

简便高精度的机器人手眼视觉标定方法

戚 芳, 席 锋

(哈尔滨工业大学 深圳研究生院 控制理论与控制工程系 广东 深圳 518055)

摘 要: 对摄像机成像模型进行了分析, 论述了机器人手眼系统标定原理。在此基础上, 不改变机器人的外臂与基坐标系的旋转关系, 设计了一种机器人手眼视觉的标定方法, 与传统的方法比较, 它不需要预先标定摄像机的内外参数。实验证明, 该方法具有算法方便快捷、实验过程简单易行, 且精度高等优点, 可用于机器人进行运动目标定位与跟踪。

关键词: 机器人; 手眼系统; 标定; 定位

中图分类号: TP24 文献标识码: A 文章编号: 1000-9787(2006)01-0027-03

Easy accurate calibration method for eye-in-hand system

QI Fang, XI Feng

(Dept of Cont Theory and Cont Engin, Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The imaging model of the camera is analyzed, the calibration principle of robot eye-in-hand system is discussed. Based on this principle, a calibration method for eye-in-hand system is schemed out. Compared with the traditional method in which the inner and outer parameters of the camera should be calibrated in advance, the experiments prove that this algorithm is quick and convenient to be applied, the experimental procedure is simple and it has high precision. It can be used to locate and track a moving object in robot vision system.

Key words: robot; eye-in-hand system; calibration; locate

0 引 言

通常, 机器人视觉系统按照摄像机的安装方式可以分为固定的场景视觉和运动的“手-眼”^[1,2]视觉。前者摄像机安装在工作台上方或侧面, 摄像机与物体的位置关系一定, 而不随机器人的运动变化, 其标定方法比较简单, 但是, 不能满足实时跟踪控制的要求; 后者摄像机固定在机器人手臂末端执行器上, 作为“眼睛”的摄像机将空间的三维景物投影到图像平面上, 通过计算机对平面信息的处理, 做出决策使机器人去执行某种相应的动作, 从而实现对机器人末端执行器的反馈控制。若要实现这种功能, 则必须要标定摄像机与机器人末端执行器之间的相对安装位置或者标定摄像机在机器人坐标系中的坐标, 这就是所谓的“手-眼”关系标定^[3,4]。手-眼系统在机器人视觉系统的研究中具有更重要的意义。

1 摄像机成像模型

由于空间某点的三维几何位置与其在图像中的对应点之间的相互关系是由摄像机的成像模型决定的, 因此, 正确选择摄像机的成像模型是关键。摄像机的透镜具有畸变, 但是, 由于考虑过多非线性畸变时对摄像机标定需要使用

非线性优化算法, 所以, 有时不仅不能提高其精度, 反而引起解的不稳定。本文的论述中, 不考虑摄像机的畸变影响, 而只讨论理想的成像情况。

物点的空间坐标变为计算机的数字坐标经过了 3 个变换。首先, 空间坐标变换为摄像机坐标; 其次, 摄像机坐标映射到摄像机的 CCD 成像面的图像坐标; 最后, CCD 成像面的图像坐标变换到计算机图像坐标。理想摄像机成像模型如图 1 所示。设 (x_w, y_w, z_w) 是三维实际坐标系中目标点 P 的坐标, 这里, 取实际坐标系与机器人基坐标系重合, 以简化计算。 P 在摄像机坐标系下的坐标为 (x_c, y_c, z_c) 。摄像机坐标系的定义为中心在 o_c (光学中心), 且 z_c 轴与光轴重合。 x_c, y_c 是中心在 o 点 (z_c 轴与图像平面的交点) 平行于 x_c, y_c 的 CCD 图像坐标系。焦距 f 是图像平面和光心的距离。 (x, y) 是理想小孔摄像机模型下点 P 的图像坐标。摄像机采集的图像在计算机中是以二维数组的形式存在的, 设为 M 行 N 列。在图像上定义直角坐标系 x, y , 每一像素的坐标 (x, y) 分别是该像素在数组中的列数和行数, 所以, 是以像素为单位的图像坐标系的坐标, 它并没有用物理单位表示出该像素在图像中的位置, 因此, 需要再建立以物理

