

受動性に基づく固定カメラ構造の3次元視触覚フィードバック制御*

河合 宏之[†]・村尾 俊幸[‡]・藤田 政之[§]

Passivity-based Visual Force Feedback Control for Fixed Camera Systems*

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

This paper investigates passivity based 3D visual force feedback control for fixed camera systems. In our approach, we can control not only the position but also the orientation of the robot hand with a contact force by using visual information. The proposed method can be regarded as an extension of the hybrid position/force control to the hybrid vision/force control. The main contribution of this paper is to show that the 3D visual force feedback system has the passivity which allows us to prove stability in the sense of Lyapunov. Both the passivity of the manipulator dynamics and the visual feedback system are preserved. Finally simulation results on 3DOF planar manipulator are presented to verify the stability of the 3D visual force feedback system and understand our proposed method simply.

1. はじめに

視覚情報を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呼ばれ、多くの制御方法が提案されている [1,2]。近年では、実システムへの応用例として、工場における組み立て用ロボット以外にも DNA を細胞へ自動注入するロボット [3] や腹腔鏡を把持する手術支援ロボット [4] に視覚フィードバック制御が適用されている。細胞注入口ロボットにおいては、視覚フィードバック制御にて注入箇所までピペットを誘導することに加えて、適切な力で挿入することが望ましく、また、腹腔鏡把持ロボットにおいては術者の視野を確保するための視覚フィードバック制御のほかに、鉗子が臓器に触れ

るため力覚・触覚の情報も必要となってくると考えられる。そのため、視覚と力覚・触覚を併せてひとつのシステムとして捉えることが重要となる。

外界センサとして視覚と力覚・触覚を両方用いてシステムを構成することは、視覚フィードバック制御の研究が盛んになり始めた頃からすでにおこなわれており、Nelson ら [5] は分解能の異なる視覚センサと力覚センサを切り替える方法を提案し、実験により有効性の検証をおこなっている。細田ら [6] は未知環境下における視覚と力覚のハイブリッド制御法を提案しており、並木ら [7] は視触覚フィードバックにより物体の把握行動を実現している。これらは技術的に実現可能な方法を提案し、実システムを用いてその有用まで示している一方で、安定性解析などの理論的な議論が十分なされていない。それに対して、Dean-León ら [8] は視触覚フィードバックシステムに対するリアプノフ関数を与え、その安定性解析までおこなっているが、提案する制御則の適用可能な対象が平面 2 自由度マニピュレータに限定されている。

本論文では対象とするロボットを平面 2 自由度マニピュレータに限定せずに、Fig. 1 に示すような固定カメラ構造の 3 次元視触覚フィードバック制御について考える。制御目的は位置姿勢が未知の対象物に対して、与えられた接触力で手先を適切に接触させることであり、そのため視覚と触覚のフィードバックが必要となる。従来研究 [9][10] で提案している 3 次元視覚フィードバック制

* 原稿受付 200x 年 x 月 xx 日

[†] 金沢工業大学 工学部 College of Engineering, Kanazawa Institute of Technology; 7-1 Ohgigaoka Nonoichi, Ishikawa 921-8501, JAPAN

[‡] 産業技術大学院大学 産業技術研究科 School of Industrial Technology, Advanced Institute of Industrial Technology; 1-10-40 Higashi-Ohi Shinagawa-ku, Tokyo 140-0011, JAPAN

[§] 東京工業大学 大学院理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology; 2-12-1 Ookayama Meguro-ku, Tokyo 152-8550, JAPAN
Key Words: visual feedback control, manipulator dynamics, passivity, Lyapunov stability, L_2 -gain performance analysis.

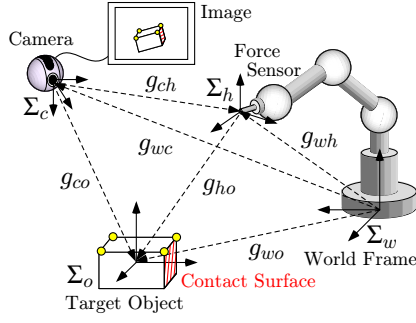


Fig. 1 Visual force feedback system with a fixed camera configuration.

