

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311581

基于平面靶标的交叉结构光标定方法*

刘建鑫¹, 纪超洋¹, 李艳文^{1,2}, 陈子明^{1,2}

(1. 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004; 2. 河北省并联机器人及机电系统实验室及先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室 秦皇岛 066004)

摘要:为实现线结构光高精度标定,提出一种基于平面靶标的交叉结构光标定方法。根据 Blinn-Phong 光照模型可知,当激光条纹投射在平面靶标上特征点边缘处时光截面不再服从高斯分布,常用的中心提取算法无法准确提取目标。首先,基于形态学操作剔除在平面靶标上特征点边缘处的中心点,使得直线拟合的误差由 0.060 8 pixel 提升到 0.035 8 pixel,有效减少因算法提取误差对标定结果造成的影响;然后,基于高斯曲线拟合方法对所提取的线结构光与辅助结构光交点位置进行修正,基于 Ransac 算法进行直线拟合,结果同样也有效剔除因光照不均、材质变化造成误差较大的点。实验结果表明,两种方法结合后标定精度提高 25%,中心点三维坐标与标定板平面方程相差仅 4 μm ,有效提高线结构光标定精度。

关键词: 机器视觉; Steger 算法; 线结构光标定; 视觉测量

中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

High-precision cross structured light calibration method based on planar target

Liu Jianxin¹, Ji Chaoyang¹, Li Yanwen^{1,2}, Chen Ziming^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Hebei Provincial Laboratory of Science Ministry of Education, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A cross structured light calibration method based on planar targets is proposed to achieve high-precision calibration of line structured light. According to the Blinn-Phong lighting model, it can be inferred that when the laser stripe is projected on the edge of the feature point on a planar target, the cross-section no longer follows a Gaussian distribution, the commonly used center extraction algorithm cannot accurately extract the target. Firstly, morphological operation is used to remove center points at the edges of feature points on flat targets, reducing the error of line fitting from 0.060 8 pixels to 0.035 8 pixels, effectively reducing the impact of algorithm extraction errors on calibration results. Secondly, based on Gaussian curve fitting method, correcting the intersection position of the extracted line structured light and auxiliary structured light, based on the Ransac algorithm for line fitting, the results also effectively eliminate points with significant errors caused by uneven lighting and material changes. Experimental results show that the combination of the two methods improves calibration accuracy by 25%, the difference between the three-dimensional coordinates of the center point and the plane equation of the calibration plate is only 4 μm , effectively improve the accuracy of line structure cursor positioning.

Keywords: machine vision; Steger algorithm; linear structured light calibration; visual measurement

0 引 言

高精度快速的 3D 测量方式在工业检测、物体三维重建以及逆向工程中越来越重要^[1-2]。结构光技术因具有非接触式测量、效率高、灵活性强、精度高等优点被广泛

应用^[3-5]。其中测量系统包括相机和结构光发射器,相机和结构光发射器一般刚性连接在一起,二者相对位置固定。结构光发射器将激光条纹投射在待测件上,由相机采集图像,通过图像处理得到激光条纹中心的像素坐标位置,最后通过激光三角测量法^[6]求得激光条纹中心点的三维坐标。在使用激光三角测量法前需要得到相机和

收稿日期:2023-06-21 Received Date: 2023-06-21

* 基金项目:河北省科技计划项目(19221909D)、河北省自然科学基金(E2020203197)项目资助

结构光发射器之间准确的相对位置或线结构光发射器在相机坐标系下的光平面方程。所以系统标定是决定最终测量精度的关键因素之一,开发准确、灵活的标定方法是近年来的主要研究课题之一。

对于结构光测量系统的标定,主要是标定相机的内参和相机与结构光发射器之间的相对位姿^[7]。为了更加简单方便高精度获取相机内部参数,Zhang^[8]、Huo等^[9]研究了通过相机拍摄标准靶标板,提取图像中的特征点计算相机内参的方法,相对于传统标定方法,该方法操作简单,无需复杂的仪器;在获得相机的内部参数后,即可开始标定结构光发射器相对相机的位姿参数,使得相机标定过程变得更方便。

在线结构光测量系统中,线结构光由线激光器投射到待测件的表面上,由相机采集带激光条纹的图像,通过对图像中的光信号进行分析,可以得到待测件表面上的三维信息。其中如何高精度标定相机与线激光器的光平面,直接影响到后续的三维信息的精度,现在常用的线结构光标定方式可以分为叉乘法^[10-11]、解线性方程组方式^[12-13]、交比不变性^[14-15]等。叉乘法需要得到至少两组以上的光条纹的方向向量,通过向量叉乘计算出光平面的法向量;解线性方程组的方式是通过得到激光条纹中心点的三维坐标和像素坐标,计算两者之间的变换矩阵;交比不变性方案使用交比不变性原理,得到激光平面上的点。上述方法均需将线结构光投射到高精度的标准件上,使用相机采集图像并提取图像中激光条纹的中心点的像素坐标,根据相机的成像模型^[16],计算空间信息,通过拍摄多幅这样的图像并重复上述过程,最终拟合出光平面。所以正确且高精度提取激光条纹中心和拟合光平面的方法,对最终光平面的拟合精度有直接影响。

陈晓辉等^[17]通过将棋盘格内角点坐标作为线结构光平面标定的约束,直接将结构光平面和相机的映射关系进行了标定,避免因为中心 L_s 点提取误差造成的影响;王荣军等^[18]提出了一种基于单边跟踪与中点预测的方法,通过条纹走向寻找与预测条纹中心,提高了中心点提取精度与鲁棒性;Tan等^[19]提出了一种基于卷积自编码器的中心提取方式,有效的提高了条纹在高反射表面的提取精度,从而提高系统的标定和测量精度。

