



基于单目-线激光的三维重建实验设计

石 岩, 郭 翔, 周 辉*, 周立青

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘要: 推进以项目为导向的光学实验教学改革, 设计了基于单目-线激光的三维重建实验。采用单目相机、线激光器、步进丝杆、树莓派等搭建基于针孔成像模型的激光三角测量系统。通过棋盘标定获取相机内、外参数和畸变参数等标定参数, 以基于阈值分割的方法提取光条中心, 获取目标物体表面点云数据。通过手动配准和迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法对点云进行配准和曲面重建, 实现对目标物进行三维重建。该实验注重学科融合, 有利于激发学生对科学研究的兴趣, 提高创新意识, 增强利用所学专业解决实际问题的能力。

关键词: 结构光; 三维重建; 点云获取; 点云配准

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20240148](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20240148)

3D Reconstruction Experiment Design Based on the Monocular-Line Laser

SHI Yan, GUO Xiang, ZHOU Hui*, ZHOU Liqing

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To facilitate the advancement of the project-oriented optical experiment teaching reform, a meticulously designed three-dimensional reconstruction experiment utilizing monocular-line laser technology is presented. A laser triangulation system is established based on the pinhole imaging model, incorporating a monocular camera, line laser, stepping screw, and Raspberry Pi. The calibration parameters encompassing internal and external camera parameters as well as distortion parameters are accurately determined through checkerboard calibration, and the method of threshold segmentation is employed to extract the center of the laser light bar for acquiring point cloud data representing the target object surface. By using the algorithms of the manual registration and the nearest point iteration to register the point clouds and reconstruct the surfaces, three-dimensional reconstruction of the target object can be implemented. This experiment emphasizes interdisciplinary integration, which helps stimulate students' interest in scientific research, foster innovation awareness, and enhance their ability to apply professional knowledge to solve practical problems.

Key words: structured light; 3D reconstruction; point cloud acquisition; point cloud registration

随着科学技术和工业生产的快速发展, 三维重建在建筑设计、虚拟现实、医学影像等领域应用愈加广泛, 同时三维重建的方式也更加多样。三维重建技术主要包括接触式重建和非接触式重建^[1], 非接触型三维重建可分为基于光学图像的三维重建和非光学图像的三维重建。非光学图像重建通过激光、声波和雷达等发射信号与重建对象的反射信息来获取对象的三维信息, 精度较低, 适用于大范围场景重建。而随着高分辨率相机的出现和图像处理以及机器视觉的高速发展, 基于

光学图像的三维重建逐渐成为这一领域中的热点, 这种重建方式是以光学图像为基础, 从二维图像或其他类型的数据中恢复三维场景, 其优点是无需接触, 对重建目标大小无限制, 效率高。根据图像采集过程中光源的控制情况, 基于光学图像的三维重建可分为被动光学重建和主动光学重建。主动光学重建中结构光扫描重建技术^[2]按照光源性质不同可分为激光三角法^[3-6]、相位移法^[7]、飞行时间法^[8]、编码结构光法^[9]等方法。激光三角法是采用线激光投射到目标表面, 由于物

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(41971302); 湖北本科高校省级教学改革研究项目(2023013); 武汉大学“教育教学改革”建设引导专项(2022)。

作者简介: 石岩, 硕士, 高级实验师, 主要从事光电测控与仪器方面的研究。E-mail: 20814929@qq.com

* 通信作者: 周辉, 博士, 教授, 主要从事激光遥感与空间探测方面的研究。E-mail: zhouhui@whu.edu.cn

体表面的起伏不同会形成不同的激光条纹, 同时利用相机捕捉其表面信息, 推导出物体表面上各点的三维坐标, 从而对其进行重建恢复, 适用于对表面细节要求较高的三维重建。因此, 本文设计和开发了基于单目-线激光的直线扫描式激光三角测量系统平台, 并在此平台上提出一个具有综合性和创新性的实验。该实验从不同角度投射激光线条到目标物体表面, 并使用相机捕捉每个角度的图像, 得到多角度的二维图像数据。通过使用多视图几何和光学原理对二维图像数据进行处理, 根据成像信息反解出目标物点的空间位置信息, 进而得到整个物体的三维重建和几何参数测量。该实验将光机电算集成在一起, 结构清晰, 操作步骤明确, 为学生对三维重建技术的理解提供了直观清晰的展现方式。