单位(如 mm)表示的图像坐标系,该坐标系以图像平面的左上角点 o_2 为原点 x_2, y_2 轴分别与 x, y 轴平行。

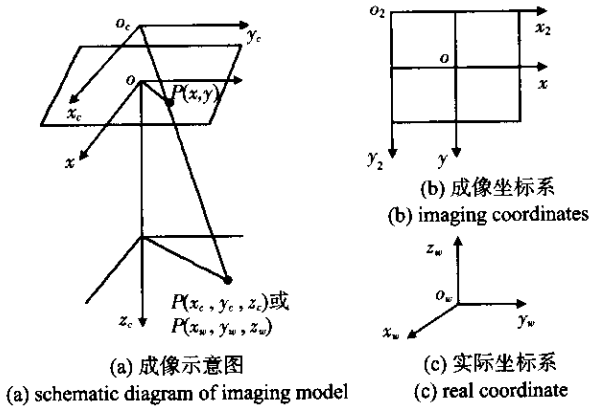


图1 理想摄像机成像模型

Fig 1 Perfect imaging model of camera

2 手-眼视觉标定原理

设摄像机坐标系中的一点 S_C 在外臂坐标系中的映射为 S_L , 其变换关系为

$$S_L = \begin{bmatrix} R_{CL} & P_{CL} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} S_C \quad (1)$$

式中 $R_{CL} \in R_{3 \times 3}$ 为摄像机坐标系到外臂坐标系的变换矩阵, P_{CL} 为摄像机坐标系中的原点在外臂坐标系中的坐标。手-眼视觉系统中 R_{CL} 和 P_{CL} 保持恒定。外臂坐标系中的映射点 S_L 在机器人基坐标系中的对应点是 S_O , 相应的变换方程为

$$S_O = \begin{bmatrix} R_{LO} & P_{LO} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} S_L \quad (2)$$

式中 $R_{LO} \in R_{3 \times 3}$ 为外臂坐标系到机器人基坐标系的变换矩阵, 它由外臂的位姿决定; P_{LO} 为外臂坐标系的原点坐标在机器人基坐标系中的位置。由式(1)与式(2), 可得到

$$S_O = \begin{bmatrix} R_{LO} & P_{LO} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{CL} & P_{CL} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} S_C \quad (3)$$

进而可得到 S_O 的坐标

$$S_O = \begin{bmatrix} R_{LO} R_{CL} & R_{LO} P_{CL} + P_{LO} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{XYZ} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 S_{XYZ} 为摄像机坐标系中目标点的非奇次坐标, 根据小孔成像原理, 有

$$f/S_{CZ} = (u - u_0)/\eta_u/S_{CX} \quad (5)$$

$$f/S_{CZ} = (v - v_0)/\eta_v/S_{CY} \quad (6)$$

式中 f 为摄像机焦距, mm; u 和 v 为目标点在像素平面中的位置, pixel; u_0 和 v_0 为像素平面的中心; η_u 和 η_v 分别为像素平面中的横轴与纵轴在图像平面中的比例因子; S_{CX} , S_{CY} 和 S_{CZ} 分别为点 S_C 在图像平面中 x, y, z 轴的坐标。并标记

$$f^{-1} = 1/f.$$

由式(5)和式(6)可得

$$S_{CXYZ} = [(u - u_0)\eta_u S_{CZ} f^{-1} \quad (v - v_0)\eta_v S_{CZ} f^{-1} \quad S_{CZ}]^T \\ = S_{CZ} f^{-1} \begin{bmatrix} \eta_u & 0 & 0 \\ 0 & \eta_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [(u - u_0)(v - v_0)f]^T \quad (7)$$

$$\text{定义} \begin{bmatrix} \eta_u & 0 & 0 \\ 0 & \eta_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = R_\eta.$$

由式(4)和式(7), 可求出

$$S_{OXYZ} = R_{LO} R_{CL} R_\eta S_{CZ} f^{-1} [(u - u_0)(v - v_0)f]^T + R_{LO} P_{CL} + P_{LO} \quad (8)$$

