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

○村 尾 俊 幸 [*]·河 合 宏 之 [*]· 藤 田 政 之 [*]
[*]金 沢 大 学

Passivity-based Visual Feedback Control with a Fixed Camera

○ Toshiyuki Murao[*], Hiroyuki Kawai[*] and Masayuki Fujita[*]
[*]Kanazawa University

This paper considers the control and the estimation of dynamic visual feedback systems with a fixed camera. Firstly the model of the visual feedback system with four coordinate frames is constructed by using the homogeneous representation and adjoint transformation. Secondly 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化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, 安定性の大域化 [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としては文献 [4) 5) 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, リアプノフ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 [6) 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, 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.

従来研究 [7) では, Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムに対して, 受動性に基づくアプローチを発展させたロボットの動的視覚フィードバック制御について議論した. 本稿では, より一般的な視覚フィードバックシステムを考慮にいれた, 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へ展開する. 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する. そして, システムの有する性質を示したあと, 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.

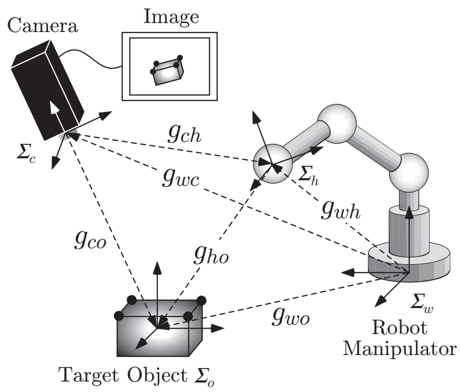

Fig. 1:視覚フィードバックシステム

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 $g_{wh}=(p_{wh},e^{\hat{\xi}\theta_{wh}})$, $g_{wc}=(p_{wc},e^{\hat{\xi}\theta_{wc}})$, $g_{wo}=(p_{wo},e^{\hat{\xi}\theta_{wo}})$ で表す. 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. ここで, 同次表現 g や 演算子 $\wedge$(wedge) の詳しい説明については文献 [8) 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

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

で表される．

一方，カメラの速度を $V_{wc}^b = [v_{wc}^T \ \omega_{wc}^T]^T \in \mathcal{R}^6$，観測対象の速度を $V_{wo}^b = [v_{wo}^T \ \omega_{wo}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ と定義する．このとき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 $V_{co}^b = [v_{co}^T \ \omega_{co}^T]^T \in \mathcal{R}^6$ は，(1) 式を時間微分することで，g_{co} の基本式として

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

と導かれる．ここで $\mathrm{Ad}_{(g)}$ は同次表現 g の随伴写像である [8]．

2.2 非線形オブザーバと推定偏差システム

カメラから得られる視覚情報は，$g_{co} = (p_{co}, e^{\hat{\xi}\theta_{co}})$ 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，相対位置姿勢の推定値 $\bar{g}_{co} = (\bar{p}_{co}, e^{\hat{\bar{\xi}}\bar{\theta}_{co}})$ を得るために，オブザーバを構成する．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

$$V_{co}^b = V_{wo}^b \tag{3}$$

となる．そこで，(3) 式の基本式に基づき，推定値 $\bar{g}_{co}$ の運動モデルを

$$\bar{V}_{co}^b = u_e \tag{4}$$

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 (3)(4) 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

$$g_{ee} := \bar{g}_{co}^{-1} g_{co} \tag{5}$$

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．

$$e_e := \begin{bmatrix} p_{ee}^T & e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}}) \end{bmatrix}^T \tag{6}$$

ただし $e_R(e^{\hat{\xi}\theta}) := \mathrm{sk}(e^{\hat{\xi}\theta})^\vee$，$\mathrm{sk}(e^{\hat{\xi}\theta}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}\theta} - e^{-\hat{\xi}\theta})$ 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と推定モデルから得られる視覚情報を用いて導出される [7]．

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，(5) 式を時間微分し，(3)(4) 式を代入することで

$$V_{ee}^b = -\mathrm{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} u_e + V_{wo}^b \tag{7}$$

