

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*

河合 宏之[†]・東 剛人[†]・藤田 政之[†]

Observer-based Dynamic Visual Feedback Control of Robotic Systems*

Hiroyuki KAWAI[†], Takehito AZUMA[†] and Masayuki FUJITA[†]

This paper considers vision-based motion control with the manipulator dynamics using position measurements and visual information, which we term dynamic visual feedback control. Firstly the visual feedback system of rigid body motion is described in order to derive the dynamic visual feedback system. Secondly we propose a dynamic visual feedback control law which guarantees local asymptotic stability of the overall closed-loop system using a Lyapunov function. L_2 -gain performance analysis for the proposed control law has been discussed using the energy function which plays the role of a storage function. Next, we show that the control law is based on passivity and the dynamic visual feedback system is constructed from two passive systems. Finally simulation results confirm the effectiveness of the dynamic visual feedback control law.

1. はじめに

視覚フィードバック制御とは、ロボットマニピュレータ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]。近年では、DNA を細胞へ注入するロボットに視覚フィードバック制御を組み込むことでシステムを自動化する研究も進められており、工場における組み立て用ロボット以外にも視覚フィードバック制御の必要性が高まってきている [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 (Fig. 1 参照) 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。このような制御目的を達成するために、安定性の大域的化やカメラ視野を議論した研究 [3–5] や 3 次元空間でのカメラ軌道を決定する軌道計画問題を議論した研究 [6, 7] が注目されているが、多くの従来研究ではマニピュレータダイナミクスを無視できると仮定している。この仮定はロボットをゆっくりと動作させる

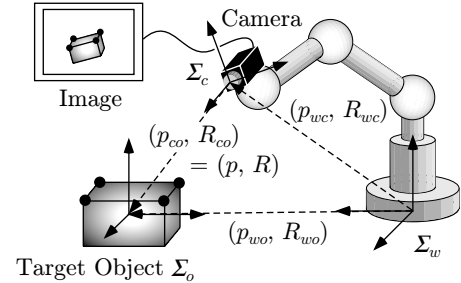


Fig. 1 Eye-in-Hand visual feedback system

ときには有効であるが、Direct Drive アームのように速く動作するロボットの場合にはこの仮定は有効ではなくなる。したがって、ロボットに速い動作をさせるためには、マニピュレータダイナミクスを考慮することが必要となる [8, 9]。Kelly ら [8] は、観測対象までの距離が既知であると仮定し、マニピュレータダイナミクスを含む視覚フィードバックシステムの安定性解析をおこなっている。Zergeroglu ら [9] は、対象となるロボットが平面マニピュレータに限定されるものの、パラメータの不確かさに対してロバストな制御則を提案している。しかしながら、いずれの研究も安定性解析のみをおこなっており、その制御性能解析まではおこなわれていない。

本研究では、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を考える。ここで提案するオブザーバ型の動的視覚フィードバック制御則は、マニ

* 原稿受付 2003 年 4 月 28 日

[†] 金沢大学 工学部 Faculty of Engineering, Kanazawa University; 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa city, Ishikawa 920-8667, JAPAN

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

ピュレータダイナミクスを考慮していない剛体運動に対する視覚フィードバック制御則 [10] に、角速度センサを必要としないオブザーバ型アプローチ [11] によるマニピュレータの制御則を組み合わせることによって導出される。文献 [12] ではこのアプローチによる安定化制御則を示しており、本稿ではこの制御則の安定性に加えて L_2 ゲイン制御性能解析をおこなう。そして、制御則の構造を明確にすることで、提案する制御則が受動性に基づく制御則になっていることを示す。これは、筆者らが文献 [10] において、相対位置姿勢の推定問題を制御理論の枠組みで統一的に定式化することで構成した視覚フィードバックシステムが受動システムであることを利用しており、推定法における性質を保存したうえで、2つの受動システムを結合し動的視覚フィードバックシステムを構成したことが、本研究における重要な意義のひとつとして挙げられる。また、提案する制御則は観測対象までの距離が既知であるという仮定を必要としない3次元の動的視覚フィードバック制御則であり、エネルギー関数を用いて安定性と制御性能解析について議論する。

本論文の構成は以下のとおりである。2. で剛体運動の視覚フィードバックシステムについて述べたあと、3. で動的視覚フィードバック制御則を提案し、安定性と制御性能解析をおこなう。4. では提案した制御則が受動性に基づく制御になっていることを示す。5. でシミュレーションを示すことで制御則の有効性を検証し、最後に6. でまとめをおこなう。

2. 剛体運動の視覚フィードバック制御

2.1 剛体運動モデルと画像特徴量

本稿では、Fig. 1 に示すような 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。座標系は、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 (p_{wc}, R_{wc}) , (p_{wo}, R_{wo}) で表すと、カメラからみた観測対象の相対位置姿勢 (p, R) は3つの座標系の関係から

$$p = R_{wc}^T(p_{wo} - p_{wc}), \quad R = R_{wc}^T R_{wo} \quad (1)$$

となる。ただし p_{wc} , p_{wo} , p はそれぞれ3次元のベクトル、 R_{wc} , R_{wo} , R はそれぞれ3次元の回転行列である。

このとき、相対位置姿勢の運動モデルは、カメラ速度を $V_{wc} \in \mathcal{R}^6$ 、観測対象の速度を $V_{wo} \in \mathcal{R}^6$ とすると、(1) 式をもとに

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ (\dot{R}R^T)^\vee \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I & \hat{p} \\ 0 & -I \end{bmatrix} V_{wc} + \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} V_{wo} \quad (2)$$

