激光技术
LASER TECHNOLOGY

一种线结构光平面的标定方法

李忠祥, 周哲海, 陈丽, 赵爽, 李勇

A method for calibrating the light plane of the linear structured light

引用本文:
李忠祥,周哲海,陈丽,赵爽,李勇. 一种线结构光平面的标定方法[J]. 激光技术, 2023, 47(6): 795–802.
LI Zhongxiang, ZHOU Zhehai, CHEN Li, et al. A method for calibrating the light plane of the linear structured light[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(6): 795–802.

您可能感兴趣的其他文章

1. 基于霍夫变换的结构光场3维成像方法
引用本文: 张志俊, 吴庆阳, 邓亦锋, 等. 基于霍夫变换的结构光场3维成像方法[J]. 激光技术, 2023, 47(4): 492–499.

2. 大视场红外告警系统中目标高精度方位提取
引用本文: 王云杰, 王艳林, 夏润秋, 等. 大视场红外告警系统中目标高精度方位提取[J]. 激光技术, 2023, 47(2): 200–204.

3. 基于条纹反射法的平面镜面形测量
引用本文: 饶喾, 燕必希, 董明利, 等. 基于条纹反射法的平面镜面形测量[J]. 激光技术, 2020, 44(6): 668–673.

4. 原子发射双谱线测温常数静态标定实验研究
引用本文: 郝晓剑, 郭玉楠, 杨彦伟. 原子发射双谱线测温常数静态标定实验研究[J]. 激光技术, 2020, 44(6): 684–687.

5. 六自由度姿态变换视觉实验平台及应用
引用本文: 王福斌, 刘洋, 程月, 等. 六自由度姿态变换视觉实验平台及应用[J]. 激光技术, 2018, 42(6): 751–757.

文章编号：1001-3806(2023)06-0795-08

一种线结构光平面的标定方法

李忠祥[1]，周哲海[1,2*]，陈　丽[1]，赵　爽[1]，李　勇[1]
(1. 北京信息科技大学 机械工业现代光电测试技术重点实验室，北京 100192；2. 北京信息科技大学 光电测试技术及仪器教育部重点实验室，北京 100192)

摘要：为了线结构光平面标定的准确性和高效性，以及提高线结构光平面标定方法的普适性，提出了一种基于 2 维圆形标靶的线结构光平面标定方法。采用光条提取算法得到照射在 2 维圆形标定靶任意位置处光条中心点的亚像素坐标值，将光条上所有点拟合成直线，交圆形标定靶每列靶标连线于一点；得到每列靶标连线与拟合出的光条中心线交点后，连接交点与相机光学中心形成一条直线；联立该连线的直线方程与像素坐标系下两条交线的直线方程，以及 2 维圆形标定靶所在平面的方程，求解出每个交点在相机坐标系下的坐标；最后采用最小二乘拟合算法进行平面拟合，得到了所求光平面方程；介绍了该标定方法的基本原理和实现过程，搭建实验系统对其有效性进行了验证。结果表明，用该方法求取光平面的平均测量误差可以达到 2.36737 mm，鲁棒性高，且标定流程十分简便，适用于一般的工程应用和机械加工过程。该研究为线结构光传感器的光平面标定提供了参考。

关键词：图像处理；线结构光平面标定；光电视觉检测；机器视觉
中图分类号：TN247　　**文献标志码**：A　　**doi**：10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.06.010

A method for calibrating the light plane of the linear structured light

LI Zhongxiang [1], *ZHOU Zhehai* [1,2], *CHEN Li* [1], *ZHAO Shuang*[1], *LI Yong*[1]
(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instruments, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Key Laboratory of the Mechanical Industry for Modern Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and efficiency of line structure light plane calibration and the universality of the calibration method, a line structure light plane calibration method based on a 2-D circular target was proposed. The subpixel coordinates of the center point of the light strip irradiated at any position of the 2-D circular calibration target were obtained by the light strip extraction algorithm. All the points on the light strip were fitted into a straight line, and the lines connecting each column of the circular calibration target intersected at one point. After obtaining the intersection point of each column of the calibration target line and the fitted light strip center line, a line connecting the intersection point and the camera optical center was formed. By setting up the equation of the line and the equations of two intersecting lines in the pixel coordinate system, and the equation of the plane where the 2-D circular calibration target was located, the coordinates of each intersection point in the camera coordinate system are solved. Finally, the plane fitting algorithm of least squares was used to obtain the equation of the light plane. The basic principle and implementation process of the calibration method was introduced, and the validity of the method was verified by setting up the experimental system. The results show that the average measurement error of the light plane obtained by this method can reach 2.36737 mm, which has high robustness, and the calibration process is very simple and suitable for general engineering applications and machining processes. This study provides a reference for the light plane calibration of line structure light sensors.

