

ズーム機構を持つビジュアルサーボ系の構成

○森山 斉 細田 耕 浅田 稔
大阪大学工学部

Visual Servoing System utilizing Zoom Mechanism

○Hitoshi MORIYAMA Koh HOSODA Minoru ASADA
Osaka University

1 はじめに

未知あるいは動的な環境内で、与えられた作業を遂行するロボットシステムを構成するために視覚センサの果たす役割は重要であり、近年ではフィードバックループに視覚センサを組み込んだ制御系(ビジュアルサーボ系)について多くの研究例がある。

ロボットの視覚センサの代表例であるカメラは、焦点距離の制御を行なえるズーム機構を持っている場合がある。従来の研究では、この焦点距離を動的に制御する方法は提案されていない。

本報告では、“ズーム機構による画像上での可動範囲はロボットの動きによる画像上の可動範囲に比べて大きい。また一般的にカメラのズーム機構による画像上での特徴点の速度は、ロボットによる画像上での特徴点の速度に比べて遅い。”ことに注目し、このようなズーム機構とロボットの特性を考慮したズーム機構を持つビジュアルサーボ系の構成について提案する。

2 ズーム機構を持つビジュアルサーボシステム

2.1 ズーム機構とマニピュレータの特性

ズーム機構を持つビジュアルサーボ系を、Fig.1に示す。

一般にズーム機構とマニピュレータには以下のような特徴がある。

[特徴1] 焦点距離 f の変化による画像上の特徴点の速度は、マニピュレータの関節角速度 θ による特徴点の速度に比べて遅い

[特徴2] 焦点距離 f による画像上の特徴点の可動範囲は、マニピュレータにより実現できる特徴点の可動範囲に比べて大きい

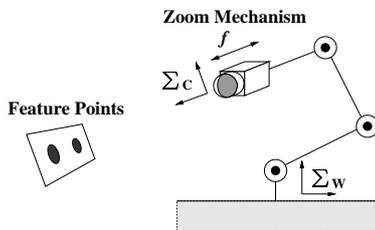


Fig.1 Visual Servo System with Zoom Mechanism

このようなシステムの場合、マニピュレータが位置決めのために必要十分な自由度を持っていたとすると、ズーム機構とマニピュレータの自由度を合わせると、全体として冗長系とみなすことができる。そこで上で

挙げたような特徴を生かした制御則を用いることにより、対象物を見失いにくいビジュアルサーボ系を構成することが考えられる。

2.2 画像に関するヤコビ行列

Fig.2に示すように、カメラの中心にカメラ座標系原点をとる。対象物体の m 個の特徴点 $p_k (k = 1, \dots, m)$

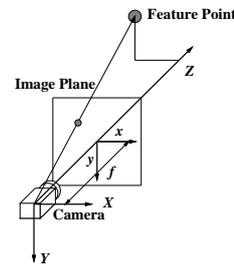


Fig.2 Model of Camera

を考え、その画像上の点を ${}^I p_k = [x_k \ y_k]^T$ とする。これら m 個の特徴点の画像上の座標をまとめて特徴点ベクトル ${}^I p \in \mathbb{R}^{2m}$ を以下のように定義する。

$${}^I p = [x_1, y_1, \dots, x_m, y_m]^T \quad (1)$$

この時、 ${}^I \dot{p}$ とサーボ系の関節変位ベクトル $\theta \in \mathbb{R}^n$ とズーム機構の焦点距離 f の間には

$${}^I \dot{p} = J_\theta \dot{\theta} + J_f \dot{f} \quad (2)$$

で表される関係がある。ここで $J_\theta \in \mathbb{R}^{2m \times n}$ 、 $J_f \in \mathbb{R}^{2m \times 1}$ は画像特徴量と関節速度、ズーム速度の間関係を記述するヤコビ行列であり、特徴点が1点で、6自由度マニピュレータの場合、 J_θ 、 J_f は

$$J_{\theta k} = \begin{bmatrix} -f \frac{1}{Z} & 0 & \frac{x_k}{Z} & \frac{x_k y_k}{f} & -\frac{x_k^2 + f^2}{f} & y_k \\ 0 & -f \frac{1}{Z} & \frac{y_k}{Z} & \frac{y_k^2 + f^2}{f} & -\frac{x_k y_k}{f} & -x_k \end{bmatrix}$$

$$J_{f k} = \begin{bmatrix} \frac{x_k}{f} & \frac{y_k}{f} \end{bmatrix}^T$$

となる。ここで Z は、カメラから特徴点までの距離である。

3 制御則

ズーム機構とマニピュレータの冗長性と特性を考慮して、画像特徴量と焦点距離速度が以下のような挙動を示す制御系を考える。

$${}^I \dot{p} + K {}^I p_e = 0 \quad (3)$$

$$\dot{f} + K_f f_e = 0 \quad (4)$$

ここでの正定ゲイン行列 K 、 K_f の値を適当に与えることによって、マニピュレータの関節速度入力 $\dot{\theta}$ と、焦点距離速度 \dot{f} の特徴を考慮した制御が可能となる。

また ${}^I p_e = {}^I p - {}^I p_d$, $f_e = f - f_d$ で, ${}^I p_d$ は, 画像特徴量の望みの位置, f_d は, 焦点距離の望みの位置である. この f_d は, マニピュレータが望ましい姿勢になった時の焦点距離とする.

