

一种新的基于圆环点的摄像机自标定方法*

孟晓桥, 胡占义

(中国科学院 自动化研究所 模式识别国家重点实验室, 北京 100080)

E-mail: xqmeng@cs.ucla.edu; huzy@nlpr.ia.ac.cn

http://www.ia.ac.cn/nlpr/

摘要: 提出了一种基于圆环点的新的摄像机自标定方法. 该方法仅要求摄像机在 3 个(或 3 个以上)不同方位摄取一个含有若干条直径的圆的图像, 即可线性求解全部摄像机内参数. 该方法原理简单, 完全摆脱了匹配问题, 也无须知道任何物理度量. 整个定标过程不需要人的干预, 可以自动进行, 非常适合非视觉专业人员使用. 模拟和真实图像实验表明, 该方法精确度较高, 鲁棒性较强, 有一定的实用性.

关键词: 摄像机标定; 圆环点; 绝对二次曲线

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

摄像机标定是计算机视觉领域里从二维图像获取三维信息的基本要求^[1,2], 是完成许多视觉工作必不可少的步骤. 随着摄像机的普及, 许多非视觉专业人士需要有一种简易、灵活的标定方法帮助他们完成与视觉有关的工作.

针对这一情况, Zhang 提出了一种用平面模板代替传统标定块的标定方法^[3]. 此方法要求绘制一个具有精确定位点阵的模板(如图 1 所示), 然后使模板和摄像机做相互运动, 获得 3 个(或 3 个以上)不同方位的模板图像, 最后通过确定图像和模板上的点的匹配, 计算出图像和模板之间的单应性矩阵(homography), 并利用该单应性矩阵线性解出摄像机内参数. Zhang 的方法简单方便、成本低廉、标定的精度相对于自标定要高, 符合办公、家庭使用的桌面视觉系统(DVS)的标定要求. 但 Zhang 的方法需要确定模板上点阵的物理坐标以及图像和模板之间的点的匹配, 当图像和选取的点较多时, 这种匹配关系的确定会成为一种极大的负担, 给使用者带来了不便. 针对这一不足, 本文提出的标定方法采用了一种新型的标定模板(如图 2 所示), 即一个圆和通过圆心的若干直线. 该方法仅要求摄像机在 3 个(或 3 个以上)不同方位摄取一个含有若干条直径的圆的图像, 即可线性求解全部摄像机内参数. 采用这种模板的标定方法不存在匹配问题, 也不需要知道任何模板上的物理度量, 完全摆脱了人工干预, 使得整个标定过程非常简单, 能够全自动进行. 遵循圆环点标定的思路, 本文还给出了多种类型的模板均可适用于标定的结论.

1 标定原理

1.1 摄像机成像模型和圆环点的概念

考虑三维空间的点在图像平面上的成像原理, 这里采用如下记号: 图像上的二维点记为 $m = [u, v]^T$, 空间中三维点记为 $M = [x, y, z]^T$, 相应的齐次点坐标分别记为 $\tilde{m} = [u, v, t]^T$ 和 $\tilde{M} = [x, y, z, t]^T$ (t 是齐次项), 如果摄像机采用针孔模型, 则空间点 M 与图像点 m 之间的射影关系为

$$s\tilde{m} = K[R \quad t]\tilde{M}, \quad (1)$$

* 收稿日期: 2000-01-05; 修改日期: 2001-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60033010; 69975021); 国家重点基础研究发展规划 973 资助项目(G1998030502)

作者简介: 孟晓桥(1976 -), 男, 湖北红安人, 博士生, 主要研究领域为摄像机标定, 三维重建, 无线通信网络; 胡占义(1961 -), 男, 山西繁峙人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为计算机视觉, 基于图像的建模与绘制.

其中 s 为非零尺度因子, $(R \ t)$ 是摄像机坐标系相对世界坐标系的旋转矩阵与平移向量, K 称为摄像机内参数矩

$$\text{阵, 定义为 } K = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

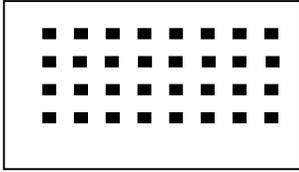


Fig.1 Zhang's planar pattern

图1 Zhang方法使用的标定模板

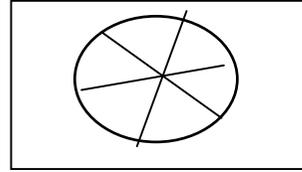


Fig.2 Proposed planar pattern

图2 本文方法使用的标定模板

在三维射影空间中,我们把满足 $t=0$ 的点称为无穷远点,所有无穷远点构成了无穷远平面.在无穷远平面上,满足方程 $\tilde{M}^T \tilde{M} = 0$ 的点构成了绝对二次曲线 ω ,利用式(1),不难验证 ω 的像为二次曲线 $K^{-T} K^{-1}$,可见,绝对二次曲线 ω 的像包含了摄像机内参数的全部信息,如果能拟合出绝对二次曲线的像,即可求出内参数.

