

激光与光电子学进展

基于远心成像的高精度线激光三维测量方法

孟亚云, 邓惠文, 张国锋, 葛灵宇, 林开梁, 杨树明*

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 精密零部件的高精度三维成像是工业制造和检测的关键任务。针对现有的线激光测量系统效率慢、精度低等问题,提出了利用远心成像的线激光三维测量系统,研究了该系统的标定方法。首先,分别采集不同位置的靶标图像和激光线照射下相同位置的靶标图像,通过远心正交成像标定相机内参矩阵系数和外参位姿关系;然后,建立线激光投影平面与标定目标平面之间的几何关系,求解不同目标平面下的激光线方向矢量,进而通过最小二乘法获得光平面方程;最后,在极大似然准则下,利用 Levenberg-Marquard 非线性优化算法精确地计算标定参数最优解,搭建了测试系统,开发了专用标定程序。实验结果表明:在 $60\text{ mm} \times 48\text{ mm}$ 的视场下,所设计的系统和方法可以实现优于 $18\text{ }\mu\text{m}$ 的测量误差,能够快速准确地重建出三维形貌。

关键词 线激光; 远心成像; 系统标定; 机器视觉; 三维传感

中图分类号 TH39 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222677

High-Precision Line Laser Three-Dimensional Measurement Method Based on Telecentric Imaging

Meng Yayun, Deng Huiwen, Zhang Guofeng, Ge Lingyu, Lin Kailiang, Yang Shuming*

State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an 710049, Shaanxi, China

Abstract High accuracy three-dimensional (3D) imaging of precision components is vital for industrial manufacturing and inspection. To address the low efficiency and low accuracy of the existing line laser measurement system, a line laser three-dimensional measurement system using telecentric imaging is proposed herein, and the calibration method of the system is analyzed. First, target images of different positions and the same position under laser irradiation are obtained, and the relationship between the internal parameter matrix coefficient and external parameter pose of the camera is calibrated via telecentric orthogonal imaging. Subsequently, the geometric relationship between the line laser projection and calibration target planes is established, the laser line direction vectors under different target planes are solved, and the equation of the light plane is obtained via the least-squares method. The Levenberg-Marquard nonlinear optimization algorithm is used to accurately calculate the optimal solution of calibration parameters under the maximum likelihood criterion. Additionally, a test system and a calibration program are developed. Experimental results show that under a $60\text{ mm} \times 48\text{ mm}$ field of view, the designed system can achieve a measurement accuracy of $18\text{ }\mu\text{m}$; furthermore, it can rapidly and accurately reconstruct the three-dimensional geometric model.

Key words line laser; telecentric imaging; system calibration; machine vision; three-dimensional sensing

1 引言

线激光扫描测量技术是近些年快速发展的一项非接触式光学测量技术,能够实现实时高精度的三维测量,其对被测物表面的轮廓形状要求和表面材质要求不

严格,稳定性较好。但是,传统小孔成像透镜的透视效应和畸变严重制约了高精度测量。近年来,远心镜头因其具有正交投影、畸变小以及恒定放大率等优点,开始被应用于微观尺度上的三维测量。将远心镜头应用于线激光三维测量可以显著提高系统测量精度。远心镜

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-11-09; 录用日期: 2022-11-30

基金项目: 国家杰出青年科学基金(52225507)、国家重点研发计划(2021YFF0700402)、陕西省重点研发计划(2020ZDL-GY04-02)

通信作者: *shuming.yang@mail.xjtu.edu.cn

头在成像模型和标定方法上与传统的透镜不同,利用远心成像实现高精度三维测量已成为研究的热点之一。

在线激光测量系统中,系统参数标定和激光条纹中心提取是保证测量精度的关键。目前应用较为广泛的激光平面标定方法包括矢量交叉积、线性方程的解、交叉比不变性。Zheng^[1]提出了矢量交叉积的标定方法,根据线激光投影与相机之间的约束关系,得到了线激光的投影方程,通过激光条纹矢量的交叉积计算光平面的法向矢量。该方法原理较为简单,但因存在误差,两条直线不能在一点上理想相交,很难保证标定精度。Sun^[2]和Walch^[3]通过棋盘格上已知的参考点建立了相机和激光传感器之间的线性方程,该标定方法的关键在于如何获得高精度标志点的世界坐标和像素坐标。Zhou等^[4]和杨凯等^[5]分别于2005年和2016年提出了基于交比不变性的平面靶标标定方法。在这类方法中,可以根据交比不变原理^[6]获得控制点在靶标坐标系下的局部坐标,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相机坐标系,完成光平面标定。Wei等^[7]于2014年提出基于消隐线原理的方法进行光平面标定,该方法通常不适用于非专业人士。