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．

2.3 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

$$g_{ho} = g_{ch}^{-1} g_{co} \tag{8}$$

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

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

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，(9) 式を時間微分することで

$$\begin{aligned} \bar{V}_{ho}^b &= -\mathrm{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{ch}^b + \bar{V}_{co}^b \\ &= -\mathrm{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{wh}^b + u_e \end{aligned} \tag{10}$$

と導かれる．ただし，

$$g_{ch} = g_{wc}^{-1} g_{wh} \tag{11}$$

より導かれる $V_{ch}^b = V_{wh}^b$ の関係と (4) 式を用いている．

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 $g_d = (p_d, e^{\hat{\xi}\theta_d})$ 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} とおよび $g_{ec} = (p_{ec}, e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})$ を

$$g_{ec} := g_d^{-1} \bar{g}_{ho} \tag{12}$$

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 $e_c \in \mathcal{R}^6$ を

$$e_c := \begin{bmatrix} p_{ec}^T & e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) \end{bmatrix}^T \tag{13}$$

と定義する．

ここで，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，制御偏差ベクトル e_c を状態とした制御偏差システムを構成すると，(12) 式を時間微分し，(10) 式を代入することで

$$V_{ec}^b = -\mathrm{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{wh}^b + u_e \tag{14}$$

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

2.4 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 (7) (14) 式より

$$\begin{bmatrix} V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathrm{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} & I \\ 0 & -\mathrm{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u_{ce} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} V_{wo}^b \tag{15}$$

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

$$\nu_{ce} := \begin{bmatrix} -\mathrm{Ad}_{(g_d^{-1})}^T & 0 \\ \mathrm{Ad}_{(e^{-\hat{\xi}\theta_{ec}})} & -I \end{bmatrix} e \tag{16}$$

とするとき，(15) 式の視覚フィードバックシステムの入出力間に

$$\int_0^T u_{ce}^T \nu_{ce} d\tau \geq -\beta_{ce}, \ \ ^\forall T > 0 \tag{17}$$

が成り立つ．ただし β_{ce} はある非負の定数である．

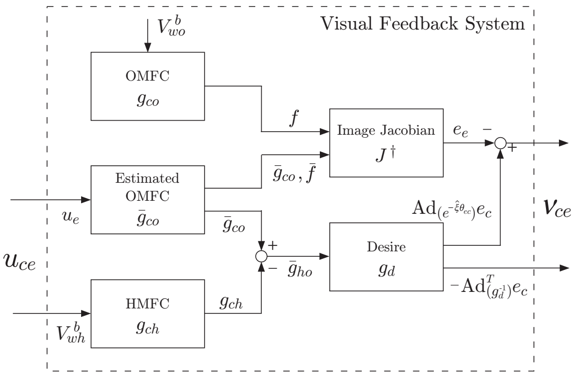

Fig. 2:視覚フィードバックシステムのブロック図

証明は以下のエネルギー関数

$$V_{ce} = \frac{1}{2}\|p_{ec}\|^2 + \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) + \frac{1}{2}\|p_{ee}\|^2 + \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}}) \tag{18}$$

を用いることで，文献 [7] と同様に可能である． ここで，関数 $\phi(e^{\hat{\xi}\theta})$ 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 [9]．

この補題は, (15) 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_{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．

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．

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + \tau_d \tag{19}$$

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

$$V^b_{wh} = J_b(q)\dot{q} \tag{20}$$

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 $\dot{q}_d$ で表すとすると, (20) 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

$$\xi := \dot{q} - \dot{q}_d \tag{21}$$

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

$$\begin{aligned} \tau = M(q)\ddot{q}_d + C(q,\dot{q})\dot{q}_d + g(q) \\ + J_b^T(q)\mathrm{Ad}^T_{(g_d^{-1})}W_c e_c + u_\xi \end{aligned} \tag{22}$$

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, (15)(19)(22) 式を用いることで動的視覚フィードバックシステムは

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ V^b_{ec} \\ V^b_{ee} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -M(q)^{-1}\left(C(q,\dot{q})\xi + J_b^T(q)\mathrm{Ad}^T_{(g_d^{-1})}W_c e_c\right) \\ -\mathrm{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})}J_b(q)\xi \\ 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} M(q)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & -\mathrm{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} & I \\ 0 & 0 & -\mathrm{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} M(q)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} w \end{aligned} \tag{23}$$

