

未校正カメラを用いた視覚サーボ系の一設計

6P-02

森田 正彦 東京電機大学理工学部

1 はじめに

カメラを搭載したロボットに対して、目標画像を与えることで、その画像が得られる位置・姿勢へ誘導することを視覚サーボという。

従来の研究では、ロボットの運動は 2 次元の平面のみと制限されていた [1]。

本論文はロボットの運動を 3 次元空間に拡張し、カメラから得られた画像のみの情報を用いてロボットを視覚誘導する。ただし、ロボットはあらかじめ校正されたロボットアーム "MITUBISHI PA-10A-ARM" を用い、その並進の方向は一方方向のみとする。また、カメラはピンホールカメラで未校正であるとし、その回転と並進の中心はアームの回転と並進の中心に等しく、カメラとアームの Z 軸は一致しているものと仮定する。

2 カメラモデルとロボットモデル

2.1 カメラモデル

3 次元空間中にすべての基本となるワールド座標系があるとする。

カメラ座標系はワールド座標系を $\mathbf{R}$ だけ回転させた後、 $\mathbf{T}$ だけ並進させたものとする。ワールド座標系上の点 ${}^W\mathbf{X}$ と、実際に画像として得られる点 $\mathbf{m}$ には次のような関係がある。

$$\lambda \tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{P} {}^W\tilde{\mathbf{X}} \quad (1)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T\mathbf{T} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{m}}$ は $\mathbf{m}$ の同次座標、 λ は同次座標による定数倍の不定性、 $\mathbf{A}$ はカメラが得た画像の倍率、歪、中心位置などの情報を含んだ 3×3 行列である。

この $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$ が未知であるカメラを未校正カメラという。

2.2 ロボットモデル

本研究では 7 つの関節をもった "MITUBISHI PA-10A-ARM" を使用する。このロボットアームは校正されており、`pa_mov_ypr` 関数を用いることで回転、`pa_mov_xyz` 関数を用いることで並進ができる [2]。し

たがって本論文ではロボットアームの制御については述べない。

3 視覚サーボの設計

本論文ではロボットアームが持っている 3 次元の情報を用いず、画像から得られた情報のみを用いて 4 つのステップに分けて視覚サーボを実現する。

3.1 並進の方向を求める

2 枚の画像内において 8 点の対応が得られた場合、2 つのカメラの相対的な位置、姿勢の情報はエビポール幾何学から Fundamental 行列 $\mathbf{F}$ として求まる [3]。また $\mathbf{F}$ から得られるエビポールは 2 つのカメラの相互的な位置を示している [1]。

並進後と前の画像から得られたエビボール $\mathbf{e}, \mathbf{e}'$ はロボットの並進方向をカメラに投影したものである。これを $\mathbf{m}_v = [m_u, m_v]^T$ とする。

3.2 並進の方向を目標位置 $\mathbf{T}_F$ へ向ける

$\mathbf{Im}_C$ と $\mathbf{Im}_F$ からエビボール $\mathbf{e} = [e_u, e_v]^T$ を求め、その差を次のように置く。

$$\Delta m = \sqrt{(e_u - m_u)^2 + (e_v - m_v)^2} \quad (3)$$

初めに X 軸、次に Y 軸の順でロボットアーム回転し、 Δm を 0 に近づける。

3.3 目標位置 $\mathbf{T}_F$ まで並進する

2 つのカメラが同じ位置にいるとき、画像上の点 $\mathbf{m}, \mathbf{m}'$ には平面射影変換の関係がある。

$$\tilde{\mathbf{m}}' = \mathbf{H} \tilde{\mathbf{m}} \quad (4)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}' \mathbf{R}'^T \mathbf{R} \mathbf{A} \quad (5)$$

