

# 基于点阵标定板的视觉测量系统的标定方法

段振云 王 宁 赵文辉 赵文珍

沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870

**摘要** 在应用机器视觉技术进行测量时,测量系统的像素当量、系统误差和光源强度等因素均会对测量精度造成影响,因此必须对像素当量和系统误差进行标定,并分析光源强度对工件图像边缘位置的影响。提出一种基于点阵标定板的视觉测量系统综合标定方法,在提取标定圆圆心坐标的基础上,计算圆心距物理尺寸和像素尺寸的比值,得到像素当量;建立圆心实际坐标和理论坐标的二元三次误差模型,并利用最小二乘法拟合求解误差模型系数;通过确定光源强度引起的图像边缘位置误差补偿量,实现测量系统的综合标定。实验结果表明,该方法可以有效提高系统的测量精度。

**关键词** 机器视觉;标定;点阵标定板;像素当量;系统误差;光源强度

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0515004

## Calibration Method Based on Lattice Calibration Plate in Vision Measurement System

Duan Zhenyun Wang Ning Zhao Wenhui Zhao Wenzhen

School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China

**Abstract** In the application of machine vision technology for measurement, the factors of pixel equivalent, system errors and light source intensity in measurement system affect measuring accuracy. In order to improve the measuring accuracy, the pixel equivalent and system errors must be calibrated, and we need to analyze light source intensity which influences edge location of work piece image. An integrated calibration method based on lattice calibration plate in vision measurement system is put forward. On the basis of extracting center coordinates of calibration circle, pixel equivalent is got by calculating the center distance of physical value and pixel value. The error model with the actual coordinates and theoretical coordinates of center point is established, the error model coefficients are got by the least squares fitting. By determining the compensation amount of image edge position error caused by light source intensity, composite calibration of measurement system is achieved. The experimental results show that this method can effectively improve the measurement precision.

**Key words** machine vision; calibration; lattice calibration plate; pixel equivalent; system error; light source intensity

**OCIS codes** 150.0155;150.1488;150.1135

## 1 引 言

在应用机器视觉技术对机械零件进行测量时,像素当量作为测量系统的重要参数,对测量精度有着决定性影响,需要进行标定。同时,在测量过程中,由于各种误差的存在,使得被测物在相机图像平面上实际所成的像与理想成像之间存在不同程度的非线性光学变形<sup>[1-3]</sup>。为了提高测量系统的测量精度,必须对测量系统进行标定,尽可能地减小系统误差对测量精度的影响。

目前的标定方法主要分为两类:传统标定方法和直接标定方法。传统标定方法是在标定摄像机内外参数的基础上,再标定光源与摄像机的位置关系<sup>[4]</sup>。其中具有代表性的就是靶标标定法,它主要是利用标定靶

收稿日期:2015-11-27;收到修改稿日期:2015-12-28

基金项目:十二五国家科技支撑计划(2014BAF08B01)

作者简介:段振云(1971-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事复杂曲面加工技术和视觉检测等方面的研究。

E-mail:13604045543@139.com

点的三维坐标及其对应的像点坐标,通过线性算法实现对成像系统参数的标定,然后再以这些参数作为初始值,考虑非线性畸变参数,利用优化算法进一步提高标定精度<sup>[5-9]</sup>。这种标定方法存在的缺点是误差模型仅考虑了镜头畸变误差,而不是整个系统的误差,并且靶点三维坐标的精度和靶点像点坐标提取的精度对成像系统的标定精度影响较大<sup>[10-11]</sup>。直接标定法则是直接建立像点图像坐标和空间坐标的位置关系以完成系统标定,虽然这种方法简单快速,但没有进行像素当量标定,且没有考虑光源强度对图像边缘提取与定位的影响,标定精度达不到微米级。

本文提出一种基于点阵标定板的视觉测量系统综合标定方法,完成测量系统像素当量的标定,建立描述像点位置和空间物点位置相互对应关系的标定函数,确定光源强度不同时的图像边缘位置补偿量,保证测量精度达到微米级。

