

学術論文

構造やパラメータに関する先験的な知識を必要としない フィードフォワード補償器を持つ 適応型ビジュアルサーボ系の構成

細田 耕* 浅田 稔*

Adaptive Visual Servoing Controller with Feedforward Compensator without Knowledge of True Jacobian

Koh HOSODA* and Minoru ASADA*

This paper describes an adaptive visual servoing controller consisting of an on-line estimator and a feed-back/feedforward controller for uncalibrated camera-manipulator systems. The estimator does not need a priori knowledge on the kinematic structure nor parameters of the camera-manipulator system, such as camera and link parameters. The controller consists of feedforward and feedback terms to make the image features converge to the desired trajectories, by using the estimated results. Some experimental results demonstrate the validity of the proposed estimator and controller.

Key Words: adaptive visual servoing, uncalibrated camera-manipulator systems, on-line estimator, feedforward compensator

1. はじめに

ロボットシステムを取り巻く環境が未知であったり、動的に変化する場合や、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外界センサの果たす役割は大きい。特に視覚センサは、観測対象と物理的に干渉せずに観測ができるので、その応用範囲は広い。このように、視覚を持つロボットシステムに対する研究は、環境の変化に対して柔軟なシステムの構成にとって非常に重要となる。

従来、視覚情報処理はロボットの行動とは独立に研究されており、再構成されるデータの精度を、時間をかけて上げることに専念してきた。しかしながら、視覚を持つロボットにタスクを遂行させる場合には、ロボット自身の行動と視覚の関係を利用できるため、視覚情報処理の精度はタスクを実行できる程度あればよく、またこれによって処理にかかる時間を短くすることができる[1]。このような研究の一つとして、近年、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系に関する研究がなされている[2][3]。

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

ライン同定[4]されている必要があった。しかし、オフライン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、パラメータの変動や同定誤差に弱いシステムになってしまう。このような欠点を補うために、パラメータのオンライン推定機構を持つ適応型ビジュアルサーボ系に関するいくつかの報告が発表されている[5]~[9]。Weissら[5]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。Feddemaraら[6]はシステムのモデルを概略持っており、モデル化誤差を推定するためにARX(Auto-Regressive with eXternal inputs)モデルを用い、ビジュアルサーボ系を構成することを提案している。Papanikolopoulosら[7][8]は、マニピュレータとカメラ間は完全にキャリブレーションされているものとして、システムをARXモデルを用いてモデル化し、その係数を推定している。また、彼ら[9]は、カメラから対象物までの距離を推定する方法について述べている。しかしながらいずれの方法も、システムが1入力1出力系として近似できる[5]、システムの概略のモデルが必要[6]、マニピュレータ、カメラ間の関係は既知[7][8]、距離パラメータについてのかなり詳しい知識が必要[9]など、システムに対しての制約が強かったり、先験的な知識を必要としている。

従来、ビジュアルサーボ系には、画像上での対象物を、望みの見え方にするためのフィードバックをするという、単純なタスクが与えられていた。そのため、フィードバック項のみを持つものに対して研究が進んでいる。しかしながら、タスクが複

原稿受付 1994年4月12日

*大阪大学工学部

*Osaka University

雑化してくると、システムに対するタスクが画像上の連続軌道で与えられ、これを実現するようなタスクを実行しなければならないケースが想定される。このような場合には、フィードフォワード項の果たす役割は大きいと考えられるが、フィードフォワード項を持つ系に対する研究はほとんどなかった。

本論文では、画像上の特徴量の変化とロボットシステムの運動速度の関係性を記述するヤコビ行列のオンライン推定法と、これを用いたフィードフォワード項を持つビジュアルサーボ系の構成を考える。提案する手法は以下のような特徴を持つ。

- (1) 提案するヤコビ行列の推定法は、システムの状態を記述する変数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験的な知識を必要としない。例えばステレオ視を用いた3次元情報の再構成をする際に必要となるような、面倒なカメラキャリブレーションを一切必要としない。
- (2) 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制御系を構成できる。例えば、カメラの台数や、カメラがロボットに搭載されているか、地面に固定されているかに無関係に制御系を構成できる。
- (3) [6]~[9]では、システムの真のパラメータを得るために、システムに対して種々の制約を設けている。これに対して、提案するヤコビ行列の推定法は、制御則が画像特徴量をその目標軌道へ収束させるという所期の制御目的を実現するためのパラメータを推定するものであり、真のパラメータを推定するものではない。
- (4) 提案するビジュアルサーボ系は、従来用いられているフィードバック項に加え、フィードフォワード項を持つため、画像上で与えられた目標軌道の時間系列によりよく追従することができる。