で表される ([10], pp. 628, (11) 式)。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 [13]。

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。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での x 座標と y 座標を考える [14]。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

$$p_{ci} = p + R p_{oi} \quad (3)$$

で表される。ただし、特徴点 p_{oi} はすべて既知であるとする。 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。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 $f_i := [X_i \ Y_i]^T (i=1, \dots, m)$ と定義すると、透視変換を用いることで特徴量は

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

と表される。

2.2 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、(3), (4) 式より相対位置姿勢 (p, R) を含んではいないが、視覚情報から直接 (p, R) を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{p}, \bar{R}) を推定することを考える。(2) 式に基づき、推定値の運動モデルを

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{p}} \\ (\dot{\bar{R}}\bar{R}^T)^\vee \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I & \hat{\bar{p}} \\ 0 & -I \end{bmatrix} V_{wc} + \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & \bar{R} \end{bmatrix} u_e \quad (5)$$

とする。 u_e は推定偏差の振る舞いを安定にするために加えられる入力である。また (3), (4) 式と同様にして推定値 (\bar{p}, \bar{R}) を用いた特徴量を $\bar{f}_i (i=1, \dots, m)$ とする。

ここで、相対位置姿勢の真値と推定値の偏差を

$$(p_{ee}, R_{ee}) := (p - \bar{p}, \bar{R}^T R) \quad (6)$$

と定義する。そして、回転行列 R の偏差ベクトルを与える関数を $e_R(R) := \frac{1}{2}(R - R^T)^\vee$ と定義する。このとき、(6) 式の推定偏差に対する推定偏差ベクトルは $e_e := [p_{ee}^T \ e_R^T(R_{ee})]^T \in \mathcal{R}^6$ 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。特徴量

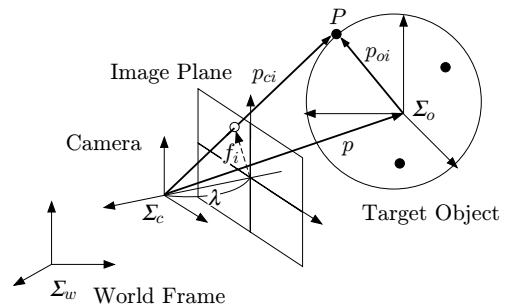


Fig. 2 Pinhole camera

$f_i, \bar{f}_i (i=1 \cdots m)$ 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

$$\begin{aligned} f - \bar{f} &= J(\bar{p}, \bar{R}) e_e \\ J(\bar{p}, \bar{R}) &:= \begin{bmatrix} L_1^T(\bar{p}, \bar{R}) & \cdots & L_m^T(\bar{p}, \bar{R}) \end{bmatrix}^T \\ L_i(\bar{p}, \bar{R}) &:= \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} & 0 & -\frac{\lambda \bar{x}_{ci}}{\bar{z}_{ci}^2} \\ 0 & \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} & -\frac{\lambda \bar{y}_{ci}}{\bar{z}_{ci}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & -\bar{R} \hat{p}_{oi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

$$i = 1, \dots, m$$

が成り立つ ([10], pp. 630, (29) 式).

2.3 視覚フィードバックシステムと制御則

カメラから見た観測対象の相対位置姿勢の目標値を (p_d, R_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とよび

$$(p_{ec}, R_{ec}) := (\bar{p} - p_d, \bar{R} R_d^T) \quad (8)$$

で定義する. また, その制御偏差ベクトルは推定偏差ベクトルと同様に $e_c := [p_{ec}^T \ R_{ec}^T]^T$ で定義される.

このとき (6), (8) 式の偏差に基づき構成される視覚フィードバックシステムは, (2), (5) 式を利用することで

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_{ec} \\ (\dot{R}_{ec} R_{ec}^T)^v \\ \dot{p}_{ee} \\ (\dot{R}_{ee} R_{ee}^T)^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I & \hat{p} & I & 0 \\ 0 & -I & 0 & \bar{R} \\ 0 & \hat{p}_{ee} & -I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} u_{ce} + \begin{bmatrix} 0 \\ R_2 \end{bmatrix} V_{wo} \quad (9)$$

となる ([10], pp. 631, (37) 式). ただし, $u_{ce} := [V_{wc}^T \ u_e^T]^T$, $R_2 := \text{diag}\{R, R_{ee}\}$ である. ここで,

$$\begin{aligned} \nu_{ce} &:= \begin{bmatrix} -B(p_d) & 0 \\ R_1^T & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_c \\ e_e \end{bmatrix} \\ R_1 &:= \text{diag}\{I, \bar{R}\}, \quad B(a) := \begin{bmatrix} I & 0 \\ \hat{a} & I \end{bmatrix} \quad \forall a \in \mathcal{R}^3 \end{aligned} \quad (10)$$

と定義する. (9) 式のシステムに対して, 参考文献 [10] でつぎの 2 つの結果が示されている.

【結果 1】 ([10], pp. 631, Theorem 1) $V_{wo} = 0$ のとき, (9) 式と入力

$$u_{ce} = - \begin{bmatrix} K_c & 0 \\ 0 & K_e \end{bmatrix} \nu_{ce} \quad K_c, K_e \in \mathcal{R}^{6 \times 6} \quad (11)$$

で構成される閉ループ系の平衡点 $[e_c^T \ e_e^T]^T = 0$ は漸近安定である. ただし, ゲイン K_c, K_e は正定行列とする.

