

文章编号: 2095—0411 (2012) 02—0049—05

考虑一阶径向畸变的摄像机参数标定^{*}

薛 白, 段锁林, 邹 凌

(常州大学 机器人研究所, 江苏 常州 213164)

摘要: 针对 GRB—400 机器人视觉系统, 建立完整的摄像机一阶径向畸变模型。首先用 GRB 系统的 Matrox 图像采集卡采集标定坐标, 然后利用径向排列约束方法 (简称 RAC) 建立线性方程组求解摄像机的径向畸变参数。基于此畸变参数实现图像校正, 以提高对目标物体的定位精度, 从而提高机器人视觉系统对摄像机标定参数变化的鲁棒性。实验结果表明: 该方法有较高的标定精度。

关键词: 摄像机标定; 径向畸变; 径向约束; 交比不变性; 定位精度

中图分类号: TP 242.6⁺²

文献标识码: A

Calibration of Camera Parameters with One Order Radial Distortion

XUE Bai, DUAN Suo—lin, ZOU Ling

(Institute of Robotics, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: For the GRB—400 robot vision system, a nonlinear camera model of one order radial distortion is set up. First, the coordinates of the calibrated image are collected with Matrox of the GRB system, and then distortion parameters of camera are worked out by the established linear equation based on radial alignment constraint (referred to as the RAC). The image is corrected by using distortion parameters, so as to improve the location accuracy of target object. At the same time, the robustness of robot vision systems is improved when camera calibration parameters change. The experimental results show that this method has higher precision in the calibration.

Key words: camera calibration; radial distortion; radial alignment constraint; cross ratio invariability; location accuracy

机器人目标识别包括对目标物体的形状、大小、颜色等特征的识别, 而在机器人目标物体抓取操作中, 还要识别目标物体的方位, 以便机器人据此方位来驱动各关节运动到目标物体所在位置并将手爪调整到合适的姿态, 进而实现对目标物体的抓取操作。但影响机器人目标识别的因素很多, 如镜头畸变、光照变化等, 镜头径向畸变是机器人视觉系统产生误差的主要因素, 求得畸变参数后对靶标

图像和目标图像校正可以提高视觉系统识别的准确性和对摄像机标定参数变化的鲁棒性。

根据摄像机模型分类, 标定^[1]方法大致可分为线性标定、非线性标定和两步法。文献 [2] 中的摄像机模型没有考虑镜头畸变, 所获得的标定参数准确性不足。文献 [3] 考虑了各种畸变因素, 可以得到较高的标定精度, 但计算量大, 耗时较多,

* 收稿日期: 2012—01—12

基金项目: 常州市科技计划项目资助 (CJ20110023)

作者简介: 薛白 (1987—), 女, 江苏常州人, 硕士生; 通讯联系人: 段锁林。

非线性搜索不能完全保证参数收敛到全局最优解。两步法结合了前 2 种方法的优点, 典型代表为 Tasi 两步法^[4]和张正友平面靶标法^[5]。本文针对所考虑的 GRB-400 机器人视觉系统的标定问题, 基于上述 2 种方法, 结合交比不变性准则^[6], 完成了该摄像机内外参数及畸变参数的标定。

1 视觉系统模型及畸变参数标定方法

1.1 机器人视觉标定系统

带视觉的 GRB-400 4 自由度机器人系统是 1 个开放的机器人系统开发平台, 大致可分为 5 部分: 机器人操作臂、控制器、伺服驱动系统、位置检测传感装置和限位装置以及固定位置的视觉传感器系统。基于此系统结构, 为了实现系统摄像机参数标定, 建立考虑径向畸变的视觉系统坐标关系, 如图 1 所示, 以机器人基坐标系建立世界坐标系 $o_w x_w y_w z_w$, 以摄像头的光心 o 为原点建立摄像机坐标系 $o_x y_x z_x$, 在计算机屏幕上建立图像坐标系 OXY 。

