

受動性に基づく可動カメラを用いた視覚フィードバック制御の一考察

○村 尾 俊 幸*・河 合 宏 之**・藤 田 政 之*

*金 沢 大 学,**法 政 大 学

Passivity-based Visual Feedback Control with a Movable Camera

○ Toshiyuki Murao*, Hiroyuki Kawai* and Masayuki Fujita*

*Kanazawa University,**Hosei University

In this paper, we discuss the dynamic visual feedback control with a movable camera instead of a fixed camera in the fixed camera configuration. Firstly the brief summary of the control and the estimated error system is given. Secondly we construct the camera field error system in order to consider the camera field of view. 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. Finally the stability and L_2 -gain performance analysis are discussed based on the passivity.

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る舞いをさせるには、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、この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のことを視覚フィードバック制御という¹⁾。

ロボットの視覚フィードバック制御の目的のひとつに、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があげられる。この制御目的を達成させるために、安定性の域大化²⁾や軌道計画問題³⁾が研究されている。これらの従来研究では、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して捉えられている。一方、マニピュレータダイナミクスまで考慮した研究で、平面マニピュレータに限定されない制御則を Kelly ら⁴⁾が提案している。しかし、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。それに対して従来研究⁵⁾では、固定カメラ構造の視覚フィードバックシステムについて安定性や制御性能解析について議論した。

しかし、従来研究⁵⁾のシステムではカメラが固定されているためにカメラ視野を広くとることができない。Chaumette は文献⁶⁾においてカメラ視野の問題は非常に重要であると述べており、マニピュレータの作業スペースを広げるためにも、より多くの視野が必要となる。

したがって、本稿ではカメラを固定させるのではなく、可動カメラを用いることによって視野をより広げることを考える。そのために従来研究⁵⁾の四つの座標系を有する固定カメラ構造の視覚フィードバックシステムに対して、固定カメラの部分可動カメラに置き換えて議論する。また、可動カメラの動きを決定するために、カメラ視野偏差システムを新たに構成し、可動カメラを

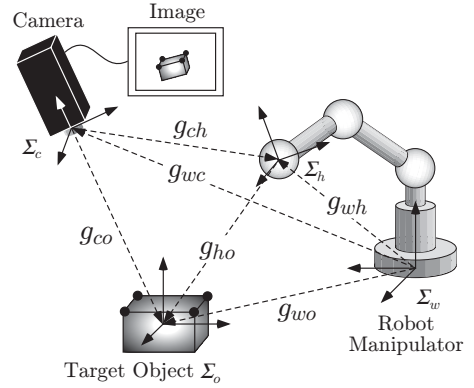


Fig. 1: 視覚フィードバックシステム

用いた視覚フィードバックシステムを構成する。さらにマニピュレータダイナミクスを考慮することで、動的視覚フィードバックシステムを構成し、閉ループ系の漸近安定性と L_2 ゲイン制御性能解析をおこなう。

2 四つの座標系をもつ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覚フィードバックシステムについて考える。Fig. 1 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} , g_{wc} , g_{wo} で表す。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} , g_{co} とし、手先座標系からみた観測対象の位置姿勢を g_{ho} と表す。視覚フィードバックシステムの制御目的は、手先座

標系からみた観測対象の相対位置姿勢 g_{ho} を目標相対位置姿勢 g_d に常に一致させておくことである。ここで、同次表現 g_{ab} や演算子 $\wedge$ (wedge) の詳しい説明については文献⁷⁾を参照していただきたい。

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

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

で表される。一方、カメラの速度を V_{wc}^b 、観測対象の速度を V_{wo}^b と定義すると、カメラ座標系からみた観測対象の相対的な位置姿勢に対する速度 V_{co}^b は、(1) 式を時間微分することで、 g_{co} の基本式として

$$V_{co}^b = -\text{Ad}_{(g_{co}^{-1})} V_{wc}^b + V_{wo}^b \quad (2)$$

と導かれる。ここで $\text{Ad}_{(g_{ab})}$ は同次表現 g_{ab} の随伴写像である⁷⁾。

2.2 推定偏差システムと制御偏差システム

本節は、従来研究⁵⁾⁸⁾である推定偏差システムと制御偏差システムについて述べる。

カメラから得られる視覚情報 f は、相対位置姿勢 g_{co} を直接得ることはできないため、その推定値 $\bar{g}_{co}$ を得るためにオブザーバを構成する。(2) 式の基本式に基づき、推定値 $\bar{g}_{co}$ の運動モデルを

