

文章编号: 0253-2239(2010)05-1297-07

摄像机的一种主动视觉标定方法

朱 嘉 李醒飞 徐颖欣

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 提出了一种快速高精度的摄像机主动视觉标定方法,建立了摄像机模型并详细分析了其各项参数的求解算法。标定时,令摄像机作一组二维的平移运动,采集圆孔靶标件的图像并计算圆心的像点坐标,同时记录摄像机的移动距离,得到标定所需的特征点。利用这些特征点计算摄像机标定参数,标定精度可达到 0.005 mm。利用该方法定制的标定模块实现了摄像机的自动标定。该方法对摄像机运动的限制条件较少,并基本实现了摄像机模型参数的线性求解,为主动视觉系统的摄像机标定提供了一种有效的解决方案。

关键词 机器视觉;摄像机标定;主动视觉;镜头畸变

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1297

Camera Calibration Technique Based on Active Vision

Zhu Jia Li Xingfei Xu Yingxin

(State Key Laboratory of Precise Measurement Technology and Instrument, Tianjin University,
Tianjin 300072, China)

Abstract A rapid and high-precision camera calibration technique based on active vision is proposed. A camera model and detailed analysis on the solution algorithm of its parameter are established. By in-plane translational motion of the camera, images of a hollow target plate are collected to calculate locations of the circular center. Meanwhile, the exact displacements of the camera are recorded; therefore the needed coordinates of the feature points in the object plane and in the correlative image plane are gained. Using these feature points, the camera calibration parameters can be calculated with a precision of 0.005 mm. Finally, automatic calibration is realized by use of the custom calibration module. The proposed method with less limiting conditions of camera motion basically realizes linear solution of the parameters of camera model, and provides an effective solution of camera calibration for active vision systems.

Key words machine vision; camera calibration; active vision; lens distortion

1 引 言

三维重建是机器视觉的主要研究方向。视觉系统从摄像机获取的图像信息出发,计算三维场景中物体的形状、位置等几何信息。像点与空间物点的几何对应关系由摄像机模型决定。通过实验和计算确定摄像机模型参数的过程称为摄像机标定^[1]。

现有的摄像机标定方法可分为传统标定方法、主动视觉标定方法和摄像机自标定方法^[2]。传统标定方法^[3~6]过程复杂,并需要高精度的已知景物结构信息(常用精密加工的标定参照物);摄像机自标

定方法^[7~9]不依赖已知参照物,仅通过图像点的对应关系对摄像机作标定,灵活、应用范围广,但精度不高,稳健性不足;主动视觉标定方法^[10,11]中,摄像机安置在可精确控制的运动平台上。该方法利用已知的运动信息来建立关于摄像机模型参数的方程,并通常可线性求解,因此具有操作方便、精度高和稳健性好等优点,在主动视觉系统中得到了普遍应用。目前常用的主动视觉标定方法有:基于摄像机纯旋转的标定方法^[12]、基于三正交平移运动的标定方法^[13]、基于平面正交运动的标定方法^[11]、基于无穷

收稿日期: 2009-04-30; 收到修改稿日期: 2009-06-26

作者简介: 朱 嘉(1982—),男,博士研究生,主要从事数字图像处理、测试计量技术及仪器等方面的研究。

E-mail: s.1415926@gmail.com

导师简介: 李醒飞(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事多传感器融合技术、测试计量技术及仪器等方面的研究。

E-mail: lixf@tju.edu.cn

的切向畸变(tangential distortion)和因镜片制造及成像敏感阵列制造误差造成的薄透镜畸变(thin prism distortion)。

径向畸变和切向畸变分别表示为^[16]

$$\mathbf{D}_r = (k_1\rho^2 + k_2\rho^4 + k_3\rho^6 + \dots) \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{D}_t = \begin{bmatrix} [p_1(\rho^2 + 2\bar{u}^2) + 2p_2\bar{u}\bar{v}](1 + p_3\rho^2 + \dots) \\ [p_2(\rho^2 + 2\bar{v}^2) + 2p_1\bar{u}\bar{v}](1 + p_3\rho^2 + \dots) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

