

# 高效线结构光视觉测量系统标定方法

李爱娟, 辛睿, 武栓虎\*

烟台大学计算机与控制工程学院, 山东 烟台 264005

**摘要** 线结构光视觉测量系统参数标定是三维测量应用的首要步骤,其中光平面特征点的稳定获取最为关键。针对平面标靶的特点和基于交比不变定理获取特征点方法的不足,提出一种高效的基于相机投影矩阵和单应矩阵的标定法。首先,通过平面标靶特征点与其世界坐标对应关系计算出单应矩阵,然后根据相机投影矩阵和单应矩阵一次计算出光平面和标靶的交线上所有特征点。实验结果表明,本文方法可以利用所有的特征点,稳定性好,易实现,能达到需要的精度。

**关键词** 机器视觉; 线结构光; 交比不变原理; 单应矩阵; 投影矩阵

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.221505

## Efficient Calibration Method for Line-Structured Light Vision Measurement System

Li Aijuan, Xin Rui, Wu Shuanhu\*

School of Computer and Control Engineering, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China

**Abstract** Parameter calibration of a line-structured light vision measurement system is the first step required for three-dimensional measurement applications, wherein the most important task is stable acquisition of the feature points on the optical plane. An efficient calibration method is proposed based on a camera projection matrix and a homography matrix considering the characteristics of planar targets as well as the deficiency of the method of obtaining feature points based on the cross-ratio invariant principal. First, the homography matrix is calculated using the corresponding relationship between the feature points on the plane target and their world coordinates. Subsequently, all feature points lying on the intersection of the optical plane and target can be obtained simultaneously based on the camera projection and homography matrices. The experimental results indicate good stability and simple implementation for the new method, as well as high accuracy due to the utilization of all feature points.

**Key words** machine vision; line-structured light; cross-ratio invariant principle; homography matrix; projection matrix

**OCIS codes** 150.0155; 150.1488; 150.6910

## 1 引言

线结构光测量是机器视觉领域的一种典型测量手段,它通过向目标表面投射激光平面,从而获取该平面与待测目标交线处的三维点坐标,具有非接触、高速、高精度、强抗干扰能力的特点。线结构光测量在三维地貌测量、目标轮廓提取、考古、表面贴装技术(SMT)封装电路板在线检测、焊接、车门

涂装瑕疵检测等领域得到了广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。

当前对线结构光测量技术的研究主要包括 3 个方面<sup>[5]</sup>:测量模型、光条中心提取和传感器标定。本文的重点主要集中在传感器标定方面,包括单相机透视模型的标定和光平面的标定。单相机透视模型事先可以通过各种技术进行标定,如 Zhang<sup>[6]</sup>的方法。因此,目前的研究主要集中在光平面传感器的标定上。Huynh 等<sup>[7]</sup>利用三维标靶和交比不变定

收稿日期: 2019-04-19; 修回日期: 2019-05-13; 录用日期: 2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61802331)、山东省青年博士基金(ZR2018BF008)

\* E-mail: wushuanhu@ytu.edu.cn

位方法解决了光平面的特征提取,但高精度三维标靶制作成本太高,不利于推广应用。Zhang 等<sup>[8]</sup>采用一种更灵活的标定方法,采用的标靶由光电瞄准设备和三维移动平台构成,并基于双重交比不变原理,获取光平面上的特征点,同样成本太高。随着相机标定方法的提出<sup>[6]</sup>,文献[9-11]提出利用自由移动平面标靶的标定方法,但这些方法都是基于交比不变原理并利用平面标靶上部分特征点(在一条直线上)来获取光平面上少量的特征点,因此还有改进空间。另外,文献[11]采用的是双相机估计特征点的三维坐标。

针对基于交比不变原理技术获取光平面特征点数量少、计算繁琐的问题,本文结合平面标靶的成像特点和相机透视模型,提出一种基于相机透视投影矩阵和单应矩阵获取特征点的的标定方法。新方法可以高效快速地计算出光平面与标定板交线上的任何标定,能有效解决提取标定少的问题,进一步提高了标定的稳健性和精度。