以下、まずヤコビ行列の推定法を提案し、推定されたヤコビ行列を用い、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。そして実験により提案する手法の有効性を検証する。

2. 画像特徴量と関節変位間関係の推定法

2.1 画像特徴量速度と関節速度間のヤコビ行列

本論文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と、それを支える可動部(あるいは地面に固定されていても良い)と、マニピュレータ(サーボの対象となる特徴量が地面に固定されている場合にはなくてもよい)を持っている。ここでの制御目的は、マニピュレータの手先、あるいは地面に固定された注視対象の画像特徴量(画像上での位置、輪郭、面積など)を、画像上での目標値に収束させることである(Fig.1)。ロボットシステムに関する先験的な知識をできるだけ使わないで、このような制御系を構成するには、ロボットシステムの運動速度と画像特徴量の速度の関係性を記述するヤコビ行列のオンライン推定が必要となる。ここで提案する推定法では、ロボットシステムの運動を記述する変数(以下、システム記述変数と呼ぶことにする)が全て観測されているものと仮定する。例え

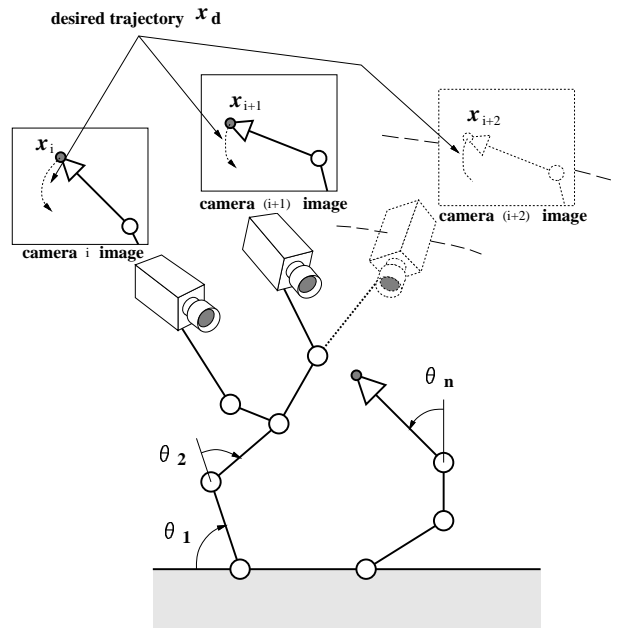


Fig. 1 A Robot system equipped with visual sensors.

ば注視対象が、基準座標に対して未知の速度で移動する場合には扱わない。

このようなシステム記述変数ベクトルを $\theta \in \mathbb{R}^n$ とし、注視対象の画像上での特徴量を $x \in \mathbb{R}^m$ とすると、

$$x = x(\theta) \quad (1)$$

と書くことができる。式(1)を微分することにより、速度間関係式

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

を得る。ここで $J(\theta) = \partial x / \partial \theta^T \in \mathbb{R}^{m \times n}$ は画像特徴量速度とシステム記述変数速度の関係性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、ロボットシステムの構造や、リンクパラメータなどを含んでいる。

2.2 ヤコビ行列の推定則

ロボットシステムに関する先験的な知識を用いずにビジュアルサーボ系を構成するために、実時間のヤコビ行列の推定則を導く。サンプリング時間が十分短く、その間ヤコビ行列 J が一定と見なせると仮定すると、式(2)は以下のように離散化される。

$$x(k+1) = x(k) + J(k)u(k) \quad (3)$$

ここで、 $J(k)$ は、サンプリング時間の間一定と見なせるヤコビ行列、 $u(= T\dot{\theta})$ は、 k 番目のサンプリングにおける入力、 T はサンプリング時間である。式(3)より、ヤコビ行列 J の第 i 行ベクトルを j_i^T とすると、

$$\{j_i(k+1)^T - j_i(k)^T\}u(k+1) = \{x(k+2) - x(k+1) - J(k)u(k+1)\}_i \quad (4)$$

となる．これを満たす \hat{j}_i^T で，重みづけされた変化率が最小になる推定値 \hat{j}_i^T は

$$\hat{j}_i(k+1) - \hat{j}_i(k) = \frac{\{x(k+2) - x(k+1) - \hat{J}(k)u(k+1)\}_i}{u(k+1)^T W_i(k+1)u(k+1)} W_i(k+1)u(k+1) \quad (5)$$