御と、受動性に基づく位置と力のハイブリッド制御 [11] を融合することで、視触覚フィードバック制御則を提案する。その際、構成する視触覚フィードバックシステムが受動性を保存していることを示し、リアプノフ関数を与えることで安定性解析をおこなう。

本論文の構成は以下のとおりである。2. で固定カメラ構造の3次元視覚フィードバックシステムについてまとめる。3. で力制御と融合することで、視触覚フィードバック制御則を提案し、構成した視触覚フィードバックシステムが受動性を有することを示した後、安定性解析をおこなう。4. で3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. 視覚フィードバックシステム

2.1 剛体運動の表現と推定偏差システム

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触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]。基準座標系からみたそれぞれの位置姿勢と同様に、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 $g_{ch} = (p_{ch}, e^{\hat{\xi}_{\theta_{ch}}})$, $g_{co} = (p_{co}, e^{\hat{\xi}_{\theta_{co}}})$ 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。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。また、カメラ座標系からみた観測対象の相対速度は、 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 [10]。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 [12]。

一方、カメラから得られる視覚情報 $f(g_{co})$ は、相対位置姿勢 g_{co} により変化することからその情報を含んではいけない。そこで、オブザーバを構成することで相対位置姿勢の推定値 $\bar{g}_{co} = (\bar{p}_{co}, e^{\hat{\xi}_{\bar{\theta}_{co}}})$ を得ることを考える。本論文では固定カメラ構造の視触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、 g_{co} の運動モデルは (3) 式より

$$\dot{V}_{co}^b = V_{wo}^b \quad (4)$$

となる。そこで (4) 式から、推定値 $\bar{g}_{co}$ の運動モデルを

$$\dot{\bar{V}}_{co}^b = u_e \quad (5)$$

と構成する。 $u_e \in \mathcal{R}^6$ 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。

推定偏差システムを (4)(5) 式から構成する。まず、カメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢の真値と推定値の偏差 $g_{ee} = (p_{ee}, e^{\hat{\xi}_{\theta_{ee}}})$ を

$$g_{ee} := \bar{g}_{co}^{-1} g_{co} \quad (6)$$

と定義する。この推定偏差に対する推定偏差ベクトルを $e_e \in \mathcal{R}^6$ として、 $e_e := [p_{ee}^T \ e_R^T(e^{\hat{\xi}_{\theta_{ee}}})]^T$ と定義する。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。この推定偏差ベクトル e_e はカメラから得られる視覚情報 f と推定モデルから得られる視覚情報の推定値 $\bar{f}$ および画像ヤコビアン $J^\dagger(\bar{g}_{co})$ の擬似逆行列を用いて

$$e_e = J^\dagger(\bar{g}_{co})(f - \bar{f}) \quad (7)$$

と導出される [10]。このとき、推定偏差ベクトル e_e を状態とした推定偏差システムは、(6) 式を時間微分し、(4)(5) 式を代入することで

$$\dot{V}_{ee}^b = -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} u_e + V_{wo}^b \quad (8)$$

と導出される。

2.2 制御偏差システム

視覚フィードバックシステムにおける制御目的を達成するために、制御偏差システムについて議論する。ここで、制御偏差 $g_{ec} = (p_{ec}, e^{\hat{\theta}_{ec}})$ を

$$g_{ec} := g_d^{-1} g_{ho} \quad (9)$$

で定義する。このとき g_d は相対位置姿勢の目標値である。また、制御偏差に対する制御偏差ベクトルを $e_c \in \mathcal{R}^6$ として、 $e_c := [p_{ec}^T \ e_R^T(e^{\hat{\theta}_{ec}})]^T$ と定義する。(9) 式より、制御偏差 g_{ec} は推定偏差 g_{ee} を用いて以下のように表すことができる。

$$g_{ec} = g_d^{-1} g_{ho} = g_d^{-1} g_{ch}^{-1} g_{co} = g_d^{-1} g_{ch}^{-1} \bar{g}_{co} g_{ee} \quad (10)$$