1 实验原理

1.1 基于线激光的三角测量模型

基于线激光的三角测量模型是通过使用激光器产生的单色线激光配合相机来获取物体表面的信息。该模型通过从不同角度投射激光线条到目标物体上, 并使用相机捕捉每个角度的图像, 从而得到多组二维图像数据^[10]。在每次测量时, 使激光器与相机的位置处于相对静止, 这样照射在目标物体上的激光光条就和它在相机成像面上所成的影像形成了一一对应的关系, 如图1所示。通过使用多视图几何和光学原理对这些数据进行处理, 就可以推断出三维模型的几何结构, 从而实现高精度的三维重建。

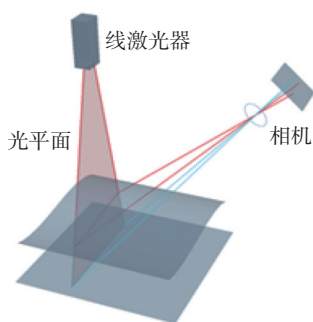


图1 线激光三角测量模型图

1.2 坐标转换原理

1.2.1 相机针孔成像模型

相机针孔成像模型用于描述三维空间物体坐标与经过成像后的像素图像坐标的对应关系, 在镜头景深范围内能较好地贴合实际成像。该模型

的成像过程分为坐标转换与画面畸变校正两个步骤, 如图2所示。

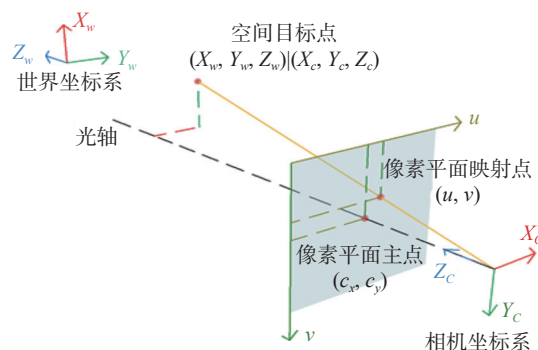


图2 针孔成像模型图

在未考虑畸变的情况下, 成像过程的数学表达式如下:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x & 0 \\ 0 & f_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: s 是缩放比例系数; (u, v) 是某世界坐标系的点 (X_w, Y_w, Z_w) 映射到像素平面的像素坐标; (f_x, f_y) 是镜头焦距以电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 单个像素的 x 、 y 方向尺寸为单位的长度; (c_x, c_y) 是相机像素平面主点, 即镜头光轴与像素平面交点的像素坐标; r 、 t 参数是世界坐标系到相机坐标系的转换参数。

针孔成像过程的第一步是将空间点的世界坐标系坐标转换到以镜头主点为原点的坐标系上, 得到相机坐标系的坐标值 (X_c, Y_c, Z_c) , 即:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

从图2可以得到, 空间点与像素成像点在相机坐标系上的坐标值是成比例的, 因此当已知相机像素平面主点 (c_x, c_y) 和以像素尺寸为单位的焦距为 (f_x, f_y) 时, 相机坐标系坐标值与像素坐标值的转化关系为:

$$\begin{aligned} u &= f_x x' + c_x \\ v &= f_y y' + c_y \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $x' = X_c/Z_c$, $y' = Y_c/Z_c$, 矩阵表达式为

$$Z_C \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中：矩阵 K 也称为相机的内部矩阵。相对的，相机的外部矩阵则是 r 、 t 参数构成的坐标系转换矩阵。因此，在已知相机内部参数^[11]和外部参数的情况下，便能通过针孔成像模型建立世界坐标系上任意点到像素平面坐标的映射关系。

实际相机的成像过程并不是理想的针孔成像模型，而是存在畸变以及其他像差的。畸变的存在会导致实际像素坐标值与理想像素坐标值产生偏差，因此，需要建立畸变的数学模型以对其进行矫正。在 OpenCV 的畸变模型^[12]中一共描述了 4 种畸变类型：径向畸变、切向畸变、薄透镜畸变和透视畸变，前 3 种畸变源于镜头本身的像差，最后一种畸变则源于 CCD 与镜头的安装误差。这些畸变在针孔成像模型中会对相机坐标系与像素坐标系的转换比例 (x', y') 产生影响，径向畸变、切向畸变和薄透镜畸变的表达式如下：

$$\begin{aligned} x'' &= x' \frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} + \\ &2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2) + s_1 r^2 + s_2 r^4 \\ y'' &= y' \frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} + \\ &p_1 (r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x' y' + s_3 r^2 + s_4 r^4 \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $r^2 = x'^2 + y'^2$ ， $(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6)$ 为径向畸变参数； (p_1, p_2) 为切向畸变参数； (s_1, s_2, s_3, s_4) 为薄透镜畸变参数。