$\mathbf{H}$ を平面射影変換行列という。 $\mathbf{H}$ は 4 点の対応点があれば求めることができる [4]。したがって $\mathbf{H}$ と $\mathbf{m}$ から計算によって求めた $\tilde{\mathbf{m}}'$ と実際に画像から得られる $\mathbf{m}'$ の差を次のように置き、

$$\Delta H = \sum_{i=0}^n \sqrt{(u'_i - \hat{u}'_i)^2 + (v'_i - \hat{v}'_i)^2} \quad (6)$$

これが0に最も近づいたとき目標位置 T_F に最も近づいている。

3.4 目標姿勢 R_F まで回転する

式 (12) より、2つのカメラの姿勢が等しければ $H = I$ である。したがって、

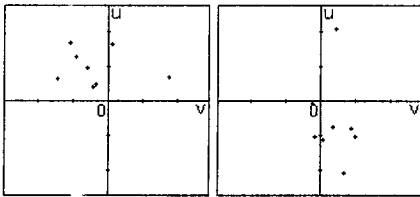
$$\Delta I = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sqrt{(\delta_{ij} - h_{ij})^2} \quad (7)$$

として ΔI が最小になるように X 軸、Y 軸、Z 軸の順に回転していく。

4 数値シミュレーション

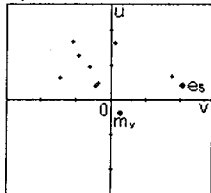
3次元空間中の8点:

$$\begin{aligned} X_1 &= [50, 50, 80]^T, & X_2 &= [90, -90, 100]^T, \\ X_3 &= [50, -50, 120]^T, & X_4 &= [120, -110, 100]^T, \\ X_5 &= [90, -80, 130]^T, & X_6 &= [130, -30, 110]^T, \\ X_7 &= [40, -100, 90]^T, & X_8 &= [40, -50, 110]^T. \end{aligned}$$



the current image at C0 the final image at C5

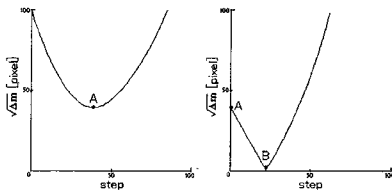
■step-1



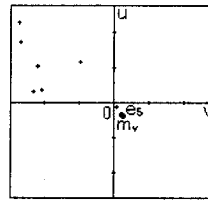
the image in step1

$$m_v = \begin{bmatrix} -20.47 \\ 14.57 \end{bmatrix}$$

■step-2



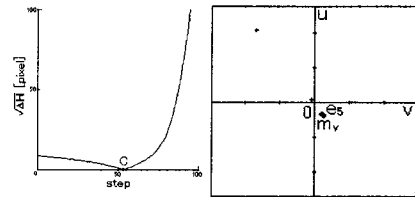
Δm about the X-axis Δm about the Y-axis



the image in step2

Δm は 5.36pixel であった。

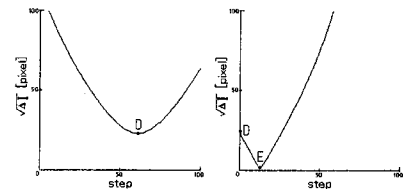
■step-3



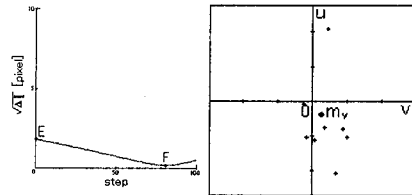
Response of ΔH the image in step3

ΔH は 0.14pixel であった。

■step-4



ΔI about the X-axis ΔI about the Y-axis



ΔI about the Z-axis the image in step4

参考文献

- [1] 佐藤岳晴, 佐藤淳, "未校正カメラによる未校正ロボットの視覚サーボ", vol.J83-D-II, no.4, pp.1110-1118, 2000.
- [2] "PA-10A-ARM Manuals", MITUBISHI, 2000.
- [3] 佐藤淳, "コンピュータビジョン—視覚の幾何学", コロナ社, 1999.
- [4] M.Morita, S.Uchikado, "On Design of Visual Servoing using an Uncalibrated Camera and a Calibrated Robot", ICCAS2001, pp.24-27, 2000.