不失一般性,假设模板位于世界坐标系的 $X-Y$ 平面上,即模板平面方程为 $z=0$,记旋转矩阵 R 的第 i 列为 r_i ,由式(1),有

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \\ t \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ t \end{bmatrix}. \tag{2}$$

由上式,模板平面上的点 $[x, y, z, t]^T$ 也可用二维齐次坐标 $[x, y, t]^T$ 来表示.根据射影几何的概念,模板平面上所有满足 $t=0$ 的点构成了该模板平面的无穷远直线 l_∞ .我们考虑 l_∞ 上的两个特殊点 $I(1, i, 0, 0)^T, J(1, -i, 0, 0)^T$ (通常称为圆环点)^[8],不难证明: I, J 的坐标满足方程 $\tilde{M}^T \tilde{M} = 0$,即 I, J 是 ω 上的点.如果假设 I, J 的像点分别为 I_m, J_m ,则 I_m, J_m 应落在 ω 的像上,即有:

$$I_m^T K^{-T} K^{-1} I_m = 0, J_m^T K^{-T} K^{-1} J_m = 0. \tag{3}$$

因为 I, J 共轭,在射影变换作用下, I_m, J_m 仍是共轭点,故上两式提供的约束实际上是等同的,但可以由实部、虚部分别为 0 得到关于 $K^{-T} K^{-1}$ 的两个约束:

$$\text{Re}(I_m^T K^{-T} K^{-1} I_m) = 0, \text{Im}(I_m^T K^{-T} K^{-1} I_m) = 0.$$

我们再考虑形如图 2 的模板.如图 3 所示,模板平面上的圆 O 有若干条过圆心的直线,设圆心 O 的坐标为 $(O_x, O_y, 0, 1)^T$,半径为 r ,则圆的方程可写为

$$\left(\frac{x}{t} - O_x\right)^2 + \left(\frac{y}{t} - O_y\right)^2 = r^2. \tag{4}$$

为计算圆 O 与无穷远直线 l_∞ 的交点,将 l_∞ 的方程 $t=0$ 代入式(4),易得 $x^2 + y^2 = 0$,即 $y = \pm ix$,故两个交点可用齐次坐标表示为 $(1, \pm i, 0)$,与 O_x, O_y, t 无关,这表明平面上任一个圆与该平面的无穷远直线必定交于两个圆环点^[4],根据透视变换的性质,相应地,在图像平面上,圆的像与无穷远直线的像是圆环点的像,如图 4 所示.

一般情况下,模板平面上的圆成像为椭圆,椭圆方程可以直接在图像上检测获得,如果我们能进一步得到无穷远直线在图像上的像(通常称为隐消线),即可联立椭圆和直线的方程解出圆环点的像坐标.