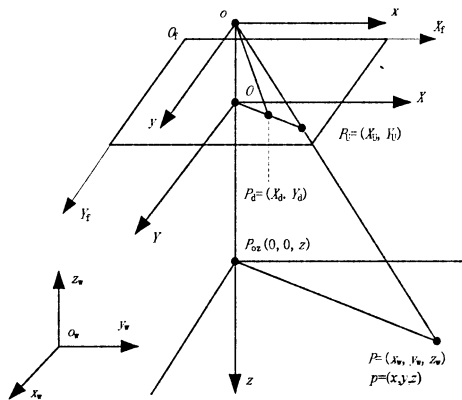


图 1 考虑径向畸变的视觉系统坐标关系

Fig. 1 Coordinate relation of the vision system with radial distortion

1.2 机器人—摄像机系统模型

在基于视觉的机器人目标定位与抓取研究中, 要实现对目标物体的准确定位, 就要确定目标物体在机器人坐标系里的位置, 为此根据图 1 需要先从视觉传感器来确定目标物体在图像坐标系中的相对位置, 然后再根据图像坐标系和摄像机坐标系之间的相互关系来确定目标物体在摄像机坐标系中的位置, 最后由摄像机坐标系和世界坐标系的关系确定目标物体在世界坐标系和机器人坐标系中的位置, 本文中以机器人坐标系作为世界坐标系。在图 1 中, 假设空间点 P , (X_u, Y_u) 是 P 点根据理想透视投影成像关系在图像坐标系上的投影点坐标,

(X_d, Y_d) 是经过透镜径向畸变后的实际投影点坐标。有效焦距 f 是 o 点到图像平面的距离。

从 3 维世界坐标系到计算机图像坐标系的转换可以分为以下 4 步 (如图 2)。

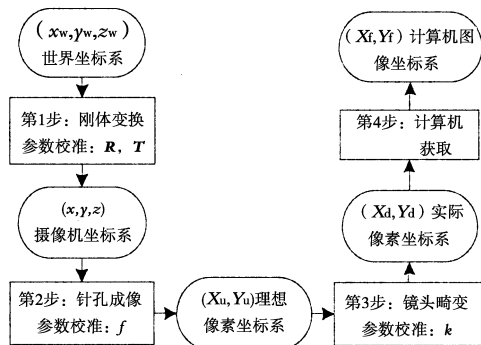


图 2 标定过程的坐标系转换

Fig. 2 Coordinate conversion in calibration

(1) 从世界坐标系 (x_w, y_w, z_w) 到摄像机坐标系 (x, y, z) 的转换:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = [R \quad T] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & T_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & T_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, R 为旋转矩阵, T 为平移矩阵, $[R \quad T]$ 构成摄像机的外参数矩阵。

(2) 从摄像机坐标系 (x, y, z) 到理想像素坐标系 (X_u, Y_u) :

$$\begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

(3) 从理想像素坐标系 (X_u, Y_u) 到实际像素坐标系 (X_d, Y_d) , 用下面矩阵近似表示:

$$\begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+kr_d^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1+kr_d^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $r_d^2 = X_d^2 + Y_d^2$, k 是径向畸变系数。

(4) 从实际像素坐标系 (X_d, Y_d) 到计算机图像像素坐标系 (X_f, Y_f) 的转换:

$$\begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & u_0 \\ 0 & s_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, (u_0, v_0) 是图像中心坐标, s_x, s_y 分别为图像平面单位距离 x, y 方向上的像素数 (pixel/mm), 通过预标定获得, 其和 u_0, v_0 一起构成摄像机内参数。

从上述关系可以看出, 要想准确获得目标物体在机器人坐标系(本文中的世界坐标系)中的位置, 必须考虑摄像机径向畸变的影响。本文中仅考虑一阶径向畸变参数的标定问题。

1.3 径向排列约束法(RAC)的基本原理

如图1可以看出: $OP_d // P_{oz}P$, 径向畸变不改变 OP_d 的方向, 所以 RAC 约束所得到的任何关系式都与有效焦距 f 和畸变系数 k 无关。

由摄像机坐标系与世界坐标系关系(1)可得

$$\begin{cases} x = r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x \\ y = r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y \\ z = r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z \end{cases} \quad (5)$$

由 RAC 约束可得

$$\frac{x}{y} = \frac{x_d}{y_d} = \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x}{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y} \quad (6)$$

将式(6)移项整理变换, 可以表示为矢量形式。

本文用平面模板来标定, 可选取世界坐标系 $z_w = 0$ 。于是式(6)可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x_w Y_d \\ y_w Y_d \\ Y_d \\ -x_w X_d \\ -y_w X_d \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} r_1/T_y \\ r_2/T_y \\ T_x/T_y \\ r_4/T_y \\ r_5/T_y \end{bmatrix} = X_d \quad (7)$$

式(7)中, 行向量是已知的, 列向量中各元素是待求的参数。这样, 只需要5个点就可以求解线性方程组。考虑误差, 一般可选取多于5个点, 利用最小二乘法求解超定方程。