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

と構成する。 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。

つぎに、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} を

$$g_{ee} := \bar{g}_{co}^{-1} g_{co} \quad (4)$$

と定義する。この推定偏差に対する推定偏差ベクトルを $e_e := [p_{ee}^T \ e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})]^T$ と定義する。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次式のように表される⁸⁾。

$$V_{ee}^b = (g_{ee}^{-1} \dot{g}_{ee})^\vee = -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} u_e + V_{wo}^b \quad (5)$$

同様に、手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢の推定値と目標相対位置姿勢の偏差 g_{ec} を

$$g_{ec} := g_d^{-1} \bar{g}_{ho} \quad (6)$$

と定義する。この手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢の推定値 $\bar{g}_{ho}$ は $g_{ch} = g_{wc}^{-1} g_{wh}$ が正確な値を得ることができると仮定するとき、

$$\bar{g}_{ho} = g_{ch}^{-1} \bar{g}_{co} \quad (7)$$

という関係式から得ることができる。制御偏差に対する制御偏差ベクトルを $e_c := [p_{ec}^T \ e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})]^T$ と定義するとき、制御偏差ベクトル e_c を状態にもつ制御偏差システムは

$$V_{ec}^b = (g_{ec}^{-1} \dot{g}_{ec})^\vee = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{wh}^b + u_e - \text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} V_d^b \quad (8)$$

として表される⁵⁾。ここで V_{wh}^b はマニピュレータの手先の速度であり、 V_d^b は手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢 g_{ho} の目標速度である。

(5) 式の制御偏差システムと (8) 式の推定偏差システムで構成される視覚フィードバックシステムは受動性を有している⁵⁾。

3 可動カメラを用いた視覚フィードバックシステム

3.1 カメラ視野偏差システム

従来研究⁵⁾と比較すると、2章の四つの座標系をもつ視覚フィードバックシステムでは、カメラを固定させずに議論してきたが、カメラ視野を広げるためのカメラの動きの決め方については議論してこなかった。したがって、本章ではカメラの動きを決めるために、カメラ座標系からみた観測対象への目標相対位置姿勢を設定し、カメラ座標系からみた観測対象への推定値との偏差をとることで、カメラ視野偏差システムを構成する。

まずはじめに、カメラの動きを決めるために、カメラ座標系からみた観測対象への相対位置姿勢の目標値を g_{cd} で表すこととする。このとき、カメラ座標系からみた観測対象への相対位置姿勢の推定値とその目標相対位置姿勢 g_{cd} との偏差 g_{ev} を

$$g_{ev} = g_{cd}^{-1} \bar{g}_{co} \quad (9)$$

と定義する。また、カメラ視野偏差に対するカメラ視野偏差ベクトルを $e_v := [p_{ev}^T \ e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ev}})]^T$ と定義する。このとき (9) 式を時間微分することで、カメラ視野偏差ベクトル e_v を状態とするカメラ視野偏差システムは

$$V_{ev}^b = (g_{ev}^{-1} \dot{g}_{ev})^\vee = u_e - \text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} V_{wc}^b - \text{Ad}_{(g_{ev}^{-1})} V_{cd}^b \quad (10)$$

と導出される。ここで V_{cd}^b はカメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢 g_{co} の目標速度である。

3.2 視覚フィードバックシステムの入出力の関係

可動カメラを用いた剛体運動の視覚フィードバックシステムを (5)(8)(10) 式より

$$\begin{bmatrix} V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \\ V_{ev}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} & I & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} & 0 \\ 0 & I & -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} \end{bmatrix} u_{cev} + \begin{bmatrix} 0 \\ V_{wo}^b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

