应用于自动化生产线的视觉机器人系统

Fixed in Workspace Vision Positioning System of Robot

中国科学院 沈阳自动化研究所 黄孝明
中国科学院 研究生院 陈锡爱
Huang Xiaoming Chen Xiai

摘　要：应用于自动化生产线基于眼固定安装方式的机器人定位系统，提出了一种方便有效的手眼标方法。通过最小二乘法求解手眼坐标的变换关系，再根据工作台平面与摄像机成像模型的约束关系，求解出目标物体的三维位姿，并最终实现了机械手的精确定位。

关键词：机器人视觉　手眼标定　眼固定　摄像机标定

Abstract: We developed a fixed in workspace vision positioning system of robot, and present a convenience and effective hand-eye calibration method. Getting the transform matrix of eye and robot coordinate by least square method, and with restrict of working plane and camera model, we get position of aim object in three-dimensional coordinate. Accurate positioning was aquired at last.

Key words: Robot vision　Hand-eye calibration　Fixed in workspace　Camera calibration

[中图分类号] TP242　[文献标识码] B　文章编号 1606-5123(2005)12-0104-03

1 引言

随着科学技术的迅猛发展，机器人逐步进入我们的工作与生活中，如应用于焊接、搬运和装配等各种场所。不过这些应用都是基于先精确的示教后运行，目标物体的位姿稍有变动就会导致机器人任务的失败。因此对于工业流水线等工件位置不固定的应用场合，必须增加传感器来提高机器人对环境的感知能力。由于我们人类知识80%以上是通过眼睛获取的，因而使用视觉来提高机器人的智能水平，具有重要现实的意义和研究价值。

机器人的手眼系统分为眼在手上和眼固定安装两种方式，由于后者具有视场范围固定、标定过程相对简单且系统稳定可靠的特点，因而广泛的应用于自动化生产线。当工业流水线传送带或工作台出现目标物体时，它能够快速有效的对其空间位姿进行定位，配合机械手实现抓取和操作的功能，从而极大的提高了自动化生产效率。

2 摄像机坐标系

2.1 摄像机针孔模型

摄像机针孔模型如图1所示，此时摄像机坐标系与成像平面坐标系之间存在如下关系：

$$x=\frac{fX_C}{Z_C}\qquad y=\frac{fY_C}{Z_C}\tag{1}$$

其中，(x，y)为P点在成像平面坐标系下的坐标，(X_C，Y_C，Z_C，)为空间点P在摄像机坐标系下的坐标。用齐次坐标与矩阵表示为：

$$\begin{bmatrix}xt\\yt\\t\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}f&0&0&0\\0&f&0&0\\0&0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_C\\Y_C\\Z_C\\1\end{bmatrix}\tag{2}$$

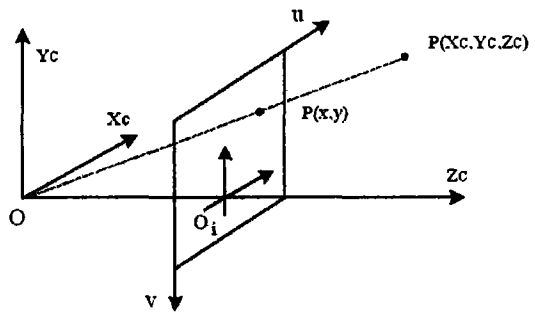

图1 小孔成像模型

摄像机图像坐标系(u，v)和成像坐标系之间存在着象素点与物理单位的转换：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & s' & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中(u_0，v_0)为摄像机光轴与图像平面的交点，d_x，d_y 表示每个象素在X轴和Y轴方向上的物理尺寸，S^1 表示因摄像机成像平面坐标轴相互不正交引出的倾斜因子。

由式(2)、(3)可得图像坐标系和世界坐标系之间的关系：

$$\begin{bmatrix} ut \\ vt \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & s' & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_u & s & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

2.2 畸变模型

由于摄像机光学系统存在加工误差和装配误差，物体在摄像机平面上实际所成的像与理想成像之间存在光学畸变误差。主要的畸变误差类型有两种：径向畸变和切向畸变。径向畸变可由式(5)描述：

$$\begin{aligned} \delta xr &= X_d(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \Lambda) \\ \delta yr &= Y_d(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \Lambda) \end{aligned} \tag{5}$$