【結果 2】 ([10], pp. 632, Theorem 2) $V_{wo} \neq 0$ において, 与えられた γ に対して K_c, K_e をある条件のもとで定めるとき, (9)~(11) 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.

この 2 つの結果はエネルギー関数

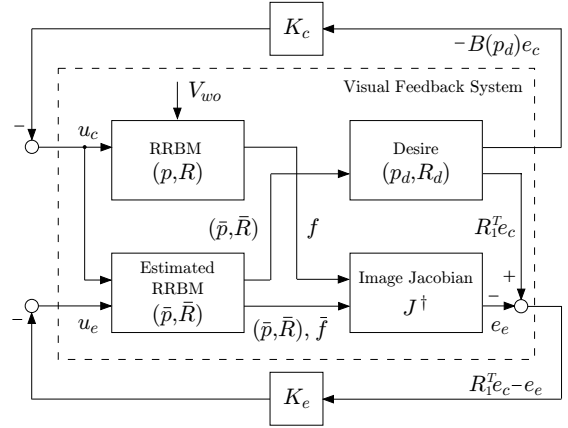


Fig. 3 Block diagram of visual feedback control

$$V_{ce} = \frac{1}{2} \|p_{ec}\|^2 + \phi(R_{ec}) + \frac{1}{2} \|p_{ee}\|^2 + \phi(R_{ee}) \quad (12)$$

をそれぞれリアプノフ関数, 蓄積関数とみなすことで導かれる. ただし, 関数 $\phi(R)$ は回転エネルギーを表す正定関数である [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 RRBM と Estimated RRBM はそれぞれ剛体運動モデルと推定モデルを表している. (11) 式の制御入力は, 推定偏差ベクトル e_e が (7) 式における $J(\bar{p}, \bar{R})$ の擬似逆行列と視覚情報 $f - \bar{f}$ を用いて得られるため構成可能である.

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の構成

本節では, 剛体運動モデルに対する視覚フィードバック制御にマニピュレータダイナミクスを加えることで構成する, 動的視覚フィードバック制御について考える.

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].

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (13)$$

$q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathcal{R}^n$ はそれぞれ各関節の角度, 角速度, 角加速度を表し, $\tau \in \mathcal{R}^n$ は入力トルクである. $M(q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は慣性行列, $C(q, \dot{q}) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は遠心力・コリオリ力項, $g(q) \in \mathcal{R}^n$ は重力項を表す.

ここで, つぎの制御則と関節角速度を推定するためのオブザーバを提案する.

$$\text{制御則} \quad \begin{cases} \tau = M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q}_d)\dot{q}_d + g(q) \\ \quad + J_b^T(q)B(p_d)e_c + u_s \\ \dot{q}_0 = \dot{q} - \Lambda \tilde{q} \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{オブザーバ} \quad \begin{cases} \dot{\tilde{q}} = z + L_d \tilde{q} \\ \dot{z} = \ddot{q}_d + L_p \tilde{q} \end{cases} \quad (15)$$

$\dot{q}_d, \ddot{q}_d \in \mathcal{R}^n$ は角速度と角加速度の目標値, $\tilde{q}, \dot{\tilde{q}} \in \mathcal{R}^n$ が関節角度と関節角速度の推定値を表し, $\tilde{q} := q - \bar{q}$ は関節角度の推定偏差である. $J_b(q)$ はマニピュレータヤコビアン [13] であり, $u_s \in \mathcal{R}^n$ は新たな制御入力である. ゲ

イン $\Lambda \in \mathcal{R}^{n \times n}$, $L_d \in \mathcal{R}^{n \times n}$, $L_p \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は正定行列とし, $L_d = l_d I + \Lambda > 0$, $L_p = l_d \Lambda > 0$ を満たすとする. ただし $l_d \in \mathcal{R}$ は正の定数である. マニピュレータの角速度と目標値の偏差を制御偏差として次式で定義する.

$$s_1 := \dot{q} - \dot{q}_d \quad (16)$$

このとき, (13), (14) 式から次式の偏差系が得られる.

$$\begin{aligned} M(q)\dot{s}_1 + C(q, \dot{q})s_1 + C(q, \dot{q} - \dot{q}_0)\dot{q}_d \\ = J_b^T(q)B(p_d)e_c + u_s \end{aligned} \quad (17)$$

また, 関節角度と角速度の推定偏差からなる変数を

$$s_2 := \dot{q} - \dot{q}_0 = \dot{q} + \Lambda \tilde{q} \quad (18)$$

と定義する. ここで, オブザーバのゲインが満たす条件 $L_d = l_d I + \Lambda$, $L_p = l_d \Lambda$ を用いて導かれる $\dot{s}_1 = \dot{s}_2 + l_d s_2$ の関係を利用すると, (17), (18) 式より

$$\begin{aligned} M(q)\dot{s}_2 + M(q)l_d s_2 + C(q, \dot{q})s_1 + C(q, s_2)\dot{q}_d \\ = J_b^T(q)B(p_d)e_c + u_s \end{aligned} \quad (19)$$

が成り立つ.

一方, Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムではカメラ速度がマニピュレータの手先速度に等しいことから, カメラ速度はマニピュレータヤコビアンを用いて

$$V_{wc} = J_b(q)\dot{q} \quad (20)$$

で与えられる. 同様に, 関節角速度の目標値 \dot{q}_d に対して, 手先速度の目標値を u_d とすると, $u_d = J_b(q)\dot{q}_d$ が成り立つ. ここで, \dot{q}_d に対して, $V_M = \sup \|\dot{q}_d\|$ を満たす V_M が存在すると仮定する.

