受動性に基づく固定カメラシステムの 3次元視触覚フィードバック制御

河合宏之(金沢工業大学)村尾俊幸(産業技術大学院大学)藤田政之(東京工業大学)

Visual Force Feedback Control for Fixed Camera Systems based on Passivity Approach

H. Kawai (Kanazawa Institute of Technology), T. Murao (Advanced Institute of Industrial Technology) and M. Fujita (Tokyo Institute of Technology)

Abstract— This paper investigates passivity based visual force feedback control for fixed camera systems. The proposed method can be regarded as an extension of the hybrid position/force control to the hybrid vision/force control. Both the passivity of the manipulator dynamics and the passivity of the visual feedback system are preserved in the visual force feedback system. The main contribution of this paper is to show that the visual force feedback system has the passivity which allows us to prove stability in the sense of Lyapunov.

Key Words: visual feedback control, force control, passivity, stability

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、様々な分野で適用 されはじめている [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. この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. 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.

接触する対象の位置姿勢が既知の場合は,視覚を用 いずとも例えば文献[5]のように位置と力のハイブリッ ド制御による方法が有用である.しかし,接触する対象 の位置姿勢が未知の場合には視覚情報を用いることが 有用となり,文献[6]や文献[7]では視覚と力のハイプ リッド制御による方法が提案され,安定性について議 論されている.しかしながら,これらの従来研究ではロ ボットが平面2自由度マニピュレータに限定されてお り,3次元の視覚フィードバック制御と力覚・触覚制御 を融合し,その安定性まで議論された研究はなされて いない.そこで,本稿では従来研究[8]で提案している 位置ベース法の3次元視覚フィードバック制御を基に, 固定カメラ構造の視触覚フィードバック制御について 考え,その安定性について議論する.

- 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

本稿では、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



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

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 [9]. 演算子 \land (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 \lor (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

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

として用いる [9]. 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

$$g_{co} = g_{wc}^{-1} g_{wo} \tag{2}$$

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,

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

のように導かれる [8]. 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, $\operatorname{Ad}_{(g_{ab})} \in \mathcal{R}^{6\times 6}$ は同次表現 g_{ab} の随伴写像である [9].

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} により変化するためその情報を含んでは 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, 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. 本稿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, g_{co} の基本式は (3) 式より

$$V_{co}^b = V_{wo}^b \tag{4}$$

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

$$\bar{V}^b_{co} = u_e \tag{5}$$

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 メラ座標系から観測対象へ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

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

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 $e_R(e^{\hat{\xi}\theta}) := \operatorname{sk}(e^{\hat{\xi}\theta})^{\vee}, \operatorname{sk}(e^{\hat{\xi}\theta}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}\theta} - e^{-\hat{\xi}\theta})$ 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 \bar{f} および画像ヤコビアンの擬似逆行列 $J^{\dagger}(\bar{q}_{co})$ を用いて

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

と導出される [8]. 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

$$V_{ee}^b = -\operatorname{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} u_e + V_{wo}^b \tag{8}$$

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.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 得られるとすると、手先座標系からみた観測対象の位置 姿勢の推定値は

$$\bar{g}_{ho} := g_{ch}^{-1} \bar{g}_{co} \tag{9}$$

となる.ここで、制御偏差 $g_{ec} = (p_{ec}, e^{\xi \theta_{ec}})$ を

$$g_{ec} := g_d^{-1} g_{ho} \tag{10}$$

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, $e_{c} := [p_{ec}^{T} e_{R}^{T} (e^{\hat{\xi} \theta_{ec}})]^{T}$ と定義する. (10) 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.

$$g_{ec} = g_d^{-1} g_{ho} = g_d^{-1} \bar{g}_{ho} \bar{g}_{ho}^{-1} g_{ho} = g_d^{-1} \bar{g}_{ho} g_{ee} \quad (11)$$

(11) 式において, 目標値 g_d と推定値 \bar{g}_{ho} 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.このとき, $-\frac{\pi}{2} \leq \theta_{ee} \leq \frac{\pi}{2}$ の範囲内で, 以下の関 係式が成り立つ [10].

$$\xi \theta_{ee} = \frac{\arcsin \|e_R(e^{\xi \theta_{ee}})\|}{\|e_R(e^{\hat{\xi} \theta_{ee}})\|} e_R(e^{\hat{\xi} \theta_{ee}})$$
(12)

したがって, 推定偏差ベクトル e_e から推定偏差 g_{ee} が 求められ, (11) 式より制御偏差 g_{ec} を導出することが 可能となる.