## 2 像素当量标定

像素当量是视觉测量系统的重要参数之一,对测量精度有很大影响,需要进行准确标定<sup>[12]</sup>。在系统的硬件参数、物距确定的情况下,像素当量是固定的,即物理尺寸与像素尺寸的比值。所述测量系统采用的是双远心镜头,保证了测量具有一定厚度的产品时,像素当量不受影响。

采用的点阵标定板(如图1所示)由7行7列49个等直径的圆构成,圆直径为2 mm,圆心距为4 mm,几何误差为1  $\mu\text{m}$ 。它具有抗干扰能力强、无方向标记要求、使用方便、标定效果较理想等诸多优点<sup>[13-14]</sup>。

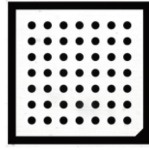


图1 点阵标定板

Fig. 1 Lattice calibration plate

为了提高测量精度,考虑到相机的视场和分辨率,以标定板中心区域的3行3列9个标定圆作为像素当量标定区域,根据标定板中标定圆的圆心距进行像素当量标定时,边缘位置的变化不会造成圆心距的变化,可以有效避免边缘位置变化对像素当量的影响。通过边缘提取算法获得标定圆的亚像素边缘,并将其进行最小二乘法圆拟合,得到圆心像素坐标,计算中心点到其周围8个圆心的像素距离和,可得圆心距的平均像素值,由于圆心距为4 mm,根据两者比值确定测量系统的像素当量  $A_r$ 。

## 3 系统误差标定

### 3.1 误差模型建立

理论上视觉测量系统的成像模型应当遵循小孔成像模型,但是由于实际制造、安装等因素的影响,使得目标像点与理论像点之间存在多种不同类型的几何畸变,其中包括径向畸变,偏心畸变和薄棱镜畸变<sup>[15-16]</sup>。另外由于被测物面与摄像系统光轴不垂直,使得经过镜头所成像还是一个不垂直于光轴的平面,因此也会造成透视误差。

对于获取的图像,首先进行坐标系转换,建立测量坐标系。设定图像中心为坐标原点,以平行于图像坐标系  $x$  轴且过该点的直线为  $X$  轴,以平行于图像坐标系  $y$  轴且过该点的直线为  $Y$  轴,坐标方向与图像坐标系相同。综合考虑各种成像模型误差和相机光轴与被测物表面垂直度误差引起的透视像差,采用三次多项式来描述像点  $(x, y)$  处的误差<sup>[17-20]</sup>,可表示为

$$\begin{cases} \delta_x = a_1 x^3 + a_2 y^3 + a_3 xy^2 + a_4 x^2 y + a_5 x^2 + a_6 y^2 + a_7 xy + a_8 x + a_9 y \\ \delta_y = b_1 x^3 + b_2 y^3 + b_3 xy^2 + b_4 x^2 y + b_5 x^2 + b_6 y^2 + b_7 xy + b_8 x + b_9 y \end{cases} \quad (1)$$

### 3.2 标定过程

将点阵标定板放置在测量系统的视场中央,在物距和光源强度一定的情况下,获取不同位姿的标定板图像,其中每个标定圆都对应一个圆心,同一个标定板中所有圆心的相对位置都是已知的,则圆心的理论坐标

可求,因此只要得到这些圆心在图像中的坐标,就可以对误差模型系数进行标定。

对于每一幅图像利用亚像素边缘提取算法获得标定板中标定圆的边缘,通过最小二乘法拟合得到相应标定圆的实际圆心坐标  $(x_{i,j}, y_{i,j})$ ,  $i=1,2,\dots,6,7, j=1,2,\dots,6,7$ ,理论上相邻圆心之间的距离相等,且同一行或同一列的圆心应该位于同一条直线上。设中间区域标定圆的理论圆心坐标为  $(a, b)$ ,同一行理论圆心点所在直线的斜率为  $k$ ,则所有理论圆心坐标可表示为

$$\begin{cases} \bar{x}_{i,j} = a - \frac{A_r}{\sqrt{1+k^2}} \times (j-4) + k \times \frac{A_r}{\sqrt{1+k^2}} \times (i-4) \\ \bar{y}_{i,j} = b - \frac{A_r}{\sqrt{1+k^2}} \times (i-4) + k \times \frac{A_r}{\sqrt{1+k^2}} \times (j-4) \end{cases} \quad (2)$$