(17) 式より s_1 に対する偏差系を導出し, (19) 式をもとに, $C(q, s_2)\dot{q} - C(q, \dot{q})s_2 = 0$ の関係を用いることで s_2 に対する偏差系を導出する. そして, (9) 式に (20) 式を代入することで, つぎの動的視覚フィードバックシステムが導出される.

$$\begin{aligned} M(q)\dot{s}_1 = -C(q, \dot{q})s_1 - C(q, s_2)\dot{q}_d \\ + J_b^T(q)B(p_d)e_c + u_s \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} M(q)\dot{s}_2 = -C(q, \dot{q})s_2 + C(q, s_2 - \dot{q})s_1 - M(q)l_d s_2 \\ + J_b^T(q)B(p_d)e_c + u_s \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{p}_{ec} \\ (\dot{R}_{ec}R_{ec}^T)^\vee \\ \dot{p}_{ee} \\ (\dot{R}_{ee}R_{ee}^T)^\vee \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -I & \hat{p} \\ 0 & -I \\ 0 & \hat{p}_{ee} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} J_b(q)s_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ R_2 \end{bmatrix} V_{wo} \\ &+ \begin{bmatrix} -I & \hat{p} & I & 0 \\ 0 & -I & 0 & \bar{R} \\ 0 & \hat{p}_{ee} & -I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_e \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

ここで, 動的視覚フィードバックシステムの状態を $x := [s_1^T \ s_2^T \ e_c^T \ e_e^T]^T$ と定義しておく.

3.2 動的視覚フィードバック制御則と安定性

ここでは, (21)~(23) 式の動的視覚フィードバックシステムに対し, 観測対象が静止している (すなわち $V_{wo} = 0$) 場合に平衡点 $x = 0$ を安定とする制御則の提案をする.

マニピュレータにおいて観測可能な偏差 $s_1 - s_2$ と, (10), (11) 式の制御入力を用いて, 動的視覚フィードバック制御則として次式を提案する.

$$u_s = -K_s(s_1 - s_2) \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_e \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_c & 0 \\ 0 & K_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -B(p_d) & 0 \\ R_1^T & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_c \\ e_e \end{bmatrix} \quad (25)$$

ゲイン $K_s \in \mathcal{R}^{n \times n}$, $K_c \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$, $K_e \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ は正定行列とする. また, つぎの 2 つの行列を定義しておく.

$$K_{ce} := \begin{bmatrix} B^T(p_d) - R_1 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_c & 0 \\ 0 & K_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B(p_d) & 0 \\ -R_1^T & I \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$K_J(q) := (J_b^T(q)B(p_d))^T (J_b^T(q)B(p_d)) \quad (27)$$

このとき, (21)~(25) 式で構成される閉ループ系の平衡点の安定性に関してつぎの定理が成り立つ.

【定理 1】 つぎの条件が満たされているとする.

$$K_{s,m} > C_M V_M \quad (28)$$

$$l_d > M_m^{-1}(K_{s,m} + \frac{1}{2} + C_M V_M) \quad (29)$$

$$K_{ce,m} > \frac{1}{2} K_{J,M} \quad (30)$$

(21)~(25) 式で構成される閉ループ系の平衡点 $x = 0$ は漸近安定であり, 吸収領域はつぎのように与えられる.

$$\begin{aligned} D_1 = \left\{ x \in \mathcal{R}^{2n+12} \mid \frac{K_{s,m}}{C_M} - V_M > \|s_2\|, \right. \\ \left. \frac{2l_d M_m - 2K_{s,m} - 1}{2C_M} - V_M > \|s_1\| \right\} \end{aligned} \quad (31)$$

ただし, 行列 $A(x) = A^T(x) > 0$ に対して A_m , A_M は, それぞれ行列 $A(x)$ の最小固有値, 最大固有値を表すものとする.

(証明) つぎのエネルギー関数を考える.

$$\begin{aligned} V = \frac{1}{2} s_1^T M(q)s_1 + \frac{1}{2} s_2^T M(q)s_2 \\ + \frac{1}{2} \|p_{ec}\|^2 + \phi(R_{ec}) + \frac{1}{2} \|p_{ee}\|^2 + \phi(R_{ee}) \end{aligned} \quad (32)$$

(32) 式を (21)~(25) 式の閉ループ系の解軌道に沿って時間微分し, $\dot{M} - 2C$ の歪対称性を利用することで

$$\begin{aligned} \dot{V} = -s_1^T K_s s_1 - s_2^T (l_d M(q) - K_s - C(q, s_1)) s_2 \\ - s_2^T C(q, s_1)s_1 - s_2^T C(q, \dot{q})s_1 - s_1^T C(q, \dot{q})s_2 \\ + s_2^T J_b^T(q)B(p_d)e_c - e^T K_{ce} e \end{aligned} \quad (33)$$

が導かれる. さらに, マニピュレータダイナミクスの有

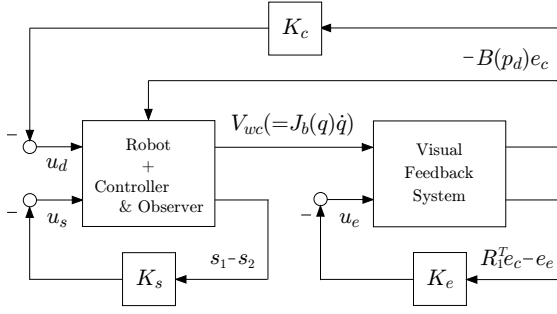


Fig. 4 Block diagram of dynamic visual feedback control

する有界性の性質 [16], および $\|a\|^2 + \|b\|^2 \geq 2\|a\| \cdot \|b\|$ の関係を用いることで

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -(K_{s,m} - C_M(V_M + \|s_2\|))\|s_1\|^2 \\ & - (l_d M_m - K_{s,m} - \frac{1}{2} - C_M(V_M + \|s_1\|))\|s_2\|^2 \\ & - (K_{ce,m} - \frac{1}{2} K_{J,M})\|e\|^2 \end{aligned} \quad (34)$$

が導かれる. 吸収領域 $D_1 - \{0\}$ で $\dot{V} < 0$ を満たすので, 平衡点の漸近安定性が示される.

