

基于单应性矩阵的机器人视觉伺服系统研究

丁建华, 姚明海*, 赵 瑜
(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 针对在视觉伺服过程中采用图像雅克比矩阵方法时遇到的对目标深度信息的求取等问题, 并为了进一步扩大机器人的运动空间, 设计了一种基于单应性矩阵的视觉控制器应用于视觉伺服控制系统。通过摄像机针孔模型求解出该单应性矩阵后, 对其进行奇异值分解, 得到了机器人控制器的输入, 从而实现了机器人的控制; 该控制策略运用 Matlab/Simulink 仿真软件, 并结合在机器人学领域中被广泛采用的机器人工具箱, 构建了基于图像的视觉伺服系统仿真模型, 并选取一长方体表面上的4个角点作为目标物体进行了仿真抓取实验。研究结果表明, 该视觉控制器使整个控制系统具有较强的稳态特性和较高的控制精度, 图像特征点从当前位置运动到了期望位置, 误差最终收敛于零, 具有较好的控制效果。

关键词: 机器人视觉伺服系统; 单应性矩阵; 图像雅克比矩阵; 摄像机针孔模型

中图分类号: TP242 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)12-1485-05

Study of visual servoing system of robot based on homography matrix

DING Jian-hua, YAO Ming-hai, ZHAO Yu

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at getting the depth information in image Jacobian matrix and enlarging robot's application area in visual servoing system, a visual controller was designed based on the homography matrix. Then the singular value decomposition was executed after getting the homography matrix according to camera pinhole model, and the answer was as the input of the robot. A visual servoing simulation model was established, combined with robotics toolbox for Matlab and Simulink. Four peaks of a cuboid were selected as a target object. The results indicate that, by using this controller, image feature points have finally reached the desired position and the error has tended to zero, the steady-state characteristics and control precision of the system are made robust, so that an ideal control effect could be achieved.

Key words: visual servoing system of robot; homography matrix; image Jacobian matrix; camera pinhole model

0 引 言

近年来, 机器人系统为智能控制、人工神经网络、现代控制理论的发展提供了重要的空间, 特别是引入视觉信息后, 在很大程度上扩大了机器人的应用范围并提高了其灵活性。机器人视觉伺服在未来机器人发展方向中具有广阔的应用前景。机器人视觉伺服是指通过光学的装置和非接触的传感器自动地接收和处理目标物体图像, 通过图像反馈的信息让机器人对目标物体做进一步控制或相应的自适应调整的行为。视觉信息不仅包含了极其丰富的信息量, 而且能够实现非

接触地感知周边环境, 在机器人的视觉伺服、海洋开发、国防军事以及航空器等应用领域具有重大的研究意义。机器人视觉伺服系统有很多种不同的分类方法, 根据反馈信息不同可分为: 基于图像的视觉伺服控制 (IBVS)、基于位置的视觉伺服控制 (PBVS) 以及基于位置和图像的混合视觉伺服控制 (HVS)^[1], 等等。

基于图像的视觉伺服控制, 其控制误差定义在图像空间中, 避开了机器人的位姿估计, 有效地克服了计算延迟, 忽略了摄像机定标模型点估计误差, 具有较强的稳定性^[2-3]。因此, 本研究采用基于图像的视觉伺服控制系统, 该系统采用双闭环结构, 其中外环为

收稿日期: 2012-07-17

作者简介: 丁建华(1987-), 男, 安徽亳州人, 主要从事机器人视觉伺服方面的研究。E-mail: dingjianhua10501@163.com

通信联系人: 姚明海, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: ymh@zjut.edu.cn

机器人视觉伺服控制,控制机械臂关节角的设定;内环为机器人关节伺服控制,对机械臂末端执行器进行轨迹跟踪;该系统将从图像中提取的视觉信息特征作为反馈环节,对机械臂末端执行器进行位姿闭环控制^[4]。

然而,基于图像的视觉伺服控制系统需要实时估算图像雅可比矩阵(表示图像特征与机械手位姿变换关系的矩阵),并计算其逆矩阵;而且,图像雅可比矩阵方法在视觉伺服过程中需要对目标深度信息进行估计,还可能会出现奇异点及其他局部线性化缺陷等等,解决这些问题具有很大的难度。

在基于图像的控制方式的前提下,本研究设计一种基于单应性矩阵的视觉控制器,在 Matlab/Simulink 环境下建立系统仿真模型,并完成机械手末端执行器对目标物体的定位仿真试验。

