

# 基于消隐点的线结构光测量系统标定方法

王朝旭<sup>1,2</sup>, 伏燕军<sup>1,2\*</sup>, 李晔<sup>1,2</sup>, 钟可君<sup>1,2</sup>, 鲍伟<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;

<sup>2</sup>南昌航空大学测试与光电工程学院, 江西 南昌 330063

**摘要** 针对现有线结构光测量系统标定模型复杂、需要特制靶标等局限性, 提出了一种新的线结构光测量系统标定方法。利用精密导轨运载平面靶标沿着空间一个方向至少运动两次, 创建一组在激光平面上的平行特征线。根据消隐点的原理, 建立新的数学模型, 可以标定成像像素与运动方向上一维信息的直接对应关系。改变导轨运动方向, 另外两个空间正交方向上的像素-维度对应关系同样可以得到。与传统标定方法相比, 所提标定方法无需标定系统多组空间关系, 简化了传统标定过程, 减少了误差的积累。另外, 靶标可为普通平面, 避免了特制靶标的制造困难。实验结果表明, 所提方法测量结果均方根误差 (RMSE) 为 0.0359 mm, 平均绝对误差 (MAE) 为 0.0306 mm, 可以有效用于线结构光三维 (3D) 测量。

**关键词** 测量; 线结构光; 系统标定; 特征线; 消隐点

中图分类号 TN29/TH711

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2212003

## Calibration Method for Line Structured Light Measurement System Based on Vanishing Point

Wang Zhaoxu<sup>1,2</sup>, Fu Yanjun<sup>1,2\*</sup>, Li Ye<sup>1,2</sup>, Zhong Kejun<sup>1,2</sup>, Bao Wei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Nondestructive Testing Technology, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China;

<sup>2</sup>School of Measuring and Optical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

**Abstract** Aiming at the limitations of complex calibration model and the need for special targets of the existing line structured light measurement system, a new calibration method for the line structured light measurement system is proposed. The precision guide rail is used to move the plane target at least twice in one direction in space, creating a set of parallel feature lines on the laser plane. According to the principle of vanishing point, a new mathematical model is established to calibrate the direct correspondence between the imaging pixels and the one-dimensional information in the moving direction. Changing the moving direction of the guide rail, the pixel-dimension correspondence in the other two orthogonal spatial directions can be obtained by the same way. Compared with the traditional calibration methods, the proposed calibration model does not need to calibrate multiple sets of spatial relationships of the system, which correspondingly simplifies the traditional calibration process and reduces the accumulation of errors. In addition, the target can be an ordinary plane, which avoids the difficult manufacturing of a special target. The experimental results show that the root mean square error (RMSE) of the measurement results of the proposed method is 0.0359 mm, the mean absolute error (MAE) is 0.0306 mm, which can be efficiently used for line structured light three-dimensional (3D) measurement.

**Key words** measurement; line structured light; system calibration; feature line; vanishing point

**OCIS codes** 120.2830; 150.1488; 140.2020; 100.2960

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-01-19; 录用日期: 2021-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(61661034, 51765049)、无损检测技术教育部重点实验室基金(EW201908087)、图像处理与模式识别江西省重点实验室基金(ET201908399)

通信作者: \*fyjpkh@sina.com.cn

## 1 引言

过去几十年中,为了满足缺陷检测、逆向工程、目标识别等工程领域需要,国内外学者相继提出了一系列的三维(3D)测量方法<sup>[1-3]</sup>来获取物体表面信息。线结构光测量系统<sup>[4-5]</sup>具有鲁棒性高、稳定性强、测量速度快等优点,已被广泛应用于物体形貌测量。对于线结构光测量系统,标定过程是整个形貌测量技术的核心。

线结构光测量系统的数学模型通常分为解析几何模型、视觉传感器(LSLVS)模型和直接映射模型 3 种。关于标定方法的研究主要围绕这 3 种模型展开。

早期的激光测量模型可归纳为解析几何模型<sup>[6]</sup>,空间关系通过激光三角原理<sup>[7-8]</sup>表述。解析几何模型中,需要标定投影角度、基线长度等系统参数。然而,该方法通常在假设光平面平行于相机坐标系的  $x$  轴的前提下进行,几何推导的近似过程会在扫描过程中累积测量误差<sup>[9]</sup>,难以实现高精度的测量。

随后,测量精度较高的 LSLVS 模型被提出。这种模型标定方法包含相机标定与激光平面标定<sup>[10]</sup>两个部分。自 2000 年以来,相机标定时可以使用 Zhang<sup>[11]</sup>的方法精确计算出像素尺寸、有效焦距及畸变系数等相机参数。因此,系统标定的主要问题转移到了激光平面的位置确定。Huynh 等<sup>[12-13]</sup>引入了两个垂直平面组成的 3D 靶标,该靶标可以单次确定激光平面参数。此外,Liu 等<sup>[14]</sup>提出了使用一个球形靶标,通过拟合圆锥轮廓来标定激光平面的方法。对于二维靶标,基于消隐点和消隐线原理,Wei 等<sup>[15-16]</sup>提出消隐系列标定方法,标定激光平面参数。基于交比不变原理,Zhou 等<sup>[17-18]</sup>采用棋盘格来创建共线的特征点,进行激光平面拟合。另外,周富强等<sup>[19-20]</sup>提出一维靶标标定方法,该方法通过 3 点透视原理(P3P 原理)标定激光平面,提高了标定操作的灵活性。

