

基于单目视觉及线激光的非规则小尺寸物体三维重构

李奎¹, 陈华², 王婷婷¹, 刘波¹

(1. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022;

2. 河海大学 数学学院, 南京 210098)

摘要: 针对非规则小尺寸物体三维重构的问题, 提出了一种基于单目视觉和旋转线激光的三维重构方法; 采用张正友标定法求解相机内外参数完成相机标定, 利用整体最小二乘法拟合得到线激光平面在相机坐标系中的平面方程完成激光平面标定, 基于加权最小二乘法求解物体旋转时的旋转轴方程实现旋转轴标定; 利用单目相机对旋转物体上的线激光图像进行采样, 采用高斯滤波和重心法得到激光线条的中心线坐标, 根据系统标定结果计算得到物体的三维点云; 通过下采样和混合采样算法对三维点云进行数据量精简和平滑滤波处理, 并基于 Delaunary 生长算法将点云曲面化以实现物体的三维重构; 以一款镜头为实验对象进行了三维重构实验, 对得到的三维重构模型进行了半径尺寸测量; 结果表明: 重构模型的外圈轮廓半径平均误差小于 0.5 mm, 最大误差小于 1 mm, 标准差小于 0.7 mm, 验证了文章提出的方法在保证一定精度的条件下对物体三维重构的可行性和通用性。

关键词: 三维重构; 单目视觉; 线激光; 非规则; 小尺寸

3D Reconstruction of Irregular and Small-Sized Objects Based on Monocular Vision and Line Laser

LI Kui¹, CHEN Hua², WANG Tingting¹, LIU Bo¹

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. College of Mathematics, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at 3D reconstruction for irregular and small-sized objects, a 3D reconstruction method based on monocular vision and rotating line laser is proposed, which uses Zhang's calibration method to calculate the intrinsic and extrinsic parameters of the camera and complete the calibration of the camera. The total least squares method is used to fit the plane equation of line laser plane under the camera coordinate system to complete the calibration of optical plane. Using weighted least squares method to solve the rotation axis equation of an object during rotation and achieve the calibration of rotating axis; Using a monocular camera to sample line laser images on a rotating object, the Gaussian filter and centre of gravity methods are used to achieve the center line coordinates of the laser lines. Based on the system calibration results, the 3D point cloud of the object is calculated. 3D point cloud data are reduced and smoothed by down-sampling and mixed-sampling algorithms, and using Delaunary growing algorithm to curve point clouds for 3D reconstruction of the object. Taking a certain lens as the test object, a 3D reconstruction experiment is conducted, and the radius of the obtained reconstruction model is measured. Experimental results show that the average error of outer profile radius is less than 0.5 mm, with a maximum error of less than 1.0 mm and a standard deviation of less than 0.7 mm, which proves that the 3D reconstruction method is feasible and generic under certain precision requirements.

Keywords: 3D reconstruction; monocular vision; line laser; irregular; small-sized

收稿日期:2024-06-03; 修回日期:2024-07-09。

作者简介:江苏省自然科学基金面上项目(BK20201159)。

通讯作者:李奎(1982-),男,硕士,讲师。

引用格式:李奎,陈华,王婷婷,等. 基于单目视觉及线激光的非规则小尺寸物体三维重构[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(7): 219-226.

0 引言

在智能化、现代化的制造业中,传统的工业测量技术已经无法满足工业生产的需求^[1],传统测量方法对被测物体有较大的几何与形状上的限制,因此,迫切需要对复杂不规则物体进行重构与测量,进而能够得到被测物体的几何与表面结构信息。三维重构技术不仅应用于工业测量中,在人机交互、虚拟现实、逆向工程等领域同样拥有广阔的应用前景^[2-3]。

物体的三维重构技术主要分为接触式与非接触式两大类^[4],接触式三维重构是通过三坐标测量仪被测物体表面接触,进而得到数据完成测量与重构。该类方法测量精度较高,但执行效率较低,且对于非规则小尺寸物体的操作执行难度较大。非接触式三维重建大致分为主动视觉法和被动视觉法,是目前主流的三维重建方法,这两种三维重建方法根据研究程度主要可以分为双目三维重构,结构光三维重构和飞行时间法三维重构^[5]。