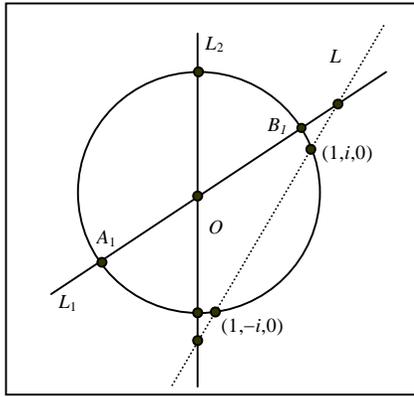


Fig.3 Model plane
图3 模板平面

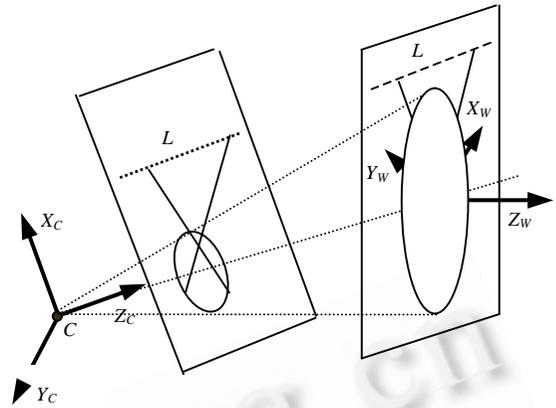


Fig.4 From model plane to image plane
图4 模板平面的成像

1.2 计算隐消线方程

图3中过圆心O的一条直线L₁交圆于点A₁, B₁,交l_∞于C₁,则根据射影几何理论, A₁, B₁, O, C₁四点的交比为-1,即(A₁B₁, OC₁) = $\frac{A_1O}{B_1O} / \frac{A_1C_1}{B_1C_1} = -1$ (因为O平分A₁, B₁且C₁是无穷远点),即A₁, B₁两点调和分割O, C₁.假设A₁, B₁, O, C₁四点对应的像点分别为m_{A1}, m_{B1}, m_O, m_{C1},则根据摄像机的透视变换的同素对应和保交比不变的性质,易知m_{A1}, m_{B1}, m_O, m_{C1}四点应共线,且所成的交比为-1,利用这两条性质,当我们在图像上确定出m_{A1}, m_{B1}, m_O后,即可列出两个方程:

$$\begin{cases} \frac{|m_{A1}m_O|}{|m_{B1}m_O|} / \frac{|m_{A1}m_{C1}|}{|m_{B1}m_{C1}|} = -1 \\ (m_{A1} \times m_{B1}) \cdot m_{C1} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

从方程组式(5)可以解出m_{C1}.显然, m_{C1}是隐消线上的点.如果存在多条直线,则同理可得到多个隐消线上的点,我们可以在最小二乘意义下拟合出隐消线的方程.

在上面计算m_{C1}时,已事先假定了m_{A1}, m_{B1}, m_O三点共线,但在实际应用中,由于噪声、直线检测误差等因素的存在,各条过圆心直线的像l_i并不总是精确地交于圆心所成的像点m_O,如图5所示,在这种情况下,我们定义了一个代价函数:

$$E = \sum_i d^2(m_O, l_i),$$

其中, d(m_O, l_i)表示点m_O到直线l_i的垂直距离.我们先利用牛顿迭代法求出使E最小的m_O,再将m_O投影到各l_i上得到点m_{Oi}.在利用式(5)求解m_{Ci}时,用m_{Oi}代替m_O进行计算即可保证m_{A1}, m_{B1}, m_O三点共线.

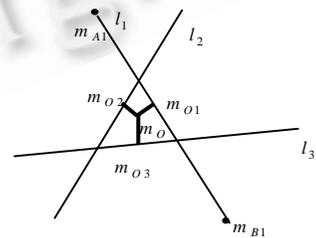


Fig.5 Nonlinear case
图5 l_i不共线情况

1.3 求解摄像机内参数

在第1.1和1.2节中,我们分别求出了圆O和无穷远直线的像,联立求解,即可得到两个圆环点的像点I_m, J_m坐标.

设 $I_m = [I_{m1}, I_{m2}, I_{m3}]^T$, 并设绝对二次曲线的像 $C = K^{-T} K^{-1} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{bmatrix}$, 利用式(3), 有

$$[I_{m1}, I_{m2}, I_{m3}] C [I_{m1}, I_{m2}, I_{m3}]^T = 0. \tag{6}$$

注意到 C 是对称阵,定义一个 6 维向量 $c = [C_{11}, C_{12}, C_{22}, C_{13}, C_{23}, C_{33}]^T$, 则式(6)可写为线性方程的形式:

$$Ac = 0, \tag{7}$$

其中 $A = [I_{m1}I_{m1}, I_{m1}I_{m2} + I_{m2}I_{m1}, I_{m2}I_{m2}, I_{m3}I_{m1} + I_{m1}I_{m3}, I_{m3}I_{m2} + I_{m2}I_{m3}, I_{m3}I_{m3}]$. 由于 A 是复向量,式(7)等价于两个齐次方程:

$$\begin{bmatrix} \text{Re}(A) \\ \text{Im}(A) \end{bmatrix} c = 0. \tag{8}$$

如果在不同方位对模板拍摄 n 幅图像,将 n 个形如式(8)的方程组叠加起来,得:

$$Vc = 0, \tag{9}$$

其中 V 是 $2n \times 6$ 的矩阵,当 $n \geq 3$ 时,在相差一个常数因子意义下一般可唯一确定 c (如果摄像机的倾斜因子 $\gamma = 0$,只需两幅图像即可确定 c).也可这样理解,确定一个椭圆型二次曲线至少需要 5 个点,而每幅图像可提供两个点,故所需最少图像的数目为 $\lceil 5/2 \rceil = 3$.易知,式(9)的解是 $V^T V$ 最小特征值对应的特征向量^[8].

