適応 H_∞ 制御に基づくマニピュレータのロバスト視覚フィードバック制御*

丸山 章**・藤田 政之***

Robust Visual Feedback Control for Robotic Manipulator Based on Adaptive H_∞ Control*

Akira MARUYAMA** and Masayuki FUJITA***

This paper deals with an adaptive H_∞ -control for the Lagrangian systems with the visual feedback in presence of parametric uncertainties. Based on an adaptive manipulator control, the proposed controller consists of the visual PD feedback part and the full dynamics feedforward part with the update law of the parametric uncertainty. The L_2 -gain performance analysis of the proposed controller is carried out and its asymptotic property is examined. For the L_2 -gain performance analysis, the image feature parameter potential plays an important role as the storage function.

1. はじめに

最近, 視覚情報をフィードバックして, ロボットマニピュレータなどの機械システムを制御する視覚フィードバック制御が注目されている¹⁾. 視覚フィードバック制御の一つの目的は, CCD カメラなどにより対象を観測し, その視覚情報をもとに観測対象とマニピュレータの相対位置を制御することである. マニピュレータダイナミクスとカメラモデルはそれぞれオイラーラグランジュ運動方程式と座標変換に基づく非線形システムである. そのため視覚フィードバック制御則は系全体の安定性を保証しなくてはならない. そのうえでマニピュレータの慣性パラメータの変動や観測対象の未知な運動が外乱として作用するため, それらの不確かさに対するロバスト性も視覚フィードバック制御において重要となる.

従来の視覚フィードバック制御に関する研究では, フィードバック線形化に基づく制御手法^{2),3)}, リアプノフの定理に基づく制御法^{4),5)}や非線形 H_∞ 制御に基づく方法⁶⁾などが研究されてきた. しかしながら, いずれの研

究もマニピュレータモデルに基づいて制御則が構成されるにもかかわらず, モデルの不確かさに対するロバスト性の議論が行われていない.

一方, 線形 H_∞ 制御を拡張することで非線形 H_∞ 制御が確立した⁷⁾. そして未知パラメータを含む非線形システムに対して, Lu らが適応 H_∞ 制御を考察した⁸⁾. これら非線形 H_∞ 制御の設計では, Hamilton-Jacobi 不等式を解くことが要求される. しかし一般的にはその解を導出することが困難であるため, 実システムへの適用がすすんでいないのが現状である.

そこで本稿では適応 H_∞ 制御に基づく視覚フィードバック制御則を取り扱う. これによりマニピュレータの慣性パラメータの不確かさが存在する場合でも, さまざまな外乱入力の変減特性を議論することが可能となった. そのうえ, マニピュレータの適応制御手法⁹⁾と我々が提案している画像パラメータポテンシャル⁵⁾を利用し, 蓄積関数を直接構成した. これにより Hamilton-Jacobi 不等式を解くことなしに, L_2 ゲイン解析や内部安定性解析を行えることを示す.

本研究では2次元の平面マニピュレータに限定して議論を行う. しかし座標変換に基づくカメラモデルの非線形性や対象の未知な運動の影響, マニピュレータモデルの不確かさなど, 視覚フィードバック制御で議論の対象となる問題点は保存されており, 適応 H_∞ 制御の応用を考察することは重要である.

* 原稿受付 1998年9月10日

** (株)不二越 ロボット開発部 Nachi-Fujikoshi Corp.; Toyama 930-8511, JAPAN

*** 金沢大学 工学部 Faculty of Engineering, Kanazawa University; Ishikawa 921-8667, JAPAN

Key Words: visual feedback control, adaptive H_∞ control, image feature parameter potential, dissipation theory.

以下, 2. で視覚フィードバックシステムのモデリングと問題を定式化する. そしてパラメトリックな不確かさが存在する視覚フィードバックシステムが有界な L_2 ゲインを有するための制御ゲイン条件を導出する. 4. では内部安定性を確認するために提案する制御則の漸近的性質を考察する. 5. ではシミュレーション結果を示し, 最後にまとめを行う.