Key words: image processing; linear structured light plane calibration; optoelectronic vision inspection; machine vision

引　言

近些年来，线结构光 3 维测量系统因其结构简单、稳定度高、效率高、量程大、非接触等优势，在 3 维模型重建、物体 3 维轮廓检测、逆向工程等领域获得了广泛应用，体现出了相当广阔的应用前景[1-3]。在线结构光 3 维测量系统中，测量的精度主要取决于系统标定的精度，而线结构光的光平面标定是系统标定中的关键

基金项目：国家自然科学基金资助项目(61875237)；北京市属高校高水平教师队伍建设支持计划长城学者培养计划资助项目(CIT&TCD20190323)；北京市优秀人才培养“青年拔尖”项目(Z2019042)

作者简介：李忠祥(1998-)，男，硕士研究生，现主要从事光电与视觉检测方向的研究。
*通讯联系人。E-mail：zhouzhehai@bistu.edu.cn

收稿日期：2022-11-02；收到修改稿日期：2022-12-22

部分[4-5]。

现有的光平面标定法主要分为矢量法[6-7]、几何法[8-9]和数学计算法[10-12] 3 种类型。其中,矢量法是使用向量叉乘的思想来求解光平面的坐标,该方法计算速度较快,实际操作也相对简单,但是精度相对较低。几何法是利用几何思维来求解光平面的方程,随着研究的不断深入,许多新的方法被不断提出,例如,LI 等人[13]使用一组设计好的正交平面,并在两个平面上绘制两组平行线,首尾相连可以得到多个直角三角形,将光条照射在各个平面上,直角三角形的光条长短关系使用交比不变原理可获取交点的坐标值,最后使用非线性优化获得最终结果;PAN 等人[14]提出的一种基于条纹点位置不确定性补偿的交比不变方法,最终标定精度的均方根 (root mean square,RMS)可以达到 0.4 mm;CHEN 等人[15]也提出了一种基于光束整形系统和交比不变方法的光平面标定方法,可以使被测物的轮廓扫描测量精度达到 0.005 mm。数学计算法是这 3 种方法中运算量最大且基本不需要获取光条上特征点信息的一种方法,LIU 等人[10]提出的基于联立多个光条在相机坐标系中的 Plùcker 矩阵求解光平面方程的方法,精度 RMS 达到了 0.009 mm;ZHANG 等人[16]提出了一种基于 Plùcker 矩阵的多传感器全局校准方法,该方法通过优化不同位置的光条中心点,并设置基准视觉传感器来校准其它传感器,误差小于 0.05 mm,但总体上该方法计算量过大且流程复杂。除此之外,学者们还提出了一些新方法,例如使用 3 维靶标的光平面标定方法[17-18],以及为了解决自动扫描问题而提出的一些基于主动视觉[19]或使用振镜[20-22]和旋转机构[23]来标定的方法。但这些方法要么依赖 3 维标定靶的加工精度,要么依赖振镜和旋转机构运动的线性度,因此导致操作复杂,且要获得较高精度时的成本较高。

为了解决上述问题与不足,本文作者提出了一种新的基于几何法的线结构光平面标定方法。该方法使用线结构光光条上所有中心点来拟合光条在像素坐标系下的直线方程,并将该直线与标定靶标之间连成的直线相交,得到交线的像素坐标 $P_0(u,v)$。利用投影几何原理可知,该交点连接相机光心后,必定交沿相机坐标系 Z_c 轴方向一定距离处的投影平面 α 于一点 E''。建立该交点 E''与 $P_0(u,v)$之间的数学关系,联立标定靶所在平面的相机坐标系下数学表达式,即可求解得到每个交点 $P_0(u,v)$的相机坐标系值,多次移动标定靶,获取多组交点的相机坐标值,通过最小二乘拟合即可得到相机坐标系下光平面的方程。结果表明,本文中提出的方法在干扰较大或光条特性不明显的地方(如光条两端或相机视野两边处),仍能获得较高的测量精度。该标定方法在简化了标定流程和计算量的同时,具有较高的稳定性、准确性和精度,适用于一般工业应用场景。

1 标定方法

1.1 相机标定及各坐标系之间的关系

在进行线结构光平面标定之前,需要先将单目相机进行内外参数的标定[24]。这里把相机看成一个小孔成像模型,由此可以得到世界坐标系中的一个点 $A(X_w,Y_w,Z_w)$与相机光心之间的关系,如图 1 所示。

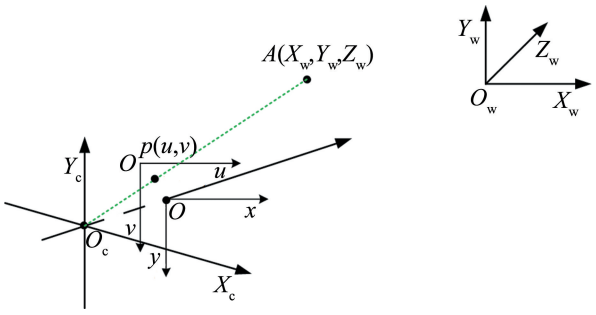

图 1 相机成像模型与各坐标系之间关系

Fig. 1 Relationship between the camera imaging model and each coordinate system

在图 1 中,把世界坐标系描述为 O_w-$X_wY_wZ_w$,相机坐标系描述为 O_c-$X_cY_cZ_c$,图像坐标系描述为 O-xy,像素坐标系描述为 O-uv。所以由刚体变换可以得到世界坐标系中的点 $A(X_w,Y_w,Z_w)$转换到相机坐标系 $A_c(X_c,Y_c,Z_c)$的过程如下:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \boldsymbol{T} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{R}$ 为描述刚体变换的旋转矩阵,$\boldsymbol{T}$ 为平移向量;点 A_c 由相机坐标转换到图像坐标系 O-xy 时可以描述为:

$$Z_c\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中,f 为焦距。在图像坐标系转换到像素坐标系时需要注意的是,像素坐标原点通常表示在图片的左上角,而图像坐标原点却在图片的正中间,所以图像坐标系到像素坐标系之间的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，d_x、d_y 表示单个像素的像元大小，u_0、v_0 表示在像素坐标系下主点位置的偏移量。得到各个坐标系之间的转换关系，可以用 ZHANG[24] 提出的相机标定方法进行相机标定，这样就得到了上面各式之间相互转换所要的相机内、外参数矩阵。

1.2　标定靶在相机坐标系下方程求解

假设有一点 $B(X_{w,1}, Y_{w,1}, Z_{w,1})$ 在世界坐标系下的标定靶平面上，并且将世界坐标系建立在了标定靶平面上，则可以把标定靶标所在的世界坐标系下平面方程描述为：

$$MX_{w,1} + NY_{w,1} + PZ_{w,1} + Q = 0 \tag{4}$$

式中，M、N、P、Q 为常数。由(1)式可以得到该平面在相机坐标系下的表达式为：

$$\begin{bmatrix} M & N & P & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \\ \boldsymbol{0}^{\mathrm{T}} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{c,1} \\ Y_{c,1} \\ Z_{c,1} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \tag{5}$$

因为世界坐标系建立在了标定靶平面上，所以(4)式可以转变为 $Z_{w,1}=0$。由此可以推出在相机坐标系下表示为：

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \\ \boldsymbol{0}^{\mathrm{T}} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{c,1} \\ Y_{c,1} \\ Z_{c,1} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \tag{6}$$

观察(5)式可知，$\boldsymbol{R}$，$\boldsymbol{T}$ 是在相机标定时求出的每个标定靶不同位姿的平移旋转矩阵，这样可以唯一确定在不同位姿下各个标定靶所在平面的相机坐标系下的方程为：

$$M_1X_{c,1} + N_1Y_{c,1} + P_1Z_{c,1} + Q_1 = 0 \tag{7}$$

式中，M_1、N_1、P_1、Q_1 是可求常数。

1.3　交点相机坐标计算与光平面标定

使用光条中心亚像素提取算法[25]计算光条亚像素中心，结果如图 2 所示，这里使用的标定靶是一种圆形标定靶。对提取的所有亚像素中心点使用随机抽样一致(random sample consensus，RANSAC)进行直线拟合，可以得到较为精确的线结构光光线的直线方程 λ_n，将其描述为：

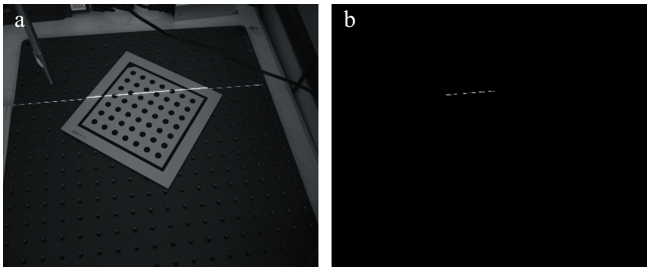

图 2　光条中心提取结果

a—线结构光光条照射在标定靶上　b— 使用光条中心提取算法提取的光条中心结果

Fig. 2　Extraction result of light stripe center

a—line structured light strip exposed to a calibrated target　b—light stripe center results extracted using the light stripe center extraction algorithm

$$a_0u + b_0v + c_0 = 0 \tag{8}$$

式中，a_0，b_0 和 c_0 为直线方程 λ_n 的常数项。因为使用的标定靶是圆形标定靶，所以可以很好地得到每个圆形圆心的像素坐标，进而得到每个圆心连线的直线方程 L_n，如图 3a 所示。

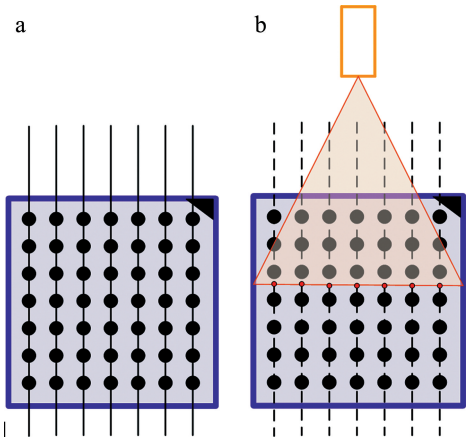

图 3　标定靶圆心连线与光条相交

a—每个圆心连成直线　b—圆心连线与光条中心线交点

Fig. 3　Line linking the centers of the calibrated targets intersects the light stripe

a—each center of the circles is connected to a straight line　b—line linking the centers of the circles intersects the center line of the light stripe