除了上述标定模型以外,直接映射模型也逐渐引起关注。这种模型不需确定激光平面相对相机的位置关系,可以直接实现像素坐标到三维坐标的转换。Wang 等<sup>[21]</sup>利用与激光平面重合的标定板来代替激光平面,根据已知点的信息进行插值处理获得直接映射关系。熊会元等<sup>[22]</sup>利用锯齿靶标外加一维精密平移台创建激光平面上的特征点,通过拟合二元五次多项式完成系统直接标定。

在上述方法中,利用系统标定结果进行单次测量只能获取一条物体轮廓的三维数据。随着位移设备不断运动,多条物体轮廓的三维数据可以相继得出。若以直线导轨作为位移设备,还需标定导轨的运动方向<sup>[23-24]</sup>,或者借助辅助设备精密调节导轨运动方向平行于世界坐标系的单轴,才能根据位移信息对多条轮廓的三维数据进行整合拼接。整体系统标定过程较为复杂,操作要求较高。本文所提系统标定模型无需标定测量系统组件之间的空间位置关系,直接建立像素坐标与可整合的世界坐标之间的对应关系,简化了传统的标定过程,有效减少系统误差积累,并且不需要特制靶标。

## 2 线结构光测量模型

线结构光测量系统硬件通常由相机成像部分、激光发射部分、辅助移动部分 3 部分组成。激光器投射激光平面交于物体表面,相交线上的任意一物点  $P$  经过小孔成像形成像点  $P'$ 。具体数学测量模型如图 1 所示,其中  $o-uv$  为像素坐标系, $o_c-x_c y_c z_c$  为相机坐标系, $O-XYZ$  为世界坐标系(根据标定模型而定)。相机坐标系的  $z_c$  轴与镜头光轴重合, $x_c$  与  $y_c$  轴分别与像平面的两边平行。光轴与成像平面交于一点,该点叫作图像主点 $(u_0, v_0)$ 。

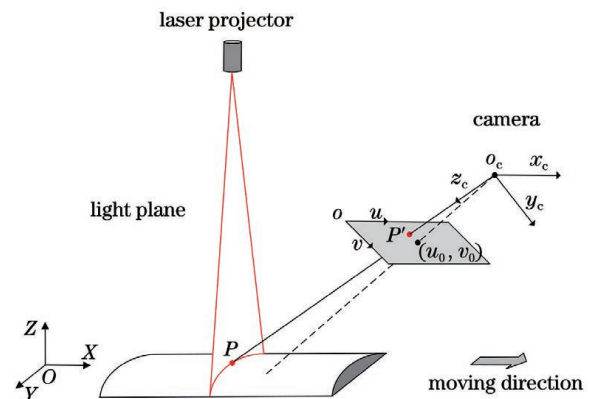


图 1 线结构光测量模型

Fig. 1 Model of line structured light measurement

线结构光测量原理就是根据模型标定结果,利用像素坐标,反求探测点的三维世界坐标。系统单次测量只能获得一条轮廓所对应的三维数据。理论上,只有世界坐标系的单轴平行于导轨移动方向,扫描过程所得多组三维轮廓数据才可直接在同一坐标系下进行整合。如果无法实现平行条件,需要标定世界坐标系下导轨的运动方向,再对所得数据进行补偿。

实际相机模型并非绝对线性小孔成像模型。考虑到相机畸变对真实图像的扭曲作用,需要对获得的图像进行畸变校正处理,矫正方法为

$$\begin{cases} u = u_d + (u_d - u_0)[k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots] \\ v = v_d + (v_d - v_0)[k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots] \\ r^2 = [(u_d - u_0)d_x]^2 + [(v_d - v_0)d_y]^2 \end{cases}, (1)$$

式中:  $r$  为畸变像素点到图像主点的实际距离;  $(u, v)$  为矫正像素坐标;  $(u_d, v_d)$  为畸变像素坐标;  $d_x$  和  $d_y$  为像素物理尺寸;  $k_1$  和  $k_2$  为径向畸变系数,高阶径向畸变系数以及切向畸变系数对结果影响较小,可以忽略。

