

## 深度约束的零件尺寸测量系统标定方法

肖志涛<sup>1</sup>, 朱莎莎<sup>1</sup>, 耿磊<sup>1</sup>, 李月龙<sup>2</sup>, 刘文超<sup>1</sup>, 叶琨<sup>1</sup>

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387;

2. 天津工业大学 计算机科学与软件学院, 天津 300387)

**摘要:** 针对大尺寸平面零件尺寸测量系统标定精度不高的问题, 提出了一种基于深度信息的系统标定方法。首先利用圆形平面靶标, 提出一种提取靶标图像特征点的新方法, 采用自适应阈值的边缘检测和多项式拟合算法提取特征点亚像素轮廓, 利用椭圆拟合得到中心坐标; 然后根据带有畸变的非线性成像几何模型, 采用最小二乘法计算摄像机参数的最优解, 获得靶标的位姿; 最后提出被测物表面与靶标平面之间的深度信息作为摄像机模型修正项, 校正测量平面位姿, 利用成像原理和直线与零件表面交点确定零件尺寸。设计了单目视觉尺寸测量系统并进行实验, 结果表明: 标定反投影误差小于 0.02 pixel, 在  $1 \times 0.75 \text{ m}^2$  的视场内, 系统测量精度达到了 0.05 mm。

**关键词:** 零件尺寸测量; 摄像机标定; 特征点检测; 深度约束

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2831-06

## Calibration method for parts dimension measurement system based on depth constraint

Xiao Zhitao<sup>1</sup>, Zhu Shasha<sup>1</sup>, Geng Lei<sup>1</sup>, Li Yuelong<sup>2</sup>, Liu Wenchao<sup>1</sup>, Ye Kun<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. School of Computer Science & Software Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** A new algorithm of system calibration based on depth constraint was presented to improve the calibration accuracy of large scale planar part vision measurement system. Firstly, an algorithm of extracting the round marks of calibration plate was proposed. Sub-pixel contours of marks were extracted by edge detection algorithm based on adaptive threshold and polynomial fitting, then the center coordinates can be computed by ellipse fitting method. Then, on the basis of analyzing camera distortion model, the optimal solution of internal parameters and plate poses were obtained using least square method. Finally, the pose of measuring plane was transformed by depth information as a correction term between parts surface and calibration plate. The dimensions could be calculated using imaging principle and the intersection point of the line and the part surface. Measurement system was designed and experiments were carried out. The result shows that the calibration back-projection error is less than 0.02 pixel and the precision of the system is up to 0.05 mm in the range of  $1 \times 0.75 \text{ m}^2$ .

**Key words:** part dimensional measurement; camera calibration; mark detection; depth constrain

收稿日期: 2015-01-05; 修订日期: 2015-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(61102150, 61302127, 11326198); 天津市科技支撑计划重点项目(13ZCZDGX02100, 14ZCZDGX00033)

作者简介: 肖志涛(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理与模式识别方面的研究。Email: xiaozhitao@tjpu.edu.cn

通讯作者: 耿磊(1982-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事测试计量技术及仪器方面的研究。Email: genglei@tjpu.edu.cn

## 0 引言

机器视觉测量技术具有非接触、高精度、易于实现自动化等优点,其中单目视觉测量系统结构简单,操作方便,已逐渐成为零件尺寸高精度测量领域的重要测量手段。高精度尺寸测量的关键是摄像机标定,目前小尺寸薄片零件标定方法能达到很高的精度,而由于现场环境、光源、系统分辨率等的影响,大尺寸物体的高精度标定方法精度不高,直接影响尺寸测量精度。首先,大尺寸的靶标图像畸变较大,需要合适的靶标特征点提取算法。其次,零件厚度变化使得测量位姿与标定位姿不一致,影响测量精度。

典型的摄像机标定算法是 Zhang<sup>[1]</sup>提出的基于平面模板的标定方法,精度高且不需要模板的运动信息,但是该方法需要人工提取图像角点进行匹配,不利于标定自动化的实现。在此基础上,针对靶标图像特征提取, Li 等<sup>[2]</sup>提出了一种依据特征点由外向内进行螺旋排序的特征匹配定位方法,对理想的靶标图像可实现特征自动提取与定位,但排序繁琐,鲁棒性较差。刘嵩等<sup>[3]</sup>将单应性矩阵应用在棋盘格角点检测中,需要手动框选初始角点,受人为因素干扰。Kou 等<sup>[4]</sup>提出了基于 Radon 变换的圆形标定物的定位方法,但对图像的旋转不敏感。郭超等<sup>[5]</sup>采用钢尺上的刻度为参考点标定像素当量,建立了工件尺寸测量系统,但是没有考虑待测量物体的厚度问题。高俊钊等<sup>[6]</sup>分析了物体高度小范围变化对测量准确度的影响,利用对焦模型对像素当量进行修正,但是由于镜头的畸变在镜头空间位置分布不均,修正精度受到影响。