と構成する。ただし、

$$u_{cev} := \begin{bmatrix} V_{wh}^b + \text{Ad}_{(g_d)} V_d^b \\ u_e \\ V_{wc}^b + \text{Ad}_{(g_{cd})} V_{cd}^b \end{bmatrix} \quad (12)$$

であり、システムの状態を $e := [e_c^T \ e_e^T \ e_v^T]$ 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

$$v_{cev} := N_{cev} e, \quad N_{cev} := \begin{bmatrix} -\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T & 0 & 0 \\ \text{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{ec}})} & -I & \text{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{ev}})} \\ 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{cd}^{-1})}^T \end{bmatrix} \quad (13)$$

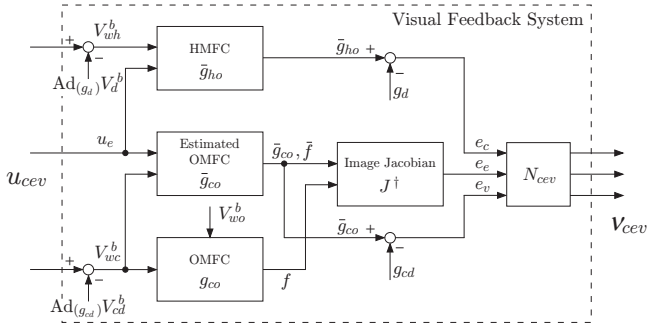


Fig. 2: 視覚フィードバックシステムのブロック図

とするとき, (11) 式の視覚フィードバックシステムの入出力間に

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

が成り立つ. ただし β_{cecv} はある非負の定数である.

証明は以下のエネルギー関数

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

を用いることで, 文献^{5) 8)}と同様に可能である. ここで $E(g) := \frac{1}{2}\|p\|^2 + \phi(e^{\hat{\theta}})$ であり, 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⁹⁾.

この補題は, (11) 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 ν_{cecv} をネガティブフィードバックしたものを入力 u_{cecv} として用いると, 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.

Fig. 2 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その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.

4 動的視覚フィードバック制御

4.1 動的視覚フィードバックシステム

本節では, 可動カメラを用いた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.

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

$q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathcal{R}^n$ はそれぞれの各関節の角度, 角速度, 角加速度を表し, $\tau \in \mathcal{R}^n$ は入力トルク, $\tau_d \in \mathcal{R}^n$ はトルク外乱, $M(q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ 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.

また, マニピュレータの手先の速度は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.

$$V_{wh}^b = J_b(q)\dot{q} \quad (17)$$

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 $\dot{q}_d$ で表すすると, (17) 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

$$\xi := \dot{q} - \dot{q}_d \quad (18)$$

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 $W_c := \text{diag}\{w_{pc}I_3, w_{rc}I_3\} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$, $W_e := \text{diag}\{w_{pe}I_3, w_{re}I_3\} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$, $W_v := \text{diag}\{w_{pv}I_3, w_{rv}I_3\} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ を定義する. ただし $w_{pc}, w_{pe}, w_{pv}, w_{rc}, w_{re}, w_{rv} \in \mathcal{R}$ 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

$$\begin{aligned} \tau = & M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q}_d + g(q) \\ & + J_b^T(q)\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T W_c e_c + u_\xi \end{aligned} \quad (19)$$

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. また, u_ξ は後に提案する新たな入力である. このとき, (11)(16)(19) 式を用いることで, 可動カメラを用いた動的視覚フィードバックシステムは

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \\ V_{ev}^b \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} -M^{-1}C\xi + M^{-1}J_b^T\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T W_c e_c \\ -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} J_b \xi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} M^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} & I & 0 \\ 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} & 0 \\ 0 & 0 & I & -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} M^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} w \end{aligned} \quad (20)$$

で表される. ただし,

$$u := \begin{bmatrix} u_\xi \\ V_{wh}^b + \text{Ad}_{(g_d)} V_d^b \\ u_e \\ V_{wc}^b + \text{Ad}_{(g_{cd})} V_{cd}^b \end{bmatrix}, \quad w := \begin{bmatrix} \tau_d \\ V_{wo}^b \end{bmatrix} \quad (21)$$

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, e_e および e_v を 0 に留めておくことで制御目的が達成される.