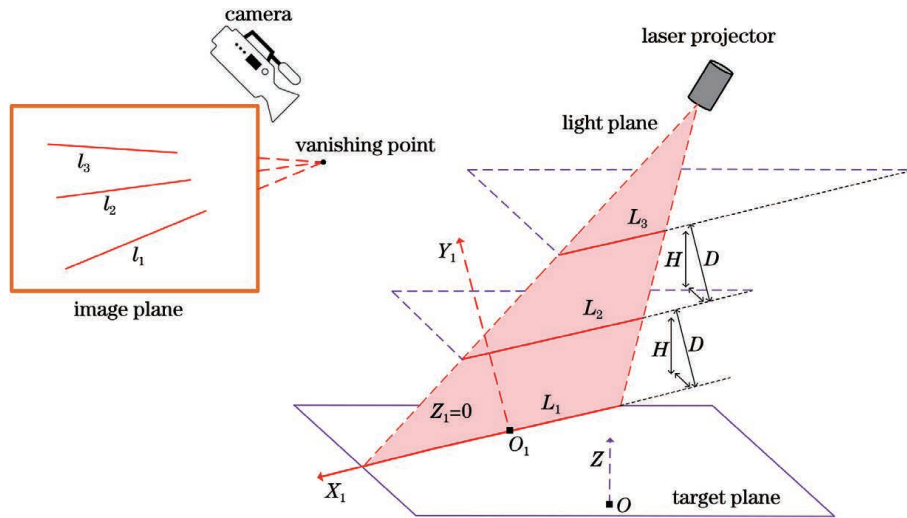


图 2 一维方向标定模型

Fig. 2 Model of one-dimensional direction calibration

在空间系统中,假设  $O_1-X_1Y_1Z_1$  为世界坐标系,世界坐标系的  $O_1-X_1Y_1$  平面与激光平面重合且  $X_1$  轴与  $L_1$  重合。那么,像素坐标与激光平面坐标之间的对应关系可表示为

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & T_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ 1 \end{bmatrix}, (2)$$

式中:两个中间转换矩阵分别叫作内参矩阵、外参矩阵;  $(X_1, Y_1)$  为激光平面上的点在假设世界坐标系下的二维坐标;  $\mathbf{R}$  为旋转矩阵;  $\mathbf{T}$  为平移向量;  $f_x$  和  $f_y$  为相机有效焦距;  $z_c$  为缩放因子。

假设内参矩阵与外参矩阵相乘结果为一个  $\mathbf{a}$  矩阵,有

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}. (3)$$

结合(2)式和(3)式,有

### 3 系统标定原理

所提系统标定方法依据消隐点的原理,分别确定像素坐标与世界坐标三个维度数据的直接对应关系。此处以求取竖直方向维度(数据  $Z$  值)为例,阐述具体标定原理。数学模型如图 2 所示,假设平面靶标是一个竖直方向上的标准平面,  $L_1$  是激光平面与靶标平面的交线,对应地在像平面中形成激光条纹  $l_1$ 。  $L_2, L_2$  和  $L_3, L_3$  分别为靶标平面沿着竖直方向移动  $H$  和  $2H$  距离形成的空间平行直线、激光条纹。  $L_1, L_2, L_3$  是所提方法激光平面上的特征线。

$$\begin{cases} u = \frac{a_{11}X_1 + a_{12}Y_1 + a_{13}}{a_{31}X_1 + a_{32}Y_1 + a_{33}} \\ v = \frac{a_{21}X_1 + a_{22}Y_1 + a_{23}}{a_{31}X_1 + a_{32}Y_1 + a_{33}} \end{cases}. (4)$$

激光平面上的三条平行特征线分别位于  $Y_1 = 0, Y_1 = D, Y_1 = 2D$  的位置,对于每条直线,  $Y_1$  为一常数,因此根据(4)式,  $v-u$  斜率为

$$\frac{dv}{du} = \frac{(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31})Y_1 + a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31}}{(a_{11}a_{32} - a_{12}a_{31})Y_1 + a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}}. (5)$$

令  $a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31} = E, a_{11}a_{32} - a_{12}a_{31} = F, a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31} = I, a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31} = J$ , (5)式可重写为

$$I + EY_1 - kFY_1 = kJ, (6)$$

式中:  $k$  为激光条纹的  $v-u$  斜率。为了计算方便,把系数  $J$  设为 1, (6)式的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} 1 & Y_1 & -kY_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ E \\ F \end{bmatrix} = k. (7)$$

解此线性方程至少需要 3 组  $Y_1-k$  系数,因此标定过程至少需要 3 条平行特征线和对应的 3 条激光条纹。但是无法确定数值  $D$  导致每组方程系数  $Y_1$  无法确定,无法从(7)式直接求取线性方程组的 3 个未知数。故对每条特征线的线性方程进行如下变换:

$$[1 \quad i-1 \quad -k_i(i-1)] \begin{bmatrix} I \\ ED \\ FD \end{bmatrix} = k_i, \quad i=1,2,3,\dots,n, \quad (8)$$

式中: $n$  为特征线的数量; $k_i$  为第  $i$  条激光条纹的斜率。已知 3 条激光条纹斜率,则 3 个新的未知数可以求得。如果特征线的数量大于 3 条,需要对计算结果进行优化。优化结果应是非齐次线性方程组的最小二乘解,设  $ED=e, FD=f$ ,最小二乘解的求取方法可表示为

$$\begin{bmatrix} I \\ e \\ f \end{bmatrix} = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{k}, \quad (9)$$

$$\text{式中: } \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & \vdots & \vdots \\ 1 & n-1 & -k_n(n-1) \end{bmatrix}; \mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_1 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix}.$$

根据消隐点的原理可知,激光平面上所有平行于  $L_1, L_2, L_3$  的直线在像平面上形成的激光条纹将会交于一点,这一点叫作消隐点。不同斜率的激光条纹所对应的空间直线将会在  $O_1-X_1Y_1$  处于不同位置。已知一点像素坐标,根据它与消隐点的  $v-u$  斜率,则可反求该点在  $Y_1$  轴上的位置信息。