双目立体视觉系统属于被动视觉法中的一种,是立体视觉系统中使用最多的一种测量方法。文献[6]利用两台高分辨率 CCD 相机正交的阴影照相站系统采集高超速飞行体多幅图像信息,然后采用改进的 SFS 算法求解出物体表面各点的相对高度和表面法向量进行三维重构;文献[7]基于双目立体视觉计算出深度信息进行三维重构,从而实现四旋翼飞行器的自主避障等动作;文献[8]利用便携型 LenaCV 双目立体视觉成像系统,在确定最优建模参数的基础上,实现了岩体三维结构的重构。双目三维重构算法原理与实现成熟,但如果图像尺寸较大或者特征不明显,就会导致计算量大、耗时长或者无法匹配。利用激光雷达进行三维重构则属于典型的飞行时间法,文献[9]针对城市交通基础设施数字化重构的需求,对车载激光扫描与无人机倾斜摄影采集技术进行综合运用,通过信息采集、空地点云配准、点云分割实现了交通基础设施的三维重构;文献[10]基于集成激光器阵列和 APD 探测阵列设计并实现了 12 元线阵扫描三维成像激光雷达系统,在高速水平扫描转动平台驱动下实现了室内三维场景重构。该类方法测量误差来源为系统误差与非系统误差,系统误差主要由温度与摆动误差引起,非系统误差则由环境光强、曝光时间、场景深度不同等因素引起。结构光三维重构属于主动视觉法中的一种,通过主动发射结构光打在被测物体上,将被测物体的三维几何特征通过图像的像素特征体现出来,结构光三维重构包括点、线、面结构光^[11],其中面结构光是应用最广泛的一种。文献[12]提出了一种复合光栅投影的在线相位测量轮廓术,以解决在像素匹配和相位计算过程中对条纹频率不同需

求的矛盾。文献[13]提出了一种基于结构光的铆钉凹凸量双目视觉检测方法,通过工业投影仪将结构光投射到铆接表面,由双目相机采集投影图像,通过点云数据处理计算出铆钉的凹凸量。

相较于面结构光和双目视觉三维重构,线激光法简单易行,成本较低,且算法更加简便,运行效率高,能够在保证一定精度条件下完成物体的三维重构,因此,更加适合于小尺寸不规则物体重构的应用场景。线激光已在很多场合得到应用,董洁等^[14]利用线激光灯航空发动机叶片进行了三维重构,但设备成本较高,主要用于高精度重构场景。刘源洞等^[15]针对电力钢管塔法兰肋板自动焊接中焊缝引导问题,提出一种基于线激光光切面的肋板焊缝三维重构和测量方法,该方法主要针对焊缝进行提取和检测,无法作为一种通用的物体重构方法。本文针对小尺寸不规则物体设计了一套成本较低,具有一定精度的三维重构系统,采用单目视觉与旋转线激光相结合的方式完成三维重构,利用线激光器主动打出红色线激光射在物体上,经过反射到达相机,相机经过滤光片得到线激光的图像,被测物体需要围绕旋转轴进行匀速旋转,再利用旋转轴的几何关系,就能将各个线条进行变换得到被测物体的表面信息进行三维重构,重构算法通用,且能保证一定的重构精度。

1 系统构建

旋转式线激光三维重构系统涉及的硬件包括相机、线激光发射器、旋转平台、夹具和标定板,如图 1 所示。线激光发射器垂直发射到被测物体,相机与线激光发射器成一定角度进行拍摄,相机与线激光发射器都进行固定,防止拍摄过程中发生移动。右边标定板通过定制夹具固定在旋转平台上,利用固定夹具保证线激光发射器与标定板的交线与旋转轴重合,这样有利于对旋转轴的标定。

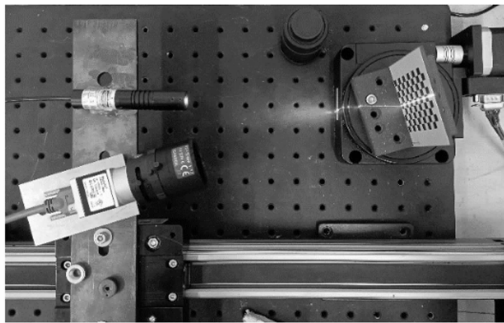


图 1 旋转式线激光测量系统实物图

旋转式线激光三维重构分为 4 个部分,如图 2 所示,首先是标定部分,包含了相机标定、线激光平面标定和旋转轴标定 3 个部分;其次是图像处理部分,主要

是对激光线条图像进行形态学处理、阈值处理和中心线提取; 再次是模型部分, 主要是通过标定得到的旋转轴方程建立起点云围绕旋转轴旋转的坐标变换, 即计算每一帧点云的偏移量, 最后是计算点云部分, 将上述 3 个部分结合起来, 便可计算得到点云数据。

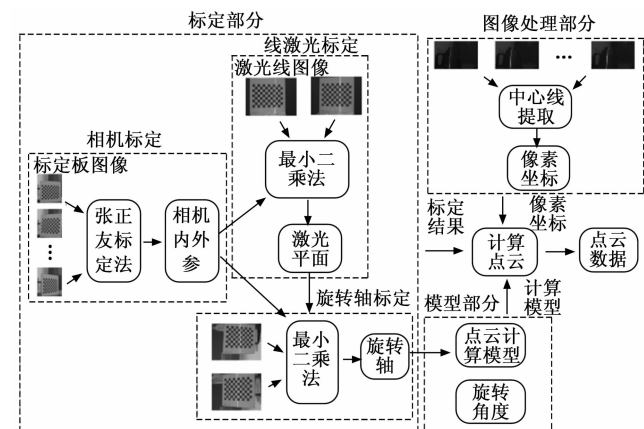


图 2 旋转式线激光重构系统组成图

2 系统标定

该系统标定主要包含了相机标定、线激光平面标定和旋转轴标定 3 个部分, 通过依次进行相机标定、光平面标定、旋转中心标定, 确定相机坐标、像素坐标、图像坐标和世界坐标 4 个坐标系之间的转换关系, 再根据旋转轴的方程和旋转角度, 建立起物体像素坐标和三维世界坐标之间的对应关系。