S_{OXYZ} 为机器人基坐标系中目标点的非奇次坐标, 若在系统标定过程中, 保持式(8)中的 R_{LO} 不变, 则式(8)可写为

$$S_{OXYZ} = S_{CZ} \{H[(u - u_0)(v - v_0)]^T + N\} + W + P_{LO} \quad (9)$$

式中 $H = [H_1 \ H_2]$ 为 $R_{LO} R_{CL} R_\eta f^{-1}$ 的前两列; N 为第三列乘以 f ; $W = R_{LO} P_{CL}$ 。在上述假设条件下, H , N 和 W 在标定过程中是保持不变的。若标定时, 还有 S_{CZ} 恒定, 即摄像机的高度保持不变, 则式(9)还可写成

$$S_{OXYZ} = A[(u - u_0)(v - v_0)]^T + B + P_{LO} \quad (10)$$

式中 $A = S_{CZ} H$, $B = S_{CZ} N + W$ 。

显而易见, A 和 B 在标定过程中保持恒定。进行手-眼视觉的标定时, 使物体在视场中 n 个不同的位置, 可得到

$$A \begin{bmatrix} \Delta u_1 & \Delta u_2 & \dots & \Delta u_{n-1} \\ \Delta v_1 & \Delta v_2 & \dots & \Delta v_{n-1} \end{bmatrix} = [\Delta P_{LO1} \ \Delta P_{LO2} \ \dots \ \Delta P_{LO(n-1)}] \quad (11)$$

式中 $\Delta u_{n-1} = u_{n-1} - u_n$, $\Delta v_{n-1} = v_{n-1} - v_n$ 可从计算机的像素平面得到; $\Delta P_{LO(n-1)} = P_{LO(n)} - P_{LO(n-1)}$ 可直接由末端执行器的位置得到。为了得到 B , 给定一点 S_{OXYZ} , 由式(10)有

$$B = S_{OXYZ} - A[(u - u_0)(v - v_0)]^T - P_{LO} \quad (12)$$

记 A 的前两行为 $A_1 = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} \\ a_{10} & a_{11} \end{bmatrix}$; B 的前两行为

$$B_1 = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}.$$

在标定过程中, 因为保持了末端执行器的高度不变, 所以, 三维物体的定位问题就简化为二维。

3 实验过程及结果

本文的机器人采用 GRB-400 四自由度机械臂, 它具有 3 个转动关节和 1 个移动关节, 末端机械手重复定位精度为 ± 0.1 mm; 采用 640 像素 \times 480 像素的 COYAL 摄像头 ($u_0 = 320$, $v_0 = 240$) 和 Meteor-II/Digital 数字图像采集卡;

被摄物为一个中心有孔的立方体金属工件,取其灰度质心作为特征点。实验装置如图 2 所示。

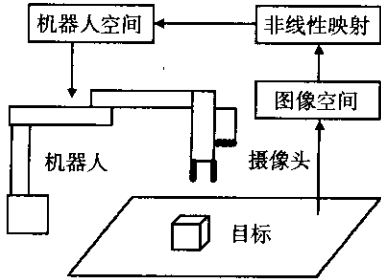


图 2 实验装置示意图

Fig 2 Schematic diagram of experimental equipment
摄像机安装在机械手的上一个关节处(移动关节,即外臂)。标定时,为了使外臂坐标系到机器人基坐标系的旋转矩阵恒定,只需保证关节 1、2 的转动角度之和恒定即可。实验时,把工件放在基坐标系的(−62.5,242.5,15)处,为简化计算,只需依上述原则使机械臂转动微小角度来改变质心在视场中的位置,从示教盒中读取转动完成后外臂的原点在基坐标系中的位置 P_{L0} ,从计算机中读取转动后工件质心的像素坐标 (u, v) ,重复以上步骤,即可完成标定。本实验共进行了 8 次标定,实验数据如表 1。

