

# 基于差异化点云处理的双目结构光 三维重建

赵欣<sup>1,2</sup>, 尚乾康<sup>1</sup>, 张艺<sup>1,2</sup>, 段智魁<sup>2</sup>, 张海明<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

<sup>2</sup>天津普达软件技术有限公司, 天津

收稿日期: 2026年4月30日; 录用日期: 2026年6月4日; 发布日期: 2026年6月12日

## 摘要

针对自然光工业场景, 太阳光干扰导致消费级双目结构光相机重建稳定性差、点云质量退化的问题, 本文开展了面向小型工业工件的三维重建与优化研究。以奥比中光335L消费级双目结构光相机为硬件平台, 搭建“硬件采集-软件处理-物体检测”三层架构实验系统。通过设置0.3 W/m<sup>2</sup>、22.5 W/m<sup>2</sup>、51.3 W/m<sup>2</sup>三种典型太阳光光照条件, 对金属连接片、塑料定位盘、方形金属垫片三类工件开展原始点云采集与量化分析, 明确了不同光照强度对点云的影响规律。在此基础上, 提出“预处理-去噪-法线估计-连通域分割”全流程差异化参数点云处理方案, 并结合泊松重建算法完成三维模型重构与精度验证。实验结果表明, 优化后系统测量精度可达0.5 mm级别, 低光照下点云噪声与边缘畸变得到抑制明显, 中等光照下重建精度与稳定性进一步提升, 强光环境下工件特征偏差降低约12%, 可有效抑制太阳光干扰, 满足中小企业低精度工业检测与自动化抓取的实际需求。

## 关键词

太阳光干扰, 双目结构光, 三维重建, 点云处理, 小型工件

# Binocular Structured Light 3D Reconstruction Based on Differentiated Point Cloud Processing

Xin Zhao<sup>1,2</sup>, Qiankang Shang<sup>1</sup>, Yi Zhang<sup>1,2</sup>, Zhikui Duan<sup>2</sup>, Haiming Zhang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

<sup>2</sup>Tianjin Puda Software Technology Co., Ltd., Tianjin

Received: April 30, 2026; accepted: June 4, 2026; published: June 12, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 赵欣, 尚乾康, 张艺, 段智魁, 张海明. 基于差异化点云处理的双目结构光三维重建[J]. 应用物理, 2026, 16(6): 647-656. DOI: 10.12677/app.2026.166059

## Abstract

Aiming at the problems of poor reconstruction stability and degraded point cloud quality of consumer-grade binocular structured-light cameras caused by solar light interference in natural light industrial scenarios, this paper conducts a research on 3D reconstruction and optimization for small industrial workpieces. Taking the Orbbec 335L consumer-grade binocular structured-light camera as the hardware platform, a three-layer experimental system including hardware acquisition, software processing and object detection is constructed. Under three typical solar irradiance conditions of  $0.3 \text{ W/m}^2$ ,  $22.5 \text{ W/m}^2$  and  $51.3 \text{ W/m}^2$ , original point cloud acquisition and quantitative analysis are carried out for three types of workpieces, namely metal connecting sheets, plastic positioning discs and square metal gaskets, and the influence law of different light intensities on point clouds is clarified. On this basis, a full-process differentiated parameter point cloud processing scheme integrating preprocessing, denoising, normal estimation and connected domain segmentation is proposed, and Poisson reconstruction algorithm is adopted to complete 3D model reconstruction and accuracy verification. The experimental results show that the measurement accuracy of the optimized system reaches the 0.5 mm level. Point cloud noise and edge distortion are significantly suppressed under low light, and the reconstruction accuracy and stability are further improved under medium light. In strong light environments, the feature deviation of workpieces is reduced by approximately 12%. The proposed method can effectively suppress solar interference and meet the practical demands of small and medium-sized enterprises for low-precision industrial inspection and automatic grasping.

## Keywords

Sunlight Interference, Binocular Structured Light, 3D Reconstruction, Point Cloud Processing, Small Workpieces

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在智能制造与工业 4.0 的发展浪潮下，三维测量已成为工业检测、机器人抓取、质量管控等环节的核心支撑技术。其中，结构光三维测量技术凭借非接触、速度快、精度适中的优势，在工业视觉领域得到了广泛应用[1]。双目结构光与单目结构光相比，双视角约束提升测量鲁棒性，更适合小型工件检测[2]。然而，传统工业级双目结构光设备虽然精度高，但成本昂贵、部署复杂，难以在中小企业的轻量化检测场景中大规模普及。因此，消费级双目结构光相机凭借低成本、小型化、易部署等特点，成为这类场景的优选方案。