2.1 相机标定

相机标定利用传统相机标定模型进行相机建模并对其进行求解, 经过坐标系变换, 可以得到从世界坐标系到像素坐标系的变换关系, 用矩阵形式表示如下:

$$Z_c \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{d_x} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{d_y} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R & T \\ O_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: Z_c 为深度, $[u \ v \ 1]^T$ 表示像素坐标, d_x 表示横向像素点尺寸, d_y 表示纵向像素点尺寸, f 表示镜头焦距, 等式 (1) 右边依次为相机内参矩阵和外参矩阵, $[x_w \ y_w \ z_w]^T$ 表示世界坐标, 相机标定主要完成内外参矩阵中相关参数的求解。

利用相机的小孔成像模型同样不能忽略镜头的畸变, 畸变分为径向畸变、偏心畸变和薄棱镜畸变。考虑到这三类畸变中, 径向畸变占主要, 在标定过程中, 忽略偏心畸变和薄棱镜畸变, 只考虑径向畸变。

径向畸变是关于光心对称的, 主要有枕形畸变和桶形畸变, 区别是前者形变系数与到中心的距离成正比,

而后者形变系数与到中心点距离成反比, 它们的数学表达式如下:

$$\begin{cases} x_r = x_i(1 + k_1 r^2) \\ y_r = y_i(1 + k_2 r^2) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $[x_r \ y_r]^T$ 为矫正后的坐标, 而 $[x_i \ y_i]^T$ 为图像中的坐标, $r = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ 为目标像素点到中心的距离, k_1, k_2 为径向畸变系数, 其正负值代表了是枕形畸变或是桶形畸变。

采用张正友标定法进行相机标定, 标定过程中使用 20 张标定板图片, 尽量使得标定板覆盖所有的相机视野, 可以减小标定误差, 实验中采用的是 11×8 个角点的标定板, 为氧化铝材料, 棋盘格的边长为 5 毫米, 距离相机的距离为 20 厘米左右, 采集的标定板图片如图 3 所示。

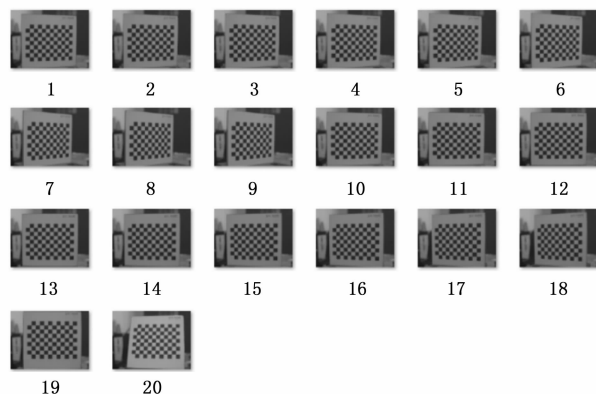


图 3 标定图片

相机标定得到的内部参数矩阵为

$$\begin{bmatrix} 864.5928 & 0 & 173.5633 & 0 \\ 0 & 864.7255 & 234.5981 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \text{畸变系数 } k_1 = -0.3817, k_2 = 0.2446, \text{表示二阶径向畸变。}$$

进行反向投影计算平均误差如图 4 所示, 平均误差为 0.075 像素点, 最大误差不超过 0.1 像素点, 说明标定结果比较精准, 满足线激光平面标定和激光轴标定的精度要求。

2.2 光平面标定

光平面标定是指将线激光平面在相机坐标系中表示出来, 本系统中, 标定板与线激光—相机系统没有固定关系或者可控运动, 采用基于靶物与传感器之间存在自由运动的标定方法, 利用标定板与线激光相交进行标定, 通过提取照射在标定板的光条中心点的亚像素坐标, 拟合出激光平面^[16]。