表 1 参数标定结果

Tab 1 Calibrating result of all parameters

a_{00}	a_{01}	a_{10}	a_{11}	b_0	b_1
−0.195	−0.014	0.155	−0.015	−65.909	−20.960
−0.191	−0.016	0.160	−0.018	−66.911	−22.131
−0.201	−0.013	0.147	−0.016	−65.992	−21.002
−0.201	−0.018	0.148	−0.018	−66.341	−21.404
−0.209	−0.013	0.136	−0.014	−65.816	−20.720
−0.207	−0.009	0.139	−0.012	−66.273	−21.284
−0.192	−0.015	0.158	−0.014	−66.780	−21.965
−0.202	−0.014	0.146	−0.011	−66.207	−21.236

其中 a_{00} 、 a_{01} 、 a_{10} 、 a_{11} 分别为 A 的第一行第一列、第一行第二列、第二行第一列、第二行第二列元素, b_0 、 b_1 为 B 的前 2 个元素,取均值可得

$$B_1 = \begin{bmatrix} -66.291 \\ -21.338 \end{bmatrix}.$$

选取另外 5 个点作为校验点,得到的移动机器人不同位置下的测量值和工件真实三维坐标值对比实验数据如表 2。

表 2 测量值与真值对比

Tab 2 Contrast of measured value and truth value

真实坐标	(62.5,148.5)	(7.0,132.5)	(36.5,127.5)	(40.0,138.0)	(47.0,133.5)
位置 1(mm)	(62.456,148.642)	(7.142,132.484)	(36.571,127.512)	(40.184,137.950)	(47.312,133.403)
位置 2(mm)	(62.618,147.996)	(6.964,132.441)	(36.474,127.506)	(39.816,137.941)	(46.801,132.559)
位置 3(mm)	(62.741,148.536)	(7.015,132.537)	(36.205,127.540)	(40.122,138.154)	(47.140,133.322)

4 结 论

采用该方法进行机器人的手-眼关系标定。在标定计算过程中,避免了复杂的非线性优化过程,受机器人本体重复定位精度的影响,标定误差范围在 ±0.5 mm 之间,精度较高。由于手-眼机器人跟踪系统本身对标定精度要求就不高,本方法可以满足移动机器人进行跟踪控制的使用要求。

参考文献:

[1] Henrik Malm, Anders Heyden. A new approach to hand-eye calibration[J]. Proceedings of International Conference on Pattern

Recognition 2000, 1: 525–529.

[2] Nicalas Andreff, Radu Horaud, Bernard Espian. Robot hand-eye calibration using structure-from-motion[J]. International Journal of Robotics and Research 2001, 20(3): 228–248.
[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.
[4] 朱振友, 徐爱杰, 林 涛, 等. 机器人视觉的“手-眼”关系快速标定算法[J]. 光学技术 2004, 30(2): 150–152.

作者简介:

戚 芳(1982–),女,黑龙江萝北人,硕士研究生,研究领域为机器视觉。

(上接第 26 页)

(2)各组份之间相互牵制相互影响:若 P_2O_5 量少($V_2O_5:P_2O_5 \gg 3$)则不利于 VO_2 微晶的稳定,影响 VO_2 在 $T > T_c$ 时导体性能;若 P_2O_5 量多($P_2O_5:Fe_2O_3 \gg 1$)则会影响 Fe_2O_3 的变价和电子的传导。若 Fe_2O_3 量少($V_2O_5:Fe_2O_3 \gg 3$)将牵制 VO_2 在 $T > T_c$ 时导体导电;若 Fe_2O_3 量多($V_2O_5:Fe_2O_3 \ll 3$),CTR 的导电在 $T > T_c$ 时是以 Fe_2O_3 的半导体导电为主; Fe_2O_3 的量在 $T < T_c$ 时与 CTR 的平均

导电性能成正比关系。

参考文献:

[1] 孙 健,甘朝钦. V-P-Fe 系 CTR 的研制[J]. 应用科学学报, 2000(1): 186–188.
[2] 孙生才. 常温 NTC 热敏电阻的几种材料[J]. 传感器技术, 1991(5): 9–13.

作者简介:

孙 健(1959–),男,江苏滨海人,副教授,研究方向为温度传感器。