

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006076

# 基于二维平面靶标的线结构光标定\*

于龙龙<sup>1,2</sup>, 李艳文<sup>1,2</sup>, 栾英宝<sup>1,2</sup>, 陈子明<sup>1,2</sup>, 李赫<sup>1,2</sup>

(1. 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004; 2. 河北省并联机器人与机电系统实验室及  
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:**为实现对线结构光的高精度标定,提出一种新的基于二维平面靶标的线结构光标定算法。首先拟合图像坐标系下光条直线方程,通过图像坐标系与相机坐标系的转换关系求解相机坐标系下在图像中的光条直线方程;求解过相机坐标系原点与此直线所确定的平面方程,之后确定二维靶标平面在相机坐标系下的平面方程,此两平面的交线即为标定板上的光条直线在相机坐标系下的方程;每幅标定板图像均做以上处理,通过最终提取出的多组光条中心线拟合激光平面方程。实验表明,在一般的实验环境下,此算法弥补了以往算法的标定点少的缺陷,具有高精度和操作简便的优点,最大差值为0.006 mm。

**关键词:**线结构光; 标定; 二维靶标; 坐标变换

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

## Line structured light calibrating based on two-dimensional planar target

Yu Longlong<sup>1,2</sup>, Li Yanwen<sup>1,2</sup>, Luan Yingbao<sup>1,2</sup>, Chen Ziming<sup>1,2</sup>, Li He<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Hebei Provincial Laboratory of Parallel Robots and Mechatronic Systems and Key Laboratory of Advanced Forging Technology and Science Ministry of Education, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** To achieve high-precision calibration of line structured light, a new line structure cursor calibration algorithm based on two-dimensional planar target is proposed. First of all, the light bar straight line equation in the image coordinate system is fitted. The light bar straight line equation in the image of the camera coordinate system is solved by transforming relationship between the image coordinate system and the camera coordinate system. The plane equation determined by the origin of the camera coordinate system and the straight line is solved. Then, the plane equation of the two-dimensional target plane is determined. The intersection of two planes is the equation of the light bar straight line on the calibration plate of the camera coordinate system. Each calibration board image is processed as above. The laser plane equation is fitted by the finally extracted multiple groups of light bar centerlines. In the general environment, experimental results show that this algorithm can make up for the shortcomings of the existing algorithms with fewer calibration points. It has advantages of high accuracy and easy operation. The maximum difference is 0.006 mm.

**Keywords:** line structured light; calibration; two-dimensional target; coordinate transformation

## 0 引言

线结构光视觉测量技术具有速度快、非接触、大量程、结构简单、精度适中等优势,因此在物体三维重构和工业测量等领域具有广泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>。在线结构光测量系统中,影响其测量精度的因素主要是测量系统标

定的精度,而线结构光平面标定的精度是视觉系统标定中的关键部分。

对线结构光平面标定的现有算法按标定靶物分类可分为:一维靶标的标定、二维靶标的标定和三维靶标的标定。基于一维靶标和二维靶标的标定算法较三维靶标使用起来灵活方便,成本低,并且标定精度高,故适合广泛使用。一维靶标标定算法如周富强等<sup>[3]</sup>提出一种利用消