式 (4) より, f の入力 \dot{f} は

$$\dot{f} = -K_f f_e \quad (5)$$

と与えられる. 式 (2), (5) より, 制御入力

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= -J_{\theta}^+ (K^I p_e + J_f \dot{f}) \\ &= -J_{\theta}^+ (K^I p_e - J_f K_f f_e) \end{aligned} \quad (6)$$

が与えられる. ここで, J_{θ}^+ は行列 J_{θ} の疑似逆行列である.

4 実験

Fig.3 に示すようなシステムを用いて実験を行なった. 本実験では, ロボットは手先が並進3自由度を持

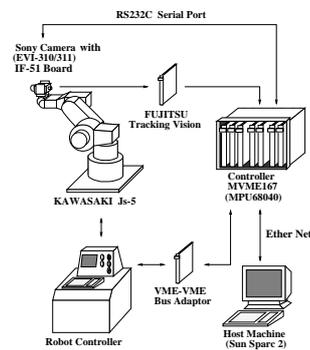


Fig.3 Experimental System

つものとし, 特徴点ベクトルは対象物体上の2点の特徴点中心の xy 座標とした. したがって $\theta \in \mathbb{R}^3$, ${}^I p \in \mathbb{R}^4$ となる. タスクは画像上の特徴点が望みの出力となるようにマニピュレータとカメラを制御することであり, システムにステップ目標値を与えた.

マニピュレータの初期値において特徴ベクトル (pixel) を

$$\begin{aligned} {}^I p &= [x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2]^T \\ &= [112 \ 224 \ 392 \ 292]^T \end{aligned}$$

とし, 時刻 $t = 0$ にステップ上の目標値

$$\begin{aligned} {}^I p_d &= [x_{1d} \ y_{1d} \ x_{2d} \ y_{2d}]^T \\ &= [40 \ 160 \ 352 \ 232]^T \end{aligned}$$

を与えた. また f の初期値は $14.12(mm)$ であるとした.

式 (3) のゲイン行列 K は

$$K = \text{diag} \begin{bmatrix} 4.0 \times 10^{-2} & 4.0 \times 10^{-2} \\ 4.0 \times 10^{-2} & 4.0 \times 10^{-2} \end{bmatrix}$$

と決めた.

ここでは, 次の2つの場合について実験を行なった.

[ケース 1] 式 (4) における K_f の指定を $K_f = 0$ とした場合. (ズーム機構を持たない通常のビジュアルサーボ系に相当する.)

[ケース 2] 式 (4) における K_f の指定を $K_f = 1.0 \times 10^{-2}$ とした場合. f_d は, マニピュレータが望みの目標値 (初期値) になるように決めた.

Fig.4 に2点の内の一つの特徴点についての誤差ノルムを示す. また Fig.5 に焦点距離の変化, マニピュレータの手先の基本座標系からの xyz 座標 (ただし方向はカメラの軸と一致させる) の位置を示す.

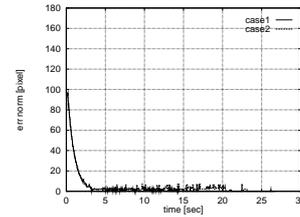


Fig.4 Experimental Result (Error norm)

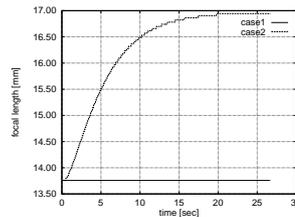


Fig.5(a) Focal Length

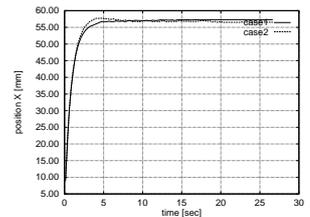


Fig.5(b) Position (X)

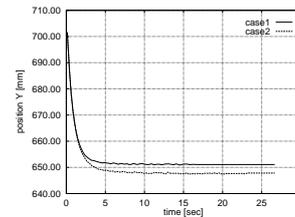


Fig.5(c) Position (Y)

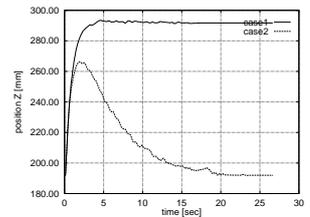


Fig.5(d) Position (Z)

Fig.5 Experimental Results (Position)

Fig.4 をより画像特徴量が目標値に収束していることがわかる.

また, Fig.5(a), Fig.5(d) をみるとステップ上の目標値に対して, 速度の速いマニピュレータが最初に大きく移動し, その後ズーム機構を用いて, マニピュレータを望みの位置 (初期値) に戻るようによく移動していることがわかる.

5 考察と今後の課題

本報告では, 実際のカメラが持つ特徴を考慮したズーム機構を持つビジュアルサーボ系の構成について考え, 実験によりその有効性を示した.

今回では, 冗長ビジュアルサーボ系の冗長性の利用として, マニピュレータの姿勢が望みの目標値 (初期値) になるように制御を行なったが, これはセンサの位置配置の問題¹⁾ にも関係してくると思われる. 今後は, それらについても検討する予定である.

参考文献

- [1] Brad Nelson and Pradeep K.Khosla. "Integrating Sensor Placement and Visual Tracking Strategies". In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1351-1356, 1994.