切向畸变可由式(6)描述：

$$\begin{aligned} \delta_{xt} &= p_1(r^2 + 2X_d^2) + 2p_2 \cdot X_d \cdot Y_d \\ \delta_{yt} &= 2p_1 \cdot X_d \cdot Y_d + p_2 \cdot (r^2 + 2Y_d^2) \end{aligned} \tag{6}$$

其中(X_d，Y_d)为实际图像坐标，r为两者之间的距离 $r^2=X_d^2+Y_d^2$。

3 手眼坐标标定

3.1 手眼关系

由于采用“眼固定”方式，摄像机坐标系和机器人坐标系$[X_R\ \ Y_R\ \ Z_R]^T$存在如下的坐标变换关系：

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = [r_1'\ \ r_2'\ \ r_3'\ \ p]_{3\times4} \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} \tag{7}$$

由式(4)、(7)可得：

$$\begin{bmatrix} ut \\ vt \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_u & s & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & p_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & p_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & p_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

相应矩阵相乘后，再齐次方程左右同乘以1/C34，得下式：

$$\begin{bmatrix} ut \\ vt \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} u = \dfrac{ut}{t} = \dfrac{C_{11}X_R + C_{12}Y_R + C_{13}Z_R + C_{14}}{C_{31}X_R + C_{32}Y_R + C_{33}Z_R + 1} \\ v = \dfrac{vt}{t} = \dfrac{C_{21}X_R + C_{22}Y_R + C_{23}Z_R + C_{24}}{C_{31}X_R + C_{32}Y_R + C_{33}Z_R + 1} \end{cases} \tag{10}$$

由式(10)可得：

$$\begin{cases} X_R C_{11} + Y_R C_{12} + Z_R C_{13} + C_{14} - X_R C_{31} u - Y_R C_{32} u - Z_R C_{33} u = u \\ X_R C_{21} + Y_R C_{22} + Z_R C_{23} + C_{24} - X_R C_{31} v - Y_R C_{32} v - Z_R C_{33} v = v \end{cases} \tag{11}$$

在机器人坐标系下取n个不在同一平面上的坐标点$[X_{R1}\ \ Y_{R1}\ \ Z_{R1}\ \ X_{R2}\ \ Y_{R2}\ \ Z_{R2}\cdots]_{n\times1}^T$，可得如下关系：

$$T \cdot \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ \mathbf{M} \\ C_{33} \end{bmatrix}_{11\times1} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \mathbf{M} \end{bmatrix}_{2n\times1} \tag{12}$$

$$T = \begin{bmatrix} X_{R1} & Y_{R1} & Z_{R1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{R1}u_1 & -Y_{R1}u_1 & -Z_{R1}u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{R1} & Y_{R1} & Z_{R1} & 1 & -X_{R1}v_1 & -Y_{R1}v_1 & -Z_{R1}v_1 \\ X_{R2} & Y_{R2} & Z_{R2} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{R2}u_2 & -Y_{R2}u_2 & -Z_{R2}u_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{R2} & Y_{R2} & Z_{R2} & 1 & -X_{R2}v_2 & -Y_{R2}v_2 & -Z_{R2}v_2 \\ \mathbf{M} & & & & & & & & & & \end{bmatrix}_{2n\times11}$$

式(12)可写成 T*C=U，此时由最小二乘法得：

$$C = (T^T \cdot T)^{-1} T^T \cdot U \tag{13}$$

其中，C就是我们所要求解的机器人坐标系和摄像机的投影变换关系。

3.2 约束关系

由式(13)可得摄像机平面上的象素点(u，v)和机器人坐标系(X_R，Y_R，Z_R)的对应关系如下：

$$\begin{bmatrix} ut \\ vt \\ t \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