隐点的一维靶标标定算法,可在大视场现场进行在线标定,该方法所需的标定靶标成本低,加工制造容易,维护和现场操作简单,更重要的是解决了大尺寸结构光视觉测量传感器的标定难题。Han 等<sup>[4]</sup>提出一种基于三点透视(P3P)的标定方法,此算法在靶物上设置3个等距的共线点,根据相机透视投影和平面几何关系求得光平面与平面特征线的交点,移动靶标置若干位置,获得若干控制点,完成光平面标定,该方法的均方根(root mean square, RMS)低于0.24 mm。周京博等<sup>[5]</sup>提出一种基于参考靶标的线性结构光传感器(linear structured light sensor, LSLs)标定方法,通过将参考靶标中心向激光平面投影,得到了靶标中心点的像素坐标所对应的世界坐标,采用多项式拟合得到了像素坐标到激光平面坐标之间的转换关系,实现了传感器的标定,该方法的不足之处在于相对于经典方法多使用了一个参考靶标,这增加了标定参考靶标的步骤,且标定范围受参考靶标大小的限制。二维靶标标定算法如Wei 等<sup>[6]</sup>提出基于消隐线原理的方法进行光平面标定,该方法在500 mm×500 mm的范围内获得的RMS误差为0.134 mm。毕德学等<sup>[7]</sup>利用物方光线交汇原理获得光平面方程参数的标定方法,通过拍摄一个与线结构光相交并以不同姿态随机自由移动的平面靶标的图像(至少3幅),就可同时实现三维视觉传感器CCD和激光平面的快速标定,该方法获得光平面方程参数的平均误差小于5%。Zhou 等<sup>[8]</sup>和杨凯等<sup>[9]</sup>分别提出基于交比不变性的平面靶标标定方法,根据交比不变原理,通过多次移动平面靶标获取多组非共线的控制点,最后利用刚体变换将局部坐标系下的控制点坐标统一到摄像机坐标系中,完成光平面标定,利用该原理,Zhou 等<sup>[8]</sup>获得的RMS误差为0.085 mm,杨凯等<sup>[9]</sup>获得的测量精度为0.09 mm。彭谦之等<sup>[10]</sup>提出了一种基于单应性矩阵的线结构光测量快速标定方法,此标定方法精度一般,满足一定精度要求的线结构光三维扫描。平乙杉等<sup>[11]</sup>提出一种基于单应性矩阵的线结构光标定算法,该方法需获取2幅以上不同位置的光刀图像,从中提取每个光刀图像中的特征点,构成一个光刀平面,并根据光刀平面和相机像平面的单应性关系,计算出单应性矩阵即可完成系统标定,最大残差小于0.05 mm,标准差小于0.02 mm,两个面之间的测量距离相对误差低于1.3%。基于三维靶标的标定算法主要利用高精度的移动靶标或借助于靶标提供的高精度三维约束进行标定,如Dewar 等<sup>[12]</sup>提出的拉丝法、Liu 等<sup>[13]</sup>提出的球形靶标标定法和段发阶提出的锯齿法<sup>[14]</sup>,因加工制造困难,所以应用受到限制。

本文基于二维平面靶标标定算法存在标定点较少而导致标定精度较低的问题,提出一种基于平面棋盘靶标的标定方法,增加了标定点的数量,提高了标定的精度。本文对丰富线结构光标定理论具有重要意义。

## 1 基本原理

对传感器的标定主要包括单目相机标定和线结构光平面标定两部分。单目相机的标定算法目前已经相对成熟,通过单目相机标定可获取图像坐标系与世界坐标系的位置关系。线结构光平面标定是标定线激光器发射出的激光平面在相机坐标系下的空间平面方程。

本文提出的线结构光平面标定算法流程图如图1所示。

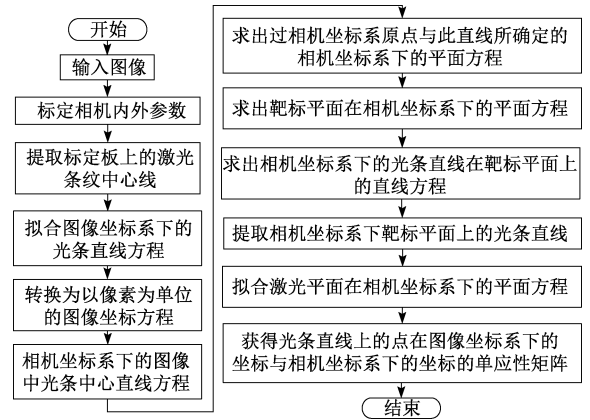


图1 线结构光平面标定算法流程

Fig. 1 Flow chart of the line structured light calibration algorithm

### 1.1 单目相机的标定

在标定线结构光平面之前首先需要对相机的内外参数进行标定。

如图2所示,以摄像机光心(摄像机光心即透镜的中心)为相机坐标系的原点建立相机坐标系,以虚拟成像面的左上角为原点建立图像坐标系,图像坐标系建立在光学系统的右面,因为在推导相机标定的坐标系关系时,为了便于理解,认为光线先通过成像平面,再在相机坐标系上汇聚到一点,故把成像面用虚拟成像面代替了。