根据最小二乘法原理,保证中间区域的9个标定圆的实际圆心到理论圆心的距离最小,求得  $a, b, k$  的值,则所有的理论圆心坐标都可以得到,实际圆心  $(x, y)$  处的误差可表示为

$$\begin{cases} \delta_x = \bar{x} - x \\ \delta_y = \bar{y} - y \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $(\bar{x}, \bar{y})$  为理论圆心坐标,  $(x, y)$  为实际圆心坐标。

为了便于求解,可以将误差模型写成向量相乘的形式:

$$\mathbf{A}\mathbf{P} = \bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X}, \quad (4)$$

式中:

$$\mathbf{A} = [x^3 \quad y^3 \quad xy^2 \quad x^2y \quad x^2 \quad y^2 \quad xy \quad x \quad y], \quad (5)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & a_9 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 & b_8 & b_9 \end{bmatrix}^T;$$

$$\bar{\mathbf{X}} = [\bar{x} \quad \bar{y}]^T, \quad \mathbf{Y} = [x \quad y]^T. \quad (6)$$

圆心的一对理论值和实际值可以建立两个方程,18个未知的畸变系数需要9对被测圆心坐标的理论值和实际值来求解。为了提高测量精度,保证提取的标定点个数远大于误差模型系数的个数,因此采用最小二乘法求误差模型系数向量  $\mathbf{P}$ 。

$$\mathbf{P} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T(\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X}). \quad (7)$$

#### 4 光源强度引起的图像边缘位置误差标定

光源作为测量系统的关键组成部分,光源强度会对图像边缘的精确提取和定位产生重要影响,进而影响系统的测量精度。为了获取质量较好的图像,光源强度应该保证在合适的范围。光源强度过低时,导致图像信噪比低,不利于系统成像;光源强度过高时,电荷耦合器件(CCD)的全部像元趋于饱和,会造成图像部分细节信息丢失。

图像灰度值可以用于衡量光源强度,因此获取不同光源强度的背景图像,计算相机视野中央区域的灰度平均值。量化后输出的像素灰度值可用  $0\sim 255$  表示,灰度值越接近 255,说明光源强度越高,以此确定图像饱和时的光源强度等级。

以标定板中的一个标定圆为例,欠饱和时,图像不清晰,边缘的过渡带较宽,不利于边缘的提取,影响测量

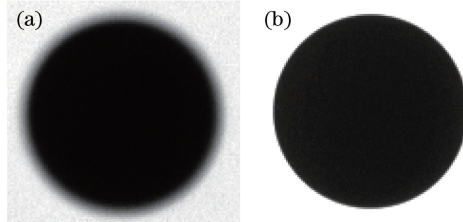


图2 标定圆图像。(a) 欠饱和图像;(b) 过饱和图像

Fig. 2 Image of calibration circle. (a) Undersaturated image; (b) supersaturated image

精度,欠饱和情况下标定板中的标定圆如图 2(a)所示;过饱和时,光源强度变化,图像的背景灰度值不再发生变化,均保持灰度值为 255,而前景灰度值会增大,这样就会造成边缘沿着其法线方向由白向黑偏移,产生边缘位置误差。同时,由于光源过饱和,边缘会更加清晰,过渡带更窄,有利于边缘的提取,过饱和情况下标定板中的标定圆如图 2(b)所示。因此测量时,选择刚过饱和的图像进行边缘提取,然后再对这个误差进行补偿。

由于选择刚过饱和的图像进行边缘提取,因此辐射度非线性模型对边缘位置的影响较小,不影响光源强度对边缘位置误差的标定。

为了提高系统的测量精度,需要对光源强度变化引起的边缘位置误差进行补偿。在确定像素当量的基础上,不同光源强度引起的图像边缘位置误差值可以表示为

$$\Delta = \frac{1}{2} \left( \frac{D}{A_r} - d \right), \quad (8)$$

式中, $\Delta$  为误差补偿量, $D$  为标定圆直径的物理尺寸, $A_r$  为像素当量, $d$  为标定圆直径的实际像素尺寸。根据(8)式,可建立光源强度和图像边缘位置误差之间的函数关系。

