構造やパラメータに関する知識を用いないビジュアルサーボ系の構成

○細田　耕　　浅田　稔
大阪大学 工学部

Versatile Visual Servoing without Knowledge of True Jacobian

○Koh HOSODA　　Minoru ASADA
Osaka University

1　はじめに

ロボットシステムを取り巻く環境が未知，あるいは動的である場合や，システムのパラメータが十分に同定されていない場合には，環境の変動やシステムの状態を観測するために視覚の果たす役割は大きい．このため，視覚を持つロボットシステムに対する研究は，柔軟なシステムの構成にとって非常に重要となる．近年では，視覚を持つロボットシステムに対して，視覚をフィードバックループの中にとり入れたビジュアルサーボに関する研究がなされている[1)]．特にシステムに対する目標値を画像平面上で与え，視覚により観測される画像特徴量をこの目標値に対してフィードバックする方法に対して，様々な研究が進められている[2–7)]．

従来のビジュアルサーボ系に関する報告では，アームやカメラの構造とそれらのパラメータは既知であるか，またはオフラインで同定されている必要があった (例えば [8] など)．オフラインでの同定により得られたパラメータを用いてサーボ系を構成すると，パラメータ変動や同定誤差に弱いシステムになる．このような欠点を補うために，パラメータのオンライン同定に関するいくつかの報告が発表されている[6,7)]．Weiss ら[6)] は視覚ロボットシステムが線形で１入力１出力系とみなせるものとして，各入出力毎に独立なモデル規範型適応制御を適用している．Papanikolopoulos ら[7)] は，カメラの速度と画像上の特徴量の速度を関係付ける画像ヤコビ行列が時不変であるものとして，これを最小２乗法をもとに同定している．しかしながらこれらの方法では，システムの構造に，１入力１出力系でなければならない，カメラと対象の間の距離は一定でなければならないなどの制約があり，しかもその構造は既知でなければならない．

本報告では，画像上の特徴量とシステムの関節変数の間の関係を記述するヤコビ行列のオンライン推定法と，これを用いたビジュアルサーボ系の構成を考える．この方法は

1. 入出力数の限定，対象とカメラの距離が一定などのシステムに対する制約はなく，システムの構造とは無関係に構成できる．このためカメラの台数などに制限がない．

2. 提案するヤコビ行列の推定法は，システムの状態を観測することができれば，ロボット，カメラの構造やパラメータに関する先見的知識を必要としない．特に面倒なカメラキャリブレーションを一切必要としない．

3. 提案するヤコビ行列の推定法は，必ずしもシステムの真のヤコビ行列を推定するものではないが，制御則と併せて画像特徴量の目標軌道への収束を保証する．

といった特徴を持つ．以下，まず推定されるヤコビ行列の満たすべき関係式を導き，この式を基にヤコビ行列の推定法を導く．またこれとは独立に，時間重みを持つ最小２乗法を基にヤコビ行列の推定法を導き，これらを統合したものを新しいヤコビ行列の推定法として提案する．そしてこの推定法を用い，フィードフォワード項を持つビジュアルサーボ系を構成する．このサーボ系を適用することにより，画像上の特徴量が与えられた時変の目標軌道に漸近的に収束することが，リアプノフの安定定理を用いて証明される．最後にシミュレーションにより，本方式の有効性を検証する．