4.2 動的視覚フィードバックシステムの入出力間の関係

制御目的を達成するための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果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

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

とするとき、動的視覚フィードバックシステム (20) の入出力間に

$$\int_0^T u^T \nu d\tau \geq -\beta_0, \quad \forall T > 0 \quad (22)$$

が成り立つ。ただし β_0 はある非負の定数である。

補題 2 はエネルギー関数

$$V(x) = \frac{1}{2} \xi^T M \xi + E_W(g_{ec}) + E_W(g_{ee}) + E_W(g_{ev}) \quad (23)$$

を用いて、 $\dot{M} - 2C$ の歪対称性と $\hat{p}_{ec}$, $\hat{p}_{ee}$ と $\hat{p}_{ev}$ の歪対称性を利用することで証明される。ここで、 $E_W(g) := \frac{1}{2} w_p \|p\|^2 + w_r \phi(e^{\hat{\theta}})$ であり、 w_p と w_r はそれぞれの重み行列の各要素である。

この補題は、(20) 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、(11) 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。

4.3 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 (20) 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。

$$u = -K\nu = -KNx, \quad K := \begin{bmatrix} K_\xi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_v \end{bmatrix} \quad (24)$$

$K_\xi := \text{diag}\{k_{\xi 1}, \dots, k_{\xi n}\}$ は各関節に対するゲインであり、 $K_c := \text{diag}\{k_{c1}, \dots, k_{c6}\}$, $K_e := \text{diag}\{k_{e1}, \dots, k_{e6}\}$ と $K_v := \text{diag}\{k_{v1}, \dots, k_{v6}\}$ 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とカメラ視野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 (20) と (24) 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。

この定理 1 は (23) 式のエネルギー関数をリアプノフ関数候補とすることにより示される。

4.4 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、本稿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 を用いてつぎの行列を定義する。

$$P := N^T K N - \frac{1}{2\gamma^2} W - \frac{1}{2} I \quad (25)$$

ただし $W := \text{diag}\{I, 0, W_e^2, 0\}$ 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 , K_v および重み W_c , W_e , W_v を選ぶとき、(20)(24) 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。

定理 2 は (23) 式のエネルギー関数を蓄積関数とみなすことで証明される。この制御性能解析では観測対象の運動を外乱として捉えているために、 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おり、 γ を外乱抑制レベルを示す指標とみなすことができる。本稿では、 H_∞ 制御における最も基本となる外乱抑制問題を考えた。本稿で提案した手法は、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。

5 おわりに

本稿では、カメラ視野を広げるために、従来研究で提案していた固定カメラ構造の視覚フィードバックシステムに対して、可動カメラを用いて議論をおこなった。また、カメラ視野偏差システムを新たに構成し、可動カメラを用いた視覚フィードバックシステムを構成した。さらにマニピュレータダイナミクスを考慮することで、動的視覚フィードバックシステムを構成し、閉ループ系の漸近安定性と 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) 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, 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.
- 5) 村尾, 河合, 藤田, “受動性に基づく視覚フィードバック制御の固定カメラ構造への展開,” 第 4 回 制御部門大会 資料, pp. 327–330, 2004.
- 6) F. Chaumette, “Potential Problems of Stability and Convergence in Image-Based and Position-Based Visual Servoing,” In: D. J. Kriegman, G. D. Hager and A. S. Morse (Eds), *The Confluence of Vision and Control*, Springer-Verlag, pp. 66–78, 1998.
- 7) R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press, 1994.
- 8) 河合, 村尾, 藤田, “受動性に基づく動的視覚フィードバック制御の安定性と L_2 ゲイン制御性能解析,” 第 32 回 制御理論シンポジウム 資料, pp. 23–26, 2003.
- 9) F. Bullo and R. Murray, “Tracking for Fully Actuated Mechanical Systems: a Geometric Framework,” *Automatica*, Vol. 35, No. 1, pp. 17–34, 1999.