2 摄像机内外参数及畸变参数的求解

本文采用黑白方格的棋盘标定模板, 其平面靶标上有许多方格点, 方格点即为标定点, 选取35个共面内角点, 则标定的过程分以下几步实现。

2.1 旋转矩阵 R 、平移矩阵分量 T_x , T_y

(1) 选取 N ($N = 35$) 个特征点的图像坐标, 其世界坐标为 (x_{wi}, y_{wi}) , 相应的图像坐标为 (x_{fi}, y_{fi}) , $i = 1, 2, \dots, 35$ 。根据式(4), 计算

$$\begin{cases} X_{di} = (X_{fi} - u_0) / s_x \\ Y_{di} = (Y_{fi} - v_0) / s_y \end{cases} \quad (8)$$

(2) 对于每个点 P_i 可以根据式(7)列出1个方程, 联立这 N 个方程

$$\begin{bmatrix} x_{wi} Y_{di} \\ y_{wi} Y_{di} \\ Y_{di} \\ -x_{wi} X_{di} \\ -y_{wi} X_{di} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} r_1/T_y \\ r_2/T_y \\ T_x/T_y \\ r_4/T_y \\ r_5/T_y \end{bmatrix} = X_{di} \quad (9)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, 35$ 。

将式(9)写成 $Km = U$ 的形式, 则 K 为 $N \times 5$ 矩阵, m 为5维向量, U 为 N 维向量。当 $N > 5$ 时, $Km = U$ 是超定方程组, 利用最小二乘法求解这个线性方程组, 可以得到:

$$m = (K^T K)^{-1} K^T U \quad (10)$$

(3) 利用 R 的正交性计算 T_y , 可以得到

$$T_y^2 = \frac{S_r - [S_r^2 - 4(r_1' r_5' - r_4' r_2')]^{1/2}}{2(r_1' r_5' - r_4' r_2')} \quad (11)$$

其中, $S_r = r_1'^2 + r_2'^2 + r_4'^2 + r_5'^2$, $r_1' = r_1/T_y$, $r_2' = r_2/T_y$, $T_x' = T_x/T_y$, $r_4' = r_4/T_y$, $r_5' = r_5/T_y$ 。

(4) 确定 $|T_y|$ 的符号, 解得 $r_1 - r_9$ 和 T_x 。

根据成像关系, 由 X_d 与 x 、 Y_d 与 y 符号相同来确定 T_y 的符号。任选1点 P_i , 设 T_y 为正, 计算:

① $r_i = r_i' T_y$ ($i = 1, 2, 4, 5$), $T_x = T_x' T_y$, $x = r_1 x_w + r_2 y_w + T_x$, $y = r_4 y_w + r_5 y_w + T_y$ 。

②若 x 和 X_d 、 y 和 Y_d 同号, 则 T_y 为正, 否则为负。利用 R 的正交性和右手系准则计算

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & \pm(1 - r_1^2 - r_2^2)^{1/2} \\ r_4 & r_5 & \pm S(1 - r_4^2 - r_5^2)^{1/2} \\ \pm r_7 & \pm r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中 $S = -\text{sgn}[r_1 r_4 + r_2 r_5]$ 。

③根据 R 的正交性, 计算 r_7 、 r_8 、 r_9 :

$$[r_7 \ r_8 \ r_9]^T = [r_1 \ r_2 \ r_3]^T \times [r_4 \ r_5 \ r_6]^T \quad (13)$$

由试探法确定 R , 若 $f > 0$, 则选取正确。

2.2 有效焦距 f 、 T_z 分量

若不计透镜径向畸变 ($k = 0$), 则对每一个 P_i :

$$Y_{di}/f = y_i/z_i \quad (14)$$

由式(5)、式(8)和式(14), 可以得到

$$Y_i f - (Y_{fi} - v_0) T_z / s_y = (Y_{fi} - v_0) w_i / s_y \quad (15)$$

其中, $w_i = r_7 x_{wi} + r_8 y_{wi}$ 。

用矩阵形式表示

$$\begin{bmatrix} Y_i - \frac{Y_{fi} - v_0}{s_y} \\ Y_i - \frac{Y_{fi} - v_0}{s_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ T_z \end{bmatrix} = \frac{Y_{fi} - v_0}{s_y} w_i \quad (16)$$

解超定方程式 (16) ($i = 1, 2, \dots, 35$) 即可分别求出有效焦距 f 和 T_z 的初始值。

2.3 畸变参数 k

平面靶标上的黑白方格是等边长的, 提取共线的任意 4 个方格点 P_1, P_2, P_3, P_4 , 其有向线段的长度已知, 如图 3。该 4 点构成的线束交比为:

$$CR = (\overline{P_1 P_3} / \overline{P_2 P_3}) (\overline{P_1 P_4} / \overline{P_2 P_4}) \quad (17)$$