## 2 线结构光视觉系统测量模型

线结构光视觉测量系统主要由线激光发射器和相机组成,其中,为保证测量精度,相机成像方向和光平面投射方向夹角在  $30^\circ \sim 60^\circ$  为宜。在相机和光源距离一定的情况下,夹角越小,测量距离越远,相机成像对目标的分辨能力越差,因此在同样的像素误差下,夹角越小,对应的实际测量误差越大。事实上,关于夹角的问题,目前尚无定论,可根据实际测量距离范围和系统的整体结构作适当调节<sup>[4]</sup>。通过激光发射器发射激光并投射到物体表面,根据在物体表面形成的激光交线的图像像素坐标,就可计算目标表面和激光平面交线上所有点的三维坐标,如图 1 所示。如果增加第三维运动信息将交线轮廓拼接起来,就能精准检测复杂目标表面的曲面轮廓。

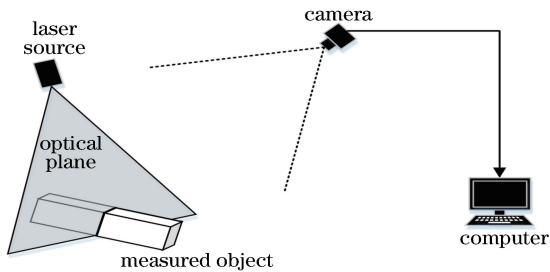


图 1 测量系统工作原理

Fig. 1 Working principle of measuring system

线结构光测量系统标定由相机参数标定和光平面标定两部分组成。单相机标定目前普遍采用

Zhang<sup>[6]</sup>的算法事先进行标定,主要参数有相机投影矩阵和镜头畸变参数,相机投影测量模型为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $s$  为常比例系数;  $[u, v]^T$  为目标点图像坐标;  $\mathbf{K}$  为投影矩阵,也称内参矩阵;  $f_x$  和  $f_y$  分别为相机在  $x, y$  方向焦距参数;  $c_x$  和  $c_y$  为成像主点(光轴和成像平面交点);  $[x_c, y_c, z_c]^T$  是相机坐标系下的点的三维坐标。

光平面模型表示为

$$\begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = h, \quad (2)$$

式中,  $[n_x \ n_y \ n_z]$  是光平面的单位法向量,  $[x_c, y_c, z_c]^T$  是在相机坐标系下光平面上点的三维坐标,  $h$  是相机坐标原点到激光平面的垂直距离。由于相机和激光传感器夹角固定,  $h$  是常数。

首先注意到计算光平面与目标交线的三维坐标时,由于(1)式中含有常比例系数  $s$ , 因此得到的三维坐标具有不确定性,但可以通过光平面方程(2)式,将比例系数去掉,得到真实的三维坐标。

## 3 光平面标定方法

为便于比较,首先描述基于交比不变原理的光平面标定方法及其不足,然后介绍本文提出的基于相机投影模型和单应矩阵的方法。

### 3.1 基于交比不变原理的光平面标定

交比不变原理是线性分式变换的一种,是空间直线上的点在透视投影变换前后其各点之间距离比例保持不变的方法<sup>[8]</sup>。如图 2 所示,激光面与标定板相交形成一条直线,由于光平面与标靶的相交线

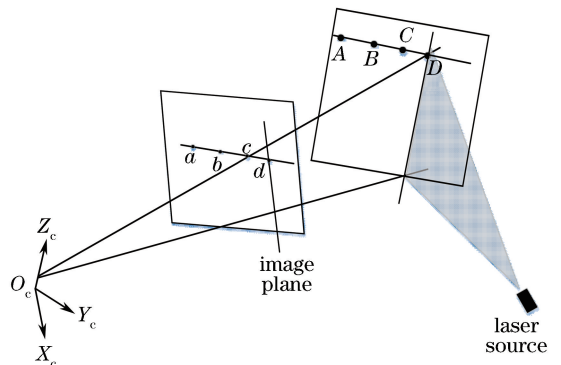


图 2 交比不变原理示意图

Fig. 2 Schematic of cross-ratio invariant principle

不一定和平面标靶上特征点重合,因此其对应标靶上的三维坐标无法估计。根据交比不变原理,已知平面标靶上共线的三个特征点(A,B,C)的精确坐标,就可根据图像平面共线特征点(a,b,c)形成的直线和激光线的交点d计算出对应的世界坐标D。因此,利用标靶上多条共线特征点就可求出交线上多个特征点。移动平面标靶多次(大于1),利用交比不变原理估计多个(至少3个点)非共线三维特征点即可标定光平面。