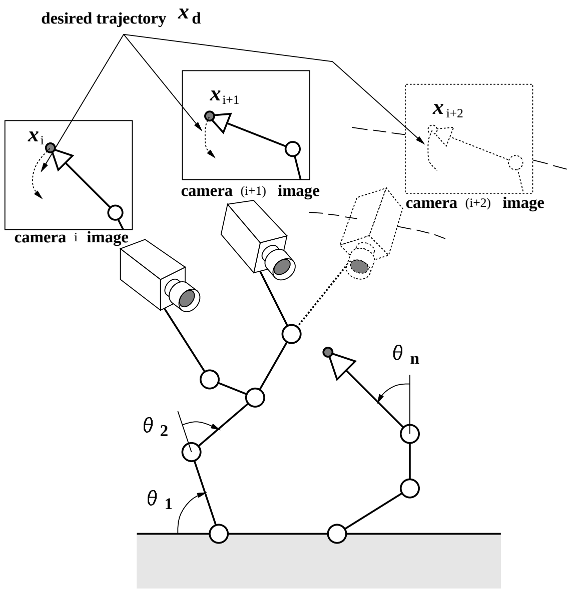

Fig.1 Robot system equipped with visual sensors

2 画像特徴量と関節変位間の関係の推定法

2.1 画像特徴量速度と関節速度間のヤコビ行列

本報告で対象とするロボットシステムは，1台，あるいは複数台のカメラを持ち，アームの手先，あるいは基準座標系に固定された対象を，画像上での目標値に収束させるものである (**Fig.1**)．画像特徴量速度と関節速度の間のヤコビ行列をオンラインで推定するには，3 次元空間内での特徴点とカメラの相対位置を記述する関節変位がすべて観測される必要があり，例えば対象が未知の速度で運動している場合には適用できない．このような関節変位ベクトルを $\boldsymbol{\theta} \in \Re^n$ とし，対象の画像上での特徴量を $\boldsymbol{x} \in \Re^m$ とすると，

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}(\boldsymbol{\theta}) \tag{1}$$

と書くことができる．式 (1) を微分することにより，速度間の関係式

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \tag{2}$$

を得る．ここで $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta}) = \partial \boldsymbol{x}/\partial \boldsymbol{\theta}^T \in \Re^{m\times n}$ は画像特徴量速度と関節速度の間の関係を記述するヤコビ行列である．このヤコビ行列は，カメラの構造や，焦点距離，アスペクト比，歪み係数などのカメラパラメータ，アームの構造や，カメラアーム間の変換行列，アームのリンクパラメータなどを含んでいる．

2.2 疑似逆行列を用いたヤコビ行列の推定法

ここで提案するヤコビ行列の推定法は，推定ヤコビ行列 $\widehat{\boldsymbol{J}}(t)$ の各要素の真の値への収束を保証するものではなく，観測された $\dot{\boldsymbol{x}}$，$\dot{\boldsymbol{\theta}}$ に対して

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \widehat{\boldsymbol{J}}(t)\dot{\boldsymbol{\theta}} \tag{3}$$

を満たすように $\widehat{\boldsymbol{J}}(t)$ を推定するものである．式 (3) を微分することにより，

$$\dot{\widehat{\boldsymbol{J}}}\dot{\boldsymbol{\theta}} = \ddot{\boldsymbol{x}} - \widehat{\boldsymbol{J}}\ddot{\boldsymbol{\theta}} \tag{4}$$

を得る．式 (4) を満たすヤコビ行列の微分 $\dot{\widehat{\boldsymbol{J}}}(t)$ は唯一に決まらないので，重み行列 $\boldsymbol{W}(t)$ で重み付けされた疑似逆行列を両辺にかけることによって，一つの解

$$\begin{aligned} \dot{\widehat{\boldsymbol{J}}} &= \frac{(\ddot{\boldsymbol{x}} - \widehat{\boldsymbol{J}}\ddot{\boldsymbol{\theta}})\dot{\boldsymbol{\theta}}^T \boldsymbol{W}(t)}{\dot{\boldsymbol{\theta}}^T \boldsymbol{W}(t)\dot{\boldsymbol{\theta}}}, \quad (\| \dot{\boldsymbol{\theta}} \| \neq 0) \\ \dot{\widehat{\boldsymbol{J}}} &= \boldsymbol{O}, \qquad\qquad\qquad\qquad (\| \dot{\boldsymbol{\theta}} \| = 0) \end{aligned} \tag{5}$$

を選ぶものとする．

式 (5) を形式的にサンプリング時間 Δt で離散化することにより，推定則

$$\widehat{\boldsymbol{J}}(t) - \widehat{\boldsymbol{J}}(t-\Delta t) = \frac{\{\Delta\boldsymbol{x}(t) - \widehat{\boldsymbol{J}}(t-\Delta t)\Delta\boldsymbol{\theta}(t)\}\Delta\boldsymbol{\theta}(t)^T \boldsymbol{W}(t)}{\Delta\boldsymbol{\theta}(t)^T \boldsymbol{W}(t)\Delta\boldsymbol{\theta}(t)} \tag{6}$$

を得る．ここで $\Delta\boldsymbol{\theta}(t) = \boldsymbol{\theta}(t) - \boldsymbol{\theta}(t-\Delta t)$，$\Delta\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{x}(t-\Delta t)$ とする．