首先采集图 5 所示的标定板带有激光线条的图像, 提取出激光线条的像素坐标, 由相机成像模型计算得到激光线条像素坐标对应的世界坐标, 利用整体最小二乘

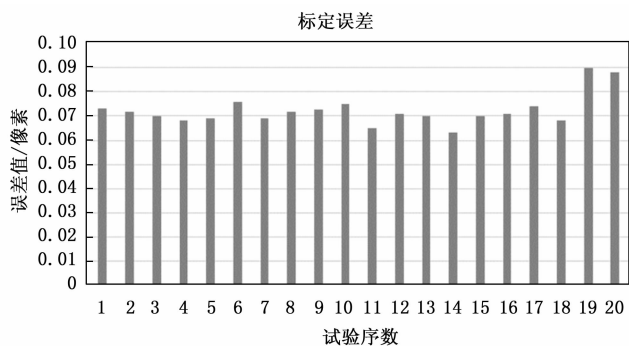


图 4 标定平均误差

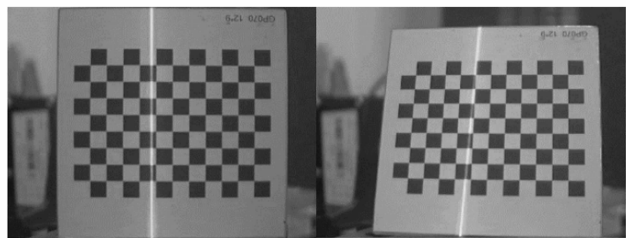


图 5 两幅激光一标定板图像

法或移动最小二乘法进行平面拟合^[17]。整体最小二乘法克服了经典方法对回归矩阵中的干扰因素的忽略，能得到更高的计算精度。

在三维坐标系中，平面方程可以表达为：

$$z = ax + by + c \quad (3)$$

由上述像素坐标到世界坐标的转换，可以计算出 n 个处于激光平面上的点的世界坐标：

$$\left\{ \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, n \right\} \quad (4)$$

考虑到会存在 x, y, z 三个方向的误差，可以对公式 (3) 加入误差项：

$$z + \delta_z = a(x + \delta_x) + b(y + \delta_y) + c \quad (5)$$

其中： $[\delta_x \ \delta_y \ \delta_z]^T$ 表示 x, y, z 三个方向的误差修正值。对上式进行整理，写为矩阵形式：

$$(A + E_A)X = L + E_L \quad (6)$$

式中， E_A 和 E_L 分别表示矩阵 A 和向量 L 的误差^[18]，即：

$$A_{n,3} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}, E_{A_{n,3}} = \begin{bmatrix} v_{x_1} & v_{y_1} & 1 \\ v_{x_2} & v_{y_2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{x_n} & v_{y_n} & 1 \end{bmatrix},$$

$$X_{3,1} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, L_{n,1} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}, E_{L_{n,1}} = \begin{bmatrix} v_{z_1} \\ v_{z_2} \\ \vdots \\ v_{z_n} \end{bmatrix}。$$

用矩阵奇异值分解法 (SVD) 求解待定参数的最小二乘解：

$$[A \ L] = \begin{bmatrix} U_1 & U_2 \\ m+1 & n-(m+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix} V^T = U_1 \Sigma V^T \quad (7)$$

其中：

$$V^T = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \\ m & m \end{bmatrix},$$

$$U_1 = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ m & m \end{bmatrix} \Sigma = \begin{bmatrix} \sum_1 & 0 \\ 0 & \sum_2 \\ m & m \end{bmatrix}_1^m$$

进而求得参数的整体最小二乘估计值为：

$$X = -V_{12} V_{22}^{-1} \quad (8)$$

残差矩阵可以表示为：

$$[E_A \ E_L] = U_{12} \sum_2 [V_{12}^T \ V_{22}^T] \quad (9)$$

通过公式 (10) 也可直接得到要求的参数：

$$X = (A^T A - \lambda_3^2 I)^{-1} A^T L \quad (10)$$

其中， λ_3^2 表示增广矩阵 $[A \ L]$ 的最小特征值。

经过计算，光平面方程为：

$$Z = 0.073 \ 224 \ 7x + 0.008 \ 191 \ 52y + 0.027 \ 348 \ 8 \quad (11)$$

激光平面在相机坐标系下的表示如图 6 所示。

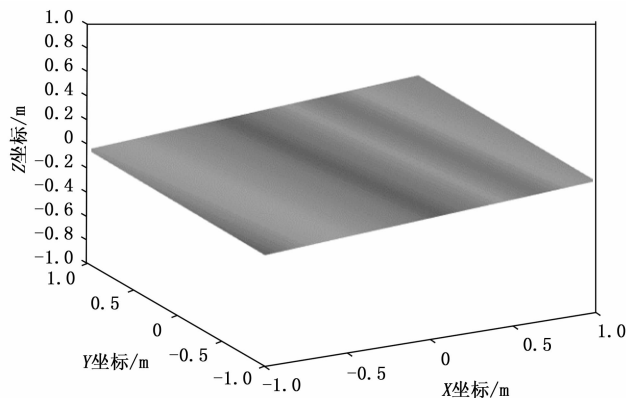


图 6 激光平面标定结果

2.3 旋转轴标定

旋转轴的标定与光平面标定类似，二者的区别在于，平面标定需要激光平面与标定板平面相交的直线不能太近，否则可能会出现重合的情况，对计算平面方程不利，所以在进行标定时，需要使标定板位姿变化比较大，从而得到的两条直线不会重合，能唯一确定激光平面。旋转轴的标定则与之相反，需要利用到夹具的固定，来确保两张图片中的激光线条都是于旋转轴重合的，这样将两幅图片中的激光线条像素坐标计算为世界坐标后，这些点都位于一条直线上，即旋转轴，如图 7