透视畸变表达式为：

$$\begin{aligned} s \begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_{33}(\tau_x, \tau_y) & 0 & -R_{13}(\tau_x, \tau_y) \\ 0 & R_{33}(\tau_x, \tau_y) & -R_{23}(\tau_x, \tau_y) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ &R(\tau_x, \tau_y) \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

式中： (τ_x, τ_y) 是透视畸变参数， $R(\tau_x, \tau_y)$ 是 x 、 y 两轴旋转矩阵。因此，经过畸变后的像素坐标为：

$$\begin{aligned} u &= f_x x''' + c_x \\ v &= f_y y''' + c_y \end{aligned} \quad (7)$$

在目标空间物体处于镜头的景深范围内时，用以上基于针孔成像的坐标转换和畸变模型近似

计算实际镜头的成像图像。

1.2.2 像素点-空间平面点转换原理

在针孔成像模型的成像过程中，空间点最终会映射到像素坐标系上，并丢失像素坐标系的高度信息，最终得到的结果只包含了像素的二维坐标。因此其映射关系是单向的，无法仅通过像素点的坐标值还原出其在空间的三维坐标。

当空间目标点处在世界坐标系上一个确定的平面上时，其像素坐标值 (u, v) 与相机坐标系的高度坐标 Z_C 能建立起一一对应的关系，此时便可以从像素坐标直接转换到世界坐标系的三维坐标。这个确定的平面在激光三角测量系统中称为光平面，用于将激光光斑中心的像素坐标转换为世界坐标系的三维坐标，这一步是激光三角测量系统中最关键的步骤之一。通常，光平面由一个包含 4 个参数的三维平面方程来表示：

$$AX_W + BY_W + CZ_W + D = 0 \quad (8)$$

将上式与针孔成像表达式联立消去参数 s 得如下非齐次线性方程组：

$$M_{3 \times 3} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} = N_{3 \times 1} \quad (9)$$

其中：

$$\begin{aligned} M_{3 \times 3} &= \begin{bmatrix} f_x r_{11} + c_x r_{31} - ur_{31} & f_x r_{12} + c_x r_{32} - ur_{32} & f_x r_{13} + c_x r_{33} - ur_{33} \\ f_y r_{21} + c_y r_{31} - vr_{31} & f_y r_{22} + c_y r_{32} - vr_{32} & f_y r_{23} + c_y r_{33} - vr_{33} \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{matrix} A & B & C \end{matrix} \end{aligned} \quad (10)$$

$$N_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} ut_3 - c_x t_3 - f_x t_1 \\ ut_3 - c_y t_3 - f_y t_1 \\ -D \end{bmatrix} \quad (11)$$

求解上式即可得到空间平面目标点在世界坐标系的坐标 (X_W, Y_W, Z_W) 。

1.2.3 光平面参数获取方法

本实验设计利用精确标定棋盘同时作为坐标系基准以及激光线显示载体的方法，对激光平面的点云进行平面拟合从而提取光平面参数。光平面点云的获取有 3 个主要步骤：棋盘坐标系提取、线激光中心提取及其空间坐标计算、世界坐标系坐标转换^[13-15]。在获取光平面点云前，要保证已经通过精确标定棋盘对相机的内部矩阵和畸变参数进行标定，并给定测量系统整体的世界坐标系。

1.3 直线扫描和旋转测量原理

在测量系统不发生移动的情况下, 激光三角测量系统中像素坐标与光平面的转换只能得到空间中一个平面切片的点云, 无法得到被测目标的整体三维信息。因此, 激光三角测量系统通常要求测量系统与被测物发生相对移动, 通过相对移动的参数对物体的切片点云进行三维恢复^[16-17], 从而得到足以描述物体三维形状的点云。为了得到足够的点云, 本实验设计采用直线扫描测量方法和旋转测量方法。

1.3.1 直线扫描测量原理

直线扫描测量方法主要通过直线移动机构带动被测目标或测量系统移动, 从而产生相对位移以实现物体的三维点云测量。本实验设计采用步进丝杆作为可控位移量的直线移动机构, 并以固定的直线位移量进行逐帧式步进测量, 这种测量方法位移精度高, 能提高点云的测量精度。