薄透镜畸变表示为^[17]

$$\mathbf{D}_p = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \rho^2 + \begin{bmatrix} s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} \rho^4 + \dots, \quad (5)$$

式中 $\bar{u} = u_d - u_0$, $\bar{v} = v_d - v_0$, $\rho^2 = \bar{u}^2 + \bar{v}^2$; $k_i, i = 1, 2, 3 \dots$ 为径向畸变系数; $p_i, i = 1, 2, 3 \dots$ 为切向畸变系数; $s_i, i = 1, 2, 3 \dots$ 为薄透镜畸变系数。

令 $\boldsymbol{\alpha}_d = [u_d, v_d]^T$, $\boldsymbol{\alpha}_c = [u, v]^T$, 存在如下关系:

$$\boldsymbol{\alpha}_c = \boldsymbol{\alpha}_d - \Gamma(\boldsymbol{\delta}, \boldsymbol{\alpha}_d), \quad (6)$$

即理想像点(或畸变矫正后的像点)坐标等于实际像点坐标与畸变误差之差。式中 Γ 为非线性的畸变函数, 它包含径向畸变 \mathbf{D}_r 、切向畸变 \mathbf{D}_t 和薄透镜畸变 \mathbf{D}_p ; $\boldsymbol{\delta}$ 为畸变系数向量。考虑 $\mathbf{D}_r, \mathbf{D}_t$ 和 \mathbf{D}_p 中起主导作用的低次项^[19], 得到简化的畸变函数

$$\hat{\Gamma}(\hat{\boldsymbol{\delta}}, \boldsymbol{\alpha}_d) = \hat{\mathbf{D}}_r + \hat{\mathbf{D}}_t + \hat{\mathbf{D}}_p = \begin{bmatrix} \bar{u}(k_1\rho^2 + k_2\rho^4) + p_1(\rho^2 + 2\bar{u}^2) + 2p_2\bar{u}\bar{v} + s_1\rho^2 \\ \bar{v}(k_1\rho^2 + k_2\rho^4) + p_2(\rho^2 + 2\bar{v}^2) + 2p_1\bar{u}\bar{v} + s_2\rho^2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $\hat{\boldsymbol{\delta}} = [k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2]^T$ 为简化的畸变系数向量。

(1), (2), (5) 和 (6) 式构建了摄像机模型, 它包含 6 个外部参数 $\boldsymbol{\theta}_{\text{ext}} = [t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma]^T$ 和 11 个内部参数 $\boldsymbol{\theta}_{\text{int}} = [f_u, f_v, \kappa, u_0, v_0, k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2]^T$ 。

令

$$\mathbf{B} = \lambda \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{21} & b_{31} \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \frac{1}{f_u^2} & -\frac{\kappa}{f_u^2 f_v} & \frac{v_0 \kappa - u_0 f_v}{f_u^2 f_v} \\ -\frac{\kappa}{f_u^2 f_v} & \frac{\kappa}{f_u f_v^2} + \frac{1}{f_v^2} & -\frac{\kappa(v_0 \kappa - u_0 f_v)}{f_u f_v^2} - \frac{v_0}{f_v^2} \\ \frac{v_0 \kappa - u_0 f_v}{f_u f_v} & -\frac{\kappa(v_0 \kappa - u_0 f_v)}{f_u f_v^2} - \frac{v_0}{f_v^2} & \frac{(v_0 \kappa - u_0 f_v)^2}{f_u f_v^2} + \frac{v_0^2}{f_v^2} + 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

定义向量 $\mathbf{b} = [b_{11} \ b_{12} \ b_{22} \ b_{13} \ b_{23} \ b_{33}]^T$, 则有

$$\mathbf{h}_i^T \mathbf{B} \mathbf{h}_j = \mathbf{v}_{ij}^T \mathbf{b}, \quad (15)$$

