

一种简单高精度的线结构光传感器标定方法

张 然

(飞马智科信息技术股份有限公司, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 线结构光三维视觉测量是获取物体表面三维数据的主要方法之一, 传统的线结构光标定结果完全依赖提取光条纹特征点的数量, 实际操作中无法保证提取足够多的特征点来拟合平面。针对这一问题, 设计1种新的线结构光标定方法, 将相机中心与结构光光条纹中心的任一特征点连成直线, 不需求得光条纹中心线所有点的坐标, 只需找到光条纹与棋盘格格边的交点; 将其作为光条纹的特征点, 控制特征点的数量, 基于一次拟合特征点在像素坐标系下的直线方程, 再联立直线方程与棋盘格平面方程, 得到相机坐标系下的特征点坐标, 依次求得3条及以上光条纹的中心坐标; 利用多条不重合的直线拟合平面, 采用二次拟合的方法提高标定精度。通过实验室搭建的线结构光单目相机对本文方法进行标定实验, 结果表明: 特征点到光平面的平均距离为0.052 mm, 该距离在标定误差范围内, 本文方法可有效解决因特征点较少而导致标定误差大的问题。

关键词: 线结构光; 光条纹特征点; 系统标定; 光平面拟合

中图分类号: TN 249 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23095



A Simple and High Precision Calibration Method for Line Structured Light Sensor

ZHANG Ran

(PHIMA Intelligence Technology Co., Ltd, Maanshan 243002, China)

Abstract: Line structured light 3D vision measurement is one of the main methods for obtaining 3D data on the surface of an object, the traditional line structured light calibration results rely entirely on the number of feature points on the extracted light streak, and in practice operations, it cannot guarantee the extraction of enough feature points to fit the plane. To address this problem, a new line structured light calibration method was proposed. The center of the camera was connected to any feature point in the center of the structured light stripe as a straight line, and there was no need to obtain the coordinates of all the points in the center line of the light stripe, but only to find the intersection of the light stripe with the checkerboard grid edge, which was used as the feature point of the light stripe. The number of such points was controlled, and a single linear regression was performed to obtain the equation of these characteristic points in pixel coordinates. Subsequently, this linear equation was combined with the equation of the chessboard plane to derive the corresponding feature point coordinates in the camera coordinate system. This process was repeated for three or more non-overlapping light stripes, enabling the fitting of a plane using multiple lines and enhancing calibration accuracy through a second-order regression. An experimental calibration was conducted using a line-structured light monocular camera setup in a laboratory environment. The results show an average distance of 0.052 mm between the characteristic points and the light plane, which falls within the acceptable calibration error range. This demonstrates that the proposed method can effectively solve the problem of large

收稿日期: 2023-06-13

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(2108085MF225)

作者简介: 张然(1985—), 男, 安徽马鞍山人, 工程师, 主要研究方向为机器视觉技术及应用。

引文格式: 张然. 一种简单高精度的线结构光传感器标定方法[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(3):314-320.

calibration errors caused by a limited number of feature points.

Keywords: line structured light; optical stripe feature points; systematic calibration; optical plane fitting

随着计算机视觉的发展,三维扫描技术^[1-4]被越来越广泛用于工业制造、文物修复、工程建模等领域。三维扫描技术可分为接触式和非接触式,接触式三维扫描方法效率较低、易使扫描仪头部产生形变、成本较高;非接触扫描可通过光学、声学等方式获取物体的三维坐标。常用的非接触扫描方法为基于线结构光^[5-6]的光学三维扫描方法,扫描原理为线结构光光源将光投射至物体表面,形成受物体表面调制而形变的光条,通过相机获取带有光条的物体图像,再通过相机内外参数^[7]和结构光平面方程获取三维点云数据。系统的标定精度决定三维扫描设备的扫描精度,但传统的线结构光传感器标定过度依赖提取特征点的数量,且计算过程复杂、标定精度不高,导致扫描获取的物体信息不全。因此,优化线结构光传感器的标定方法对实现智能化、无损伤、高精度的监测和测量具有较大的现实意义。