提案する (24), (25) 式の制御入力, 結果 1 で示した (11) 式の制御入力を含んでおり, 安定性を示すために用いたリアプノフ関数 V は, 結果 1 のエネルギー関数 V_{ce} を含んでいる. 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. また, (28)~(30) 式は十分条件であるので, この保守性の軽減については今後の課題である.

3.3 L_2 ゲイン制御性能解析

本節では, 観測対象が運動する場合について考察する. 特に, 観測対象の運動を外乱と捉え L_2 ゲイン制御性能解析をおこなうことで, L_2 ゲインが追従性能の指標となっていることを示す. 前節で示した (24), (25) 式の制御則を (21)~(23) 式の動的視覚フィードバックシステムに用いることでつぎの結果が得られる.

【定理 2】 γ が与えられ, 以下の条件が満たされているとする.

$$K_{s,m} > C_M V_M + \frac{1}{2} \quad (35)$$

$$l_d > M_m^{-1}(K_{s,m} + 1 + C_M V_M) \quad (36)$$

$$K_{ce,m} > \frac{1}{2} \left(K_{J,M} + 1 + \frac{1}{\gamma^2} \right) \quad (37)$$

このとき以下の吸収領域 D_2 のもとで (21)~(25) 式で構成される閉ループ系は γ 以下の L_2 ゲインを有する.

$$D_2 = \left\{ x \in \mathcal{R}^{2n+12} \mid \begin{aligned} & \frac{2K_{s,m}-1}{2C_M} - V_M > \|s_2\|, \\ & \frac{l_d M_m - K_{s,m} - 1}{C_M} - V_M > \|s_1\| \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

(証明) 安定性解析のときと同様に, (32) 式のエネルギー関数を (21)~(25) 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

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \frac{\gamma^2}{2} \|V_{wo}\|^2 - \frac{\gamma^2}{2} \left\| V_{wo} - \frac{1}{\gamma^2} \begin{bmatrix} 0 & R_2^T \end{bmatrix} e \right\|^2 \\ & + \frac{1}{2\gamma^2} e^T \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} e - (K_{ce,m} - \frac{1}{2} K_{J,M}) \|e\|^2 \\ & - (l_d M_m - K_{s,m} - \frac{1}{2} - C_M(V_M + \|s_1\|)) \|s_2\|^2 \\ & - (K_{s,m} - C_M(V_M + \|s_2\|)) \|s_1\|^2 \end{aligned} \quad (39)$$

となる. このとき, 最悪外乱としての観測対象の運動は

$$V_{wo} = \frac{1}{\gamma^2} \begin{bmatrix} 0 & R_2^T \end{bmatrix} e \quad (40)$$

で与えられる. したがって, 任意の V_{wo} に対して, 以下の不等式が成り立つ.

$$\begin{aligned} \dot{V} + \frac{1}{2} \|x\|^2 - \frac{\gamma^2}{2} \|V_{wo}\|^2 \\ \leq & -(K_{s,m} - C_M(V_M + \|s_2\|) - \frac{1}{2}) \|s_1\|^2 \\ & - (l_d M_m - K_{s,m} - 1 - C_M(V_M + \|s_1\|)) \|s_2\|^2 \\ & - (K_{ce,m} - \frac{1}{2} K_{J,M} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2\gamma^2}) \|e\|^2 \end{aligned} \quad (41)$$

(41) 式を 0 から T で積分し, $V(x(T)) \geq 0$ であることに注意すると, 吸収領域 D_2 のもとで任意の T に対して

$$\int_0^T \|x\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|V_{wo}\|^2 dt + 2V(x(0)) \quad (42)$$

が成り立つ. (42) 式より閉ループ系は γ 以下の L_2 ゲインを有することが示される.

この制御性能解析では観測対象の運動を外乱と捉えているため, 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おり, L_2 ゲインを追従性能を示す指標とみなすことができる. 定理 1 と同様に, (35)~(37) 式の十分条件の保守性の軽減については今後の課題である.

4. 動的視覚フィードバック制御の性質

本節では前節で示した動的視覚フィードバックシステムに含まれるマニピュレータの制御則と速度オブザーバについて考え, 以下では, マニピュレータの制御則が受動性に基づく制御になっていることと速度オブザーバが逆運動学に基づく制御になっていることを示す.