针对大尺寸厚度不一的平面零件视觉测量中标定精确低的问题,文中提出了一种阈值自适应的圆形靶标特征点提取方法;在摄像机透视成像模型的基础上,引入被测物表面与平面靶标之间的深度信息改进视觉测量系统的数学模型;设计大尺寸平面零件视觉测量系统 (Large Scale Planar Vision Measurement System, PVMS),通过实验分析了系统的标定和测量精度。

## 1 PVMS 结构设计

测量系统主要由 CCD 相机、点激光器和光源组

成,如图 1 所示。其中,相机光轴垂直于测量平面,点激光器和摄像机约成 45°放置,斜射式投射光束,采用高密度 LED 阵列面为系统提供高强度背光均匀光场,突出被测物边缘特征。平面零件尺寸的检测,实际上是零件表面上各个点位置坐标的计算,其方法流程图如图 2 所示。首先采用自适应阈值的边缘检测和多项式拟合算法提取特征点亚像素轮廓,利用椭圆拟合算法得到中心坐标,建立其与三维世界坐标的准确对应,采用最小二乘法得到摄像机参数,得到靶标的平面方程。再通过点结构光方法测量零件厚度,在标定得到的姿态基础上利用深度方向的约束得到实际零件尺寸。

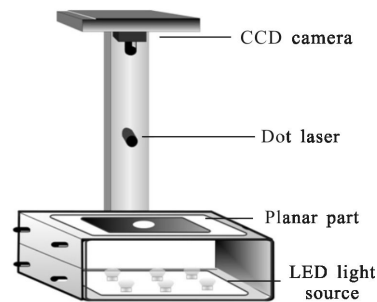


图 1 系统结构图

Fig.1 System structure image

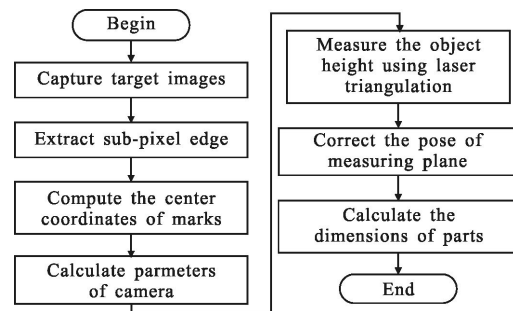


图 2 方法流程图

Fig.2 Method flow diagram

## 2 PVMS 标定模型

### 2.1 透视变换和摄像机模型

摄像机模型是光学成像几何关系的简化,选用带有透镜畸变的小孔透视模型。设  $P$  为空间中一点,在世界坐标系和摄像机坐标系中的坐标分别为  $(x_w, y_w, z_w)$  和  $(x_c, y_c, z_c)$ ,图像坐标为  $(r, c)$ 。理想成像下  $P$  点的成像坐标为  $(u, v)$ ,实际成像位置为  $p'(\tilde{u}, \tilde{v})$ 。

根据透视成像模型,图像坐标系与世界坐标系之

间的关系可以用  $3 \times 4$  投影矩阵  $M$  来表示,  $M=A[R|T]$ ,  $[R|T]$  表示从世界坐标系上点  $P_w$  到摄像机坐标系点  $P_c$  的刚性变换,  $A$  为摄像机内部参数矩阵。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T, A = \begin{bmatrix} s_x & 0 & c_x \\ 0 & s_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $T=(t_x, t_y, t_z)^T$  为平移向量;  $R=(\alpha, \beta, \gamma)$  为旋转矩阵;  $s_x, s_y$  分别表示在  $x$  和  $y$  方向上像点的物理坐标到图像坐标的比例系数;  $c_x, c_y$  为光轴与像平面交点的图像坐标。

