

ステレオ視覚フィードバックによる物体のハンドリング制御

北海道大学工学部 ○大部 一俊 近藤 司 金子 俊一 五十嵐 悟

要旨

本研究の目的は、多軸ロボットで対象物をハンドリング制御する際に、ステレオカメラで捉えた画像情報を用いてフィードバックコントロールを行うための画像特徴点の運用、および特徴空間同士の関係を明らかにすることである。これを実現するシステムの基本構成について述べ、併せて画像面上における特徴点の測定精度についての基本的実験を行い、その結果について報告する。

1. はじめに

自律的マシンの制御を行う際に画像パターン情報は欠かせないものの一つとなっている。そのためのアプローチとして、画像特徴をマニピュレータのフィードバックに利用しようとした際には、特徴点の取り方と運用において安定かつ継続的に3次元空間内の対象物の運動を把握できることが要求されており、対象物の回転運動により特徴点が隠れいされたり、新たに生成されたりといった状況に対処できる手法が必要となっている。

このような問題に対して我々は「MDKF」と呼ぶロバストな運動推定機構[1]を提案しており、それを利用したステレオ視覚フィードバックに基づくロボット制御システムの開発研究を行っている。このシステムは、カメラ、マニピュレータ、対象物の配置だけでなく、対象物の姿勢や軌道の修正に対しても柔軟性を持つ。今回はその基本構成、定式化、更に較正処理などを述べる。また微小運動を仮定した場合の軌道追従実験について報告する。

2. 単眼カメラを用いた実験モデル

ステレオカメラモデルを扱う前に、単眼カメラにより基礎実験を行った(図1)。ここでは、測定を行う CCD カメラ (SONY 製 XC-711RR) は6軸ロボットマニピュレータ (FANUC 製 ROBOT S MODEL 5) のエンド部に固定されている。

2.1 単眼カメラモデルの概要

図1のような透視投影変換を用いたピンホールカメラモデルを考える。

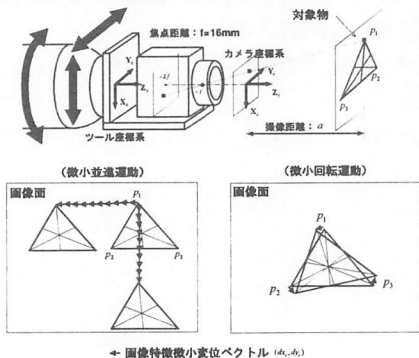


図1 単眼カメラモデルと微小変位

ここで画像特徴、ツール座標、マニピュレータの関節角の各特徴空間における微小変位ベクトルを次のように定義する。

$$dp_c = [dx_{c1} \ dy_{c1} \ dx_{c2} \ dy_{c2} \ \dots \ dy_{cn}]^T$$

: 画像特徴微小変位ベクトル [pixel]

$$dc_6 = [dx_6 \ dy_6 \ dz_6 \ d\theta_6 \ d\phi_E \ d\psi_E]^T$$

: (第6軸の) 微小変位ベクトル

$$d\Theta = [d\theta_1 \ d\theta_2 \ d\theta_3 \ d\theta_4 \ d\theta_5 \ d\theta_6]^T$$

: 微小関節角変位ベクトル

これらの特徴空間どうしは、

$$dp_c = J_V dc_6 = J_V \cdot J_M d\Theta \tag{2.1}$$

の線形関係を持つ。ただし、 J_V は画像ヤコビ行列 ($n \times 6$)、 J_M はアームヤコビ行列 (6×6) である。たとえば、カメラの運動が画像面に平行な場合には、 $X_c - Y_c$ 方向への微小並進運動のとき

$$dp_c = J_{VS} dc_6$$

$$\begin{bmatrix} dx_c \\ dy_c \end{bmatrix} = J_{VS} \begin{bmatrix} dx_6 \\ dy_6 \end{bmatrix} = -\frac{1.2 \times 10^3}{a+16} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_6 \\ dy_6 \end{bmatrix} = g(a) \begin{bmatrix} dx_6 \\ dy_6 \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