以上标定方法都是针对针孔相机模型所设计的,需要求解标志点在相机坐标系下的三维坐标。为实现小视场高精度的快速三维测量,设计的线激光测量系统引入了远心镜头,远心镜头的正交成像会导致沿光轴深度变化的不敏感^[8],目前还没有统一、完善的标定方法。为了解决这些问题,提出一种基于远心成像的线激光标定方法。首先,系统标定时需在不同位置拍摄靶标图像以及相同位置下带有激光线的靶标图像,通过远心相机标定计算相机内外参数;然后,建立光条纹投影平面与平面靶标所在平面之间的几何关系,求解不同图像下的激光线方向矢量,通过线性最小二乘方法拟合激光线得到光平面方程;最后,结合非线性优化算法快速精确地完成标定。

2 远心成像的线激光测量基本原理

2.1 系统设计

远心成像的线激光测量系统硬件模块主要包括激光发生器、CCD相机、远心镜头以及运动位移装置,如图1所示。高精度激光器生成的线激光条纹经过被测物体调制后,由远心镜头收集变形的激光线并在CCD相机处获取条纹图像。运动位移装置用于精确控制被测物体和测量系统之间的相对运动,实现物体三维形貌的扫描式完整测量。

2.2 系统标定方法

为了实现高精度的三维成像,本研究需对设计的系统进行标定,包括远心成像标定、激光平面标定和运动方向标定。远心成像标定是获取相机内外参数与畸变参数;激光平面标定是计算激光平面在世界坐标系

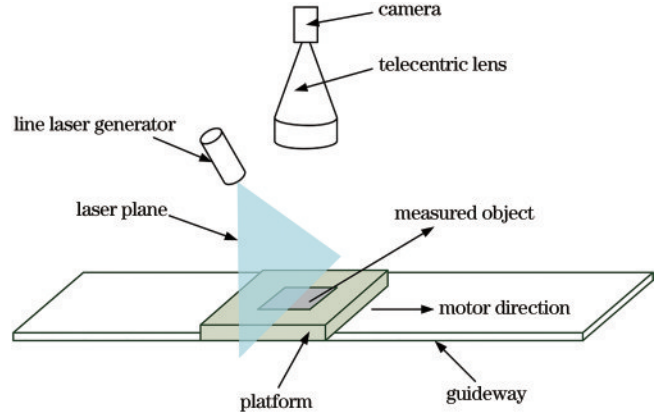


图1 远心成像的线激光测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of line laser measurement system for telecentric imaging

中的法线方向;运动方向标定计算机工作台在世界坐标系中的位移方向。激光平面标定和运动方向标定统称为系统结构参数标定,下面将详细介绍。

2.2.1 远心相机标定

所使用的镜头为物像双远心镜头,其成像光路图如图2所示,包含物方透镜与像方透镜,且像方焦距与物方焦距重合,孔径光阑位于两透镜的公共交点处,形成正交投影^[9]。与传统相机的针孔模型不同,远心透镜的光心位于无穷远处,具有恒定的放大倍数,仅在X和Y方向放大,缺少了Z方向上的透视因子。如图3所示,假设目标点A的世界坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) ,相机坐标为 (x_c, y_c, z_c) ,像素坐标为 (u, v) ,无畸变的远心相机投影模型可表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M/d_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M/d_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M/d_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M/d_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11}^c & r_{12}^c & r_{13}^c & t_x^c \\ r_{21}^c & r_{22}^c & r_{23}^c & t_y^c \\ r_{31}^c & r_{32}^c & r_{33}^c & t_z^c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: M 为远心镜头的放大倍数; d_u, d_v 分别为相机在 u, v 方向上的像素尺寸; $\mathbf{R}_{3 \times 3}^c = [r_{ij}^c]$ 为 3×3 的旋转矩阵; $\mathbf{T}_{3 \times 1}^c = [t_x^c, t_y^c, t_z^c]^T$ 为 3×1 的平移向量。当 $d_u = d_v$ 时,定义 $m = M/d_u = M/d_v$,则方程可简化为