## 5 实验分析

采用的视觉测量系统主要硬件为:Basler piA2400-17gc 全帧型面阵 CCD 黑白像机,其分辨率为 2448 pixel×2050 pixel,芯片为 Sony ICX625,像素尺寸为 3.45  $\mu\text{m}$  × 3.45  $\mu\text{m}$ ,CCD 尺寸 2/3"(1 inch = 25.4 mm),模数转换器(ADC)位数是 16 位;TC2348 双远心镜头,视场为 48 mm×36 mm,畸变率小于 0.1%,景深 20 mm;光电二极管(LED)蓝光平行光源,光源控制器采用脉冲宽度调制(PWM)方法,分 1000 级调节,对应光源电压为 0~24 V。

### 5.1 像素当量标定模型

由于像素当量是根据圆心距的物理尺寸和像素尺寸的比值求得,而圆心距又不受光源强度的影响,因此光源强度对像素当量没有影响,只需分析标定板的位姿对像素当量标定结果的影响。在一定物距下,获取的同一光源强度下不同位姿的标定板图像如图 3 所示,分别求取的像素当量如表 1 所示。

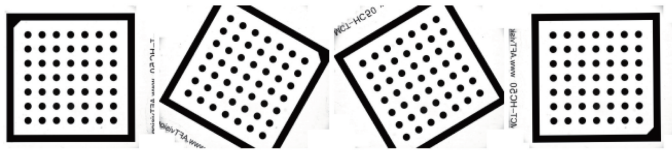


图 3 不同位姿的标定板图像

Fig. 3 Calibration plate images with different poses

表 1 不同位姿标定板像素当量标定结果

Table 1 Calibration results of pixel equivalent by plate with different poses

Order number	Center distance /pixel	Pixel equivalent / $\mu\text{m}$
1	205.4211	19.4722
2	205.4221	19.4721
3	205.4221	19.4721
4	205.4232	19.4720
5	205.4211	19.4722
6	205.4253	19.4718
7	205.4253	19.4718
8	205.4232	19.4720
9	205.4242	19.4719

从表 1 分析可知,在物距和光源强度一定的情况下,标定板位姿的变化对像素当量标定结果的影响可以忽略不计,最大值与最小值仅相差 0.004  $\mu\text{m}$ ,平均值为 19.4720  $\mu\text{m}$ 。

### 5.2 系统误差标定模型

为了进行测量系统误差标定,在物距和光源强度一定的情况下,获取 20 张不同位姿的标定板图像,部分

标定板图像如图 3 所示,保证标定圆的圆心覆盖整个视场。采用提出的标定方法对测量系统进行标定,求得误差模型系数向量  $\mathbf{P}$ ,误差曲面如图 4 所示,误差模型表达式为

$$\begin{cases} \delta_x = 7.748 \times 10^{-10} x^3 + 7.799 \times 10^{-11} y^3 - 2.950 \times 10^{-10} xy^2 + 1.539 \times 10^{-10} x^2 y + \\ \quad 1.681 \times 10^{-7} x^2 + 5.921 \times 10^{-8} y^2 - 5.962 \times 10^{-7} xy - 1.543 \times 10^{-4} x + 1.025 \times 10^{-5} y \\ \delta_y = -8.022 \times 10^{-12} x^3 - 1.903 \times 10^{-10} y^3 + 1.713 \times 10^{-10} xy^2 - 2.118 \times 10^{-10} x^2 y - \\ \quad 2.049 \times 10^{-7} x^2 - 8.221 \times 10^{-7} y^2 + 1.140 \times 10^{-7} xy + 3.514 \times 10^{-5} x + 1.675 \times 10^{-4} y \end{cases} \quad (9)$$