4.1 マニピュレータの制御則

推定偏差がない場合, すなわち $s_2 = 0$ とすると, マニピュレータの制御則のみを考えることになる. $s_2 = 0$ のとき, マニピュレータの制御則は

$$\begin{aligned} \tau = & M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q}_d + g(q) \\ & + J_b^T(q)B(p_d)e_c + u_s \end{aligned} \quad (43)$$

で表され、偏差系は

$$M(q)\dot{s}_1 = -C(q, \dot{q})s_1 + J_b^T(q)B(p_d)e_c + u_s \quad (44)$$

となる。いま、入力を $u_m := [u_d^T \ u_s^T]^T$ 、出力を $\nu_m := [(J_b(q)\dot{q})^T \ s_1^T]^T$ と定義する。このとき、入出力に対して以下の定理が成り立つ。

【定理 3】 推定偏差がない、すなわち $s_2 = 0$ とする。このとき、(13), (14) 式で構成されるシステムにおいて

$$\int_0^T u_m^T \nu_m dt \geq -\gamma_m \quad (45)$$

が成り立つ。ただし γ_m はある正の定数である。

(証明) つぎのエネルギー関数を考える。

$$V_{s1} = \frac{1}{2} s_1^T M(q) s_1 \quad (46)$$

(13), (14) 式の解軌道に沿った時間微分は、 $\dot{M} - 2C$ の歪対象性と $s_1 = \dot{q} - \dot{q}_d$ を用いると

$$\begin{aligned} \dot{V}_{s1} &= s_1^T M(q)\dot{s}_1 + \frac{1}{2} s_1^T \dot{M}(q) s_1 \\ &= (\dot{q} - \dot{q}_d)^T J_b^T(q) B(p_d) e_c + s_1^T u_s \end{aligned} \quad (47)$$

となる。 \dot{q}_d は角速度目標値であり設計可能であるため、 $J_b(q)\dot{q}_d = B(p_d)e_c$ を満たすように定める。この関係を (47) 式に代入し、 $u_d = J_b(q)\dot{q}_d$ と表されることに注意することで

$$\begin{aligned} \dot{V}_{s1} &= (J_b(q)\dot{q})^T J_b(q)\dot{q}_d - (J_b(q)\dot{q})^T J_b(q)\dot{q}_d + s_1^T u_s \\ &= u_m^T \nu_m - u_d^T u_d \end{aligned} \quad (48)$$

が導かれる。上式を積分することで

$$\int_0^T u_m^T \nu_m dt = V(T) - V(0) + u_d^T u_d \geq -\gamma_m \quad (49)$$

が成り立つ。 γ_m は初期状態のみに依存する正の定数である。

定理 3 は (13), (14) 式で構成されるシステムの入力 u_d および u_s と出力 $J_b(q)\dot{q}$ および s_1 の間にそれぞれ受動性が成り立つことを示しており、提案する (14) 式の制御則が受動性に基づく制御則となっていると考えることができる。Fig. 4 から明らかなように、出力 $J_b(q)\dot{q}$ は入力 $J_b(q)\dot{q}_d$ に間接的にフィードバックされている。これは、(9) 式の視覚フィードバックシステムが参考文献 [10] の Lemma 2 で示されているように、入力 $V_{wo} (= J_b(q)\dot{q})$ と出力 $-B(p_d)e_c$ の間に受動性を有しており、定理 3 より (13), (14) 式のシステムが入力 u_d と出力 $J_b(q)\dot{q}$ の間で受動性を有しているため、(21)~(23) 式の動的視覚フィードバックシステムは 2 つの受動システムが結合されていると解釈することができる。

4.2 マニピュレータの速度オブザーバ

ここではマニピュレータの速度オブザーバについて考察するために、 $s_1 = 0$ の場合、すなわち $\dot{q} = \dot{q}_d$ の場合に

について考える。(15) 式の速度オブザーバより \ddot{q} を求めと

$$\ddot{q} = \dot{z} + L_d \dot{q} = \ddot{q}_d + L_p \tilde{q} + L_d \dot{\tilde{q}} \quad (50)$$

と表される。いま、 $s_1 = 0$ としているので $\dot{q} = \dot{q}_d$ より $\ddot{q} = \ddot{q}_d$ となる。このとき (50) 式は

$$\ddot{\tilde{q}} + L_d \dot{\tilde{q}} + L_p \tilde{q} = 0 \quad (51)$$

で表される。ここで $L_p = \text{diag}\{\omega_1^2, \dots, \omega_n^2\}$, $L_d = \text{diag}\{2\zeta_1\omega_1, \dots, 2\zeta_n\omega_n\}$ とすると閉ループ系の振る舞いは関節ごとに線形 2 次系

$$\ddot{\tilde{q}}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{\tilde{q}}_i + \omega_i^2\tilde{q}_i = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (52)$$

で支配されることになる。このことは (15) 式の速度オブザーバが、逆運動学に基づくロボット制御 [16] に基づいていることを示唆しており、臨界減衰 $\zeta_i = 1$ とし、固有角周波数 ω_i をある程度大きくとれば、安定で速い応答が期待できる。

5. シミュレーション

本節では、観測対象の動きを並進 1 自由度、回転 1 自由度に限定し、Fig. 5 に示す 2 自由度マニピュレータで構成される動的視覚フィードバックシステムに対して、提案する制御則の有効性を示すためのシミュレーションを示す。本稿では、理解のしやすさからマニピュレータとして 2 自由度の SICE-DD アーム [16] を考えるが、提案する制御則は 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本座標系の原点とし、手先をカメラ座標系とする。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、リンク 2 の先端にカメラが取り付けられている。観測対象は $x_o = 0.3$ [m], $y_o = -0.2016 \sim 0.3135$ [m], $\theta_{wo} = -3\pi/8 \sim \pi/8$ [rad] の範囲で運動させ、そのトラジェクトリーを Fig. 6 に示す。Fig. 6 の四角形の 4 つの頂点を特徴点とし、その中心が観測対象座標の原点である。初期状態では偏差を