解出 c 后,利用 Cholesky 分解法对 C 进行分解可唯一确定 K^{-1} ^[8],再求逆得到 K .这样求出的 K 与内参数矩阵相差一个常数因子,因为内参数矩阵最后一个元素为 1,所以将 K 的最后一个元素归一化,即得到真正的摄像机内参数矩阵.

1.4 恢复部分外参数

我们已由第 1.1 节得知,模板平面上的点 $(x, y, 0)$,如果满足条件 $y = \pm ix$ (x, y 均为复数),则其对应的像点是 I_m (或 J_m).代入式(2)得

$$sI_m = K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \\ \pm ix & & \\ 0 & & \end{bmatrix} = x(Kr_1 \pm Kr_2 \cdot i). \tag{10}$$

式(10)中的 s 为常数,令 $s/x = a + bi$,可得 $r_1 = \lambda_1 K^{-1}(a * \text{Re}(I_m) - b * \text{Im}(I_m))$, $r_2 = \lambda_2 K^{-1}(b * \text{Re}(I_m) + a * \text{Im}(I_m))$ (λ_1, λ_2 是常数). a, b 是未知常数,故无法求出 r_1, r_2 (注: $r_1^T r_2 = 0$ 是不依赖于 a, b 而恒成立的等式,并不能由此推出 a, b 之间的关系),但我们可以利用关系式 $r_3 = r_1 \times r_2$ 求出 r_3 :

$$r_3 = \lambda_3 [K^{-1} \text{Re}(I_m)] \times [K^{-1} \text{Im}(I_m)] \text{ (常数 } \lambda_3 \text{ 可通过 } \|r_3\| = 1 \text{ 确定)}.$$

t 可在相差一个常数因子 λ_t 下通过圆心的像点坐标 m_o 恢复, $t = \lambda_t K^{-1} m_o$. 可见,外参数 r_1, r_2 被“丢失”了,这是由模板平面图形的特殊性造成的,其原因可以这样理解:如图 4 所示, C 是光心,以 C 为原点建立摄像机坐标系 $X_c Y_c Z_c$. 由第 1.1 节知,模板平面上圆环点的坐标不依赖于圆心 O ,故不妨令轴 Z_c 通过圆心 O ,并以 O 为原点建立世界坐标系 $X_w Y_w Z_w$ (轴 Z_w 与模板平面的法向量重合). 我们知道, r_1, r_2, r_3 分别对应着轴 X_w, Y_w, Z_w 在摄像机坐标系 $X_c Y_c Z_c$ 中的单位矢量. 由于模板平面上的图形具有中心对称性,其成像仅取决于轴 Z_w (在摄像机坐标系中),而与轴 X_w, Y_w 的选取无关. 因此,在摄像机内参数和模板的像已知时,我们只能求出 r_3 .

一般而言,摄像机的外参数对桌面视觉系统没有意义, r_1, r_2 的“丢失”并不会造成多大的影响.

1.5 退化情形

对自标定过程中退化情形的详尽研究可参见文献[5,9].在本文方法中,出现退化情形只可能是解出了相同的圆环点像坐标 I_m .从式(10)可以看出: I_m 只与 R 有关,与 t 无关,故为避免退化情形,必须保证摄像机摄取图像时,摄像机相对模板平面的 R 不同,即摄像机与模板平面之间的相对姿态不同.

另一种退化情形是模板平面与图像平面平行,因为此时模板平面上的无穷远点 $(x, y, 0, 0)$ 的成像为

$$K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \\ & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha x + \gamma y \\ \beta y \\ 0 \end{bmatrix}.$$

$[\alpha x + \gamma y, \beta y, 0]^T$ 是图像平面的无穷远点,这表明模板平面与图像平面平行时,隐消线将与图像平面的无穷远直线重合,此时第 1.3 节中计算隐消线的方法将失效.为避免这种退化情形,我们给出一种简单的判别方法.如图 6 所示, m_o 是圆心的像点,对应的极线是隐消线 l_∞ , E 是椭圆中心,对应的极线是图像平面的无穷远直线 L_∞ .根据配极变换的原则:二次曲线的极点与极线是一一对应的^[8],所以当模板平面与图像平面平行时, l_∞ 与 L_∞ 重合, m_o 也将与 E 重合.利用这种性质,我们可以在标定过程中将检测出的椭圆心与圆心的像点 m_o 相比较,尽量使两者距离较大,以“远离”退化情形.