在线结构光扫描系统中,最关键的环节是光条纹中心的提取^[8-9]和结构光平面标定^[10-13]。Sun等^[7]提出1种基于透视投影原理的激光二极管视觉测量模型,并提出相应的标定方法,通过二维移动平台将目标移动到预订的位置,利用线阵相机采集目标图像;Yang等^[14]提出1种内径激光束方向的标定方法,激光束在平面内旋转、平移形成旋转射线,由传感器的距离实现激光束的方向校准;Kang等^[15]提出1种基于离散点插值的激光束高精度标定方法,基于角度和离散点插值模型得到靶面上激光光斑的坐标,通过线性拟合得到激光束的方向矢量;陈文亮等^[16]提出1种多线结构光单目视觉测量系统的快速标定方法,可同时标定多个线结构光,线结构光投射到不同高度的立柱端面上,根据物相关系得到端面光条坐标,完成系统标定。目前结构光平面标定算法可分为一维、二维和三维靶标定,其中一维和二维靶标定更方便。周富强等^[17]提出1种基于自由移动的一维靶标的结构光传感器标定方法,在一般试验条件下,该方法可达到平面靶标法的标定精度;韩建栋等^[18]针对线结构光传感器系统标定对设备要求高、标定过程繁琐的问题,提出1种基于三点透视模型的快速标定方法,该方法平均相对测量误差约0.72%,标定时不需昂贵的辅助调整设备,也不需求解坐标系之间的转换矩阵。但上述2种标定法因标定少导致标定精度降低,为实现对线结构光

的高精度标定,于龙龙等^[19]提出1种新的基于二维平面靶标的线结构光标定方法,在一般的实验环境下可弥补以往方法标定点少的缺陷,具有高精度和操作简便的优点,最大差值为0.006 mm,但这种方法因特征点数量多导致计算过程复杂;现场操作中,难以提取全部且准确的特征点,且标定的特征点越多特征点坐标误差就越大,导致标定结果不精确。鉴于此,提出1种基于光条纹中心线与棋盘格格边相交特征点的线结构光传感器标定方法,以期在有效提高线结构光标定精度的同时,减少因特征点不足导致的标定误差。

1 线结构光传感器标定方法的设计

设计1种基于光条纹中心线交点的线结构光传感器标定方法,标定流程为:标定出相机的内参矩阵、旋转矩阵、平移矩阵、焦距等参数,提取光条纹中心线,并计算出中心线与棋盘格格边相交的特征点在像素坐标系下的坐标;根据特征点坐标拟合光条纹直线在像素坐标系下的直线方程(一次拟合),将像素坐标系下的光条纹直线方程转换为相机坐标系下的直线方程;确定相机原点与光条纹直线形成的光平面在相机坐标系下的平面方程,以及棋盘格所在平面在相机坐标系下的平面方程,联立2个平面方程,求出平面的交线即光条纹直线在棋盘格所在平面坐标系下的方程。同理,获得多条光条纹直线,最终拟合出他们在相机坐标系下形成的光平面(二次拟合)。

1.1 线结构光传感器模型

线结构光发射器将线结构光发射至被测物体表面,在物体表面调制形成不规则光条纹,通过相机获取物体表面的光条纹图像;在光条纹图像的基础上提取线结构光的光条中心,利用三角测量法求出三维空间点的坐标,通过相机标定和光平面标定获取相机的内外参数和结构光平面参数,从而获取线结构光传感器系统参数。如图1所示, $O_c-x_c y_c z_c$ 为相机坐标系, $O_w-x_w y_w z_w$ 为基于物体的世界坐标系,点 $p(x_w, y_w, z_w)$ 为物体表面激光光条纹上的任一点,点 p' 为点 p 在图像平面的成像点。相机坐标系原点 O_c 与点 p' 相连,直线延长后与物体表面光条纹相交于点 p ,因此点 p 的三维坐标可通过求直线 $O_c p'$ 与光平面的交点获得。