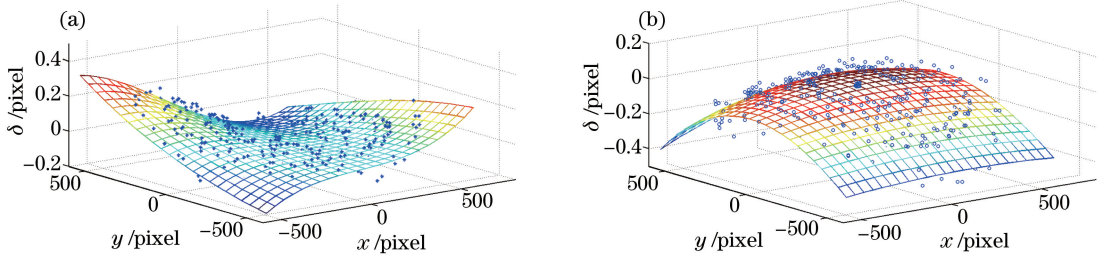


图 4 误差曲面。(a)  $\delta_x$  误差曲面;(b)  $\delta_y$  误差曲面

Fig. 4 Error curved surface. (a) Error curved surface of  $\delta_x$ ; (b) error curved surface of  $\delta_y$

### 5.3 光源强度引起的图像边缘位置误差补偿模型

在物距一定的情况下,获取不同光源强度的背景图像,选取视野中心区域的 100 个像素点,求出该区域的灰度平均值,以此表示光源强度等级,结果如图 5 所示。可以看出,在本实验的测量系统条件下,光源等级为 82 级时,图像达到饱和状态,即图像背景灰度值为 255。

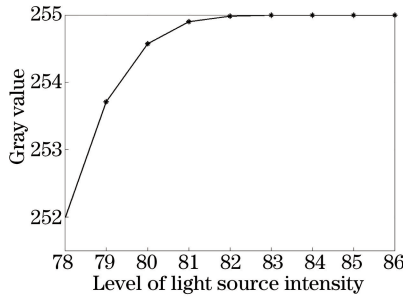


图 5 不同光源强度灰度分布

Fig. 5 Gray distribution under different light source intensities

为了建立光源强度和边缘位置误差补偿值的函数关系,获取不同光源强度的标定板图像(如图 1 所示),提取不同光源强度的标定板上同一位置的标定圆圆心位置,圆心位置分布如图 6 所示。可以看出,光源强度的变化基本不会造成圆心位置的变化,说明光源强度变化不会造成图像边缘位置的整体向一个方向偏移,而是边缘沿着其法线方向上都向背景或都向前景偏移。

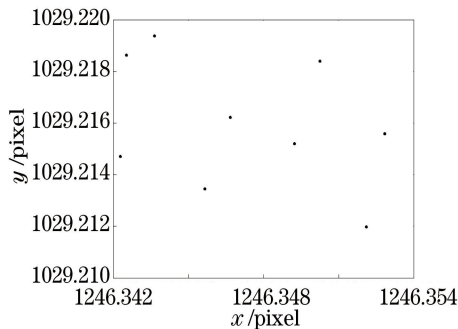


图 6 不同光源强度下同一标定圆圆心位置分布

Fig. 6 Distribution of center position of the same calibration circle under different light intensities

光源强度低于 78 级时,图像过于模糊,影响测量精度。光源强度高于 82 级时,边缘清晰,边缘沿着其法线方向由白向黑偏移,标定圆直径缩小。处理光源强度从 78 级到 86 级之间的标定板图像,根据标定圆的理

论直径和实测的像素直径,计算光源强度引起的边缘位置误差值,数据如表 2 所示。则补偿量与光源强度的关系如图 7 所示,可以看出补偿量与光源强度等级基本呈线性关系,斜率为 0.0158。