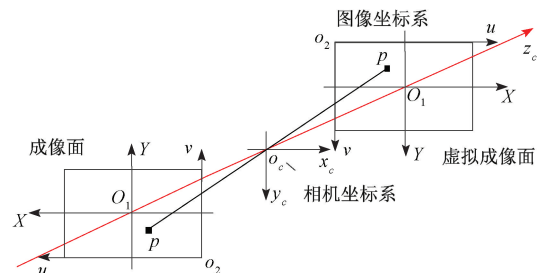


图2 坐标系关系

Fig. 2 Diagram of coordinate system relationship

设点 $p(u, v)$ 为图像坐标系下的坐标,根据张氏标定法<sup>[15]</sup>有:

$$(u, v, 1)^T = \mathbf{H}_1 \cdot (x_w, y_w, z_w, 1)^T \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{H}_1$  为从世界坐标系到图像坐标系的变换矩阵;  $(u, v)$  为  $p$  点的图像坐标, pixel;  $(x_w, y_w, z_w)$  为  $p$  点的世界坐标, mm。

根据坐标系之间转换关系完成对相机的标定。

## 1.2 光平面的标定

在完成相机标定后,计算出相机内外参数的基础上,对线激光平面进行标定,即获取线激光平面在相机坐标系下的平面方程。

为了使光条更易于提取,将激光线投射在棋盘格外,如图3所示。首先能够获得相机采集的光条图像在图像坐标系下的坐标  $(u, v)$ , 为获得被测件上的激光条纹中心点在相机坐标系下的坐标,需要先将图像坐标系下的光条中心线通过最小二乘法拟合出直线方程。

$$a \cdot u + b \cdot v + c = 0 \quad (2)$$

式中:  $a, b, c$  为图像坐标系下的直线方程系数;  $(u, v)$  为图像坐标系下的坐标, pixel。

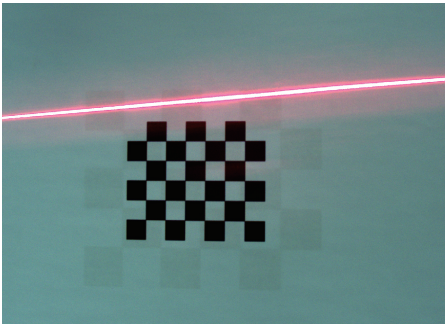


图3 相机采集的标定图像

Fig. 3 Calibration image collected by the camera

提取图3中激光条纹中心线如图4所示,坐标单位为 pixel。因图像的像素以图像的左上角作为原点,图像像素的列数为横向坐标值,图像像素的行数为纵向坐标值,而提取的光条纹中心坐标是以左下角坐标原点,水平方向为  $X$  轴,竖直方向为  $Y$  轴,故提取出的光条纹中心坐标正好与图像中的条纹方向相反。

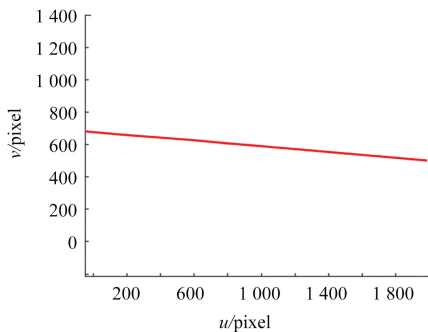


图4 提取的激光条纹中心线

Fig. 4 The extracted laser fringe center line

根据以 mm 为单位的图像坐标系与以 pixel 为单位的图像坐标系的转化关系<sup>[15]</sup>,将直线方程由以 pixel 为单位的图像坐标系下的方程转化为以 mm 为单位的图像坐标系下的方程。

$$(a, b, c) \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = (a, b, c) \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $u_0$  为横向像元数的一半;  $v_0$  为纵向像元数的一半;  $dX$  为光敏面上横向像元的尺寸, mm;  $dY$  为光敏面上横向像元的尺寸, mm;  $X, Y$  为图像坐标系下的横纵坐标, mm;  $(a, b, c)$  为以 pixel 为单位的图像坐标系下的直线方程系数。