激光条纹经过畸变校正、中心提取、中心拟合,可以准确获得对应激光条纹的斜率。由于所需激光条纹数量多于两条,即使经过畸变矫正,多条激光条纹的中心拟合直线仍然不能绝对相交到一个点,因此消隐点对应的最佳像素坐标应为多条直线方程的最小二乘解。

$$\begin{bmatrix} u_v \\ v_v \end{bmatrix} = (\mathbf{k}^T \mathbf{k})^{-1} \mathbf{k}^T \mathbf{b}, \quad (10)$$

$$\text{式中: } \mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_1 & -1 \\ \vdots & -1 \\ k_n & -1 \end{bmatrix}; \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}; (u_v, v_v) \text{ 为消隐点}$$

的像素坐标; $b_n$  为该直线与  $v$  轴交点。

若以靶标第一次的平面为世界坐标系的  $O-XY$  面,空间的高度信息是对应世界坐标系下的  $Z$  值。但是利用(8)式所得结果,只能反求  $i$  的数值。根据空间对应关系可知  $Z=(i-1)H$ ,如果已知条

纹中心的像素坐标,该方向的对应维度可表示为

$$Z = \frac{I - k_p}{(k_p f - e)} H, \quad (11)$$

式中:像素点和消隐点所在直线的斜率  $k_p = \frac{v_p - v_v}{u_p - u_v}$ ;  $(u_p, v_p)$  为测量点的像素坐标。由此可知,整个系统只需确定与 3 条直线斜率有关的  $I, e, f$  3 个系数即可标定全部像素坐标与世界坐标  $Z$  值的对应过程。沿着另外两个空间正交方向运动,  $X, Y$  轴方向的像素-维度对应关系可以根据同样原理标定得出。由于模型设定的坐标系是沿着导轨方向建立的,不需额外确定导轨运动方向,所得三维数据可以直接进行整合。最终所得数据的基准世界坐标系如图 3 所示。图中 3 个平面分别为 3 个运动方向上的第一张靶标平面,根据标定模型可知,基准世界坐标系的原点位于 3 个平面的交点位置。

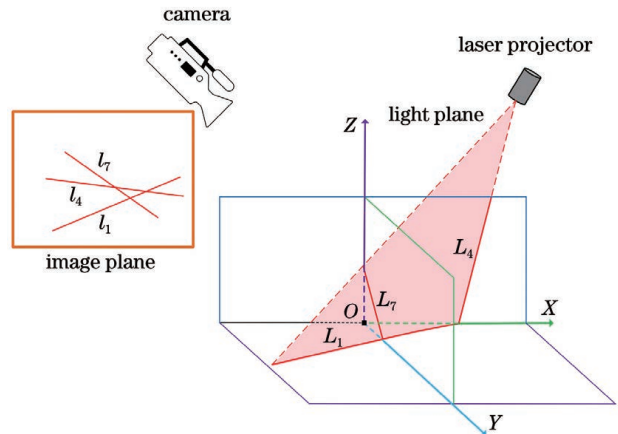


图 3 世界坐标系的位置确定

Fig. 3 Position determination of world coordinate system

## 4 实 验

所搭建的测量系统由分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$  的大恒相机 (MER-130-30UM) 配套 12 mm 焦距的镜头,波长为 650 nm 的红光-线激光器,最大行程误差为 0.02 mm 的 ZOLIX 线性导轨搭建而成,如图 4 所示。特别注意的是,相机放置尽量偏于激光投射方向,这样可以避免 3 条直线在相机中平行,从而防止消隐点丢失。

### 4.1 系统标定

#### 4.1.1 标定误差分析

所提方法通过建立像素坐标到世界坐标的直接线性对应关系,完成系统标定。整个系统标定精度由相机线性程度、靶标位移精度、噪声干扰程度决定。

相机线性成像是所提标定算法推导的基础。相



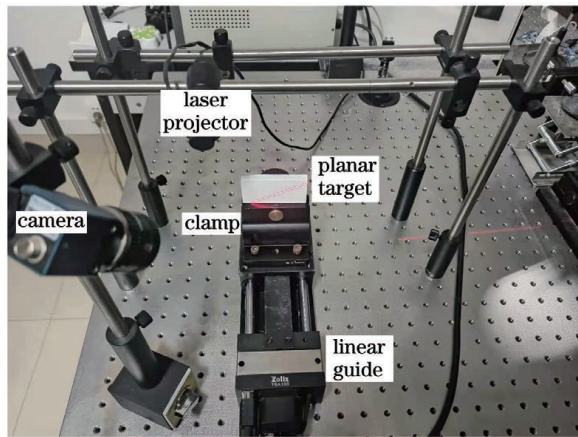


图 4 实验装置结构

Fig. 4 Structure of experimental setup

机畸变可以通过增加棋盘格的图片数量来达到更高层次的矫正。实验中视场尺寸大约为  $250\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ，棋盘格约占视场的  $1/4$ ，大约采集 10 幅以上标定图片即可达到稳定的矫正效果。

整个标定算法利用靶标位移距离作为约束条件，靶标位移距离通过导轨移动距离表征，因此靶标位移精度由导轨移动精度、靶标的平整性、靶标平面与运动方向的垂直性决定。实验选用行程精度为  $0.02\text{ mm}$  的精密导轨来提高位移的准确性；喷漆白