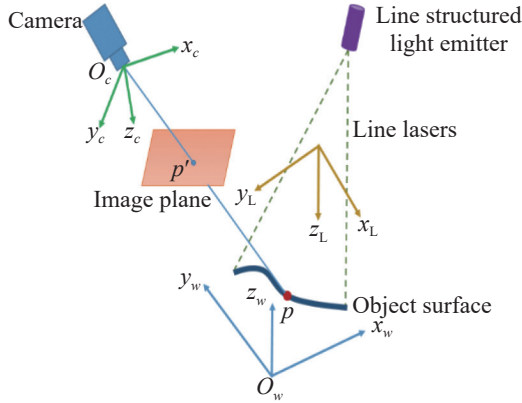


图1 线结构光传感器数学模型

Fig. 1 Mathematical model of linear structured optical sensor

1.2 相机标定

单目相机标定是线结构光传感器系统标定的基础,为对相机进行标定,需求解相机的内外参数矩阵和畸变系数。如图2所示, \$q(u, v)\$ 为基于像素的图像坐标系坐标; \$(x, y)\$ 为以 mm 为单位的图像坐标系的坐标; \$z_c\$ 为相机光轴,与图像平面垂直,图像坐标系原点 \$O\$ 为光轴与图像平面的交点。

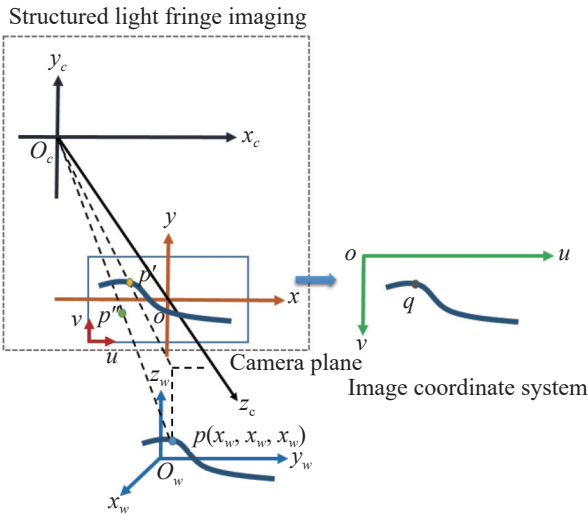


图2 相机数学模型

Fig. 2 Mathematical model of the camera

图2中 \$p(x_w, y_w, z_w)\$ 为空间的任一点,点 \$p'(x_1, y_1)\$ 为点 \$p\$ 在相机平面的实际成像点,点 \$p''(x_2, y_2)\$ 为点 \$p\$ 在相机平面的理想成像点,点 \$q(u, v)\$ 为点 \$p\$ 在图像平面的像素点坐标,故可得到任一像素点在图像坐标系下的坐标转换关系,如式(1)。同时根据相机针孔模型,可得到二维与三维物体坐标的转换关系,如式(2)。由式(1),(2)可得图像平面的像素点坐标与相机平面坐标的转换关系,如式(3)。由相机传感器原理可得相机平面实际成像点 \$p'(x_1, y_1)\$ 与图像平面像素点 \$q(u, v)\$ 的转换关系,如式(4)。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u' \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_2 = f \frac{x_c}{z_c} \\ y_2 = f \frac{y_c}{z_c} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u' \\ 0 & f_y & v' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{x_c}{z_c} \\ \frac{y_c}{z_c} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u = S_x d_x^{-1} x_1 + u' \\ v = d_y^{-1} y_1 + v' \end{cases} \quad (4)$$

式中: \$u', v'\$ 为图像物理坐标与像素坐标之间的偏移量; \$d_x, d_y\$ 为每个像素在 \$x, y\$ 轴上的宽度; \$f_x, f_y\$ 为相机镜头在 \$x, y\$ 轴上的焦距; \$S_x\$ 为不确定的比例因子。