则光条中心线在以 mm 为单位的图像坐标系下方程为:

$$A \cdot X + B \cdot Y + C = 0 \quad (4)$$

式中:  $A, B, C$  为光条中心线在以 mm 为单位的图像坐标系下直线方程系数。

光条直线方程系数在以 pixel 为单位和以 mm 为单位的图像坐标系下的转换关系<sup>[15]</sup>:

$$(A, B, C) = (a, b, c) \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  下的光条直线  $l_{ab}$  如图5所示,其直线方程为:

$$\begin{cases} A \cdot x_c + B \cdot y_c + C = 0 \\ z_c = f \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $x_c, y_c, z_c$  为相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  下的坐标, mm;  $f$  为相机焦距, mm。

过摄像机光心  $o_c$  (相机坐标系原点) 与直线  $l_{ab}$  可确定一个平面  $o_c ab$ , 如图5所示。因平面  $o_c ab$  过原点  $o_c$ , 则其平面方程常数项系数为0, 平面方程为:

$$A \cdot f \cdot x_c + B \cdot f \cdot y_c + C \cdot z_c = 0 \quad (7)$$

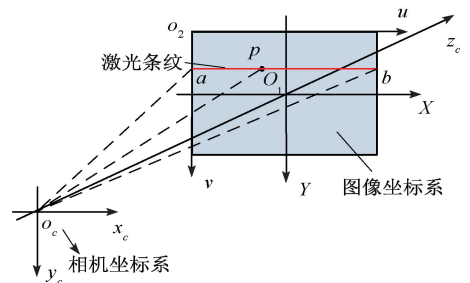


图5 激光条纹成像

Fig. 5 Laser fringe imaging

将世界坐标系  $o_w - x_w y_w z_w$  建立在棋盘靶标平面上,使  $x_w o_w y_w$  平面与棋盘靶标平面共面,如图6所示。因此,棋盘靶标所在平面在世界坐标系  $o_w - x_w y_w z_w$  下的方程为:

$$z_w = 0 \quad (8)$$

式中:  $z_w$  为世界坐标系  $o_w - x_w y_w z_w$  下的  $z_w$  向坐标, mm。

棋盘靶标所在平面(即世界坐标系的  $x_w o_w y_w$  平面)在相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  下的方程为:

$$(0 \ 0 \ 1 \ 0) \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{R}$  为相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  与世界坐标系  $o_w - x_w y_w z_w$  之间的旋转矩阵;  $\mathbf{t}$  为相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  与世界坐标系  $o_w - x_w y_w z_w$  间的平移矩阵。

联立式(7)和(9)可得光条中心线在相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  下的直线方程为:

$$\begin{cases} A_l \cdot x_c + B_l \cdot y_c + C_l \cdot z_c + D_l = 0 \\ A \cdot f \cdot x_c + B \cdot f \cdot y_c + C \cdot z_c = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $A_l, B_l, C_l, D_l$  为棋盘靶标平面在相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  下的平面方程系数。

提取直线方程式(10)在相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  下的坐标,调整标定板的角,采用相同的方法求取相应的相机坐标。将以上求得的空间点坐标运用最小二乘法的方式拟合平面,求得激光平面在相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  下的方程为:

$$A_c \cdot x_c + B_c \cdot y_c + C_c \cdot z_c + D_c = 0 \quad (11)$$

式中:  $A_c, B_c, C_c, D_c$  为激光平面在相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  下的平面方程系数。

求得光条直线上的点在以 pixel 为单位的图像坐标系  $O_1 - XY$  下的坐标与相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  下的标定板上光条直线坐标的单应性矩阵<sup>[15]</sup>:

$$\mathbf{s} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{s}$  为投射在标定板上的光条直线在相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  下的  $z_c$  向坐标, mm;  $\mathbf{H}$  为相机的内参矩阵。

最终通过式(11)和(12)重构出光条中心点在相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  下的坐标,改写成:

$$\begin{cases} f_1(u, z_c) = x_c \\ f_2(v, z_c) = y_c \\ A_c \cdot x_c + B_c \cdot y_c + C_c \cdot z_c + D_c = 0 \end{cases} \quad (13)$$

以上3个方程中的系数均可以通过标定算法求解出

来,从而通过式(13)可将  $x_c, y_c, z_c$  解算出。以上为整个标定及激光条纹中心点在相机坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  下坐标的求解过程。各坐标系关系如图6所示。