可以看出,基于交比不变原理的光平面标定方法每次仅能得到一个光平面特征点,而且步骤繁琐。其精度取决于标靶上部分共线特征点提取的精度,稳健性不足。因此,如果可以利用标靶上所有特征点一次性估计相交直线上所有像素点的三维坐标,稳健性将大大提高。

### 3.2 基于相机投影矩阵和单应矩阵的标定方法

单应矩阵表示一个平面到另一个平面的投影映射,即对于多个共面的特征点,经过单应变换之后,其对应的成像特征点也是共面的。如图3所示,棋盘格上的A',B',C',D'点分别对应投影图像上的a',b',c',d'点,对应关系表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{H}$  为单应矩阵,  $[x_w, y_w]^T$  为对应的标靶平面上点的三维坐标。

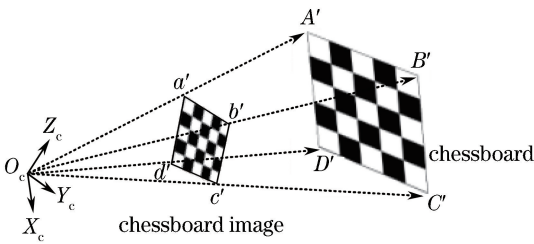


图3 单应矩阵平面投影示意图

Fig. 3 Schematic of plane projection of homography matrix

考虑平面标靶的相机成像模型,有

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{K} [r_1 \ r_2 \ r_3 \ t] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} [r_1 \ r_2 \ t] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中,  $[r_1, r_2, r_3]$  和  $t$  分别为标靶的旋转向量和平

移向量,  $\mathbf{H}$  为平面标靶到图像平面的单应矩阵。在实际标定时,根据标靶上所有特征点和对应的图像像素坐标,就可根据(3)式一次确定单应矩阵  $\mathbf{H}$ <sup>[6]</sup>。得到单应矩阵后,任何图像空间中像素坐标对应的世界坐标就可按照(4)式计算,即

$$\begin{bmatrix} x_w/s \\ y_w/s \\ 1/s \end{bmatrix} = \mathbf{H}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

对应的相机坐标系下的特征点可按照(4)式计算,即

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

与光平面相交直线上的任何三维坐标可以一次性估计,而不必根据交比不变原理多次计算。另外,利用基于相机投影矩阵和单应矩阵的标定方法计算光平面上特征点三维坐标时,采用了标靶上全部特征点(用来计算单应矩阵),因此该算法的稳健性更好。