本文提出了一种基于平面靶标的交叉结构光标定的方法,交叉结构光可以看做由两个光平面不平行的线结构光组成。该方案相对于单线结构光,加入了一个与原有单一线结构光发射器的光平面不平行的线结构光发射器,使得两个光平面相交,并将两个光平面的交线也加入到拟合条件中,相对于单独对一个光平面进行拟合的方案,该方案标定结果中每个光平面拟合精度都得到提高,而且只需使用平面标定板进行操作,操作便捷快速。

1 激光条纹中心点筛选

在线结构光标定过程中,激光条纹的中心提取精度将会直接影响到后续的标定精度。现在常用的半导体激光发射器所投射出的光强呈高斯分布^[20-21]。由于线结构光截面的光强在投射面上呈现高斯分布,经过相机成像以后,所获得的灰度图像也呈现高斯分布。所以基于Steger算法^[22-23]的中心线提取具有较高的鲁棒性和提取精度。

根据Blinn-Phong光照模型,如图1所示,进入到相机的光主要有高光(全反射光),漫反射光 L_d 和环境光 L_a 。一般标定板带有特征点的面做过处理,使得投射在上面的光线呈现漫反射。反射的总光线强度为:

$$L = L_a + L_d + L_s \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_a = K_a I_a \\ L_d = K_d \frac{I}{r^2} \max(0, \hat{n} \cdot \hat{l}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_a 为物体表面对环境光线的吸收率; I_a 为结构光强; K_d 为物体表面对漫反射光的吸收率; I 为光源的光强; r 为光源到反射面的距离; \hat{n} 为物体表面的法向量; \hat{l} 为光源的入射方向向量。

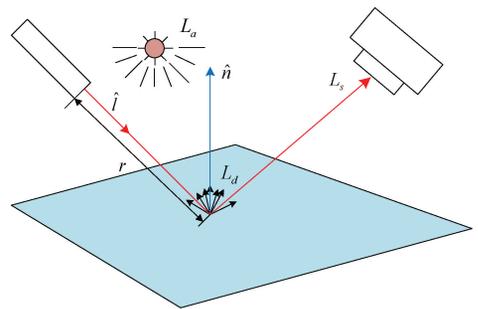


图1 光线反射

Fig. 1 Light reflection

可以看出,在不考虑环境光的情况下,结构光反射回相机的主要是漫反射光,其中因为结构光发射器所发射的线结构光极细,所以在线结构光的截面上到光源距离近似相等,理想情况下,结构光所投射的表面反射率均相等,经过相机成像得到理想一维结构光灰度分布(图2)呈现高斯分布,其中带圆折线为像素点处的灰度值,光滑曲线由离散的灰度点拟合得到,竖直粗线为中心线的位置,虚线为对应像素位置的表面反射率。使用Steger算法进行计算,可以准确得到条纹的中心。

使用标定板进行系统标定的时候,为了提高相机提取标定板上特征点的精度,标定板上的特征点与底色有很大的色差,不同颜色反射率也不同,这时光条纹如果投

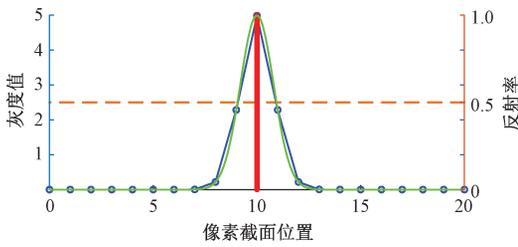


图 2 均匀反射率表面上激光条纹截面灰度值
Fig. 2 Gray value of laser fringe cross section on uniform reflectance surface

射颜色变化的交界处时,所成像的激光条纹将不再符合高斯分布(图 3)。图 3 为激光条纹截面刚好存在反射率不均的情况,虚线表示反射率在像素截面位置上的变化情况。可以看出,当激光条纹照射处反射率不均匀时,通过 Steger 算法提取出的中心线位置也会出现偏差,该偏差会直接影响到后续的系统参数的标定过程。而本文所使用的平面靶标为 HALCON 的相机标定靶标,靶标上存在的圆形图案作为需要识别的特征(黑色)与底色(白色)进行颜色划分,所以在特征点与底色交接处会存在反射率不均匀的情况。

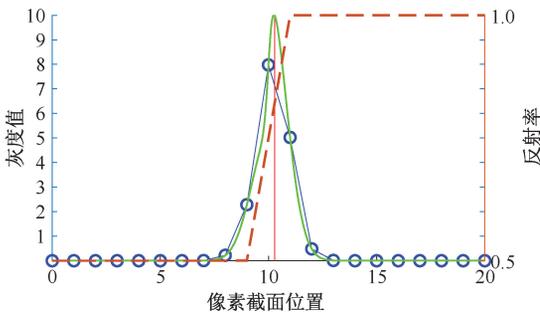


图 3 非均匀反射率表面激光条纹截面灰度值
Fig. 3 Gray value of laser fringe cross section on non-uniform reflectance surface

针对该问题,本文提出了使用图像轮廓提取和膨胀处理方法,剔除靠近平面靶标特征点边缘处(特征点与底色交接处)的激光条纹中心点,对提取到的中心点进行一次选取。

1) 对标定板原图(图 4(a))进行轮廓提取,得到标定板的轮廓图(图 4(b)),之后对轮廓图进行膨胀处理^[24](图 4(c)),膨胀处理的卷积核宽度大于进行 Steger 算法提取中心时卷积核的宽度。