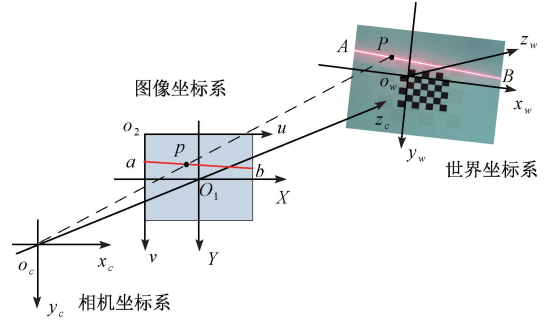


图6 线结构光视觉传感器的数学模型

Fig. 6 Mathematical model of line-structured light vision sensor

### 1.3 实验验证

用张正友标定方法对相机的内外参数进行标定,选用棋盘格作为标定参照物,并且在实验中易操作便于更换标定板。

线激光位移传感器是波长为 650 nm 的一字线激光器,功率为 20 mW,工作电压为 DC 5 V,展角为 90°,线宽为 1 mm。相机选用中国大恒集团的 MER-302-56U3C 水星工业相机,分辨率为 2 048 pixel × 1 536 pixel,镜头为手动调焦的变焦变倍镜头 M3Z1228C-MP,焦距为 10 ~ 40 mm。搭建测量实验平台如图7所示。

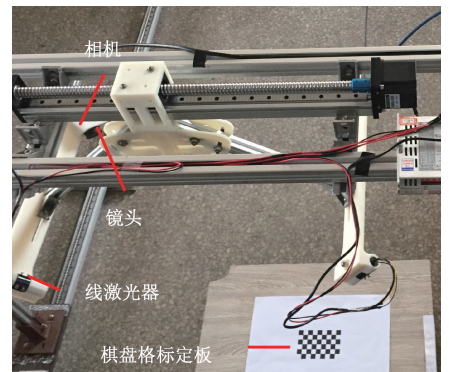


图7 实验平台

Fig. 7 Experimental platform

在对相机和线结构光平面标定之前,调整镜头焦距,并将被测物体放置于相机的景深范围内,且成像清晰,此时镜头焦距固定不变。

用 MATLAB R2016b 中的 Camera Calibrate APP 对相机进行标定,得到相机的内参数矩阵和 15 组<sup>[16]</sup>外参数矩阵,以及径向畸变系数和切向畸变系数,如表1所示。

表1 标定结果

Table 1 Calibration results

参数名称	标定出的参数
相机内参	$\begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3\ 615.26 & 0 & 1\ 003.03 \\ 0 & 3\ 604.47 & 785.82 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
相机外参	15组 $\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
径向畸变	$k_1 = 0.021\ 8$ $k_2 = 0.837\ 2$ $k_3 = 0$
切向畸变	$p_1 = 0$ $p_2 = 0$

表1中相机内参中 $\alpha_x = \frac{f}{dx}$ ,  $\alpha_y = \frac{f}{dy}$ , 其中 $dx$ 与 $dy$ 表示每一个像素在图5的图像坐标系中 $X$ 轴和 $Y$ 轴方向上的物理尺寸, $f$ 为镜头的焦距, $(u_0, v_0)$ 表示在图5所示图像坐标系中 $O_1$ 的坐标,即摄像机光轴与成像靶面的交点;相机外参表示相机坐标系与世界坐标系之间的旋转和平移矩阵。

对相机的内外参数和径向切向畸变标定完成后,对线激光发生器和相机的位置关系进行标定,即标定激光平面在相机坐标系下的平面方程,如图8所示。

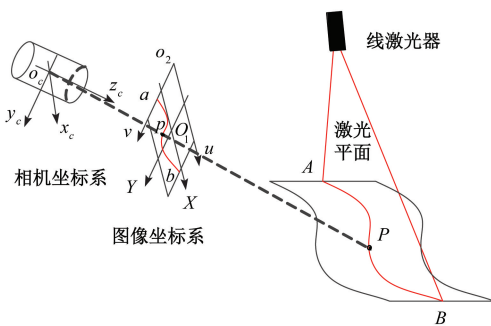


图8 线激光平面与相机的位置关系

Fig. 8 Schematic diagram of the positional relationship between the laser plane and the camera