2. モデリングと問題設定

2.1 カメラとマニピュレータのモデル

本稿では, Fig. 1 のような平面上を動作する 2 自由度マニピュレータを考える. カメラはマニピュレータの手先に固定されて, 対象を観測する. これは eye-in-hand 構造とよばれる視覚フィードバックシステムでは標準的な構造である. また基準座標系として $\Sigma_w = \{X_w, Y_w, Z_w\}$ を, カメラ座標系として $\Sigma_c = \{X_c, Y_c, Z_c\}$ を考え, Fig. 1 のように配置する. 観測対象は, 点として基準座標系において $[x_p, y_p, z_p]^T$ の座標にある.

このような構成のもとではカメラの幾何モデルは, scaled orthographic projection¹⁾を利用して与えられる.

$$f(p, c(q), \theta_c(q)) = se^{-\hat{\theta}_c(q)}(b - c(q)) \quad (1)$$

ここで, $q \in \mathcal{R}^2$ はマニピュレータの関節角度, $c(q) \in \mathcal{R}^2$ と $\theta_c(q) \in \mathcal{R}$ は基準座標系 Σ_w におけるカメラ座標系 Σ_c の X_w - Y_w の位置と Z_w 軸回りの姿勢である. これらはマニピュレータの順運動学により与えられるので関節角度 q の関数となっている. また任意のスカラー a に対して,

$$\hat{a} := \begin{bmatrix} 0 & -a \\ a & 0 \end{bmatrix} \in se(2)$$

と定義する. その指数行列 $e^{\hat{a}}$ は回転行列群 $SO(2)$ の元であることが知られている¹⁰⁾. $b := [x_p, y_p]^T$ として対象の位置をあらわす. スケーリングファクタ s は奥行き z_p やカメラの焦点距離からなる定数で, 一般性を失わない仮定として $s > 0$ とする. (1) 式の両辺を微分することで,

$$\dot{f} = -se^{-\hat{\theta}_c} J_p(q) \dot{q} - \hat{\theta}_c f + se^{-\hat{\theta}_c} \dot{b} \quad (2)$$

をえる. ここで, $\dot{b}$ は対象の未知の速度ベクトル, $J_p(q)$ はマニピュレータのヤコビアンで $\dot{c} = J_p(q) \dot{q}$ である.

マニピュレータダイナミクスモデルはオイラー-ラグランジュの運動方程式を利用して導出する. オイラー-ラグランジュの運動方程式はつぎのような行列表現で与えられることはよく知られた事実である¹⁰⁾.

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \tau + w \quad (3)$$

Fig. 1 Visual feedback system

ここで, τ は入力トルクベクトル, w は外乱トルクベクトル, $M(q)$ は慣性行列, $C(q, \dot{q}) \dot{q}$ はコリオリ・遠心力ベクトルそして $g(q)$ は重力項である. このモデルの性質として慣性行列 $M(q)$ は任意の q に対して正定となり, $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ は任意の q と $\dot{q}$ に対して歪み対称行列となる. ダイナミクスの方程式 (3) は慣性パラメータに対して線形性を有しており⁹⁾,

$$M(q)a + C(q, \dot{q})v + g(q) = Y(q, \dot{q}, v, a)\rho \quad (4)$$

のように慣性パラメータベクトル ρ とリグレッサ行列 $Y(q, \dot{q}, v, a)$ を用いて記述できる. ここで a, v は関節角度 q と同じ次元のベクトルとする.

慣性パラメータ ρ は, リンクの質量, 慣性モーメント, 質量中心位置, リンク長からなる. このうちリンク長以外は, たとえば手先効果器で物体を把持するなどの作業状況で変化するため, 事前にしりえない場合が多い. また慣性モーメントや質量中心位置の物理定数は, 精密な測定を試みたとしても正確には決定できない場合がある.