ただし、カメラ座標系からみた手先の位置姿勢 g_{ch} は同定により得られるとする。(10) 式において、目標値 g_d と推定値 $\bar{g}_{co}$ は既知情報であるため、推定偏差 g_{ee} が得られれば、相対位置姿勢 g_{ho} を直接得なくとも制御偏差 g_{ec} は求まることがわかる。文献 [14] より、推定偏差 g_{ee} は $-\frac{\pi}{2} \leq \theta_{ee} \leq \frac{\pi}{2}$ の範囲内で推定偏差ベクトル e_e から求められることがわかっているため、(10) 式より制御偏差 g_{ec} を導出することが可能となる。

(9) 式で定義した制御偏差 g_{ec} を時間微分し、(4) 式を用いることで、制御偏差システムは

$$V_{ec}^b = -\text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} \text{Ad}_{(g_d^{-1})} V_{wh}^b + V_{wo}^b \quad (11)$$

と導出される。

2.3 視覚フィードバックシステムの受動性

推定偏差システム (8) と制御偏差システム (11) を併せることで、固定カメラ構造における視覚フィードバックシステムをつぎのように構成する。

$$\begin{bmatrix} V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u_{ce} + \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix} V_{wo}^b \quad (12)$$

ただし、 $u_{ce} := [(\text{Ad}_{(g_d^{-1})} V_{wh}^b)^T \ u_e^T]^T$ を入力として定義する。ここでは、マニピュレータダイナミクスを考慮せず、手先速度 V_{wh}^b を直接決められると仮定する（次節以降はこの仮定は不要）。制御偏差ベクトル e_c と推定偏差ベクトル e_e を視覚フィードバックシステムの状態とし $e := [e_c^T \ e_e^T]^T$ と定義する。このとき、つぎの補題が成り立つ [10]。

【補題 1】 観測対象が静止している（すなわち $V_{wo}^b = 0$ ）とする。出力を

$$\nu_{ce} := -e \quad (13)$$

とするとき、(12) 式の視覚フィードバックシステムの入出力間に

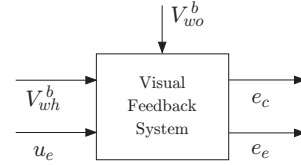


Fig. 2 Block diagram of the visual feedback system.

$$\int_0^T u_{ce}^T \nu_{ce} dt \geq -\beta_{ce}, \quad \forall T > 0 \quad (14)$$

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行われる。

$$V_{ce} = E(g_{ec}) + E(g_{ee}) \quad (15)$$

ただし、 $E(g_{ab}) := \frac{1}{2} \|p_{ab}\|^2 + \phi(e^{\hat{\theta}_{ab}})$ であり、 $\phi(e^{\hat{\theta}_{ab}}) := \frac{1}{2} \text{tr}(I - e^{\hat{\theta}_{ab}})$ は回転行列に対するエネルギー関数を表す正定関数である [13]。Fig. 2 に視覚フィードバックシステム (12) のブロック図を示す。この補題は、視覚フィードバックシステムにおいて入力を u_{ce} 、出力を ν_{ce} とするとき、その間に受動性が成り立つことを意味している。

3. 視触覚フィードバック制御

本論文で考える制御目的は、観測した対象物に対するマニピュレータの手先の相対位置姿勢を目標相対位置姿勢 g_d に一致させたいと、与えられた接触力 λ_d で接触させることである。そこで、前節で示した固定カメラ構造の視覚フィードバックシステムにおいて接触力を考慮することで、視触覚フィードバックシステムを構成する。そして、受動性に基づく視触覚フィードバック制御則を提案する。

3.1 視触覚フィードバックシステム

接触力を考慮した 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 [11]。

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + J_\varphi(q)\lambda \quad (16)$$

$q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathcal{R}^n$ 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、 $\lambda \in \mathcal{R}$ は接触力、 $M(q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は正定な慣性行列、 $C(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathcal{R}^n$ は遠心力・コリオリ力項、 $g(q) \in \mathcal{R}^n$ は重力項を表す。 $J_\varphi(q)$ は接触点における手先拘束が $\varphi(q) = 0$ ($\varphi(q) \in \mathcal{R}$) で表されるとき、その時間微分により

$$J_\varphi^T(q)\dot{q} = 0, \quad J_\varphi(q) = \left[\frac{\partial \varphi(q)}{\partial q} \right]^T \in \mathcal{R}^n \quad (17)$$