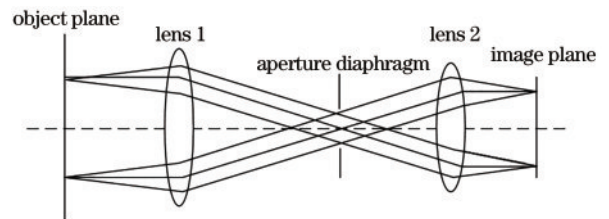


图2 远心镜头成像光路图示意图

Fig. 2 Schematic diagram of telecentric lens imaging optical path

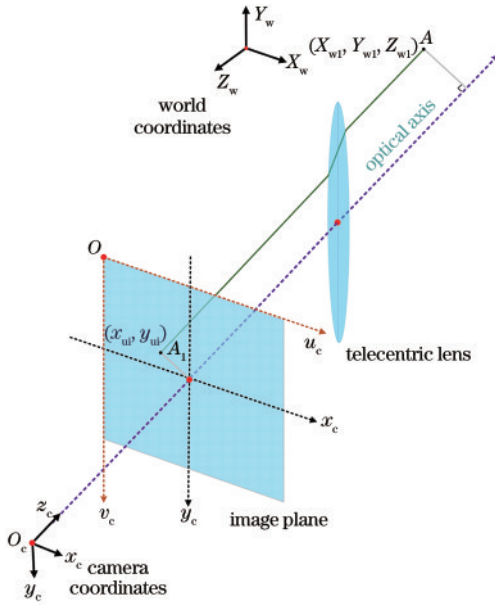


图 3 双远心镜头的相机成像模型

Fig. 3 Camera imaging model with bilateral telecentric lens

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

本研究采用 Li^[10] 的方法对成像模型的参数进行初值求解, 并通过 Levenberg-Marquard 非线性算法进行参数优化^[11-12]。第 1 步, 利用单应矩阵求解相机参数的封闭解, 得到无畸变远心相机模型的参数。第 2 步, 对无畸变的特征点坐标进行非线性优化, 然后对包括畸变系数和畸变中心在内的所有相机参数进行非线性优化。

2.2.2 激光平面标定

在远心成像的线激光测量系统中, 激光平面标定首先将激光平面与相机坐标系 Z 轴的交点定义为相机坐标系的原点; 然后建立光条纹投影平面与平面靶标所在平面之间的几何关系, 求解不同图像下的激光线方向矢量; 最后通过最小二乘拟合激光线得到光平面向程, 并结合非线性优化算法快速精确地完成标定。

相机拍摄 n 幅标定板在不同位姿下带有激光线的图片, 如图 4 所示。任意一幅图像的激光条纹在相机成像平面中的方程可表示为

$$a_i u + b_i v + c_i = 0, \quad (3)$$

式中: a_i, b_i, c_i 为相机靶面上投影激光条纹直线方程系数, i 为第 i 幅图像 ($i \leq n$)。

联立式 (2) 和式 (3), 并将投影激光条纹像素坐标转化为相机坐标, 激光条纹投影平面的方程在相机坐

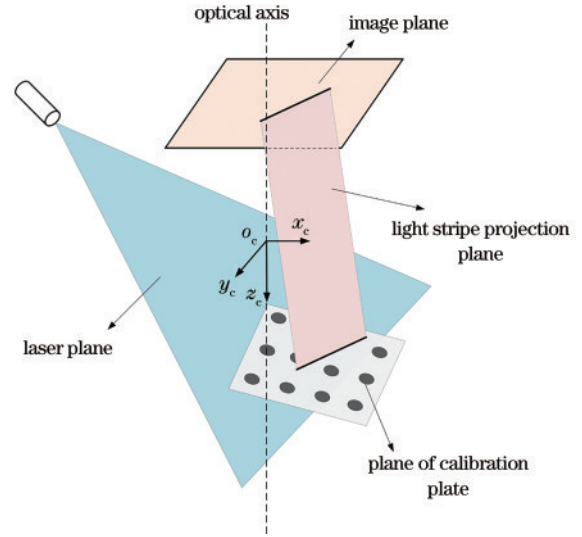


图 4 激光平面、投影平面、标定平面位置关系示意图

Fig. 4 Diagram of position relation of laser plane, projection plane and calibration plane

