

汎用視覚サーボ系によるマニピュレータの障害物回避

Obstacle Avoidance of Manipulators Using Purposive Visual Control

准 細田 耕 (阪大) 准 阪本 健二 (阪大)
正 浅田 稔 (阪大)

Koh HOSODA, Osaka University, 2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka
Kenji SAKAMOTO, Osaka University
Minoru ASADA, Osaka University

This paper describes an adaptive visual servoing controller and a trajectory generator for uncalibrated camera-manipulator systems to realize obstacle avoidance tasks. 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. The trajectory generator utilizes the epipolar constraint to generate the obstacle avoiding trajectory without any a priori knowledge of the environment. An experimental result demonstrates the validity of the proposed schemes.

Key Words : obstacle avoidance, adaptive visual servoing, trajectory generator, epipolar constraint

1 はじめに

未知の環境内でロボットシステムが動作する際、外界の情報を得るために外界センサが必要となる。外界センサの中でも、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ため、環境の観測のために有用である。この意味で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、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⁾。

環境に対する先験的な知識がない場合には、ロボットシステムにとって最も基本的な環境モデルは、センサ空間でのモデルである。特にシステムがカメラを持つ場合には、基本的な環境モデルとして、カメラの画像空間でのモデルを用いるのが自然であると考えられる。したがって、このような場合には画像空間での環境モデルに対して、与えられたタスクを遂行できるようなビジュアルサーボ系、およびタスク計画器が必要になると考えられる。

本報告では、環境やロボットシステムに対する先験的な知識を持たない場合に、画像から得られる情報をもとに、カメラ・マニピュレータシステムに障害物回避タスクを実現させる方法について述べる。まず、画像上で与えられる目標軌道に、マニピュレータの先端を追従させることができるビジュアルサーボ系について述べる。このサーボ系は、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、これを用いたフィードフォワード項を持ち、(1) 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、(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がなく、システムの構造とは無関係に制御系を構成できる、(3) 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) 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、などの特徴を持つ。また、カメラ・マニピュレータシステムに障害物回避タスクを実現させるために、このサーボ系に対しての目標軌道を生成する軌道生成器について述べる。この軌道生成器は、2台のカメラ間の幾何学的関係である、エビポーラ拘束³⁾を用い、環境に対する詳細なモデルを必要としないものである。最後に実験により、提案するシステムが、障害物回避を実現できることを示す。

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ともよい)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)。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、ロボットの運動速度と画像特

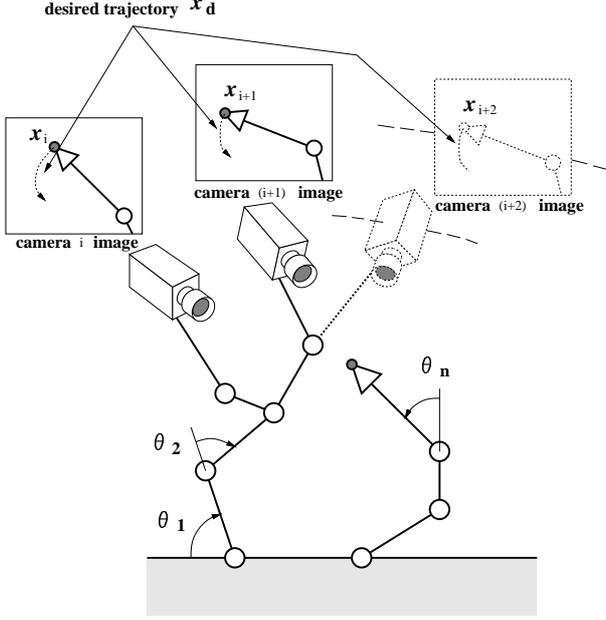


Fig.1 A Robot system equipped with visual sensors.

微量の速度の関係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などは扱わない．

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，速度間の関係式

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

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を示すヤコビ行列である．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 ヤコビ行列の推定則

ロボットやカメラ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，

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

となる．これを満たす 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

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

によって得られる．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，

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

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 $\|\{x(k+1) - x(k) - \hat{J}(k)u(k)\}_i\|$ 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

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

と修正する．ここで ρ_i は適当な正の定数である． $\|u\|$ が十分に大きい時には 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．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，

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

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

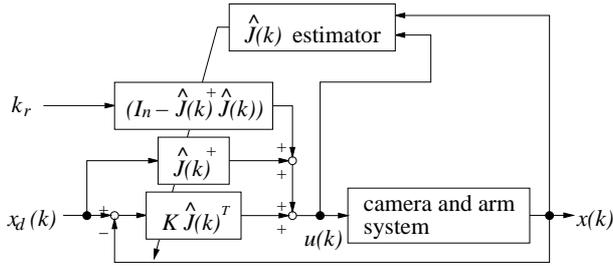


Fig.2 The block diagram of the proposed estimator and visual servoing scheme.