によって得られる [10]．ここで $W_i(k+1)$ は $\hat{j}_i(k)$ の変化に対する重み行列である．式 (5) をもとにヤコビ行列の推定値を求めると，推定値 $J(k+1)$ を求めるために観測値 $x(k+2)$ が必要となるが，これは現実には不可能である．ゆえに \hat{J} は外挿によって求めることとし，

$$\hat{j}_i(k+1) - \hat{j}_i(k) = \frac{\{x(k+1) - x(k) - \hat{J}(k)u(k)\}_i}{u(k)^T W_i(k)u(k)} W_i(k)u(k) \quad (6)$$

とする．

式 (6) を基に \hat{J} を推定する場合， $\|u\|=0$ のとき理論的には $\|x(k+1) - x(k) - \hat{J}(k)u(k)\|$ も適当な速度で 0 に収束するため，式 (6) の右辺は発散することはない．しかしながら現実のシステムにおいては，外乱等の影響で必ずしも右辺が発散しないとは限らない．そこで，外乱等による影響を考慮し， $\|u\|=0$ のときにも右辺が発散しないように，推定則を

$$\hat{j}_i(k+1) - \hat{j}_i(k) = \frac{\{x(k+1) - x(k) - \hat{J}(k)u(k)\}_i}{\rho_i + u(k)^T W_i(k)u(k)} W_i(k)u(k) \quad (7)$$

と修正する．ここで ρ_i は適当な正の定数である． $\|u\|$ が充分に大きい時には ρ_i は無視でき，また小さい時には右辺が発散しないような，適当な ρ_i を選ぶ必要がある．重み行列 $W_i(k)$ として共分散行列をとり， ρ_i の範囲を $0 < \rho_i \leq 1$ と限定すると，この推定則は最小二乗法となる [11]．つまりこの推定則は最小二乗法を内包していることになる．

また，この推定則は真のヤコビ行列ではなく，式 (3) を満たすようなヤコビ行列を推定することを目的としている．提案する手法は真のヤコビ行列を推定するのが目的ではなく，推定されたヤコビ行列を用いることによって所期の制御目的を実現しようとしていることに着目されたい．

2.3 ビジュアルサーボ系

前節で提案されたヤコビ行列の推定値 \hat{J} を用いることにより，画像特徴量 $x(k)$ を与えられた目標値 $x_d(k)$ に追従させるビジュアルサーボ系を構成する．式 (3) より，サーボ系として，

$$u(k) = \hat{J}(k)^+ \{x_d(k+1) - x_d(k)\} + \{I_n - \hat{J}(k)^+ \hat{J}(k)\} k_r + K \hat{J}(k)^T \{x_d(k+1) - x(k)\} \quad (8)$$

を得る．ここで $\hat{J}(k)^+$ は行列 $\hat{J}(k)$ の疑似逆行列， I_n は $n \times n$ の単位行列， K は正定ゲイン行列である．この制御則の右辺第 1, 2 項は，ヤコビ行列が十分に推定されているときには，注視

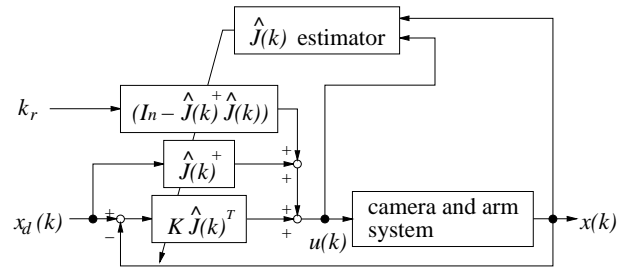


Fig. 2 The block diagram of the proposed estimator and visual servoing scheme.

対象の画像特徴量を，与えられた目標値に追従させることのできるフィードフォワード項である．右辺第 2 項はシステムの冗長性を表す項であり， k_r はその冗長性を記述する項である．これに対して右辺第 3 項は，フィードバック項であり，閉ループシステムの安定性を保証する項である．右辺第 3 項の $\hat{J}(k)^T$ は，ヤコビ行列が真の値，または真値に近い値を取っているときには $\hat{J}(k)^+$ を用いても安定性が保証される [3] が，本論文で扱っているような，対象に対して先験的な知識が無い場合には，推定値の初期値によっては $\hat{J}(k)$ の最小特異値が小さくなってしまふ場合がある．このような場合，閉ループ系を不安定にしてしまう恐れがあるために，より安定となるように転置を用いている．また，フィードフォワードを適用しない場合には，転置を用いる方が計算量が減少する利点もある．