そこで本稿ではマニピュレータにおける慣性パラメータの不確かさをパラメータベクトルを用いて, $\tilde{\rho} := \rho - \rho_0$ と記述する. ここで $\tilde{\rho}$ がパラメトリックな不確かさ, ρ_0 が公称パラメータ, ρ が実際の慣性パラメータをあらわすベクトルである. しかしリンク長などの運動学的パラメータは, 作業状況で変化することも少なく, 物理定数の同定も容易である場合が多い. よって運動学的パラメータにより決定されるヤコビアン J_p や回転角度 θ_c の不確かさは本稿では考慮していない.

2.2 視覚フィードバック制御問題の設定

本研究で取り扱う視覚フィードバック制御の目的は、カメラの位置 c と対象の位置 b が一致するように、カメラ情報 f を利用してマニピュレータの入力トルク τ を計算することである。カメラモデル (1) において、スケーリング要素 s が正の値、行列 $e^{\hat{\theta}_c}$ が正則であることから、カメラの位置 c と対象の位置 b が一致することと $f=0$ となることは等価である。つまり $f=0$ を達成する制御入力を構成することが視覚フィードバック制御の目的となる。

この目的達成のためにつぎのような仮定をおく。

(仮定 1) 任意の対象の位置 b に対して、 $f=0$ を達成するマニピュレータの姿勢 q_0 は存在する。

(仮定 2) ヤコビアン J_p はフルランクとする。

仮定 1 は視覚フィードバック制御問題が可解である必要条件である。また仮定 2 は制御ゲインの決定の際に必要な条件である。なお非冗長なマニピュレータは特異姿勢にない限り仮定 2 を満足することはあきらかである。

我々は参考文献 6) において公称モデルに対しての視覚フィードバック制御則を導出した。

$$\tau = u + Y(q, \dot{q}, \lambda \eta, \lambda \dot{\eta}) \rho_0 \quad (5)$$

ここで $\eta := J_p^T(q) e^{\hat{\theta}_c} f$, λ は正のスカラー値、そして u は視覚フィードバックの目標を達成するための制御入力とする。この制御則 (5) をマニピュレータダイナミクス (3) に代入することにより、つぎの閉ループ系をえる。

$$\begin{aligned} M(q) \dot{\xi} &= -C(q, \dot{q}) \xi + u + w - Y(q, \dot{q}, \lambda \eta, \lambda \dot{\eta}) \bar{\rho} \\ \dot{f} &= -s e^{-\hat{\theta}_c} J_p(q) \dot{q} - \hat{\theta}_c f + s e^{-\hat{\theta}_c} \dot{b} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで $\xi := \dot{q} - \lambda \eta$ とする。

本研究では、制御対象モデルのパラメトリックな不確かさ $\bar{\rho}$ および外乱入力の影響を低減することが制御目的である。ここでマニピュレータのトルク外乱 w とターゲットの未知な速度 $\dot{b}$ を外乱入力とみなし $r := [w^T \dot{b}^T]^T$ と記述する。その影響は、外乱 r からつぎの被制御出力

$$z = [\xi^T f^T]^T \quad (7)$$

への L_2 ゲインにより評価する。

以上をまとめて本研究で取り扱う視覚フィードバック制御問題を記述するとつぎのように与えられる。

視覚フィードバックによる外乱抑制問題: 二つの定数 $\varepsilon > 0$ と $\gamma > 0$ が与えられている。このとき閉ループ系 (6) が外乱 $r=0$ のとき $t \rightarrow \infty$ で $f \rightarrow 0$ および $\dot{q} \rightarrow 0$ を達成して、かつ任意の時刻 $T \in [0, \infty)$ と外乱 $r \in L_2$ としてパラメトリックな不確かさ $\bar{\rho}$ に対して、つぎの不等式

$$\int_0^T \|z\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|r\|^2 dt + \varepsilon \quad (8)$$

