

多线激光分类与光平面标定方法研究

刘天赐^{1,2}, 刘桂华^{1,2*}, 黄会明^{1,2}, 胡莉^{1,2}, 李亮亮^{1,2}

¹西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010;

²特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010

摘要 针对现有的三维测量系统在线激光标定过程中存在多线不易标定、提取特征点精度低等问题, 提出一种新的多线激光分类与光平面标定方法。首先利用 steger 算法提取激光中心线, 利用基于轮廓判断的方法对中心线进行分类; 然后对标定板上的关键点进行检测, 利用奇异值分解得出摄像机与标定板的对应关系矩阵, 进而可利用对应关系矩阵, 求解关键点在相机坐标系下的三维坐标; 拟合标定板在相机坐标系下的平面方程, 即可求出激光线在标定板平面上的三维点。多次变换标定板位姿, 最终可完成多线激光平面标定。对标准块的重建实验结果表明, 所提方法的重复测量均值尺寸精度达 0.02 mm, 满足工业精度要求, 证明了所提方法的有效性。

关键词 轮廓判断; 标定板; 奇异值分解; 多线激光平面标定

中图分类号 TP391 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223387

Multiline Laser Classification and Optical Plane Calibration Method

Liu Tianci^{1,2}, Liu Guihua^{1,2*}, Huang Huiming^{1,2}, Hu Li^{1,2}, Li Liangliang^{1,2}

¹School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang 621010, Sichuan, China;

²Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province,
Mianyang 621010, Sichuan, China

Abstract This study proposes a new method for multiline laser classification and optical plane calibration to overcome the limitations of the existing on-line laser calibration methods used for three-dimensional (3D) measurement systems. These limitations include difficulties in multiline calibration and low accuracy in extracting feature points. The proposed method utilizes the steger algorithm to extract the laser center line and classifies it using a method based on contour judgment. The key points on the calibration board are detected, and the corresponding relationship matrix between the camera and calibration board is obtained using singular value decomposition. Using this relationship matrix, the 3D coordinates of the key points in the camera coordinate system can be determined. Subsequently, the plane equation of the calibration plate in the camera coordinate system is obtained via fitting, allowing for the determination of the 3D point of the laser line on the calibration plate plane. This process can be repeated several times by changing the position and attitude of the calibration plate till multiline laser plane calibration is achieved. Experimental results on the standard block demonstrate that the proposed method is effective and meets the industrial accuracy parameters, achieving an average size accuracy of 0.02 mm after repeated measurements.

Key words contour judgment; calibration plate; singular value decomposition; multiline laser plane calibration

1 引言

随着计算机视觉领域的不断发展, 借助光学手段对物体表面进行三维测量日益成熟^[1-4]。激光测量技术的主要原理是: 对物体表面投射激光线, 获取投射在

物体表面的激光线的三维坐标, 进而得到物体尺寸。激光测量系统具备稳定性高、速度快、精度高等优势, 在物体表面轮廓测量、在线检测、医学等领域^[5]应用越来越广泛。在进行三维测量之前, 首先要对系统进行相机标定和激光平面标定, 标定精度直接影响后续重

收稿日期: 2022-12-23; 修回日期: 2023-01-19; 录用日期: 2023-03-01; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2021YFG0380)、四川省卫生和计划生育科研课题(17PJ207)

通信作者: liughua_swit@163.com

建的精度,因此标定工作是视觉测量系统中的关键部分。多线扫描比传统单线扫描具有更高的效率,极大缩短物体表面重建时间,为人们带来了方便。如何对多线激光进行分类、得出相机坐标系下的特征点三维坐标以及设计一套操作简单的标定方法是研究者们追求的目标。

如今,研究者们提出的激光平面标定方法多种多样,但并没有形成统一的标定方法,仍处于不断研究摸索阶段。其中,Huynh等^[6]利用交比不变性完成了对光平面的特征提取,但利用的三维靶标成本高,灵活性差。杨凯等^[7]针对交比不变性方法操作复杂的问题,提出了一种基于平面靶标的光平面标定方法,以激光线与棋盘格角点边线的交点作为特征点,利用相机内参提取特长点,但精度易受光线影响。为了避免光条与棋盘格上的边线相交的问题,张瑞峰等^[8]提出增加拟合光平面特征点数量的方法,该方法提高了标定精度,虽降低了操作复杂性,但仍不能适用于多个光平面标定。除了交比不变性,毕德学等^[9]提出了基于物方光线会交原理的标定方法,其主要原理是求取平面靶标在相机坐标系下的平面方程,利用图像点与相机中心的关系,得出射线方程,可求得特征点在靶标平面的三维点,进而获得光平面方程。为了提高标定精度,于龙龙等^[10]增加了标定算法过程中标定点的数量,进而使算法具有高精度的优点,但其存在计算量大等问题。刘红光等^[11]为了提高光平面标定精度,利用棋盘靶标获取大量标定点,并提出异常点提高了标定精度。平乙杉等^[12]提出一种基于单应性矩阵的线结构光标定方法,使用两幅以上的图片中的特征点,构建光刀平面,求取其和像平面的单应性关系,根据此关系完成激光标定。王金桥等^[13]提出一种引入两束激光线进行相交求特征点的方法,虽然该方法简单,易操作,但没有解决相交产生干涉的问题,导致最终标定精度低。胡增等^[14]为了减少人工参与,利用消隐点方法进行标定,提高了标定效率,但该方法适用场景有限且操作较复杂。秦训鹏等^[15]通过旋转光条并拟合光平面来求解方程,实现了较高的测量精度并避免了靶标平面的多次移动。还有利用高精度三维靶标进行标定的方法,比如拉丝法^[16]、球形靶标标定法^[17]及锯齿法^[18]等,但因操作复杂且标定物加工制作困难,很少用此类方法进行标定。

