

実時間推定器を持つ視覚・運動系の反射的・合目的行動の実現

○細田 耕 浅田 稔
大阪大学 工学部

Purposive/Reactive Behavior by Vision-Motor System with Purposive Visual Controller

○Koh HOSODA Minoru ASADA
Osaka University

Abstract — This paper describes an adaptive visual servoing controller consisting of an on-line estimator and a feedback/feedforward controller for uncalibrated camera-manipulator systems. The controller consists of feedforward and feedback terms to make the image features converge to the desired trajectories, by using the on-line estimated parameters. Some experimental results demonstrate the validity of the proposed estimator and controller.

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。

筆者らは[1]において、実時間推定機構を持つ視覚サーボ系を提案した。この方法は、面倒なカメラキャリブレーションを一切必要としない、システムに対する制約がないなどの特徴の他に、反射的行動を実現するフィードバック項と、合目的行動を実現するフィードフォワード項を持つという特徴を持つ。本報告では、フィードフォワード項の軌道制御性能の向上に対する寄与を調べるための実験を行った。

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と、それを支える可動部と、マニピュレータを持っている (Fig.1)。システム記述変数ベクトル (ロボットシステムの運動を記述する変数) 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、

$$\dot{x} = J(\theta)\dot{\theta} \quad (1)$$

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を表すヤコビ行列である。

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(1)は以下のように離散化される。

$$x(k+1) = x(k) + J(k)u(k) \quad (2)$$

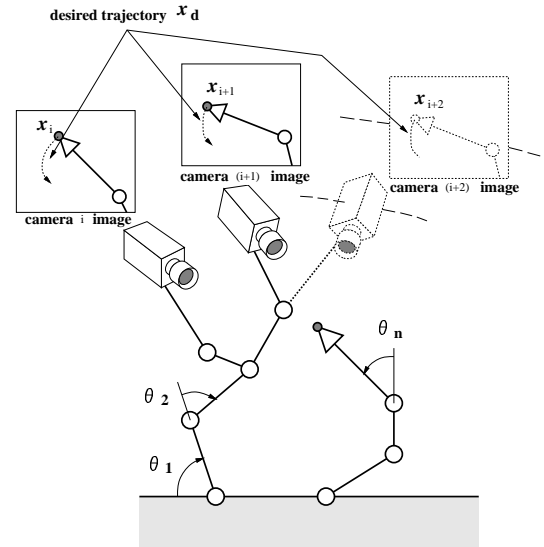


Fig.1 A robot system equipped with visual sensors.

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(2)を満たす推定値の横ベクトル \hat{j}_i^T を以下のように求める。

$$\hat{j}_i(k+1) - \hat{j}_i(k) = \frac{\{x(k+1) - x(k) - \hat{J}(k)u(k)\}_i}{\rho_i + u(k)^T W_i(k)u(k)} W_i(k)u(k) \quad (3)$$

ここで ρ_i は適当な正の定数、 $W_i(k+1)$ は $\hat{j}_i(k)$ の変化に対する重み行列である。

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(2)より、サーボ系として、

$$u(k) = \hat{J}(k)^+ \{x_d(k+1) - x_d(k)\} + \{I_n - \hat{J}(k)^+ \hat{J}(k)\} k_r + K \hat{J}(k)^T \{x_d(k+1) - x(k)\} \quad (4)$$

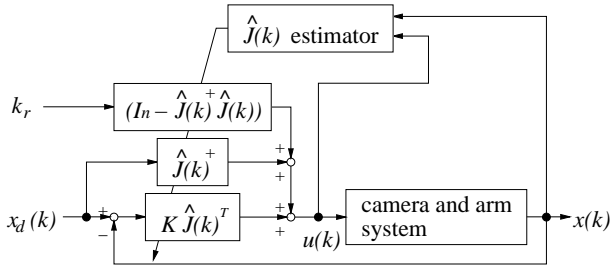


Fig.2 The block diagram of the proposed estimator and visual servoing scheme.

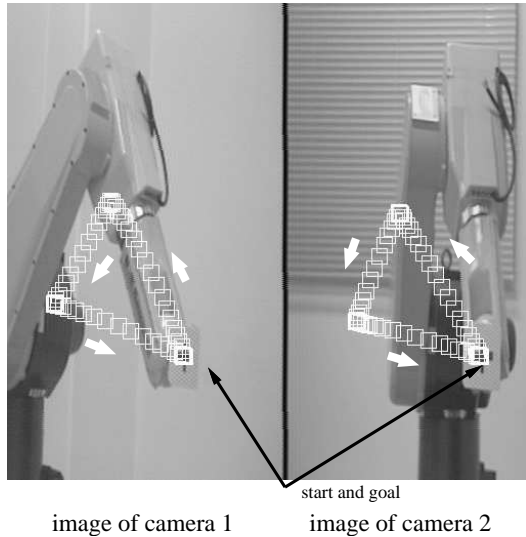


Fig.3 Desired trajectories on the image planes.