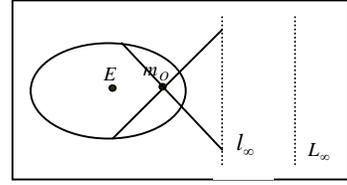


Fig.6 Vanishing line and the line at infinity

图 6 图像平面的无穷远直线与隐消线

1.6 算法描述

总结上述讨论,我们把标定过程概括如下:

- (1) 打印一个圆及通过圆心的若干条直线,并把它贴到平面上;
- (2) 改变摄像机与模板的相对位姿,拍摄至少 3 幅图像;
- (3) 在图像上分别检测椭圆和直线,写出椭圆和直线束的方程,并检验是否为退化情形;
- (4) 用直线束计算隐消线方程(参见第 1.2 节),再联立椭圆和隐消线方程计算圆环点的像坐标(参见第 1.1 节);
- (5) 得到至少 3 幅图像上的圆环点像坐标后,解出摄像机内参数(参见第 1.3 节).

1.7 直线和椭圆的提取

为计算出模板上的直线和圆的像方程,有必要在图像上直接提取出直线和椭圆,关于该问题,文献中已有大量现成算法^[12,13].在这里,由于我们所采用的模板是在白色背景上打印少量的直线和曲线,所提取的模板图像上仅含有极少量的噪声点,因而直线和椭圆的提取变得非常的简单.在实际试验中,我们采用随机 Hough 变换提取直线^[11],采用基于代数距离的最小二乘法来检测椭圆.设图像上有 n 个点 $\{x_i\} = \{(x_i, y_i)\} (i = 1, \dots, n)$, 则椭圆的方程可写为

$$Q(x, y) = Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F.$$

我们在规一化约束 $A^2 + B^2 + C^2 + D^2 + E^2 + F^2 = 1$ 下使 $F = \sum_{i=1}^n Q^2(x_i, y_i)$ 最小,即拟合出了椭圆方程,由于噪声点极少,提取出的椭圆精度非常高.关于椭圆检测更详细的描述^[9,10].

2 实验

2.1 模拟数据实验

在模拟实验中,摄像机设置如下: $\alpha = 1200$, $\beta = 1000$, $\gamma = 0.2$, $u_0 = v_0 = 0$, 图像的分辨率为 1000×1000 . 平面模板在空间的朝向(为一旋转矩阵)由三维向量 r 表示,其中旋转轴平行于向量的方向,旋转角等于向量的长度(单位:degree).平面模板的位置由三维向量 t 表示(单位:cm).

不同随机噪声水平下的标定结果:本组模拟实验采用了 3 幅图像,对应的摄像机姿态和位置参数分别是:旋转轴 $r_1 = [170, 50, 10]^T$, 旋转角为 15° , $t_1 = [20, 20, 0]^T$; 旋转轴 $r_2 = [40, 50, 160]^T$, 旋转角为 15° , $t_2 = [30, 20, 5]^T$; 旋转轴 $r_3 = [20, 70, 70]^T$, 旋转角为 15° , $t_3 = [10, 30, 30]^T$. 模板平面上有一个圆,半径为 50. 共有 10 条均匀分布的通过圆心的直线,图像上相应的投影点位置分别加上均值为 0, 均方差为 σ (噪声水平)的高斯噪声,噪声的均方差 σ 由 0.4 像素~3.2 像素.表 1 是模拟实验求出的摄像机内参数随噪声变化的情况,所有结果均是 100 次独立试验的平均值.

为测试本文方法的稳定性,我们计算了不同噪声水平下的 5 个内参数的均方差(如图 7~ 图 9 所示).当噪声的均方差 σ 增加到 6.0 像素时,内参数的均方差仍然相当小,这表明本文方法的鲁棒性较好.