标系中可表示为

$$a_i m \cdot x_c + b_i m \cdot y_c + a_i u_0 + b_i v_0 + c_i = 0, \quad (4)$$

式中: u_0, v_0 为相机主点像素坐标。

该平面的单位法向量 $n_{1(i)}$ 可表示为

$$n_{1(i)} = \left(\frac{a_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}, \frac{b_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}, 0 \right)^T. \quad (5)$$

标定板所在平面的单位法向量 $n_{2(i)}$, 即为远心标定中得到的外参旋转矩阵中的第 3 列, 可表示为

$$n_{2(i)} = (r_{13(i)}^c, r_{23(i)}^c, r_{33(i)}^c)^T. \quad (6)$$

激光条纹投影平面与标定板平面相交形成激光线, 通过上述 2 个平面的单位法向量可以得到第 i 张标定图像上激光线的单位方向向量 $v_{1(i)}$ 。

$$v_{1(i)} = n_{1(i)} \times n_{2(i)} = \left(\frac{a_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}, \frac{b_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}, 0 \right)^T \times (r_{13(i)}^c, r_{23(i)}^c, r_{33(i)}^c)^T, \quad (7)$$

式中: \times 为向量的叉乘运算。

重复上述过程, 可以获得 n 条不同位姿下的激光线单位方向向量, 可以用奇异值分解的方法求解激光平面的单位法向量 n_p :

$$[v_{1(1)}, v_{1(2)}, \dots, v_{1(n)}]^T \cdot n_p = 0. \quad (8)$$

式 (8) 得到的光平面向量是一个封闭解, 利用极大似然准则对激光平面向量 n_p 进行进一步优化, 得到其最优解。建立优化函数如下:

$$g(x) = \sum_{i=1}^n \arccos \left(\frac{v_{1(i)}^T \cdot \tilde{v}_{1(i)}(n_p, v_{2(i)}, m)}{\|v_{1(i)}^T \cdot \tilde{v}_{1(i)}(n_p, v_{2(i)}, m)\|} \right), \quad (9)$$

式中: $\tilde{v}_{1(i)}(n_p, v_{2(i)}, m)$ 为像素坐标系下激光条纹重投影的方向向量, 该优化函数表示像素坐标系下, 光条纹方向向量 $v_{1(i)}$ 和重投影条纹方向向量之间的最小角度,

使用 Levenberg-Marquard algorithm 非线性优化方法优化,求解在极大似然准则下的最优解。

相机坐标系的原点定义为激光平面与相机光轴的交点,已知激光平面的单位法向量 $\mathbf{n}_p = (n_{p1} \ n_{p2} \ n_{p3})^T$,其平面方程可表示为

$$\mathbf{n}_p^T \cdot (x_c, y_c, z_c)^T = n_{p1}x_c + n_{p2}y_c + n_{p3}z_c = 0. \quad (10)$$

已知激光线上某一点的像素坐标为 (u, v) ,在相机坐标系中对应的坐标为 (x_c, y_c, z_c) ,结合式(2)和式(10),可计算得到该点在相机坐标系下的坐标为

$$\mathbf{W}_c = (x_c, y_c, z_c) = \left(\frac{u}{m}, \frac{v}{m}, -\frac{n_{p1} \cdot u + n_{p2} \cdot v}{n_{p3}} \right). \quad (11)$$

2.2.3 运动方向标定

在实际测量中,为了实现被测物体的完整三维形貌测量,需借助精密位移平台的一维运动实现线激光的扫描^[13],因此电机运动方向是一项需要标定的参数。在精密位移平台上固定一个圆形标定板,控制电机平台移动一定的距离。

以标定板的圆心作为目标点,目标点 A 移动前后在相机坐标系中的坐标分别表示为 $\mathbf{k}_1 = (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})^T$ 和 $\mathbf{k}_2 = (x_{c2}, y_{c2}, z_{c2})^T$,精密位移平台的移动距离 d 可表示为

$$d = \|\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2\| = \sqrt{(x_{c2} - x_{c1})^2 + (y_{c2} - y_{c1})^2 + (z_{c2} - z_{c1})^2}. \quad (12)$$

已知像素坐标, (x_{c1}, y_{c1}) 和 (x_{c2}, y_{c2}) 可根据式(2)求出,则电机运动的单位方向向量可表示为

$$\mathbf{v}_d = \frac{\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2}{\|\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2\|} = \left[\frac{(x_{c2} - x_{c1})}{d}, \frac{(y_{c2} - y_{c1})}{d}, \frac{d^2 - (x_{c2} - x_{c1})^2 - (y_{c2} - y_{c1})^2}{d} \right]. \quad (13)$$