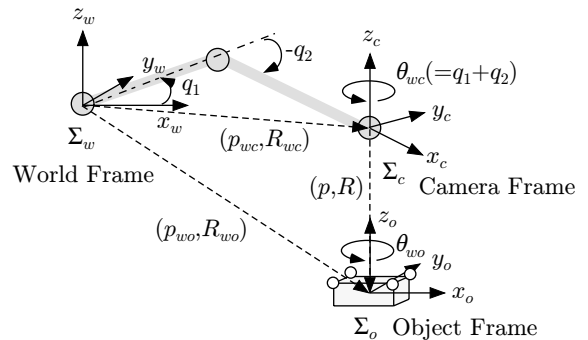


Fig. 5 Coordinate frames for dynamic visual feedback system with two degree of freedom manipulator

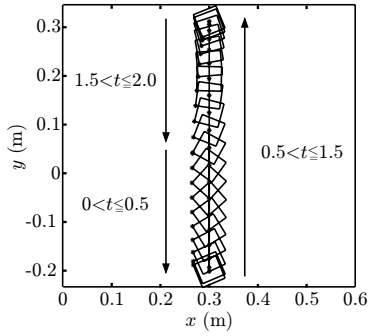
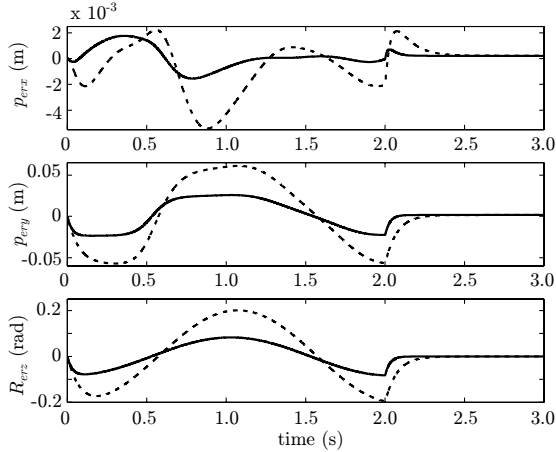


Fig. 6 Trajectory of target object

Fig. 7 Tracking errors
(Gain A: dashed, Gain B: solid)

0 (すなわち $p = \bar{p} = [0 \ 0 \ 1]^T$, $R = \bar{R} = I$) とし、各パラメータは参考文献[16]より $M_M = 0.3528$, $M_m = 0.0163$, $C_M = 0.0548$, $V_M = 3$, $K_{J,M} = 3$ と定めた。

定理 1, 2 の条件を満たすようにつぎの 2 組のゲインを定めた。 $\gamma = 0.390$ を満たすゲイン (Gain A) として $K_c = \text{diag}\{40, 40, 20, 20, 20, 40\}$, $K_e = 30I$ を, $\gamma = 0.193$ を満たすゲイン (Gain B) として $K_c = \text{diag}\{100, 100, 75, 75, 75, 100\}$, $K_e = 75I$ を定めた。上記以外のゲインは、同じ大きさのゲインを選び, $K_s = \text{diag}\{100, 30\}$, $l_d = 6.5 \times 10^3$, $A = 6.5 \times 10^3 I$ とした。

Figs. 7~11 にシミュレーション結果を示す。Fig. 7 は 3 次元空間での位置姿勢の偏差 ($p_{er} = p - p_d$, $R_{er} = RR_d^T$) の x, y 軸の位置偏差と z 軸の回転偏差を, Fig. 8 に同様に推定偏差を示す。図中の破線が Gain A の場合を, 実線が Gain B の場合を表している。Fig. 9 には Gain B の場合の 1 軸と 2 軸の速度の推定偏差を示す。速度の推定偏差は振動的ではあるが, 速度の最大値が $V_M = 3(\text{m/s})$ に対して偏差の最大値が $2.9 \times 10^{-3}(\text{m/s})$ であるので, 速度偏差は十分小さいといえる。Fig. 10 には, すべての偏差を含む動的視覚フィードバックシステムの状態 x のユークリッドノルム $\|x\|$ を示す。Figs. 7, 8 と同様に, 図中の破線が Gain A の場合を, 実線が Gain B の場合を表している。Figs. 7, 8, 10 から明らかなように, 観測

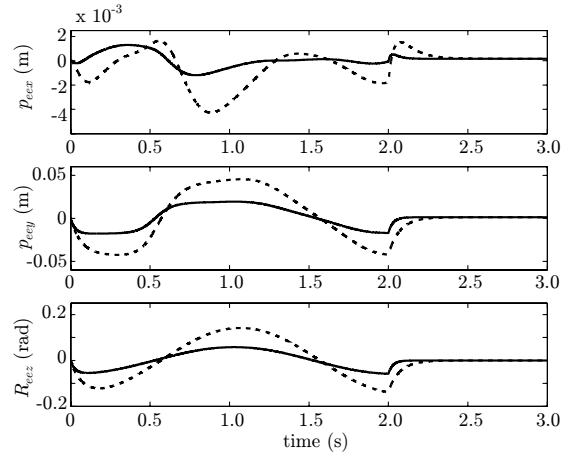
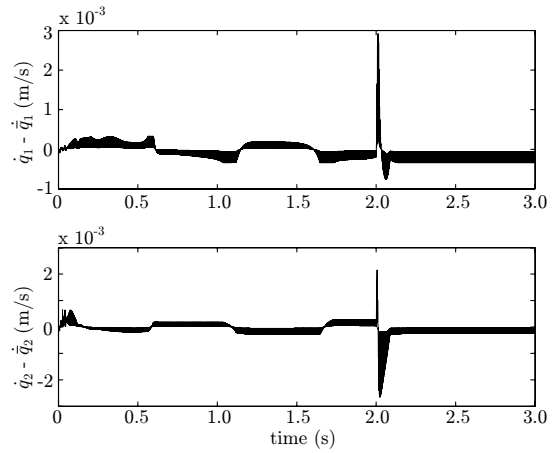
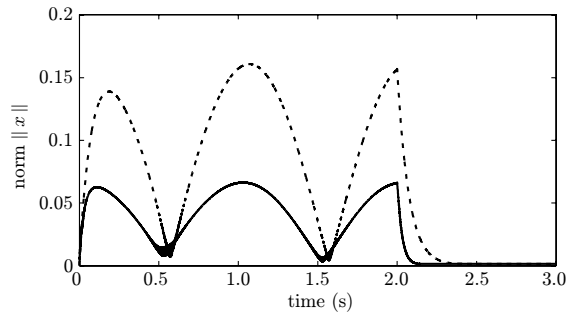
Fig. 8 Estimation errors
(Gain A: dashed, Gain B: solid)