计算 4 点的点列交比值。根据欧氏空间刚体变换不变性定律, 在不同坐标系中观察同一物体, 物体的长度、角度都保持不变。

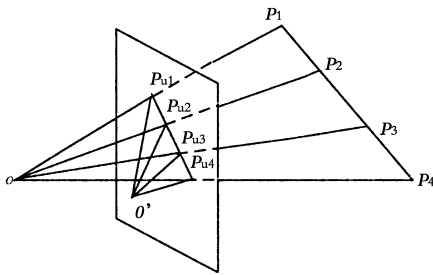


图 3 交比不变示意图

Fig. 3 Sketch of cross ratio invariability

设平面靶标上提取的图像点在摄像机坐标系中为 $P_1 (x_1, y_1, z_1)$, $P_2 (x_2, y_2, z_2)$, $P_3 (x_3, y_3, z_3)$, $P_4 (x_4, y_4, z_4)$ 。对应于图像坐标系中为 $P_{U1} (X_{U1}, Y_{U1})$, $P_{U2} (X_{U2}, Y_{U2})$, $P_{U3} (X_{U3}, Y_{U3})$, $P_{U4} (X_{U4}, Y_{U4})$, 根据透视原理式 (2) 和交比不变性质有

$$\begin{cases} \frac{(X_{U1} - X_{U3})(X_{U2} - X_{U4})}{(X_{U2} - X_{U3})(X_{U1} - X_{U4})} = CR \\ \frac{(Y_{U1} - Y_{U3})(Y_{U2} - Y_{U4})}{(Y_{U2} - Y_{U3})(Y_{U1} - Y_{U4})} = CR \end{cases} \quad (18)$$

由于实际的镜头带有畸变, 即使得空间点 (x, y, z) 所成的像不在 (X_U, Y_U) 点, 而在 (X_d, Y_d) 点。由式 (3) 可得表达式:

$$\begin{cases} X_{Ui} = X_{di} (1 + k r_i^2) \\ Y_{Ui} = Y_{di} (1 + k r_i^2) \end{cases} \quad (19)$$

其中, $i = 1, 2, 3, 4$, $r_i^2 = X_{di}^2 + Y_{di}^2$ 。

将式 (19) 代入 (18), 整理成 1 个形如 $ak^2 + bk + c = 0$ 的关于畸变参数 k 的一元二次方程。

本文使用多组解求平均的方法来优化畸变参数。

3 实验及结果分析

3.1 标定实验

GRB-400 机器人视觉系统采用 Matrox 图像采集卡, 其 MIL 库中包含方便的视频采集函数。CCD 摄像头的传感器有效图像尺寸为 $6.5 (H) \times 4.84 (V) \text{ mm}$ ($1/2$ 靶面), 总像素为 640 (水平) \times 480 (垂直), 拍摄距离约为 70cm。标定所用的模板为黑白相间的国际象棋图案, 每格的边长为 2cm, 黑格子的公共点为角点, 选取 $7 \times 5 = 35$ 个内角点。如图 4 (a) 所示。实验步骤如下:

(1) 将棋盘格标定模板固定, 抓取一帧图像, 输入二值化阈值, 调出可识别的清晰的二值化图像;

(2) 用质心法获得整幅棋盘图像的中心点坐标为 $u_0 = 332$, $v_0 = 194$;

(3) 取棋盘图像上 4 个相邻的黑白小格, 用质心法获得其中心坐标, 由于 4 个小格具有完全中心对称性, 即提取的点即为角点。依次取 4 个棋盘小格, 共获取 35 个角点的世界坐标和实际像素坐标。按上述求解摄像机内外参数的方法得到标定结果为:

旋转矩阵 $R =$

$$\begin{bmatrix} -0.9938 & 0.0054 & 0.1108 \\ -0.0005 & -0.9990 & 0.04426 \\ 0.1109 & -0.0439 & -0.9929 \end{bmatrix};$$

平移向量 $T =$

$$[-0.3483 \quad 310.8286 \quad 564.2456]^T;$$

有效焦距: $f = 11.9696 \text{ mm}$ 。查找 CCD 摄像头说明书, 给定的焦距 $f = 12 \text{ mm}$, 相差约 0.03 mm , 这是镜头畸变、摄像机螺纹连接等引起的误差。

(4) 把 35 个内角点分为 5 大组, 即选取棋盘图像上共线的 7 个点为 1 组, 任取其中的 4 个点求解畸变参数, 这样可以得到 175 组解, 求其平均, 得到一阶径向畸变参数: $k = 0.0013$ 。