1 视觉控制器的构建

1.1 单应性矩阵的原理

本研究构建的摄像机几何成像图如图1所示,称为摄像机针孔模型^[5-8], P 为空间平面 S 上的一点, C, C^* 分别是当前位置和期望位置的摄像机坐标系, L_p, L_p^* 是采用物理单位(如:mm)表示的成像平面坐标系, L, L' 是采用像素单位表示的图像坐标系。设点 P 在 C 中的坐标为 $\Gamma = [X_c Y_c Z_c]$,在 L_p 中的齐次坐标为 $p = [x \ y \ 1]$,在 L 中的像素坐标为 $x = [u \ v \ 1]$,用 Γ^*, p^*, x^* 表示当摄像机到达期望位置时点 P 在各期望坐标系中的坐标。

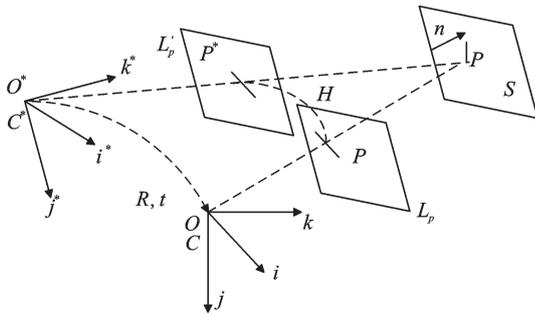


图1 摄像机模型

设空间中平面 S 的方程为:

$$n^T \Gamma = d \tag{1}$$

式中: d —摄像机光心 O 到平面 S 的距离, n —平面 S 的单位法向量。

令 R, t 分别表示摄像机坐标系 C, C^* 之间的旋转和平移矩阵,则 Γ^*, Γ 有如下关系式:

$$\Gamma^* = R\Gamma + t \tag{2}$$

根据摄像机成像原理可以知道:

$$p = \frac{\lambda}{Z_c} \Gamma \tag{3}$$

$$p^* = \frac{\lambda}{Z_c^*} \Gamma^* \tag{4}$$

$$x = Kp \tag{5}$$

$$x^* = Kp^* \tag{6}$$

式中: K —摄像机的内部参数矩阵, $K = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$;

λ —摄像机焦距。

由式(1~4)可得:

$$\frac{Z_c^*}{Z_c} p^* = (R + \frac{tn^T}{d}) p \tag{7}$$

令:

$$\sigma = \frac{Z_c^*}{Z_c}$$

$$H = R + \frac{tn^T}{d}$$

则式(7)等价于:

$$\sigma p^* = H p \tag{8}$$

式中: σ ——未定的比例常数, H ——一个 3×3 的矩阵,称为两幅图像平面之间的单应性矩阵。

由式(5~8)可得到如下关系式:

$$\sigma x^* = M x \tag{9}$$

其中: $M = KHK^{-1}$,并且也是一个 3×3 的矩阵,称为两幅图像平面之间的映射单应性矩阵,为了求取 M ,需要知道图像平面上的4个点,求解方法如下:

$$\text{令 } M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}, m_{33} = 1, \text{取特征点 } (u_1, v_1),$$

可以得到以下关系式:

$$u_1^* = m_{11}u_1 + m_{12}v_1 + m_{13} \tag{10}$$

$$v_1^* = m_{21}u_1 + m_{22}v_1 + m_{23} \tag{11}$$

$$1 = m_{31}u_1 + m_{32}v_1 + 1 \tag{12}$$

将式(12)分别乘以 u_1^*, v_1^* 后,代入式(10)和式(11)中,可得:

$$\begin{cases} u_1^* = m_{11}u_1 + m_{12}v_1 + m_{13} - m_{31}u_1u_1^* - m_{32}v_1u_1^* \\ v_1^* = m_{21}u_1 + m_{22}v_1 + m_{23} - m_{31}u_1v_1^* - m_{32}v_1v_1^* \end{cases} \tag{13}$$