を満足するように制御入力 u を決定せよ。ここで初期状態として $[f^T(0) \dot{q}^T(0)]^T = 0$ とする。

ここで ε に関する項は、不確かさ $\bar{\rho}$ とその推定値の初期値との誤差により生じるものである。(8) 式のような L_2 ゲイン制御性能は非線形 H_∞ 評価基準であり、それが満足されるためには閉ループ系 (6) が供給率

$$\frac{1}{2}(\gamma^2 \|r\|^2 - \|z\|^2)$$

に対して消散性を満足していなくてはならない⁷⁾。正定関数 W が任意の $\bar{\rho}$ に対して、つぎの微分消散不等式

$$\dot{W} \leq \frac{1}{2}(\gamma^2 \|r\|^2 - \|z\|^2) \quad (9)$$

を満足することが、システムが消散性を有することの十分条件である。正定関数 W は蓄積関数と呼ばれる。以下ではこの蓄積関数の構成を議論する。

2.3 公称モデルの視覚フィードバック制御

ここでは、パラメトリックな不確かさが存在しない、すなわち $\bar{\rho}=0$ の場合について考察する。この公称値制御は筆者らにより考察され、つぎのような結果がえられている⁶⁾。

結果 1 パラメトリックな不確かさは存在しない、つまり $\bar{\rho}=0$ とする。視覚フィードバック制御則として

$$u = -K_1 \xi + k_2 \eta \quad (10)$$

を与える。ここでゲイン $K_1 > 0$ と $k_2 > 0$, $\lambda > 0$ はつぎの不等式を満足するように選ばれる。

$$\begin{aligned} & -\xi^T K_1 \xi - k_2 \lambda f^T e^{-\hat{\theta}_c} J_p J_p^T e^{\hat{\theta}_c} f \\ & + \frac{1}{2} \xi^T \xi + \frac{1}{2} f^T f + \frac{1}{2\gamma^2} \xi^T \xi + \frac{k_2^2}{2\gamma^2} f^T f \leq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

ならば、(6) 式、(10) 式と (7) 式からなる視覚フィードバック閉ループシステムは H_∞ 評価基準 (8) を満足する。

参考文献 6) における研究では、正定関数

$$V = \frac{1}{2} \xi^T M(q) \xi + \frac{k_2}{2s} \|f(q)\|^2 \quad (12)$$

が蓄積関数であることの十分条件がゲイン条件 (11) であることを示している。ここで $\|\cdot\|$ はユークリッドノルムをあらわす。なお蓄積関数 (12) はマニピュレータの運動エネルギーと画像情報の出力のポテンシャル関数の和からなる一種の総エネルギー関数であることに注意してもらいたい。

3. 適応 H_∞ 制御に基づく視覚フィードバックシステム

本節では、パラメトリックな不確かさが存在する場合、つまり $\bar{p} \neq 0$ となる場合について考察する。不確かさ $\bar{p}$ が既知である場合には、公称値制御と等価となるので関数 V は微分消散不等式の解であることはあきらかである。しかし不確かさが既知であることはまれであり、蓄積関数も不確かさの影響を考慮して構成しなくてはならない。

そこでパラメトリックな不確かさに対処する方法として適応 H_∞ 制御手法⁸⁾を利用することを試みる。マニピュレータの関節空間での制御において、本稿で考慮しているようなパラメトリックな不確かさを推定して系全体の安定性を保証する手法として適応制御が研究されてきた⁹⁾。これに基づいて本稿では、視覚フィードバック制御則 u として

$$\dot{p} = -\Gamma^{-1}Y^T(q, \dot{q}, \lambda\eta, \lambda\dot{\eta})\xi \quad (13)$$

$$u = Y(q, \dot{q}, \lambda\eta, \lambda\dot{\eta})p - K_1\xi + k_2\eta \quad (14)$$