L_n 可以表示为：

$$a_1u + b_1v + c_1 = 0 \tag{9}$$

式中，a_1，b_1 和 c_1 为直线方程 L_n 的常数项。如图 3b 所示，进一步将光条与圆心连线相交的交点 $P_0(u,v)$ 表示为：

$$P_0(u,v) = \begin{cases} u = \dfrac{b_0c_1 - b_1c_0}{b_1a_0 - b_0a_1} \\ v = \dfrac{a_0c_1 - a_1c_0}{b_0a_1 - b_1a_0} \end{cases} \tag{10}$$

由相机的透视投影模型可知，在相机视野范围内的标定板上所有点与相机光心的连线都与标定板有且仅有一个交点。所以由(2)式，光条与靶标连线的交点 $P_0(u,v)$ 在相机坐标系下可描述为：

$$Z_{c,0}\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}f_x&0&u_0\\0&f_y&v_0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_{c,0}\\Y_{c,0}\\Z_{c,0}\end{bmatrix}\tag{11}$$

式中，$(X_{c,0},Y_{c,0},Z_{c,0})^{\mathrm{T}}$ 表示相机坐标系下的交点的坐标值，其系数矩阵为相机标定时获取的相机内参矩阵，而 f_x、f_y 表示相机在 u、v 轴向的尺度因子，u_0、v_0 表示选取的主点坐标。将(11)式中的相机内参矩阵求逆后左乘至等号左边，可得到如下关系式：

$$\begin{bmatrix}X_{c,0}\\Y_{c,0}\\Z_{c,0}\end{bmatrix}=Z_{c,0}\begin{bmatrix}\frac{1}{f_x}&0&-\frac{u_0}{f_x}\\0&\frac{1}{f_y}&-\frac{v_0}{f_y}\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}\tag{12}$$

经过化简，(12)式进一步表示为：

$$\begin{cases}X_{c,0}=Z_{c,0}\dfrac{u-u_0}{f_x}\\Y_{c,0}=Z_{c,0}\dfrac{v-v_0}{f_y}\\Z_{c,0}=Z_{c,0}\end{cases}\tag{13}$$

标定板上两线的交点透视投影模型如图 4 所示。通过分析可知，距离相机光心一定距离处的，图像坐标系 α 中点 E'' 的图像坐标与相机光心的连线和世界坐标系下，该点与相机光心的连线共线。

所以，相机坐标系与离相机光心一定距离处的图像坐标系 α 之间的旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为单位阵，并且平移向量 $\boldsymbol{T}=(0,0,g)^{\mathrm{T}}$，其中 g 为常数。进而得到在坐标系 α 中两线交点的相机坐标值为：

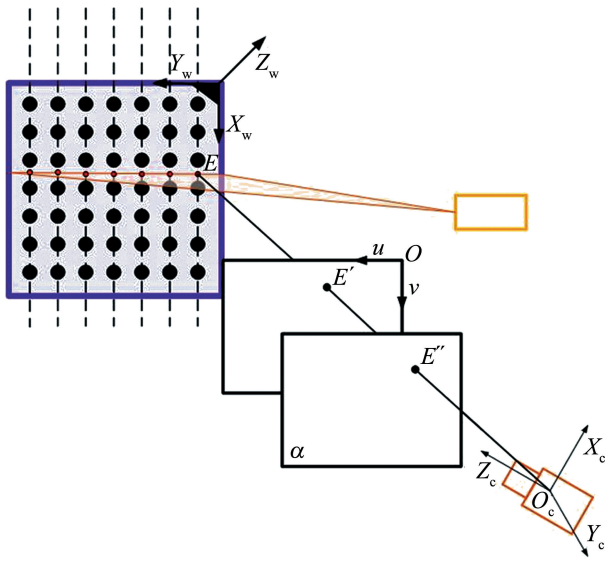

图 4 标定板上两线的交点透视投影模型

Fig. 4 Perspective projection model of the intersection of two lines on the calibration plate

$$\begin{bmatrix}X_{c,0}\\Y_{c,0}\\Z_{c,0}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}g\dfrac{u-u_0}{f_x}\\g\dfrac{v-v_0}{f_y}\\g\end{bmatrix}\tag{14}$$

为了方便计算，这里设 $g=1$，(14) 式简化为：

$$\begin{cases}X_{c,0}=(u-u_0)/f_x\\Y_{c,0}=(v-v_0)/f_y\\Z_{c,0}=1\end{cases}\tag{15}$$