运用同样方法可求得 $u_2^*, v_2^*, u_3^*, v_3^*, u_4^*, v_4^*$ 的表达式如下:

$$\begin{cases} u_2^* = m_{11}u_2 + m_{12}v_2 + m_{13} - m_{31}u_2u_2^* - m_{32}v_2u_2^* \\ v_2^* = m_{21}u_2 + m_{22}v_2 + m_{23} - m_{31}u_2v_2^* - m_{32}v_2v_2^* \end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases} u_3^* = m_{11}u_3 + m_{12}v_3 + m_{13} - m_{31}u_3u_3^* - m_{32}v_3u_3^* \\ v_3^* = m_{21}u_3 + m_{22}v_3 + m_{23} - m_{31}u_3v_3^* - m_{32}v_3v_3^* \end{cases} \tag{15}$$

$$\begin{cases} u_4^* = m_{11}u_4 + m_{12}v_4 + m_{13} - m_{31}u_4u_4^* - m_{32}v_4u_4^* \\ v_4^* = m_{21}u_4 + m_{22}v_4 + m_{23} - m_{31}u_4v_4^* - m_{32}v_4v_4^* \end{cases} \tag{16}$$

写成矩阵的形式为:

$$\begin{bmatrix} u_1^* \\ v_1^* \\ u_2^* \\ v_2^* \\ u_3^* \\ v_3^* \\ u_4^* \\ v_4^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 u_1^* & -u_1^* v_1^* \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & 1 & -u_1 v_1^* & -v_1^* u_1^* \\ \dots & \dots \\ u_4 & v_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_4 u_4^* & -u_4^* v_4^* \\ 0 & 0 & 0 & u_4 & v_4 & 1 & -u_4 v_4^* & -v_4^* u_4^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{31} \\ m_{32} \end{bmatrix} \quad (17)$$

根据式(17)可求出 M , 再由关系式:

$$M = KHK^{-1} \quad (18)$$

可求出 H 为:

$$H = K^{-1}MK \quad (19)$$

通过对单应性矩阵 H 进行奇异值分解就可以得到表示两幅图像平面之间变换关系的旋转矩阵 R 和平移矩阵 t 。

1.2 单应性矩阵的奇异值分解

本研究求出了单应性矩阵 $H = R + tn^T/d$, 对其进行奇异值分解^[9]:

$$H = U\Sigma V^T \quad (20)$$

式中: Σ — $m \times n$ 对角矩阵, U — m 阶正交矩阵, V — n 阶正交矩阵, 称对角矩阵 Σ 的元素 σ_i 为 H 的奇异值。

根据定义知道, 设 $H^T H$ 的特征值为 $d_1 \geq d_2 \geq d_3 > 0$, 则 $\sigma_i = \sqrt{d_i}$ ($i = 1, 2, 3$)。式(20)也可以表示为:

$$\Sigma = d'R' + t'n^T \quad (21)$$

其中, R, t, n 和 R', t', n' 之间的对应关系为:

$$\begin{cases} R = sUR'V^T \\ t = Ut' \\ n = Vn' \\ d = sd' \\ s = \det U \det V \end{cases} \quad (22)$$

本研究把 n' 表示为 $n' = x_1 e_1 + x_2 e_2 + x_3 e_3$ (e_1, e_2, e_3 为标准正交基), 根据式(22)可得到3个方程:

$$d_i e_i = d'R' e_i + t' x_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (23)$$

略去 t' , 可得:

$$d'R'(x_j e_j - x_i e_j) = d_i x_j e_i - d_j x_i e_j \quad (24)$$

其中, $i = 1, 2, 3, i \neq j$, 因为 R' 具有向量范数的性质, 由式(24)可得到:

$$\begin{cases} (d^2 - d_2^2)x_1^2 + (d^2 - d_1^2)x_2^2 = 0 \\ (d^2 - d_3^2)x_2^2 + (d^2 - d_2^2)x_3^2 = 0 \\ (d^2 - d_1^2)x_3^2 + (d^2 - d_3^2)x_1^2 = 0 \end{cases} \quad (25)$$

该线性方程组可以把 x_1^2, x_2^2, x_3^2 作为未知数, 若使其有非零解, 则需满足:

$$(d^2 - d_1^2)(d^2 - d_2^2)(d^2 - d_3^2) = 0 \quad (26)$$

根据单应性矩阵 H 的奇异值 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 之间的

关系, 作如下考虑:

(1) $d_1 \neq d_2 \neq d_3$ 且 $d' = \pm d_2$;

(2) $d_1 = d_2 \neq d_3$ 或者 $d_1 \neq d_2 = d_3$, 且 $d' = \pm d_2$; 因为 $d_1 = d_2$ 与 $d_2 = d_3$ 是对称的, 这里只考虑一种情况即可;