2.3 最小2乗法をもとにしたヤコビ行列の推定法

一方，時間的に緩やかに変動するシステムの同定には，時間重みのついた最小2乗法による推定を用いることが考えられる．時間重みのついたヤコビ行列の推定は

$$\widehat{\boldsymbol{J}}(t) - \widehat{\boldsymbol{J}}(t-\Delta t) = \frac{\{\Delta\boldsymbol{x}(t) - \widehat{\boldsymbol{J}}(t-\Delta t)\Delta\boldsymbol{\theta}(t)\}\Delta\boldsymbol{\theta}(t)^T \boldsymbol{P}(t-\Delta t)}{\rho + \Delta\boldsymbol{\theta}(t)^T \boldsymbol{P}(t-\Delta t)\Delta\boldsymbol{\theta}(t)} \tag{7}$$

で与えられる．ここで $\rho(0 < \rho \leq 1)$ は忘却係数で，$\rho = 1$ の時，現在までのデータがすべて同等に重

み付けされ，$\rho < 1$の時，過去のデータによる影響は指数的に減衰する．$\boldsymbol{P}(t)$は共分散行列で，

$$\boldsymbol{P}(t) = \frac{1}{\rho}\{\boldsymbol{P}(t-\Delta t) - \frac{\boldsymbol{P}(t-\Delta t)\Delta\boldsymbol{\theta}(t)\Delta\boldsymbol{\theta}(t)^T\boldsymbol{P}(t-\Delta t)}{\rho+\Delta\boldsymbol{\theta}(t)^T\boldsymbol{P}(t-\Delta t)\Delta\boldsymbol{\theta}(t)}\} \tag{8}$$

で与えられる．

2.4 提案する推定則

式(6)と式(7)は，違った方針の基に導かれた式であるが，外見上良く似ている．そこで式(6)と式(7)を統合した推定則として，本報告では，

$$\widehat{\boldsymbol{J}}(t) - \widehat{\boldsymbol{J}}(t-\Delta t) = \begin{cases} \frac{\{\Delta\boldsymbol{x}(t)-\widehat{\boldsymbol{J}}(t-\Delta t)\}\Delta\boldsymbol{\theta}(t)^T\boldsymbol{W}(t)}{\rho+\Delta\boldsymbol{\theta}(t)^T\boldsymbol{W}(t)\Delta\boldsymbol{\theta}(t)}, & (\|\Delta\boldsymbol{\theta}\| \neq 0) \\ \boldsymbol{O}, & (\|\Delta\boldsymbol{\theta}\| = 0) \end{cases} \tag{9}$$

なるヤコビ行列の推定則を提案する．ここで，$\boldsymbol{W}(t)$は各要素間の重み行列，$\rho(0 \le \rho \le 1)$は忘却係数である．

各要素間の重み行列$\boldsymbol{W}(t)$として共分散行列$\boldsymbol{P}(t-\Delta t)$を用い，忘却係数$\rho$の範囲を$0 < \rho \le 1$とすると，時間重みのついた最小2乗法となる．また$\rho = 0$とすると，推定されたヤコビ行列$\widehat{\boldsymbol{J}}$は$\Delta t \to 0$のときに式(3)を満たすことになる．ヤコビ行列の推定則(9)を用いると，ρが0に近い時には，推定値は現在の観測データに敏感になり，逆にρが1に近い場合には鈍感で安定になる．

3 ビジュアルサーボ系の構成

本章では式(9)により推定されたヤコビ行列を用い，サーボ対象の画像平面上での画像特徴量を与えられた目標値に追従させるビジュアルサーボ系を構成する．

画像平面上での特徴量の目標軌道として1階微分可能な軌道$\boldsymbol{x}_d$が与えられる場合，ビジュアルサーボ系

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \widehat{\boldsymbol{J}}^+\dot{\boldsymbol{x}}_d + (\boldsymbol{I}_n - \widehat{\boldsymbol{J}}^+\widehat{\boldsymbol{J}})\boldsymbol{k} - \boldsymbol{K}\widehat{\boldsymbol{J}}^T\boldsymbol{e} \tag{10}$$