で定義される。ただし、本論文では対象物の接触面の形状は既知とする。

ここで、マニピュレータへの入力トルクとして

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

$$+J_b^T(q)\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T e_c - J_\varphi \lambda_d + u_s + J_\varphi u_F \quad (18)$$

を考える。\$J_b(q)\$ はボディマニピュレータヤコビアン、\$\lambda_d\$ は接触力の目標値であり、\$u_s\$ と \$u_F\$ は後で定める角速度および接触力に関する新しい入力である。また、\$\dot{q}_r\$ は

$$\dot{q}_r := Q_\varphi(q)\dot{q}_d + \alpha J_\varphi(q)F_e \quad (19)$$

で定義される新たな変数であり、\$\alpha\$ は正の定数とする。\$Q_\varphi(q)\$ は次式で定義される関節空間から接触面への射影行列である [11]。

$$Q_\varphi(q) = I - J_\varphi(q)J_\varphi^T(q) \quad (20)$$

また、\$F_e\$ は接触力に関する偏差として

$$F_e := \int_{t_0}^t (\lambda - \lambda_d) d\tau = \int_{t_0}^t e_\lambda d\tau \in \mathcal{R} \quad (21)$$

と定義する。ただし、\$t_0\$ は手先が対象物に接触した時刻であり、\$e_\lambda := \lambda - \lambda_d\$ である。このとき

$$\dot{F}_e = e_\lambda \quad (22)$$

が成り立つ。

一方、マニピュレータの手先の速度はボディマニピュレータヤコビアン \$J_b(q)\$ を用いることでつぎのように表される [12]。

$$V_{wh}^b = J_b(q)\dot{q} = J_b(q)Q_\varphi\dot{q} \quad (23)$$

ここで、\$Q_\varphi\$ の定義により得られる関係 \$Q_\varphi Q_\varphi \dot{q} = Q_\varphi \dot{q} = \dot{q}\$ を用いている。同様に、視覚情報を用いて構成される手先の速度の目標値を \$u_h\$ とし、マニピュレータの関節角速度の目標値を \$q_d\$ で表すと、ボディマニピュレータヤコビアンを用いることで \$u_h = J_b(q)Q_\varphi\dot{q}_d\$ と表すことができる。ここで、マニピュレータの関節角速度に関する偏差 \$s \in \mathcal{R}^n\$ を

$$s := \dot{q} - \dot{q}_r \in \mathcal{R}^n \quad (24)$$

と定義する。このとき、関節角速度の偏差 \$s\$ と接触力に関する偏差 \$F_e\$ の間に

$$\begin{aligned} J_\varphi^T s &= J_\varphi^T (\dot{q} - \dot{q}_r) = -J_\varphi^T \dot{q}_r \\ &= -J_\varphi^T Q_\varphi \dot{q}_d - \alpha J_\varphi^T J_\varphi F_e = -\alpha F_e \end{aligned} \quad (25)$$

なる関係がある。ただし、\$J_\varphi^T J_\varphi = I\$ と \$J_\varphi^T Q_\varphi = 0\$ を用いている [11]。

固定カメラ構造の視触覚フィードバックシステムは (12)(16)(18)(22) 式より

$$\begin{bmatrix} \dot{s} \\ \dot{F}_e \\ V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1} \left(Cs - J_b^T \text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T e_c - J_\varphi e_\lambda \right) \\ e_\lambda \\ -\text{Ad}_{(g_{ho}^{-1})} J_b s \\ 0 \end{bmatrix}$$

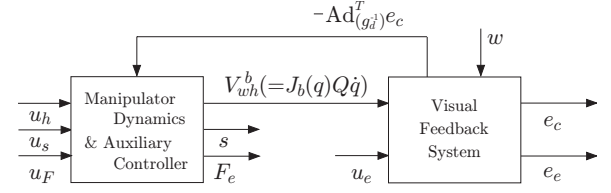


Fig. 3 Block diagram of the dynamic visual force feedback system.

$$+ \begin{bmatrix} M^{-1} & M^{-1}J_\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I \\ I \end{bmatrix} w \quad (26)$$

と構成される。ここで、システムの状態、入力および外乱をそれぞれ

$$x := \begin{bmatrix} s \\ F_e \\ e_c \\ e_e \end{bmatrix}, \quad u := \begin{bmatrix} u_s \\ u_F \\ \text{Ad}_{(g_d^{-1})} u_h \\ u_e \end{bmatrix}, \quad w := V_{wo}^b$$