(10) 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

$$V_{ec}^{b} = -\mathrm{Ad}_{(g_{ec}^{-1})}\mathrm{Ad}_{(g_{d}^{-1})}V_{wh}^{b} + V_{wo}^{b}$$
(13)

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(13)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.

$$\begin{bmatrix} V_{ec}^{b} \\ V_{ee}^{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\operatorname{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} & 0 \\ 0 & -\operatorname{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u_{ce} + \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix} V_{wo}^{b}$$
(14)

ただし、 $u_{ce} := [(\operatorname{Ad}_{(g_d^{-1})}V_{wh}^b)^T u_e^T]^T$ 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.

補題 1[8] 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

$$\nu_{ce} := -e \tag{15}$$

とするとき, (14) 式の視覚フィードバックシステムの 入出力間に

$$\int_0^T u_{ce}^T \nu_{ce} dt \ge -\beta_{ce}, \quad \forall T > 0 \tag{16}$$

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.

$$V_{ce} = E(g_{ec}) + E(g_{ee}) \tag{17}$$

ただし, $E(g_{ab}) := \frac{1}{2} ||p_{ab}||^2 + \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}})$ であり, $\phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}})$ $:= \frac{1}{2} tr(I - e^{\hat{\xi}\theta_{ab}})$ 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 [11]. 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

3.1 視触覚フィードバックシステム

本節では、前節で述べた固定カメラ構造の視覚フィー ドバックシステムに接触力を考慮したマニピュレータ ダイナミクスを考えることで、固定カメラ構造に対する 視触覚フィードバックシステムを構成する.

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 [5].

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + J_{\varphi}(q)\lambda \qquad (18)$$

 $q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathcal{R}^n$ 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

$$\varphi(q) = 0, \quad \varphi(q) \in \mathcal{R} \tag{19}$$

で表されたとき、その時間微分により

$$J_{\varphi}^{T}(q)\dot{q} = 0, \quad J_{\varphi}(q) = \left[\frac{\partial\varphi(q)}{\partial q}\right]^{T} \in \mathcal{R}^{n} \quad (20)$$

で定義される.

ここで、マニピュレータへの入力トルクとして

$$\tau = M(q)\ddot{q}_r + C(q,\dot{q})\dot{q}_r + g(q) + J_b^T(q)\operatorname{Ad}_{(g_d^{-1})}^T e_c - J_{\varphi}\lambda_d + u_s + J_{\varphi}u_F(21)$$

を考える. $J_b(q)$ はボディマニピュレータヤコビアン, λ_d は接触力の目標値であり, $u_s \ge u_F$ 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

$$\dot{q}_r := Q_\varphi(q)\dot{q}_d + \alpha J_\varphi(q)F_e \tag{22}$$

で定義される新たな変数であり、 α は正の定数とする. $Q_{\varphi}(q)$ は次式で定義される射影行列である [5].

$$Q_{\varphi}(q) = I - J_{\varphi}(q)J_{\varphi}^{T}(q)$$
(23)

また、 F_e は接触力に関する偏差として

$$F_e := \int_0^t (\lambda - \lambda_d) d\tau = \int_0^t e_\lambda d\tau \in \mathcal{R} \quad (24)$$

として定義する.ただし, $e_{\lambda}:=\lambda-\lambda_d$ である.このとき

$$\dot{F}_e = e_\lambda \tag{25}$$

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 [9].

$$V_{wh}^b = J_b(q)\dot{q} \tag{26}$$

さらに、関節角速度の目標値をつぎのように設定する.

$$\dot{q}_d := Q_{\varphi}^{\dagger}(q) \left(J_b^{\dagger}(q) u_c - \alpha J_{\varphi}(q) F_e \right)$$
(27)



Fig. 2: Block diagram of the dynamic visual force feedback system.

 u_c は後ほど視覚情報から構成する新たな入力である.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

$$s := \dot{q} - \dot{q}_r \in \mathcal{R}^n \tag{28}$$

と定義する. このとき, 関節角速度の偏差 s と接触力の偏差 F_e の間に

$$J_{\varphi}^T s = -\alpha F_e \tag{29}$$

なる関係がある [5].