ヤコビ行列の推定則 (7) は，真のヤコビ行列を推定するものではなく，式 (3) を満たすような \hat{J} を推定するものであることは前に述べたが，ここで導かれた制御則 (8) も，同じく式 (3) より与えられているために，推定則が真の値を推定できなくても画像特徴量を目標値に収束させることができる．

提案するヤコビ行列の推定則と，ビジュアルサーボ系を組み合わせた制御系を Fig.2 に示す．

3. 実 験

提案する手法の有効性を検証するために実験を行う．まず，提案する手法のヤコビ行列の推定法とフィードバック項の有効性を示すための PTP (Point To Point) 制御の結果を，ついで提案する手法のフィードフォワード項の有効性を示すための軌道制御の実験結果を示す．

3.1 実験システム

Fig.3 に実験に用いた装置の構成を示す．2 台の CCD カメラ (UN401, ELMO) によって取得された画像情報は画像処理ユニット MV200 (DataCube) に送られ (画像サイズ 512[pixel] × 480[pixel])，各々が横方向に 1/2 に圧縮され (256[pixel] × 480[pixel])，並べられて一画面のデータ (512[pixel] × 480[pixel]) として富士通製のトラッキングモジュールに送られる．このトラッキングモジュールは前もって与えられた画像テンプレートと，現在の画像の相関をとることによって，そのテンプレートと相関が最も高い画像が現在の画像平面上のどこにあるのかを検出できる [12]．このトラッキングモジュールにより得られた座標はホストコンピュータボード

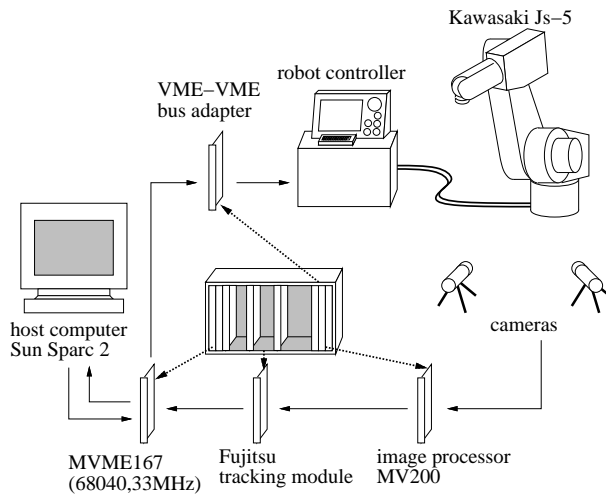


Fig. 3 Experimental equipments

MVME167(CPU:68040,33MHz, motorola)に送られ、これをもとに6自由度ロボット Js-5(川崎重工)に対する出力が計算される。計算された出力はVME-VMEバスアダプタを通して、ロボットの専用コントローラに送られる。ロボットは専用コントローラにより位置制御されている。姿勢に関しては本実験では固定して、手先並進3自由度をロボットが持っている自由度としている。このシステムを用い、制御用のソフトウェアをVxWorks上のC言語で記述したところ、サンプリング時間は33[ms]となった。

本実験では、式(1)における x は、与えられた画像テンプレートの2台のカメラ画像上での x, y 座標、 θ は、マニピュレータの手先位置である。また、2台のカメラ間の距離を約1.5[m]、カメラからマニピュレータまでの距離を約3[m]として、実験を行った。

3.2 PTP 制御

提案する手法のヤコビ行列の推定法がシステムに対する先験的知識を必要としないことと、提案する手法のフィードバックの有効性を示すためにPTP(Point To Point)制御の実験を行った。時刻 $t = 0$ に、あらかじめ提示による教示(teaching by showing)によって示されたステップ状目標値をシステムに与え、その応答を確かめた。PTP制御なので、式(8)のフィードフォワード項である右辺第1項、第2項は0である。

$\rho_i (i = 1, \dots, 4)$ は実験を進めながら試行錯誤的に選び、 $\rho_i = 0.8 (i = 1, \dots, 4)$ と決めた。また、重み行列は $W_i(k) = I_3 (i = 1, \dots, 4)$ とした。ビジュアルサーボ系(8)のフィードバックゲイン K [m/pixel]は

$$K = \text{diag} \begin{bmatrix} 1.5 \times 10^{-4} & 1.5 \times 10^{-4} \\ 1.5 \times 10^{-4} & 1.5 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$$

とした。

まず2台のカメラを床に固定し、ロボットの手先を注視対象とした場合の実験を行った(Fig.4)。カメラは適当に固定され、また画像も横方向に圧縮されているために、もしこれらに関す