图1为面 \$O_w-x_wy_w\$ 与线结构光投射在物体上的光面重合的数学模型,点 \$p\$ 是线结构光投射在物体上的任意一点,故点 \$p\$ 在面 \$O_w-x_wy_w\$ 上。文中通过张正友相机标定法^[20] 计算出相机内外参数值,再利用相机畸变系数校正图像。由透镜径向畸变原理可得实际成像点 \$p'(x_1, y_1)\$ 与理想成像点 \$p''(x_2, y_2)\$ 的转换关系式(5)。联立式(1)~(5)可求得空间任一点 \$p(x_w, y_w, z_w)\$ 与像素点 \$q(u, v)\$ 的数学转换式(6)。

$$\begin{cases} x_1 [a_1(x_1^2 + y_1^2) + a_2(x_1^2 + y_1^2) + \dots + 1] = x_2 \\ y_1 [a_1(x_1^2 + y_1^2) + a_2(x_1^2 + y_1^2) + \dots + 1] = y_2 \\ \sqrt{x_1^2 + y_1^2} = r \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_2 = f(r_1 x_w + r_2 x_w + r_3 x_w + t_x) / (r_7 x_w + r_8 x_w + r_9 x_w + t_z) \\ y_2 = f(r_4 x_w + r_5 x_w + r_6 x_w + t_y) / (r_7 x_w + r_8 x_w + r_9 x_w + t_z) \end{cases} \quad (6)$$

式中: \$a_1, a_2, \dots\$ 为透镜径向畸变系数; \$r_1, \dots, r_9\$ 及 \$t_1, t_2, t_3\$ 为光平面参数。

1.3 光平面标定

在相机内外参数已知的基础上,需对线结构光平面进行标定,获得光平面方程。采用1个标定棋盘格,将结构光投射到棋盘格上,光条纹与棋盘格格边的交点即为本方法的特征点,如图3。相机采集的带有光条纹图像在图像坐标系下的任一坐标为 \$q(u, v)\$,需对此坐标进行坐标转换,才能获取其在相机坐标系下的坐标。光条纹在相机上的成像如图3。

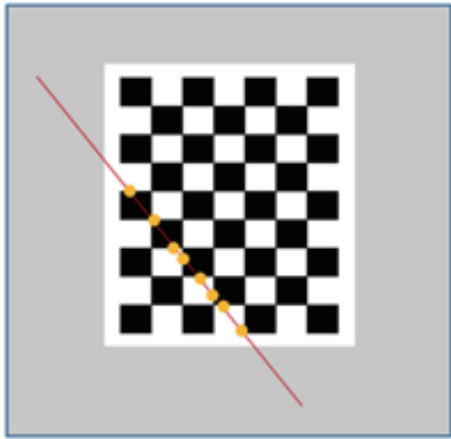


图3 特征点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of feature points

设基于像素为单位的图像坐标系下光条中心线的直线方程如式 (7)。

$$\alpha_1 u + \beta_1 v + \gamma_1 = 0 \quad (7)$$

获得基于像素为单位的直线方程后, 根据坐标转换关系, 利用式 (1) 将其转换为以 mm 为单位的方程, 转换后的光条直线方程在图像坐标系 $O-xy$ 下的方程如式 (8)。

$$\alpha x + \beta y + \gamma = 0 \quad (8)$$

式中 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \alpha, \beta, \gamma$ 为方程的系数。光条直线在相机坐标系 $O_c-x_c y_c z_c$ 下的成像示意图如图 4, 面 O_c-eg 的方程如式 (9)。

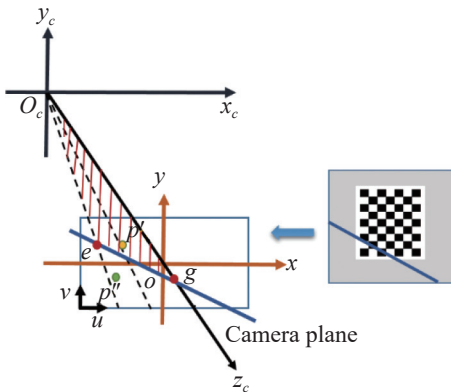


图4 光条纹在相机上的成像

Fig. 4 Imaging of light streaks on the camera

$$\alpha f_x x_c + \beta f_y y_c + \gamma z_c = 0 \quad (9)$$

根据相机坐标系与世界坐标系之间的转换关系, 求得棋盘格所在平面在相机坐标系下的方程:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = z_w \quad (10)$$