と定義する。Fig. 3 に視触覚フィードバックシステム (26) のブロック図を示す。

視触覚フィードバックシステムにおける制御目的は未知な位置姿勢の対象物に、適切な接触力でロボットの手先を接触させることである。そこで、本論文で考える問題をあらためて示すと、つぎのようになる。

問題設定 固定カメラ構造の視触覚フィードバックシステム (26) において、対象物が静止しているとき、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F_e = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_c = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_e = 0$$

を満たすように制御入力 \$u\$ を決定せよ。

3.2 視触覚フィードバックシステムの受動性

制御入力 \$u\$ を決定するために、視触覚フィードバックシステムの性質としてつぎの補題を示す。

【補題 2】 外乱が存在しない (すなわち \$w = 0\$) とする。出力を

$$\nu := Nx, \quad N := \text{diag}\{I_n, -\alpha, -I_6, -I_6\}$$

とするとき、(26) 式の視触覚フィードバックシステムの入出力間に

$$\int_0^T u^T \nu \geq -\beta, \quad \forall T > 0 \quad (27)$$

が成り立つ。ただし、\$\beta\$ はある非負の定数である。

(証明) エネルギー関数として

$$V = \frac{1}{2} s^T M s + \frac{1}{2} \alpha F_e^2 + E(g_{ec}) + E(g_{ee}) \quad (28)$$

を考える。このエネルギー関数の解軌道に沿った時間微分は $\dot{M} - 2C$, $\hat{p}_{ec}$ と $\hat{p}_{ee}$ の歪対称性 (すなわち $s^T(\dot{M} - 2C)s = 0$, $p_{ec}^T \hat{p}_{ec} e^{-\xi \theta_d \omega_{ud}} = -p_{ec}^T (e^{-\xi \theta_d \omega_{ud}})^{\wedge} p_{ec} = 0$, $p_{ee}^T \hat{p}_{ee} \omega_{ue} = -p_{ee}^T \hat{\omega}_{ue} p_{ee} = 0$) を用いると

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -s^T C \dot{s} + s^T J_b^T \text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T e_c + s^T J_\varphi e_\lambda + \alpha F_e e_\lambda \\ &\quad - e_c^T \text{Ad}_{(g_{ho}^{-1})} J_b s + \frac{1}{2} s^T \dot{M} s + x^T N^T u \\ &= \frac{1}{2} s^T (\dot{M} - 2C) s + e_\lambda^T (J_\varphi^T s + \alpha F_e) + x^T N^T u \\ &= x^T N^T u \end{aligned} \quad (29)$$

となる。両辺を積分することで

$$\int_0^T u^T \nu d\tau = V(T) - V(0) \geq -V(0) = -\beta \quad (30)$$

が成り立つ。ただし、 β は s , F_e , e_c および e_e の初期状態のみに依存する、ある非負の定数である。(Q.E.D.)

補題1で示したように視覚フィードバックシステム(12)は受動性を有している。また、文献[11]で示されているように、マニピュレータダイナミクス(16)を含む力制御における偏差システムも受動性を有している。補題2は、固定カメラ構造の視触覚フィードバックシステム(26)の入力 $u = [u_s^T \ u_F^T \ (\text{Ad}_{(g_d^{-1})} u_h)^T \ u_e^T]^T$ から出力 $\nu = [s^T \ -\alpha F_e^T \ -e_c^T \ -e_e^T]^T$ の間に受動性が成り立つことを示しており、上記のふたつの受動性を保存していると考えられる。

3.3 受動性に基づく制御則と安定性解析

前述の補題を用いて、3次元視触覚フィードバックシステムの入力として、つぎの受動性に基づく制御則を提案する。

$$\begin{aligned} u &= -K\nu = -KNx \\ K &:= \text{diag}\{K_s, k_F, K_c, K_e\} \in \mathcal{R}^{n+13} \end{aligned} \quad (31)$$