本文针对线激光平面标定操作复杂、提取特征点易受干扰、多个光平面不易标定等问题,提出了一种基于多线激光轮廓分类的激光标定方法。首先对多条激光线进行轮廓检测并分类,再利用相机透视模型和特征点成像特点,获取平面靶标和相机之间的对应关系矩阵,进而求取相机坐标系下特征点的三维坐标。所提方法能够有效地对多个光平面进行标定,单独采集特征点与激光线,进一步提高了标定的稳定性和准确性,且无需建立严格的位置关系。

2 多线激光分类与光平面标定方法

为了更好地对多线激光进行标定,本文先对多个激光条纹进行基于轮廓的分类,然后根据相机成像原理,提出一种新的具有相机与标定板对应关系的模型并进行数学推导。

2.1 多线激光分类

如图1所示,线激光标定系统主要由一台相机、一个激光器和标定板组成。在标定时,由激光器发射多束激光线,接着使用相机采集图片,然后对图片进行处理。

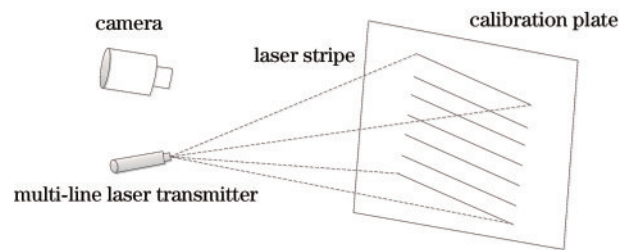


图1 多线激光标定模型

Fig. 1 Multi-line laser calibration model

与单线激光测量系统不同,所提系统有多条激光线,从而不确定每个激光点所属的光平面,无法进行标定。为了消除多条激光线的干扰,便于后续能有效对每个光平面进行标定,需要对采集到的多线激光条纹进行单线分离。首先利用steger算法^[19]对采集到的多线激光图像进行激光中心点提取,图像是由多个像素组成的,因此提取的激光线是一堆点集组成的线,而这些点集为激光点。由于激光条纹投射在标定板黑色区域时该黑色区域会吸收激光条纹能量,造成激光线断裂。为了保证激光线有更好的连通效果,不影响后续激光点的分类操作,采用形态学膨胀操作,对提取到的激光线进行处理。采用的结构元素大小为 32×32 ,能够最大保证每根线全部连通,效果如图2所示。

由图2可以看出,膨胀后的激光线体能够很好地覆盖所有激光点的范围,使所有激光点都在其内部。其次对膨胀后的激光线进行轮廓提取,此时,就可以得到与激光线数目相同的轮廓数,再对轮廓进行编号处理,使得每个轮廓都有独立的身份特征。计算提取的激光点到每个轮廓边缘的距离,判断激光点是否在当前轮廓内,假如判定在其内部,则对此激光点也进行编号处理,此编号与相应的轮廓编号相同。如此反复,直至将所有的激光点全部编号,分类效果如图3所示。