所以，图 2 中 E 点的投影坐标 E'' 与相机光心 O_c 所组成的直线方程为：

$$\frac{X_c-X_{c,0}}{X_{c,0}}=\frac{Y_c-Y_{c,0}}{Y_{c,0}}=Z_c-1\tag{16}$$

联立(7)式、(10)式和(16)式，得到 E 点在相机坐标系下的坐标为：

$$\begin{cases}X_c=-[Q_1f_y(a_1b_0-a_0b_1)b_0c_1-b_1c_0-u_0a_0b_1+u_0a_1b_0]/[M_1f_y(a_1b_0-a_0b_1)(b_0c_1-b_1c_0-u_0a_0b_1+u_0a_1b_0)+\\\quad N_1f_x(a_0b_1-a_1b_0)(a_0c_1-a_1c_0-v_0a_1b_0+v_0a_0b_1)+P_1f_xf_y(a_0b_1-a_1b_0)(a_1b_0-a_0b_1)]\\Y_c=-[Q_1f_x(a_0b_1-a_1b_0)(a_0c_1-a_1c_0-v_0a_1b_0+v_0a_0b_1)]/[M_1f_y(a_1b_0-a_0b_1)(b_0c_1-b_1c_0-u_0a_0b_1+u_0a_1b_0)+\\\quad N_1f_x(a_0b_1-a_1b_0)(a_0c_1-a_1c_0-v_0a_1b_0+v_0a_0b_1)+P_1f_xf_y(a_0b_1-a_1b_0)(a_1b_0-a_0b_1)]\\Z_c=-[Q_1f_xf_y(a_0b_1-a_1b_0)(a_1b_0-a_0b_1)]/[M_1f_y(a_1b_0-a_0b_1)(b_0c_1-b_1c_0-u_0a_0b_1+u_0a_1b_0)+\\\quad N_1f_x(a_0b_1-a_1b_0)(a_0c_1-a_1c_0-v_0a_1b_0+v_0a_0b_1)+P_1f_xf_y(a_0b_1-a_1b_0)(a_1b_0-a_0b_1)]\end{cases}\tag{17}$$

式中，等号右边均为已知量，a_0、a_1、b_0、b_1、c_0、c_1 可由 N 个不同位姿标定板上的光条直线方程与靶标连线的 7 条直线方程得到。使光平面固定不变，移动 N 次标定板获取 $N\times7$ 个交点，即可使用最小二乘法拟合得到光平面方程。

2 系统搭建及实验结果

2.1 系统搭建

为了测试光平面标定的精度以及算法的稳定性，设计并搭建了如图 5 所示的线结构光 3 维测量系统。

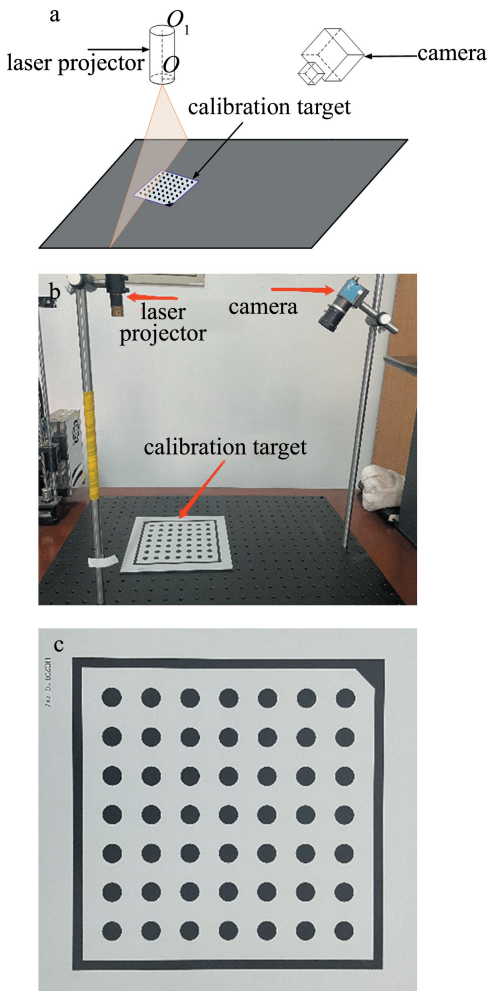

图 5　搭建的实验系统

a—系统结构示意图　b—系统实物图　c—使用的圆形标定靶

Fig. 5　Experimental system built

a—schematic diagram of the system structure　b—physical view of the system　c—circular calibration target used

系统使用黑白工业相机，并搭配 8 mm 定焦镜头用于成像。使用波长为 405 nm 的一字线结构光激光器作为线结构光源，标靶采用图案数量为 7×7，靶标圆心距离为 2 cm 的圆形标靶。

系统标定时，为了使标定更加简便、准确，使用了一种图片相减求差异[26]的方式来定位光条所在区域。在拍摄标定单目相机所需要图片的同时，也打开激光器照射到标定靶上再次拍摄图片，使在标定靶相同位置下，拍摄的这两张照片之间的差异只有光条，这样就完成了光条感兴趣区域（region of interest，ROI）提取。