其中: \mathbf{R} 为相机坐标系与世界坐标系之间的旋转矩

阵; \mathbf{T} 为相机坐标系与世界坐标系之间的平移矩阵。棋盘格所在平面是基于世界坐标系的, 故 $z_w = 0$, 式 (10) 可简化为:

$$(0 \ 0 \ 1 \ 0) \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

面 O_c-eg 与棋盘格所在平面相交于光条纹直线, 可通过式 (12) 求出光条纹直线在相机坐标系下的直线方程。确定 1 个平面至少需 2 条不重合的直线, 保持光平面不变, 通过改变棋盘格的位姿获取多条不重合的直线, 继续上述方法, 获得其他直线在相机坐标系下的方程, 最终使用最小二乘法拟合求得光平面在相机坐标系下的方程, 如式 (13)。

$$\begin{cases} \alpha f_x x_c + \beta f_y y_c + \gamma z_c = 0 \\ \alpha' f_x x_c + \beta' f_y y_c + \gamma' z_c + \eta' = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\alpha'' x_c + \beta'' y_c + \gamma'' z_c + \eta'' = 0 \quad (13)$$

其中 $\alpha, \beta, \gamma, \alpha', \beta', \gamma', \eta', \alpha'', \beta'', \gamma'', \eta''$ 为棋盘格平面在相机坐标系下的方程系数。

2 仿真结果与分析

通过实验室搭建的线结构光单目相机对本文标定方法进行实验, 实验平台如图 5。相机型号为 MV-CE120-10 GM, 线结构光发射器的工作距离为 300 mm, 线长为 290 mm, 线细为 0.3 mm, 功率为 10 mW。棋盘格每格的标准长度为 25 mm, 相机标定软件为 Matlab R2015b。实验前, 固定相机与线结构光发射器的位置, 调节相机的光圈与焦距, 确保能采集到清晰的图像; 实验过程中, 保持相机的位置和状态不变。

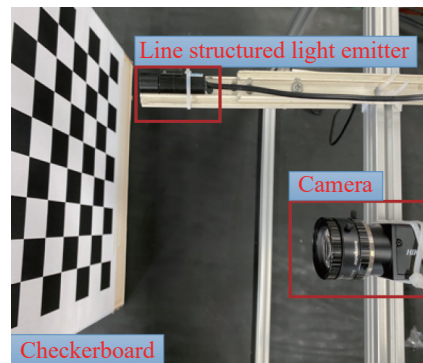


图5 实验平台

Fig. 5 Experimental platform

2.1 相机标定

保持相机与线结构光发射器位置固定, 将棋盘格放置在相机视野内, 拍摄 12 张不同位置的棋盘格

图像,对12张图像进行标定。每张棋盘格图像在相机坐标系下的视图如图6。每张图像的重投影误差如图7,平均误差为0.12 mm,标定结果精确。标定后得到的相机参数如表1,其中包括相机内参、12组旋转矩阵和12组平移矩阵、切向畸变参数和径向畸变参数。