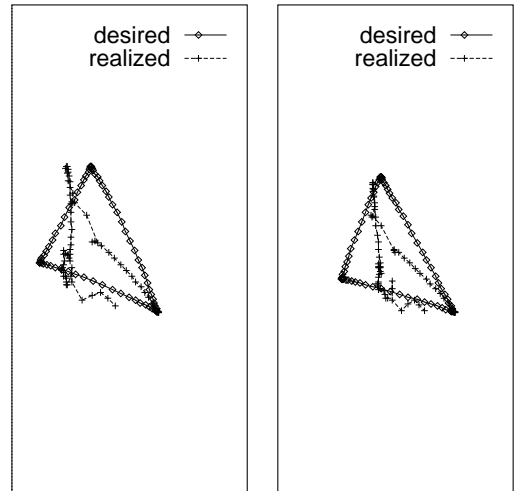
を得る．ここで $\hat{J}(k)^+$ は行列 $\hat{J}(k)$ の疑似逆行列， I_n は $n \times n$ の単位行列， K は正定ゲイン行列である．提案するヤコビ行列の推定則と，ビジュアルサーボ系を組み合わせた制御系を Fig.2 に示す．

3 実験

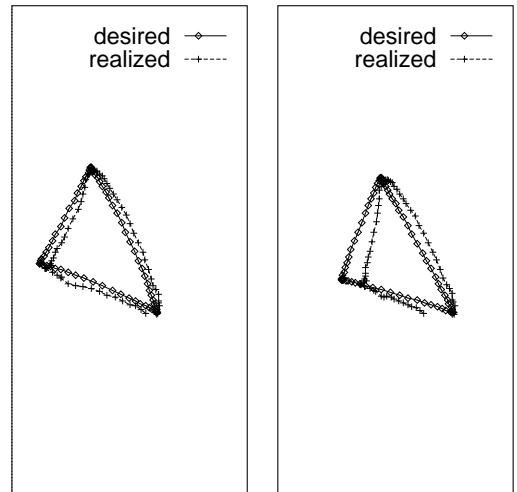
本方法の有効性を検証するために，軌道制御の実験を行った．2台のカメラを床に固定し，ロボットの先端を注視対象とした場合の実験を行った．実際に人間がロボットを動作させ，その画像を取り込むことによって目標画像の系列を得ている．目標軌道を Fig.3 に示す．軌道は 12 [s] 間にわたって与えられており，Fig.3 には 0.2 [s] ごとの軌跡を表示している．システムに対する先験的知識がないとの仮定より，ヤコビ行列の初期値を $\hat{J}(0) = [0.1 \ 0 \ 0; 0 \ 0.1 \ 0; 0 \ 0 \ 0.1; 0 \ 0 \ 0 \ 0.1]$ と適当に決めた． ρ_i 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 (4) のフィードバックゲインを $K = \text{diag} [1.5 \times 10^{-4} \ 1.5 \times 10^{-4} \ 1.5 \times 10^{-4} \ 1.5 \times 10^{-4}] [\text{m}/\text{pixel}]$ とした．画像上の目標軌道と実際の軌道を Fig.4 に示す．フィードフォワード項がない場合に比べ，本方式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

本報告では提案する視覚サーボ系のフィードフォワード項が軌道追従制御に有効であることを実験で検証し



(a) Realized trajectory without feedforward



(b) Realized trajectory with feedforward

Fig.4 Realized trajectories with and without feedforward terms

た．反射的な行動を実現するフィードバック項だけでなく，フィードフォワード項をビジュアルサーボ系に組み込むことにより，目的を持った行動をロボットに遂行させることができると考えられる．目的行動実現のためには，与えられたタスクからこの制御系に対する目標値をいかに生成するかが問題となる²⁾．

参考文献

- 1) K. Hosoda and M. Asada. Versatile Visual Servoing without Knowledge of True Jacobian. In *Proc. of the 1994 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 186–193, 1994.
- 2) K. Hosoda, K. Sakamoto, and M. Asada. Trajectory Generation for Obstacle Avoidance of Uncalibrated Stereo Visual Servoing without 3D Reconstruction. In *Proc. of the 1995 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 29–34, 1995.