由此,对多线激光进行分类后,可把多线激光平面标定转换为单线激光标定,简化了多个激光平面的标定复杂程度。

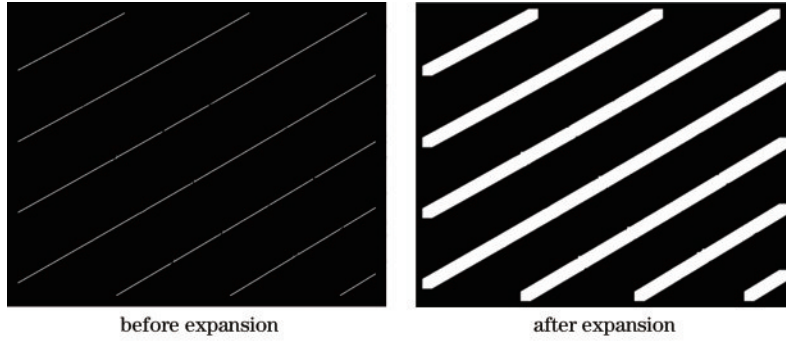


图 2 形态学膨胀操作效果图

Fig. 2 Effect of morphological expansion operation

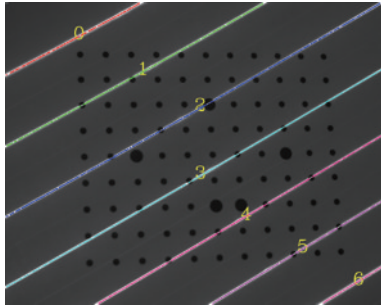


图 3 激光编号并分类

Fig. 3 Laser numbering and classification

2.2 光平面标定方法

2.2.1 相机标定中的成像原理

通常在进行激光平面标定之前是离不开相机本身标定的,最经典的便是张氏标定法^[20],因其操作简单、制作成本低和精度较高被广大学者所使用,本文同样选用此方法完成对相机内参的标定。标定过程中涉及的坐标系转换关系^[6]为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & f/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: s 表示相机成像的尺度因子; f 表示相机焦距; d_x 与 d_y 分别表示相机像元在 x 与 y 方向上的物理尺寸; \mathbf{A}_c 表示相机内参; \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 表示旋转矩阵和平移矩阵,即相机外参。相机成像过程:首先世界坐标系中的某一点(X_w, Y_w, Z_w)经过矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 转换到相机坐标系,然后再根据针孔模型原理转换到图像坐标系,进而最终得到像素坐标系上的二维像素坐标。相机标定过程:利用标定板上的特征点和四大坐标系之间的关系求解

内参矩阵 \mathbf{A}_c 和外部参数 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 矩阵。

2.2.2 一种新的激光平面标定方法

由上述方法完成相机内参标定和基于轮廓的多线激光分类后,对提取到的分类激光点进行光平面标定,即获取每个激光平面在相机坐标系下的平面方程,以便后续对激光线进行三维重建。本文基于相机成像原理,提出了一种新的激光标定模型算法。其可得到相机与标定板的对应关系矩阵,可获得标定板上全部特征点的三维坐标,使特征点不受激光线的干扰,完成光平面标定。此算法使得相机与标定板之间无需建立严格的位置关系,详细原理推导如下。

为了能够突出标定板上的特征点,提高稳定性,选取如图4所示的白底黑色圆形标定板。然后以标定板平面建立世界坐标系, Z 轴垂直标定板面,则在标定板上的点的 Z 值全部为0。根据圆心之间的等间距,可得圆心在世界坐标系中的3D坐标点($x, y, 0$),又根据世界坐标系和相机坐标系的关系,可得

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = [\mathbf{R}_0 \mathbf{T}_0] \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2 \mathbf{r}_3 \mathbf{T}_0] \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2 \mathbf{T}_0] \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{R}_0 和 \mathbf{T}_0 为世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和平移矩阵。又因 Z 值为0,因此式(3)可直接简化, \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 为旋转矩阵 \mathbf{R}_0 的前两列。

在单目相机标定过程中,如图5所示,已知图像坐标系和相机坐标系,则它们之间的转换关系为



图 4 标定板示意图

Fig. 4 Schematic of a calibration board

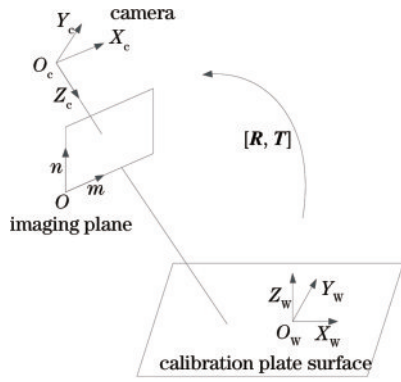


图 5 标定原理图

Fig. 5 Schematic of the calibration principle

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 0 \end{bmatrix} = A_c \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}, A_c = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中： ρ 为比例因子； (u, v) 表示像素坐标系中的二维坐标点； (X_c, Y_c, Z_c) 表示相机坐标系下的三维坐标点。根据式(3)和式(4)，可以对标定板上的世界坐标系已知点和图像坐标系已知点构建等式关系，由此可得

$$\rho' \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A_c \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = A_c [r_1 \ r_2 \ T_0] \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

从式(5)不难看出，从某个坐标系的二维坐标转换为其他坐标系的二维坐标，可理解为平面上点到另外一个平面上的点，则可将转换关系看成单应性矩阵 H ，表达式为

$$H = A_c [r_1 \ r_2 \ T_0], \quad (6)$$

令

$$G = H^{-1} = [r_1 \ r_2 \ T_0]^{-1} A_c^{-1} = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 \\ g_4 & g_5 & g_6 \\ g_7 & g_8 & g_9 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