2) 将带激光条纹的图像(图 5(a))和不带条纹的图像相减(图 4(a)),去除环境光的影响(图 5(b)),使用 Steger 算法提取激光条纹中心点(图 5(c)),其中 Steger 算法中的卷积核的宽度小于步骤 1)中膨胀处理时卷积核的宽度。

3) 对步骤 2) 提取到的激光条纹中心点进行判断,剔除出在膨胀后的轮廓上的中心点,保留剩余的中心点(图 6)。

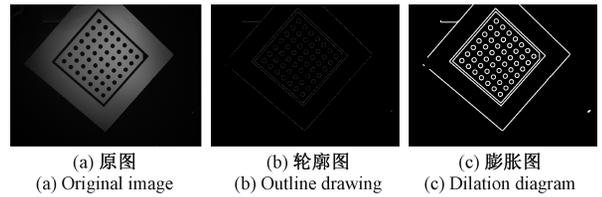


图 4 标定板图

Fig. 4 Calibration board image

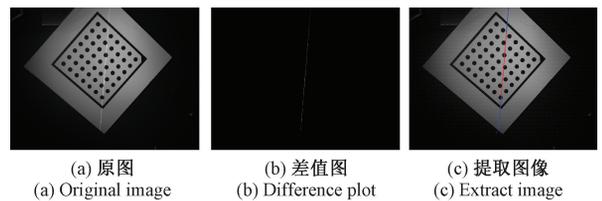


图 5 线结构光图片

Fig. 5 Line structured light picture

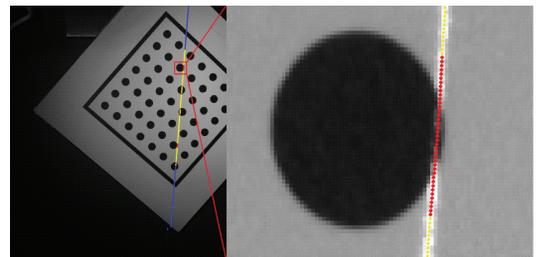


图 6 平面靶标上特征点边缘对结构光中心点提取的影响
Fig. 6 Influence of feature point edge on structured light center point extraction

由图 6 可以看出,投射在特征靶标边界的激光条纹上提取到的中心点,明显偏离了条纹中心。

对所有棱形点和圆点进行拟合求取直线后,得到拟合直线的平均偏差为 0.060 8 pixel;单独对圆点进行拟合求取直线后,得到直线的平均偏差为 0.035 8 pixel。通过上述的选取后,直线拟合误差明显减小。

通过将边缘数据剔除,可以有效的减少因为边缘轮廓反射率不均造成的提取偏差较大的点,但对于图像中因为光照不均以及标定板表面缺陷造成的误差无法有效剔除。

本文针对该问题,设计了一种基于交叉结构光进行标定的方式,该方法优点在于可以通过定位交叉点位置,对交叉点进行精细化提取以提高精度;还可以可视地调整交叉点投影位置,使得交叉点落点避开瑕疵处。

2 交叉结构光标定

交叉结构光可以看成两个不平行的一字结构光组成,如图7所示。由两个线结构光投射在平面标定板上的激光条纹,在相机中成像后通过 Steger 算法,分别得到每个线结构光发射器所投射的激光条纹的中心坐标,如图8所示。

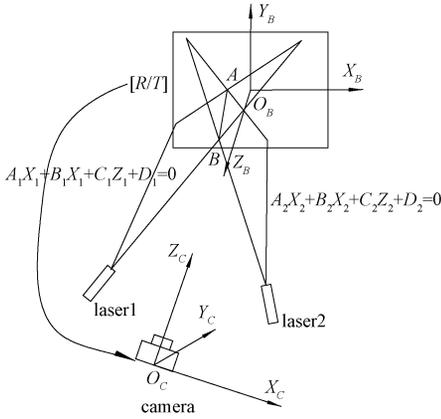


图7 交叉结构光系统结构

Fig. 7 Cross structured light System Structure

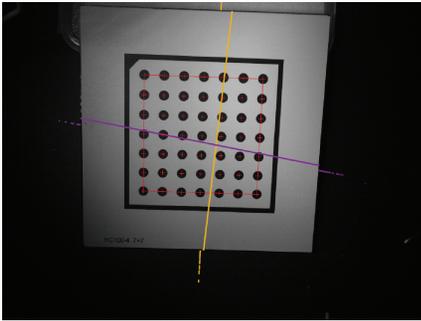


图8 交叉结构光图片

Fig. 8 Cross structured light Picture

$$\begin{cases} \mathbf{pos}_{(p,1,i)} = [u_i & v_i & 1]^T & i = 1, 2, \dots, N_s \\ \mathbf{pos}_{(p,2,j)} = [u_j & v_j & 1]^T & j = 1, 2, \dots, M_s \end{cases} \quad (3)$$

式中： p 表示标定板的序号($p=1, 2, \dots, P$)，同一序号下，结构光所投射激光条纹的标定板具有相同的位置姿态；竖向点为 $\mathbf{points}_{p,1}$ ，表示提取到的结构光发射器1投射于第 p 个位置姿态的标定板图像上的条纹中心点序列； N_s 为该序列的长度；横线点为 $\mathbf{points}_{p,2}$ ，表示提取到的结构光发射器2投射于第 p 个位置姿态的标定板图像上的条纹中心点序列； M_s 为该序列长度。

保留方框中的中心点：

$$\begin{cases} \mathbf{po}_{(p,1,i)} = [u_i & v_i & 1]^T & i = 1, 2, \dots, N \\ \mathbf{po}_{(p,2,j)} = [u_j & v_j & 1]^T & j = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (4)$$