直线扫描测量方法中, 需要事先取得直线移动机构相对于世界坐标系的单位化移动矢量。本实验设计采用棋盘作为坐标载体的方式求解移动矢量。该方法的思路是从直线机构前后两个位置拍摄棋盘图像, 求取棋盘坐标系, 并利用世界坐标系转换的方法将棋盘角点恢复到世界坐标系上, 通过对两个位置的棋盘对应角点世界坐标系坐标进行相减, 便可得到移动矢量, 最后对该矢量单位化即可。取得单位化移动矢量后, 只要根据每次测量时的相对位移总量计算切片点云的偏移矢量, 并将点云坐标与该偏移矢量相加, 便能逐步恢复出物体的三维点云。

1.3.2 旋转测量原理

由于直线扫描无法获取其他面的点云信息, 为了更加方便地对一个目标物体的整体点云进行测量, 本实验设计引入了基于旋转平台的点云测量和转角恢复机制。该旋转平台相对于世界坐标系是固定的, 被测物放置在旋转平台上, 在需要进行被测物其它角度的点云测量时, 只需记录旋转平台相对于初始位置的转角值, 便能通过计算直接恢复出经过配准的物体点云。

在旋转测量系统中, 影响点云的恢复精度最关键的步骤是旋转平台旋转轴空间参数提取, 该参数的准确程度直接影响了最终的点云转角恢复结果。本实验利用标准球体作为坐标载体, 在已知标准球点云的情况下, 利用三维球拟合算法对

多组标准球点云球心进行三维圆拟合即可得到转轴的空间参数, 采用本方法提取的转轴对标准球进行转角恢复后的半径拟合误差为 0.128 mm。基于上述方法得到的旋转平台转轴空间参数, 对不同旋转位置下的点云进行转角恢复, 从而得到被测物多个测量角度下的配准点云。

2 实验系统设计

本实验设计包含硬件部分和软件部分的三维重建系统, 系统流程如图 3 所示。

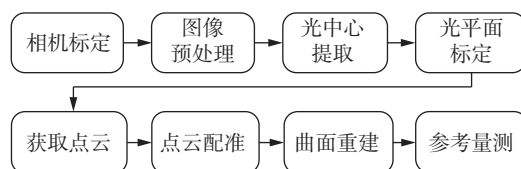


图 3 系统流程图

2.1 硬件系统

实验设计搭建的单目-线激光三维重建系统的硬件分为测量组件、运动组件、控制与计算 3 部分, 具体的硬件设备实物如图 4 所示。

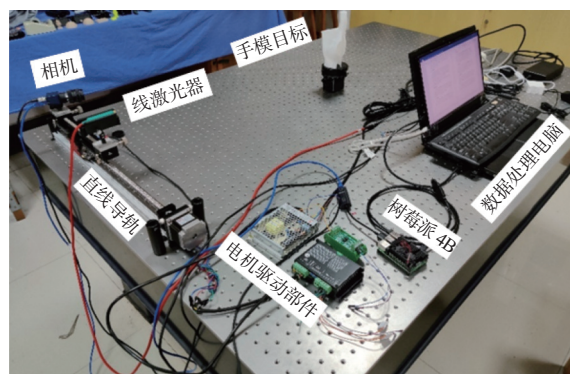


图 4 硬件设备实物图

2.1.1 测量组件

系统的测量组件由相机、线激光器和目标/标定棋盘 3 部分组成。相机选定大恒图像的 MER-500-14GM 千兆网口相机, 其镜头接口为 C 接口, 利用千兆网线与计算机连接, 同时支持 Windows 和 Linux 操作系统, 通用性较好; 相机镜头采用焦距约为 25 mm 的 C 接口定焦镜头; 采用波长为 532 nm, 功率为 5 mW 的线激光作为光源。

2.1.2 运动组件

本系统的运动组件有直线丝杆和旋转平台两个。直线丝杆采用了福誉科技公司的 FSL-40 直线模组, 其丝杆导程为 10 mm, 运动范围为 500 mm,

重复定位精度为 0.05 mm, 能满足此实验系统的要求。此外该直线模组还包含了 AC-DC 电源与步进电机驱动器两个驱动部件, 通过发送信号脉冲的个数对直线模组的单步步进的进行控制, 并通过方向信号电平控制步进方向。旋转平台是实现旋转测量和点云转角恢复的关键, 本系统采用的是读数精度为 2' 的手动式旋转平台。