由于世界坐标系的  $x_w y_w$  平面与靶标平面重合, 即靶标平面的方程为:  $z_w=0$ , 可以得到理想透视数学模型, 考虑径向畸变前三项和切向畸变, 标定时靶标上的特征点经透视变换投影到像面上得到的坐标  $(\tilde{u}_i', \tilde{v}_i')$ , 与图像处理得到的特征点图像坐标  $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)$  存在偏差, 以二者之间距离最小构建数学模型进行非线性优化, 采用最小二乘法<sup>[7]</sup>实现内外参数的优化求解。

### 2.2 平面靶标特征点的提取

靶标图像特征点的精确提取是进行标定的先决条件, 为了充分标定视场边缘的畸变量, 需多次成像以保证靶标覆盖摄像机的整个视场, 但是被测物尺寸较大时, 即大视场条件下像面照度具有明显的不均匀性, 特征点的提取精度受到影响。因此文中提出阈值自适应的 Canny 算子对靶标图像边缘粗定位, 然后用多项式拟合法得到亚像素级的边缘轮廓, 利用最小平方拟合算法拟合椭圆, 得到特征点中心坐标, 最终建立图像中特征点与实物靶标特征点的拓扑关系。

#### 2.2.1 大视场光学系统对像面照度影响

根据几何光学和光度学理论, 光学系统的像面照度  $E$  的分布公式为:

$$E = \frac{\pi I}{4A^2} \left[ \frac{L-f'}{f} \right]^2 \cos^4 \theta \quad (2)$$

式中:  $I$  为物体的亮度;  $L$  为物距;  $f'$  为系统的焦距;  $\theta$  为视场角;  $A=f'/D$  为镜头的光圈数。由公式(2)可知, 物体位于光轴上时 ( $\theta=0$ ) 像面照度值最大, 位于光轴外时像面照度值按  $\cos^4 \theta$  关系降低。因此到 CCD 中央部分的光线亮度明显强于周围区域, 图像的边缘部分会形成暗角。当视场角很大时, 边缘像点的光照度降低得相当严重, 如图 3 所示。

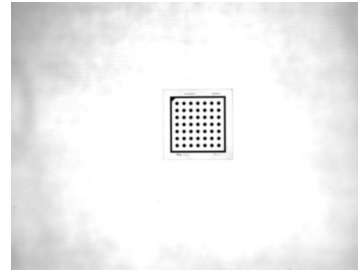


图 3 采集的靶标图像

Fig.3 Captured target image

由于像面照度的不均匀性, Canny 算子在进行边缘粗定位时, 设置的固定高阈值无法兼顾靶标在中心区域和在边角区域的图像, 导致特征点边缘不连续。为此, 文中提出采用迭代算法计算阈值, 可以自适应确定特征点边界灰度阈值。

#### 2.2.2 靶标特征点定位

迭代算法描述如下: 设置迭代的初始阈值, 将该阈值下的边缘记为候选轮廓。在此基础上经过面积、形状因子、直径等特征约束剔除非特征点, 得到符合约束特征的椭圆个数和位置信息, 判断是否满足实际靶标特征。若满足则迭代结束; 若不满足则将该次阈值减少  $T_p$ , 得到新的阈值, 重复以上步骤, 最终得到的  $M$  就是期望的阈值。具体步骤如下:

(1) 通过统计灰度直方图得到初始阈值  $T_0, T_0 = \{T_k | k=0\}$ ,  $k$  为迭代次数。

(2) 选用 Canny 算子作为整像素级边缘定位函数, 进行整像素级边缘提取, 通过抑制梯度方向上所有非屋脊峰值的幅值来细化边缘, 最后进行双阈值分割时, 选用  $T_k$  作为高阈值, 得到的点作为候选轮廓。

(3) 在候选轮廓的基础上经过直径、形状因子特征约束剔除非标识点, 得到经过特征约束的椭圆边缘的图像。形状因子定义为:

$$\begin{cases} k = \frac{4\pi S}{P}, 0 < k \leq 1 \\ l = n_1 + \sqrt{2} n_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $S$  为图形面积, 定义为封闭轮廓包含的像素总数;  $n_1$  为图像边缘中 4 邻域像素数;  $n_2$  为图像边缘中 8 邻域像素数。

(4) 确定评价函数为轮廓个数和轮廓中心点位置关系。若与靶标数据一致, 则迭代结束, 否则  $k=k+1$ , 计算新的阈值  $T_k=T_k-T_p$ ,  $T_p$  为阈值步长, 转步骤(2)。