首先采集在摆动不同角度下的标定板上的激光条纹,利用本文的激光平面标定算法,求得在相机坐标系下不同角度的标定板上光条直线如图9所示。提取光条直线,并拟合平面方程,如图10所示。

激光平面方程如式(11)所示,系数计算得: $A_c = -0.014\ 7$ ,  $B_c = -0.759\ 4$ ,  $C_c = 0.650\ 4$ ,  $D_c = -286.815\ 2$ 。

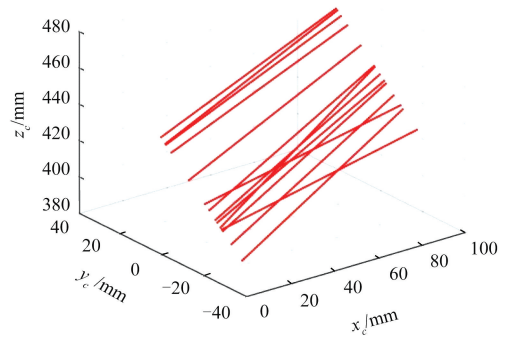


图9 相机坐标系下光条中心线

Fig. 9 Centerline of light bar in the camera coordinate system

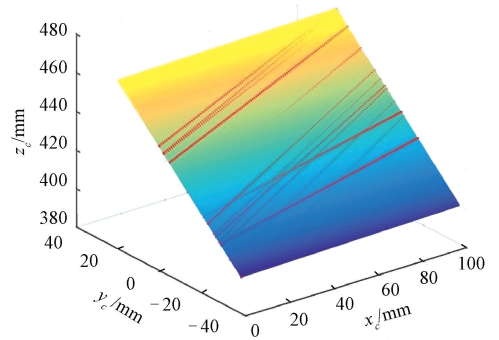


图10 最小二乘法拟合平面

Fig. 10 Least squares fitting plane

为求得被测点的实际坐标,根据相机标定的激光平面参数和相机的内外参数,将式(13)的具体公式解算出来,如式(14)所示。

$$\begin{cases} z_c = -\frac{D_c}{A_c \times (u - u_0)/\alpha_x + B_c \times (v - v_0)/\alpha_y + C_c} \\ x_c = \frac{u - u_0}{\alpha_x} \times z_c \\ y_c = \frac{v - v_0}{\alpha_y} \times z_c \end{cases} \quad (14)$$

式中: $(x_c, y_c, z_c)$ 为被测件的实际检测出的坐标,即转换后的最终坐标; $A_c, B_c, C_c, D_c$ 为标定出的激光平面在相机坐标系下的方程系数; $(u_0, v_0)$ 为以mm为单位的图像坐标系的坐标原点; $(u, v)$ 为所提取的图像坐标系下的光条中心点; $\alpha_x = f/dx$ ,  $\alpha_y = f/dy$ 为尺度因子。

至此,可将激光条纹中心线的图像坐标点通过式(14)转化为实际被测点的坐标。

## 2 测试精度

保持相机与线激光发生器相对位置不变,移走棋盘

格标定靶标,将标准块放置在标准板面上,使其位于相机的视野中,保持标准板面位置不动,保持测试物镜的倍率不变,激光投射在标准块带有标准尺寸的平面上,使用标准块进行精度验证,多次采集并更换标准量块,采集的图像如图 11 所示。