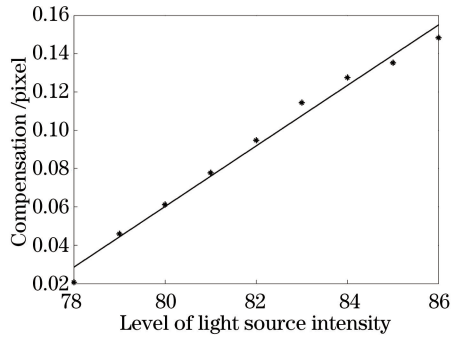


图 7 补偿量与光源强度分布曲线

Fig. 7 Distribution curve of compensation and light source intensity

表 2 不同光源强度标定板图像情况

Table 2 Case of calibration plate image under different light source intensities

Level of light source intensity	Gray value	Compensation /pixel
78	252.0	0.0207
79	253.7	0.0459
80	254.6	0.0611
81	254.9	0.0778
82	255.0	0.0948
83	255.0	0.1144
84	255.0	0.1276
85	255.0	0.1352
86	255.0	0.1484

#### 5.4 视觉测量系统综合校正

为了验证视觉测量系统的标定精度,在物距和光源强度一定的条件下,随机对一幅点阵标定板图像进行综合校正。将提取的标定板圆心坐标 $(x, y)$ 代入(9)式中,求出每个点的误差 $\delta_x$ 、 $\delta_y$ ,则校正后的圆心坐标可表示为

$$\begin{cases} bx = x + \delta_x \\ by = y + \delta_y \end{cases} \quad (10)$$

(10)式描述了像点位置与已消除了误差影响的物点位置的相互对应关系,分别计算实际圆心到理论圆心的距离和误差校正后圆心到理论圆心的距离,由于物距确定,即系统的像素当量确定,则可将像素距离转化成物理距离,结果分别如表 3、表 4 所示。

表 3 实际圆心与理论圆心距离(单位:  $\mu\text{m}$ )

Table 3 Distance between actual center and theoretical center (unit:  $\mu\text{m}$ )

Column	Row				
	1	2	3	4	5
1	2.986	2.223	2.191	2.291	4.421
2	1.328	1.408	0.642	0.798	2.448
3	1.191	0.639	0.379	1.283	0.962
4	2.379	1.604	1.617	1.718	2.441
5	6.339	4.805	3.959	3.999	4.343

表 4 误差校正后圆心与理论圆心距离 (单位:  $\mu\text{m}$ )

Table 4 Distance between actual center after error correction and theoretical center (unit:  $\mu\text{m}$ )

Column	Row				
	1	2	3	4	5
1	0.688	0.674	0.617	0.913	0.906
2	0.819	0.604	0.671	0.465	1.031
3	0.755	0.464	0.385	0.904	0.702
4	0.753	0.546	0.464	0.509	0.728
5	1.869	1.053	0.449	0.259	0.678

将提取的标定圆边缘进行拟合,其直径如表 5 所示。由于光源强度确定,根据光源强度引起的图像边缘位置误差补偿模型确定标定圆的边缘位置误差补偿量,误差校正后标定圆直径如表 6 所示。

由表 3、表 4 可知,实际圆心位置与理论圆心位置的最大误差为  $6.3 \mu\text{m}$ ,校正后圆心位置与理论圆心位置的误差在  $2 \mu\text{m}$  以内,由表 5、表 6 可知,提取的标定圆实际直径的平均值为  $1996.663 \mu\text{m}$ ,与理论直径的误差为  $3.337 \mu\text{m}$ ,且直径最大值与最小值的差值为  $8.225 \mu\text{m}$ ,校正后标定圆直径的平均值为  $2000.353 \mu\text{m}$ ,与理论直径的误差为  $0.353 \mu\text{m}$ ,且直径最大值与最小值的差值为  $3.235 \mu\text{m}$ ,则校正后的标定圆直径更加接近理论标定圆直径,且整体误差较小。由此可以看出,采用提出的标定方法对测量系统进行综合标定后,校正直与理论值更加接近,实现了系统的高精度标定。

为了说明提出的标定方法具有可重复性,随机选取 5 幅位姿不同的点阵标定板图像进行综合校正。以位于标定板上同一位置的标定圆为例,分析其实际值与校正直,结果分别如表 7、表 8 所示。

表 5 标定圆直径 (单位:  $\mu\text{m}$ )

Table 5 Diameter of calibration circle (unit:  $\mu\text{m}$ )