2.1.3 控制与计算组件

本实验系统的硬件控制需求较为简单, 仅需要对直线丝杆驱动器发送脉冲信号以及调用相机两种需求, 因此采用了同时具有 GPIO 信号输入能力

和运算性能的树莓派 4B 和笔记本电脑作为控制与计算组件。

2.2 软件系统

本次实验设计的代码主要是在 Thonny Python IDE 和 PyCharm 上进行编写和调试, 在 Windows 和 Raspbian 64 位系统上运行, 可分为点云获取(相机标定、光条中心提取、光平面标定)和点云处理(点云配准、曲面重建、参数测量)两部分, 其中 Windows 系统运行点云获取部分的代码, Raspbian 64 位系统运行点云处理部分的代码, 算法流程如图 5 所示。

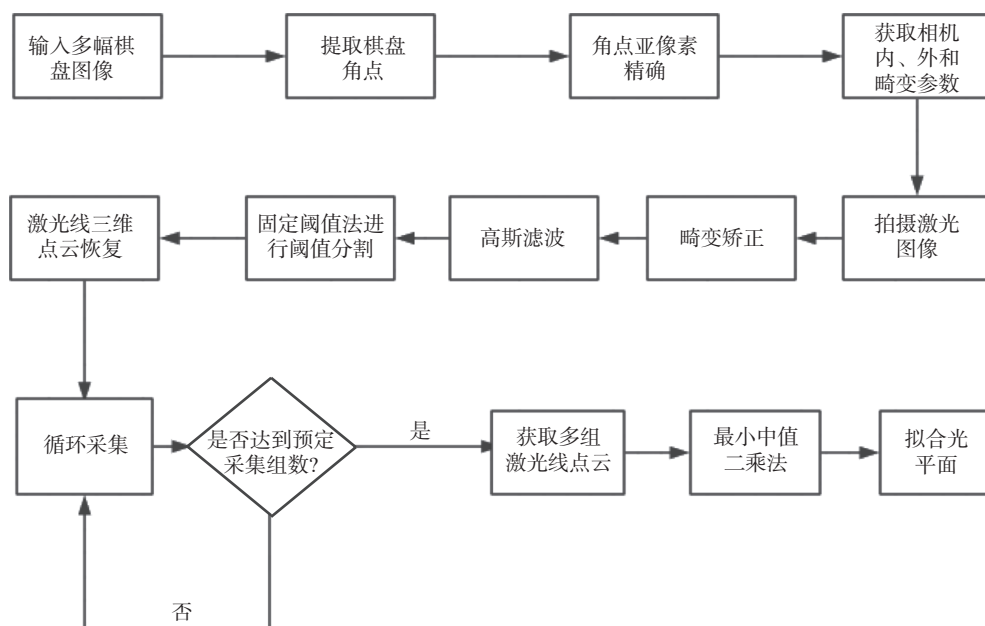


图 5 算法流程图

2.3 实验步骤

实验过程的具体操作步骤分以下 7 步: 相机标定、激光光条中心提取、光平面标定、点云获取、点云配准、曲面重建、参数测量。

2.3.1 相机标定

相机标定目的在于确定相机的内部参数和外部参数, 从而将图像坐标系与世界坐标系相关联, 并为后续图像预处理部分提供畸变参数, 从而使三维重建结果更加精确, 主要包括以下步骤。

1) 拍摄标定板图像

将标定板放置在相机前方, 在不同角度、不同方位下拍摄多张图像, 要求覆盖整个标定板区域, 同时保证标定板在相机视场内的范围尽量大。每张图像的拍摄角度需要在一定范围内变化, 以便计算出相机的外部参数, 标定板及图像

采集如图 6(a)所示。

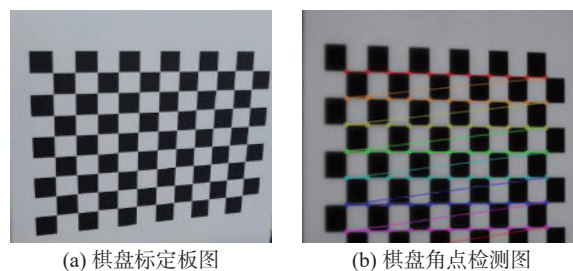


图 6 相机标定处理图

2) 检测角点

对获取得到的多幅标定板图像进行角点(棋盘格上黑白方块的交点位置)检测, 如图 6(b)所示。然后对每个检测到的角点进一步提取亚像素角点信息, 计算其在图像坐标系下的像素坐标。