整个光平面的标定流程大致分为：(a)拍摄标定靶在不同位置的图像；(b)标定单目相机；(c)使用有无线结构光光条的标定靶图片相减后提取光条中心；(d)将光条中心进行直线拟合并求出标定靶圆点与该直线交点的表达式；(e)求出标定靶所在平面的相机坐标系下表达式；(f)求出第 1.2 节中的(15)式，并联立所有方程组求解交点的相机坐标系下的坐标值；(g)多次移动标定靶求解多个交点的相机坐标系值后，使用最小二乘拟合光平面。具体的标定流程如图 6 所示。

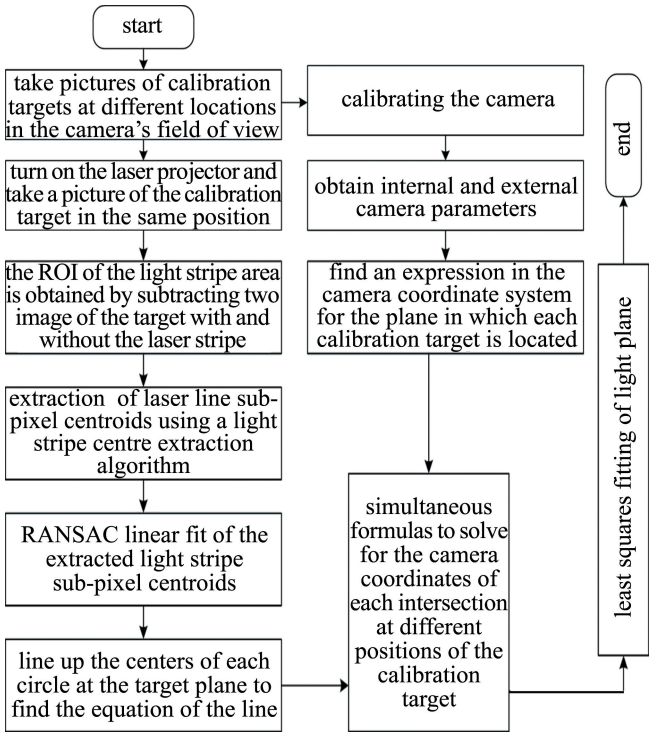

图 6　系统标定流程图

Fig. 6　System calibration flowchart

2.2　实验结果

移动 10 次标定靶，拍摄 10 组有、无光条的标定靶图片，标定得到单目相机的内参矩阵为：

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}2411.3221524654123 & 0 & 1194.2398017944938\\ 0 & 2411.2737493416175 & 1028.5612192475869\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{18}$$

拍摄的所有标定使用光条如图 7a 所示；使用光条中心提取算法得到图 7b 中每个光条对应的中心线。

光平面标定结果如图 8 所示，表达式为：

$$Z_c=0.260958X_c+1.833015Y_c+68.194519 \tag{19}$$

使用了长度为 40 mm 的标准量块来测试光平面的标定精度，量块实物图如图 9a 所示。使用相机拍摄该量块在光条不同位置处的图像如图 9b 所示，使用光平面标定结果量块上的光条中心点转换为世界坐标并

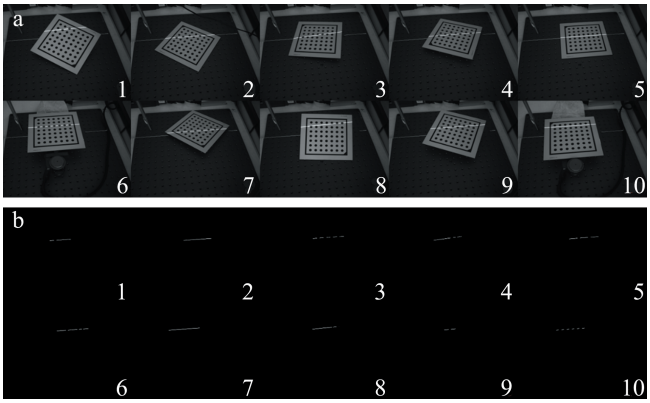

图 7 光条图片与光条中心提取结果

a—光条在标靶上的图片 b—各个位置光条提取结果

Fig. 7 Light stripe picture and light strip center extraction results

a—picture of the light stripe on the target b— light stripe extraction results for each position

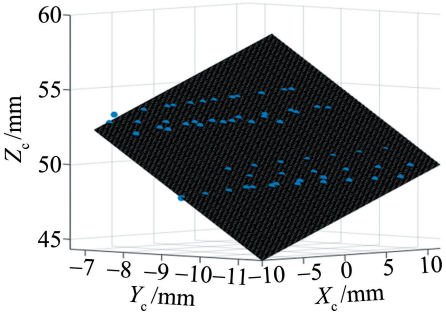

图 8 光平面标定结果

Fig. 8 Light plane calibration results

计算量块两端的点距离。

表 1 所示为使用本文作者提出的方法对该量块的测量结果。表中列出了使用本文中的方法和 ZHANG[27] 提出的方法,分别对该量块在同一光平面下不同位置的 16 次测量结果。使用 ZHANG[27] 的方法得到的光平面方程为:

$$Z_c = 0.260212X_c + 1.833526Y_c + 68.194689 \quad (20)$$

而从表 2 中容易看出,本文中的方法在后 10 次的光条和相机视野边缘位置处,测量的量块宽度仍能保持较好的鲁棒性。使用 ZHANG[27] 的方法在光条质量较好、且测量时被测物处于相机成像中心区域内的测量结果略优于本文中的方法,但是在不理想条件下的准确性和鲁棒性均未能达到本文作者所提出方法的性能。