を考える。ここで p はパラメトリックな不確かさの推定ベクトルであり、微分方程式 (13) は初期状態 $p(0)$ であるパラメータ更新則である。また Γ は適当な大きさの正定行列とし、 $p(0)$ はパラメトリックな不確かさの初期推定量とする。制御則 (13) と (14) を (6) 式へ代入し変形すると、以下の閉ループシステムがえられる。

$$\begin{aligned} M(q)\dot{\xi} &= -C(q, \dot{q})\xi + u + w + Y(q, \dot{q}, \lambda\eta, \lambda\dot{\eta})(p - \bar{p}) \\ \dot{f} &= -se^{-\hat{\theta}_c} J_p(q)\dot{q} - \hat{\theta}_c f + se^{-\hat{\theta}_c} \dot{b} \\ \dot{p} &= -\Gamma^{-1}Y^T(q, \dot{q}, \lambda\eta, \lambda\dot{\eta})\xi \end{aligned} \quad (15)$$

この閉ループ系に対する蓄積関数候補として、公称制御で利用した蓄積関数に推定値 p に関する二次項を付加したつぎの正定関数を考える。

$$W = V + \frac{1}{2}(p - \bar{p})^T \Gamma (p - \bar{p}) \quad (16)$$

この正定関数 W を時間に関して微分すると、

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \xi^T (-C\xi - K_1\xi + k_2\eta - w + Y(p - \bar{p})) \\ &\quad + \frac{k_2}{s} f^T (-se^{-\hat{\theta}_c} J_p \dot{q} - \hat{\theta}_c f + se^{-\hat{\theta}_c} \dot{b}) \\ &\quad + \frac{1}{2} \xi^T \dot{M} \xi - (p - \bar{p})^T \Gamma (\Gamma^{-1} Y^T \xi), \\ &= \frac{1}{2} \xi^T (\dot{M} - 2C) \xi - \frac{k_2}{s} f^T \hat{\theta}_c f \\ &\quad - \xi^T K_1 \xi - k_2 \lambda \eta^T \eta - \xi^T w + k_2 f^T e^{-\hat{\theta}_c} \dot{b} \end{aligned}$$

をえる。ここでマニピュレータの性質である行列 $\dot{M} - 2C$ の歪み対称性とカメラモデルの性質である $\hat{\theta}_c$ の歪み対

称性を利用すると、右辺第1項および第2項が0になり、

$$\dot{W} = -\xi^T K_1 \xi - k_2 \lambda \eta^T \eta - \xi^T w + k_2 f^T e^{-\hat{\theta}_c} \dot{b},$$

となる。この式に対して平方完成を適用すると、

$$\begin{aligned} \dot{W} + \frac{1}{2} \|z\|^2 - \frac{\gamma^2}{2} \|r\|^2 &= -\frac{\gamma^2}{2} \left\| r - \frac{1}{\gamma^2} \begin{bmatrix} -\xi \\ k_2 f \end{bmatrix} \right\|^2 \\ &\quad - \xi^T K_1 \xi - k_2 \lambda f^T e^{-\hat{\theta}_c} J_p J_p^T e^{\hat{\theta}_c} f \\ &\quad + \frac{1}{2} \xi^T \xi + \frac{1}{2} f^T f + \frac{1}{2\gamma^2} \xi^T \xi + \frac{k_2^2}{2\gamma^2} f^T f \end{aligned}$$

をえる。このとき最悪外乱として $r = \frac{1}{\gamma^2} [-\xi^T \ k_2 f^T]^T$ を考えている。よつてもしつぎの不等式

$$\begin{aligned} &-\xi^T K_1 \xi - k_2 \lambda f^T e^{-\hat{\theta}_c} J_p J_p^T e^{\hat{\theta}_c} f \\ &+ \frac{1}{2} \xi^T \xi + \frac{1}{2} f^T f + \frac{1}{2\gamma^2} \xi^T \xi + \frac{k_2^2}{2\gamma^2} f^T f \leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

が成立するならば、パラメトリックな不確かさ $\bar{p}$ に無関係に正定関数 W は不等式 (9) を満足する。以上をまとめると本研究での主結果がつぎの定理で与えられる。