对于 $\mathbf{points}_{p,1}$ 中 $v_i < v_{i+1}$ ；对于 $\mathbf{points}_{p,2}$ 中 $u_i < u_{i+1}$ 。

在 $\mathbf{points}_{p,1}$ 按照 $v_i < v_{i+1}$ 的规则进行排序，在 $\mathbf{points}_{p,2}$ 按照 $u_i < u_{i+1}$ 的规则进行排序。

2.1 基于高斯分布拟合求交点

如图9所示，若线段 $\mathbf{point}_{p,1,i}$ 、 $\mathbf{point}_{p,1,i+1}$ 与线段 $\mathbf{point}_{p,2,j}$ 、 $\mathbf{point}_{p,2,j+1}$ 相交，则有：

$$\begin{cases} (\overrightarrow{\mathbf{po}_{p,1,i}\mathbf{po}_{p,2,j}} \times \overrightarrow{\mathbf{po}_{p,1,i}\mathbf{po}_{p,1,i+1}}) \cdot \\ (\overrightarrow{\mathbf{po}_{p,1,i}\mathbf{po}_{p,1,i+1}} \times \overrightarrow{\mathbf{po}_{p,1,i}\mathbf{po}_{p,2,j+1}}) \geq 0 \\ (\overrightarrow{\mathbf{po}_{p,2,j}\mathbf{po}_{p,1,i}} \times \overrightarrow{\mathbf{po}_{p,2,j}\mathbf{po}_{p,2,j+1}}) \cdot \\ (\overrightarrow{\mathbf{po}_{p,2,j}\mathbf{po}_{p,2,j+1}} \times \overrightarrow{\mathbf{po}_{p,2,j}\mathbf{po}_{p,1,i+1}}) \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

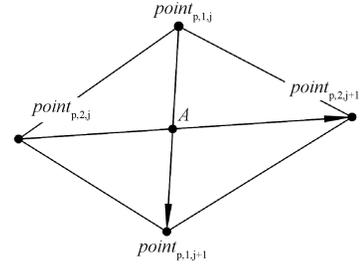


图9 交点A的求取

Fig. 9 Determination of intersection A

通过对两个点序列同步循环查找 i 和 j 确定数值，之后初步计算交点A的位置：

$$\begin{bmatrix} u_{A0} \\ v_{A0} \\ 1 \end{bmatrix} = \left\lceil \frac{\mathbf{po}_{p,1,i} + \mathbf{po}_{p,1,i+1} + \mathbf{po}_{p,2,j} + \mathbf{po}_{p,2,j+1}}{4} - \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0 \end{bmatrix} \right\rceil \quad (6)$$

得到交点A的初步位置后，如图10所示，通过拟合中心点附近直线获得两条结构光各自的直线方程：

$$\begin{cases} y_1 = k_1 x_1 + b_1 \\ y_2 = k_2 x_2 + b_2 \end{cases} \quad (7)$$

求取两组直线方程的交点 (u_{A0}, v_{A0}) ，分别以 (u_{A0}, v_{A0}) 为中心、另外一条线切线方向，由式(8)计算出的像素位置截取单根结构光图像在该位置上的数据，对每个点进行二次线性插值得到各亚像素点灰度值 $G(\rho)$ ，其中激光条纹分布符合高斯分布^[20-21](图10)，所以对该截面数据进行高斯曲线拟合(式(9))，即可获取中心点在两个方向上的偏移量，得到修正后交点(式(10))。

$$\begin{cases} \theta_l = \arctan k_r \\ x_{c_{l,j}} = \rho_{l,j} \cos \theta_l + u_{A0} \\ y_{c_{l,j}} = \rho_{l,j} \sin \theta_l + v_{A0} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I = 1, 2 \text{ if } I = 1, I' = 2 \text{ or } I' = 1 \\ \rho = \{0, \pm 1, \dots, \pm w \text{ and } w \in \mathbb{Z}\} \\ J = \{1, 2, \dots, \text{length}(\rho)\} \end{cases} \quad (8)$$

$$\ln(G(\rho_{I,J})) = \left[\ln A - \frac{u_I^2}{2\sigma^2} \right] + \frac{\rho_{I,J} u_I}{2\sigma^2} - \frac{\rho_{I,J}^2}{2\sigma^2}$$

$$\begin{cases} u_A = (u_1 \cos \theta_1 + u_2 \cos \theta_2) / 2 + u_{A0} \\ v_A = (u_1 \sin \theta_1 + u_2 \sin \theta_2) / 2 + v_{A0} \end{cases} \quad (9)$$

$$po_{(p,A)} = [u_A, v_A, 1]^T \quad (10)$$

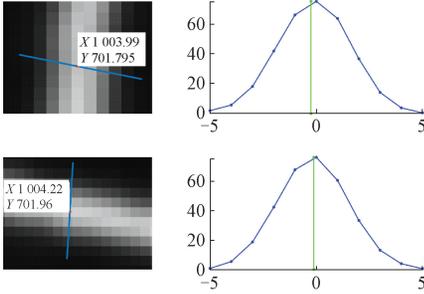


图 10 高斯拟合中心进行修正

Fig. 10 Gaussian fitting center correction

如图 11 所示,在图 8 的交点处提取到的 10×10 的区域,圆点是使用 Steger 算法提取到的激光条纹中心点,棱形点是通过上述方法计算出的交点。

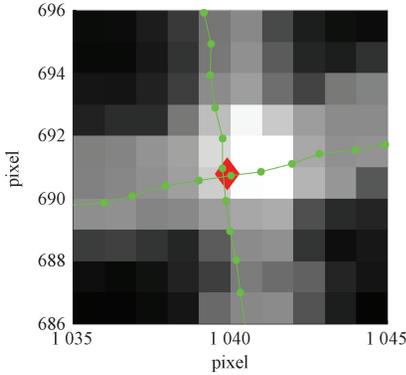


图 11 在交点 A 的初步位置提取 10×10 区域

Fig. 11 Extract the area of 10×10 at the initial position of intersection A

2.2 光平面拟合

Ransac 算法^[25]在数据拟合中被广泛应用,本文采用 Ransac 算法对每张图像中的直线进行拟合,其中从点序列中随机提取两个点和交点 A:

$$po_{r1} = [po_{p,1,i1} \quad po_{p,1,i2} \quad po_{p,A}] \quad (11)$$

$$po_{r2} = [po_{p,2,j1} \quad po_{p,2,j2} \quad po_{p,A}] \quad (12)$$

拟合过程结束后,保存最好结果时抽取的两个点:

$$\begin{cases} pr_{p,1} = [u_i \quad v_i \quad 1]^T, \quad i = 1, 2 \\ pr_{p,2} = [u_j \quad v_j \quad 1]^T, \quad j = 1, 2 \end{cases} \quad (13)$$

如图 12 所示,使用 Steger 算法提取全局激光条纹中心点,圆点是使用 Ransac 算法拟合后的内点,棱形点为剔除掉的外点,由图 12 可以看出,通过加入交点 A 的拟合过程后也可剔除部分在平面靶标上特征点边缘处激光条纹中心点。

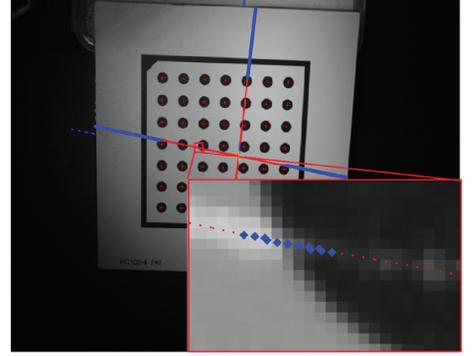


图 12 使用交点 A 进行直线拟合

Fig. 12 Using Intersection A for Line Fitting

图 7 中, AB 为两个光平面的交线,现在常用的标定方式是将该交叉结构光分成两个线结构光分别标定两个结构光发射器所产生的激光的光平面方程:

$$\begin{cases} A_1 X_1 + B_1 Y_1 + C_1 Z_1 + D_1 = 0 \\ A_2 X_2 + B_2 Y_2 + C_2 Z_2 + D_2 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

本文将两个光平面的交线 AB 也作为约束条件,相机的结构参数为:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

交点 A 在相机成像平面上的坐标为:

$$ca_{(p,A)} = K^{(-1)} \cdot po_{(p,A)} = [x_c, y_c, 1]^T \quad (16)$$

在相机坐标系下的坐标为:

$$Ca_{(p,A)} = Z_c \cdot [x_c, y_c, 1]^T = [x_c, y_c, 1]^T \quad (17)$$

在标定板坐标系下的坐标为:

$$board_{(p,A)} = [X_A, Y_A, 0, 1]^T \quad (18)$$

第 p 张标定板图像的位置姿态为:

$$T_p = [R | t] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \quad (19)$$

交点 A 在标定板坐标系下的坐标转换到相机坐标系下的坐标:

$$Ca_{p,A} = T_p board_{p,A} = \begin{bmatrix} r_{11} X_A + r_{12} Y_A + t_x \\ r_{21} X_A + r_{22} Y_A + t_y \\ r_{31} X_A + r_{32} Y_A + t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c x_c \\ Z_c y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (20)$$

经过化简可得:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{31}x_c - r_{11} & r_{32}x_c - r_{12} \\ r_{31}x_c - r_{21} & r_{32}x_c - r_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} t_x - t_2x_c \\ t_y - t_2y_c \end{bmatrix} \quad (21)$$

结合式(20)可以得到交点 A 在相机坐标系下的位置。同理可以得到直线拟合时所抽取的点 $pr_{p,1}$ 和 $pr_{p,2}$ 在相机坐标系下的三维坐标:

$$\begin{cases} \mathbf{Ca}_{(1,i)} = [X_{ci} & Y_{ci} & Z_{ci}]^T & i = 1, 2, \dots, Q \\ \mathbf{Ca}_{(2,j)} = [X_{cj} & Y_{cj} & Z_{cj}]^T & j = 1, 2, \dots, Q \end{cases} \quad (22)$$

之后对空间点进行拟合得到空间平面,对于激光器1的光平面,使用 Ransac 算法首先从直线拟合时随机抽取到的点随机抽取两个点,再从交点 A 中随机抽取两个点:

$$\mathbf{Pc} = [\mathbf{Ca}_{1,i1} \quad \mathbf{Ca}_{1,i2}], \quad i1, i2 = 1, 2, \dots, Q; \quad i1 \neq i2 \quad (23)$$

$$\mathbf{Pa} = [\mathbf{Ca}_{p1,A} \quad \mathbf{Ca}_{p2,A}], \quad p1, p2 = 1, 2, \dots, P; \quad p1 \neq p2 \quad (24)$$

$$\mathbf{Pca} = [\mathbf{Pc} \quad \mathbf{Pa}] \quad (25)$$

使用最小二乘法进行计算,不断循环保留最好的结果;激光器2的光平面求法同理,最终得到两个激光器的光平面参数。

为了验证本文方案的精度,进行标定实验,如图13所示,实验使用的是 FILR 的 BFS31 系列的相机,分辨率为 2048×1560 ,结构光发射系统由两组一字结构光组成,两组一字结构光发射器发射的激光条纹相互交叉,标定板使用的是 HALCON 标定板^[26]。



