

文章编号 1004-924X(2014)08-2267-07

## 利用圆心不对称投影精确标定工业相机

朱伟东<sup>1\*</sup>, 曹良洪<sup>1</sup>, 梅 标<sup>1</sup>, 李江雄<sup>1</sup>, 封璞加<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 机械工程学院系, 浙江 杭州 310027;

2. 中国航空工业集团公司 陕西飞机工业(集团)有限公司, 陕西 汉中 723213)

**摘要:**工业相机常采用基于圆形控制点的方法进行标定, 但该方法存在不对称投影问题, 极易产生标定误差。为了避免引入不对称投影误差并能以迭代方式修正这一误差, 本文提出了一种利用圆心不对称投影所蕴含信息的相机标定方法。首先, 推导了平面模板上的圆形控制点投影成为椭圆之后的理论坐标; 然后, 提取每一幅标定板图像中实际椭圆的中心坐标, 通过最小二乘法求得该幅图像对应的精确投影变换矩阵; 最后, 利用所有的投影变换矩阵求出相机内参数。实验结果表明: 采用本文提出的标定方法, 标定结果的重投影误差降到了 1/50 pixel。该方法可一次完成标定, 计算简单, 标定精度高, 适用于工业相机的标定。

**关键词:**工业相机; 相机标定; 不对称投影; 投影变换矩阵; 重投影误差

**中图分类号:** TP391; TB853 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20142208. 2267

## Calibration of industrial cameras using asymmetric circle center projection

ZHU Wei-dong<sup>1\*</sup>, CAO Liang-hong<sup>1</sup>, MEI Biao<sup>1</sup>, LI Jiang-xiong<sup>1</sup>, Feng Pu-jia<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Shanxi Aircraft Industry(Group) Company Ltd., Aviation Industry Corporation of China, Hanzhong 723213, China)

\* Corresponding author, E-mail: wdzhu@zju.edu.cn

**Abstract:** The calibration of industrial cameras usually uses circular points as control points. However, there is asymmetric projection in the calibration, so that the calibration results have errors. In order to avoid the introduction of asymmetric projection error and to correct the error in an iteration form, this paper proposes a new camera calibration method by utilizing the asymmetric projection of circular centers. Firstly, the theoretical coordinate of the projection ellipse center from a circular point on the planar pattern was deduced, then the center coordinate of actual ellipse for the image of a calibration board was extracted and the projective transformation matrix was obtained by using nonlinear least square method. Finally, the camera intrinsic parameters were obtained by using all projective transformation matrixes. Experimental result reveals that the re-projection error of the calibration result of Baumer TXG12 industrial camera is just about 1/50 pixels by using proposed method. The method can complete the calibration at a time and is able to meet the precision requirement of industrial measurement in simpler calculation and higher accuracy.

收稿日期: 2013-11-29; 修订日期: 2014-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51205352)

**Key words:** industrial camera; camera calibration; asymmetric projection; projection transformation matrix; re-projection error

## 1 引言

随着工业自动化水平的不断提高,工业相机在制造业中的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。由于工业相机具有低成本、高精度和非接触式测量等优点,以其为主要组成部分的视觉测量系统在机器人制孔中发挥了重要作用<sup>[2]</sup>。然而在使用视觉系统进行高精度测量之前,必须精确标定相机的各项参数。相机标定是图像和三维世界联系的桥梁,决定了物理度量单位(mm)和图像单位(pixel)之间的转换关系<sup>[3]</sup>,其标定精度直接决定了测量精度。

现有的相机标定技术大致分为两类<sup>[4]</sup>:经典相机标定方法和自标定方法。基于主动视觉的自标定方法无需昂贵的辅助设备,从而费用比较低,标定过程也相对简单,但标定精度却低于传统标定方法<sup>[5]</sup>。经典相机标定方法使用已知几何参数的高精度标定物,通过标定物上的控制点和其对应图像点的关系来确定相机参数,这种方法精度高,适用于需要精确测量的场合。

Zhang<sup>[6-7]</sup>提出的标定方法只需要几幅不同视角的棋盘格图片便可以标定相机。该方法首先求出封闭解作为初始值,然后用 Levenberg-Marquardt 方法<sup>[8]</sup>进行非线性优化。该方法操作简单,便于实际应用。但是它没有考虑相机光轴与标定板平面的夹角对角点提取准确性的影响。当相机与棋盘格不垂直时,角点处的轮廓就不再垂直,这会使基于梯度的亚像素角点提取方法所提取的角点坐标不准确,进而给标定结果带来误差<sup>[9]</sup>,而且,在实际应用中,由于存在噪声和图片模糊等因素,棋盘格角点的提取并不是很容易,要以亚像素精度提取角点坐标就更难了。

