

文章编号: 1001-9081(2005)12Z-0302-03

基于手眼立体视觉的机器人定位系统

陈锡爱^{1,2}, 徐方¹

(1 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016

2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

(chencaw@sia.cn)

摘要: 研发了基于手眼的机器人定位系统, 采用了眼在手上的单目摄像机, 通过机械手的一次移动实现了立体视觉的功能。提出了一种方便有效手眼标定方法, 避免了复杂的传统手眼标定过程, 无需求解摄像机外参数和手眼变换矩阵。仅获取标定时刻的摄像机综合参数和机器人位姿, 就可以在机器人基坐标系中视场范围内的任意两点进行检测, 根据立体视觉的约束关系求解出目标物体在机器人基坐标中的位置, 进而实现对目标物体的精确定位。

关键词: 机器人; 手眼标定; 视觉; 定位

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

0 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示教再现的方式, 目标物体的位姿稍有变动就会导致机器人任务的失败。为了使机器人能够更好的应用于柔性生产系统, 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。

机器人的手眼视觉系统可分为眼固定安装和眼在手上两种方式。基于眼固定方式安装的机器人, 视场容易被机械手所遮挡且无法由单目摄像机实现立体视觉。若采用双目视觉则存在着设备花费高、目标定位精度与其视场的大小之间难以平衡的问题。为此本文设计了一种基于眼在手上的单目立体视觉机器人定位系统, 通过机械手末端的一次移动, 虚拟实现了双目视觉的功能。同时为了降低标定过程的复杂度, 本文提出了一种同时标定机械手和摄像机综合参数的方法, 简单有效的标定了手眼关系。标定完成后, 只需根据空间两个检测点的机器人位姿和目标物体在图像平面上的坐标值, 就能够快速求解得到目标物体在基坐标中的精确位置。

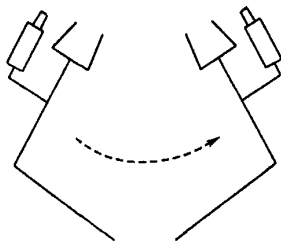


图 1 系统检测示意图

1 手眼变换关系

1.1 摄像机模型

图像平面上的点 $[u \ v]^T$ 和摄像机坐标系中相对应的点 $[X_C \ Y_C \ Z_C]^T$ 之间用线性模型^[1]来描述, 存在着如下关系:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \times \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_u & s & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, a_u, a_v 分别是摄像机 x, y 方向的尺度因子, u_0, v_0 是光心的像素坐标, s 表示因摄像机成像平面坐标轴相互不垂直引出的倾斜因子。

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(2)描述:

$$\begin{aligned} \delta_{xr} &= X_d (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \\ \delta_{yr} &= Y_d (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \end{aligned} \quad (2)$$

切向畸变可由式(3)描述:

$$\begin{aligned} \delta_{xt} &= p_1 (r^2 + 2X_d^2) + 2p_2 \cdot X_d \cdot Y_d \\ \delta_{yt} &= 2p_1 \cdot X_d \cdot Y_d + p_2 \cdot (r^2 + 2Y_d^2) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 (X_d, Y_d) 为实际图像坐标, r 为两者之间的距离。

$$r^2 = X_d^2 + Y_d^2$$

1.2 手眼变换矩阵

采用眼在手上的摄像机安装方式时, 机器人系统各坐标系的转换关系示意图如图 2。

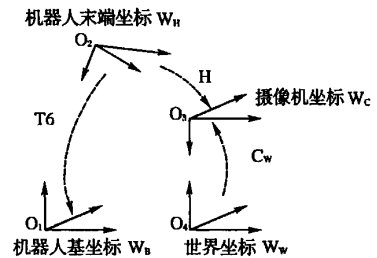


图 2 坐标系位置关系

其中, T_6 是机器人当前位姿, H 为手眼变换矩阵, C_W 为摄像机的外参数。同时为了测量和计算方便, 设定机器人基坐标和世界坐标重合。由图 2 可得, 基坐标和世界坐标存在着

收稿日期: 2005-07-20 修订日期: 2005-10-17 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2004AA001090)

作者简介: 陈锡爱 (1981-), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器人控制、机器人视觉; 徐方 (1962-), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 主要研究方向: 机器人学、自动控制。

如下的转换关系:

$$W_B = T_6 \times H^{-1} \times C_W \times W_W \quad (4)$$

从而求得:

$$H = C_W \times T_6 \quad (5)$$

1.3 摄像机综合参数的获取

根据相对运动原理设计了一种快速有效的标定方法, 只需机器人末端与平面标定块对尖一次, 读取各标定点在基坐标中的值。再保持末端姿态不变, 沿基坐标 Z 轴方向垂直提升, 就能精确获取摄像机的综合参数, 标定过程如图 3 所示。

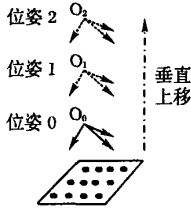


图 3 摄像机综合参数标定示意图

假设摄像机不动而标定物在动, 机器人末端提升两次后, 就可获得每个标定点在基坐标内的三个不同的坐标位置, 从而求解出摄像机在位姿 0 时的综合参数。求解过程如下:

由于世界坐标系和机器人基坐标系重合, 图像平面坐标系和世界坐标系存在如下的关系:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ t \end{bmatrix} = A \times C_W \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

即:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_u & s & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

相应矩阵相乘后, 再齐次方程左右同乘以 $1/C_{3\phi}$ 得下式:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} u = \frac{ut}{t} = \frac{C_{11}X_R + C_{12}Y_R + C_{13}Z_R + C_{14}}{C_{31}X_R + C_{32}Y_R + C_{33}Z_R + 1} \\ v = \frac{vt}{t} = \frac{C_{21}X_R + C_{22}Y_R + C_{23}Z_R + C_{24}}{C_{31}X_R + C_{32}Y_R + C_{33}Z_R + 1} \end{cases} \quad (9)$$

由式 (9) 可得

$$\begin{cases} X_R C_{11} + Y_R C_{12} + Z_R C_{13} + C_{14} - X_R C_{31}u - Y_R C_{32}u - Z_R C_{33}u = u \\ X_R C_{21} + Y_R C_{22} + Z_R C_{23} + C_{24} - X_R C_{31}v - Y_R C_{32}v - Z_R C_{33}v = v \end{cases} \quad (10)$$

采用机器人基坐标系下 n 个不在同一平面上的坐标点

$[X_{R1} \ Y_{R1} \ Z_{R1} \ X_{R2} \ Y_{R2} \ Z_{R2} \ \dots]_{n \times 1}^T$, 可得如下关系:

$$T \cdot \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ \vdots \\ C_{33} \end{bmatrix}_{11 \times 1} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \end{bmatrix}_{2n \times 1} \quad (11)$$

$T =$

$$\begin{bmatrix} X_{R1} & Y_{R1} & Z_{R1} & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_{R1}u_1 & -Y_{R1}u_1 & -z_{R1}u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{R1} & Y_{R1} & Z_{R1} & 1 & -X_{R1}v_1 & -Y_{R1}v_1 & -z_{R1}v_1 \\ X_{R2} & Y_{R2} & Z_{R2} & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_{R2}u_2 & -Y_{R2}u_2 & -z_{R2}u_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{R2} & Y_{R2} & Z_{R2} & 1 & -X_{R2}v_2 & -Y_{R2}v_2 & -z_{R2}v_2 \\ \vdots & & & & & & & & & & \end{bmatrix}_{2n \times 11}$$

式 (11) 可写成 $T^* C = U$, 此时由最小二乘法得:

$$C = (T^* \cdot T)^{-1} T^* \cdot U \quad (12)$$

由于摄像机外参数 C_W 的旋转量 r 为正交单位矩阵 l^U , 故而 $|r_3| = 1$, 因而由式 (7) 和式 (8) 可得

$$C_{34} | C_3 | = 1 \Rightarrow C_{34} = \frac{1}{|C_3|} \quad (13)$$

其中 $r_3 = [r_{31}, r_{32}, r_{33}]$, $C_3 = [C_{31}, C_{32}, C_{33}]$ 。

从而获得摄像机在机器人位姿 0 时完整的综合参数矩阵

$$M^0 = A \times C_W = C_{34} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

2 立体视觉

机器人在空间两点检测时的立体视觉匹配示意图如图 4

4

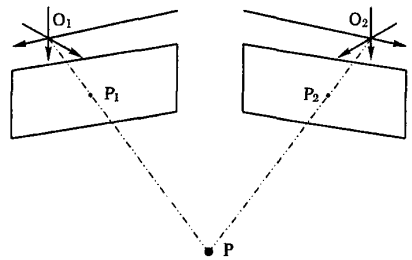


图 4 立体视觉示意图

根据手眼坐标的变换关系易得:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = C_W \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} = HT_6^{-1} \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中 T_6 为末端位姿, X_C 为摄像机坐标, X_R 为基坐标, 由式 (1) 和式 (15) 可得:

$$Z_C \begin{bmatrix} u \\ v \\ t \end{bmatrix} = A \times H \times T_6^{-1} \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

由式 (5) 可得

$$A \times H = A \times C_W \times T_6^0 = M^0 \times T_6^0 = M_T \quad (17)$$

由此可得立体视觉的约束关系如下:

$$Z_{C1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ t \end{bmatrix} = M_T \times T_6^1 \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$Z_{C2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ t \end{bmatrix} = M_T \times T_6^2 \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中 $M_T = M^0 \times T6^0$ ，即我们标定时所得的摄像机综合参数和机器人位姿的乘积，是一个恒定不变的矩阵。从式(18)和式(19)可以看出，只需获得空间两个检测点的机器人位姿和目标物体在图像平面上的坐标值，就能够快速有效地获得目标物体在机器人基坐标中的位置，从而实现了目标的立体定位。

3 实验系统的组成

系统的硬件部分主要由：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机械手末端，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。实验系统的组成如图5所示。