理论上,单个标志点就可以确定电机运动的单位方向向量。但在实际标定中,圆心的亚像素提取以及数值计算均会引入误差,可对多个圆心标志点进行计算并求取平均值以减小误差。

2.3 三维测量点云拼接

通过 2.2 节的系统标定和三维重建方法,可以获得被测物体表面形貌调制的激光线三维点云坐标,假设 d 为采集第 i 幅图像时位移台移动的距离,则该位置下测量点的实际世界坐标为

$$\mathbf{W}_w = \mathbf{W}_c + d \cdot \mathbf{v}_d. \quad (14)$$

式(14)和式(8)、式(10)联立,即可求解世界坐标系下的所有测量点三维点云坐标。

2.4 条纹中心提取

激光条纹中心的提取是线激光三维测量系统中关键技术之一,对实现高精度测量至关重要。目前常用的条纹中心提取方法包括灰度重心法^[14]、Steger算法^[15]和骨架提取法^[16]。理想情况下,图像中的激光条纹应该是单像素宽度。然而在实际中使用的激光在垂直方向

上符合高斯分布且有一定的线宽^[17]。因此,在实际测量之前需要对图像进行预处理,采用高斯滤波的方法。经过预处理后,采用加权重心法^[18]获得激光条纹中心亚像素位置。通过平方加权可以削弱边缘灰度的影响,使得灰度重心波动更小,从而提高中心提取的精度。

3 实验与结果分析

搭建测量平台如图 5 所示,使用的相机为大恒 MER-520-79U3M 型 USB3.0 接口工业相机,像素分辨率为 1600 pixel × 1200 pixel,像元尺寸为 4.5 μm × 4.5 μm。镜头采用 BT-10C064,放大倍率为 0.2,景深为 8 mm,视场为 64 mm × 48 mm。激光器波长为 520 nm,功率为 20 mW。

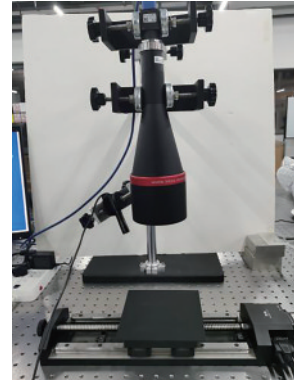


图 5 测量平台

Fig. 5 Measuring platform

3.1 相机标定实验

相机标定所使用的平面靶标为 7 × 7 陶瓷圆形标定板(圆直径为 1 mm、圆心距为 2 mm),拍摄不同位姿下 18 张标定板图像,采集到的图像如图 6 所示,采用 2.2.1 节的远心相机标定算法进行标定,标定结果如表 1 所示。

表 1 远心相机标定结果

Table 1 Telecentric camera calibration results

Magnification	Distortion k_1 ($\times 10^{-7}$)	Distortion k_2 ($\times 10^{-10}$)	Reprojection error / pixel
0.199719	4.26091	-2.52496	0.271447

3.2 激光平面标定实验

在关闭激光器的环境下,打开辅助 LED 白光照明光源,拍摄一幅标定板图像,可标定出标定板在该位姿下的外参旋转矩阵,旋转矩阵的第 3 列即为此时标定板所在平面的法向量。打开激光器,关闭照明光源,拍摄相同位姿下的激光条纹图像,由 2.4 节的算法提取条纹中心,拟合标定板上条纹中心得到像素坐标系下该条激光线的方向向量。重复此步骤,采集 13 个不同位姿下的标定板图像和激光条纹图像。其中一个位姿下的图像如图 7 所示。不同位姿下激光线在相机坐标系下的单位方向向量如表 2 所示。