根据式(5)和式(7)，可得

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \rho' G \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{u \cdot g_7 + v \cdot g_8 + g_9} G \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

在此可得到以标定板建立的世界坐标系和像素坐标系之间的关系，为了求解矩阵 G 中各个元素的值，可对式(8)进行展开，整理得

$$\begin{bmatrix} u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1 u_1 & -x_1 v_1 & -x_1 \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & 1 & -y_1 u_1 & -y_1 v_1 & -y_1 \\ u_2 & v_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2 u_2 & -x_2 v_2 & -x_2 \\ 0 & 0 & 0 & u_2 & v_2 & 1 & -y_2 u_2 & -y_2 v_2 & -y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_k & v_k & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_k u_k & -x_k v_k & -x_k \\ 0 & 0 & 0 & u_k & v_k & 1 & -y_k u_k & -y_k v_k & -y_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \\ g_7 \\ g_8 \\ g_9 \end{bmatrix} = 0. \quad (9)$$

再根据多组标定板上关键点的二维图像像素点坐标及相对应的世界坐标系中的三维坐标点，利用奇异值分解(SVD)即可求出矩阵 G 。再将式(7)和式(8)代入式(3)，可得出相机坐标系中三维点坐标与图像坐标系中二维坐标之间的映射关系：

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \frac{1}{u \cdot g_7 + v \cdot g_8 + g_9} A_c^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

由此可知，检测出标定板上关键点的二维坐标及找到对应的世界坐标系中的三维点后，即可求出关键点在相机坐标系下的三维点。为了得出激光平面在相机坐标系下的平面方程，关键是要得到激光点在相机坐标系下的三维点坐标。又因为标定板关键点并没有分布在同一条直线上，在得到相机坐标系下关键点的三维坐标后，可进一步求取相机坐标系下标定板的平面方程。然后根据多个三维坐标点，再次利用 SVD 求解标定板的平面方程系数，得到的标定板平面方程为

$$Ax_c + By_c + Cz_c + D = 0, \quad (11)$$

式中： A, B, C, D 为标定板在相机坐标系下的平面方程参数。确定好参数后，保证标定板在相机下的位姿不动，接着激光器对标定板投射多条激光线。根据激光线轮廓对激光点进行分类编号，使编号相同的激光点归为同一根激光线。标定时，编号相同的激光点参加同一光平面标定。结合所得出的标定板平面方程和相机成像原理的式(1)，则可求出激光点在相机坐标系下的三维坐标点：

$$\begin{cases} X_c = Z_c \times \frac{u - u_0}{f_x} \\ Y_c = Z_c \times \frac{v - v_0}{f_y} \\ Z_c = -\frac{D}{A \times [(u - u_0)/f_x] + B \times [(v - v_0)/f_y] + C} \end{cases}, \quad (12)$$

式中： u_0, v_0, f_x 和 f_y 为相机内参。根据式(12)，求出编号相同的激光点在相机坐标系下的三维坐标点。多次变换标定板在相机下的位姿，则可获得随标定板位姿变化的激光三维点，再分别利用激光编号相同的激光点拟合空间平面方程，最终得到多个激光平面在相机坐标系下的平面方程，可完成多线激光标定。多线激光标定具体步骤如下。

1) 固定好相机与多线激光器的相对位置，激光器不工作，相机工作。拍摄不同位姿的圆形标定板进行相机标定，得出内参。拍摄此时刻标定板，利用特征点的二维图像坐标与对应建立的世界坐标系上的三维点，可求出相机与标定板的对应关系矩阵 G 和标定板在相机坐标系下的平面方程。

2) 保持标定板不动，打开激光器，使多条激光线都能投射在标定板上。利用 steger 算法提取激光线，

根据步骤 1), 即可求出标定板上所有激光点对应的三维坐标。

3) 在相机的测量范围内, 更换标定板位置, 重复步骤 1) 和步骤 2), 即可得到多组数据。由于相机与激光器的相对位置不变, 则不同位姿的标定板上的激光线也不会处于同一平面。

4) 最后根据激光分类算法, 对于不同位姿的相同编号激光点数据, 利用最小二乘方式拟合光平面, 完成多线激光标定。

在进行实际标定操作时, 应将全部激光线投射在标定板上, 假如相机采集某一组图片后出现遗漏激光线情况, 则会导致激光线标号错位, 从而导致光平面标定错误, 影响后续重建效果。