Z_6 軸まわりの微小回転運動のとき1次近似により、

$$dp_c = J_{VR\phi} dc_6$$

$$\begin{bmatrix} dx_c \\ dy_c \end{bmatrix} = J_{VR\phi} d\phi_E = \begin{bmatrix} y_c + b_{6c} \\ -(x_c + a_{6c}) \end{bmatrix} d\phi_E \tag{2.3}$$

となる。

2.2 特徴量の精度の検証

式(2.2)、(2.3)に基づき画像面上でのレンズ中心の位置、及び回転軸の位置などの基本的なパラメータについて較正した。次に、撮像距離 $a=300, 500$ [mm]について、カメラを微小回転、並進運動させた際の画像特徴微小変位ベクトルを測定し、式(2.2)、(2.3)から得られる理論値と比較した(表1)。この結果から、これらの運動に関する微小線形近似及び

表1 画像特徴微小変位ベクトルの比較[pixel] (0.5mmピッチで動かした場合)

		撮像距離 a [mm]	
		300	500
dp_c	理論値 式(2.2)より算出	1.9	1.2
	実測値 (X_c 方向) (30点測定の平均)	2.1	1.3

ヤコビ行列などは妥当であるといえる。

3. ステレオ視覚フィードバックの基本構成

3.1 ステレオカメラモデル

図2にステレオカメラの座標系の定義を示す。2台のカメラは光軸周りの回転がないものとし、また同一平面内にレンズ中心と光軸を持つ。特徴点 P の位置はカメラ座標系で、

$$P: \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\tan \phi}{\cos(\theta_L + \theta_L')} z \\ \frac{\sin(\theta_L + \theta_L' + \theta_R + \theta_R')}{\sin(\theta_L + \theta_L' - \theta_R - \theta_R')} L \\ \frac{2L}{\tan(\theta_R + \theta_R') - \tan(\theta_L + \theta_L')} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

となる。ただし、

$$\theta_L' = \arctan\left(\frac{y_L \cdot q_y}{f}\right), \theta_R' = \arctan\left(\frac{y_R \cdot q_y}{f}\right), \phi = \arctan\left(\frac{x_L \cdot q_x \cos \theta_L'}{f}\right) \quad (3.2)$$

であり、 q_x, q_y はそれぞれ垂直、水平方向の量子化幅 (単位: [mm/pixel]) である。

3.2 特徴点と撮像の微小変化関係

図3に視覚フィードバックを用いたシステムのモデルを示す。まず、制御対象物A、ゴール座標系、及び世界座標系 (ここではマニピュレータの基台に原点を固定) が見込める位置にカメラをセットする。カメラ座標系から見た世界座標系の位置と姿勢を表す変換行列を ${}^c T_w$ とする。世界座標系の各軸に沿って特徴点 P を動かし、カメラ座標系における変化量を測定する。これらを正規化、直交化したものをそれぞれ $\Delta^c P_x, \Delta^c P_y, \Delta^c P_z$ とし、カメラ座標系から見た、ランドマークを取り付けた世界座標系の原点位置を ${}^c O_{CW}$ とすると、

$${}^c T_w = \begin{bmatrix} \Delta^c P_x & \Delta^c P_y & \Delta^c P_z & {}^c O_{CW} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