を用いることを提案する．ここで，$\boldsymbol{A}^+$は行列$\boldsymbol{A}$の疑似逆行列，$\boldsymbol{I}_n$は$n \times n$の単位行列，$\boldsymbol{K}$は正定ゲイン行列，$\boldsymbol{e}$は誤差ベクトル$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_d$である．また，$\boldsymbol{k}$は関節自由度が，目標を実現するというタスクに対して冗長である時に，その冗長性を記述する任意のベクトルとなる．ここでは，ロボットの各関節は下位の制御ループにより速度制御されているものとする．

ヤコビ行列の推定則(5)とビジュアルサーボ系(10)を用いることにより，画像上の特徴量$\boldsymbol{x}$を目標値$\boldsymbol{x}_d$に漸近的に収束させることができることが，リアプノフの安定定理を用いて証明できる．以下にこれを示す．

リアプノフ関数の候補として，正定スカラ関数

$$V = \frac{1}{2}\boldsymbol{e}^T\boldsymbol{e} \tag{11}$$

を考える．関数Vの時間微分は

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \boldsymbol{e}^T\dot{\boldsymbol{e}} \\ &= \boldsymbol{e}^T(\dot{\boldsymbol{x}} - \dot{\boldsymbol{x}}_d) \end{aligned} \tag{12}$$

のように得られる．ヤコビ行列の推定則(5)は，式(3)を満たすので，式(10)とあわせて考えると

$$\dot{V} = \boldsymbol{e}^T(\widehat{\boldsymbol{J}}\widehat{\boldsymbol{J}}^+\dot{\boldsymbol{x}}_d - \dot{\boldsymbol{x}}_d - \widehat{\boldsymbol{J}}\boldsymbol{K}\widehat{\boldsymbol{J}}^T\boldsymbol{e}) \tag{13}$$

のように変形できる．ここで$\dot{V} \le 0$となり，Vがリアプノフ関数であることを示すためには，サーボの対象の3次元空間内での自由度lおよび画像平面上での特徴量の自由度mの関係に関して以下のように場合分けして考える必要がある．なお，ここではシステムは目標を実現するために十分な自由度を持っているものとし，アームの関節の自由度nは$n \ge \min(m, l)$を満たすものとする．また，rank $\widehat{\boldsymbol{J}}$はl以下であることに注意されたい．

(i) $m \le l$ の場合

このケースは，画像平面上での特徴量の自由度が，サーボ対象の3次元空間内での自由度より小さい場合である．例えば，対象が1つの点でカメラが1台のケースはこれに該当する．rank$\widehat{\boldsymbol{J}} = m$が成立するとき，

$$\widehat{\boldsymbol{J}}\widehat{\boldsymbol{J}}^+ - \boldsymbol{I}_m = \boldsymbol{O} \tag{14}$$

となるので，Vの時間微分は

$$\dot{V} = -\boldsymbol{e}^T\widehat{\boldsymbol{J}}\boldsymbol{K}\widehat{\boldsymbol{J}}^T\boldsymbol{e} \le 0 \tag{15}$$

のように与えられる．ここで，等号は$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{o}$の時のみに成立し，リアプノフの安定定理より，$\boldsymbol{x}$が$\boldsymbol{x}_d$に漸近的に収束することが証明された．

(ii) $m > l$ の場合

このケースは逆に，画像平面上での特徴量の自由度が，サーボ対象の3次元空間内での自由度よりも大きい場合である．例えば，対象が1つの点で，カメラが2台の場合は，これに該当する．このような場合，画像特徴量間には，実世界に存在する特徴量が画像平面上に投影された時に満たすべき拘束条件が存在する．$\mathrm{rank}\widehat{\boldsymbol{J}} = l$ の時には，画像特徴量の中から独立な要素を取り出し，新しい独立な画像特徴量ベクトルを $\boldsymbol{y} \in \Re^l$ とし，$\boldsymbol{x}$ と $\boldsymbol{y}$ の間に成立する拘束条件を

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}_i \dot{\boldsymbol{y}} \tag{16}$$

と書くことができる．ここで行列 $\boldsymbol{J}_i \in \Re^{m \times l}$ はこの拘束を表す行列である．画像特徴量に対する目標 $\boldsymbol{x}_d$ がこの拘束条件 (16) を満たすものとすると，

$$(\widehat{\boldsymbol{J}}\widehat{\boldsymbol{J}}^+ - \boldsymbol{I}_m)\boldsymbol{J}_i = \boldsymbol{O} \tag{17}$$