固定カメラ構造の視触覚フィードバックシステムは (14)(18)(21)(25) 式より



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

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

と定義する. Fig. 2 に視触覚フィードバックシステム (30)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 未知な位置姿勢の観測対象に、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、本稿で考える 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(30)において、観測対象が静止しているとき、

$$\lim_{t \to \infty} s = 0, \ \lim_{t \to \infty} F_e = 0, \ \lim_{t \to \infty} e_c = 0 \ and \ \lim_{t \to \infty} e_e = 0$$

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, (30) 式の視触覚フィードバックシステム の入出力間に

$$\int_0^T u^T \nu \ge -\beta, \quad \forall T > 0 \tag{31}$$

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

$$V = \frac{1}{2}s^T M s + \frac{1}{2}\alpha F_e^2 + E(g_{ec}) + E(g_{ee}) \quad (32)$$

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 $s^{T}(\dot{M}-2C)s = 0$, $p_{ec}^{T}\hat{p}_{ec}e^{-\hat{\xi}\theta_{d}}\omega_{ud} = -p_{ec}^{T}(e^{-\hat{\xi}\theta_{d}}\omega_{ud})^{\wedge}p_{ec} = 0$, $p_{ee}^{T}\hat{p}_{ee}\omega_{ue} = -p_{ee}^{T}\hat{\omega}_{ue}p_{ee} = 0$) を用いると

$$\dot{V} = -s^T C \dot{s} + s^T J_b^T \operatorname{Ad}_{(g_d^{-1})}^T e_c + s^T J_{\varphi} e_{\lambda} + \alpha F_e e_{\lambda}$$
$$-e_c^T \operatorname{Ad}_{(g_{ho}^{-1})} J_b s + \frac{1}{2} s^T \dot{M} s + x^T N^T u$$
$$= \frac{1}{2} s^T (\dot{M} - 2C) s + e_{\lambda}^T (J_{\varphi} s + \alpha F_e) + x^T N^T u$$
$$= x^T N^T u$$
(33)

となる. 両辺を積分することで

$$\int_0^T u^T \nu d\tau = V(T) - V(0) \ge -V(0) = -\beta \quad (34)$$

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 (14) は受動性を有している.また、文献 [5] で示されて いるように、マニピュレータダイナミクス (18) 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 (30) の入力 $u = [u_s^T \ u_F^T \ (\operatorname{Ad}_{(g_a^{-1})} u_c)^T \ u_e^T]^T$ 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 ていると考えることができる.

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.

$$u = -K\nu = -KNx$$

$$K := \operatorname{diag}\{K_s, k_F, K_c, K_e\} \in \mathcal{R}^{n+13}$$
(35)

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 (30) と (35) 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(32)式のエネルギー関数Vをリアプノフ関数候補とすると,(30)(35)式の閉ループ系の解軌道に沿った時間微分は(33)式より

$$\dot{V} = -x^T N^T K N x \tag{36}$$

と導かれる. ゲイン K_s , k_F , 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. (Q.E.D.)

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.

4 おわりに

本稿では、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、固定カメラシステムに対する 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だ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

- F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual Servo Control, Part I: Basic Approaches," *IEEE Robotics & Au*tomation Magazine, Vol. 13, No. 4, pp. 82–90, 2006.
- [2] F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual Servo Control, 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," In:D. Rus and S. Singh (Eds), *Experimental Robotics VII*, 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] Y. Liu, K. Kitagaki, T. Ogasawara and S. Arimoto, "Model-based Adaptive Hybrid Control for Manupilators Under Multiple Geometric Constraints," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 7, No. 1, pp. 97–109, 1999.
- [6] 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.
- [7] H. Kawai, T. Murao and M. Fujita, "Passivity-based Visual Force Feedback Control for Planar Manipulators with Eye-in-Hand Configuration," *Proc. of 16th IEEE International Conference on Control Applications* pp. 1480-1485, 2007.
- [8] M. Fujita, H. Kawai and M. Spong, "Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking: Stability and L₂-gain Performance Analysis," *IEEE Transactions on Control* Systems Technology, Vol. 15, No. 1, pp. 40–52, 2007.
- [9] R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry, A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press, 1994.
- [10] 村尾、河合、藤田、"受動性に基づく視覚フィードバック における推定と制御の内部構造、"第36回 SICE 制御理 論シンポジウム 資料、pp. 183-186, 2007.
- [11] F. Bullo and A.D. Lewis, Geometric Control of Mechanical Systems, Springer-Verlag, 2004.