所示，两条激光线条与旋转轴重合。

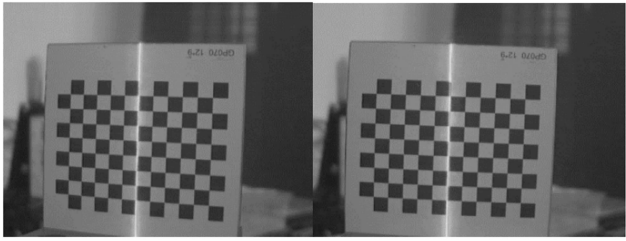


图 7 两幅线激光—标定板图片

通过相机标定模型将激光线条的像素坐标转换为世界坐标，进而利用加权最小二乘法进行三维直线拟合。设旋转轴点向式方程的表达为：

$$\frac{X-x_0}{a} = \frac{Y-y_0}{b} = \frac{Z-z_0}{c} = t \tag{12}$$

其离差平方和函数表示为：

$$Q_w(x_0, y_0, z_0, a, b, c) = \sum_{i=1}^n w_i [(X_i - (x_0 + at))^2 + [Y_i - (y_0 + bt)]^2 + [Z_i - (z_0 + ct)]^2] \tag{13}$$

为了达到离差平方和函数最小，式（13）对 t 进行求导并令其等于 0，从而得到一组方程组，求解该方程组即可得到最优参数，经过计算得到旋转轴方程为：

$$\frac{X+0.039\ 989\ 8}{0.898\ 435} = \frac{Y-0.047\ 158\ 5}{-0.021\ 227\ 6} = \frac{Z-0.999\ 913}{0.438\ 592} \tag{14}$$

标定得到的激光平面和旋转轴如图 8 所示。

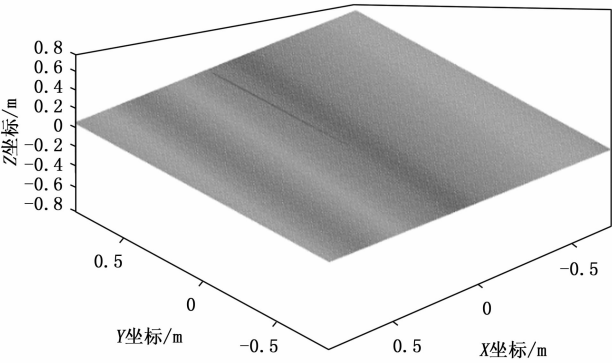


图 8 激光平面和旋转轴示意图

3 激光线条图像处理

3.1 ROI 设置

对于旋转式线激光三维重构，当相机和线激光相对固定后，再经过旋转台光轴的标定，图像中激光线条的位置和范围基本确定，可以按照设定矩形 ROI 的方法，设定目标处理区域，从而减少计算量。

如图 9 所示，ROI 图像尺寸分别为 322×424 ，相

较于原图 656×492 的分辨率，像素点减少百分之五十以上，实际运算过程中，处理一张图片用时对比：原图像 18.643 毫秒，设置 ROI 后用时 11.892 毫秒，所以设置 ROI 能够大幅提升图像处理速度。

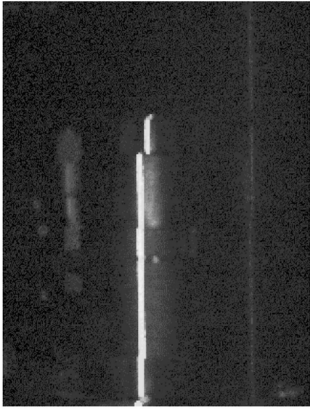
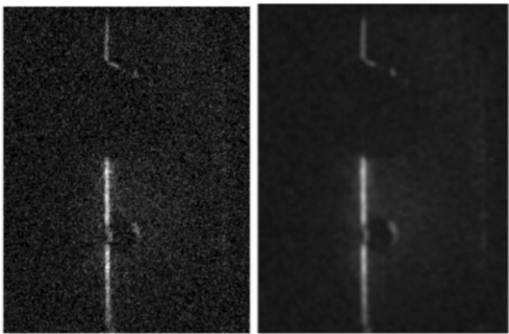


图 9 设置 ROI 后采集的原始图像

3.2 滤波处理

图像滤波操作用于去除图像中的噪声，图像降噪的关键在于信号与噪声的分布不同，信号主要为低频的，而噪声主要为高频的，去除噪声可以提高信噪比。针对实带噪声的线激光图片，采用高斯滤波进行滤波处理，处理结果分别如图 10 所示。



(a) 带噪声灰度图像 (b) 高斯滤波结果

图 10 滤波前后图像对比

3.3 中心线提取

经过滤波处理，图像噪声大大降低，需要利用滤波后的图像提取激光线条中心，由于原始图像采集已经进行了滤波和遮光等操作，产生的光斑和光晕并不是特别强烈，通过滤波操作可以除去大部分噪声，再考虑到计算速度的要求，本次中心线提取采取灰度重心法，在成像效果好的情况下，能够达到亚像素水平^[19]。

利用灰度重心法公式（15）和（16）获取中心线的像素坐标为：

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_i h(i, j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n h(i, j)} \tag{15}$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_i h(i, j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n h(i, j)} \quad (16)$$