板、标准块的表面、贴纸玻璃板都能保证靶标具有良好的平整性，此处选用标准块作为平面靶标；利用基部带有 4 个螺丝孔的夹子夹紧平面靶标，固定于导轨的平台上，可以保证平面靶标与运动方向具有较高的垂直性。

所提标定方法中，整个系统标定参数只与特征条纹的中心斜率有关。因为每条激光条纹包含大量中心数据，所以中心拟合对于系统噪声并不敏感。为了分析噪声程度对系统标定的影响，首先需要分析噪声对于条纹斜率的影响。设置对比实验，在获取的条纹图样中加入不同信噪比 (SNR) 的高斯噪声，分析不同程度噪声对于条纹中心拟合的影响。可以发现当信噪比降为  $-32\text{ dB}$  时，条纹难以识别，拟合无法完成，部分处理图像如图 5 所示。假设相机经过矫正以后畸变为零，在靶标位移量为  $10\text{ mm}$  的条件下采集一组激光条纹，计算 3 个标定系数，分析噪声干扰下斜率所造成的标定偏差，结果如图 6 所示。通过实验观察可知，信噪比为  $-26\text{ dB}$  时，测量误差仍然可以控制在  $0.2\text{ mm}$  内。传统标定方法所用标定图像在信噪比为  $10\text{ dB}$  以下时，将会严重影响标定结果。相对而言，所提标定方法抗噪性能提高了一到两个数量级，具有极高的抗噪性能。

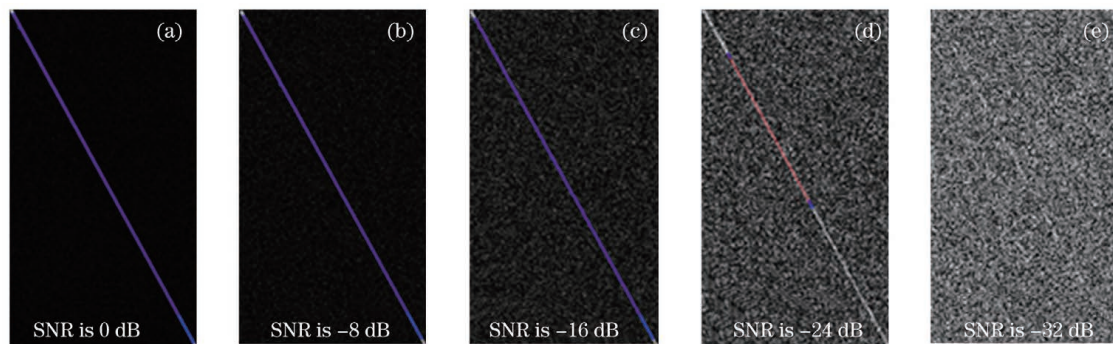


图 5 信噪比对特征条纹斜率的影响

Fig. 5 Influence of SNR on slope of feature strip

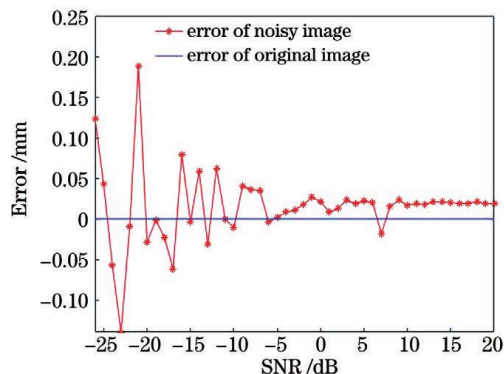


图 6 信噪比对标定误差影响

Fig. 6 Influence of SNR on calibration error

#### 4.1.2 标定结果

分别沿着 3 个正交方向固定导轨平台，采集标定图像之后即可标定测量系统。或者整个标定过程可以直接利用三维平移台实现 3 个垂直方向的移动。为了方便后续分析标准块的测量高度，本次实验采用置于导轨平台上的一维平移台实现竖直方向的移动，将世界坐标系建立在导轨平台之上。

控制导轨沿 Y 轴、Z 轴方向每次移动  $10\text{ mm}$ 。X 轴方向单次移动距离由激光平面倾斜程度具体确定，实验中控制导轨在该方向每次移动  $1\text{ mm}$ 。三个维度方向采集的图像以及处理结果如图 7 所

示,具体的标定结果如表 1 所示。为了与传统方法进行对比,采用 LSLVS 标定模型中 Zhou 等<sup>[17]</sup>的标定方法设置对比实验。标定过程要求放置一幅棋盘格在导轨平台之上,作为基准世界坐标系。采集图像之后进行模型标定,同样标定图像数量之下,对比实验计算时间为 32.45 s,所提方法只需 18.72 s。

对比实验中,LSLVS 模型下的激光平面方程为  $0.6480x - 0.6032y - 0.4650z + 122.1491 = 0$ ,相机坐标与世界坐标的转换矩阵  $\mathbf{R} =$

$$\begin{bmatrix} 0.5613 & 0.4178 & 0.7144 \\ -0.6098 & 0.7924 & 0.0158 \\ -0.5595 & -0.4445 & 0.6996 \end{bmatrix}, \mathbf{T} = \begin{bmatrix} -1.7850 \\ -2.9684 \\ 323.9586 \end{bmatrix}.$$