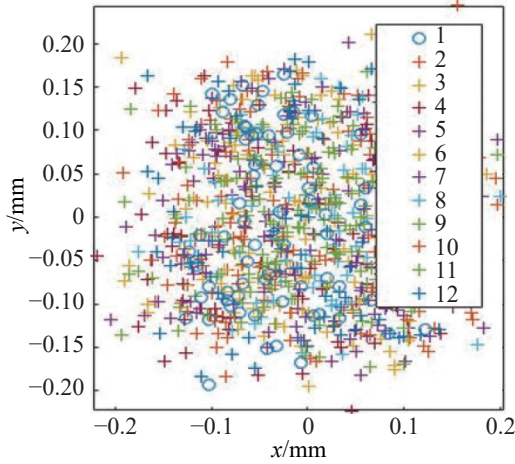


图6 重投影误差散点图

Fig. 6 Scatter plot of reprojection error

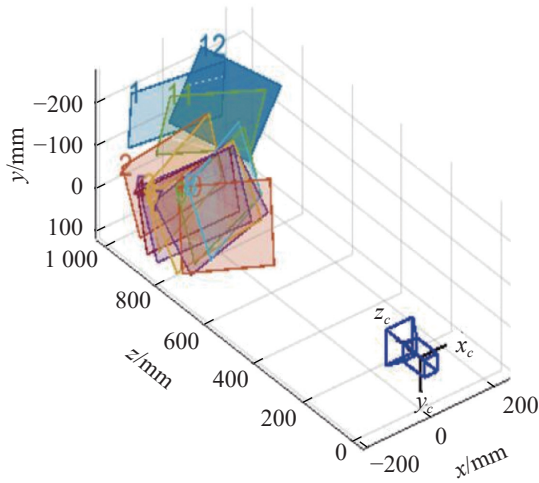


图7 图像在相机坐标系下的视图

Fig. 7 View of the image in the camera coordinate system

表1 相机标定结果

Tab.1 Coordinates under the camera calibration result system

参数名称	参数值/mm
相机内参数	$\begin{bmatrix} 1506.0 & 0 & 0 \\ 0 & 1506.4 & 0 \\ 1029.3 & 552.3 & 1 \end{bmatrix}$
旋转矩阵	$R(12 \text{ groups})$
平移矩阵	$T(12 \text{ groups})$
切向畸变([x,y])	[0,0]
径向畸变([x,y])	[-0.116 2, 0.291 7]
焦距([x,y])	[1 506.0, 1 506.4]
主点([x,y])	[1 029.3, 552.3]

2.2 光平面标定

完成相机标定后,记录相机参数,对线结构光传感器系统位置标定。保持相机与线结构光发射器位置固定,将线结构光投射至棋盘格,拍摄多张不同位置带有线结构光条纹的棋盘格图像。借鉴文献[21]中的标定思想对光平面进行标定,利用图像中棋盘格内所有光条纹像素点的图像坐标和对应的世界坐标对光平面进行标定。由于光条纹像素点的个数较多,且提取的像素点误差较大,无法提取出全部点,非特征点易被误取,如图8。利用本文方法对线结构光传感器进行标定,提取的线结构光条纹的中心特征点如图9。

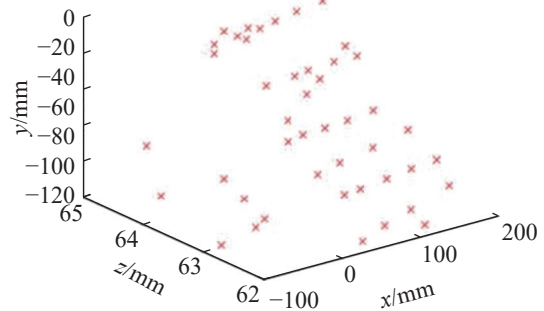


图8 光条与棋盘格格边的交点

Fig. 8 Intersection of light bar and checkerboard grid edge

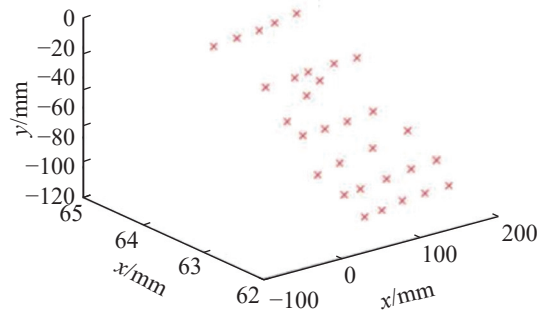


图9 本文方法提取的光条与棋盘格格边的交点

Fig. 9 Intersection of light bar and checkerboard grid edge extracted by this method

使用本文标定方法前,采用将特征点直接拟合成平面的方法,求出部分特征点在图像坐标系和相机坐标系下的三维坐标如表2。其中,表2中(u,v)为图像坐标系中的坐标,(x_c,y_c,z_c)为相机坐标系中的坐标,d表示特征点到平面的距离,计算特征点到拟合平面的平均距离为0.052 mm,该距离误差在标定误差允许范围内。

表2 部分特征点在图像坐标系和相机坐标系下的坐标

Tab.2 Coordinates of some feature points in pixel coordinate system and camera coordinate system