3 实验验证

3.1 多线光平面标定实验

本次实验系统如图 6 所示, 主要由 XL71B 型七线平行激光器和 2 个 CA013-A0UM 型海康相机(分辨率为 1280×1024) 构成, 本次标定实验只使用其中一台相机。平面靶标为 11×8 的白底黑色标记点的圆形标定板, 其圆心距为 10 mm, 精度在 ± 0.01 mm 内, 相机与标定板距离约为 500 mm。

首先利用张正友方法进行相机标定, 得出相机的内部参数、径向畸变系数及切向畸变系数, 结果如表 1 所示。

其次将标定板放在相机的景深范围内, 调整焦距, 直到采集的图像清晰。此时, 激光器不工作, 相机只采

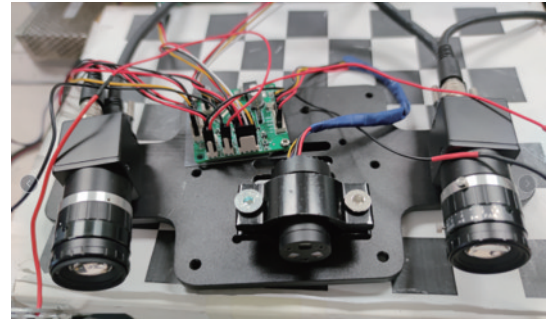


图 6 硬件系统实物图

Fig. 6 Physical diagram of the hardware system

表 1 相机标定参数

Table 1 Camera calibration parameters

Parameter	Value
Camera internal parameter	$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 2525.6461 & 0 & 630.0736 \\ 0 & 2526.2245 & 505.3871 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Radial distortion coefficient	$k_1 = -0.0484, k_2 = -0.0104$

集此刻的标定板位姿; 接着打开激光器, 使 7 条激光线全部投射在标定板上, 再次利用相机采集图片, 此为一组图像。手动变换标定板在相机下的摆放位姿, 使得每次投射的空间激光线处于不同空间位置, 便于后续更好地拟合光平面。多次采集图片, 共 10 组照片。采集的部分标定板和对应投射多条激光线的图片数据如图 7 所示。此过程中需要将全部的激光线全部投射在标定板上, 并且每组位姿一一对应。

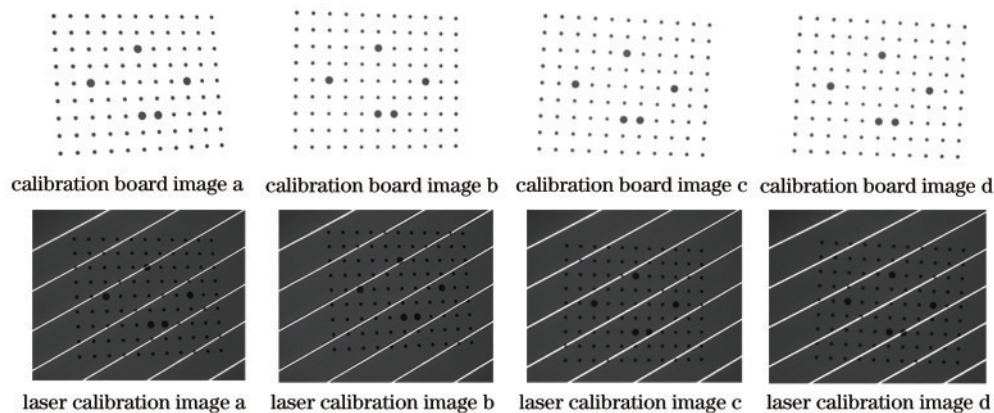


图 7 系统标定图片

Fig. 7 Pictures of the system calibration

在对多个激光平面进行标定时, 先对采集到的激光图像进行基于轮廓的多线激光分类, 将多线标定问题转换成单线标定问题。为了防止单个光平面标定出现误差较大的情况, 要保证每个激光图片中含有完整数量的激光线, 且各个图片中激光线分类标号对应, 如没有拍摄到全部激光线, 则需要重新拍摄; 再次检测标定板上的特征点, 对其与建立的世界坐标系中的三维坐标点进行对应; 然后利用 SVD 求解转换矩阵 \mathbf{G} , 即

可得到标定板上特征点在相机坐标系下的三维坐标, 进而可拟合标定板平面在相机坐标系下的平面方程。

多次采集每个标定板上的激光线, 根据标定板平面方程可得出投射在此平面上的激光点三维坐标。拍摄的每组标定板的位姿不一, 进而得出同一编号不同高度的激光线三维坐标。可以根据每条激光线不同位姿的三维坐标进行平面拟合, 得出多个光平面方程。本文对得出的相机坐标系下不同位姿的标定板特征点