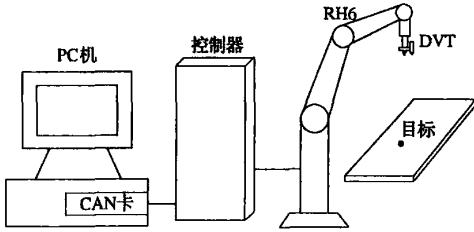


图5 系统结构示意图

RH6机器人是沈阳新松机器人自动化股份有限公司自行研发的工业机器人，它由机器人本体、供电电缆，机器人控制柜、变压器和汉字编程示教盒等五部分组成。属于6自由度垂直关节型通用工业机器人，最大工作负荷6公斤，重复定位精度±0.08mm。

上位机CAN接口板采用研华公司生产的PCL-841双端口隔离CAN总线接口卡，它能够提供PC机与控制器区域网(CAN)的连接。卡上的CAN控制器可设置在内存中的不同位置，通过直接内存映射直接访问CAN控制器，完成对其的各种操作，其最高通讯速度可达1Mbps。

DVT Lengend550是美国DVT公司推出的智能图像传感器，该产品将CCD摄像头、微处理器、存储器、数字I/O集为一体，具有全自动在线检测产品表面质量、图样识别等功能。采用100M快速以太网与主机进行通讯；最高分辨率为640×480像素；采集得到的图像为256色灰度图。

监控、处理和控制程序由VC开发，其运行界面如图6。

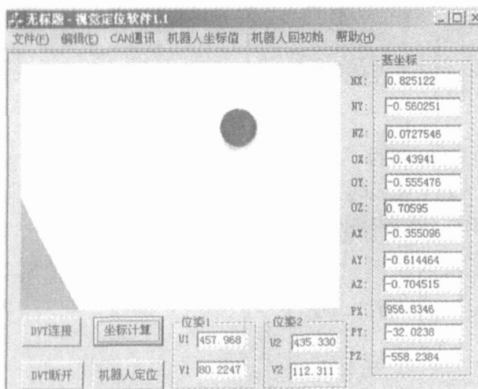


图6 程序运行界面

4 实验

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(322 735 68 209 168 97)，摄像机的畸变参

数为：

$$[k1 \ k2 \ p1 \ p2] = [-9 \ 006 \ 4e-004 \ -2 \ 962 \ 9e-005 \ 6 \ 879 \ 5e-005 \ 9 \ 396 \ 1e-005]$$

接着读取标定检测点时刻的机器人位姿：

$$T6^0 = \begin{bmatrix} 0.825122 & -0.43941 & -0.355096 & 868.389 \\ -0.560251 & -0.555476 & -0.614464 & 24.5145 \\ 0.727546 & 0.70595 & -0.704515 & -135.751 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

机器人沿着基坐标Z轴方向以60 000 0mm均匀向上移动两次，根据相对运动原理，并由最小二乘法求得标定时刻的摄像机综合参数为：

$$M = \begin{bmatrix} -125.44 & 1029.8 & 300.84 & 1.1847e+005 \\ 1087.2 & 98.529 & 297.85 & -9.074e+005 \\ -0.062682 & -0.031839 & 0.99753 & 171.4 \end{bmatrix}$$

然后在空间坐标视场范围内的任意两个检测点对目标物体进行检测，根据立体视觉的约束关系求解出目标物体在基坐标中的位置，进而实现了对目标物体实现精确定位。

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 $(X_e \ Y_e \ Z_e)$ 和计算点 $(X_c \ Y_c \ Z_c)$ 之间的距离，即：

$$e = \sqrt{(X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2 + (Z_i - Z_c)^2} \quad (20)$$

取均匀分布于基坐标空间各个区域的60个目标点，得误差曲线示意图如图7。

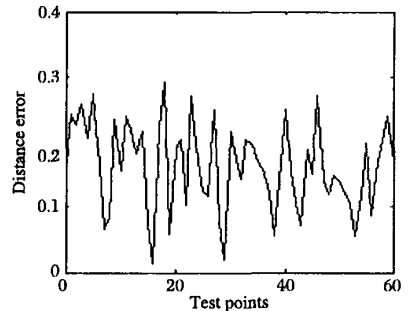


图7 误差曲线示意图

由图7可得系统定位误差 $e < 0.3\text{mm}$ ，能够满足机器人进行定位控制的使用要求。

5 结语

本文提出了一种快速有效的手眼标定过程，避免了传统复杂的 $AX = XB$ 的手眼方程的求解过程。使用手眼单目摄像机的一次移动实现了立体视觉的功能。同时根据现对运动的原理设计了一种快速方便的摄像机综合参数标定方法，并在标定和求解的过程中使用了摄像机非线性模型，进一步提高了系统精度。该系统完全能够满足搬运、装配和检测等各种场合的应用需求。

参考文献：

- [1] 马颂德, 张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 52-70.
- [2] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern analysis and Machine Intelligence, 2000 22(11): 1330-1334.
- [3] 熊春山, 黄心汉, 王敏. 手眼立体视觉的算法与实现[J]. 机器人, 2001 23(2): 113-117.