ただし $K_s := \text{diag}\{k_{s1}, \dots, k_{sn}\}$ と k_F は各関節および接触力の偏差に関するゲインであり、 $K_c := \text{diag}\{k_{c1}, \dots, k_{c6}\}$ 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で示した視触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、固定カメラ構造の3次元視触覚フィードバックシステム(26)と(31)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) 補題2の証明における(28)式のエネルギー関数 V をリアプノフ関数候補とすると、(26)(31)式の閉ループ系の解軌道に沿った時間微分は(29)式より

$$\dot{V} = -x^T N^T K N x \quad (32)$$

と導かれる。ゲイン K_s , k_F , K_c , K_e の正定性より行列

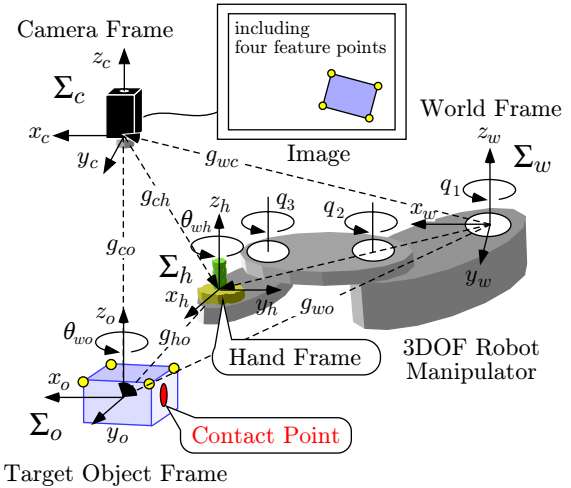


Fig. 4 Coordinate frames for dynamic visual force feedback system with three degree of freedom manipulator.

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。(Q.E.D.)

定理1では、固定カメラ構造の3次元視触覚フィードバックシステムに対し、リアプノフ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。従来の受動性に基づく位置と力・触覚のハイブリッド制御では対象物の位置姿勢は既知とされていたが、本研究で提案する受動性に基づく視触覚フィードバック制御では未知な位置姿勢でも接触を可能としている。特に、手先の速度を(23)式で表すことでマニピュレータダイナミクスを含む力制御における偏差システムと視覚フィードバックシステムを結合したことで、受動性および安定性の議論が可能となっている。また、本論文では受動性に基づく視触覚フィードバック制御則を提案しているため、マニピュレータの受動性に基づく位置制御での議論と同様に、パラメトリックな不確かさに対するロバスト制御や適応制御への展開も可能であると考えられる。

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Fig.4に示すような平面3自由度マニピュレータを考える。しかし、提案する制御則は3次元空間に置かれた対象物(並進3自由度, 回転3自由度)に手先を接触させることが可能な3次元視触覚フィードバック制御則である。座標系はFig.4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。

観測する対象物の特徴点は立方体上部の四つの頂点とし、立方体の中心が対象物の座標系の原点で $p_{wo} = [0.47 \ 0.05 \ 0]^T$ [m], $\xi_{\theta_{wo}} = [0 \ 0 \ 0]^T$ [rad] に配置されており、接触点はその側面とする。マニピュレータのリンクの長さを台座側からそれぞれ、 $l_1 = 0.2$ [m], $l_2 = 0.2$ [m],

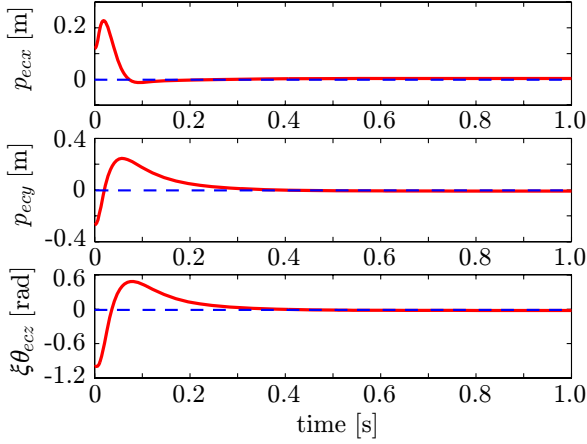


Fig. 5 The control error e_c which defined the error between the relative rigid body motion of the robot hand g_{ho} and desired one g_d . Initial control errors are $p_{ecx} = 0.12$ [m], $p_{ecy} = -0.27$ [m] and $\xi\theta_{ecz} = -\pi/2$ [rad], respectively.