由于圆形控制点对图像质量要求较低,实际中很容易利用重心法或最小二乘椭圆拟合精确得到其投影的重心坐标,但是却存在不对称投影的问题,即提取到的实际椭圆中心并不是圆形控制点圆心的投影。Heikkila<sup>[10-11]</sup>采用了圆形控制点来标定相机,并将圆心的不对称投影看成一种误差,进而提出了一种修正圆心不对称投影的标定方法。该方法需要先采用相机内参数的名义值作

为初始值,然后对投影矩阵进行分解,以得到外参数的初始值,最后加入畸变进行非线性优化,求得最后的精确解。该方法计算量大,如果初始值不准确,会影响最终结果的收敛精度,而且在某些情况下无法事先获知相机内参数的名义值(如有些工业相机的焦距是可调的)。Data<sup>[9]</sup>等提出了一种基于控制点迭代求精的标定方法,其中利用圆形控制点的方法同样将圆心不对称投影法看成一种误差进行修正。首先利用提取的初始控制点先求出相机参数(包括畸变),再利用求得的参数将标定图像转换成正视图并进行图像校正,然后重新提取控制点,如此往复,直至达到精度要求。该方法需要多次标定,步骤较多,计算量大,且存在初始参数计算不准确等问题。

用于精密测量的工业相机拍摄范围很小(本文所采用的工业相机拍摄范围大约为 30 mm × 30 mm),且很多现代相机都采用了去畸变处理,所以镜头畸变很小<sup>[12]</sup>。圆心的投影和投影中心之间的偏差绝大部分是由透视投影引起的,可以根据不对称投影求出投影变换矩阵。与传统方法不同,本文针对工业相机进行标定,利用圆投影之后成为椭圆这一性质,计算投影后椭圆中心的坐标的理论值,与在图像中提取到的椭圆中心坐标的实际值进行最小二乘匹配,确定投影变换矩阵,进而获得相机内参数。

## 2 不对称投影

### 2.1 单应性矩阵

在计算机视觉中,平面的单应性被定义为从一个平面到另外一个平面的投影映射。因此一个二维标定平面上的控制点到成像平面上的像素点之间的变换就是单应性变换。令  $\mathbf{W}$  为世界坐标系到相机坐标系的转换矩阵,有

$$\mathbf{W} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}], \quad (1)$$

其中:  $\mathbf{R}$  为旋转分量,  $\mathbf{t}$  为平移分量。令相机内参数矩阵为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中:  $f_x$  和  $f_y$  为水平方向和垂直方向的焦距长度(像素单位);  $c_x$  和  $c_y$  分别是相机光轴与图像平面的交点在图像坐标系上的坐标(图像坐标系的原点在图像左上角)。将世界坐标系建立在标定板平面上,则控制点的世界坐标  $Z$  分量为零,令  $\mathbf{P} = [X \ Y \ 0]$  为标定板上的控制点,  $p = [x \ y]$  为  $P$  点在图像上的对应点,  $P$  与  $p$  有如下转换关系:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = s\mathbf{M} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = s\mathbf{M} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中:  $s$  是任意的尺度比例;  $[r_1 \ r_2 \ r_3 \ t]$  为  $\mathbf{W}$  矩阵的旋转分量。由于  $P$  点的  $Z$  坐标为零,故旋转分量的一个列向量就不需要了。因此,世界坐标系下点坐标到像平面上的点坐标的单应性矩阵  $\mathbf{H}$  可以表示为:

$$\mathbf{H} = s\mathbf{M} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix}. \quad (4)$$

即  $\mathbf{H}$  是一个  $3 \times 3$  的矩阵,且只有 8 个独立参数。

### 2.2 不对称投影方程

由于圆形标志易于提取,并且能够用亚像素算法<sup>[13]</sup>定位出圆形边界,再以非常高的精度定位其圆心坐标,所以圆心经常被多种标定方法用来定位控制点。但是由于透视投影的存在,当标定平面与图像平面不平行时,标定板上的圆形投影之后会变成椭圆,而图像上椭圆的中心点并不是标定板上对应圆心点的投影<sup>[10]</sup>。下面将推导圆形图案投影为椭圆后,椭圆中心坐标的理论值。为了简化计算,定义从图像平面到标定板平面的单应性矩阵为  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{L}$  与  $\mathbf{H}$  的逆矩阵  $\mathbf{H}^{-1}$  之间存在一个比例关系  $\mathbf{L} = \lambda\mathbf{H}^{-1}$ , 其中  $\lambda$  是任意的比例常数,将  $\mathbf{L}$  写成如下形式:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