将阈值  $T_k$  作为 Canny 的高阈值获取图像边缘,

在边缘附近取一系列的点,拟合多项式并且在梯度方向上求出了最大值的位置,得到亚像素精度轮廓。圆形特征点投影后为椭圆图像<sup>[9]</sup>,用最小平方算法拟合椭圆,椭圆曲线可以由一个二次多项式来表示:

$$\begin{cases} F(G, X) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f \\ G = [a, b, c, d, e, f]^T \\ X = [x^2, xy, y^2, x, y, 1]^T \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F(G, X)$ 为点 $(x_i, y_i)$ 到曲线 $F(G, X) = 0$ 的“代数距离”。通过最小化 $N$ 个数据点 $x_i$ 到曲线的代数距离平方和实现椭圆拟合:

$$D_A(G) = \sum_{i=1}^N F(X_i)^2 \quad (5)$$

根据 Bookstein 理论加入约束条件,就可以得到对应的唯一的椭圆,进而确定中心点坐标,建立图像与实物标靶特征点的拓扑关系。

### 3 测量平面参数校正

在实际应用中,平面零件薄厚不一,零件上表面即测量平面与标定平面存在高度差,导致标定的相机外参不是实际测量平面的参数。文中利用测量平面与靶标平面的高度差校正测量平面的位姿,其中高度差采用点结构光测厚的方法获得。

如图 4 所示,测量平面 $\pi_2$ 与标定平面 $\pi_1$ 平行,在两个平面上分别建立标定平面坐标系 $(x_w, y_w, z_w)$ 和测量平面坐标系 $(x_w^1, y_w^1, z_w^1)$ ,两平面之间的距离为 $h$ 。标定平面 $\pi_0$ 与摄像机坐标系的对应关系 $M_1$ 已由公式(1)给出,此时,若已知 $\pi_0$ 与 $\pi_1$ 间距 $h$ ,测量平面坐标系 $(x_w^1, y_w^1, z_w^1)$ 到摄像机坐标系的转换由公式(6)得到:

$$T' = R \times (0, 0, h)^T + T \quad (6)$$

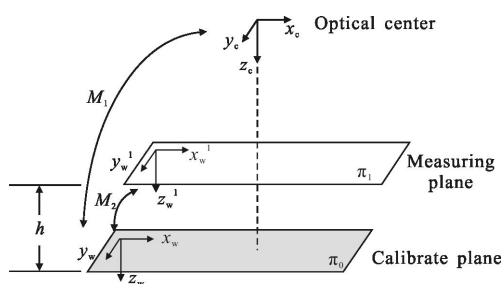


图 4 高度变化与外参的数学关系

Fig.4 Mathematical relationship between height variation and external parameters

采用参考文献[9]的方法获得高度 $h$ ,其过程为:点激光器发出的光线聚焦在 $\pi_1$ 上,放置被测物后,光斑由标定平面移动到了物体表面,其所成的像在 CCD 上会相应移动,如图 5 所示。

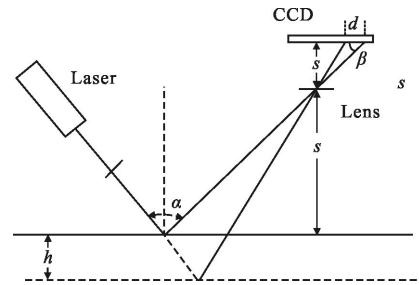


图 5 斜射式三角法原理图

Fig.5 Schematic diagram of trigonometry

图中, $\alpha$ 为激光束光轴与透镜光轴的夹角, $\beta$ 为 CCD 光敏面与透镜光轴的夹角, $h$ 为物体表面的偏移。设物距和像距分别为 $s$ 和 $s'$ ,传感器上的成像点的偏移为 $d$ , $h$ 可由公式(7)得到:

$$h = \frac{d s \sin \beta}{s' \sin \beta - d \sin(\alpha + \beta)} \quad (7)$$

### 4 深度约束下的平面零件测量

利用 CCD 相机采集零件图像并利用多项式拟合得到亚像素边缘,反求边缘点的世界坐标确定零件尺寸。通过图像点坐标求取对应的物方坐标是利用成像的基本原理,根据图像上目标成像点所对应的光线直线与边缘点所在平面的交点来确定边缘点的空间坐标,进而得到目标的位置信息。定义光线 $L_c$ 的两个点分别为摄像机的投影中心和图像坐标系中的 $(r, c)^T$ 点,通过公式(1)得到光线 $L_c$ 在摄像机坐标系中的方程:

$$L_c = (0, 0, 0)^T + \lambda(u, v, f)^T \quad (8)$$

通过公式(9)~(11)得到光线 $L_c$ 在世界坐标系下的方程(公式 12):

$$P_w = R^{-1}(P_c - T) = R^T(P_c - T) \quad (9)$$

$$O_w = R^T((0, 0, 0)^T - T) = -R^T T \quad (10)$$

$$I_w = R^T((u, v, f)^T - T) \quad (11)$$

$$L_w = O_w + \lambda(I_w - O_w) = O_w + \lambda D_w \quad (12)$$

式中: $R^{-1} = R^T$ 为公式(1)中旋转矩阵 $R$ 的逆矩阵; $O_w$ 为转换后的光心点; $I_w$ 为转换到成像平面上的点; $D_w$ 为光线的方向向量。

计算光线与测量平面  $z=0$  的交点坐标, 即目标点的世界坐标  $P_w$ , 令  $O_w=(o_x, o_y, o_z)^T, D_w=(d_x, d_y, d_z)^T$ , 则:

$$P_w=(o_x-o_zd_x/d_z, o_y-o_zd_y/d_z, 0) \quad (13)$$

## 5 实验结果与分析

### 5.1 标定实验

采用 VA-8MC 型 CCD 黑白工业相机采集图像, 其分辨率为  $3\,296 \times 2\,472$ , 像素尺寸  $(5.5 \times 5.5)\mu\text{m}$ , 镜头焦距为  $28\text{ mm}$ , 选用大小为  $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 、特征点间距为  $15\text{ mm}$  的平面圆形靶标, 以 LED 直发光背光源为照明系统。摄像机拍摄平面大小为  $1\,000\text{ mm} \times 750\text{ mm}$ , 获取靶标系列图像, 考虑速度与精度, 实验选取  $T_p$  为 10, 提取每幅图像靶标特征点并计算靶标方向。

标定结果中摄像机内参  $(f, C_x, C_y, S_x, S_y)$  为  $(29.11, 1\,640.18, 1\,249.87, 5.500\,9, 5.500\,0)$ , 畸变参数  $(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)$  为  $(0.144\,5 \times 10^3, 0.144\,1 \times 10^6, 0.981\,3 \times 10^8, 0.020\,0, -0.009\,6)$ , 反投影误差为  $0.017\,6$ 。外参  $(R_x, R_y, R_z, T_x, T_y, T_z)$  为  $(0.0104, 358.2, 180.7, 0.0304, -0.000\,9, 1.397)$ 。

以反投影误差作为相机标定精度的判断标准, 其反投影的平均误差为  $0.017\,6\text{ pixel}$ 。摄像机分辨率为  $3\,296 \times 2\,472$ , 利用标定内外参计算图像两像素间的实际距离为  $0.3\text{ mm}$ , 所以反投影误差为  $0.005\text{ mm}$ , 由此可见, 文中的标定算法可以实现对 PVMS 系统的高精度标定。

### 5.2 实物尺寸测量

对结构如图 6 所示, 厚度分别为  $1\text{ mm}$ 、 $3\text{ mm}$ 、 $5\text{ mm}$  的平面零件进行测量, 数据真值由型号 VMS-4030F、精度为  $(3+L/200)\mu\text{m}$  的数字式影像测量仪获得。

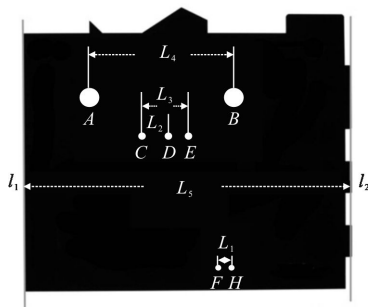


图 6 实物测量

Fig.6 Object measurement

用文中方法对平面零件上  $AB$ 、 $CD$ 、 $CE$ 、 $FH$  的圆心距  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ , 直线  $l_1$  和  $l_2$  的间距  $L_5$  进行测量, 测量结果及如表 1~表 3 所示。

表 1 1 mm 厚零件测量结果(单位: mm)

Tab.1 Results of 1 mm part(Unit: mm)

|                 | $L_1$  | $L_2$  | $L_3$   | $L_4$   | $L_5$   |
|-----------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| True values     | 39.990 | 70.006 | 129.990 | 219.960 | 499.870 |
| Measured values | 39.975 | 69.980 | 129.960 | 219.950 | 499.840 |
| Error           | -0.015 | -0.026 | -0.030  | -0.010  | -0.030  |
| Average error   | -0.022 |        |         |         |         |