光平面的实际标定操作如图4所示。具体的标定过程如下。

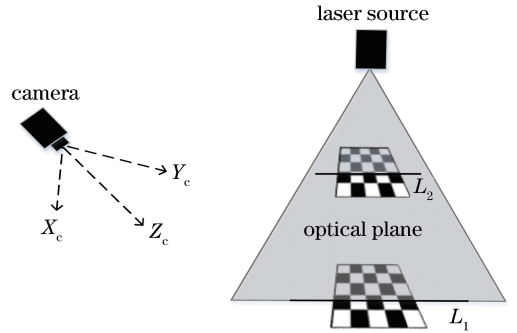


图4 标定操作示意图

Fig. 4 Schematic of calibration operation

1) 标定相机,得到相机的投影矩阵  $\mathbf{K}$  和镜头的畸变参数。

2) 使用结构光视觉测量系统,并移动标靶拍摄获取2张不同位置的图像。光平面与标靶的交线分别为  $L_1, L_2$ 。

3) 使用相机内参对获取的图像进行畸变矫正。

4) 在矫正的图像上检测光平面与标靶的两条交线,并进行相关的处理并拟合得到相应的直线方程。

5) 对拟合的两条直线方程分别进行采样,并分别使用基于相机投影矩阵和单应矩阵的标定方法计算其在相机坐标下的三维坐标,总共得到  $N$  个特征点。

6) 对得到的  $N$  个光平面特征点,使用最小二乘法拟合平面,得到归一化的光平面方程: $n_x \times x_c + n_y \times y_c + n_z \times z_c = l$ ,注意  $[n_x, n_y, n_z]^T$  必须是归一化的单位法向量,其中,  $l$  表示相机坐标原点到激光平面的垂直距离,  $l > 0$ 。

7) 利用得到的光平面方程和相机模型按照线结构光视觉系统测量模型进行三维测量。

(5)式和(6)式中单应矩阵  $H$ 、 $H^{-1}$  及  $K^{-1}H$  可以利用标靶上所有特征点和相机投影矩阵一次计算完成,移动一次标靶就可获得光平面和目标交线上所有特征点的三维坐标。而利用交比不变原理在获取特征点时,每次只能获取有限个特征点,在获取同样多特征点的条件下,需要多次移动标靶,效率较低。比如,针对具有  $5 \times 5$  特征点的标靶,每次只能获取交线上 5 个特征点,而每个特征点只能利用标靶上 3 个共线特征点依据交比定理分别计算。由于在识别获取标靶上的特征点时精度不一,每次依据 3 个共线特征点计算交线上一个特征点,稳定性较差,解决的方法是多次移动标靶,获取足够多的特征点。整体比较而言,本文算法更加高效和稳定。

## 4 实验结果

为验证本文方法的有效性,针对实际图像进行



图 5 光条直线预处理示意图。(a)处理前;(b)处理后

Fig. 5 Schematic of light strip line pre-processing. (a) Before processing; (b) after processing

另外,表 2 给出了与文献中有关方法的结果比较。值得一提的是,测量精度与光平面和相机的夹角、测量距离、标靶精度、图像获取环境有关。实验中使用的激光器成像效果不理想(如图 5 所示),对

具体测试。采用 130 万像素的工业相机,分辨率为  $1280 \times 1024$ ,采用  $7 \times 7$  棋盘标靶,精度在 0.05 mm 左右,角点(特征点)距离为 25 mm。线结构光与相机夹角为  $30^\circ$  左右,目标测量距离为 700 mm 左右。按照标定步骤,首先标定相机,然后移动棋盘获取两幅不同位置处线结构光和标靶的交线图像。为提高标定精度,需要对获取的直线进行预处理。本文采用形态算子进行预处理,首先选取合适的阈值二值化,然后先腐蚀后膨胀去掉毛刺,图 5 为初步的处理结果,最后采用最小二乘法拟合直线,提取中心直线,进而采样得到需要的特征点像素坐标。在本实验中每条直线特征点采样个数为 20。

利用提取的特征点像素坐标按照本算法计算光平面的三维坐标,并标定光平面,即可得到标定后的线结构光视觉测量系统的测试结果。表 1 为部分检测的三维特征点坐标和测量得到的三维特征点坐标(取小数点后 3 位)的比较。取所有测量点的平均误差来表示平均精度。结果表明,本算法的平均精度在 0.136 mm 左右。如表 2 所示,不同算法比较时,测量距离均不相同,测量距离越大,相机成像对目标的分辨能力越差,同样的像素误差对应的测量误差越大。因此在同样的测量误差下,测量距离大的算法占优势。

光条中心的精确提取有一定影响。另外,相机分辨率也不高,因此在更好的实验条件下,本文算法利用了所有标靶上的特征点,具有更好的稳健性,但在精度上还有进一步的提高空间。