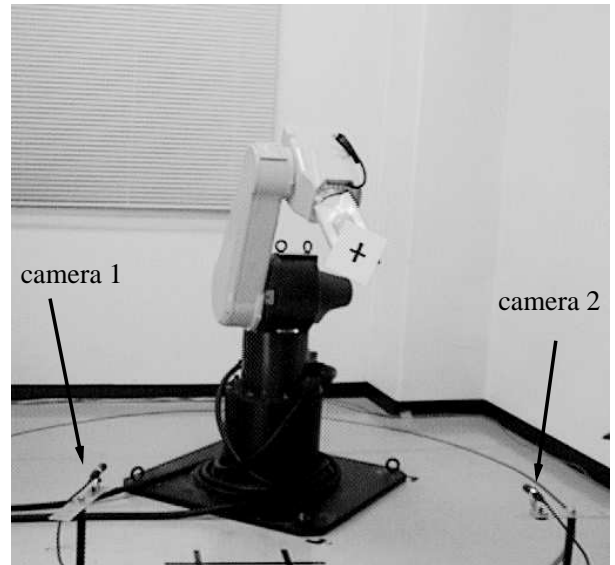


Fig. 4 An eye and arm system used for experiments.

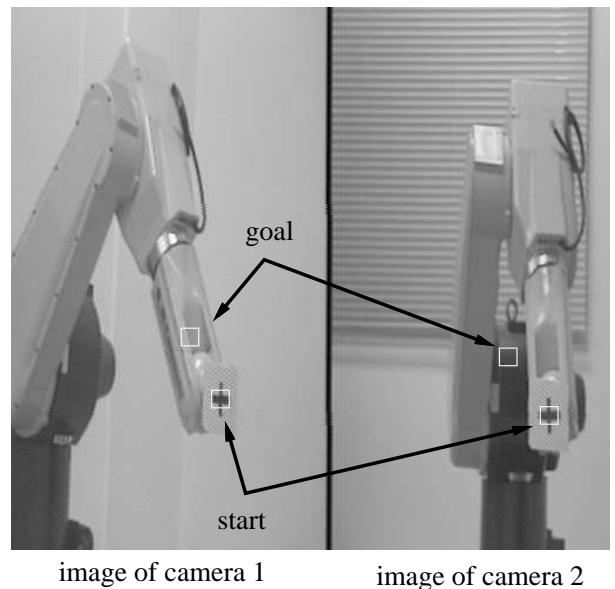


Fig. 5 Initial and final positions of prememorized image pattern. The eye and arm system is in the initial posture.

るキャリブレーションを行おうとすると、多大な労力が必要となる。しかしながら提案する手法ではこれらに関する知識をシステムに与える必要が無い。

ロボットが初期姿勢を取っているときの、注視点としたロボット手先の初期の画像テンプレートの位置と目標のテンプレート位置をFig.5に示す。システムに対する先験的知識がないとの仮定より、ヤコビ行列の初期値を

$$\hat{J}(0) = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

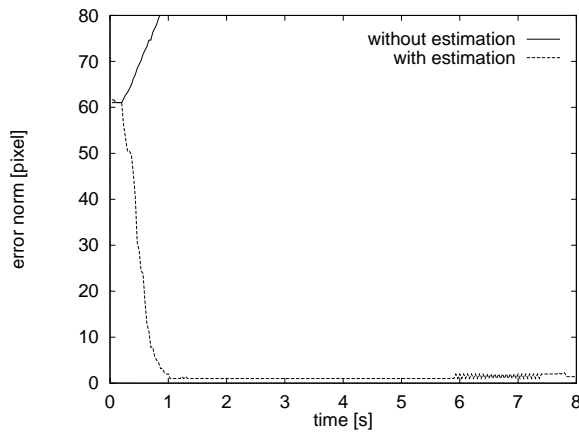


Fig. 6 Step responses of the eye and arm system with and without on-line estimation.

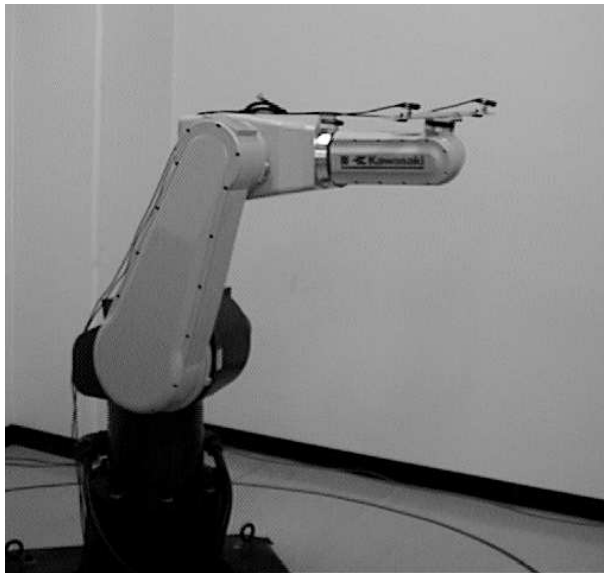


Fig. 7 An eye in arm system used for experiments.