的三维坐标进行可视化显示。已知标定板特征点数量为 11×9 , 因此每 99 个特征点构成一个标定板平面, 如图 8 所示。可以清楚地看到, 每组特征点都处于同一空间平面内, 且看到标定板之间不同的位姿关系, 证明所提方法的可用性。根据得出的特征点三维坐标, 计算出它们之间的测量距离, 并与实际距离进行比较, 标定板上相邻特征点之间的距离均为 10 mm。共计算了 10 组特征点之间的距离, 误差结果如表 2 所示。

在标定过程中, 如果特征点误差越大, 则拟合的平

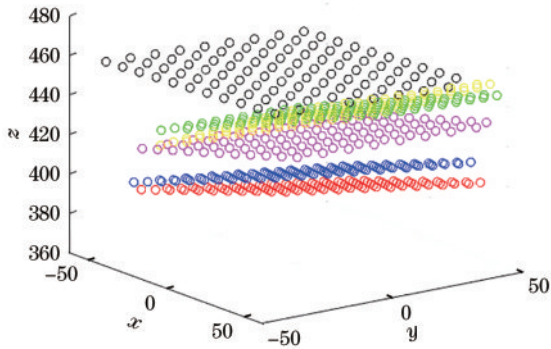


图 8 标定板位姿图

Fig. 8 Position and attitude diagram of the calibration board

表 2 特征点测量距离
Table 2 Measured distance of characteristic points unit: mm

Test No.	Measured distance	Error
1	9.982	0.018
2	9.986	0.014
3	9.998	0.002
4	9.997	0.003
5	10.002	0.002
6	10.008	0.008
7	10.004	0.004
8	9.994	0.006
9	9.988	0.012
10	9.990	0.010

面与实际平面的位置偏差越大, 从而影响最终的光平面标定精度。所提算法不受激光线的干扰, 能够精确提取特征点, 为后续拟合光平面方程做了很好的基础工作, 但本文的最终精度以重建的标准块尺寸为准。至此, 多线激光平面方程完成标定, 后续可根据相机与激光平面的空间位置关系得出激光线实际测量物体的大小。本次实验所得的相机坐标系下多个激光平面参数如表 3 所示。

表 3 多线激光平面标定结果

Table 3 Calibration results of multi-line laser plane

Laser wire No.	0	1	2	3	4	5	6
Parameter A	1	1	1	1	1	1	1
Parameter B	-2.354	-2.371	-2.421	-2.506	-2.592	-2.668	-2.831
Parameter C	0.343	0.193	0.0438	-0.111	-0.276	-0.455	-0.642
Parameter D	102.365	103.239	104.459	105.923	107.618	110.281	108.062

3.2 标定精度测试

为了检验所提标定方法的精度, 采用重建标准块的方法进行测试。事先标定好相机与多线激光器的空

间位置参数, 对尺寸参数已知的标定块进行激光重建。标准块如图 9(a) 所示, 图 9(b) 则是对其表面进行多线激光重建的示意图。

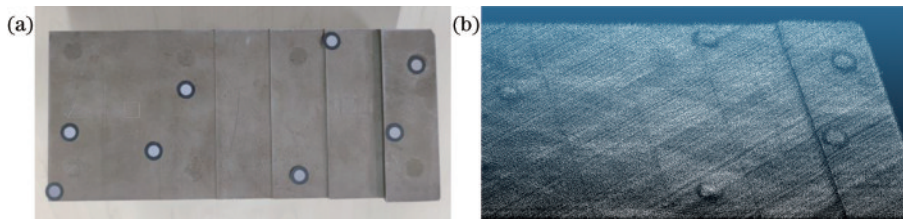


图 9 标准块重建。(a) 标准块示意图; (b) 表面重建示意图

Fig. 9 Standard block reconstruction. (a) Standard block diagram; (b) sketch map of surface reconstruction

从图 9(b) 可清晰地看到每个台阶。为了得出台阶的尺寸高度, 测出所提方法的精度, 对重建标准块表面点云进行后处理, 即分别拟合标准块台阶相邻的每个平面, 计算相邻平面之间的距离, 如图 10 所示, 并与真值进行比较。对标准块中的 3 个台阶高度进行测量, 即测量拟合平面之间的距离, 重复测量 10 次, 对应的真值分别为 1 mm、0.5 mm、0.3 mm。对测量数值进行均值误差 (mean error) 与均方根误差

(RMSE) 统计, 测量结果和统计图如表 4 和图 11 所示。

从表 4 可以看出, 所提算法在每次测量 3 个台阶高度中的误差都在 0.1 mm 以内。图 11(a) 为均值误差, 可以看到均值误差在 0.02 mm 范围内, 表明重复测量具有良好的稳定性。另外还计算了测量数据与真值的均方根误差, 如图 11(b) 所示, 可以看到, 随着台阶的真值越小, 误差表现越大, 但在 0.3 mm 的台阶高度中