(3) $d_1 = d_2 = d_3$ 且 $d' = \pm d_2$ 。

如果 $d_1 \neq d_3$, 可从式(25)中解得 x_1, x_2, x_3 为:

$$\begin{cases} x_1 = \varepsilon_1 \sqrt{\frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1^2 - d_3^2}} \\ x_2 = 0, \varepsilon_1, \varepsilon_3 = \pm 1 \\ x_3 = \varepsilon_3 \sqrt{\frac{d_2^2 - d_3^2}{d_1^2 - d_3^2}} \end{cases} \quad (27)$$

根据实际情况, 摄像机到物体的距离均是大于零的, 而且目标物体的特征点都要在摄像机的视场范围内, 据此对应以上3种情况:

(1) 根据式(23)可得:

$$R'e_2 = e_2$$

式中: R' 一绕 e_2 轴的旋转矩阵。

所以可求出矩阵 R' 为:

$$R' = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (28)$$

根据式(24, 27)可得:

$$\begin{cases} \sin \theta = (d_1 - d_3) \frac{x_1 x_3}{d_2} = \varepsilon_1 \varepsilon_3 \frac{\sqrt{(d_1^2 - d_2^2)(d_2^2 - d_3^2)}}{(d_1 + d_3)d_2} \\ \cos \theta = \frac{d_1 x_3^2 + d_3 x_1^2}{d_2} = \frac{d_2^2 + d_1 d_3}{(d_1 + d_3)d_2} \end{cases} \quad (29)$$

将式(29)代入式(23), 可得:

$$t' = (d_1 - d_3) \begin{pmatrix} x_1 \\ 0 \\ -x_3 \end{pmatrix} \quad (30)$$

(2) 此时, $x_1 = x_2 = 0$ 且 $x_3 = \pm 1$ 。因此有:

$$\begin{cases} R' = I \\ t' = (d_3 - d_1)n' \end{cases} \quad (31)$$

(3) 此时 x_1, x_2, x_3 均为0, 可以不予考虑, 根据式(23, 24)得:

$$\begin{cases} R' = I \\ t' = 0 \end{cases} \quad (32)$$

在摄像机能够到达的视场范围内, 要满足 $n^T P(i) > 0$, 依据以上这些条件, 只有两组合适的解。

上面求出了两摄像机之间的旋转矩阵 R 和平移向量 t , 本研究把它们变换到机器人坐标空间, 从 R 中提取回转角 ϕ 、俯仰角 θ 和偏转角 φ , 由这3个参数组成向量 $\Phi = [\varphi, \theta, \phi]^T$, 定义 $\Omega = [w_x, w_y, w_z]^T$ 为摄像机的角速度, 则有关系式:

$$\Omega(t) = \Lambda(\theta, \phi)\Phi \quad (33)$$

其中：

$$A(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi)\cos(\theta) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi)\cos(\theta) & \cos(\phi) & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由此得到角速度 Ω ，再由 $T = [T_x, T_y, T_z]^T = t$ 可求出摄像机的平移速度，从而得到控制量 $u = k[T_x, T_y, T_z, w_x, w_y, w_z]^T$ (k 为增益系数)，将 u 作为机器人控制器的输入，以实现机器人的视觉伺服控制。

2 基于图像的视觉伺服系统仿真

2.1 摄像机针孔成像模型

本研究采用的线性摄像机模型如图 2 所示。在摄像机坐标系中， O 点为摄像机的光心， Z 轴与成像平面坐标系垂直，称为摄像机的光轴， $O_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 为世界坐标系，用来描述空间中目标物体的位置^[10]。

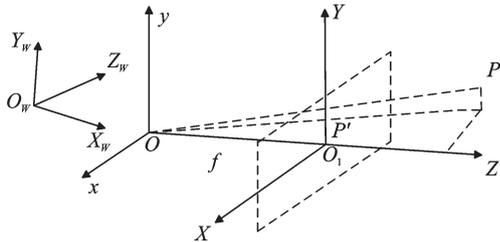


图 2 针孔模型示意图

它们之间的关系用矩阵方程描述如下：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z} \begin{bmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{R} \\ \vec{t} \\ \vec{0}^T \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\frac{1}{z} \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{R} \\ \vec{t} \\ \vec{0}^T \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z} P_1 P_2 \bar{X}_w = \frac{1}{z} P \bar{X}_w$$

式中： α_x, α_y — u 轴和 v 轴上的尺度因子，或称为 u 轴和 v 轴上的归一化焦距， $\alpha_x = f/dX, \alpha_y = f/dY$ ，

$\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ 只与摄像机内部参数有关； P_1 —摄像机内部参数矩阵； P_2 —摄像机外部参数矩阵， P_2 中的旋转矩阵和平移矩阵由摄像机相对于世界坐标系的方位决定； P — 3×3 的矩阵，称作投影矩阵。