其中: $h(i, j) = \begin{cases} h(i, j), & h(i, j) \geq T \\ 0, & h(i, j) < T \end{cases}$, $h(i, j)$ 表示

某个像素点的灰度值, 转为二值图则为 1, T 表示灰度阈值。

通过 ROI 设置、滤波以及灰度重心法, 得到光条的中心线如图 11 所示, 白线表示激光线条的边界, 边界内部黑色线条则表示提取的中心线。

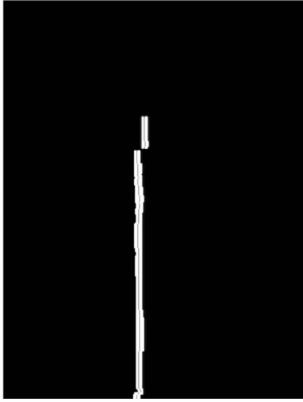


图 11 提取的线激光中心线

4 点云获取

4.1 点云计算模型

通过对激光线条图像进行中心线提取, 可以得到每一张图像中的激光线条的中心点像素坐标 $\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$, 带入公式 (17):

$$Z_c \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

得到相对于相机坐标系下的坐标 $\begin{bmatrix} x_c & y_c & z_c \end{bmatrix}^T$, 再带入到光平面方程 $Z = ax + by + c$, 求出真实的深度 Z , 根据公式 (1) 即可得到每一个中心点 $\begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix}^T$ 对应的世界坐标 $\begin{bmatrix} x_w & y_w & z_w \end{bmatrix}^T$ 。

4.2 点云旋转偏移

通过上述计算每一帧的点云, 可以得到每张图像中心点对应的真实的三维坐标, 由于每张激光图像都是在转台旋转一定角度后旋转获取, 所以经过旋转偏移得到其真实世界坐标。空间点围绕任意直线旋转的坐标变换公式为:

$$\begin{aligned} x' &= [v_x \cdot v_x \cdot (1 - \cos\theta) + \cos\theta] \cdot (x - X) + \\ &[v_x \cdot v_y \cdot (1 - \cos\theta) - v_z \cdot \sin\theta] \cdot (y - Y) + \\ &[v_x \cdot v_z \cdot (1 - \cos\theta) + v_y \cdot \sin\theta] \cdot (z - Z) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} y' &= [v_x \cdot v_y \cdot (1 - \cos\theta) + v_z \cdot \cos\theta] \cdot (x - X) + \\ &[v_y \cdot v_y \cdot (1 - \cos\theta) + \cos\theta] \cdot (y - Y) + \\ &[v_y \cdot v_z \cdot (1 - \cos\theta) + v_x \cdot \sin\theta] \cdot (z - Z) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} z' &= [v_x \cdot v_z \cdot (1 - \cos\theta) - v_y \cdot \sin\theta] \cdot (x - X) + \\ &[v_y \cdot v_z \cdot (1 - \cos\theta) + v_x \cdot \cos\theta] \cdot (y - Y) + \\ &[v_z \cdot v_z \cdot (1 - \cos\theta) + \cos\theta] \cdot (z - Z) \end{aligned} \quad (20)$$

其中: $\begin{bmatrix} v_x & v_y & v_z \end{bmatrix}^T$ 表示空间直线的方向向量, $\begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^T$ 表示空间直线经过的点坐标参数, 这两个参数在旋转轴标定时已经得到, θ 表示物体旋转的角度。

在系统搭建部分, 已经知道旋转一周相机将采集 450 张左右图片, 在实际的实验中, 旋转一周采集 451 张图像, 每两张图片之间存在一个旋转角, 即 360° 平均分为 450 份, 每相邻图片之间的间隔为 0.8° , 按照这个规律, 第 n 张图片的旋转量应该为 $n \times 0.8^\circ$, 带入公式 (18) — (20) 中求得添加旋转偏移后的 $\begin{bmatrix} x' & y' & z' \end{bmatrix}^T$, 将所有计算出来的点云数据放在同一个坐标系中显示, 便可得到物体的三维重构模型。

4.3 点云处理

点云处理主要包括点云下采样、离群杂点滤波处、点云重采样平滑机曲面建模。原始生成的点云数据过于繁杂, 具有重建时间长、效率低、冗余大等问题, 不利于后续三角化处理。本文采用体素下采样法, 将原点云划分为以体素为单位的新点云, 即每个体素中包含原来的多个点云像素点, 再对每个体素中的点云像素点进行处理, 即精简操作, 达到下采样的效果。

下采样得到点云依然有很多杂质点存在, 需要对杂质点进行滤波处理, 减少噪声对建立的模型产生影响, 同样, 由于缺少不含噪声的标准模型或者点云数据用于比较计算误差, 本文采用高斯滤波改进的双边滤波处理。

点云高斯滤波利用卷积核进行卷积操作, 相比于普通的卷积核, 高斯卷积核工作性能取决于高斯滤波函数的标准差:

$$w(i, j) = \exp\left(-\frac{(i-x)^2 + (j-y)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (21)$$