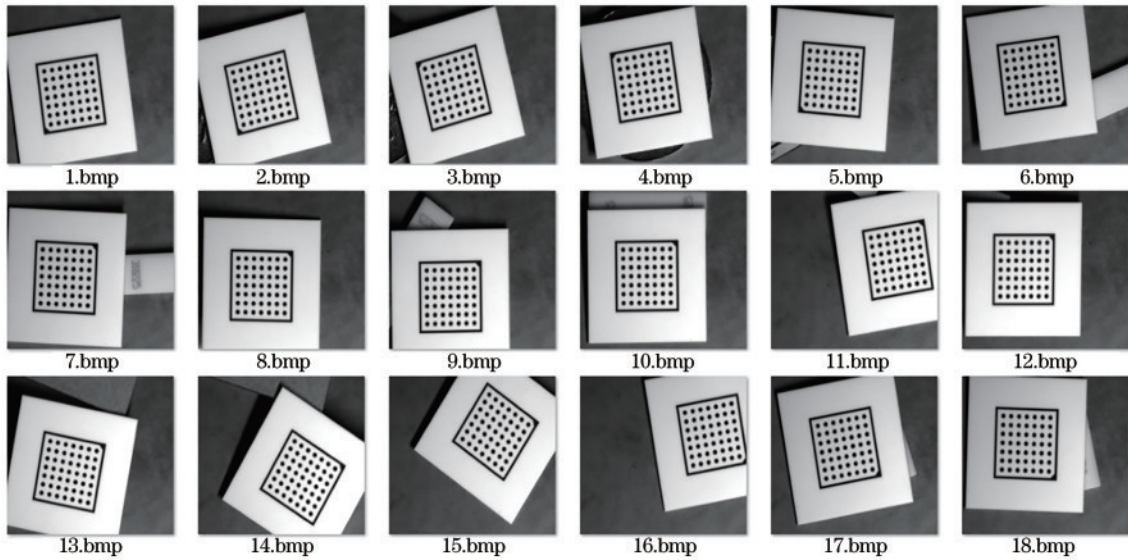


图 6 相机标定图像

Fig. 6 Camera calibration images

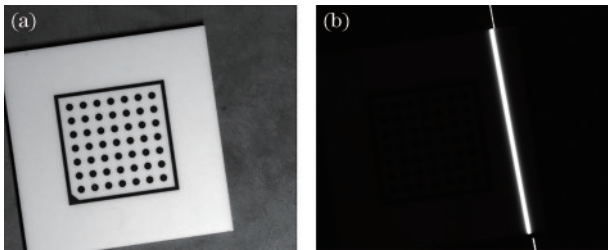


图 7 某一位姿下的图像。(a) 无激光投影的标定板图像；
(b) 无照明光源的激光条纹图像

Fig. 7 Images in a certain pose. (a) Calibration plate image without laser projection; (b) laser stripe image without lighting source

表 2 相机坐标下激光线的单位方向向量

Table 2 Telecentric camera calibration results

Point No.	Laser line direction vector
1	$[0.181871, 0.982846, -0.014553]^T$
2	$[0.189028, 0.977347, -0.024117]^T$
3	$[0.188845, 0.977098, -0.023485]^T$
4	$[0.188770, 0.980917, -0.018678]^T$
5	$[0.169291, 0.980011, -0.022408]^T$
6	$[0.139874, 0.986097, -0.089592]^T$
7	$[0.173615, 0.982375, 0.005284]^T$
8	$[0.166604, 0.977990, -0.027501]^T$
9	$[0.207611, 0.972565, -0.072362]^T$
10	$[0.222349, 0.969022, -0.107222]^T$
11	$[0.2253088, 0.947963, -0.120007]^T$
12	$[0.251250, 0.947922, -0.183600]^T$
13	$[0.182562, 0.979764, -0.016613]^T$

对获取到的 13 条激光线进行最小二乘拟合, 得到激光平面的法向量 $(0.898981, -0.153396, 0.410247)^T$, 利用实测值拟合的激光平面如图 8 所示。

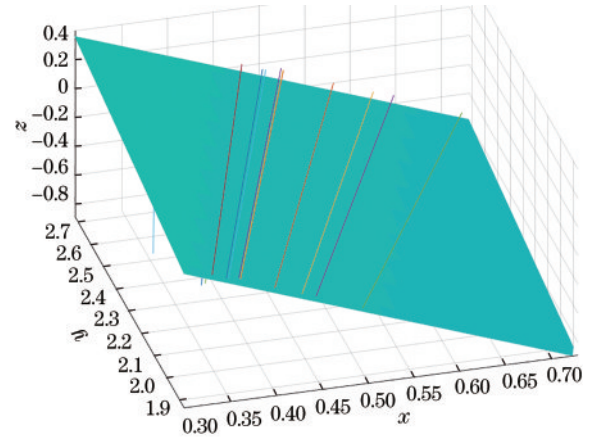


图 8 激光条纹及光平面拟合

Fig. 8 Laser stripe and light plane fitting

3.3 精度验证

为了验证三维测量的准确度, 测量了标准高度为 1 mm 的量块, 测量结果如图 9 所示。由表 3 可知, 标准量块的测量结果为 0.982 mm, 与标准值相比测量误差为 18 μm , 测量误差与随机噪声相比非常小。主要误差源可能来自被测物表面的粗糙度, 或来自相机的随机噪声。为验证三维形貌测量的效果, 测量了精密加