と適当に決めた．また提案する手法と，実時間のヤコビ行列の推定法を持たない手法の応答を Fig.6で比較している．推定法を持たない場合 (without estimation)，ヤコビ行列の初期値が真値と異なるため，誤差を収束させることができないことがグラフより分かる．これに対して提案する手法 (with estimation) は初期は推定法を持たない場合と同様の応答を示すが，ロボットが動作していくにつれ実時間でヤコビ行列を推定するため，誤差をなくすように動作することができる．

次に提案する手法がシステムの構造を問題としないことを示すために，カメラをアームに搭載し，床に固定した参照点を目標の位置に移動させるシステム (Fig.7) について，同様の実験を行った．ロボットが初期姿勢をとっているときの，注視点の初期の画像テンプレートの位置と目標のテンプレート位置を Fig.8 に，結果を Fig.9 に示す．ヤコビ行列の初期値はカメラを床に固定した場合と同じものを用いた．この場合についても実時間推定法を持たない制御系は誤差を0に収束させること

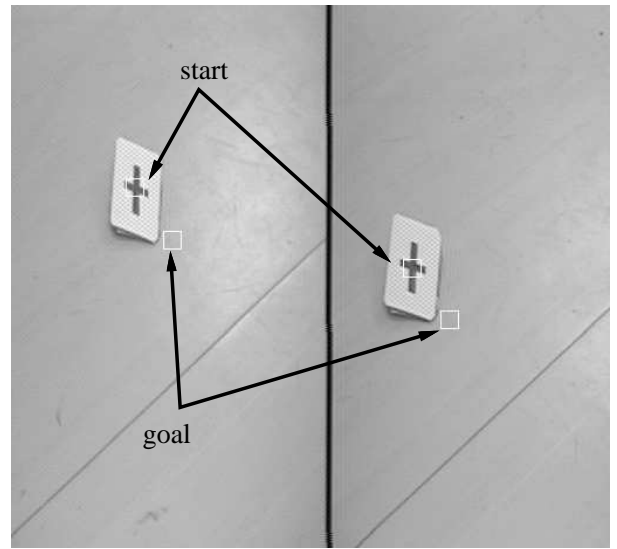


Fig. 8 Initial and final positions of prememorized image pattern. The eye in arm system is in the initial posture.

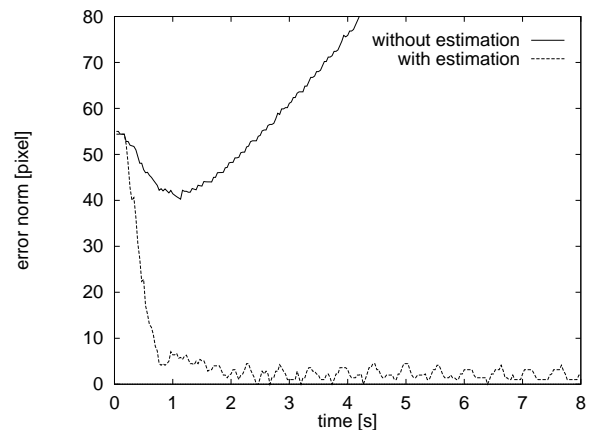


Fig. 9 Step responses of the eye in arm system with and without on-line estimation.

ができないのに対し，提案する方法は誤差を取り除くことができる．

以上の実験結果より，提案する実時間推定法およびフィードバック制御は，システムに対する先験的な知識を用いなくて，PTP 動作を実現できることが示された．

3.3 軌道制御

提案するビジュアルサーボ系のフィードフォワード項の有効性を検証するために，提示による教示 (teaching by showing) によって与えられた軌道を実現するような軌道制御の実験を行った．このシステムではVME上のコントローラからマニピュレータの指令値を出力してから，その指令値が実現されるまでにおよそ100[ms]の遅れがあることが観測されている．このため，式(8)のフィードフォワードをそのまま適用すると，不安