图13 实验系统

Fig. 13 Experimental System

1) 在不开启结构光发射器的情况下,拍摄多组不同姿态的标定板,使用 HALCON 软件完成对相机的内参标定,获得相机的内参矩阵:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 2441.395 & 0 & 1029.410 \\ 0 & 2456.942 & 769.849 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

2) 开启结构光发射器,采集不同位置姿态的标定板,代入上一步得到的相机内参,计算该步标定板相对相机的变换矩阵。

3) 对步骤2)采集到的图像进行中心线提取,如图14所示。

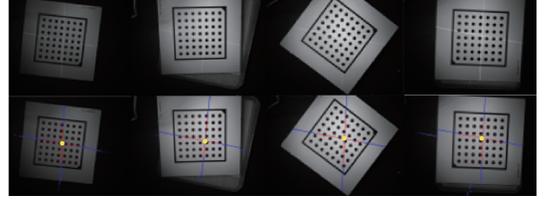


图14 进行结构光标定

Fig. 14 Calibration of structured light

4) 将提取的条纹中心点和交点使用 Ransac 算法进行直线拟合,将最好的结果所抽取的点集保存下来

5) 使用式(20)和(21)计算上述点集的三维坐标,从 $\mathbf{Camera}_{p,A}$ 和 $\mathbf{Camera}_{1,i}$ 各随机抽取2个点对激光器1的光平面进行拟合;从 $\mathbf{Camera}_{p,A}$ 和 $\mathbf{Camera}_{1,j}$ 各随机抽取两个点对激光器2的光平面进行拟合。

最终得到两个光平面在相机坐标系下的光平面方程(图15):

$$\begin{cases} -0.9082X_1 - 0.02697Y_1 - 0.4176Z_1 + 88.4205 = 0 \\ -0.1744X_2 - 0.9632Y_2 - 0.2047Z_2 + 49.7972 = 0 \end{cases} \quad (27)$$

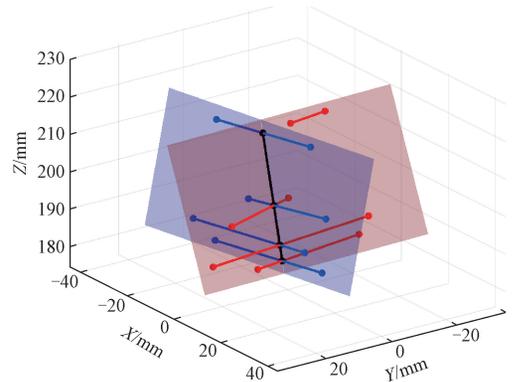


图15 标定结果

Fig. 15 Calibration Results

3 精度评估

3.1 三维测量

系统结果标定后,可以得到两个激光器的光平面方程:

$$\begin{cases} A_1X_1 + B_1Y_1 + C_1Z_1 + D_1 = 0 \\ A_2X_2 + B_2Y_2 + C_2Z_2 + D_2 = 0 \end{cases} \quad (28)$$

当激光条纹投射在某个表面上后,并反射回相机进行呈像,通过 Steger 算法进行提取得到条纹中心点:

$$po_1 = [u_i \quad v_i \quad 1]^T \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (29)$$

$$po_2 = [u_j \quad v_j \quad 1]^T \quad j = 1, 2, \dots, M$$

在相机坐标系中坐标为:

$$\begin{cases} ca_1 = K^{(-1)} po_1 = \left[\frac{(u_i - u_0)}{f_x} Z_{c1i}, \frac{(v_i - v_0)}{f_y} Z_{c1i}, Z_{c1i} \right]^T \\ ca_2 = K^{(-1)} po_2 = \left[\frac{(u_j - u_0)}{f_x} Z_{c2j}, \frac{(v_j - v_0)}{f_y} Z_{c2j}, Z_{c2j} \right]^T \end{cases} \quad (30)$$

将上式代入各自的光平面的方程,可得:

$$\begin{cases} A_1 \frac{(u_i - u_0)}{f_x} Z_{c1i} + B_1 \frac{(v_i - v_0)}{f_y} Z_{c1i} + C_1 Z_{c1i} + D_1 = 0 \\ A_2 \frac{(u_j - u_0)}{f_x} Z_{c2j} + B_2 \frac{(v_j - v_0)}{f_y} Z_{c2j} + C_2 Z_{c2j} + D_2 = 0 \end{cases} \quad (31)$$

结合式(30)可以得到条纹中心点在相机坐标系下的三维坐标。

3.2 精度验证

使用本文的系统拍摄多张不同姿态的 7×7,特征点间距离为 8 mm 且制造精度为 0.01 mm 的标定板,对图像中的激光条纹中心点和特征点进行提取(图 8)。其中标定板特征点的像素坐标为:

$$po_p = [u_i \quad v_i \quad 1]^T \quad i = 1, 2, \dots, 49 \quad (32)$$

通过式(30)、(32)对提取到的条纹中心点进行求解,得到这些点在相机坐标系下的三维坐标并进行平面拟合,获得标定板在相机坐标系中的平面方程:

$$A_p X_p + B_p Y_p + C_p Z_p + P = 0 \quad (33)$$

结合式(30)、(32)可以求得标定板特征点在相机坐标系下的三维坐标(图 16):

$$Ca_p = [X_{ci} \quad Y_{ci} \quad Z_{ci}]^T, \quad i = 1, 2, \dots, 49 \quad (34)$$