3.2 畸变校正实验

图 4 (a) 是 GRB 视觉系统获取的一帧棋盘图像, 可见图像边缘部分有较明显的畸变 (靶标的直线边缘显得弯曲)。在 VC++ 平台上进行编程, 设置框可以对焦距 f , 图像中心坐标 u_0 、 v_0 以及畸

变系数 k 进行调整, 按照标定所得的参数对图像进行校正处理。图 4 (b) 是校正后的图像, 可见原图中弯曲的边缘得到了校正。

为了定量评价畸变校正的效果, 用图像外围直线的直线度来度量畸变的大小。获取图 4 中校正前后棋盘图像的角点像素坐标, 通过 8 组数据统计计算, 可知校正前 X 向和 Y 向的棋盘图像畸变量为 9.45 个像素和 7.11 个像素, 而校正后 X 向和 Y 向的畸变量为 2.43 个像素和 2.37 个像素, 可见畸变校正的效果是明显的。由于畸变量在图像边缘处较大, 本文实验取棋盘图像的内角点, 以减小特征点坐标提取误差带来的影响。

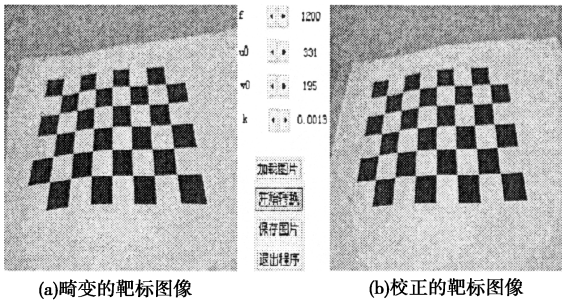
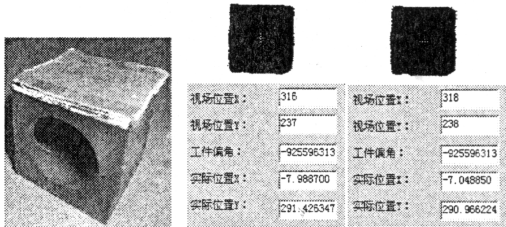


图 4 畸变与校正的靶标图像

Fig. 4 Distorted and corrected target image

图 5 (a) 是机器人视觉系统实际抓取的目标物体, 实验中采取质心法从正上方来识别目标。图 5 (b) 和 (c) 是校正前后目标图像的质心坐标, 获取其角点坐标。用目标图像的理想质心坐标进行比较, 用畸变参数校正目标图像后, 质心坐标 X 向和 Y 向的精确度分别提高了 2 个像素和 1 个像素。因此, 考虑畸变参数能提高对目标物体的定位精度和对目标物体定位的鲁棒性。



(a)目标物体 (b)畸变的目标图像 (c)校正的目标图像

图 5 畸变与校正的目标图像

Fig. 5 Distorted and corrected object image

4 结 论

本文针对 GRB-400 机器人视觉系统, 建立完整的摄像机一阶径向畸变模型, 利用径向排列约束方法建立线性方程组求解摄像机的径向畸变参数。在求得畸变系数后, 对靶标图像进行校正, 提高视觉系统识别的准确性和对摄像机标定参数变化的鲁棒性。从而提高了视觉机器人系统对目标物体的定位精度和识别鲁棒性, 使机器人视觉系统能更精确地识别和抓取目标物体。

参考文献:

[1] 张铨伟, 王彪, 徐贵力. 摄像机标定方法研究 [J]. 计算机技术与发展, 2010, 20 (11): 174-183.

[2] 王建文, 陶瑞. 快速有效的摄像机标定方 [J]. 计算机工程与设计, 2010, 31 (11): 2614-2616.

[3] 刘源洞, 孔建益, 刘钊. 双目立体视觉系统的非线性摄像机标定技术 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28 (9): 3398-3400.

[4] 赵雪峰, 仲晓敏, 兰义华. 标定靶面平行成像平面时 Tsai 算法的改进 [J]. 计算机工程与设计, 2011, 32 (3): 1019-1022.

[5] Zhang Z. A flexible new hnique fotecr camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1330-1334.

[6] 李进明, 林意. 基于交比不变性的摄像机标定方法 [J]. 计算机工程与设计, 2011, 32 (3): 1126-1129.

[7] 张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 84-85.

[8] 杨忠耀, 段锁林. 双目视觉机器人物体搬运伺服控制系统研究 [J]. 太原科技大学学报, 2008, 29 (4): 295-301.

[9] 张和平, 段锁林, 姜小娟. 装配机械手的轮式移动机器人目标物体跟踪与抓取 [J]. 常州大学学报 (自然科学版), 2011, 23 (3): 41-46.