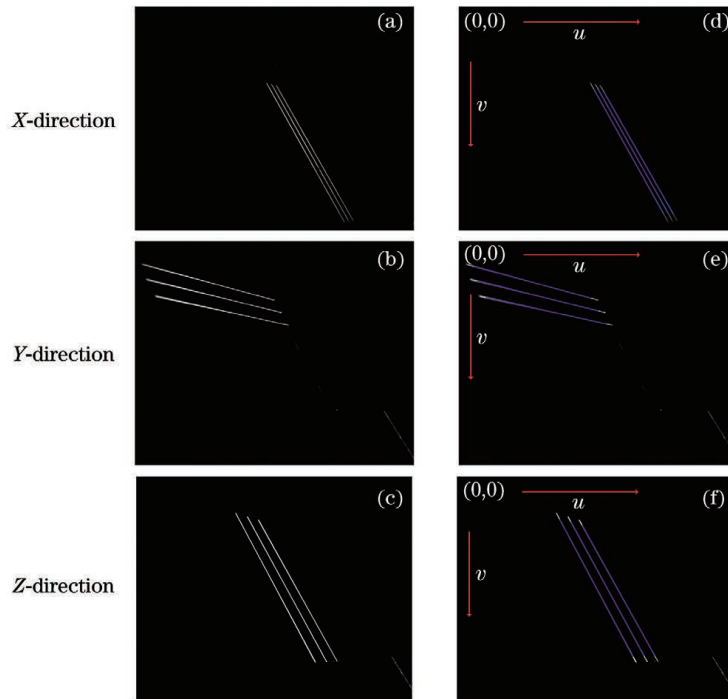


图 7 标定图像处理。(a)~(c)原始图像;(d)~(f)处理后的图像

Fig. 7 Calibrated images processing. (a)~(c) Original images; (d)~(f) processed images

表 1 三个维度上的标定结果

Table 1 Calibration results in three dimensions

Direction	$l$	$e$	$f$
X-direction	1.7562	-0.0489	-0.0354
Y-direction	0.2179	0.0337	0.0270
Z-direction	1.7925	-0.0752	-0.0604

## 4.2 测量精度评价

### 4.2.1 RMSE 分析

为了估计所提标定方法的测量精度,选用一

个一体型的标准阶梯块进行高度测量,测量结果如图 8 所示。对第 23 条条纹所对应的高度数据进行提取,可得 906 个三维数据。为了清晰显示测量结果,等间隔抽取 75 个测量值与实际高度值进行比较,比较结果如图 9 所示。从图中可以看出,测量值与实际高度值可以较好地吻合。每个台阶最大误差、最小误差、RMSE 如表 2 所示,从表中可以看出, RMSE 最大值为 0.0359 mm。与 Zhou 的方法对比结果如图 10 所示,可以发现所提方法测量误差更小。

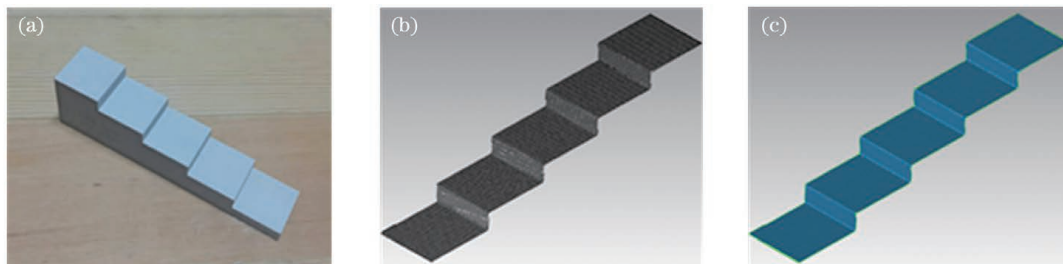


图 8 标准阶梯块的测量。(a)实物图片;(b)测量点云;(c)封装结果

Fig. 8 Measurement of standard step block. (a) Object picture; (b) measured point clouds; (c) wrapped result

表 2 RMSE 分析  
Table 2 RMSE analysis

unit: mm

Parameter	Step1	Step2	Step3	Step4	Step5
Standard thickness	5.0012	10.0036	15.0028	20.0034	25.0021
Maximum error	0.0713	0.0682	0.0657	0.0782	0.0853
Minimum error	0.0036	0.0045	0.0062	0.0068	0.0073
RMSE	0.0325	0.0304	0.0359	0.0336	0.0298