3 标定方法的数学原理

3.1 理想模型的参数估计

定义不考虑畸变时的摄像机模型为理想模型, 参考文献[6]的方法估计理想模型参数。不失一般性, 设物方的平面模板位于 $Y=0$ 的平面, 由(1)和(2)式有

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3 \ \mathbf{t}] \cdot \begin{bmatrix} X \\ Z \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 \mathbf{A} 为不考虑畸变时摄像机模型的内部参数; $\mathbf{r}_i, i=1, 2, 3$ 表示旋转矩阵 \mathbf{R} 的第 i 个列向量。 $\mathbf{H} = \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_3 \ \mathbf{t}]$ 为单应性(homography)矩阵^[19], 用 $\mathbf{h}_i = [h_{1i} \ h_{2i} \ h_{3i}]^T, i=1, 2, 3$, 表示矩阵 \mathbf{H} 的第 i 个列向量, 则 $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3]$, (8)式可改写为

$$\lambda \tilde{\mathbf{m}} = \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{M}, \quad (9)$$

式中 $\tilde{\mathbf{m}} = [u, v, 1]^T$, $\tilde{\mathbf{M}} = [X, Z, 1]^T$ 。

首先估计单应性矩阵 \mathbf{H} ; 令 $\mathbf{x} = [\mathbf{h}_1^T \ \mathbf{h}_2^T \ \mathbf{h}_3^T]^T$, (9)式可改写为

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{M}}^T & 0^T & -u\tilde{\mathbf{M}}^T \\ 0^T & \tilde{\mathbf{M}}^T & -v\tilde{\mathbf{M}}^T \end{bmatrix} \mathbf{x} = 0, \quad (10)$$

给定 n 个特征点, 可以建立 n 个形如(10)式的方程, 联立方程

$$\mathbf{L} \mathbf{x} = 0, \quad (11)$$

式中 \mathbf{L} 为 $2n \times 9$ 的矩阵。

同时由 $[\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3] = \lambda^{-1} \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_3 \ \mathbf{t}]$ 可得

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{r}_3 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \end{cases}, \quad (12)$$

由于 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_3 单位正交, 则 $\mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_3 = 0$, $\|\mathbf{r}_1\| = \|\mathbf{r}_3\|$, 有

$$\begin{cases} \mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0 \\ \mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \end{cases}, \quad (13)$$

$\mathbf{v}_{ij} = [h_{1i} h_{1j} \ h_{1i} h_{2j} + h_{2i} h_{1j} \ h_{2i} h_{2j}$

$$h_{3i} h_{1j} + h_{1i} h_{3j} \ h_{3i} h_{2j} + h_{2i} h_{3j} \ h_{3i} h_{3j}]^T, \quad (16)$$

由(11), (13)和(14)式可得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{12}^T \\ \mathbf{v}_{11}^T - \mathbf{v}_{22}^T \end{bmatrix} \mathbf{b} = 0, \quad (17)$$

对平面模板进行 n 次观察, 得到 n 幅图像, 则可以得

到 n 个类似(14)式的方程组, 有

$$\mathbf{V}\mathbf{b} = 0, \quad (18)$$

由(11)式可求得摄像机模型的部分内部参数:

$$\begin{cases} v_0 = (b_{12}b_{13} - b_{11}b_{23}) / (b_{11}b_{22} - b_{12}^2) \\ \lambda = b_{33} - [b_{13}^2 + v_0(b_{12}b_{13} - b_{11}b_{23})] / b_{11} \\ f_u = \sqrt{\lambda / b_{11}} \\ f_v = \sqrt{\lambda b_{11} / (b_{11}b_{22} - b_{12}^2)} \\ \kappa = -b_{12}f_u f_v / \lambda \\ u_0 = \kappa v_0 / f_v - b_{13}f_u / \lambda \end{cases}, \quad (19)$$

同时可以求得摄像机模型的外部参数

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{r}_3 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_3 \\ \mathbf{t} = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_3 \end{cases}. \quad (20)$$