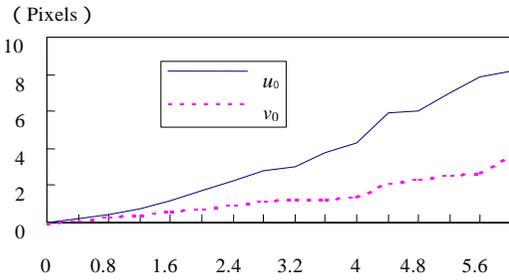


Fig.7 Standard deviations of u_0 and v_0
图 7 u_0, v_0 的均方差随噪声变化的关系

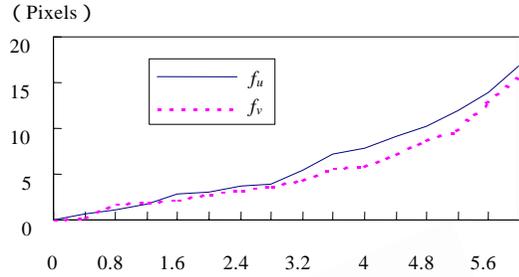


Fig.8 Standard deviations of f_u and f_v
图 8 f_u, f_v 的均方差随噪声变化的关系

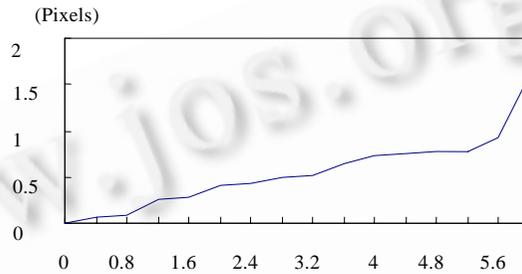


Fig.9 Standard deviation of s
图 9 s 的均方差随噪声变化的关系

从这组实验可以看出,本文方法标定精确性很好,鲁棒性也比较强,在比较大的噪声情形下,标定的结果仍然令人满意(见表 1).

Table 1 Calibrating results at different noise levels
表 1 不同噪声水平下的标定结果

Noise level	f_u	f_v	s	u_0	v_0
0.4	1 201.320	1 001.351	0.201	-0.544	0.000
0.8	1 201.609	998.817	0.263	-1.991	0.448
1.2	1 198.048	1 003.224	0.429	-2.396	0.852
1.6	1 203.699	1 006.150	0.605	-3.245	2.087
2.0	1 207.070	985.183	0.630	-6.949	2.664
2.4	1 182.346	1 017.202	0.714	-7.567	4.369
2.8	1 219.099	1 018.161	0.838	-8.536	4.433
3.2	1 221.168	1 024.087	0.947	-15.345	9.673

噪声水平.

不同的图像数目对标定的影响:本组实验测试了用于标定的图像数目对标定结果的影响.前 3 幅图四像对应的摄像机的姿态和位置参数与第 1 组实验相同,从摄取第 4 幅图像开始,摄像机的旋转轴、旋转角度、位置参数均是随机给定的.用于标定的图像数目从 3 幅增加到 18 幅,对于每一个图像数目,我们均进行了 100 次独立实验,每次实验均加上了噪声水平为 1.0 的高斯噪声.由实验结果(图 10 ~ 图 11)可以看出,使用更多的图像有助于提高标定的精度.但当图像数目多于 6 幅时,改进的效果已很不明显.

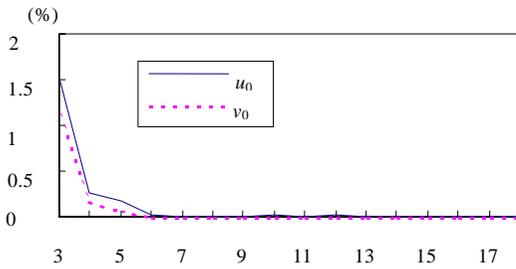


Fig.10 Relative error of u_0 and v_0

图 10 u_0, v_0 的相对误差与图像数目的关系

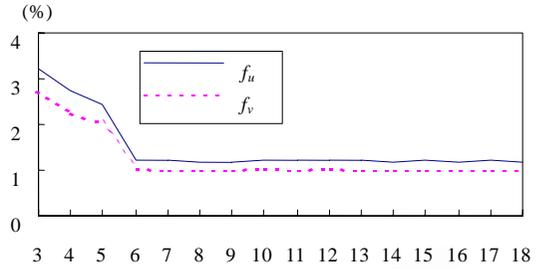


Fig.11 Relative error of f_u and f_v

图 11 f_u, f_v 的相对误差与图像数目的关系

圆的偏心率对标定的影响:本组实验测试了模板上的圆产生畸变对标定结果的影响.我们将圆的偏心率从 0 增加到 0.3(偏心率 e 定义为: $e^2 = 1 - (b/a)^2$, 其中 a, b 分别为长半轴、短半轴),对于每一个偏心率,均进行 100 次独立实验,每次实验均加上噪声水平为 1.0 的高斯噪声.实验结果(如图 12 和图 13 所示)表明,圆的偏心率对标定结果的影响并不显著.