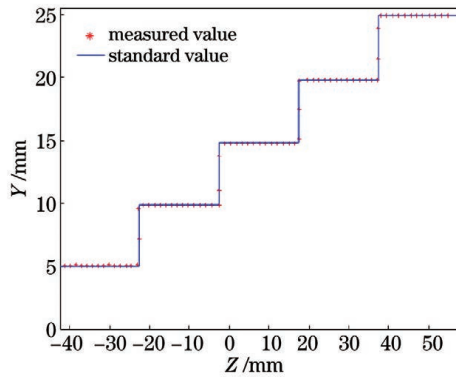


图 9 第 23 条条纹对应的测量高度

Fig. 9 Measured height corresponding to 23rd stripe

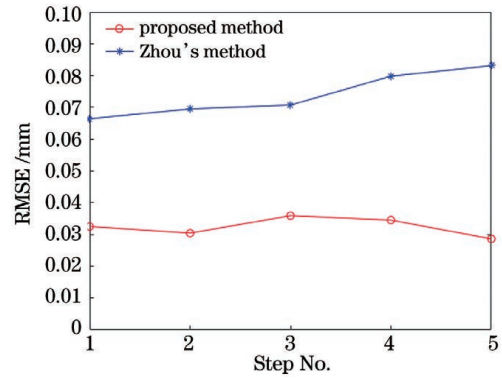


图 10 RMSE 对比

Fig. 10 Comparison of RMSE

#### 4.2.2 MAE 分析

选取一个标准球体封盖作为测量对象进行测量精度分析,测量结果如图 11 所示。获取球体封盖三维点云之后,拟合球体封盖表面形状,偏差分布图如图 12 所示。将球体封盖移动 5 次,计算不同位置

下的拟合半径,测量结果如表 3 所示。与实际半径对比,平均绝对误差(MAE)为 0.0306 mm。两种方法每次测量的绝对误差比较结果如图 13 所示,从图中可以看出,所提方法绝对测量误差较小。

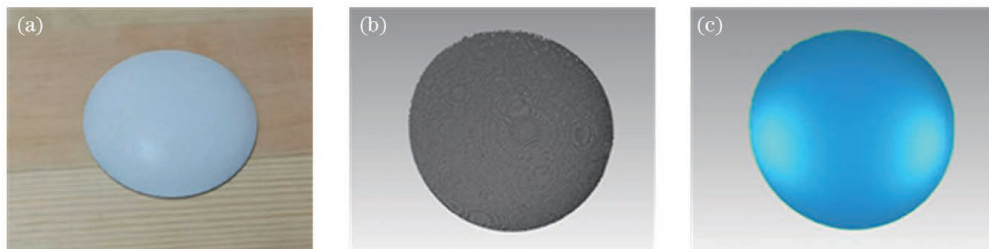


图 11 球体封盖的测量。(a)实物图片;(b)测量点云;(c)封装结果

Fig. 11 Measurement of sphere cover. (a) Object picture; (b) measured point clouds; (c) wrapped result

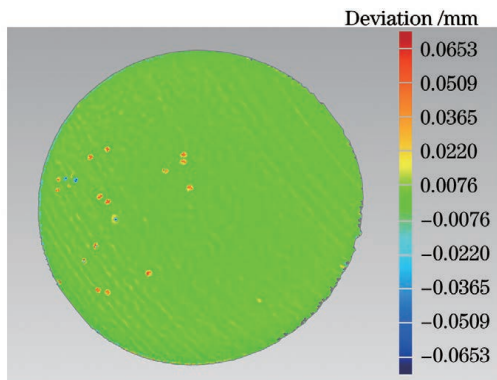


图 12 偏差分布图

Fig. 12 Diagram of deviation distribution

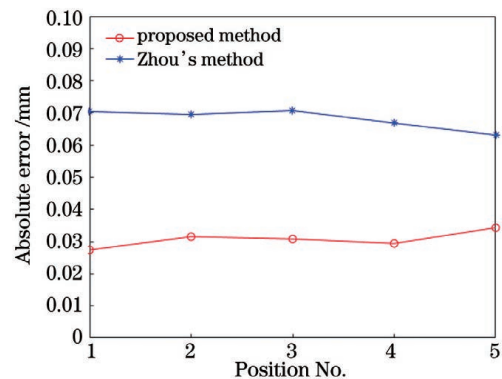


图 13 绝对误差比较

Fig. 13 Comparison of absolute error



表 3 MAE 分析  
Table 3 MAE analysis

unit: mm

Parameter	Position1	Position2	Position3	Position4	Position5
Actual diameter			5.0022		
Fitted diameter	5.0296	5.0337	5.0330	5.0316	5.0365
Absolute error	0.0274	0.0315	0.0308	0.0294	0.0343
MAE			0.0306		

### 4.3 复杂表面测量

利用所提标定方法进行系统标定后,对复杂物体表面进行测量,测量结果如图 14 所示。从图中可以看出,所提标定方法对复杂表面可以进行高质量的重建,表明所提方法可以有效用于物体形貌三维测量。

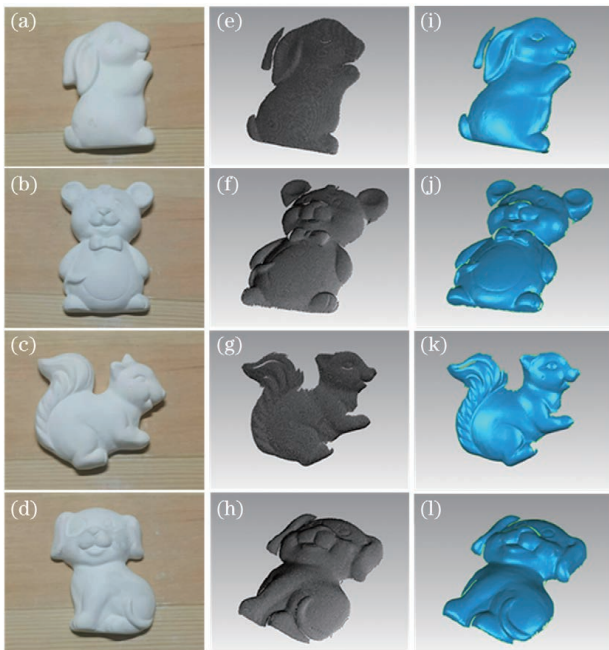


图 14 复杂模型测量。(a)~(d)实物模型;(e)~(h)测量点云;(i)~(l)封装结果

Fig. 14 Measurement of complex models. (a)~(d) Object models; (e)~(h) measured point clouds; (i)~(l) wrapped results