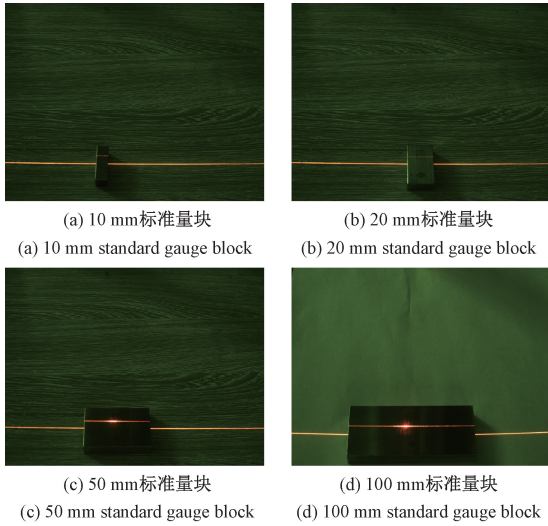


图 11 标准量块采集图像

Fig. 11 Acquisition of standard gauge blocks

基于消隐线原理的激光平面标定算法<sup>[6]</sup>原理如图 12 所示分为两个阶段:1) 获取消隐线的表达式,光条的投影图像交靶标平面的消隐线于一消隐点,移动靶标,可获得第 2 个消隐点,两消隐点的方向矢量通过叉积运算获得光平面方向矢量;2) 通过图 12(a) 中所示  $h$  和  $\varphi$  计算光平面的距离参数。

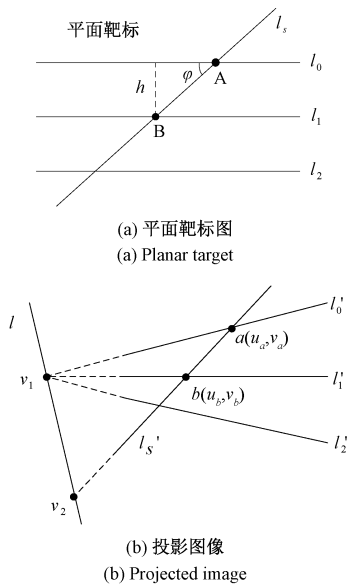


图 12 平行线约束标定方法原理

Fig. 12 Diagram of the calibration method based on parallel straight line constraint

基于消隐线原理的激光平面标定算法简而言之由图 12(b) 中的点  $a$  和点  $b$  计算出线激光的方向矢量,即激光平面方程的方向参数值;由图 12(a) 中的点  $A$  和点  $B$  计算出线激光平面的距离参数值,即激光平面方程的常数项参数值。

基于交比不变性的平面靶标标定算法<sup>[9]</sup>以平面靶标作为标定对象,首先采用张正友的方法标定出了摄像机内部参数,然后引入了线结构光和自由移动平面靶标,以各种位姿下靶标内的激光条纹与棋盘格角点边线交点作为特征点,根据交比不变性原理,求取特征点在摄像机坐标系下的坐标,并拟合出了结构光平面方程,完成整个测量系统的标定。此标定方法的标定点为图 13 中的红色点。

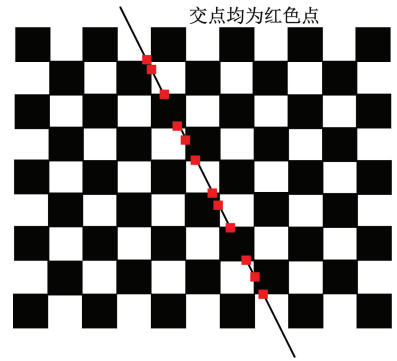


图 13 平面靶标特征点

Fig. 13 Feature points of the planar target

本文的标定算法通过 15 组激光条纹空间直线对激光平面进行拟合,如图 9 和 10 所示。因此明显本文所提算法的标定点多,标定点越多,标定精度越高。

对 3 种算法进行精度对比。对标准量块进行多次图像采集,本文采用 Steger 法<sup>[17]</sup>对投射在标准量块上的激光条纹进行提取中心线,之后将本文所提算法、基于消隐线原理的激光平面标定算法与基于交比不变性原理的标定算法分别结合式 (12) 和激光平面方程对标准量块上的光条中心线长度进行计算,得出其在相机坐标系下的坐标,即量块的测量尺寸。重复以上操作,将多次测量的标准量块测量尺寸计算平均值进行比较,如表 2 所示。

表 2 量块尺寸与测量值比较

Table 2 Gage block size and measured value comparison

		mm		
标称长度	标准量块尺寸	本算法测量尺寸的均值	消隐线算法测量尺寸的均值	基于交比不变性原理标定算法测量尺寸的均值
10	10±0.000 20	9.997	9.886	10.035
20	20±0.000 30	20.005	20.163	20.039
50	50±0.000 50	50.006	50.182	50.052
100	100±0.000 60	100.005	100.201	100.067