3.2 畸变矫正

引入畸变误差并计算摄像机模型的畸变系数。由(6)式有 $\hat{\Gamma}(\hat{\delta}, \alpha_d) = \alpha_d - \alpha_c$, 又由(7)式有

$$\begin{bmatrix} \bar{u}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2) & \bar{u}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^2 & 3\bar{u}^2 + \bar{v}^2 & 2\bar{u}\bar{v} & \bar{u}^2 + \bar{v}^2 & 0 \\ \bar{v}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2) & \bar{v}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^2 & 2\bar{u}\bar{v} & \bar{u}^2 + 3\bar{v}^2 & 0 & \bar{u}^2 + \bar{v}^2 \end{bmatrix} \hat{\delta} = \alpha_d - \alpha_c, \quad (21)$$

对给定的 n 个特征点, 建立 n 个形如(21)式的方程, 联立得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D}(1) \\ \mathbf{D}(2) \\ \vdots \\ \mathbf{D}(n) \end{bmatrix} \hat{\delta} = \begin{bmatrix} \alpha_d(1) - \alpha_c(1) \\ \alpha_d(2) - \alpha_c(2) \\ \vdots \\ \alpha_d(n) - \alpha_c(n) \end{bmatrix}, \quad (22)$$

式中

$$\mathbf{D}(i) = \begin{bmatrix} \overline{u(i)\rho^2(i)} & \overline{u\rho^4(i)} & 2\overline{u(i)^2 + \rho^2(i)} & 2\overline{u(i)\overline{v(i)}} & \rho^2(i) & 0 \\ \overline{v(i)\rho^2(i)} & \overline{v(i)\rho^4(i)} & 2\overline{u(i)\overline{v(i)}} & \rho^2(i) + 3\overline{v(i)^2} & 0 & \rho^2(i) \end{bmatrix},$$

$$\overline{u(i)} = u_d(i) - u_0, \quad \overline{v(i)} = v_d(i) - v_0, \quad \rho^2(i) = \sqrt{\overline{u(i)^2 + \overline{v(i)^2}}}.$$

这是一个超定方程组, 其线性最小二乘解为

$$\hat{\delta} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}(1) \\ \mathbf{D}(2) \\ \vdots \\ \mathbf{D}(n) \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \alpha_d(1) - \alpha_c(1) \\ \alpha_d(2) - \alpha_c(2) \\ \vdots \\ \alpha_d(n) - \alpha_c(n) \end{bmatrix}, \quad (23)$$

式中 $[\cdot]^+$ 表示矩阵的左逆。

3.3 全局优化

至此, 已经求得摄像机模型的全部 17 项内外部参数。由于 3.1 中作参数估计时未考虑畸变误差, 可以首先计算特征点的理想像点坐标

$$\tilde{\mathbf{m}} = \begin{bmatrix} \alpha_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_d - \hat{\Gamma}(\hat{\delta}, \alpha_d) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

将(24)式代入(9)式, 再反复按 3.1 和 3.2 中的步骤求解模型参数, 直到获得收敛的最优解。

或者, 可通过最大似然估计作非线性全局优化, 目标函数为

$$\sum_{i=1}^n \|\alpha_d(i) - f(\theta_{\text{int}}, \theta_{\text{ext}}, \mathbf{M}_i)\|^2, \quad (25)$$

式中 n 为特征点的个数, $f(\theta_{\text{int}}, \theta_{\text{ext}}, \mathbf{M}_i)$ 为模型平面上的点按摄像机模型求解得到的像点坐标。这是一个极小化问题, 将由(19), (20)和(23)式得到的内外部参数设为初值进行迭代计算, 采用非线性最小二乘法求解, 可采用的非线性最小二乘法包括最速下降算法^[20]、高斯-牛顿法^[22]和 LM (Levenberg-Marquardt) 法^[22]等^[23,24]。全局优化需要设置一个恰当的初始值, 而且具有对初始迭代值的敏感性。在理想模型参数估计环节可以选择视场中心区域畸