3) 计算相机内、外参数

对拍摄的多张标定板图像角点信息进行标定, 计算相机的内部参数、平行向量、旋转向量等, 并将标定结果保存, 供后续图像预处理和光平面标定使用。

2.3.2 激光光条中心提取

将线激光照射在手模目标物体上, 调用相机采集激光光条图像并结合相机标定结果, 对采集的图像进行畸变矫正和去噪等预处理, 并以固定阈值对图像进行二值化处理, 利用激光光束的灰度分布特征, 以基于阈值分割的方式进行激光光条中心提取, 如图 7 所示。

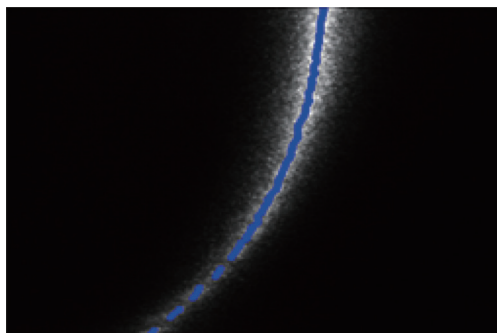


图 7 光条中心提取图

2.3.3 光平面标定

分别获取在有、无激光照射下的标定板图像, 移动标定板, 重复以上步骤, 通过拍摄多幅有、无激光照射时的标定板图像, 便可以获得多条空间参数已知的激光光条, 使用最小中值二乘法对光平面在世界坐标系下的平面参数进行拟合和提取, 便可以实现光平面的标定, 即可拟合出光平面方程。

2.3.4 点云获取

在距离直线扫描系统 860 mm 处将 3D 手模放置在旋转平台上, 打开激光器使其照射在手模上, 在树莓派上运行“点云处理.py”程序, 对步进电机驱动器采用了单步 0.2 mm 的步进值, 调用相机采集图像, 根据上述所提标定结果, 解算出该目标物体表面上的光条的像素坐标及世界坐标系下的三维坐标, 从而得到该光条的三维点云数据。

为获取人手模型的多角度配准点云, 通过控制旋转平台, 本实验从 0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°对其进行了测量, 最终得到了与其实际形状一致性很高的点云提取结果, 如图 8 所示。

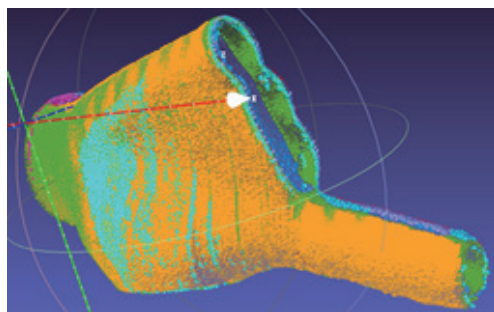


图 8 中空人手模型点云图

2.3.5 点云配准

采用 MeshLab 软件对点云进行配准。

1) 手动粗配准

初步粗配准通过选取不同视角下的两幅点云图中至少 4 个特征点作点云配准, 然后对点云图像进行手动平移、旋转, 对图像进行拼接, 如图 9 所示。

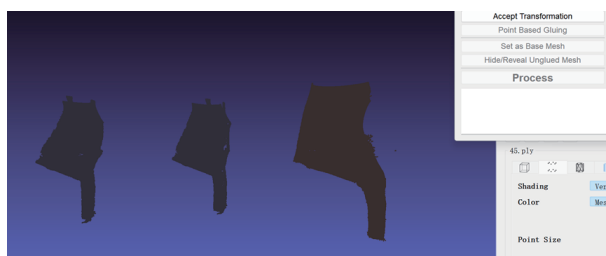


图 9 手动粗配准图

2) 点云拼接

通过选取不同视角下的两幅点云图中的同一点, 对点云图像进行拼接, 至少需要选取 4 个特征点用作点云配准。

3) 点云精配准(ICP)