Column	Row				
	1	2	3	4	5
1	1998.149	1999.405	2003.018	1997.048	1997.316
2	1995.684	1996.374	1997.847	1995.952	1998.044
3	1995.945	1996.024	1995.811	1995.966	1995.860
4	1995.133	1995.527	1997.128	1995.370	1995.198
5	1994.793	1995.968	1997.067	1995.330	1996.624

表 6 误差校正后标定圆直径 (单位:  $\mu\text{m}$ )

Table 6 Diameter of calibration circle after error correction (unit:  $\mu\text{m}$ )

Column	Row				
	1	2	3	4	5
1	2001.567	2002.366	2001.697	1999.630	1999.974
2	1999.610	1999.873	2001.097	1999.131	2001.329
3	2000.306	1999.988	1999.556	1999.669	1999.699
4	1999.855	1999.883	2001.295	1999.524	1999.518
5	1999.805	2000.643	2001.582	1999.863	2001.353

表 7 圆心距离的实际值与校正直 (单位:  $\mu\text{m}$ )

Table 7 Actual value and corrected value of center distance (unit:  $\mu\text{m}$ )

Order number	Distance between actual center and theoretical center	Distance between actual center after error correction and theoretical center
1	3.775	0.188
2	4.309	0.894
3	3.959	0.448
4	4.082	0.773
5	3.269	0.829

表 8 标定圆直径的实际值与校正值 (单位:  $\mu\text{m}$ )Table 8 Actual value and corrected value of diameter of calibration circle (unit:  $\mu\text{m}$ )

Order number	Diameter of calibration circle	Diameter of calibration circle after error correction
1	1996.651	2000.298
2	1996.858	2000.886
3	1995.811	1999.548
4	1996.224	2000.323
5	1996.661	2000.449

根据表 7、表 8 可知, 标定圆的实际圆心位置与理论圆心位置的最大误差为  $4.3 \mu\text{m}$ , 校正后误差控制在  $0.9 \mu\text{m}$  以内, 标定圆的实际直径与理论直径的最大误差为  $4.2 \mu\text{m}$ , 校正后的误差控制在  $0.9 \mu\text{m}$  以内, 由此可见, 采用提出的标定方法进行综合校正后, 其结果具有一致性, 说明该方法可靠, 可以用于高精度标定。

## 6 结 论

1) 像素当量作为视觉测量系统的重要参数, 需要对其进行标定。根据点阵标定板圆心距的物理尺寸和像素尺寸, 确定系统的像素当量, 并通过实验证明, 在物距一定的情况下, 标定板的位姿对像素当量没有影响。

2) 基于机器视觉的测量系统存在多种系统误差, 为了尽量减小这些误差对测量的影响, 需要对测量系统进行标定。根据点阵标定板圆心位置, 建立了二元三次误差补偿模型。实验证明采用这种标定方法可以综合修正各种系统误差, 有效提高系统的测量精度。

3) 考虑光源强度对系统测量精度的影响, 计算不同光源强度的边缘位置误差补偿量, 实验证明, 光源强度变化不会造成图像边缘整体向一个方向偏移, 而是沿着其法线方向都向背景或都向前景偏移, 所得补偿量与光源强度等级基本成线性关系, 根据不同光源强度的补偿量对图像进行校正后, 误差明显减小。