同  $\mathbf{H}$  一样,  $\mathbf{L}$  也只有 8 个独立参数,可以归一化,让  $L_{33} = 1$ 。

假设在标定板平面上的控制圆的方程为:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2, \quad (6)$$

其中:  $(x_0, y_0)$  为圆心,  $R$  为半径。设  $(x, y)$  为圆上任意一点,其在图像上的对应点为  $(u, v)$ , 由式

(3)可知,  $(x, y)$  和  $(u, v)$  之间存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{L} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

即:

$$\begin{cases} x = \frac{L_{11}u + L_{12}v + L_{13}}{L_{31}u + L_{32}v + 1} \\ y = \frac{L_{21}u + L_{22}v + L_{23}}{L_{31}u + L_{32}v + 1} \end{cases}, \quad (8)$$

将式(8)带入式(6)化简可得:

$$(a_1u + b_1v + c_1)^2 + (a_2u + b_2v + c_2)^2 = R^2(L_{31}u + L_{32}v + 1)^2, \quad (9)$$

其中:

$$\begin{aligned} A &= a_1^2 + a_2^2 - R^2L_{31}^2 \\ b_1 &= L_{12} - x_0L_{32} \\ c_1 &= L_{13} - x_0 \\ a_2 &= L_{21} - y_0L_{31} \\ b_2 &= L_{22} - y_0L_{32} \\ c_2 &= L_{23} - y_0 \end{aligned}$$

式(9)可进一步化简为:

$$Au^2 + 2Buv + Cv^2 + Du + Ev + F = 0, \quad (10)$$

其中:

$$\begin{aligned} A &= a_1^2 + a_2^2 - R^2L_{31}^2 \\ B &= a_1b_1 + a_2b_2 - R^2L_{31}L_{32} \\ C &= b_1^2 + b_2^2 - R^2L_{32}^2 \\ D &= a_1c_1 + a_2c_2 - R^2L_{31} \\ E &= b_1c_1 + b_2c_2 - R^2L_{32} \\ F &= c_1^2 + c_2^2 - R^2 \end{aligned}$$

由式(10)可得该椭圆的中心坐标为:

$$\begin{cases} u_0 = \frac{CD - BE}{B^2 - AC} \\ v_0 = \frac{AE - BD}{B^2 - AC} \end{cases}. \quad (11)$$

## 3 利用圆心不对称投影标定工业相机

### 3.1 忽略畸变

工业相机视野小,畸变带来的影响不那么显著,因此使用圆形控制点来标定相机时,圆心投影和投影中心之间的偏差绝大部分是由透视投影所引起的。此时如果仍然将畸变连同相机参数一起进行优化求解,则会降低收敛性,增加计算的复杂度,同时对最终求解结果精度的提高没有明显效果。文献[10]中仅考虑一阶径向畸变  $k_1$  时,对于

相当大的范围内的  $k_1$ , 所造成的重投影误差均在 0.005 pixel 以下。图 1 是根据真实标定结果所绘制的误差图, 图中一阶径向畸变  $k_1$  为 0.02, 标定板法线与相机光轴成  $30^\circ$  放置。可以看出, 畸变的影响只有不对称投影的 1/10 左右。相对于不对称投影, 畸变的影响可以忽略。

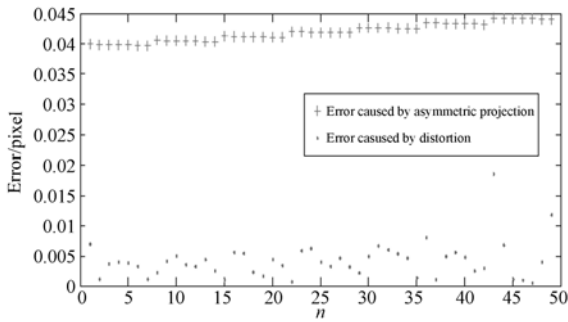


图 1 不对称投影和畸变所带来的重投影误差

Fig. 1 Reprojection errors caused by asymmetric projection and distortion

### 3.2 求解透视变换矩阵

本文不是通过提取到的椭圆中心像素的坐标和标定板上圆心的物理坐标的匹配来求解透视变换矩阵的, 而是利用圆形控制点投影之后形成的椭圆中心坐标的理论值和实际值(提取到的椭圆的中心)进行匹配来求解透视变换矩阵。该方法利用了不对称投影, 而不是把它当成一种误差进行修正或者直接忽略。重投影误差是根据标定结果计算出的投影椭圆中心与在图像中提取到的椭圆中心之间偏差的均方值, 能够很好地反映标定精度, 因此, 本文采用最小化重投影误差的方法求解单应性矩阵。重投影误差的计算公式如下:

$$F = \sum_{i=1}^k \sqrt{[(u_i - u_{0i})^2 + (v_i - v_{0i})^2]} / k, \quad (12)$$

其中:  $k$  为标定板上圆形标记的数量;  $u_i$  和  $v_i$  是第  $i$  个投影椭圆的实际中心坐标;  $u_{0i}$  和  $v_{0i}$  是其对应的理论中心坐标。

利用非线性优化算法(如 Levenberg-Marquardt 算法)求出  $F$  取最小值时的  $L$  矩阵即为真实的图像平面到标定板平面的单应性矩阵。注意  $L$  矩阵并不是需要的从标定板平面到图像平面的单应性矩阵  $H$ , 不过, 简单地对  $L$  矩阵求逆并进行归一化(使  $H_{33} = 1$ )便可得到需要的透视变换矩阵  $H$ 。

### 3.3 标定流程

本文提出的工业相机标定方法的具体操作步骤如下:

(1) 准备一块印有圆形控制点的标定板, 以不同视角拍摄标定板的多幅图片。

(2) 提取出每一幅图片中所有椭圆的中心坐标。

(3) 根据(2.2)节中推导的投影之后的椭圆中心的理论坐标与步骤 2 在图片中提取到的椭圆中心的实际坐标, 利用非线性最小二乘算法, 计算出每一幅图片所对应的投影变换矩阵。

(4) 利用文献[6]中的方法计算相机的内参数。具体过程是: 首先根据所有的透视变换矩阵得到所有内外参数的封闭解, 再利用最大可能性进行非线性优化, 得到最终的相机内参数。

## 4 实验验证

### 4.1 仿真实验

设定相机参数  $f_x = f_y = 11\ 110$  pixels,  $c_x = 647.5$ ,  $c_y = 482.5$ 。假设标定板在相机坐标系下的坐标为(0,0,252), 单位为 mm, 初始姿态与相机图像平面平行, 其坐标系各轴与相机坐标系对应轴平行。在此基础上, 将标定板沿自身坐标系的  $x$  轴和  $y$  轴旋转, 利用投影变换合成标定板在不同姿态下的投影图片(8 幅)。为接近真实情况, 在每一幅图片中加入高斯噪声(均值 0, 方差 0.01), 并使用  $3 \times 3$  的高斯滤波器进行模糊处理, 得到的模拟图片如图 2 所示。分别用 Heikkilä<sup>[10]</sup>的方法、以椭圆中心坐标代替棋盘格角点坐标的 MATLAB 相机标定工具箱<sup>[14]</sup>方法和本文提出的方法针对模拟图片进行标定, 标定结果如表 1 所示。由表 1 可以看出, 利用本文所提出的方法得到的结果更加接近真实值, 且计算简单。

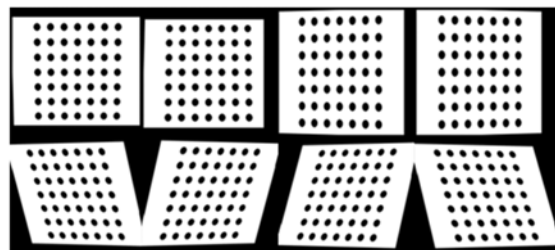


图 2 合成的标定板图片

Fig. 2 Synthetic calibration board pictures

图 3 根据绕自身  $x$  轴旋转  $30^\circ$  的标定板图像,画出了每一个控制点的圆心不对称投影偏差,箭头表示圆心投影到投影椭圆中心的偏差方向,最大偏差为 0.52 pixels。采用同样方法,对旋转角度分别为  $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$  等情况进行计算,得到标定板平面与图像平面的夹角对圆心不对称投影偏差的影响曲线,如图 4 所示。可见在  $0 \sim 40^\circ$  的范围内,夹角越大,不对称投影引起的偏差也越大。