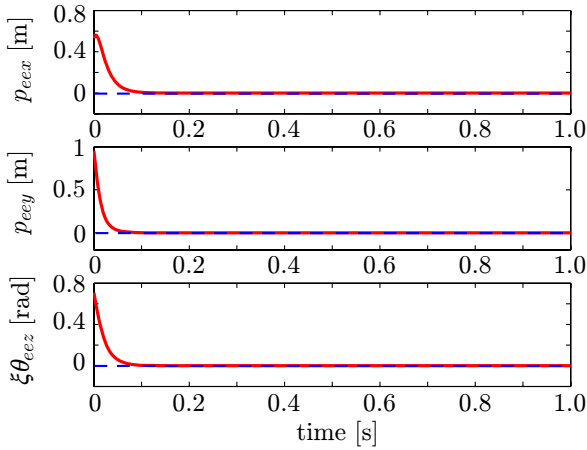


Fig. 6 The estimation error e_e which defined the error between the estimated value $\bar{g}_{co}$ and the actual relative rigid body motion g_{co} . Initial estimation errors are $p_{eex} = 0.53$ [m], $p_{eyy} = -0.95$ [m] and $\xi\theta_{eez} = \pi/4$ [rad], respectively.

$l_3 = 0.1$ [m] とし、各関節角度の初期値を $q_1(0) = -\pi/2$ [rad], $q_2(0) = \pi/2$ [rad], $q_3(0) = \pi/2$ [rad] とする。このとき、相対位置姿勢は $p_{ho} = [0.15 \ -0.27 \ 0]^T$ [m], $\xi\theta_{ho} = [0 \ 0 \ -\pi/2]^T$ [rad] となる。手先が対象物に接触するように、相対目標位置姿勢を $p_d = [0.03 \ 0 \ 0]^T$ [m], $\xi\theta_d = [0 \ 0 \ 0]^T$ [rad] と定め、目標接触力を $\lambda_d = 5$ [N] とする。このとき、視覚と接触力に関する初期偏差はそれぞれ $p_{ec} = [0.12 \ -0.27 \ 0]^T$ [m], $\xi\theta_{ec} = [0 \ 0 \ -\pi/2]^T$ [rad], $p_{ee} = [0.53 \ 0.95 \ 0]^T$ [m], $\xi\theta_{ee} = [0 \ 0 \ \pi/4]^T$ [rad], $\lambda_e = -5$ [N] となる。ただし、推定偏差は現実的な値の範囲で適当に与え、接触力には文献 [8][11] の実験で見られるような観測ノイズを付加した。

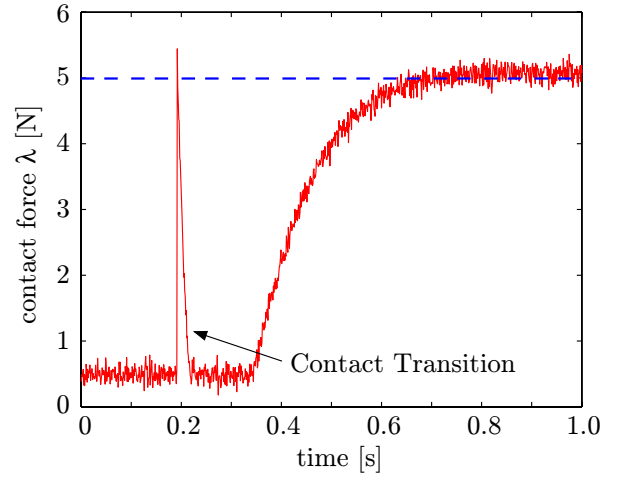


Fig. 7 The contact force trajectory λ .