变较小的像点坐标值来代替理想像点坐标值,实验表明,由此计算得到的各项摄像机模型参数已经比较接近最后的标定结果。由于选取了较好的初值,非线性优化能够较快地收敛。

4 标定实验

利用本文的方法对图 1 所示测量机的摄像装置作标定。标定使用的模板为图 3 所示的圆孔靶标件,圆心即为参与标定的特征点。

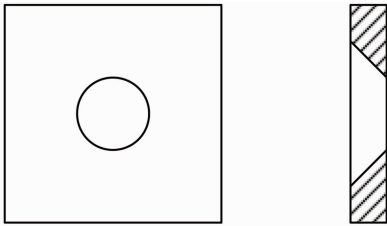


图 3 圆孔靶标件

Fig. 3 Target plate of with circular hole

标定过程如下:

1) 靶标件固定不动,控制测端令摄像机沿 X 和 Z 向作二维的平移运动,使圆孔在 CCD 像面上的不同位置成像。为了提高标定精度,减小随机误差,特征点应尽量分布在整个视场范围内。

2) 分别记录每个位置上的仪器坐标值和特征点的图像平面坐标值。仪器坐标由测量机的光栅尺

或使用双频激光干涉仪读取;对摄像机获取的圆孔轮廓点作亚像素细分^[25]、采用最小二乘拟合圆心的方法得到特征点的图像平面坐标。本文使用了单幅图像,49 个特征点在像面上呈 7×7 的阵列分布。

3) 利用特征点仪器坐标值和图像平面坐标值之间的对应关系进行标定。考虑到像面中心附近畸变较小,首先利用像面中心区域的 4×4 个特征点的数据求取摄像机理想模型的内外参数,然后按(6)式求解各点的畸变误差,代入(23)式求解畸变系数并作全局优化。

通过理想模型参数计算得到的理想像点坐标和实际像点坐标如图 4 所示。计算得到的像面上各点的 U 向和 V 向畸变误差,分别如图 5(a)和 5(b)所示。

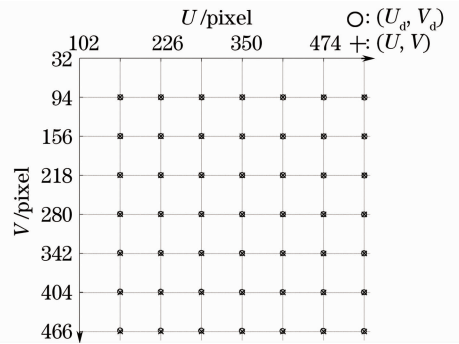


图 4 实际像点与理想像点坐标

Fig. 4 Coordinates of the actual and the ideal image point

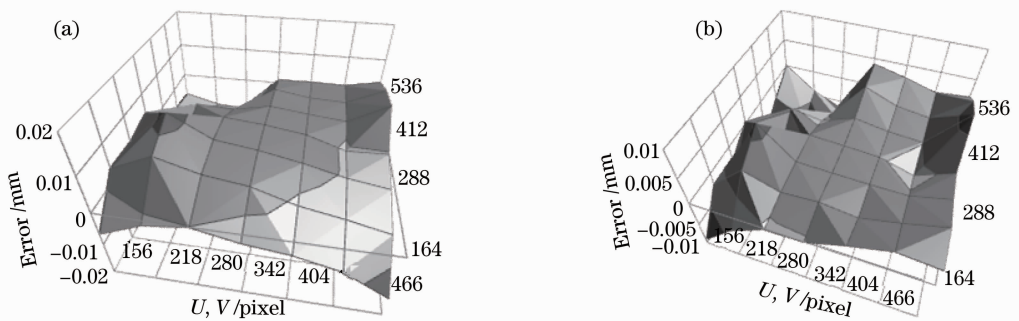


图 5 光学畸变。(a)U 向畸变;(b)V 向畸变

Fig. 5 Optical distortion. (a) U -direction distortion; (b) V -direction distortion

表 1 为标定结果。利用摄像机模型反求像点的仪器坐标值,并与测量机光栅尺读取的坐标值作比较,将二者之间的偏差称为物点误差。实验表明,利用理想模型求得的 49 个像点的物点误差在 X 向和 Z 向的标准差分别为 0.006491 mm 和 0.009831 mm;利用最终的摄像机模型得到的物点 X 向和 Z 向的标准