【定理1】 正の数 ε と適応視覚フィードバック制御則 (13) および (14) を考える。ゲイン $K_1, k_2 > 0, \lambda$ そして $\Gamma > 0$ を不等式 (17) と

$$(p(0) - \bar{p})^T \Gamma (p(0) - \bar{p}) \leq \varepsilon \quad (18)$$

が成立するように選択するならば、閉ループシステム (15) は制御目標 (8) を満足する。

(証明) 不等式 (17) より、

$$\dot{W} \leq -\frac{1}{2} (\|z\|^2 - \gamma^2 \|r\|^2) \quad (19)$$

がえられる。この式の両辺を 0 から T まで積分し、 $W(T) \geq 0, q(0) = q_0$ および $\dot{q}(0) = 0$ であることに注意すると、

$$\int_0^T \|z\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|r\|^2 dt + (p(0) - \bar{p})^T \Gamma (p(0) - \bar{p})$$

が成立する。ゲインの条件 (18) を利用するとすべての時刻 $T \geq 0$ に対してつぎの制御目標 (8) が成立する。

$$\int_0^T \|z\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|r\|^2 dt + \varepsilon \quad (20)$$

□

任意の $[\xi^T \ f^T]^T$ に対して不等式条件 (17) が成立しているかを確認するために、不等式 (17) をつぎの二次形式で表現する。

$$-\begin{bmatrix} \xi^T & f^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & 0 \\ 0 & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ f \end{bmatrix} \leq 0 \quad (21)$$

ここで

$$P_{11} := K_1 - \frac{1}{2}I - \frac{1}{2\gamma^2}I$$

$$P_{22} := k_2 \lambda e^{-\hat{\theta}_c} J_p J_p^T e^{\hat{\theta}_c} - \frac{1}{2}I - \frac{k_2^2}{2\gamma^2}I$$

である。つまり条件 (17) が成立する必要十分条件は任意の q に対して行列 P_{11}, P_{22} が準正定となることである。行列 $e^{\hat{\theta}_c}$ が正則であるからつぎの判定条件が導ける。

【系 1】 $k_2 > 0$ の場合、ゲイン条件 (17) が成立する必要十分条件は任意の関節角度 q に関して

$$K_1 - \frac{1}{2}I - \frac{1}{2\gamma^2}I \geq 0 \quad (22)$$

$$k_2 \lambda J_p(q) J_p^T(q) - \frac{1}{2}I - \frac{k_2^2}{2\gamma^2}I \geq 0 \quad (23)$$

が成立することである。

4. 適応 H_∞ 視覚フィードバック制御則の漸近的性質

ここでは提案する制御則の内部安定性を取り扱う。以下では外乱入力が存在しない、つまり $r=0$ の場合の漸近的性質を考察する。提案する制御則 (13), (14) を適用したときの $t \rightarrow \infty$ で $f \rightarrow 0$ および $\dot{q} \rightarrow 0$ と推定パラメータ p の収束性をつぎの定理が示している。

【定理 2】 閉ループシステム (15) を考える。もし外乱入力が $r=0$ であり、制御ゲインが不等式 (23) と $k_2 > 0$ を満足するならば、閉ループ系 (15) はリアプノフ安定である。加えて、 $t \rightarrow \infty$ で $f \rightarrow 0$ かつ $\dot{q} \rightarrow 0$ を達成する。なおそのうえ、パラメータ更新則は、 $t \rightarrow \infty$ で $\dot{p} \rightarrow 0$ となる。