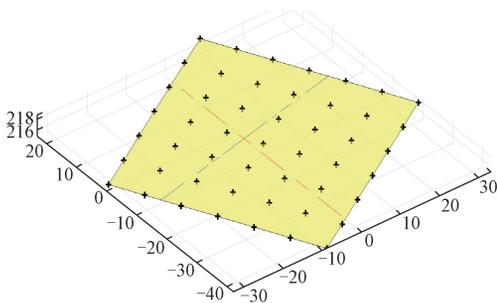


图 16 标定板特征在相机坐标系下的三维坐标

Fig. 16 3D Coordinates of Calibration Board Features in Camera Coordinate System

求取每个特征点和相邻特征点间的距离,如图 17 所示,其中交叉点为标志点的位置,标志点间的柱状条为两

个特征点间的距离值,采集多幅不同位置姿态的标定板图像,实验方法如表 1 所示。

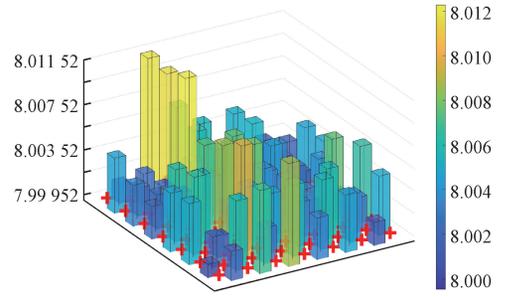


图 17 相邻特征点间的距离

Fig. 17 Distance between adjacent feature point

表 1 实验方法

Table 1 Experimental methods

方法	基于形态学操作的中心点选取	基于交点 A 的直线拟合
方法 1	✓	✓
方法 2	✓	×
方法 3	×	✓
方法 4	×	×

计算不同方法标定后,进行上述评估方案的结果,如表 2 和图 18 所示,对每张标定图所有点的 RMS 误差进行统计,其中方法 2 和方法 3 均是有效的剔除出了因为激光条纹投射到平面靶标上特征点边缘处,造成中心点提取时误差较大的点,使得最终的标定结果优于不使用进行剔除的方法 4,而方法 1 相对于方法 2 和方法 3 在精度上只有略微提升,但相对方法 4 有极大提升,本文对交叉结构光标定的方案具有较高的精度和稳定性。

表 2 误差比较

Table 2 Error comparison

序号	方法 1/μm	方法 2/μm	方法 3/μm	方法 4/μm
1	4.138	4.168	4.219	4.258
2	3.672	3.753	3.659	4.068
3	4.023	4.254	4.065	4.358
4	4.246	4.485	4.516	5.796
5	4.531	4.775	4.691	6.561
6	4.119	4.412	4.272	6.067
7	3.945	4.254	4.028	4.552
8	3.258	4.006	5.483	5.654
9	5.229	6.030	5.730	7.831
平均值	4.129	4.460	4.518	5.460
相对误差/%	75.615	81.671	82.741	100

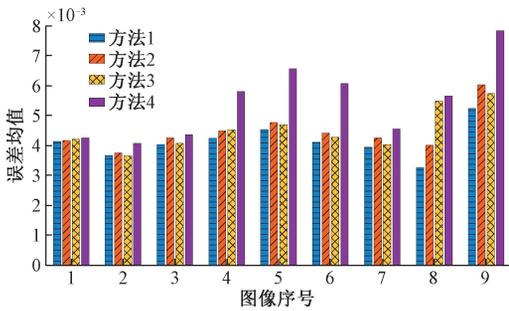


图 18 误差比较

Fig. 18 Error Comparison

4 结 论

本文提出了一种基于平面靶标的交叉结构光标定方法。该系统由一个相机和两个光平面互不平行的线结构光发射器组成。首先,将线结构光投射到平面靶标上,使用相机采集图像,并使用 Steger 算法提取激光条纹中心点,之后剔除掉平面靶标上特征点边缘处的中心点;然后,使用交叉点附近区域内激光条纹中心点拟合直线组,求解拟合直线组的交点,基于激光条纹截面高斯分布的特性对中心位置进行修正,该交点结合筛选后的中心点分别拟合两个直线方程并保存最好结果;最后,使用 Ransac 算法所得到最好结果时使用的中心点,结合相机的外参和内参得到其三维坐标,使用这些三维点进行平面拟合,得到两个线结构光平面在相机坐标系下的平面方程。

通过比较可知,使用本文方法进行标定后的结果精度相对直接使用全局中心点并且不使用交点的方法,误差减少了 25%。但因本文方法在进行中心点筛选和光平面拟合过程中均需使用到修正后的交叉点,所以需要交叉处投影到平面靶标反射均匀处。降低因为表面瑕疵,而造成的提取错误,对后续拟合过程的影响。

该方法可以普遍适用于所有基于平面靶标的线结构光标定,能有效提高标定的稳定性和精度。

参考文献

- [1] SUN J, ZHANG Z, ZHANG J. Reconstructing normal section profiles of 3-D revolving structures via pose-unconstrained multiline structured-light vision[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-12.
- [2] YANG G, WANG Y. Three-dimensional measurement of precise shaft parts based on line structured light and deep learning[J]. Measurement, 2022, 191: 110837.
- [3] 刘涛, 关添航, 杜宏旺, 等. 基于线结构光的水下旋转扫描高精度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 44-53.

LIU T, GUAN T H, DU H W, et al. Research on the high precision measurement method of underwater rotary scanning based on linear structured light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 44-53.