确定某一摄像机的内外参数的过程称为摄像机标定，其作用是将二维图像坐标变换到三维空间坐标。

2.2 仿真模型的构建

本研究利用 Matlab/Simulink 仿真软件并结合机器人工具箱^[11](RoboticsToolbox for Matlab)中提供的 PUMA560 机器人仿真实例，采用基于单应性矩阵的视觉控制器构建的仿真模型如图 3 所示。

当机械臂末端执行器(摄像机)到达期望位置时目标特征点在图像上的理想特征称为期望输入，笔者根据理想的图像特征与当前目标物体在像平面的图像特征之差计算出误差信号，通过误差信号可以反映出目标特征点的运动情况。为了方便抓取与控制，研究者通常选取特征点、线、圆、图像矩等作为目标物体的图像特征。试验中取一长方体表面上的 4 个角点作为特征点。

定义图像特征误差 e 为：

$$e = f_{req} - f \quad (35)$$

式中： f —图像特征点的当前向量， f_{req} —图像特征点的期望向量。

模型中， $uw = camera(p, C, T)$ 模块的功能是将目标物体特征点由三维世界坐标变换到相应的二维图像特征矢量坐标。

3 仿真试验及结果

本研究构建的 PUMA560 机器人与摄像机结构模型如图 4 所示。目标物体上 4 个特征点的初始空间坐标(单位：m)分别为： $(2.01, 0.32, 0.21)$ ， $(2.01, 0.32, -0.21)$ ， $(2.01, -0.32, -0.21)$ ， $(2.01, -0.32, 0.21)$ ，变换成图像特征矢量坐标之后表示为： $(166, 380)$ ， $(336, 382)$ ， $(340, 128)$ ， $(170, 128)$ 。

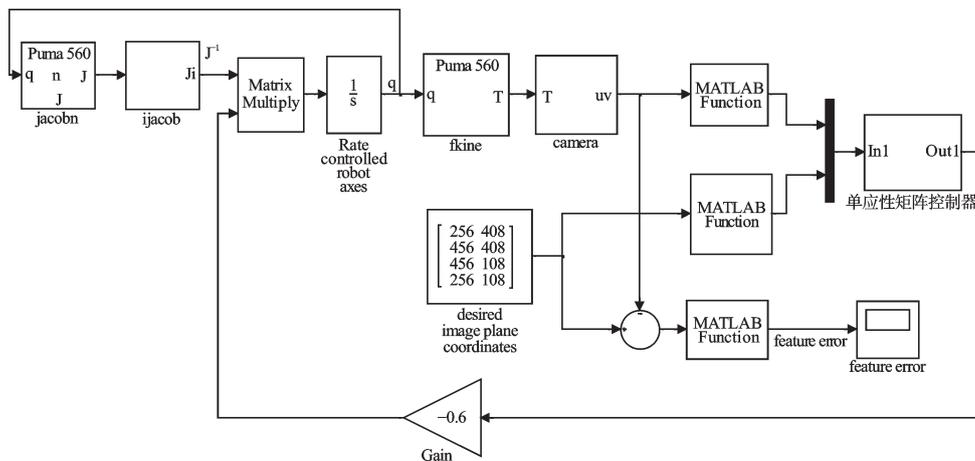


图 3 摄像机-机器人系统仿真模型

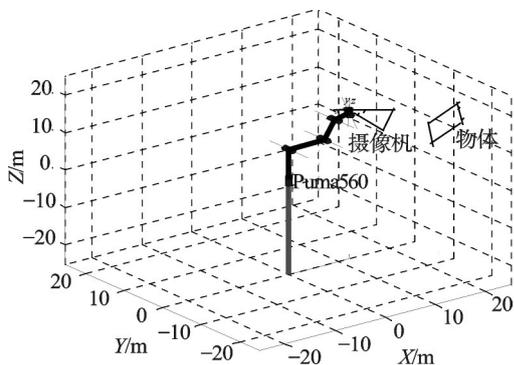


图4 机器人结构模型

仿真过程中采用的手眼摄像机参数如下:镜头的焦距为 8.20 mm,像素为 512×512 ,感光阵列 $6.4 \text{ mm} \times 6.4 \text{ mm}$,则每个像素对应的图像尺寸为 $p_x = p_y = 6.4 / 512 = 0.0125 \text{ mm}$ 。在图像坐标系中,本研究设定成像平面坐标系的原点坐标为 $u_0 = v_0 = 256$ 。另外,期望位置的图像特征矢量坐标为: $(256, 408)$, $(456, 408)$, $(456, 108)$, $(256, 108)$ 。