則の右辺第2, 3項は, ヤコビ行列が十分に推定されているときには, 注視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⁴⁾ 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う場合がある. 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 障害物回避のための軌道生成アルゴリズム

ビジュアルサーボ系(8)をシステムに適用する際には, 与えられたタスクを実現する軌道生成が必要となる. 本章では, カメラ・マニピュレータシステムによって, 障害物回避タスクを実現するための, 軌道生成アルゴリズムについて述べる. ここでは, カメラは2台とし, その相対的な位置, 姿勢は固定されているものとする.

3.1 エピポーラ拘束

相対的な位置関係の固定された2台のカメラ画像間には, エピポーラ拘束と呼ばれる幾何学的な拘束が存在する³⁾. p_1, p_2 をある点の画像1, 2上の像の同次座標であるとすると,

$$p_1^T E p_2 = 0, \quad (9)$$

なる拘束がある. ここで E は, カメラの相対的な位置と, 内部パラメータによって構成される行列である. この行列は, 8点以上の対応点がある, 両方のカメラについて与えられれば, 推定できる. ここでは, マニピュレータ先端を追跡することにより, この8点を得る.

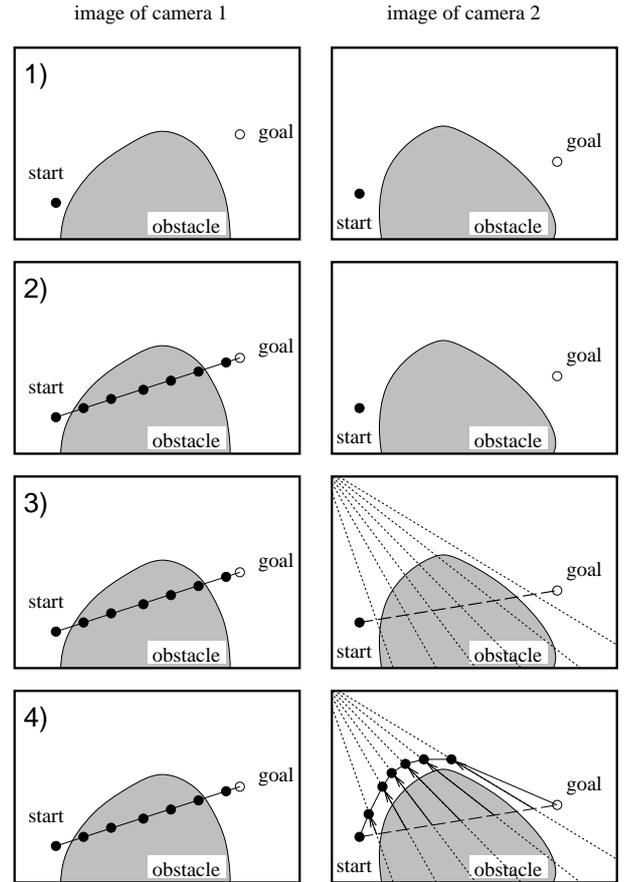


Fig.3 Trajectory generation algorithm to avoid obstacles

3.2 障害物回避軌道生成

基本的には「2台のカメラのどちらかの画像上で, 障害物と干渉していなければ, 3次元空間内においても干渉しない」という考えに基づいている. 障害物回避軌道の生成アルゴリズムを Fig.3 に示す.

1. 障害物を何らかの画像処理により, 背景から検出する.
2. 画像1上で, 軌道が始点と終点を結ぶ直線として与えられる.
3. 前もって推定されているエピポーラ拘束を用い, 対応するエピポーラ直線を画像2上で求める.
4. 求められたエピポーラ直線上を走査することにより, 画像2上で, 障害物回避を実現する軌道を求める.

4 実験

本報告で提案した方法によって, 環境に対する先験的な知識を使わずに障害物回避が実現できることを, 実験により示す.

実験装置の概略を Fig.4 に示す. また, 2つの画像上の障害物とマニピュレータを Fig.5, 背景から抽出された障害物と計画された軌道を Fig.6 に, この目標軌道にビジュアルサーボ系を適用した結果を Fig.7, 8 に示す. 実際のシステムにおいて, 障害物回避タスクが実現されていることがわかる.