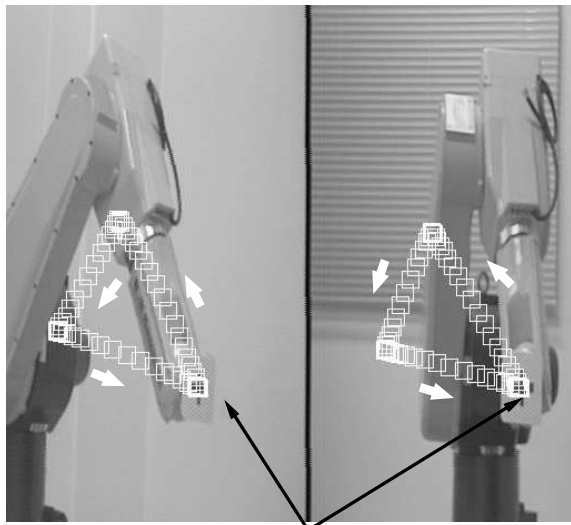


image of camera 1 image of camera 2
Fig. 10 Desired trajectories on the image planes.

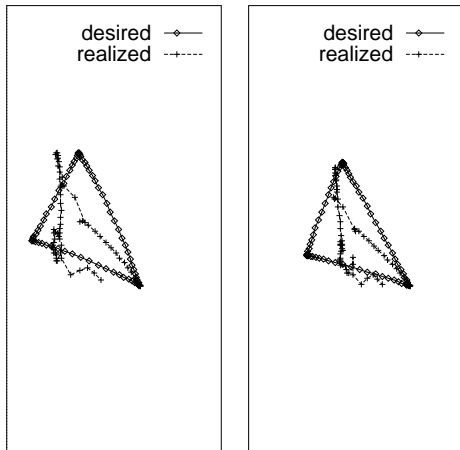


image of camera 1 image of camera 2
 (a) Realized trajectory without feedforward

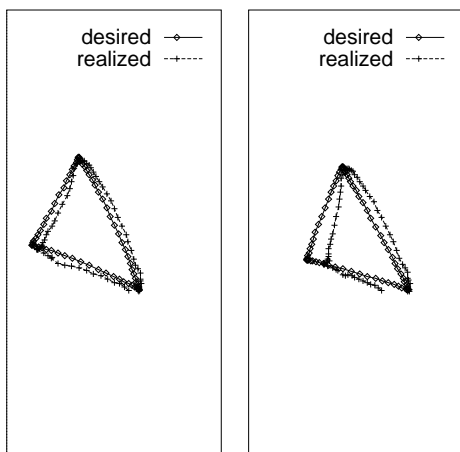
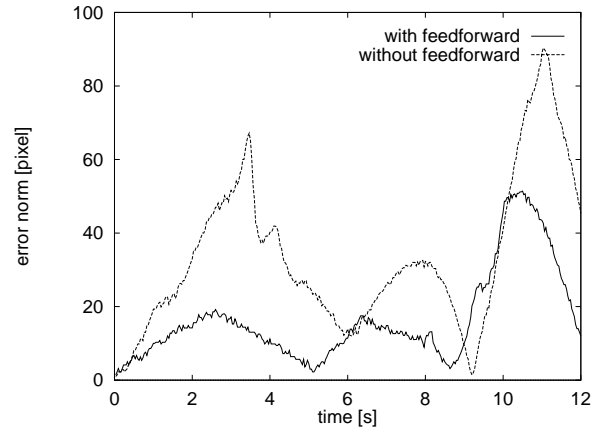


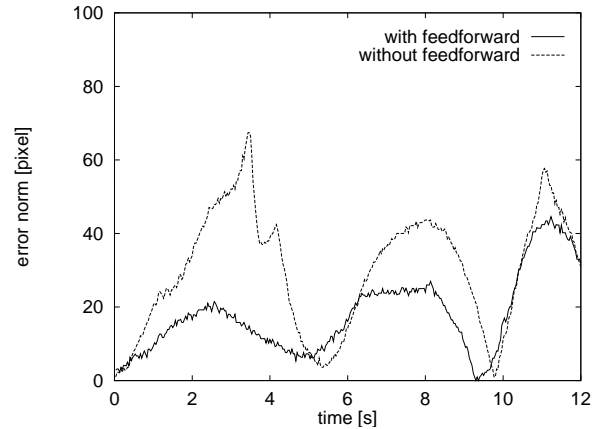
image of camera 1 image of camera 2
 (b) Realized trajectory with feedforward

Fig. 11 Realized trajectories with and without feedforward terms

定になってしまう．そこで，本実験ではフィードフォワード項



(a) Error norm in image plane 1



(b) Error norm in image plane 2

Fig. 12 Error norms of trajectory tracking by the eye and arm system with and without feedforward terms.