で表される．ただし, $u := [u_\xi^T\ u_d^T\ u_e^T]^T$, $w := [\tau_d^T\ (V^b_{wo})^T]^T$ 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 に留めておくことで制御目的が達成される．

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

$$\nu = Nx \tag{24}$$

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

とするとき, 動的視覚フィードバックシステム (23) の入出力間に

$$\int_0^T u^T \nu d\tau \geq -\beta_0,\ {}^\forall T > 0 \tag{25}$$

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

$$\begin{aligned} V = \frac{1}{2}\xi^T M(q)\xi + \frac{1}{2}w_{pc}\|p_{ec}\|^2 + w_{rc}\phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) \\ + \frac{1}{2}w_{pe}\|p_{ee}\|^2 + w_{re}\phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}}) \end{aligned} \tag{26}$$

を用いて, $\dot{M} - 2C$ の歪対称性と $\hat{p}_{ec}$ と $\hat{p}_{ee}$ の歪対称性を利用することで証明される．

この補題は, (23) 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

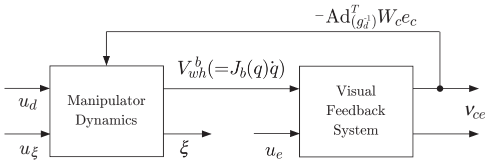

Fig. 3:動的視覚フィードバックシステムのブロック図

ドバックシステムは, (15) 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．Fig. 3 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. 2 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 (23) 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．

$$u = -K\nu = -KNx,\quad K := \begin{bmatrix} K_\xi & 0 & 0 \\ 0 & K_c & 0 \\ 0 & 0 & K_e \end{bmatrix} \tag{27}$$

$K_\xi := \mathrm{diag}\{k_{\xi 1}, \cdots, k_{\xi n}\}$ は各関節に対するゲインであり, $K_c := \mathrm{diag}\{k_{c1}, \cdots, k_{c6}\}$ と $K_e := \mathrm{diag}\{k_{e1}, \cdots, k_{e6}\}$ 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 (23) と (27) 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 (26) 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．

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．外乱抑制問題を考えるために, (23) 式の動的視覚フィードバックシステムとつぎの (28) 式を一般化プラントとして考える．

$$z = \begin{bmatrix} \varepsilon x \\ \rho u \end{bmatrix} \tag{28}$$

ただし, ε と ρ は状態と入力に対する重み行列である．

ここで, ある正の数 γ としてつぎの行列を定義する．

$$P := N^T K N - \frac{1}{2}\varepsilon^T \varepsilon - \frac{1}{2}\|\rho K\|^2 - \frac{1}{2\gamma^2} W \tag{29}$$

ただし $W := \mathrm{diag}\{I, 0, W_e^2\}$ 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 および被制御出力の重み行列 ε, ρ 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, (23)(27)(28) 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 (26) 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や入力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．

4　おわりに

本稿では, 従来研究で提案していた受動性に基づく動的視覚フィードバック制御を, 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へ展開した．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た．そして, システムの有する性質を示したあと, 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*, **12**-5, 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, **36**-8, 660/667 (2000)

3) Y. Mezouar and F. Chaumette: Optimal Camera Trajectory with Image-Based Control, *Int. Journal of Robotics Research*, **22**-10/11, 781/804 (2003)

4) R. Kelly: Robust Asymptotically Stable Visual Servoing of Planar Robots, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, **12**-5, 759/766 (1996)

5) 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*, **6**-3, 322/337 (2001)

6) R. Kelly, R. Carelli, O. Nasisi, B. Kuchen and F. Reyes: Stable Visual Servoing of Camera-in-Hand Robotic Systems, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, **5**-1, 39/48 (2000)

7) 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, 327/330 (2003)

8) R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry: *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press (1994)

9) F. Bullo and R. Murray: Tracking for Fully Actuated Mechanical Systems: a Geometric Framework, *Automatica*, **35**-1, 17/34 (1999)