表 1 测量系统部分测量结果

Table 1 Partial measured results of measurement system

Serial number	Real data /mm	Measuring data /mm	Error /mm
1	(-86.728, 9.156, 528.699)	(-86.595, 9.182, 528.731)	0.138
2	(-86.500, 9.158, 528.704)	(-86.368, 9.184, 528.737)	0.137
3	(-86.273, 9.160, 528.709)	(-86.141, 9.186, 528.743)	0.137
4	(-86.045, 9.162, 528.714)	(-85.914, 9.188, 528.749)	0.136
5	(-85.817, 9.164, 528.718)	(-85.687, 9.190, 528.755)	0.137
6	(-85.590, 9.166, 528.723)	(-85.460, 9.192, 528.760)	0.136
7	(-85.362, 9.168, 528.728)	(-85.233, 9.194, 528.766)	0.136
8	(-85.134, 9.170, 528.733)	(-85.006, 9.196, 528.772)	0.136
9	(-84.907, 9.172, 528.738)	(-84.779, 9.198, 528.778)	0.135



表2 标定方法结果比较

Table 2 Comparison of results from different calibration methods

Method	Experimental equipment	Measuring distance /mm	Error /mm
Method in Ref.[5]	Camera and laser projector	600	0.1453
Method in Ref.[6]	Camera, LCD projector and two-dimensional translation table	900	0.3334
Method in Ref.[7]	Camera, laser projector and mobile platform	500	0.0900
Proposed method	Camera and laser projector	700	0.1363

## 5 结 论

基于自由移动标靶和基于交比不变原理计算光平面特征点的方法具有局限性,提出一种基于相机投影矩阵和单应矩阵的线结构光标定方法。其优点是可根据标靶上全部特征点计算出单应矩阵,并结合相机投影矩阵直接计算得到光平面和标靶交线上任何特征点的三维坐标。相对基于交比不变原理计算特征点的繁琐步骤,本文算法稳定性更好,效率更高而且操作简便,值得进一步推广。未来在更好的实验条件下,其精度还有进一步提高的空间。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Y, Su X Y. A modified three-dimensional object recognition based on structure light projection [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, 19(11): 1561-1565.  
王莹, 苏显渝. 改进的基于结构光投影的三维物体识别[J]. *光电子·激光*, 2008, 19(11): 1561-1565.
- [2] Sun C K, Wang Z X, Zhang X D, *et al.* 3D measurement method for the tire tip in the laser vision alignment system for automobile wheels [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2002, 13(9): 959-961.  
孙长库, 王志雄, 张效栋, 等. 激光视觉车轮定位系统中胎冠 3D 坐标的求取[J]. *光电子激光*, 2002, 13(9): 959-961.
- [3] Zhan K F, Chen W J, Li W S, *et al.* Line laser 3D scene reconstruction system and error analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1204004.  
詹坤峰, 陈文建, 李武森, 等. 线激光三维场景重建系统及误差分析[J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1204004.
- [4] Guo J C, Zhu Z M, Yu Y F, *et al.* Research and application of visual sensing technology based on laser structured light in welding industry [J]. *Chinese*

*Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1200001.

郭吉昌, 朱志明, 于英飞, 等. 焊接领域激光结构光视觉传感技术的研究及应用[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1200001.

- [5] Zhang X, Zhang J. Summary on calibration method of line-structured light [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020001.  
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] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [7] 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.
- [8] Zhang G J, Wei Z Z. A novel calibration approach to structured light 3D vision inspection [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(5): 373-380.
- [9] Xu L, Zhang Z J. Calibration in structured light system using coplanar target [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2009, 20(8): 1063-1069.  
许丽, 张之江. 基于共面靶标的结构光标定方法[J]. *光电子·激光*, 2009, 20(8): 1063-1069.
- [10] Yang K, Yu H Y, Yang C. Calibration of line structured-light vision measurement system based on free-target [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2016, 33(9): 1066-1070.  
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.
- [11] Li R, Xiong X M. A calibration method of line structure light plane based on checkerboard [J]. *Instrumentation Customer*, 2017, 24(4): 6-9.  
李瑞, 熊显名. 基于棋盘格的线结构光平面标定方法[J]. *仪器仪表用户*, 2017, 24(4): 6-9.