の 30% を指令値として与え，

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(k) = & 0.3\hat{\mathbf{J}}(k)^+ \{ \mathbf{x}_d(k+1) - \mathbf{x}_d(k) \} \\ & + \mathbf{K}\hat{\mathbf{J}}(k)^T \{ \mathbf{x}_d(k+1) - \mathbf{x}(k) \} \end{aligned} \quad (9)$$

とした．

2台のカメラを床に固定し，ロボットの手先を注視対象とした場合の実験を行った (Fig.4)．実際に人間がロボットを動作させ，その画像を取り込むことによって目標画像の系列を得ている．目標軌道を Fig.10 に示す．軌道は 12 [s] 間にわたって与えられており，Fig.10 には 0.2 [s] ごとの軌跡を表示している．ヤコビ行列の初期値は，PTP 制御の場合と同じものを用いた．本実験では $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^4$ ， $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^3$ となるため，式 (8) のフィードフォワード項のうち，右辺第 2 項は存在しない．推定，制御パラメータ \mathbf{K} ， ρ_i ， $\mathbf{W}_i(k)$ は PTP 制御と同じものを使った．画像上の目標軌道と実際の軌道を Fig.11 に，誤差ノルムのグラフを Fig.12 に示す．フィードフォワード項がない場合に比べ，本論文で提案するフィードフォワード項を持つ制御則が軌道追従誤差を小さくすることができることが確認できた．

4. おわりに

本論文では、対象とするシステムに対する先験的な知識を必要とせず、ロボットやカメラに対する制約がないため、多くのシステムに適応可能なビジュアルサーボ系を提案した。このサーボ系はフィードバック項に加え、フィードフォワード項を持っているため、目標軌道に対しよりよい軌道追従を実現することができる。

ロボットシステムに与えられる画像特徴量の目標値 x_d は、システムに与えられたタスクを遂行するために生成されるものである。本論文においては、目標値は提示による教示 (Teaching by showing) により与えられているが、与えられたタスクに対して自動的に目標値を生成する手法が必要であると考えられる。特に環境やシステムに対する知識が乏しい場合には、このような目標値生成が課題になると考えられる。

参考文献

- [1] Y. Aloimonos. Introduction: Active vision revisited. In Y. Aloimonos, editor, *Active Perception*, chapter 0. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1993.
- [2] P. I. Corke. Visual control of robot manipulators – a review. In *Visual Servoing*, pages 1–31. World Scientific, 1993.
- [3] 橋本. 視覚フィードバック制御-静から動へ. システム/制御/情報, 38(12):659–665, 1994.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] J. T. Feddema and C. S. G. Lee. Adaptive image feature prediction and control for visual tracking with a hand-eye coordinated camera. *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, 20(5):1172–1183, 1990.
- [7] N. P. Papanikolopoulos and P. K. Khosla. Adaptive robotic visual tracking: Theory and experiments. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 38(3):429–445, 1993.
- [8] B. Nelson, N. P. Papanikolopoulos, and P. K. Khosla. Visual servoing for robotic assembly. In *Visual Servoing*, pages 139–164. World Scientific, 1993.
- [9] N. P. Papanikolopoulos, B. Nelson, and P. K. Khosla. Six degree-of-freedom hand/eye visual tracking with uncertain parameters. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 174–179, 1994.
- [10] 児玉 and 須田. システム制御のためのマトリクス理論, chapter 12. (社)計測自動制御学会, 1978.
- [11] 中溝. 信号解析とシステム同定, chapter 5. コロナ社, 1988.
- [12] 稲葉. 局所相関プロセッサを用いたロボットビジョン. 日本ロボット学会誌, 13(3):327–330, 1995.

細田 耕 (Koh Hosoda)

1965年11月9日生まれ。1988年京都大学工学部精密工学科卒業。1993年同大学工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。同年大阪大学工学部電子制御機械工学科助手となり、現在に至る。ロボット工学の研究に従事。博士(工学)。計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

浅田 稔 (Minoru Asada)

1982年大阪大学大学院基礎工学研究科後期課程修了。同年、大阪大学基礎工学部助手。1989年大阪大学工学部助教授となり現在に至る。この間、1986年から1年間米国メリーランド大学客員研究員。知能ロボットの研究に従事。1989年、情報処理学会研究賞、1992年、IEEE/RSJ IROS'92 Best Paper Award 受賞。工学博士。電子情報通信学会、情報処理学会、人工知能学会、日本機械学会、計測自動制御学会、システム制御情報学会、IEEE R&A, CS, SMC societiesなどの会員。(日本ロボット学会正会員)