由于本系统采用的是单目摄像机，所以无法直接恢复出空间点的三维信息$[X_R \quad Y_R \quad Z_R]^T$，即无法由式(14)中的三个方程求解出四个未知量$[X_R \quad Y_R \quad Z_R]$。而工作台平面在机器人坐标中坐标变换后仍是一平面坐标，其表达式如下：

$$AX_R + BY_R + CZ_R + D = 0 \tag{15}$$

根据式(14)、(15)的约束关系可最终求得，目标点在机器人坐标系下的坐标值：$[X_R \quad Y_R \quad Z_R]^T$。

4 实验

4.1 系统组成：

系统硬件部分主要由：RH6机器人、DVT智能图像传感器、机器人控制柜、CAN接口板、控制计算机等组成。DVT智能图像传感器固定于支架，它完成目标图像的获取、数字化并通过以太网向控制计算机传送图像，以及实时获取目标物体在图像平面上的位置。上位机通过CAN总线向机器人控制器发送控制和数据命令，并实时读取机器人当前的关节坐标值和基坐标值。实验系统的示意图如图2所示：

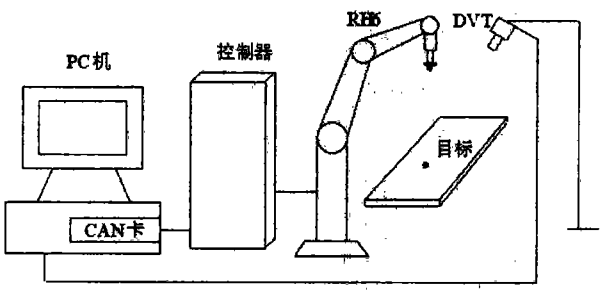

图2 实验系统结构示意图

4.2 实验过程

首先使用棋盘格标定法[2]对摄像机进行预标定，得摄像机得平面中心为(322.73568，209.16897)，摄像机的畸变参数为：

[k1 k2 p1 p2]=[-9.0064e-004 -2.9629e-005 6.8795e-005 9.3961e-005]

在机器人基坐标下对工作台平面采用24个坐标点，使用Levenberg-Marquardt非线性优化算法得工作台平面为：

[A B C D]=[-1.1554e-5 5.7996e-6 0.0013037 0.91029]

而后在机器人基坐标系下采用不在同一平面上的60个坐标点，对手眼关系进行标定，得：

$$C = \begin{bmatrix} 1.1736 & 0.19142 & -0.16581 & -971.11 \\ 0.02737 & -0.98482 & -0.60919 & -169.45 \\ -0.00024 & 0.00028 & -0.00034 & 1 \end{bmatrix}$$

根据约束关系由(u,v)求解得相应的(X_R，Y_R，Z_R)，并最终通过CAN总线发送数据控制命令给机器人控制器，保持末端执行器与目标物体相垂直，驱动机器人对目标物体进行定位。

对实际定位时机器人的基坐标值和通过视觉计算得到的坐标值之差进行分析，设定误差指标为实际点(X_t，Y_t，Z_t)和计算点(X_e，Y_e，Z_e)之间的距离，即：

$$e = \sqrt{(X_t - X_e)^2 + (Y_t - Y_e)^2 + (Z_t - Z_e)^2}$$

取均匀的分布于工作台平面各个区域的20个目标点，实验结果得平均定位误差e<0.5mm。

5 结束语

本文采用眼固定安装方式的单目摄像机，根据摄像机模型和工作台平面的约束关系实现了机器人的空间定位。同时使用了摄像机非线性模型，对畸变进行了补偿，进一步提高了系统精度。该系统完全能够满足机器人应用于工业流水线生产的需要。

参考文献

[1] 陈利红，毛剑飞，诸静．CCD摄像机标定与修正的简便方法．浙江大学学报，2003，37(4)：406~409

[2] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern analysis and Machine Intelligenc- e, 2000, 22(11): 1330~1334

[3] 王敏，王万俊，黄心汉．空间物体定位的机器人手-眼视觉标定方法．华中科技大学学报，2001，29(3)：45~47

作者简介

陈锡爱(1981-) 男 硕士研究生 研究方向：机器视觉。

黄孝明(1964-) 男 高级工程师 研究方向：机电一体化。

欢迎投稿、欢迎咨询

E-mail:plcfa@xasamail.com http://www.ca800.com