が成り立ち，ゆえにリアプノフ関数の候補 V の時間微分は

$$\dot{V} = -\boldsymbol{e}^T \widehat{\boldsymbol{J}} \boldsymbol{K} \widehat{\boldsymbol{J}}^T \boldsymbol{e} \le 0. \tag{18}$$

となる．ここで，等号は $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{y}_d$ の場合にのみ成立する．よってリアプノフの安定定理より，$\boldsymbol{y}$ が $\boldsymbol{y}_d$ に漸近的に収束することが証明された．さらに $\boldsymbol{x}$ と $\boldsymbol{y}$ との拘束条件 (16) より，$\boldsymbol{x}$ が $\boldsymbol{x}_d$ に漸近的に収束することが証明された．

(i)，(ii) より $\mathrm{rank}\widehat{\boldsymbol{J}} = \min(m, l)$ が成立する場合には，ビジュアルサーボ系 (10) と，ヤコビ行列の推定則 (5) により，漸近的収束 $\boldsymbol{x} \to \boldsymbol{x}_d$ が成立することがいえた．離散時間におけるヤコビ行列の推定則 (9) においても，システムは同様の挙動を示すことが期待される．

提案するヤコビ行列の推定法，およびビジュアルサーボ系を用いることにより，アームやカメラの構造やパラメータに関する先見的知識がない場合に，画像平面上の特徴量を与えられた目標値に収束させることができることがわかった．本方式の特徴はシステムの真のヤコビ行列を推定するのではなく，画像上の特徴点が目標軌道に収束するためのヤコビ行列を推定している所にある．

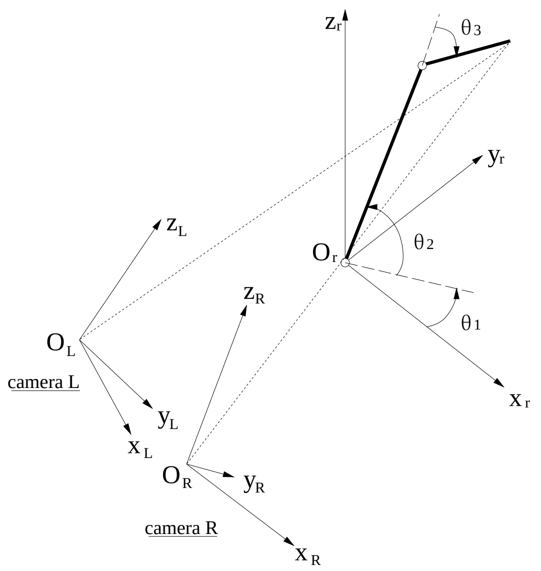

Fig.2 Robot system used for simulation

4 シミュレーション

4.1 シミュレーションに用いたシステム

提案する手法の有効性を検証するためにシミュレーションを行なう．対象とするシステムのカメラとアームの位置関係を **Fig.2**に示す．ロボットアーム部は3つの関節を持ち，カメラモデルとしてピンホールモデルを用いる．カメラ R，L は基準座標系 Σ_r に固定されており，基準座標系と，カメラ座標系 Σ_R，Σ_L との間の真の同次変換を

$$
{}^r\boldsymbol{R}_R = \begin{bmatrix} 0.946 & 0.267 & -0.183 & 0.06 \\ -0.317 & 0.658 & -0.683 & -0.2 \\ -0.062 & 0.704 & 0.707 & 0.02 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

$$
{}^r\boldsymbol{R}_L = \begin{bmatrix} 0.975 & -0.221 & -0.028 & -0.05 \\ 0.115 & 0.605 & -0.788 & -0.2 \\ 0.191 & 0.765 & 0.616 & 0.03 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

とする (Fig.2参照)．アームのリンク長，各カメラの焦点距離を **Table 1** に示す．アーム部の先端は [9] で提案されているようなビジュアルトラッキング機構により検出され，画像上での特徴量ベクトル $[x_R, y_R, x_L, y_L]^T$ が出力されるものとする．画像は R，L とも 256×480[pixel] とし，観測ノイズがランダムに ± 2[pixel] あるとして，シミュレーションを行なった．

length of link 2	(m)	0.128
length of link 3	(m)	0.064
focal length of camera R	(m)	0.01
focal length of camera L	(m)	0.011