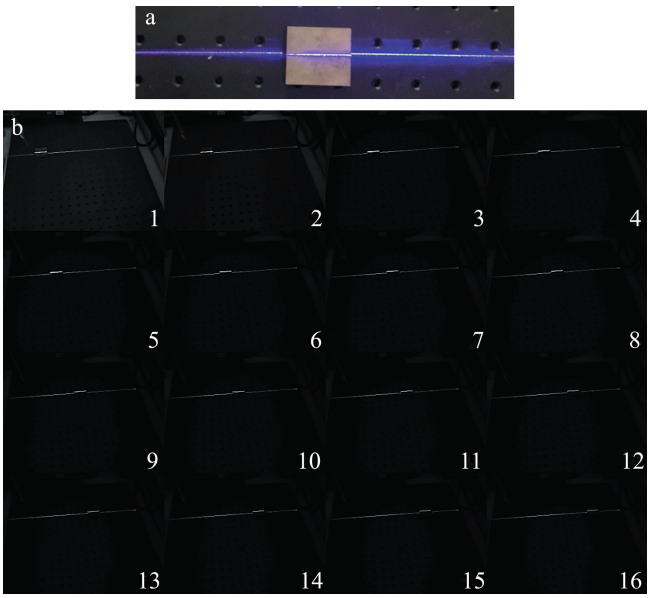

图 9 量块实拍图与量块在不同位置的位移情况

a—光平面照射在标准量块上的图片 b—移动量块在光平面不同位置的图片

Fig. 9 Actual picture of the gauge block with the displacement of the block at different positions

a—picture of the light plane onto the standard gauge block b—picture of the moving gauge block at different positions in the light plane

表 3 为测量结果的误差分析。结合表 1 和表 2 中的测量结果可知,两种方法在距离相机视野中心并且在激光器出射角中心处的测量误差均较小。在边缘位置对成像不利的条件下,本文作者提出的方法依然能达到相对较高的精度,且 RMS 误差和平均测量误差也小于对比的方法,证明该方法的抗干扰能力较强,稳定性较好。

表 1 前 6 次测量结果

Table 1 Results of the first 6 measurements/mm

position	1	2	3	4	5	6
our method	37.61066	38.11144	38.33195	38.59902	38.45734	37.06425
ZHANG's method	37.61856	38.11846	38.33737	38.60265	38.45980	37.06543

表 2 后 10 次测量结果

Table 2 Results of the last 10 measurements/mm

position	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
our method	37.07062	36.74692	36.47288	37.94350	36.99725	37.88658	37.60713	36.67100	38.25522	38.29625
ZHANG's method	37.07013	36.74542	36.47009	37.93971	36.99215	37.87989	37.59973	36.66109	38.24422	38.28226

表 3　误差分析/mm

Table 3　Error analysis/mm

	mean error	mean error of the first 6 measurements	mean error of the last 10 measurements	RMS error of the first 6 measurements	RMS error of the last 10 measurements	RMS error of 16 measurements
our method	2.36737	1.97089	2.60527	0.204202	0.284060	0.246337
ZHANG's method	2.36957	1.96629	2.61153	0.203766	0.284567	0.246575

3　结　论

提出了一种线结构光标定方法,并将该方法与已有的方法进行了对比,得到了更高的测量精度、鲁棒性和稳定性。同时,由于该方法采用先拟合直线后相交的方法,使得光条上干扰点对于拟合光平面的误差可以得到较好的降低,并且所投射的线结构光光条可以在标定靶的任何位置,使得标定更加可控和简便。应用该方法时,在标定时使用到了标定靶的中心点的圆心特征,这样会受到来自标定靶加工精度以及相机畸变程度的影响,这是接下来值得研究的一个问题。

参　考　文　献

[1] DING Sh W, ZHANG X H, YU Q F, *et al*. Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7):070003(in Chinese).
丁少闻,张小虎,于起峰,等. 非接触式 3 维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展,2017,54(7):070003.

[2] ZHAN D, XIAO J. Study on the flexible multiple camera calibration approach based on the reference plane emitted by line structured light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 2030-2036(in Chinese).
占栋,肖建. 基于线结构光参考平面的多摄像机灵活标定方法研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(9):2030-2036.

[3] ZHANG Zh J, WU Q Y,DENG Y F, *et al*. Structured light field 3-D imaging method based on Hough transform [J]. Laser Technology, 2023,47(4):492-499(in Chinese).
张志俊,吴庆阳,邓亦锋,等. 基于霍夫变换的结构光场 3 维成像方法[J]. 激光技术,2023,47(4):492-499.