差分别为 0.002761 mm 和 0.004012 mm。可见,本文的方法是可行的,并具有较高的精度。相比文献[11]所述的基于平面平移运动的主动视觉标定方法要求摄像机作至少 5 组不同的平面正交运动,本文的方法对摄像机运动的限制更少,标定时只需令特征点尽量均匀地分布在视场范围内,因此具有更好的灵活性。

表 1 标定结果

Table 1 Calibration results

Exterior parameters	$\alpha /(^{\circ})$	$\beta /(^{\circ})$	$\gamma /(^{\circ})$	$t_x /(\text{mm})$	$t_y /(\text{mm})$	$t_z /(\text{mm})$
Calibration results	2.121692	-1.729563	-4.452335	55.691065	0.023521	-12.1492311
Interior parameters	f_u / pixel	f_v / pixel	κ	u_0 / pixel	v_0 / pixel	
Calibration results	2939.819196	2934.172542	0.010014	349.771132	278.762854	
Interior parameters	k_1	k_2	p_1	p_2	s_1	s_2
Calibration Results	0.000249	-0.000262	-0.017732	0.021791	-0.000613	-0.032144

5 标定模块

利用本文的方法制定摄像机标定模块并嵌入到测量机软件中。标定时将圆孔靶标件固定在工作台上,调焦后,通过该标定模块可实现摄像机的自动标定,标定得到的摄像机模型存入数据库以作测量数据的后续处理。标定模块的流程图如图 6 所示。

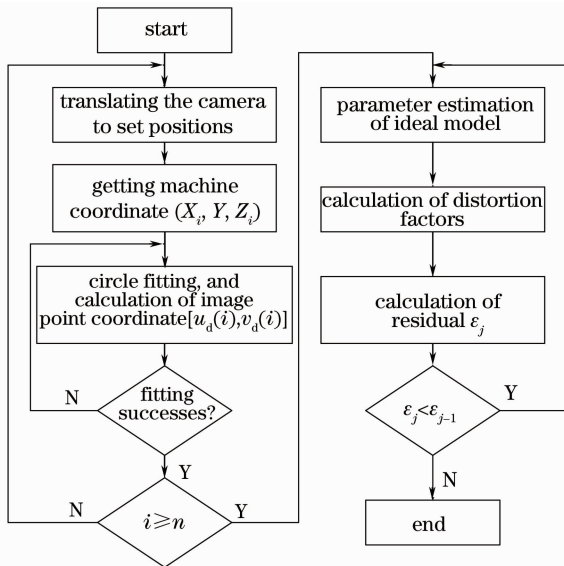


图 6 标定模块流程示意图

Fig. 6 Flow chart of calibration module

6 结 论

提出了一种快速、高精度的摄像机主动视觉标定方法。建立的包含 17 项内外部参数的摄像机模型考虑了径向、切向和薄透镜畸变等各种不确定因素;标定过程分为理想模型参数估计、畸变矫正和全局优化 3 个步骤,大部分计算属于线性计算,具有很好的稳健性。实验证明,通过标定后的摄像机模型反求像点的仪器坐标值与实际坐标值的偏差小于 0.005 mm。靶标件加工容易,加工精度要求不高,事先不需要对靶标件进行测量。根据本文方法制定的标定模块实现了摄像机的自动标定。