と表すことができる。

また、特徴点 P をカメラ座標系、世界座標系、対象物座標系で表し、 ${}^c P, {}^w P, {}^A P$ とすると、

$${}^c P = {}^c T_w P = {}^c T_w {}^w T_A {}^A P = {}^c T_A {}^A P \quad (3.4)$$

が成り立つ。 ${}^w T_A, {}^c T_A$ はそれぞれ世界座標系、カメラ座標系からの対象物座標系への変換行列である。

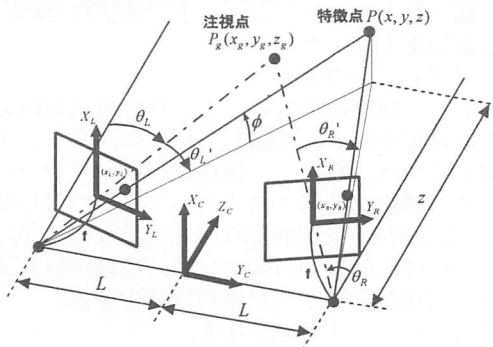


図2 ステレオカメラモデル

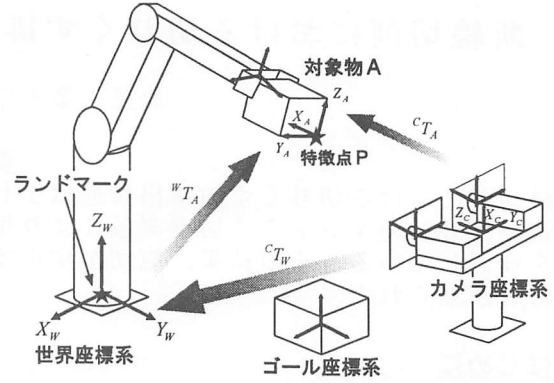


図3 ステレオ視覚フィードバックの構成
 ${}^c T_A$ の成分を、

$${}^c T_A = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

とする。また、 i 座標系における微小回転・並進変換ベクトルを

$$\begin{cases} \mathbf{d}_i = d_x \mathbf{i} + d_y \mathbf{j} + d_z \mathbf{k} \\ \delta_i = \delta_x \mathbf{i} + \delta_y \mathbf{j} + \delta_z \mathbf{k} \end{cases} \quad (3.6)$$

とすると、以下のようにヤコビ行列 J を用いてカメラ座標系から見た対象物の微小変位量 \mathbf{d}_c と対象物座標系から見た \mathbf{d}_A を関係づけることができる。

$$\mathbf{d}_A = J \mathbf{d}_c \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} {}^A d_x \\ {}^A d_y \\ {}^A d_z \\ {}^A \delta_x \\ {}^A \delta_y \\ {}^A \delta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & (p \times n)_x & (p \times n)_y & (p \times n)_z \\ o_x & o_y & o_z & (p \times o)_x & (p \times o)_y & (p \times o)_z \\ a_x & a_y & a_z & (p \times a)_x & (p \times a)_y & (p \times a)_z \\ 0 & 0 & 0 & n_x & n_y & n_z \\ 0 & 0 & 0 & o_x & o_y & o_z \\ 0 & 0 & 0 & a_x & a_y & a_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c d_x \\ {}^c d_y \\ {}^c d_z \\ {}^c \delta_x \\ {}^c \delta_y \\ {}^c \delta_z \end{bmatrix}$$

式(3.7)は次のように用いることができる。

- (1) 較正処理：世界座標系内のカメラ座標系の位置・姿勢 (行列 ${}^c T_w$) を推定する。
- (2) 時間対応処理：式(2.1)も用いて、対象物の微小運動を推定することにより、よりロバストなハンドリング制御を実現する。

4. まとめ

ステレオ視覚フィードバックに基づく制御システムの基本構成などを述べた。較正処理およびステレオ計算を実装中であり、今後の課題としては、その定量的評価および基本的な追従制御実験を行うことが挙げられる

[参考文献]

- [1] 金子俊一、堀内一仁、本多庸悟：“多重分散カルマンフィルタによる3次元運動推定” 電子情報通信学会論文誌 '96/5 Vol. j79-D-II No.5
- [2] 金子俊一、大町洋正、本多庸悟：“両眼視奥行き計算への顕著度エントロピーに基づくエッジセグメントグループの構造化の導入”、電子情報通信学会論文誌 '92/10 Vol. j75-D-II No.10