 剛体運動のボディ速度を $V_{ab}^b = [v_{ab}^T \ \omega_{ab}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ (ただし, $v_{ab} \in \mathcal{R}^3$ は並進速度, $\omega_{ab} \in \mathcal{R}^3$ は角速度を表す) と定義するとき, 同次表現を用いたボディ速度は

$$\hat{V}_{ab}^b = g_{ab}^{-1}\dot{g}_{ab} = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_{ab} & v_{ab} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{4 \times 4} \quad (A2)$$

で表される [12]. そこで, 上式の両辺に左から g_{co}^{-1} を乗じ, 速度の定義と (2) 式に注意すると

$$\begin{aligned}\hat{V}_{co}^b &= -g_{co}^{-1}\hat{V}_{wc}^b g_{wc}^{-1}g_{wo} + g_{co}^{-1}g_{wc}^{-1}g_{wo}\hat{V}_{wo}^b \\ &= -g_{co}^{-1}\hat{V}_{wc}^b g_{co} + \hat{V}_{wo}^b\end{aligned}\quad (A3)$$

が成り立つ. さらに

$$\begin{aligned}\hat{V}^{b'} &= g\hat{V}^b g^{-1} \iff V^{b'} = \text{Ad}_{(g)} V^b \\ \text{Ad}_{(g)} &:= \begin{bmatrix} e^{\hat{\xi}\theta} & \hat{p}e^{\hat{\xi}\theta} \\ 0 & e^{\hat{\xi}\theta} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (A4)$$

の関係 [12] を用いると, (A3) 式より g_{co} の基本式として

$$\dot{V}_{co}^b = -\text{Ad}_{(g_{co}^{-1})} V_{wc}^b + V_{wo}^b \quad (A5)$$

が導かれる.

付録 2. 補題 1 の証明

(証明) (25) 式のエネルギー関数 V_{ce} の時間微分は, 並進速度の定義 ($v_{ab} = e^{-\hat{\xi}\theta_{ab}}\dot{p}_{ab}$) と $e^{\hat{\xi}\theta}e^{-\hat{\xi}\theta} = I_3$ に注意すると

$$\begin{aligned}\dot{V}_{ce} &= p_{ec}^T e^{\hat{\xi}\theta_{ec}} e^{-\hat{\xi}\theta_{ec}} \dot{p}_{ec} + e_R^T (e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) e^{\hat{\xi}\theta_{ec}} \omega_{ec} \\ &\quad + p_{ee}^T e^{\hat{\xi}\theta_{ee}} e^{-\hat{\xi}\theta_{ee}} \dot{p}_{ee} + e_R^T (e^{\hat{\xi}\theta_{ee}}) e^{\hat{\xi}\theta_{ee}} \omega_{ee}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= e^T \begin{bmatrix} \text{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})} & 0 \\ 0 & \text{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} \\
&= e^T \begin{bmatrix} \text{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})} & 0 \\ 0 & \text{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} & I \\ 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u_{ce} \quad (A6)
\end{aligned}$$

となる。ここで、 $\hat{p}_{ec}$ と $\hat{p}_{ee}$ の歪対称性に注意すると

$$\begin{aligned}
p_{ec}^T \hat{p}_{ec} e^{-\hat{\xi}\theta_d} \omega_{wh} &= -p_{ec}^T (e^{-\hat{\xi}\theta_d} \omega_{wh})^\wedge p_{ec} = 0 \\
p_{ee}^T \hat{p}_{ee} \omega_{ue} &= -p_{ee}^T \hat{\omega}_{ue} p_{ee} = 0
\end{aligned} \quad (A7)$$

が成り立つことから、(A6) 式は

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{ce} &= e^T \begin{bmatrix} -\text{Ad}_{(g_d^{-1})} & \text{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})} \\ 0 & -I \end{bmatrix} u_{ce} \\
&= u_{ce}^T \nu_{ce} \quad (A8)
\end{aligned}$$

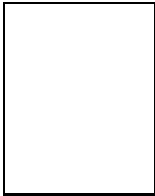
となる。(A8) 式の両辺を積分することで

$$\begin{aligned}
\int_0^T u_{ce}^T \nu_{ce} d\tau &= V_{ce}(T) - V_{ce}(0) \\
&\geq -V_{ce}(0) := -\beta_{ce} \quad (A9)
\end{aligned}$$

が成り立つ。ただし β_{ce} は初期状態のみに依存するある非負の定数である。□

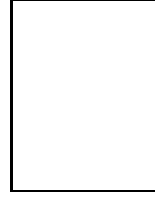
著者略歴

かわ い ひろ ゆき
河 合 宏 之 (正会員)



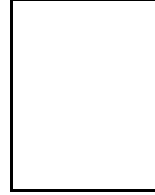
1999 年金沢大学工学部電気・情報工学科卒業。2001 年金沢大学大学院博士前期課程修了，2004 年金沢大学大学院博士後期課程修了，同年法政大学情報技術 (IT) 研究センターポスドクター。視覚フィードバック制御に関する研究に従事。博士 (工学)。計測自動制御学会，IEEE の会員。

むら お とし ゆき
村 尾 俊 幸 (学生会員)



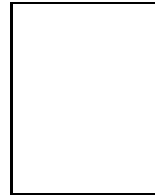
2003 年金沢大学工学部電気・情報工学科卒業。同年金沢大学大学院博士前期課程入学，現在に至る。視覚フィードバック制御に関する研究に従事。計測自動制御学会の会員。

あずま たけ ひと
東 剛 人 (正会員)



1997 年早稲田大学大学院修士課程修了。1998 年早稲田大学理工学部助手。2000 年同大学院博士課程修了。2000 年金沢大学工学部助手。システムパイオロジー，コンピュータネットワークの輻輳制御，むだ時間システムの制御およびゲインスケジューリングに関する研究に従事。博士 (工学)。計測自動制御学会，電気学会，IEEE の会員。

ふじ た まさ ゆき
藤 田 政 之 (正会員)



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。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，IEEE などの会員。