表 2 3 mm 厚零件测量结果(单位: mm)

Tab.2 Results of 3 mm part(Unit: mm)

|                 | $L_1$  | $L_2$  | $L_3$   | $L_4$   | $L_5$   |
|-----------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| True values     | 39.968 | 69.942 | 129.980 | 219.951 | 499.860 |
| Measured values | 40.001 | 69.968 | 130.000 | 219.985 | 499.900 |
| Error           | 0.033  | 0.026  | 0.020   | 0.034   | 0.040   |
| Average error   | 0.030  |        |         |         |         |

表 3 5 mm 厚零件测量结果(单位: mm)

Tab.3 Results of 5 mm part(Unit: mm)

|                 | $L_1$  | $L_2$  | $L_3$   | $L_4$   | $L_5$   |
|-----------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| True values     | 39.995 | 69.980 | 129.978 | 219.940 | 499.860 |
| Measured values | 40.010 | 69.998 | 130.030 | 219.990 | 499.900 |
| Error           | 0.015  | 0.018  | 0.052   | 0.050   | 0.040   |
| Average error   | 0.035  |        |         |         |         |

实验结果表明, 系统测量误差均不超过  $0.05\text{ mm}$ , 并且当物体厚度增加时, 精度仍小于  $0.05\text{ mm}$ 。可以看出, 加入深度约束后, 物体厚度对测量精度的影响明显降低, 上述的标定结果能够大幅度地提高平面测量的精度。

## 6 结论

文中提出了基于深度约束的零件尺寸测量系统标定方法, 首先精确提取平面靶标特征点, 通过最小二乘法求取摄像机模型参数, 然后结合非接触式的激光测厚技术, 引入测量平面与靶标平面之间的深

度信息建立了位姿测量模型。设计大尺寸平面零件视觉测量系统,结合实际实验分析标定和测量精度。结果表明,系统对大视场像面照度不均匀的靶标能快速、准确地获取靶标特征点,进而提高了摄像机标定精度,加入深度约束后,物体厚度对测量精度基本无影响。在 $1 \times 0.75 \text{ m}^2$ 的测量视场内,对不同厚度的平面零件进行了实测,系统测量精度达到了  $0.05 \text{ mm}$ 。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330–1334.
- [2] Li Yuan, Yan Bei. Method of matching calibration points on 2D drone[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(13): 242–244.
- [3] Liu Song, Ye Yutang, Sun Qiang, et al. Research of chessboard's corner detection based on homography [J]. *Electronic Design Engineering*, 2012, 20 (6): 114–117. (in Chinese)  
刘嵩, 叶玉堂, 孙强, 等. 基于单应性矩阵的棋盘格角点检测研究 [J]. *电子设计工程*, 2012, 20(6): 114–117.
- [4] Kou X, Wang Z, Chen M Z, et al. Fully automatic algorithm for region of interest location in camera calibration [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(6): 1220–1226.
- [5] Guo Chao, Ma Lin. Research of size measurement based on machine vision [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2012, (1): 15–17. (in Chinese)  
郭超, 马麟. 基于机器视觉的尺寸测量方法研究 [J]. *机械工程与自动化*, 2012, (1): 15–17.
- [6] Gao Junchai, Lei Zhiyong, Wang Zemin. Camera calibration for high-precision measurement [J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(2): 93–96. (in Chinese)  
高俊钊, 雷志勇, 王泽民. 高精度测量的相机标定[J]. *光电与控制*, 2011, 18(2): 93–96.
- [7] Niu Haitao, Zhao Xunjie. New method of camera calibration based on checker board [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 133–137. (in Chinese)  
牛海涛, 赵勋杰. 采用棋盘格模板的摄像机标定新方法 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 133–137.
- [8] Xu Peng, Wang Jianye, Wang Yanru. Calculation exact center coordinate of a target circle in camera calibration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1342–1346. (in Chinese)  
徐鹏, 汪建业, 王燕儒. 摄像机标定中靶标圆心像点坐标的精确计算[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1342–1346.
- [9] Wang Dan, Zhao Bin. Laser oblique illumination method for measuring steel plate thickness [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2033–2036. (in Chinese)  
王丹, 赵斌. 激光倾斜照明法测量钢板厚度 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 2033–2036.