Table 1 Parameters of robot system

ヤコビ行列の推定値の初期値はその符号と数値のオーダーのみがわかっているとし，真のヤコビ行列が

$$\boldsymbol{J}(0) = \begin{bmatrix} 22.5 & -343 & -471 \\ 183 & -102 & -335 \\ -67.6 & -321 & -30.8 \\ 165 & -422 & -368 \end{bmatrix}$$

であるのに対し，

$$\hat{\boldsymbol{J}}(0) = \begin{bmatrix} 10 & -100 & -100 \\ 100 & -100 & -100 \\ -10 & -100 & -10 \\ 100 & -100 & -100 \end{bmatrix}$$

とした．ゲイン行列

$$\boldsymbol{K} = \mathrm{diag}[9.0\times10^4, 9.0\times10^4, 9.0\times10^4]$$

は試行錯誤的に求めた．また，サンプリング時間は33[ms]とした．

4.2　ステップ応答のシミュレーション

システムにステップ目標値を与えた場合のシミュレーション結果を**Fig.3**に示す．アーム部の関節角の初期値は$[\theta_1,\theta_2,\theta_3]^T = [0, \pi/2, -\pi/2]^T$で，その時の特徴量ベクトル(pixel)は$[x_R, y_R, x_L, y_L]^T = [90, 341, 157, 350]^T$とし，時刻$t=0$にステップ状の目標値$[x_R, y_R, x_L, y_L]^T = [139, 147, 242, 225]^T$を与える．この目標値は実空間の拘束を満たすように計算されている．ここでは3つのシミュレーション結果を示す．

ケース 1 提案したヤコビ行列の推定法(9)を$\rho = 5.0\times10^{-4}$，$\boldsymbol{W}(t) = \boldsymbol{I}_n$として用い，提案したビジュアルサーボ系(10)を適用した場合.

ケース 2 真のヤコビ行列を用いて提案したビジュアルサーボ系(10)を適用した場合.

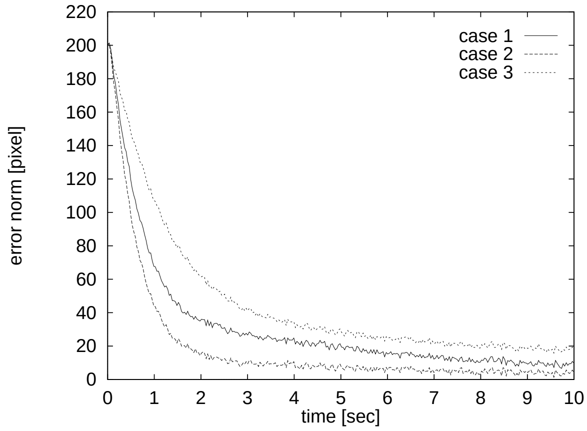

Fig.3 Simulation result (step response, error norm on camera R)

ケース 3 推定ヤコビ行列を$\hat{\boldsymbol{J}}(0)$とし，オンライン推定を行なわないで提案したビジュアルサーボ系(10)を適用した場合.

Fig.3ではカメラRにおける画像上の誤差ノルム$\| \boldsymbol{x}_R - \boldsymbol{x}_{Rd} \|$を示している．ケース1(実線)とケース3(点線)の結果を比較することにより，ヤコビ行列のオンライン推定の有効性が確認できる．なお，カメラLに関する結果はカメラRに関するものとほとんど同じであった.

4.3　軌道制御のシミュレーション

連続的な軌道を与えた場合のシミュレーション結果を**Fig.4**に示す．目標軌道は初期値はステップ応答の場合と同じものを用い，最終値は$[x_R, y_R, x_L, y_L]^T = [395, 236, 548, 565]^T$とし，これを3.0 [sec]で移動する軌道を与える．なお，この軌道はあらかじめアームの先端が満たすべき画像上の拘束を満足しているものを与えた．目標軌道が時間関数として与えられる場合でも，ケース1はオンラインでヤコビ行列を同定しているために，その性能はケース2(破線)と変わらない．一方，ケース3は1，2に比べて極端に性能が悪くなっていることがわかる．時刻$t = 10.0$[sec]におけるケース1での推定されたヤコビ行列は

$$\hat{\boldsymbol{J}}(10) = \begin{bmatrix} 105 & -432 & 244 \\ 69.4 & -279 & -236 \\ -31.7 & -414 & 138 \\ 7.67 & -589 & -37.0 \end{bmatrix}$$