参 考 文 献

- 1 Qiu Maolin, Ma Songde, Li Yi. Overview of camera calibration for computer vision[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(1): 43~55
- 2 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机标定综述[J]. *自动化学报*, 2000, **26**(1): 43~55
- 3 Hu Zhanyi, Wu Fuchao. A review on some active vision based camera calibration techniques[J]. *Chinese J. Computers*, 2002, **25**(11): 1149~1156
- 4 胡占义, 吴福朝. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. *计算机学报*, 2002, **25**(11): 1149~1156
- 5 Y. I. Abdel-Aziz, H. M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates is close-range photogrammetry [C]. *ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry*, 1971. 1~18
- 6 Li Weimin, Yu Qiaoyun, Liu Chao. Calibration method with separation pattern of a single-camera based on difference coordinates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 697~701
- 7 李为民, 俞巧云, 刘超. 采用分离式差分标定靶的单摄像机标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 697~701
- 8 Li Yong, Su Xianyu, Wu Qinyang. Calibration and data merging of two-camera phase measuring profilometry system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 551~556
- 9 李勇, 苏显渝, 吴庆阳. 双摄像机相位测量轮廓术系统标定与数据融合[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 551~556
- 10 Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 11 M. Pollefeys, R. Koch, L. Van Gool. Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown internal camera parameters[J]. *International J. Computer Vision*, 1999, **32**(1): 90~95
- 12 Long Quan. Self-calibration of an affine camera from multiple views[J]. *International J. Computer Vision*, 1996, **19**(1): 93~105
- 13 R. Hartley, E. de Hayman, L. Agapito et al.. Camera calibration and the search for infinity[C]. *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999. 510~517
- 14 Sang De Ma. A self-calibration technique for active vision system [J]. *IEEE Trans. Robot. Automat.*, 1996, **12**(1): 114~120
- 15 Li Hua, Wu Fuchao, Hu Zhanyi. A new linear camera self-calibration technique[J]. *Chinese J. Computers*, 2000, **23**(11): 1121~1129
- 16 李华, 吴福朝, 胡占义. 一种新的线性摄像机自标定方法[J]. *计算机学报*, 2000, **23**(11): 1121~1129
- 17 R. Hartley. Self-calibration of stationary cameras [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, **22**(1): 5~23
- 18 S. D. Ma. A self-calibration technique for active vision system [J]. *IEEE Trans. Robot. Automat.*, 1996, **12**(1): 114~120
- 19 Wu Fuchao, Hu Zhanyi. A new theory and algorithm of linear camera self-calibration[J]. *Chinese J. Computers*, 2001, **24**(11):

- 1121~1135
吴福朝, 胡占义. 摄像机自标定的线性理论与算法[J]. 计算机学报, 2001, **24**(11): 1121~1135
- 15 Zhang Gongxiong. Coordinate Measuring Machine[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999
张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999
- 16 C. McGlone, E. Mikhail, J. Bethel *et al.*. Manual of Photogrammetry[M]. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, 2004
- 17 J. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(10): 965~980
- 18 J. Lavest, G. Rives, J. Lapreste. Underwater camera calibration[C]. Proc. European Conf. Computer Vision, 2000, **2**: 654~668
- 19 E. Malis, R. Cipolla. Multi-view constraints between collineations; application to self-calibration from unknown planar structures[C]. Proceedings of the 6th. European Conference on Computer Vision, 2000. 610~624
- 20 Xiong Youlun. Mathematical Methods of Precision Measurement [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1989
熊有伦. 精密测量的数学方法[M]. 北京: 中国计量出版社, 1989
- 21 R. W. M. Wedderburn. Quasi-likelihood functions, generalized linear models, and the gauss-newton method[J]. *Biometrika*, 1974, **61**(3): 439~447
- 22 J. J. Moré. The levenberg-marquardt algorithm: implementation and theory [J]. *Lecture Notes in Mathematics*, 1978, **630**: 105~116
- 23 Sun Wei, He Xiaoyuan, Zheng Xiang. Three-dimensional displacement measurement based on single CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1723~1729
孙 伟, 何小元, 郑 翔. 基于单摄像机的三维位移测试方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1723~1729
- 24 Xu Yunxi, Jiang Yunliang, Chen Fang. Generalized orthogonal iterative algorithm for pose estimation of multiple camera systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 72~77
许允喜, 蒋云良, 陈 方. 多摄像机系统位姿估计的广义正交迭代算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 72~77
- 25 Wang Gang, Xiao Liang, Jiang Zhijing *et al.*. Sub pixel multi-fractal method for image processing application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1345~1349
王 刚, 肖 亮, 姜志静等. 亚像素多重分形方法在图像处理中的应用[J]. 光学学报, 2006, **26**(9): 1345~1349