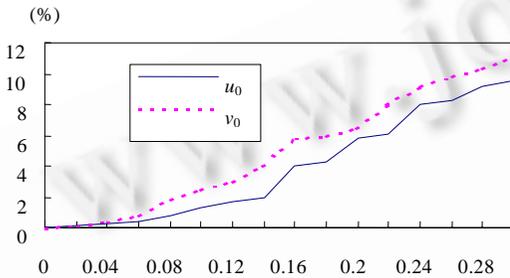


Fig.12 Relative error of u_0 and v_0

图 12 u_0, v_0 的相对误差随圆离心率变化的关系

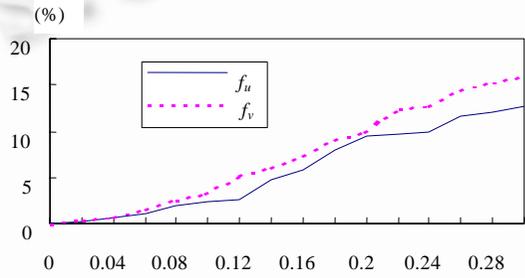


Fig.13 Relative error of f_u and f_v

图 13 f_u, f_v 的相对误差随圆离心率变化的关系

本文方法与 Zhang 方法的比较:为了保证可比性,在用两种方法标定的过程中,我们设置的摄像机内外参数、图像数目等条件均相同,Zhang 方法所需的标定点列是直接在本方法所用的模板上选取的(共 13 个点).图 14、图 15 分别是两种方法标定得到的 u_0, f_u 的相对误差的比较.实验结果表明,当噪声水平较低时,两种方法标定结果相差不大,而当噪声水平增大到 3.0 以上时,Zhang 方法标定结果的相对误差明显大于本文方法.

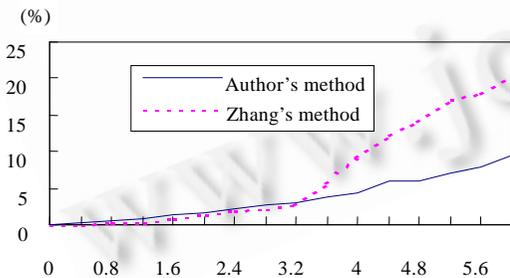


Fig.14 Relative error of u_0

图 14 u_0 的相对误差

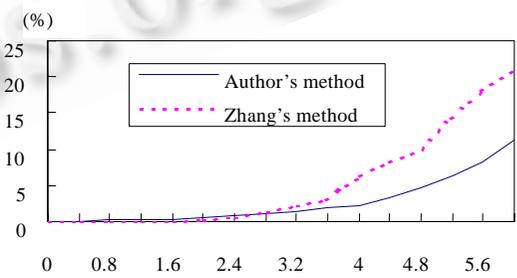


Fig.15 Relative error of f_u

图 15 f_u 的相对误差

2.2 真实图像实验

我们采用真实图像实验来检验我们提出的摄像机标定方法.摄像机采用 CCD 数码相机,图像分辨率为 1280×960 .我们用激光打印机打印了一个含 6 条直径的圆,贴在墙壁上,该圆的直径为 20cm.我们在不同的方位拍摄了 4 幅图像(图 16 所示),利用这 4 幅图像进行标定,标定结果如表 2 所示.

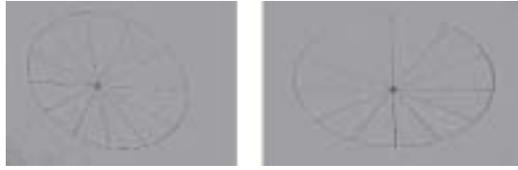


Fig.16 Two of the 4 real images taken by digital camera
图 16 数码相机摄取的 4 幅真实模板图像中的两幅

Table 2 Calibrating results from the 4 images
表 2 利用 4 幅图像标定获得的摄像机内参数

	α	β	γ	u_0	v_0
Computed value	1 390.889 299	1 392.081 766	-7.465 854	574.236 974 6	449.545 619 3

计算值.

最后,我们用立体视觉的方法来重建三维场景以检验前面得到的摄像机内参数.利用前面已标定的数码相机拍摄标定块的两幅图像(如图 17 所示).在每幅图像的两个可见面上手工选取 18 个点,每个面上 9 个点(图像中用“十”字标出),利用文献[6]的运动与结构重建算法,我们重建出标定块的两个面,图 18 显示了三维重建结果不同视角的两幅视图.从图中可以看出,重建出的每个面上的点确实是共面的.另外,重建出的两个面之间的夹角为 91° ,这和实际值 90° 是非常吻合的.