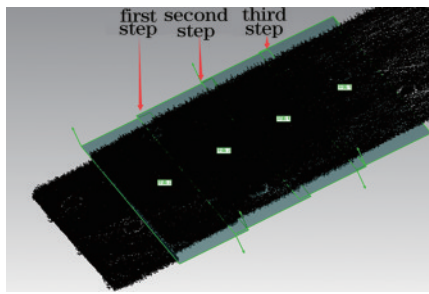


图 10 拟合平面示意图

Fig. 10 Schematic of the fitting plane

的 RMSE 也仅为 0.0355,表明精度较高。对所提算法与基于交比不变性原理的方法的重建标准块的尺寸测量精度进行了对比,将两种算法重复测量 10 次的平均值作为最终的测量数据,对比结果如表 5 所示。

由表 5 可知,所提标定算法和交比不变性算法对物体重建的一般精度都能够控制在 0.1 mm 以内,可满足一般的工业精度要求。但所提算法单独提取特征点,不受激光线干扰,获得的特征点数量也较多;交比不变性方法需要将激光线打在与棋盘格的交线处,提取特征点时易受干扰,且特征点数量较少。因此所提方法标定时更加稳定,重复测量数据偏差小。所提算法先对多根激光线进行分类后再标定,且每个光平面标定算法相同,因此多个光平面的标定精度与单个光平面标定精度保持一致,所以系统的最大标定精度取决于标定误差大的单个光平面。为了验证所提算法的适用性,还对其他物体表面进行了重建,效果如图 12 所示,可以看出,所提光平面标定算法能够很好地还原物体表面纹理。

表 4 标准块台阶尺寸的 10 次测量数据

Table 4 Ten measurement data of step size of the standard block

unit: mm

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Height of the first step	1.002	1.031	1.036	1.030	1.022	1.019	1.024	1.023	1.014	0.992
Height of the second step	0.471	0.521	0.487	0.525	0.514	0.524	0.541	0.486	0.472	0.533
Height of the third step	0.331	0.288	0.330	0.342	0.282	0.348	0.315	0.262	0.266	0.358

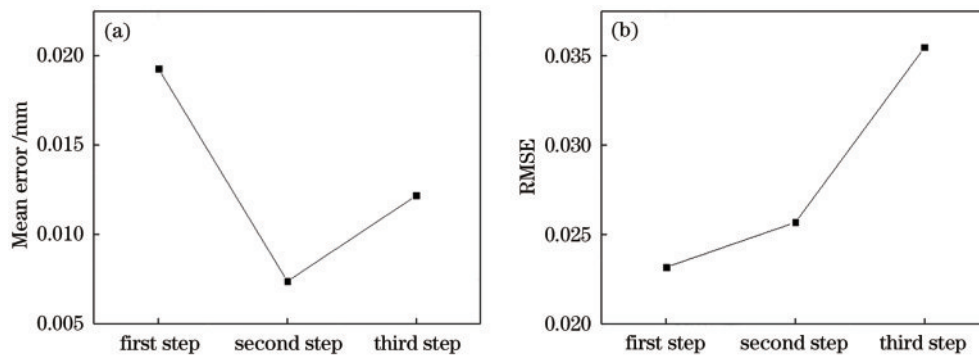


图 11 误差统计。(a)均值误差;(b)均方根误差

Fig. 11 Error statistics. (a) Mean error; (b) RMSE

表 5 标准块台阶精度测量数据

Table 5 Measurement data of step accuracy of the standard block

unit: mm

Step No.	Standard block true value	Average size measured by the proposed algorithm	Average size measured by the cross ratio invariance algorithm
The first step	1.0	1.02	0.96
The second step	0.5	0.51	0.46
The third step	0.3	0.32	0.22

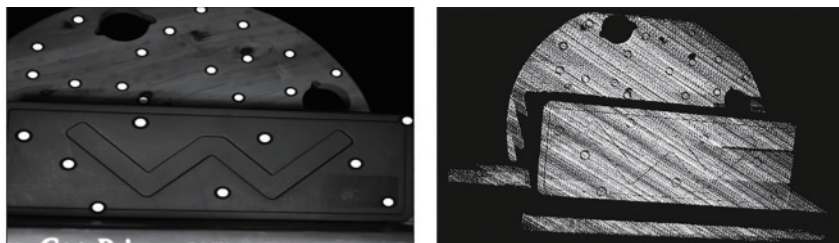


图 12 重建其他物体表面的效果

Fig. 12 Effect of reconstructing the surface of other objects

4 结 论

针对多线结构光不易标定的问题,提出了一种基于多线结构光分类视觉系统的标定方法。该方法首先采用形态学膨胀方法结合轮廓检测,对多线激光进行分类并编号,方便后续分别标定处理;接着对相机进行单目标定,得出相机内参;然后以标定板为世界坐标系,将图像中检测到的特征点的二维坐标与其在世界坐标系中的三维坐标对应,使用SVD方法求解出相机与标定板之间的关系转换矩阵,进而可拟合出多次变换标定板上的激光线平面。所提算法无需建立严格的激光线与标定板之间的位置关系,操作简单,且解决了多线激光不易标定的难题。经过实验验证,所提算法重复测量标准块时的平均精度能够达0.02 mm,满足一般工业精度要求。但所提算法实际仍是对每根单线分步进行标定的,如果系统中存在数量较多的激光线,则造成标定时间较长,因此如何对多线激光同时进行标定仍是本文研究的一大难题。