点	u/pixel	v/pixel	x_c/mm	y_c/mm	z_c/mm	d/mm
1	903.0	743.1	72.017	62.705	-85.143	0.057
2	970.0	743.6	77.414	62.711	-84.401	0.028
3	982.0	741.5	81.523	62.722	-83.251	0.025
4	1 055.0	744.2	108.438	62.715	-82.510	0.077
5	1 149.0	744.9	116.011	62.727	-80.412	0.091
6	1 215.0	745.3	60.127	63.523	-30.024	0.062
7	965.0	715.0	62.435	63.711	-29.005	0.066
8	1 020.0	715.1	66.127	63.702	-25.153	0.013
9	1 117.0	715.2	70.301	63.681	-23.214	0.024
10	1 194.0	715.2	78.911	63.657	-24.717	0.016
11	1 260.0	715.6	-50.417	64.378	-16.511	0.058
12	1 269.0	715.3	58.187	63.918	-9.013	0.053
13	1 003.0	628.6	60.147	63.921	-9.002	0.046
14	1 073.0	629.3	73.421	63.978	-8.719	0.076
15	1 260.0	631.1	86.231	64.007	-8.053	0.153
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

相机坐标系下特征点连成的光条纹直线如图10。由图10可看出提取的光条纹直线质量均匀,可为后续拟合平面提供良好的基准参数。对求得的光条纹中心线进行拟合,拟合出的平面如图11,经线结构光平面在相机坐标系下的方程式如式(12),计算得到的方程系数 α'' , β'' , γ'' , η'' 分别为0.019 04, 4.416 88, -0.066 67, -284.246 46, 即方程式为 $0.019\ 04x_c + 4.416\ 88y_c - 0.066\ 67z_c - 284.246\ 46 = 0$ 。

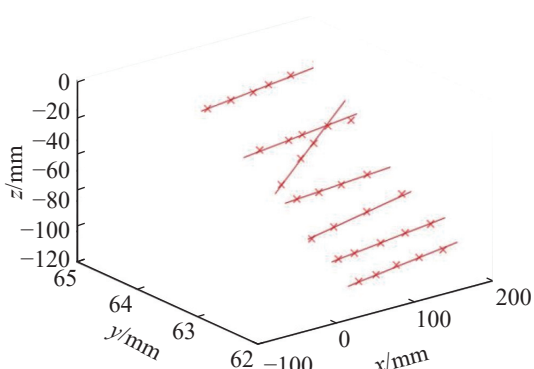


图10 光条纹直线

Fig. 10 Light bar straight line

任意3条光直线上的特征点到平面的距离趋势如图12。由图12可看出:选取的特征点均为光条纹中心线与棋盘格格边交点,故距离趋势基本一致,体现出本文标定方法稳定性高且鲁棒性强。