Fig. 9 Errors of estimated velocity

Fig. 10 Euclid norms of x
(Gain A: dashed, Gain B: solid)

対象が運動している場合 (すなわち $0 \leq t \leq 2$) 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, 観測対象が静止した場合 ($t \geq 2$) には, 状態が平衡点 $x = 0$ に収束す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によって示された。

最後に, 文献 [8] で提案されている制御則との比較を Fig. 11 に示す。各グラフは Fig. 7 と同様に 3 次元空間での位置姿勢の偏差を表しており, 図中の破線が文献 [8] の

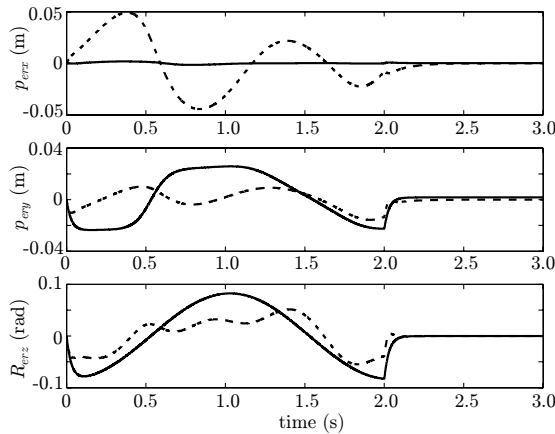


Fig. 11 Comparison with another control law
(Proposed method: solid, Method of Ref.[8]:
dashed)

制御則の場合を、実線が本稿での制御則 (Gain B) の場合を表している。x 軸方向の偏差 p_{err} に極端な違いがみられるのは、提案する手法では偏差を 3 次元空間上で定義し制御則を構成しているのに対し、文献 [8] では画像面上での偏差により制御則を構成しているためである。どちらの制御則においても、観測対象に追従するという制御目的は達成されているが、提案する手法では制御則に観測対象までの距離を必要としないという利点が挙げられる。

6. おわりに

本稿では、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を提案した。そして、提案する制御則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制御性能解析をおこなった。このエネルギー関数は、従来の視覚フィードバック制御則に対するエネルギー関数を含むように構成されている。また、マニピュレータの制御則が受動性に基づく制御則になっていることを示し、動的視覚フィードバックシステムが 2 つの受動システムを結合したシステムであることを示した。最後に、シミュレーションにより制御則の有効性を検証した。今後の課題は、提案した制御則の十分条件における保守性の軽減、実機による実験、安定性の大域的化や軌道計画問題について議論することである。

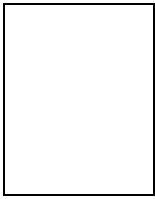
参考文献

[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] 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)

[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] H. Zhang and J. P. Ostrowski: Visual motion planning for mobile robots; *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 2, pp. 199–208 (2002)
[7] 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)
[8] R. Kelly, R. Carelli, O. Nasisi, B. Kuchen and F. Reyes: Stable visual servoing of camera-in-hand robotic systems; *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 5, No. 1, pp. 39–48 (2000)
[9] 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)
[10] 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)
[11] H. Berghuis and H. Nijmeijer: A passivity approach to controller-observer design for robots; *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 6, pp. 740–754 (1993)
[12] M. Fujita, A. Maruyama and H. Kawai: Observer Based Dynamic Visual Feedback Control for Nonlinear Robotics Systems; *Proc. of the 15th IFAC World Congress on Automatic Control*, Paper Number 1637 (2002)
[13] R. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry: *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press (1994)
[14] 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)
[15] F. Bullo and R. Murray: Tracking for fully actuated mechanical systems: a geometric framework; *Automatica*, Vol. 35, No. 1, pp. 17–34 (1999)
[16] 小林 ほか: ロボット制御の実例, コロナ社 (1997)

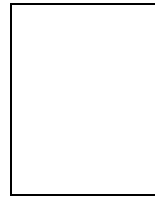
著者略歴

かわ い ひろ ゆき
河 合 宏 之 (学生会員)



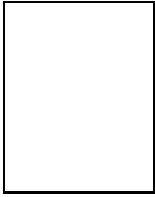
1999 年金沢大学工学部電気・情報工学科卒業。2001 年金沢大学大学院博士前期課程修了，同年金沢大学大学院博士後期課程入学，現在に至る。計測自動制御学会の会員。

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。

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。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。