- [4] 黄喆, 程二静, 齐鹏, 等. 基于线结构光的盾尾间隙测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 93-101.
- HUANG ZH, CHENG E J, QI P, et al. Research on measurement method of shield tail clearance based on line structured light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 93-101.
- [5] 石照耀, 王涛. 齿轮三维测量中线结构光测头位姿的优化方法[J]. 仪器仪表学报, 2022 43(7): 44-53.
- SHI ZH Y, WANG T. Optimization method of probe position and posture of linear structured light in three-dimensional gears measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022 43(7): 44-53.
- [6] 王成武, 陆惠宗, 吴俊杰, 等. 激光三角法位移测量多项式拟合及误差修正[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 1-8.
- WANG CH W, LU H Z, WU J J, et al. Study of polynomial fitting and error correction method for laser triangulation displacement measurement overview of laser triangulation method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 44(5): 1-8.
- [7] XU X, FEI Z, YANG J, et al. Line structured light calibration method and centerline extraction: A review[J]. Results in Physics, 2020, 19: 103637.
- [8] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [9] HUO J, MENG Z, ZHANG H, et al. Feature points extraction of defocused images using deep learning for camera calibration [J]. Measurement, 2022, 188: 110563.
- [10] ZHENG F, KONG B. Calibration of linear structured light system by planar checkerboard [C]. International Conference on Information Acquisition. IEEE, 2004: 344-346.
- [11] FAN J, JING F, FANG Z, et al. A simple calibration method of structured light plane parameters for welding robots[C]. 35th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2016: 6127-6132.
- [12] MCIVOR A M. Calibration of a laser stripe profiler[C]. Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. IEEE, 1999: 92-98.
- [13] 于龙龙, 李艳文, 栾英宝, 等. 基于二维平面靶标的线结构光标定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6):

- 124-131.
- YU L L, LI Y W, LUAN Y B, et al. Linear Structured light calibration based on two-dimensional planar target[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 124-131.
- [14] XIE Z, WANG X, CHI S. Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of structured-light sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 58: 9-18.
- [15] 杨凯, 余厚云, 杨超. 基于自由靶标的线结构光视觉测量系统标定研究[J]. 机电工程, 2016, 33(9): 1066-1070.
- YANG K, YU H Y, YANG CH. Research on calibration of linear structured light vision measurement system based on free target [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(9): 1066-1070.
- [16] YANG L, ZHOU F, ZHANG W, et al. A novel camera calibration method based on circle projection model[J]. Measurement, 2023, 222: 113651.
- [17] 陈晓辉, 张智豪, 杨鑫, 等. 基于线结构光单平面标定的3D成像方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 179-187.
- CHEN X H, ZHANG Z H, YANG X, et al. A high accuracy and robustness 3D imaging method for line structured light single plane calibration [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 179-187.
- [18] 王荣军, 黄明明, 马立东. 基于单边跟踪与中点预测的线结构光中心提取算法研究[J/OL]. 中国激光, 1-17 [2024-04-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20231120.0922.006.html>.
- WANG R J, HUANG M M, MA L D, et al. Research on center extraction algorithm of line structured light based on unilateral tracking and midpoint predict [J/OL]. Chinese Journal of Lasers, 1-17 [2024-04-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20231120.0922.006.html>.
- [19] TAN Z Y, ZHAO B L, WANG G W, et al. Metal surface 3D imaging based on convolutional autoencoder and light plane calibration [J]. Optik, 2022, 259: 169007.
- [20] MUNOZ-RODRIGUEZ J A, RODRIGUEZ-VERA R, GUIRADO M S. Direct object shape detection based on skeleton extraction of a light line [J]. Optical Engineering, 2000, 39(9): 2463-2471.
- [21] MUÑOZ RODRÍGUEZ J A. Calibration modeling for mobile vision based laser imaging and approximation networks[J]. Journal of Modern Optics, 2010, 57(17): 1583-1597.
- [22] STEGER C. Unbiased extraction of lines with parabolic and Gaussian profiles[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2013, 117(2): 97-112.
- [23] CHANG H, LI D, ZHANG X, et al. Real-time height measurement with a line-structured-light based imaging system[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, DOI:10.1016/j.sna.2024.115164.
- [24] DJUROVIC I, SIMEUNOVIC M. Review of the quasi-maximum likelihood estimator for polynomial phase signals[J]. Digital Signal Processing, 2018, 72: 59-74.
- [25] SZELISKI R. Computer Vision: Algorithms and Applications[M]. Newyork: Springer Nature, 2022.
- [26] 闫霞, 牛建强. 基于HALCON软件的摄像机标定[J]. 数字技术与应用, 2010(11): 112-113.
- YAN X, NIU J Q. Camera calibration based on HALCON software [J]. Digital Technology and Application, 2010(11): 112-113.

作者简介



刘建鑫, 2020年于燕山大学获得学士学位, 现为燕山大学博士研究生, 主要研究方向为视觉测量, 图像处理。

E-mail: 1279818103@qq.com

Liu Jianxin received his B. Sc. degree from Yanshan University in 2004. Now he is a Ph. D. candidate at Yanshan University. His main research interests include Visual measurement and image processing.



陈子明 (通信作者), 2006年于燕山大学获得学士学位, 2013年于燕山大学获得博士学位, 现为燕山大学机械工程学院教授, 主要研究方向为, 空间少自由度并联机构的设计及分析。

E-mail: chenzm@ysu.edu.cn

Chen Ziming (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Yanshan University in 2006, and Ph. D. degree from Yanshan University in 2013. Now he is a professor at Yanshan University. His main research interests include design and analysis of parallel mechanism with few degrees of freedom in space.