表 1 针对模拟图片的标定结果

Tab. 1 Calibration results of synthetic pictures

	真值	Heikkila <sup>[4]</sup>	MATLAB 相机 标定工具箱	本文的方法
$f_x/\text{pixel}$	11 110 11 106.247 5	11 106.128 9	11 106.257 9	
$f_y/\text{pixel}$	11 110 11 104.026 7	11 104.283 4	11 104.401 9	
$c_x/\text{pixel}$	647.5	644.332 4	644.230 04	644.330 0
$c_y/\text{pixel}$	482.5	483.268 5	481.970 11	482.070 1

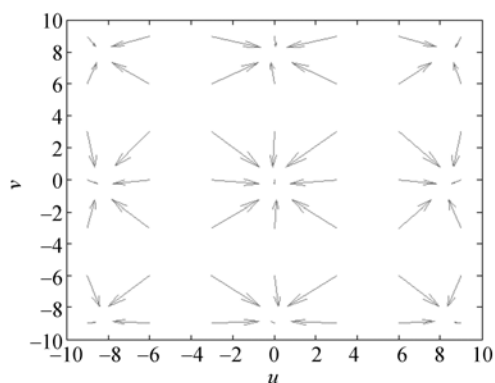


图 3 理论椭圆中心与实际提取到的椭圆中心对比  
Fig. 3 Comparison of theoretical and practical ellipse centers

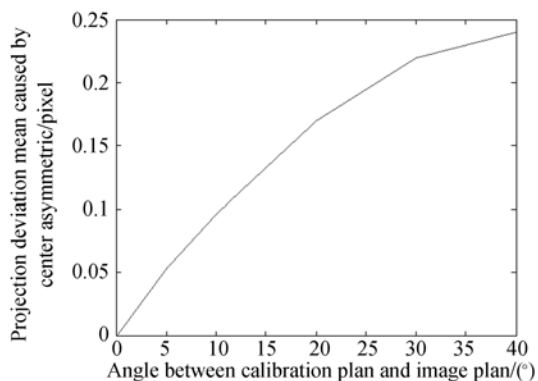


图 4 角度对圆心不对称投影的影响  
Fig. 4 Influence of angle on asymmetric projection

### 4.2 实际实验

实验采用的相机型号为 Baumer TXG12 型工业相机,其分辨率为  $1\,296 \times 966$ 。标定板采用的圆形阵列背光照明显定板(采用背光照明可以很容易地提取标定图案),其圆形图案直径为 1.5 mm,中心距为 3 mm,精度达到了  $1\ \mu\text{m}$ ,如图 5 所示。实验中工业相机固定在机器人终端执行器上,标定板不动,通过操作机器人移动工业相机,以不同的视角拍摄标定板的图片,实验装置如图 6 所示,本实验选取 12 幅标定板的图片,分别用 Heikkila<sup>[10]</sup> 的方法、MATLAB 相机标定工具箱<sup>[14]</sup> 和本文提出的方法进行标定,实验结果见表 2、表 3 和表 4。表中的重投影误差利用公式(12)求得。

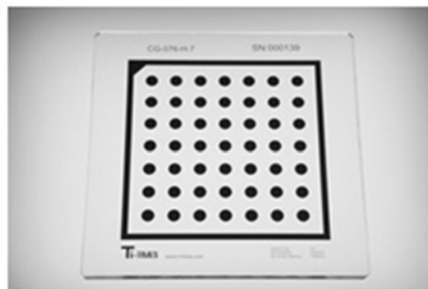


图 5 标定板  
Fig. 5 Calibration board



图 6 实验装置  
Fig. 6 Experiment setup

从实际的实验结果可以看出,对于本实验所使用的工业相机来说,Heikkila 的标定方法修正了圆心不对称投影误差,且考虑了畸变的影响,但也增加了计算的复杂度,且标定精度提高不明显;而 MATLAB 相机标定工具箱直接利用提取的椭圆中心和标定板上的控制点圆心进行匹配的,并没有修正不对称投影误差,其标定结果的标准差

和重投影误差最大;本文提出的方法利用了不对称投影精确求出透视变换矩阵来进行标定,得到的各参数标准偏差都比较小,重投影误差也大大减小。

表 2 Heikkila 的标定方法

Tab. 2 Calibration results using Heikkila's method (pixel)

	$f_x$	$f_y$	$c_x$	$c_y$
均值	11 117.768 111	118.880 0	658.943 6	453.213 8
标准差	9.545 7	9.546 7	11.2	6.07
重投影误差	0.065 9			