(証明) 外乱入力が 0 ならば、閉ループ系 (15) は $[f^T \ \dot{q}^T]^T = 0$ が平衡点となる。またあきらかに蓄積関数 W は正定関数となる。よって W をリアプノフ関数の候補として考え、その時間微分を閉ループ系の軌道に沿って実行すると、

$$\dot{W} = -z^T K z \quad (24)$$

となる。ここで $K := \text{diag}(K_1, k_2 \lambda e^{-\hat{\theta}_c} J_p J_p^T e^{\hat{\theta}_c})$ である。条件 (23) が成立するならば、

$$K_1 \geq \frac{1}{2}I + \frac{1}{2\gamma^2}I > 0$$

$$k_2 \lambda J_p J_p^T \geq \frac{1}{2}I + \frac{k_2^2}{2\gamma^2}I > 0$$

となり、 K_1 と $k_2 \lambda J_p J_p^T$ の正定性が成立する。よって、 $K > 0$ であるので、閉ループ系 (15) はリアプノフ安定である。

またあきらかに $\dot{W} = 0$ となる必要十分条件は $z = 0$ である。 $z = 0$ の必要十分条件は $[f^T \ \dot{q}^T] = 0$ である。よって $t \rightarrow \infty$ で $f \rightarrow 0$ かつ $\dot{q} \rightarrow 0$ となる。加えて、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \xi = \lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{q} - \lambda \eta) = 0$$

よりパラメータ更新則は $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{p} = 0$ となる。□

(注意 1) 本研究で提案した視覚フィードバック制御則 (13), (14) は、その条件 (17) や (23) も含めて、カメラの焦点距離 l や対象との奥行き量 z_p とまったく無関係に構成されている。これは、カメラの焦点距離の高精度のキャリブレーションや正確な奥行き量を測定する必要がないことを意味している。カメラの内部パラメータと独立に設計および解析が行えた理由として、蓄積関数の構成で (12) 式の第 2 項のような画像パラメータポテンシャル関数を構成したこととカメラモデルのもつ $\hat{\theta}$ の歪み対称性を解析に利用したためであることに注意して欲しい。

5. 設計例

ここでは提案する適応 H_∞ 視覚フィードバック制御の特性を確認するために、CCD カメラを取り付けた SICE 標準マニピュレータ¹¹⁾への適用を想定したシミュレーション結果を示す。

SICE 標準マニピュレータはつぎのようなリグレッサを有している。

$$Y(q, \dot{q}, v, a) = \begin{bmatrix} a_1 & a_1 + a_2 & Y_{13}(q, \dot{q}, v, a) \\ 0 & a_1 + a_2 & Y_{23}(q, \dot{q}, v, a) \\ \cos q_1 & \cos q_1 & \cos(q_1 + q_2) \\ 0 & 0 & \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

ここで $v = [v_1 \ v_2]^T \in \mathcal{R}^2$, $a = [a_1 \ a_2]^T \in \mathcal{R}^2$ そして

$$\begin{aligned} Y_{13}(q, \dot{q}, v, a) &= (2a_1 + a_2) \cos q_2 \\ &\quad - (\dot{q}_2 v_1 + \dot{q}_1 v_2 + \dot{q}_2 v_2) \sin q_2 \\ Y_{23}(q, \dot{q}, v, a) &= a_1 \cos q_2 + \dot{q}_1 v_1 \sin q_2 \end{aligned}$$

である。つぎに公称パラメータベクトル ρ_0 と実パラメータベクトルはそれぞれ

$$\begin{aligned} \rho_0 &= [0.25 \ 0.028 \ 0.033 \ 7.6 \ 4.1 \ 1.6]^T \\ \rho &= [0.85 \ 0.20 \ 0.27 \ 7.57 \ 34.0 \ 13.4]^T \end{aligned}$$

とあたえた。もちろん制御アルゴリズムで利用できるパラメータは公称ベクトル ρ_0 のみである。CCD カメラはスケーリングファクタ $s = 1200$ 、画素長は $0.05[\text{pixel}/\text{m}]$ であり、 $120[\text{Hz}]$ で対象点の重心位置 f とその時間微分 $\dot{f}$ を計算できる画像処理装置で CCD カメラからの情報は処理されるとする。