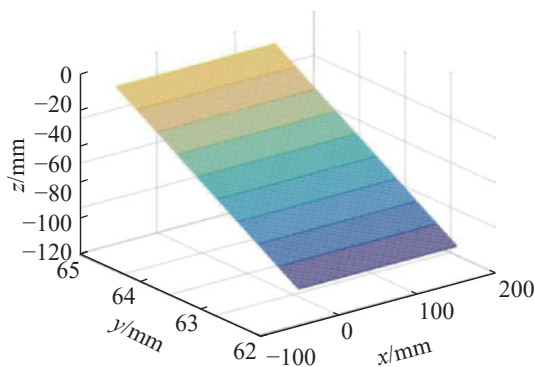


图11 拟合光平面

Fig. 11 Fitted light plane

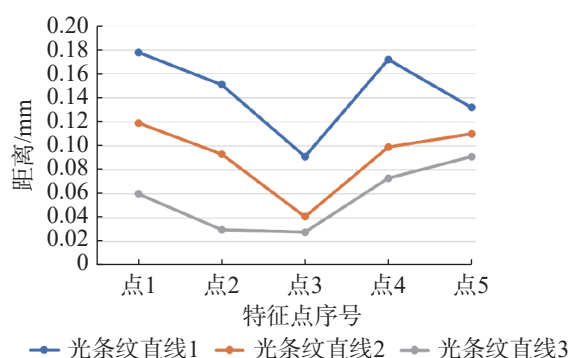


图12 特征点到光平面的距离

Fig. 12 Distance from feature point to light plane

3 结论

为提高线结构光传感器标定的准确性和鲁棒性,设计1种基于线结构光条纹中心与棋盘格格边交点的高精度二次拟合标定方法。将提取出的线结构光条纹特征点坐标拟合成直线,求得该直线与相机坐标系原点形成的平面在相机坐标系下的方程,将此平面方程与棋盘格所在平面方程联立,求得相交直线在相机坐标系下的方程;采用最小二乘法将其拟合平面,求出其在相机坐标系下的平面方程。实验结果表明:特征点到光平面的平均距离为0.052 mm,本文标定方法可有效完成线结构光传感器的标定,标定流程简单,在不提取全部特征点的情况下可保证标定结果的精度,还可降低传统线结构光传感器标定的复杂程度,可有效解决无法提取全部特征点时标定效果不理想等问题。目前,所有的标定方法都需先计算出相机的内外参数,因此下一步设计1种相机标定与线结构光平面标定一体化的标定方法,同时考虑特征点的数量对标定结果产生的影响。

参考文献:

[1] ZHOU F, PENG B, CUI Y, et al. A novel laser vision sensor

- for omnidirectional 3D measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45:1–12.
- [2] ZOU Y, CHEN X, GONG G, et al. A seam tracking system based on a laser vision sensor[J]. *Measurement*, 2018, 127:489–500.
- [3] ZOU Y, CHEN T. Laser vision seam tracking system based on image processing and continuous convolution operator tracker[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 105:141–149.
- [4] ZHUANG Y, YAN F, HU H. Automatic extrinsic self-calibration for fusing data from monocular vision and 3D laser scanner[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(7):1874–1876.
- [5] LU X, WU Q, HUANG H. Calibration based on ray-tracing for multi-line structured light projection system[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24):35884–35894.
- [6] ZHANG Q C, SU X Y, ZOU X P. Calibration of 3D measurement system using multi-sensor with line structured-illuminated laser[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 225–227.
- [7] SUN J, ZHANG J, LIU Z, et al. A vision measurement model of laser displacement sensor and its calibration method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(12):1344–1352.
- [8] QI L, ZHANG Y, ZHANG X, et al. Statistical behavior analysis and precision optimization for the laser stripe center detector based on Steger's algorithm[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11):13442–13449.
- [9] LIU S Y, WANG G R, JIA J P. Design of robot welding seam tracking system with structured light vision[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 23(4):436–442.
- [10] 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, 33:73–86.
- [11] SHI J, SUN Z, BAI S. Large-scale three-dimensional measurement via combining 3D scanner and laser rangefinder[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10):2814–2823.
- [12] SUN B, LI B. Laser displacement sensor in the application of aero-engine blade measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 16(5):1377–1384.
- [13] LILIENBLUM E, AL-HAMADI A. A structured light approach for 3D surface reconstruction with a stereo line-scan system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(5):1258–1266.
- [14] YANG T, WANG Z, WU Z, et al. Calibration of laser beam direction for inner diameter measuring device[J]. *Sensors*, 2017, 17(2):294.
- [15] KANG J, WU B, SUN Z, et al. Calibration method of a laser beam based on discrete point interpolation for 3D precision measurement[J]. *Optics Express*, 2020, 28(19):27588–27599.
- [16] 陈文亮, 董清亮, 刘峰, 等. 三维空间中线结构光与相机快速标定方法[J]. *红外技术*, 2017, 39(1):81–85.
- [17] 周富强, 蔡斐华. 基于一维靶标的结构光视觉传感器标定[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(18):7–12.
- [18] 韩建栋, 吕乃光, 董明利, 等. 线结构光传感系统的快速标定方法[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):958–963.
- [19] 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.
- [20] RAN S, YE L, WANG J L, et al. A novel camera calibration method based on simulated annealing genetic algorithm[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 719:1184–1190.
- [21] ZHANG H, BAO G Q, LIU K. Simple calibration method for three-dimensional imaging system with structured light[J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2019, 56(14):148–156.

责任编辑:何莉