通过设定 ICP 所需的参数, 不断地迭代最小化两个点云之间的距离来计算变换矩阵, 以实现点云的高精度配准, 如图 10 所示。

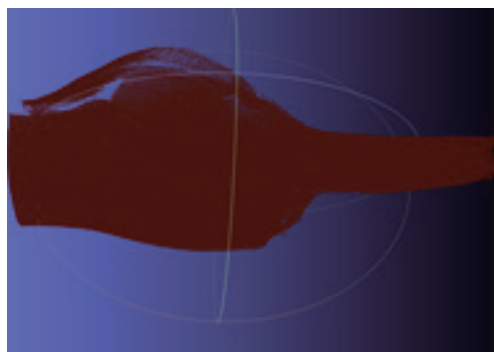


图 10 ICP 配准图

将配准后的两幅点云图合并为新的点云图，并依次重复以上步骤，直至目标物体表面所有点云配准完成，获得该物体完整的三维点云，如图 11 所示。

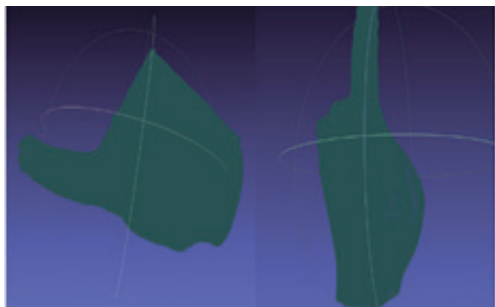


图 11 目标物完整点云图

2.3.6 曲面重建

设定相关参数并计算出点云的法向量，通过 MeshLab 中的曲面重建算法对两个或多个拟合度较高的点云进行曲面重建。在此基础上可以通过删除离群点、去除重叠的数据、优化表面细节等操作，对结果进行完善，如图 12 所示。

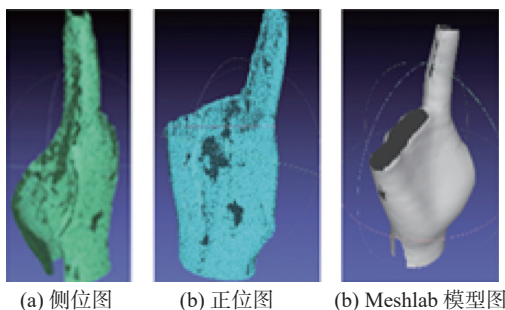


图 12 曲面重建图

2.3.7 参数测量

在 MeshLab 软件中对点云配准和曲面重建后的结果进行几何参数量测。测量结束后，可以在 Measuring Tool 界面中查看测量结果，还可以将结果导出为文本，以便后续参考和使用。

3 误差和结果分析

为对三维重建系统的误差进行分析，本文采用对标准球的点云进行球面拟合的方法，通过拟合球的直径与标准球实际直径对比得到直径误差及相对误差，这两个指标反映测量系统的准确度；另外通过计算点云与球面的残差得到球面均方差以及相对均方差，这两个指标则反映测量系统的精密性。通过上述分析方法，就能得到测量系统的误差数据。

本文对如图 13(a) 的标准球在旋转平台 36 个旋转位置上进行三维测量，其中相邻位置的旋转角约为 10° ，三维球点云如图 13(b) 所示，得到的直径拟合误差和球面均方差分布图如图 14 所示。

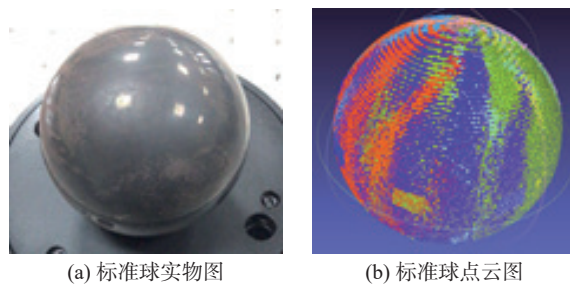
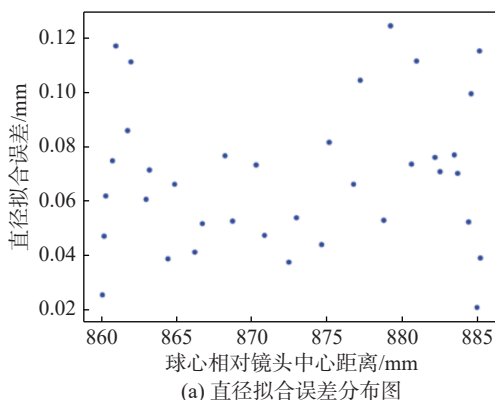
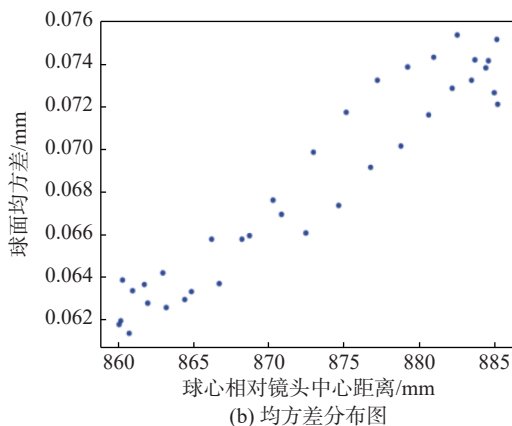