観測対象は半径 $4.00 \times 10^{-2}[\text{m}]$ 、角速度 $0.4\pi[\text{rad}/\text{s}]$ の等速円運動を行っている。閉ループ系の初期状態は $[\xi^T(0) \ f^T(0)] = 0$ と仮定し、トルク外乱としては区間 $[-0.3, 0.3][\text{Nm}]$ で一様分布する疑似乱数を利用した。な

お、シミュレーションは有限の時間区間 $[0, 10][s]$ で行う。その有限区間における対象の運動速度とトルク外乱の2乗積分値は有界である。

L_2 ゲイン評価基準 (8) を $\gamma = 1.0$ に関して達成するためにつぎのように制御ゲインを決定した。

$$K_1 = \text{diag}(2.0, 2.0), \quad k_2 = 1.0, \quad \lambda = 100.0, \\ \Gamma = \text{diag}(2.0, 2.0, 2.0, 0.05, 0.05, 0.05)$$

なお本稿でのシミュレーションはすべて MATLAB と SIMULINK を利用して行った。

適応 H_∞ 視覚フィードバック制御則の場合の画像面上の点像 f の軌跡を Fig. 2 に示す。上は画像面の x 方向を、下の図は y 方向の座標をそれぞれ示している。慣性パラメータの不確かさ、観測対象の未知運動およびトルク外乱などのさまざまな不確かさがあるにもかかわらず、画像面上の座標 f が 0 に近い値をとっていることが確認できる。Fig. 3 には比較のために従来の公称値制御則 (10) の場合の結果を示している。制御ゲインは Γ 以外

Fig. 2 Simulation results (Proposed controller)

Fig. 3 Simulation results (Nominal controller)

は同じもの利用した。慣性パラメータの不確かさの影響と思われる定常偏差があらわれているほか、とくに x 方向では対象の運動の影響である $0.2[Hz]$ の振動が顕著となっている。これは外乱減衰特性も劣化していると思われる。

6. おわりに

本研究では非線形システムに対する適応 H_∞ 制御手法を利用して、慣性パラメータの不確かさや対象の未知運動が存在する視覚フィードバックシステムの制御法について考察した。従来我々が提案してきた画像パラメータポテンシャルを利用した蓄積関数をマニピュレータの適応制御のリアプノフ関数に基づいて拡張し、新たな蓄積関数を構成することで Hamilton-Jacobi 不等式を解くことなく、 L_2 ゲイン解析を行えた。そしてシミュレーションにより本手法の有効性を確認した。

参考文献

- 1) S. Hutchinson, G. Hager and P. Corke: A tutorial on visual servo control; *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5, pp. 651-670 (1996)
- 2) B. Espiau, F. Chaumette and P. Rives: A new approach to visual servoing in robotics; *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 8, pp. 313-326 (1992)
- 3) K. Hashimoto and H. Kimura: LQ optimal and nonlinear approaches to visual servoing; *Visual Servoing*, K. Hashimoto ed., pp. 165-198, World Scientific (1993)
- 4) R. Kelly: Robust asymptotically stable visual servoing of planar robots; *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5, pp. 759-766 (1996)
- 5) A. Maruyama and M. Fujita: Robust control for planar manipulators with image feature parameter potential; *Advanced Robotics*, Vol. 12, No. 1, pp. 67-80 (1998)
- 6) 丸山, 藤田: ロバスト視覚サーボシステムの L_2 ゲインによる制御性能解析; 電学論 C, Vol. 113-C, No. 3, pp. 301-309 (1998)
- 7) A. van der Schaft: *L_2 -Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, 218, Springer-Verlag (1996)
- 8) W. Lu and A. Packard: Adaptive H_∞ -control for nonlinear systems; *Proc. ACC Albuquerque, NM*, pp. 1208-1212 (1997)
- 9) R. Ortega and M. Spong: Adaptive motion control of rigid robots: a tutorial; *Automatica*, Vol. 25, No. 6, pp. 877-888 (1989)
- 10) R. Murray, Z. Li and S. Sastry: *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press (1994)
- 11) 小林ほか: ロボット制御の実際, コロナ社 (1997)