参 考 文 献

- [1] Xie Z X, Zhu W T, Zhang Z W, et al. A novel approach for the field calibration of line structured-light sensors[J]. *Measurement*, 2010, 43(2): 190-196.
- [2] Zhang R F, Zhang X M, Qin G X, et al. A novel three-dimensional data conversion technique and a profile measurement system for engine cylinder head blank[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 697-701.
- [3] 张翰, 包国琦, 刘凯. 一种结构光三维成像系统的简易标定方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(14): 141102.
Zhang H, Bao G Q, Liu K. Simple calibration method for three-dimensional imaging system with structured light[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(14): 141102.
- [4] 李涛涛, 杨峰, 许献磊. 基于多视觉线结构光传感器的大尺度测量方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1104003.
Li T T, Yang F, Xu X L. The method of large-scale measurement based on multi-vision line -structured light sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1104003.
- [5] 王胜春, 韩强, 王昊, 等. 行车环境下钢轨轮廓激光条纹中心的提取方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0212004.
Wang S C, Han Q, Wang H, et al. Laser stripe center extraction method of rail profile in train-running environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0212004.
- [6] Huynh D Q, Owens R A, Hartmann P E. Calibrating a structured light stripe system: a novel approach[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1999, 33(1): 73-86.
- [7] 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 C. The calibration of a line structured-light vision measurement system based on free-target[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(9): 1066-1070.
- [8] 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.
Zhang R F, Shu Z Y, Nan G L. The calibration method for line-structured light[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 221101.
- [9] 毕德学, 刘方滔, 薛强, 等. 基于激光交线的结构光视觉传感器现场标定新方法[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(8): 1697-1701.
Bi D X, Liu F T, Xue Q, et al. New structured light vision sensor field calibration approach based on laser intersection lines[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(8): 1697-1701.
- [10] 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. Line -structured light calibrating based on two-dimensional planar target[J]. *Chinese Journal of Scientific Instruments*, 2020, 41(6): 124-131.
- [11] 刘红光, 张宏, 石邦凯, 等. 一种基于二维平面靶标的线结构光标定方法[J]. *应用激光*, 2022, 42(8): 129-138.
Liu H G, Zhang H, Shi B K, et al. A linear structured light calibration method was based on a 2D planar target[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(8): 129-138.
- [12] 平乙杉, 刘元坤. 基于单应性矩阵的线结构光系统简易标定方法[J]. *光电工程*, 2019, 46(12): 38-45.
Ping Y S, Liu Y K. An easy line-structured light system calibration method based on a homography matrix[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(12): 38-45.
- [13] 王金桥, 段发阶, 伯恩, 等. 线结构光扫描传感器结构参数一体化标定[J]. *传感技术学报*, 2014, 27(9): 1196-1201.
Wang J Q, Duan F J, Bo E, et al. Calibration of line-structured light scanning sensor structure parameter integration[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014, 27(9): 1196-1201.
- [14] 胡增, 高兴宇, 李伟明, 等. 基于消隐点的线结构光传感器光平面标定方法[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2022(6): 168-171.
Hu Z, Gao X Y, Li W M, et al. The calibration method for a line-structured light sensor based on vanish points[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2022(6): 168-171.
- [15] 秦训鹏, 丁吉祥, 董寰宇, 等. 基于直线空间旋转的十字结构光标定[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(6): 1430-1439.
Qin X P, Ding J X, Dong H Y, et al. Calibration of cross-structured light based on linear space rotation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1430-1439.
- [16] Dear R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system[J]. *Society of Manufacturing Engineers*, 1988: 5-13.
- [17] Liu Z, Li X J, Li F J, et al. The calibration method for line-structured light vision sensor based on a single -ball

- target[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 69: 20-28.
- [18] 段发阶, 刘凤梅, 叶声华. 一种新型线结构光传感器结构参数标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2000, 21(1): 108-110.
- Duan F J, Liu F M, Ye S H. A new accurate method for the calibration of line- structured light sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instruments*, 2000, 21(1): 108-110.
- [19] 曾建新. 激光双目三维成像关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- Zeng J X. Research on key technologies for laser binocular 3D imaging[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [20] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.