图 13 标准球三维测量图



(a) 直径拟合误差分布图



(b) 均方差分布图

图 14 直径拟合误差和均方差分布图

本文激光三角测量系统的直线扫描测量部分的直径误差平均值为 0.069 mm ，相对误差为 0.136% ，均方差平均值为 0.068 mm ，相对均方差为 0.134% 。

综上，对手模型进行三维重建，基本能够完整地恢复出目标物体表面的信息；通过对标准球进行球面拟合进行误差分析，验证了该系统具有较高的准确度和精密性。

4 实验教学实施

6个课时的三维重建实验在48课时的光学与光电子技术实验课中属于综合性实验设计,此课程中实验的台套数均为1,学生4人一组,每组在一个课时内做不同的实验,实施轮转式实验教学。教师提前编写实验大纲、实验PPT、实验指导书,录制教学视频,建立课程群,线上线下答疑,实施“分组讨论”“同伴教学”模式。所有实验在第一次实验课上由指导老师统一讲解,学生理解所有实验原理和任务,之后每个小组在做本次实验前自主组织学习,每次携带实验预习报告进实验室做相应的实验。每一个完成本实验的小组指导下一个小组,以此类推。实验教学考核与评价实施多时段、多方位的整体式考核:考核内容包括实验预习(10%)、实验操作验收(20%)、小组提问式验收(10%)等过程性评价和实验报告的撰写(10%)、实验结束后综合试卷考试(50%)的最终性评价两者相结合的更科学的考核模式。实验课程结束后收集学生电子版的意见和建议,及时调整实验教学内容、方法和策略。

5 结束语

本文提出一种基于单目-线激光的三维重建与量测实验设计方案。该实验利用工业相机、线激光器、步进丝杆、树莓派等,设计了无初始空间方位要求的直线扫描式单面激光三角测量系统,通过点云获取和点云处理,完成了目标的高精度三维重建。实验结果表明,本文提出的基于单目-线激光的三维重建与量测实验设计方案科学可行,其实验设计软硬件相结合,融合光学、计算机视觉、图像处理等多学科技术,具有一定的挑战性,可以激发学生的学习积极性,培养学生逻辑思维能力和创新意识,提高学生工程实践创新能力。

参考文献

- [1] CHEN F, BROWN G M, SONG M M. Overview of 3-D shape measurement using optical methods[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39: 10-22.
- [2] 王忠杰. 结构光三维重建技术研究与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [3] 田又源. 基于激光三角法的工件厚度测量系统研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
- [4] 倪沛东. 基于激光三角法的目标位移测量方法及系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [5] 刘源, 沈小燕, 陈爱军, 等. 基于线激光三角法的圆孔尺寸测量研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(2): 308-314.
- [6] 南卓江, 陶卫, 赵辉. 激光三角测量技术的应用与前景[J]. *自动化仪表*, 2019, 40(12): 1-5.
- [7] 刘海帝. 根据反射光的相位移动实现激光测距[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [8] 侯飞. 基于飞行时间的三维目标点云提取和重建研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2019.
- [9] YE J, ZHOU C H. Time-resolved coded structured light for 3D measurement[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(1): 5-12.
- [10] 汤强晋. 激光三角法在物体三维轮廓测量中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [11] 万瑾, 黄元庆. 激光三角法测量的研究[J]. *三明学院学报*, 2006, 23(4): 361-364.
- [12] 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.
- [13] 刘志海, 代振锐, 田绍鲁, 等. 非接触式三维重建技术综述[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(23): 9897-9908.
- [14] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [15] 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): 7-17.
- [16] 田雄斌, 杨浩, 戴尔哈. 三维重建中的线结构光标定[J]. *应用激光*, 2023, 43(9): 138-146.
- [17] 张小艳, 王晓强, 白福忠, 等. 基于改进灰度重心法的光带中心提取算法[J]. *激光与红外*, 2016, 46(5): 622-626.

编辑 王燕