## 参 考 文 献

- 1 Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: principle and researches[M]. Beijing: Science Press, 2007: 69-71.  
于起峰, 尚 洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 69-71.
- 2 Chen Ruwen, Huang Ren, Zhang Zhisheng, *et al.*. Distortion correction method based on mathematic model in machine vision measurement system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 243-248.  
陈茹雯, 黄 仁, 张志胜, 等. 基于数学模型的视觉测量系统图像畸变校正方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 243-248.
- 3 Zhao Wenhui, Zhao Ping, Duan Zhenyun, *et al.*. Research on random and systematic errors of micron-sized machine vision system[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(9): 108-114.  
赵文辉, 赵 萍, 段振云, 等. 微米级机器视觉系统中随机误差与系统误差的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(9): 108-114.
- 4 Zou Yuanyuan, Zhao Mingyang, Zhang Lei. Direct calibration method of laser stripe vision sensor based on gauge block [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1108002.  
邹媛媛, 赵明扬, 张 雷. 基于量块的线结构光视觉传感器直接标定方法[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1108002.
- 5 Zhang Hui, Zhang Liyan, Wei Hu. Three-step calibration for binocular stereo system[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(16): 1899-1903.  
张 辉, 张丽艳, 韦 虎. 双目立体测量系统标定的三步法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(16): 1899-1903.
- 6 Chen Hui, Mi Baoxiu, Gao Zhiqiang. Calibration of 3D structured light measurement system based on the properties of lens distortion[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1215002.  
陈 会, 密保秀, 高志强. 基于畸变规律的三维结构光测量系统标定[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1215002.
- 7 T T Li, H Y Zhang, J Geng. Geometric calibration of a camera-projector 3D imaging system[C]. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Application in Industry, 2011: 187-194.
- 8 Bu Penghui, Zhao Hong, Gu Feifei, *et al.*. A full automatic camera calibration method based on planar target[J]. Acta



Optica Sinica, 2014, 34(10): 1015004.

卜鹏辉, 赵 宏, 谷飞飞, 等. 一种基于平面靶标的全自动标定方法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1015004.

- 9 Yu Jun, Lin Jiaming, Yang Jianyu, *et al.*. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8): 1440-1442.
- 余 俊, 林家明, 杨建宇, 等. 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正[J]. 光学学报, 2007, 27(8): 1440-1442.
- 10 Su Chengzhi, Wang Enguo, Hao Jiangtao, *et al.*. Distortion correction for images in planar metrology[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 161-166.
- 苏成志, 王恩国, 郝江涛, 等. 平面几何测量中的图像畸变校正[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(1): 161-166.
- 11 Li Lulu, Zhao Wenchuan, Wu Fan, *et al.*. Analysis and improvement of characteristic points extraction algorithms in camera calibration[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0515002.
- 李璐璐, 赵文川, 伍 凡, 等. 摄像机标定中的特征点提取算法研究与改进[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0515002.
- 12 Hu Tao, Wu Huilan, Liu Guodong. Study of micro-vision calibration technique based on SIFT feature matching[C]. The 5<sup>th</sup> International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture, Beijing, 2012: 270-276.
- 13 Carsten Steger, Markus Ulrich, Christian Wiedemann. Machine vision algorithms and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008:268-270.
- 14 Liu Ziteng, Bai Ruilin, Wang Xiuping. Accurate location of projected circular center in visual calibration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091001.
- 刘子腾, 白瑞林, 王秀平. 视觉标定中圆心投影点精确定位[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091001.
- 15 Wang Xunsi. Research on calibration technology & application in vision inspection system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004: 14-15.
- 王训四. 视觉测量系统中的标定技术及其应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004: 14-15.
- 16 Jiang Jie, Zhang Guangjun, Zhou Fuqiang, *et al.*. Distortion correction of the wide-angle objective lens with real-time digital technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 174-177, 182.
- 江 洁, 张广军, 周富强, 等. 大视场广角物镜畸变的实时数字校正[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 174-177, 182.
- 17 Zhang Min, Jin Longxu, Li Guoning, *et al.*. Camera distortion calibration method based on straight line characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0615001.
- 张 敏, 金龙旭, 李国宁, 等. 基于直线特征的摄像机镜头畸变标定方法[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0615001.
- 18 Qiao Yanfeng, Gao Fengduan, Wang Zhiqian, *et al.*. Distortion correction for the photoelectricity measuring system based on the cubic fitting equation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(6): 28-31.
- 乔彦峰, 高峰端, 王志乾, 等. 基于三次拟合方程畸变校正的光电测量系统[J]. 光电工程, 2008, 35(6): 28-31.
- 19 C B Duane. Close-range camera calibration[J]. Photogramme Eng, 1971, 37(8): 855-866.
- 20 Yao Na, Lin Zhaorong, Ren Chaofeng, *et al.*. A distortion model suitable for nonlinear distortion correction of digital video camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 022204.
- 姚 娜, 林招荣, 任超峰, 等. 一种适合摄像机非线性畸变校正的畸变模型[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 022204.