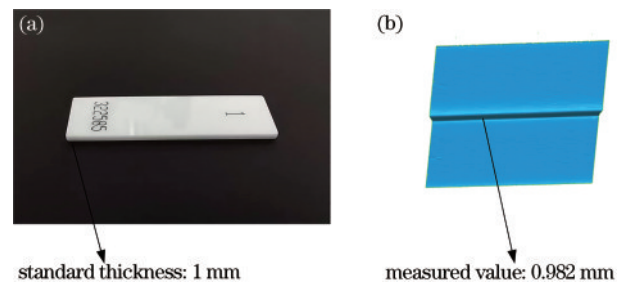


图 9 量块。(a) 实物图; (b) 点云图

Fig. 9 Gauge block. (a) Physical map; (b) point cloud map

表 3 标准量块测量结果

Table 3 Measurement results of standard gauge block

Measured region / mm×mm	Standard value /mm	Measured value /mm	Accuracy / mm
64×48.2	1	0.982	0.018

工金属件和六边形陶瓷模型,如图 10(a)、图 10(c)所示。图 10(b)、图 10(d)显示了金属加工件和陶瓷模型

3D 表面重建结果。由图 10(b)可知,金属工件的三维重建结果具有清晰的边缘轮廓,能够清晰地显示表面形态。由图 10(d)可知,陶瓷模型平面和斜坡能够实现高精度重建。实验结果表明,该标定方法可以为台阶高度提供高精度测量,对不同材料(如金属、陶瓷)和不同类型的几何体(如斜面、平面等),可以有效地进行三维测量,能够满足多数工件的高精度测量需求。

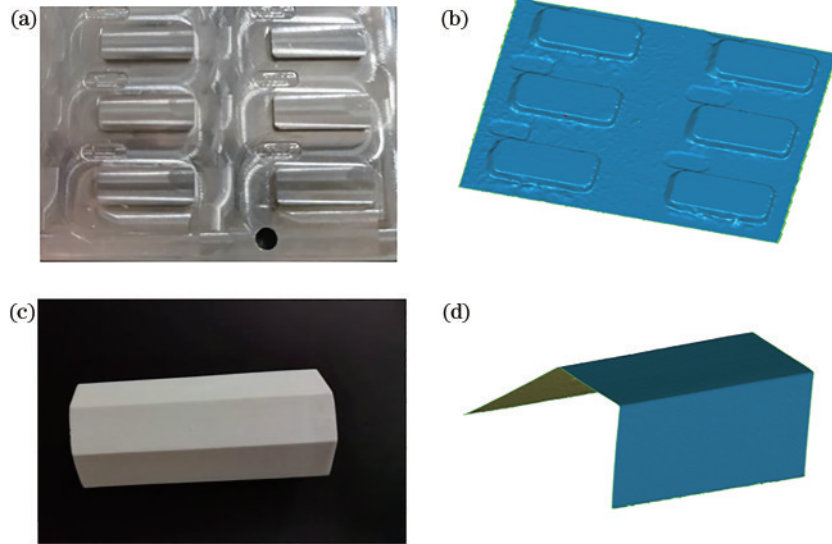


图 10 样品重建结果。(a)金属零件实物图;(b)零件三维重建结果;(c)陶瓷模型实物图;(d)陶瓷模型三维重建结果

Fig. 10 Sample reconstruction results. (a) Physical drawing of industrial part; (b) industrial part 3D reconstruction result; (c) physical drawing of ceramic model; (d) ceramic model 3D reconstruction result

表 4 比较了本文方法与 3 种表面重建方法的测量精度与测量效率。3 种方法分别为基于针孔相机的线激光扫描测量、双目远心相机被动式测量以及基于远心相机的数字投影测量。由表 4 可知,本文方法的测

量精度和测量帧率均优于前 2 种方法,方法 3 的精度表现较好,但其测量范围偏小,且测量帧率小于本文所提方法。综合以上分析,本文方法可以实现对精密零部件高效率、高精度的测量。