4.2 シミュレーション結果

提案する (31) 式の制御則における各ゲインを $K_s = \text{diag}\{10, 10, 10\}$, $k_F = 25$, $\alpha = 1$, $K_c = \text{diag}\{40, 40, 20, 20, 20, 40\}$, $K_e = 50I_6$ と定めた。このときのシミュレーション結果を Figs. 5~7 に示す。Figs. 5~7 はそれぞれ視覚に関する制御偏差 e_c と推定偏差 e_e 、接触力 λ を表している。Figs. 5, 6 においては、平面 3 自由度マニピュレータを考えているため、 x 軸と y 軸の並進および z 軸の回転のみを表している。制御偏差 e_c と推定偏差 e_e が 0 に収束していることから、視覚情報を用いて相対位置姿勢 g_{ho} が目標位置姿勢 g_d に一致することが確認される。Fig. 7 において、0.2 [s] 付近でパルス状の変化が見られるのは、手先が対象物に接触した瞬間を表している。その後、時間の経過とともに接触力 λ が目標値 5 [N] に収束していることが確認される。以上により、提案する手法において位置姿勢が未知の対象に対して与えられた接触力で手先を適切に接触されていることがシミュレーションによって確認された。

5. おわりに

本論文では、受動性に基づく視覚フィードバック制御と力制御を融合することで、固定カメラ構造に対する受動性に基づく視触覚フィードバック制御について考えた。提案する手法は力制御の従来研究で示されていた位置と力のハイブリッド制御法を、視覚と力のハイブリッド制御法へと拡張したものであると捉えることができる。構成した 3 次元視触覚フィードバックシステムが受動性を有することを示し、そのエネルギー関数をリアプノフ関数とみなすことで安定性解析をおこなった。

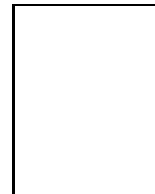
参考文献

- [1] F. Chaumette and S. Hutchinson: Visual Servo Control, Part I: Basic Approaches; *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 13, No. 4, pp. 82–90 (2006)
- [2] F. Chaumette and S. Hutchinson: Visual Servo Con-

- trol, Part II: Advanced Approaches; *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 14, No. 1, pp. 109–117 (2007)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] B. J. Nelson and P. K. Khosla: Force and Vision Resolvability for Assimilating Disparate Sensory Feedback; *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5, pp. 714–731 (1996)
- [6] 細田, 五十嵐, 浅田: 未知環境内で動作するロボットのビジュアルサーボ/力サーボハイブリッド制御系; 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 4, pp. 642–647 (1997)
- [7] 並木, 石川: 視触覚フィードバックを用いた最適把握行動; 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 2, pp. 261–269 (2000)
- [8] E.C. Dean-León, V. Parra-Vega and A. Espinosa-Romero: Visual Servoing for Constrained Planar Robots Subject to Complex Friction; *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 11, No. 4, pp. 389–400 (2006)
- [9] 河合, 村尾, 東, 藤田: 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; システム制御情報学会論文誌, Vol. 18, No. 4, pp. 127–135 (2005)
- [10] M. Fujita, H. Kawai and M. Spong: Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking: Stability and L_2 -gain Performance Analysis; *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 40–52 (2007)
- [11] Y. Liu, K. Kitagaki, T. Ogasawara and S. Arimoto: Model-based Adaptive Hybrid Control for Manipulators Under Multiple Geometric Constraints; *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 7, No. 1, pp. 97–109 (1999)
- [12] R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry: *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press (1994)
- [13] F. Bullo and A.D. Lewis: *Geometric Control of Mechanical Systems*, Springer-Verlag (2004)
- [14] 村尾, 河合, 藤田: 固定カメラシステムに対する安定化予測ビジュアルフィードバック制御; 電気学会論文誌 C, (投稿中)

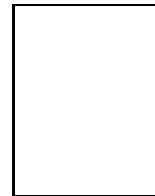
著者略歴

かわ い ひろ ゆき
河合 宏之 (正会員)



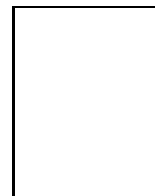
2001年金沢大学大学院自然科学研究科電子情報システム専攻博士前期課程修了, 2004年金沢大学大学院自然科学研究科機能開発科学専攻博士後期課程修了, 同年法政大学情報技術(IT)研究センターポスドクター. 2005年金沢工業大学講師. 視覚フィードバック制御とその応用に関する研究に従事. 博士(工学). 計測自動制御学会, IEEEの会員.

むら お とし ゆき
村尾 俊幸 (正会員)



2005年金沢大学大学院自然科学研究科電子情報システム専攻博士前期課程修了, 2008年東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻博士後期課程修了. 2006年産業技術大学院大学研究員, 2007年同助教. 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などの会員.

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. 2005年東京工業大学大学院理工学研究科教授. 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