## 5 结 论

提出了一种新的线结构光测量系统标定方法,该方法可以有效用于被测物体表面三维重建。传统标定过程需要标定多组系统空间关系或者对系统部件之间进行手动对准,较为繁琐。所提标定方法利用导轨位移信息作为系统约束条件,依据导轨运动方向建立基准世界坐标系,提出了一种简单的线结构光系统标定模型。所提标定模型简化了标定流

程,减少了测量误差积累。平面靶标可为普通标准平面,无需特制靶标,减小了成本,具有高度的选择性。且整个系统标定过程容易实现。

### 参 考 文 献

- [1] de Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 1-65.
- [2] Yang T, Zhang G L, Li H H, et al. Hybrid 3D shape measurement using the MEMS scanning micromirror[J]. *Micromachines*, 2019, 10(1): 47-54.
- [3] Xu S Y, Xu X. A three-dimensional measurement method based on multiple reflected images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1612001.  
徐顺雨, 徐晓. 一种基于多次反射像的三维测量方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1612001.
- [4] Xie Z X, Li J P, Chi S K. Underwater binocular measurement method based on line-structured light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0504004.  
解则晓, 李俊朋, 迟书凯. 基于线结构光的水下双目测量方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0504004.
- [5] Wang X S, Shao S Y, Su X D, et al. Measurement of rail bearing platform based on binocular line-structured light[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 211202.  
王雪嵩, 邵双运, 苏晓东, 等. 基于双目线结构光的承轨台测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 211202.
- [6] Li S S, Jia X T, Chen M W, et al. Error analysis and correction for color in laser triangulation measurement[J]. *Optik*, 2018, 168: 165-173.
- [7] Cui F K, Song Z B, Wang X Q, et al. Study on laser triangulation measurement principle of three dimensional surface roughness[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 136: 91-94.
- [8] Tsai T H, Fan K C. Calibration and analysis of eccentric error of the laser rotary-scanning measurement system[J]. *Measurement*, 2012, 45(1): 47-53.
- [9] Idrobo-Pizo G A, Motta J M S T, Sampaio R C. A



- calibration method for a laser triangulation scanner mounted on a robot arm for surface mapping [J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1783.
- [10] Zhu Z M, Wang X Y, Zhou F Q, et al. Calibration method for a line-structured light vision sensor based on a single cylindrical target [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(5): 1376-1382.
- [11] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [12] 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.
- [13] Wei Z Z, Zhang G J, Xu Y. Calibration approach for structured-lighted-stripe vision sensor [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(2): 210-214.  
魏振忠, 张广军, 徐园. 一种线结构光视觉传感器标定方法[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(2): 210-214.
- [14] 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.
- [15] Wei Z Z, Xie M, Zhang G J. Calibration method for line structured light vision sensor based on vanish points and lines[C]//2010 20th International Conference on Pattern Recognition, August 23-26, 2010, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2010: 794-797.
- [16] Wei Z Z, Shao M W, Zhang G J, et al. Parallel-based calibration method for line-structured light vision sensor[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(3): 033101.
- [17] Zhou F Q, Zhang 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.
- [18] Yang K, Yu H Y, Yang C. Calibration of line structured-light vision measurement system based on free-target [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 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.
- [19] Zhou F Q, Cai F H. Calibrating structured-light vision sensor with one-dimensional target[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(18): 7-12.  
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.
- [20] Wei Z Z, Cao L J, Zhang G J. A novel 1D target-based calibration method with unknown orientation for structured light vision sensor[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(4): 570-574.
- [21] Wang Z Y, Li H W, Li D P, et al. A direct calibration method for structured light[C]//IEEE International Conference Mechatronics and Automation, July 29-August 1, 2005, Niagara Falls, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2005: 1283-1287.
- [22] Xiong H Y, Zong Z J, Xu Y. Direct calibration method of structured light stripe visual sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(3): 38-41.  
熊会元, 宗志坚, 许铖. 线结构光视觉传感器直接标定方法[J]. *传感器与微系统*, 2009, 28(3): 38-41.
- [23] Zeng X J, Huo J C, Wu Q Y. Calibrate method for scanning direction of 3D measurement system based on linear-structure light[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 108002.  
曾祥军, 霍金城, 吴庆阳. 线结构光三维测量系统扫描方向的标定 [J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 108002.
- [24] Chen X Y, Ma Z, Chen T F, et al. Novel calibration method for axes in line structured light vision measurement system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 1108014.  
陈新禹, 马孜, 陈天飞, 等. 线结构光视觉测量系统运动轴线的简易标定方法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108014.