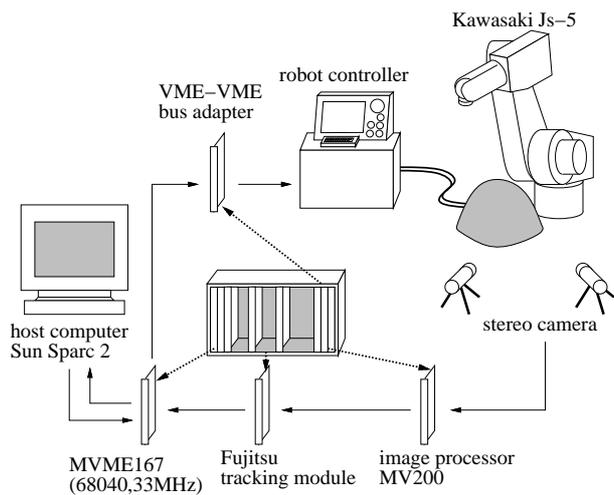


Fig.4 Experimental equipment

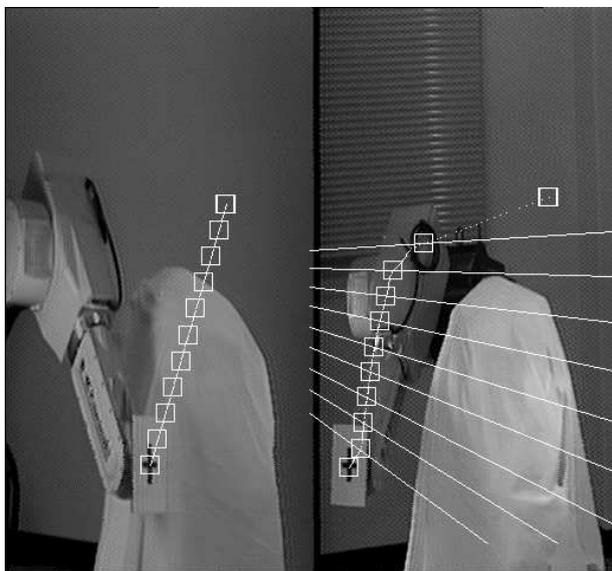
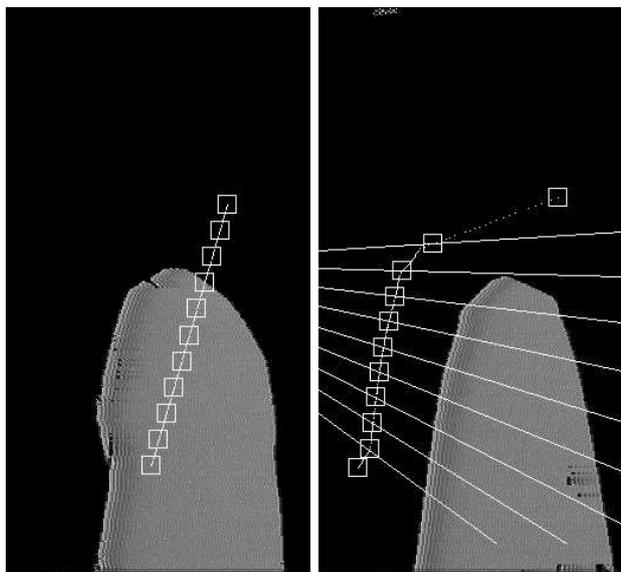


Fig.5 The manipulator and an obstacle in image planes



(a) frame 1

(b) frame 2

Fig.6 Generated desired trajectories in image planes

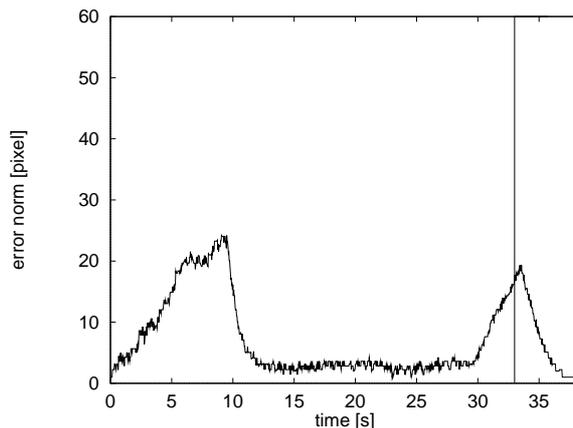


Fig.7 Error norm in image plane 1

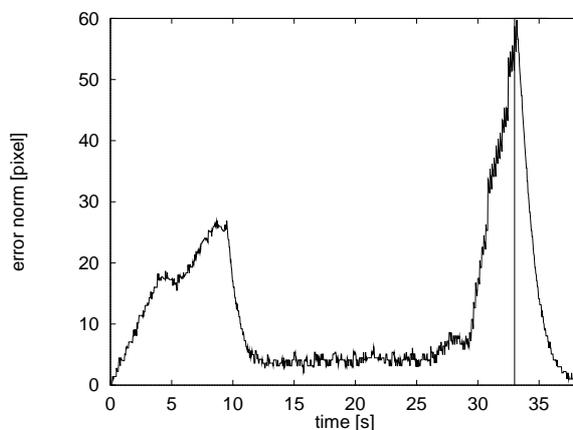


Fig.8 Error norm in image plane 2

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*, pp. 1–31. World Scientific, 1993.
- [3] H. C. Longuet-Higgins. A computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections. *Nature*, Vol. 293, pp. 133–135, 1981.
- [4] 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*, pp. 2267–2272, 1991.
- [5] G. D. Hager. Real-Time Feature Tracking and Projective Invariance as a Basis for Hand-Eye Coordination. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 533–539, 1994.