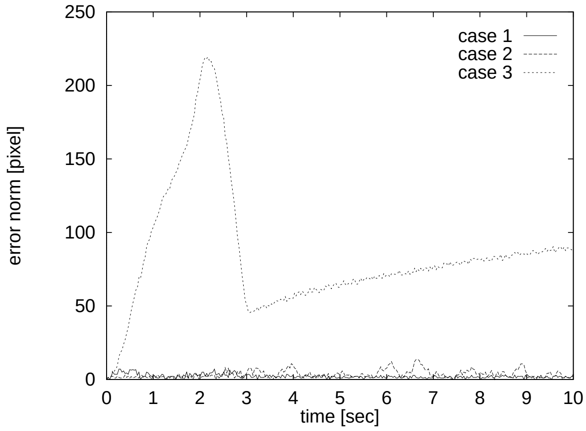

Fig.4 Simulation result (trajectory tracking, error norm no camera R)

であった．一方，ケース2でのヤコビ行列，すなわち真のヤコビ行列は

$$\boldsymbol{J}(10) = \begin{bmatrix} 175 & -791 & -121 \\ 506 & -915 & -639 \\ -239 & -661 & -68.6 \\ 400 & -1360 & -605 \end{bmatrix}$$

であった．ケース1で推定されたヤコビ行列が真のヤコビ行列とかなり異なっていることに注意されたい．

これらの結果より，システムの各種パラメータに関する先見的知識のない場合にも提案するヤコビ行列の推定法と，ビジュアルサーボ系を用いることにより，画像平面上での特徴量が目標値に収束することが示せた．

5 考察と今後の課題

本報告ではロボットシステムの構造やパラメータに関する先見的な知識なしに画像特徴量を与えられた目標軌道に収束させるためのヤコビ行列の推定法とビジュアルサーボ系を提案した．

提案した手法の有効性を検証するための実験が現在進行中であり，発表時にその結果を提示する予定である．現在，視覚トラッキングシステム [9] を含むロボットシステムを開発中である．

提案する手法を実システムに適用する場合，忘却係数ρに関する考察をしなければならない．忘却係数ρの設定により，システムをセンサ情報に関して敏感にするか，外乱に対して安定にするかを決めることができる．それゆえ，与えられた定格に対して，どのようにρを決めるかが，今後の課題である．

また，実世界での特徴量の自由度l，画像平面上での自由度mに関してさらに詳細な議論をする余地があると考えられる．さらに，画像上の目標値$\boldsymbol{x}_d$をどの様にしてシステムに与えるかも検討する必要がある．

参考文献

[1] P. I. Corke. Visual control of robot manipulators – a review. In *Visual Servoing*, pages 1–31. World Scientific, 1993.

[2] W. Jang and Z. Bien. Feature-based visual servoing of an eye-in-hand robot with improved tracking performance. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2254–2260, 1991.

[3] B. Nelson, N. P. Papanikolopoulos, and P. K. Khosla. Visual servoing for robotic assembly. In *Visual Servoing*, pages 139–164. World Scientific, 1993.

[4] N. Maru, H. Kase, et al. Manipulator control by visual servoing with the stereo vision. In *Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1865–1870, 1993.

[5] K. Hashimoto, T. Kimoto, T. Ebine, and H. Kimura. Manipulator control with image-based visual servo. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2267–2272, 1991.

[6] L. E. Weiss, A. C. Sanderson, and C. P. Neuman. Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback. *IEEE J. of Robotics and Automation*, RA-3(5):404–417, 1987.

[7] N. P. Papanikolopoulos, P. K. Khosla, and T. Kanade. Adaptive robotic visual tracking. In *Proc. of the American Control Conference*, pages 962–967, 1991.

[8] R. Y. Tsai and R. K. Lenz. A new technique for fully autonomous and efficient 3d robotics hand/eye calibration. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 5(3):345–358, 1989.

[9] M. Inaba, T. Kamata, and H. Inoue. Rope handling by mobile hand-eye robots. In *Proc. of Int. Conf. on Advanced Robotics*, pages 121–126, 1993.