表 3 MATLAB 相机标定工具箱的标定结果

Tab. 3 Calibration results using MATLAB calibration toolbox (pixel)

	$f_x$	$f_y$	$c_x$	$c_y$
均值	11 105.268 911	103.634 1	670.259 5	474.991 3
标准差	14.681 9	15.706 1	5.683 0	5.944 3
重投影误差	0.110 8			

## 参考文献:

- [1] 刘金桥,吴金强. 机器视觉系统发展及其应用[J]. 机械工程与自动化,2010,(1):9-10.  
LIU J Q, WU J Q. Development and application of machine vision systems [J]. *Mechanical Engineering and Manufacturing and Automation*, 2010, (1):9-10. (in Chinese)
- [2] 杜宝瑞,冯子明,姚艳彬,等. 用于飞机部件自动制孔的机器人制孔系统[J]. 航空制造技术,2010,(2):47-50.  
DU B R, FENG Z M, YAO Y B, et al.. Robot drilling system for automatic drilling of aircraft component [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010,(2):47-50. (in Chinese)
- [3] TSAI R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *Robotics and Automation*, 1987, 3(4):323-344.

表 4 本文标定方法的结果

Tab. 4 Calibration results using proposed method (pixel)

	$f_x$	$f_y$	$c_x$	$c_y$
均值	11 111.110 411	112.012 9	672.880 4	471.139 5
标准差	2.188 6	2.194 6	0.961 0	0.971 3
重投影误差	0.021 4			

## 5 结 论

本文提出了一种利用圆心控制点精确标定工业相机的方法。由于圆形控制点在成像后成为椭圆,而椭圆中心并不是圆心的投影。为了避免引入不对称投影误差,以迭代方式修正这一误差,本文提出通过对比圆形控制点投影之后的理论椭圆中心和实际提取到的椭圆中心,用非线性优化方法精确地求出透视变换矩阵,从而一次完成相机标定。该算法减少了计算量,提高了标定精度。实验结果表明,利用本文提出的方法标定工业相机时,重投影误差可达到 1/50 pixels 左右,可以满足工业上利用相机进行精密测量的要求。

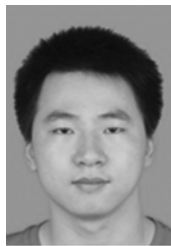
- [4] QIU M L, MA S D, LI Y. Overview of camera calibration for computer vision [J]. *Acta Automation Sinica*, 2000, 26(1):43-55.
- [5] 田梦倩. 机器人视觉系统标定问题研究综述[J]. 工业仪表与自动化装置,2006,(2):14-17.  
TIAN M Q. A survey of calibration in a vision robot system [J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2006, (2):14-17. (in Chinese)
- [6] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [7] ZHANG Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on IEEE, Kerkyra: Computer Vision*, 1999, 1: 666-673.
- [8] MORÉ, JORGE J. *The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory*[M]. Numerical analysis, Springer Berlin Heidelberg, 1978.

- [9] DATTA A, KIM J S, KANADE T. Accurate camera calibration using iterative refinement of control points [C]. 2009 *IEEE 12th International Conference on IEEE, Kyoto; Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, 2009: 1201-1208.
- [10] HEIKKILA J. Geometric camera calibration using circular control points[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(10):1066-1077.
- [11] HEIKKILA J, SILVEN O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [C]. *Proceedings of 1997 IEEE Computer Society Conference, San Juan; Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997:1106-1112.
- [12] STROBL K H, SEPP W, HIRZINGER G. On the issue of camera calibration with narrow angular field of view [C]. *IROS 2009, IEEE/RSJ International Conference, St. Louis, MO; Intelligent Robots and Systems*, 2009: 309-315.
- [13] HEIKKILA J. Moment and curvature preserving technique for accurate ellipse boundary detection [C]. *Fourteenth International Conference, Brisbane Qld; Pattern Recognition*, 1998:734-737.
- [14] BOUGUET J Y. Camera calibration toolbox for matlab [OL]. URL [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/), 2013.

#### 作者简介:



朱伟东(1977—),男,浙江桐乡人,博士,讲师,2001年、2007年于浙江大学分别获得学士、博士学位,主要从事机器人制孔技术、机床误差测量与补偿、反求工程等领域的研究。E-mail: wdzhu@zju.edu.cn



曹良洪(1989—),男,安徽芜湖人,硕士研究生,2011年于武汉大学获得学士学位,主要从事机器视觉和数字化测量等方面的研究。E-mail: whuclh@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)