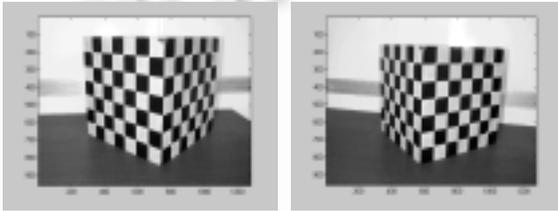


Fig.17 Two images of a calibration rig taken by digital camera

图 17 数码相机摄取的标定块的两幅图像

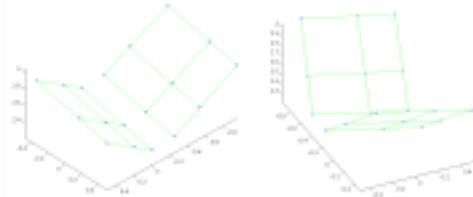


Fig.18 Two views of the reconstructed calibration rig

图 18 重建出的标定块两个面的两幅视图

3 结 论

在 Zhang 的平面模板摄像机标定方法的基础上,我们提出了一种基于圆环点的摄像机标定方法.该方法采用了打印着含若干条直径的圆的新型模板,只需要摄像机在 3 个或 3 个以上不同的方位拍摄该模板的图像,即可线性解出全部摄像机内参数.该方法的优点是不需要确定模板和图像点之间的匹配关系,也不需要知道任何模板上的物理度量,完全摆脱了人工干预,整个标定过程非常简单,能够全自动进行,非常适合对计算机视觉不太熟悉的人员使用.最后,我们还进一步证明,遵循与该方法类似的思路,可以设计多种多样的模板用于标定.模拟和真实图像实验都表明了本文给出的方法具有较高的精度和鲁棒性.

References:

- [1] Brown, D.C. Close-range camera calibration. Photogrammetric Engineering, 1971,37(8):855~866.
- [2] Faig, W. Calibration of close-range photogrammetry system: mathematical formulation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1975,41(12):1479~1486.
- [3] Zhang, Z. A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000,22(11):1330~1334.

- [4] Liebowitz, D., Zisserman, A. Metric rectification for perspective images of planes. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Santa Barbara, CA:IEEE Computer Society, 1998. 482~488.
- [5] Sturm, P. Critical motion sequences for monocular self-calibration and uncalibrated euclidean reconstruction. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Juan, Puerto Rico: IEEE Computer Society Press, 1997. 1100~1105.
- [6] Zhang, Z. Motion and structure from two perspective views: from essential parameters to euclidean motion via fundamental matrix. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997,14(11):2938~2950.
- [7] Yang, C.J., Hu, Z.Y. Planar conic based camera calibration. In: Sanfeliu, A., Villanueva, J.J., Vanrell, M., *et al.*, eds. Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition. Barcelona: IEEE Computer Society Press, 2000. 555~558.
- [8] Semple, J.G., Kneebone, G.T. Algebraic Projective Geometry. Oxford: Clarendon Press, 1952.
- [9] Ma, Y., Soatto, S., Kosecka, J., *et al.* Euclidean reconstruction and reprojection up to subgroups. In: Proceedings of the International Conference on Computer Vision. Kerkyra: IEEE Computer Society Press, 1999. 219~229.
- [10] Bookstein, F.L. Fitting conic sections to scattered data. *Computer Graphics and Image Processing*, 1979,9:56~71.
- [11] Kanatani, K. Geometric Computation for Machine Vision. Oxford: Oxford Science Publications, 1993.
- [12] Xu, L., Oja, E. Randomized hough transform(RHT): basic mechanism, algorithms, and computational complexities. *CVGIP: Image Understanding*, 1993,57(2):131~154.
- [13] Roth, G., Levine, M.D. Extracting geometric primitive. *CVGIP: Image Understanding*, 1993,58(1):1~22.
- [14] Ma, Song-de., Zhang, Zheng-you. *Computer Vision——Computing Theory and Algorithm Basis*. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese).

附中文参考文献:

- [14] 马颂德,张正友.计算机视觉——计算理论与算法基础.北京:科学出版社,1998.

A New Easy Camera Calibration Technique Based on Circular Points*

MENG Xiao-qiao, HU Zhan-yi

(National Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

E-mail: xqmeng@cs.ucla.edu; huzy@nlpr.ia.ac.cn

<http://www.ia.ac.cn/nlpr/>

Abstract: A new easy technique for calibrating a camera based on circular points is proposed. The proposed technique only requires the camera to observe a newly designed planar calibration pattern (referred to as the model plane hereinafter) which includes a circle and a pencil of lines passing through the circle's center, at a few (at least three) different unknown orientations, then all the five intrinsic parameters can be determined linearly. The main point of the proposed technique is that it does not need know metric measurement on the model plane and the correspondences between points on the model plane and image one, hence it can be done fully automatically. The proposed technique is particularly useful for those people who are not familiar with computer vision. Experiments with simulated data as well as with real images show that the new technique is robust and accurate.

Key words: camera calibration; circular points; model plane

* Received January 5, 2000; accepted April 24, 2001

Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60033010,69975021; the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.G1998030502