摄像机移动过程中,在图像平面上目标特征点 u, v 的运动轨迹如图 5 所示。其中“*”代表初始位置,“+”代表最终位置,“○”代表期望位置。由结果可以看出,图像特征点从最初位置最终移动到期望位置。

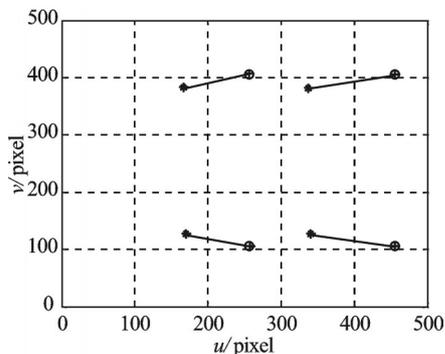


图5 图像平面中目标特征点的运动轨迹

图像特征点的误差变化曲线如图 6 所示。

4种不同的线形代表了目标物体表面4个特征点,由此可以看出,图像特征点的误差最终收敛于零,收敛效果较好。机械臂末端执行器从初始位置运动到了期望位置。

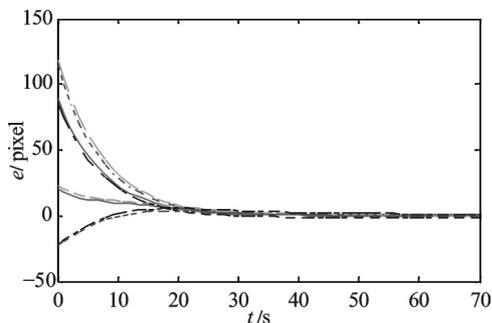


图6 图像特征点误差变化曲线

4 结束语

采用基于图像的视觉伺服控制系统,本研究设计了一种基于单应性矩阵的视觉控制器,运用机器人工具箱并结合 Matlab/Simulink 仿真软件,构建了基于图像的视觉伺服系统仿真模型,并进行了仿真实验。

研究表明,该方法避开了图像雅克比矩阵方法中目标深度信息求取的问题,较好地完成了机器人的抓取实验,并为解决图像雅克比矩阵方法中存在的局部线性化缺陷等问题提供了很好的借鉴依据。但在实际系统中由于受到环境噪声及处理延时等因素的影响,可能会使得该视觉系统图像特征点的误差扩大,进而影响整个系统的控制精度和控制效果,因此该方法还需做进一步的完善。

参考文献 (References):

- [1] 宗晓萍,淮小利,王培光,等. 基于图像的PUMA560机器人视觉伺服系统仿真[J]. 机床与液压, 2007, 35(10): 161-164, 154.
- [2] 王其磊,杨逢瑜,关红艳,等. 基于图像的PUMA560机器人视觉伺服控制分析[J]. 兰州理工大学学报:自然科学版, 2009, 35(1): 90-93.
- [3] CHESI G, VICINO A. Visual servoing for large camera displacements [J]. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 2004, 20(8): 724-735.
- [4] 淮小利. 机器人视觉伺服控制研究[D]. 保定:河北大学电信学院, 2008: 38-43.
- [5] BENHIMANE S, MALIS E. Homography-based 2D Visual Servoing [C]//Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006: 84-88.
- [6] YANG Xing-fang, HUANG Yu-mei, GAO Feng. A Simple Camera Calibration Method Based on Sub-pixel Corner Extraction of the Chessboard Image [C]//IEEE International Conference. [s.l.]:[s.n.], 2010: 688-692.
- [7] MALIS F E. 2 1/2 D Visual Servoing: a Possible Solution to Improve Image-based and Position-based Visual Servoing [C]// Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation. [s.l.]:[s.n.], 2000: 630-635.
- [8] 刘嵩,叶玉堂,孙强,等. 基于单应性矩阵的棋盘格角点检测研究[J]. 电子设计工程, 2012, 20(6): 114-117.
- [9] MALLS B. Homography-based 2D Visual Servoing [C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation Orlando, Florida: [s.n.], 2006.
- [10] PARKI W, KIMJ Y, CHOB K. Control hardware integration of a biped humanoid robot with an android head [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56(1): 95-103.
- [11] CORKE P I. Robotics toolbox for Matlab [J]. *Robotics Automation Magazine*, 1996(2): 4-32.