表 4 与其他方法的对比

Table 4 Comparison with other methods

Method	Equipment	Measured region /mm×mm	Accuracy /mm	Frame rate /((frame·s ⁻¹))
Yang ^[5]	pinhole camera, line laser projector	120×90	0.090	15
Zhang ^[19]	two telecentric cameras	21×17	0.020	15
Shi ^[20]	telecentric camera, digital projector	18×16	0.011	20

4 结 论

提出了一种基于远心成像的高精度线激光三维测量方法,在此基础上设计了线激光测量系统,该系统包括激光发生器、CCD 相机、远心镜头以及精密运动位移装置。首先,对系统的标定方法进行研究,提出一种基于远心成像的线激光标定方法,可以快速精确地完成标定,克服了由于远心相机沿光轴的深度变化不敏感而导致的光平面标定困难。然后,开发了原型和专用校准程序,以实现定量 3D 成像。实验结果表明,在 64 mm×48 mm 的视场范围内,获得优于 18 μm 的三维测量精度,能够满足工业应用中精密零部件高精度

测量的需求。

参 考 文 献

- [1] Zheng F, Kong B. Calibration of linear structured light system by planar checkerboard[C]//International Conference on Information Acquisition, June 21-25, 2004, Hefei, China. New York: IEEE Press, 2004: 344-346.
- [2] Sun Q C, Hou Y Q, Tan Q C, et al. A flexible calibration method using the planar target with a square pattern for line structured light vision system[J]. PLoS One, 2014, 9(9): e106911.
- [3] Walch A, Eitzinger C. A combined calibration of 2D and 3D sensors-a novel calibration for laser triangulation sensors based on point correspondences[C]//Proceedings

- of the 9th International Conference on Computer Vision Theory and Applications, January 5-8, 2014, Lisbon, Portugal. Setúbal: SCITEPRESS-Science and Technology Publications, 2014: 89-95.
- [4] 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.
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.
- [5] 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. Calibration of line structured-light vision measurement system based on free-target[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(9): 1066-1070.
- [6] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [7] Wei Z Z, Li C Q, Ding B O. Line structured light vision sensor calibration using parallel straight lines features[J]. Optik, 2014, 125(17): 4990-4997.
- [8] Li B W, Zhang S. Flexible calibration method for microscopic structured light system using telecentric lens [J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25795-25803.
- [9] Chen Z, Liao H Y, Zhang X M. Telecentric stereo micro-vision system: calibration method and experiments [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 57: 82-92.
- [10] Li D, Tian J D. An accurate calibration method for a camera with telecentric lenses[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(5): 538-541.
- [11] Liu H B, Lin H J, Yao L S. Calibration method for projector-camera-based telecentric fringe projection profilometry system[J]. Optics Express, 2017, 25(25): 31492-31508.
- [12] Qi L, Zhang Y X, Zhang X P, 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.
- [13] Song L M, Sun S Y, Yang Y G, et al. A multi-view stereo measurement system based on a laser scanner for fine workpieces[J]. Sensors, 2019, 19(2): 381.
- [14] Izquierdo M A G, et al. Sub-pixel measurement of 3D surfaces by laser scanning[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 76(1/2/3): 1-8
- [15] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2).
- [16] 胡斌, 李德华, 金刚. 基于方向模板的结构光条纹中心检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2002(11):59-60.
Hu B, Li D H, Jin G. New method for obtaining the center of structured light stripe center by direction template[J]. Computer Engineering and Applications, 2002(11):59-60.
- [17] 刘国文, 闫达远. 一种基于线结构光的三维视觉曲面测量方法[J]. 光学技术, 2005, 31(4): 554-556.
Liu G W, Yan D Y. A method to measure curved surface of line structured light three-dimension vision system[J]. Optical Technique, 2005, 31(4): 554-556.
- [18] Zhu F P, Liu W W, Shi H G, et al. Accurate 3D measurement system and calibration for speckle projection method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48 (11): 1132-1139.
- [19] Zhang S F, Li B, Ren F J, et al. High-precision measurement of binocular telecentric vision system with novel calibration and matching methods[J]. IEEE Access, 2019, 7: 54682-54692.
- [20] 史耀群, 邓林嘉, 王朝旭, 等. 一种基于结构光条纹投影的微小物体测量系统[J]. 应用光学, 2019, 40(6): 1120-1125.
Shi Y Q, Deng L J, Wang Z X, et al. Micro-objects measurement system based on structured light fringe projection[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(6): 1120-1125.