### 3 结 论

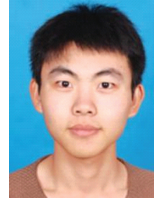
本文将提取出的图像坐标系下的激光条纹坐标运用最小二乘法拟合直线,此条直线和相机坐标系原点所组成的平面与二维靶标平面相交形成一条空间直线,通过调整标定板位姿的方式,得到多条不相交的空间直线,由这些空间直线拟合出线结构光平面。此算法以空间直线代替空间点的方式拟合线结构光平面,弥补了标定点少的缺陷。在一般实验环境下(室内、常温、无外界强光干扰的实验环境),实验结果表明,此算法提高了标定精度,且标定过程操作简便。但此算法标定点的坐标仍需相对应的相机内外参数参与运算,导致标定过程计算量仍然较大,其也为本算法的不足之处,故如何探究出一种不仅提高标定点的数量,而且相机的内外参数不参与标定过程运算的算法,仍是线结构光标定的难题。

### 参考文献

- [1] 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.  
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.
- [2] 丁少闻,张小虎,于起峰,等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电学进展, 2017, 54(7): 21-35.  
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): 21-35.
- [3] 周富强,蔡斐华. 基于一维靶标的线结构光视觉传感器标定[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 7-12.  
ZHOU F Q, CAI F H. Calibrating structured-light vision sensor with one-dimensional target[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 7-12.
- [4] HAN J D, LV N G, DONG M L, et al. Fast method to calibrate structure parameters of line structured light vision sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 958-963.
- [5] 周京博,李玥华,秦志英,等. 基于参考靶标的线结构光传感器标定[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 169-176.  
ZHOU J B, LI Y H, QIN ZH Y, et al. Calibration of linear structured light sensors based on reference targets[J]. Chinese Journal of Optics, 2019, 39(4): 169-176.
- [6] WEI Z Z, LI C Q, DING B S. Line structured light vision sensor calibration using parallel straight lines features[J]. Optic-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(17): 4990-4997.
- [7] 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. A new method for field calibration of structured light vision sensors based on laser intersecting lines[J]. Journal of Instrumentation, 2009, 30(8): 1697-1701.
- [8] ZHOU F Q, ZHAANG G J. Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations [J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(1): 59-67.
- [9] 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 line structured light vision measurement system based on free target [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2016, 33(9): 1066-1070.
- [10] 彭谦之,杨雪荣,成思源,等. 基于单应性矩阵的线结构光测量快速标定方法研究[J]. 机电工程, 2019, 36(6): 613-617.  
PENG Q ZH, YANG X R, CHENG S Y, et al. Research on the rapid calibration method of line structured light measurement based on the homography matrix [J]. Mechanical and electrical engineering, 2019, 36(6): 613-617.
- [11] 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 SH, LIU Y K. Simple calibration method of line structured light system based on homography matrix[J]. Photoelectric Engineering, 2019, 46(12): 38-45.
- [12] DEWAR 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.
- [13] LIU Z, LI X J, LI F J, et al. Calibration method for line-structured light vision sensor based on a single ball

- target[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 69: 20-28.
- [14] 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 SH H. A new accurate method for the calibration of line structured light sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, 21(1): 108-110.
- [15] ZHANG ZH Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [16] 孔繁栋. 苹果采摘环境的多目标识别及三维重构[D]. 秦皇岛:燕山大学,2019:34-38.
- KONG F D. Multiple objects recognition and 3D reconstruction of apple picking environment [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019:34-38.
- [17] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2):113-125.

## 作者简介



**Yu Longlong** received his B.Sc. degree from Tangshan University in 2017. He is currently a M.Sc. candidate at Yanshan University. His main research interests include machine vision, image processing and three-dimensional measurement of structured light.



**Li Yanwen** (Corresponding author) received her B.Sc. degree from China Agricultural University in 1989, and received her Ph.D. degree from Yanshan University in 2005. She is currently a professor at Yanshan University. Her main research interest includes robotics.

于龙龙,2017年于唐山学院获得学士学位,现为燕山大学硕士研究生,主要研究方向为机器视觉、图像处理及结构光三维测量。

E-mail: 1572334524@qq.com

李艳文(通信作者),1989年于中国农业大学获得学士学位,2005年于燕山大学获得博士学位,现为燕山大学教授,主要研究方向为机器人技术。

E-mail: ywl@ysu.edu.cn