[4] XU X B, FEI Zh W , YANG J , *et al*. Line structured light calibration method and centerline extraction: A review[J]. Results in Physics, 2020, 19:103637.

[5] ZHANG X, ZHANG J. Summary on calibration method of line-structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020001 (in Chinese).
张曦,张健. 线结构光标定方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018,55(2): 020001.

[6] FAN J F, JING F Sh, FANG Z J , *et al*. A simple calibration method of structured light plane parameters for welding robots[C]// Chinese Control Conference (IEEE). New York, USA: IEEE, 2016: 6127-6132.

[7] ZHENG F, KONG B. Calibration of linear structured light system by planar checkerboard [C]// International Conference on Information Acquisition(IEEE). New York,USA:IEEE,2004:344-346.

[8] LI D, WEN G, HUI B W, *et al*. Cross-ratio invariant based line scan camera geometric calibration with static linear data[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 62:119-125.

[9] HUYNH D Q, HARTMANN P E, OWENS R A. Calibrating a structured light stripe system: A novel approach[J]. International Journal of Computer Vision,1999,33(1):73-86.

[10] LIU Zh, ZHANG G J, WEI Zh Zh, *et al*. An accurate calibration method for line structured light vision sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3124-3128(in Chinese).
刘震,张广军,魏振忠,等. 一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J]. 光学学报,2009,29(11):3124-3128.

[11] YU J H, YANG H X, LIU Z H, *et al*. The line-structured light plane calibration based on the Plücker line[C]// 2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (IEEE). New York,USA:IEEE,2021: 1106-1109.

[12] XU G, ZAHNG X Y, SU J , *et al*. Solution approach of a laser plane based on Plücker matrices of the projective lines on a flexible 2D target[J]. Applied Optics, 2016,55(10): 2653-2656.

[13] LI D D, WEN G J, HUI B W , *et al*. Cross-ratio invariant based line scan camera geometric calibration with static linear data[J]. Optics and Lasers in Engineering,2014,6:119-125.

[14] PAN X, LI Zh. High-accuracy calibration of line-structured light vision sensor by correction of image deviation[J]. Optics Express, 2019,27(4): 4364-4385.

[15] CHEN R M, LI X H, WANG X H , *et al*. A planar pattern based calibration method for high precision structured laser triangulation measurement[J]. Proceedings of the SPIE,2019,11189:1118914.

[16] ZHANG G J, LIU Zh, SUN J H, *et al*. Novel calibration method for a multi-sensor visual measurement system based on structured light [J]. Optical Engineering,2010,49(4):043602.

[17] XU G, HAO Z B, LI X T, *et al*. Calibration method of laser plane equation for vision measurement adopting objective function of uniform horizontal height of feature points[J]. Optical Review,2016,23 (1):33-39.

[18] XU G, SUN L N, LI X T, *et al*. Global calibration and equation reconstruction methods of a three dimensional curve generated from a laser plane in vision measurement[J]. Optics Express, 2014, 22 (18):22043-22055.

[19] YONG Q , WANG Y , NING J , *et al*. Calibration of line structured light senor based on active vision systems[C] // 2013 International Conference on Computational PROBLEM-Solving (IEEE). New York,USA:IEEE, 2013:249-252.

[20] YANG Sh M, YANG L L, ZHANG G F , *et al*. Modeling and calibration of the galvanometric laser scanning three-dimensional measurement system [J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2018, 1 (3):180-192.

[21] LI Y H, ZHAO B Ch, HU B, *et al*. Universal calibration method for line structured light galvanometer scanning system[J]. Acta Optica Sinica,2022,42(10): 1015001 (in Chinese).
李玥华,赵勃冲,胡泊,等. 一种线结构光振镜扫描测量系统通用标定方法[J]. 光学学报,2022,42(10): 1015001.

[22] WANG T, YANG Sh M, LI Sh Sh , *et al*. Error analysis and compensation of galvanometer laser scanning measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2020,40(23): 2315001(in Chinese).
王腾,杨树明,李述胜,等. 振镜激光扫描测量系统误差分析与补偿[J]. 光学学报,2020,40(23): 2315001.

[23] LI Y H, ZHAO B Ch, ZHOU J B , *et al*. A universal method for the calibration of swing-scanning line structured light measurement system[J]. Optik, 2021, 241(1):166930.

[24] ZHANG Zh Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000,22(11):1330-1334.

[25] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998,20(2):113-125.

[26] ALARD C, LUPTON R H. A method for optimal image subtraction [J]. Astrophysical Journal, 1998,503(1):325-331.

[27] ZHANG R F, SHU Z Y, NAN G L. Calibration method for line-structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56 (22): 221101(in Chinese).
张瑞峰,舒子芸,南刚雷. 一种新的线结构光标定方法[J]. 激光与光电子学进展,2019,56(22): 221101.