公式 (21) 表示高斯滤波核函数, 主要参数为标准差 σ 。对于点云中的某一点 p_0 , 写出其近邻点表达式:

$$\{p_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) \mid -n \leq i \leq n, -m \leq j \leq m\} \quad (22)$$

结合式 (21) 与 (22), 得到经高斯滤波后某一点 p_0 的坐标为:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m z_{ij} w(i,j) \Delta x \Delta y}{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m w(i,j) \Delta x \Delta y} \tag{23}$$

其中： Δx 和 Δy 分别为邻域点到该点的距离， z_{ij} 为邻域该点的坐标值。

高斯滤波关键在于对一个范围内的点云像素点进行的操作，利用到了这个范围内的像素点的相关性，而其缺点是没有考虑到图像中物体的边缘信息，高斯滤波会将原有的边缘信息也进行削减。

通过引入空间域权值 w_s 和灰度值权值 w_r 来表示双边权值，总的权值可以表示为：

$$w = w_s \times w_r \tag{24}$$

其中：

$$w_s = \exp\left(-\frac{(i-x)^2 + (j-y)^2}{2\sigma_s^2}\right) \tag{25}$$

$$w_r = \exp\left(-\frac{I(i,j) - I(i,j)^2}{2\sigma_r^2}\right) \tag{26}$$

类似于高斯滤波函数， σ_s 和 σ_r 表示双边滤波函数的标准差，它们共同决定了滤波性能， $I(i,j)$ 表示该点对应的灰度值。

为了在后续点云三角化过程中避免出现某处点云空白或过于稀疏的情况，以及某处点云过于密集的情况，需要对点云进行重采样处理，从而达到平滑的效果，不仅减少点云数量，而且能够提高曲面拟合精度。重采样算法能够补全部分线激光未扫描到的空白处的点云信息，比如和线激光平面接近于共面的某些侧面。本文采用混合采样算法，结合均匀采样和曲率采样的优势，这样既保留均匀采样的高效快速的特点，又保留了曲率采样对点云特征保留功能的特点。

经过上述下采样简化、双边滤波去除噪声、重采样进行平滑三步处理，得到更加精简、高信噪比以及更加平滑的点云，可以利用得到的点云数据，进一步生成曲面模型。本文基于三维 Delaunary 生长算法原理，利用 PCL 点云库，实现有序点云的三角化，将上述一系列处理得到的点云（格式为 .ply）转换为模型文件（格式为 .stl），再利用 Solidworks 软件，便可得到三角化后的模型。

5 实验结果及分析

采用图 1 所示实验装置，对一款镜头进行三维重构，镜头原始图片如图 12 所示，重构时镜头加上了前后端盖。相机型号为 Basler ace acA640-90 um，分辨率 656×492，线激光型号为 FU639180L100-BD1270，单通道，波长 639 nm，线宽 0.6~2 mm，旋转平台通过步进电机控制器控制，每圈匀速转动耗时 15 秒，旋转

一周相机将采集 450 张左右图片，在实际的实验中，旋转一周采集 451 张图像，重构的三维模型如图 13 所示。



图 12 用于重构实验的镜头实物图



图 13 重构的镜头 stl 模型

对重构的三维模型选取上端的截面 1，在 Solid-Works 软件中选取该截面圆周上均布的 100 个点，测量每个点对应得圆周半径，测量结果如图 14 所示。

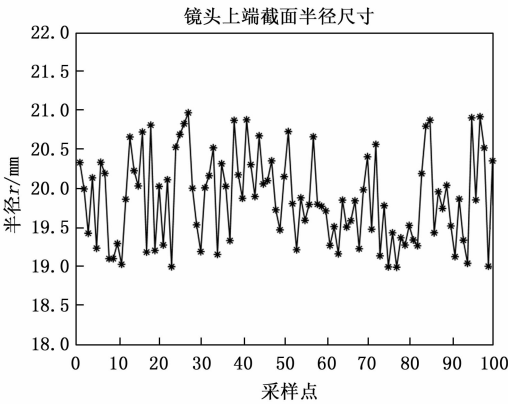


图 14 镜头截面 1 的半径测量值

截面 2 中包含凸起的旋钮部分，选择截面 2 上 100 个的测量点，其中旋钮部分选择 20 个点，测量截面 2 上的点到镜头中心线的距离，测量结果如图 15 所示。

各截面测量的最大值、最小值、平均值、平均误差和标准差如表 1 所示。

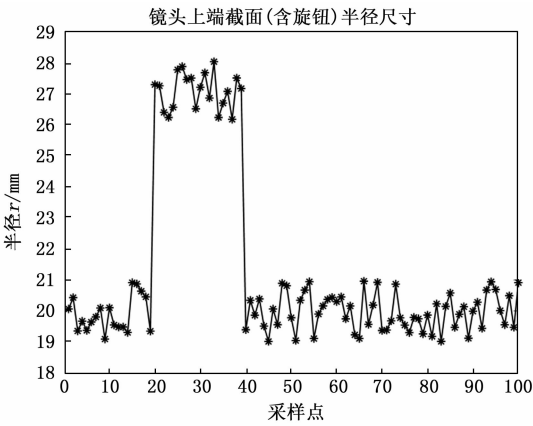


图 15 镜头截面 2 的半径测量值

表 1 重构模型的测量数据

	理论 值/mm	测量最大 值/mm	测量最小 值/mm	测量平均 值/mm	平均误 差/mm	标准差 /mm
截面 1	20.0	20.984 2	19.037	19.990 4	0.499 2	0.584 2
截面 2(非 旋钮部分)	20.0	20.996 9	19.046	19.957 5	0.482 9	0.580 1
截面 2 (旋钮部分)	27.05	27.989 9	26.153 8	27.092 7	0.498 6	0.672 1

6 结束语

本文构建了以单目相机、线激光和旋转平台为主要组成部分的三维重构系统，对非规则小尺寸物体的三维重构问题提出了一种通用的重构方法。首先通过系统标定建立起像素坐标和世界坐标之间的对应关系；其次对相机拍摄的线激光图像进行处理，并根据物体的旋转角度增加当前帧图像的旋转偏移量，获得物体的三维点云；通过对点云进行下采样、统计分析滤波、平滑处理、表面法线估计和点云曲面化处理得到物体的三维重构模型。最后，为了验证算法的可行性，以一款镜头为实验对象进行了三维重构实验，对得到的三维重构模型进行了半径尺寸测量，结果表明，重构模型的外圈轮廓半径平均误差小于 0.5 mm，最大误差小于 1 mm，标准差小于 0.7 mm，满足一定的精度要求。

下一阶段，可采用高分辨率的相机以及高精度伺服转台，并改进点云的处理算法，从而进一步提高三维重建的精度。

参考文献:

[1] 张祖勋, 郑顺义, 王晓南. 工业摄影测量技术发展与应用[J]. 测绘学报, 2022, 51 (6): 843-853.

[2] HYUNOH L, JINWON L, HYUNGKI K, et al. Dataset and method for deep learning-based reconstruction of 3D CAD models containing machining features for mechanical parts [J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2021, 9 (1): 114-127.

[3] YUANDONG N, LIMIN L, FUYU H, et al. Overview of image-based 3D reconstruction technology [J]. Journal of European Optical Society-Rapid Publications, 2024, 20 (18): 1-18.

[4] 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]. 激光与光电子学进展, 2017, 54 (7): 27-41.

[5] 徐超, 李乔. 基于计算机视觉的三维重建技术综述 [J]. 数字技术与应用, 2017 (1): 54-56.

[6] 李明, 王端, 宋耀东, 等. 基于多粒度匹配的高超速飞行体三维重构方法 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (1): 214-218.

[7] 徐今强, 刘付颖, 叶伟杰, 等. 基于双目立体视觉避障的四旋翼飞行器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (3): 183-191.

[8] 王培涛, 曹笑颖, 郭高鑫, 等. 基于双目立体视觉的岩体结构三维建模及其参数优化 [J/OL]. 哈尔滨工业大学学报, <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20240517.1953.006>.

[9] 王升钊, 陈雨人, 杨元弢. 空地融合的城市道路基础设施数字化技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (11): 176-188.

[10] 唐铂, 李振华, 王春勇, 等. 线阵扫描三维成像激光雷达系统 [J]. 激光应用技术, 2017, 47 (11): 1358-1364.

[11] 吕虹毓, 李茂月, 蔡东辰, 等. 光栅投影在机三维形貌检测技术研究进展 [J]. 中国光学, 2023, 16 (3): 500-513.

[12] 彭旷, 曹益平, 武应春. 一种复合光栅投影的在线相位测量轮廓术 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (12): 46-51.

[13] 余厚云, 孙建阳, 孙艺洪, 等. 基于结构光的铆钉凹凸量双目视觉检测方法 [J]. 航空制造技术, 2024, 67 (6): 34-41.

[14] 董洁, 王宗平, 欧登荧, 等. 基于线激光扫描的叶片三维型面重构方法 [J]. 四川大学学报, 2023, 60 (3): 1-8.

[15] 刘源洞, 薛海浪, 岳泽宇, 等. 光切面法的电力钢管塔法兰肋板焊缝三维重构 [J/OL]. 机械设计与制造, <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20230718.011>.

[16] 李忠祥, 周哲海, 陈丽, 等. 一种线结构光平面的标定方法 [J]. 激光技术, 2023, 47 (6): 795-802.

[17] 李二涛, 张国焯, 曾虹. 基于最小二乘的曲面拟合算法研究 [J]. 杭州电子科技大学学报, 2009, 29 (2): 48-51.

[18] 袁庆, 楼立志, 陈玮娟. 基于加权总体最小二乘的平面点云拟合方法 [J]. 测绘通报, 2011, 408 (3): 1-3.

[19] 李伟明, 彭国, 高兴宇, 等. 线激光光条中心快速提取算法 [J]. 中国激光, 2020, 47 (3): 192-199.