但目前主流消费级相机并未针对工业自然光环境进行专门优化，在太阳光干扰下，极易出现图像对比度下降、信噪比下降、误匹配率上升、点云空洞与密度稀疏等问题，严重制约了其在实际工程中的落地应用[3]。现有国内外研究多聚焦于高精度测量算法或专用工业设备的开发，针对“消费级设备 + 太阳光干扰 + 小型金属工件”这一典型场景的系统性优化方案仍较为缺乏，难以直接指导中小企业的实际生产。

针对上述问题，本文以奥比中光 335L 消费级双目结构光相机搭建完整的三维重建实验系统，系统研究了不同光照强度对小型工件点云重建质量的影响规律，并提出了一套不同光照条件的差异化点云后处理方案，旨在提升消费级双目结构光相机在自然光工业场景下的重建稳定性与精度，为中小企业提供低成本、易实现的三维检测解决方案。

## 2. 双目结构光重建与点云评价指标

### 2.1. 双目结构光三维重建原理

双目结构光技术融合主动结构光投影与双目立体视觉，通过红外投射器向物体表面投射随机散斑图案，双相机同步采集受形貌调制的变形图像，经特征提取、立体匹配、视差计算与三角测量，获取物体三维点云，流程见图 1 [4]。

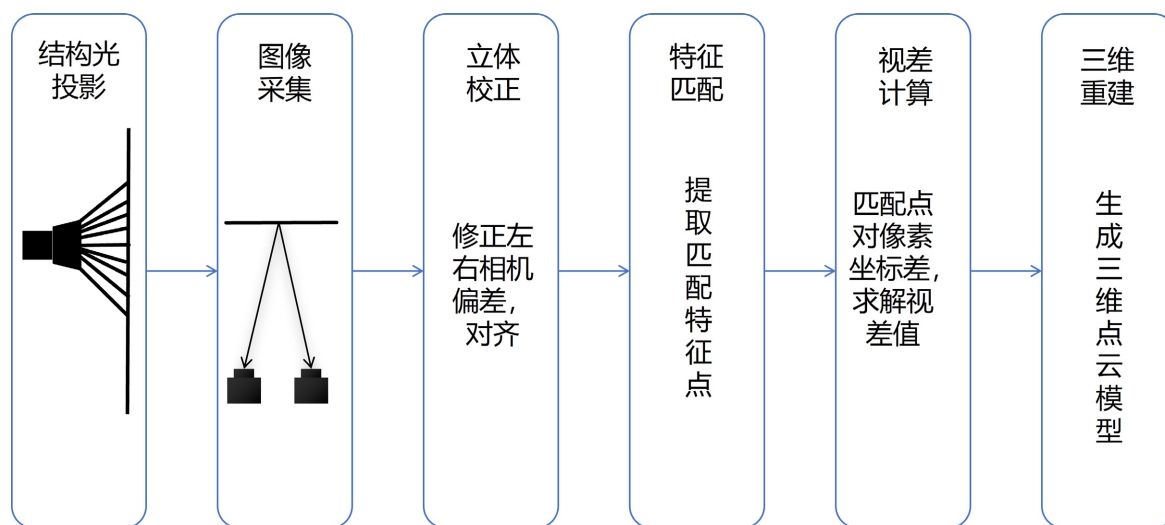


Figure 1. Measurement flow of binocular structured light technology  
图 1. 双目结构光技术测量流程

### 2.2. 点云评价指标

从点云质量与重建精度两个维度建立点云评价指标。

#### (1) 点云质量

噪声均值：点云测量点相对工件表面的平均偏离量，反映点云纯净度，噪声均值越小，点云数据质量越好[5]。

噪声标准差：点云测点与工件表面偏差的离散程度，反映点云噪声的波动幅度，标准差越小，点云噪声分布越集中，重建精度稳定性越高[6]。

点云密度：单位面积内的点云数量，反映点云模型的细节表达能力，密度分布均匀且数值适中时综合效果最优[7]。

#### (2) 重建精度

尺寸误差：重建后工件的关键尺寸与实际尺寸的绝对误差均值，反映工件整体轮廓的重建精度[8]。

特征偏差：重建后工件倒角、凹槽等特征部位的点云与实际特征的位置偏差均值，反映工件细节特征的还原精度[9]。

## 3. 实验设计与点云获取

### 3.1. 实验系统

本实验采用硬件采集和软件处理两层架构，搭建与运行流程如下。

硬件部署：将相机固定于可调支架，对准工件采集区域；功率计置于同一平面监测光照；相机与工

控机通过 USB 连接，实验场景见图 2。



Figure 2. Experimental scene

图 2. 实验场景

软件配置：

(1) 点云采集：使用奥比中光 335L 相机官方配套软件，完成相机启动、参数配置、实时点云采集与导出。

(2) 点云后处理：使用 Cloud Compare 开源软件，完成点云去噪、下采样、法线估计、分割与三维模型重建。

场景校准：调整相机高度与角度，保证工件完整入镜；在固定位置采集，确保多组实验条件一致。

### 3.2. 实验对象

本实验选取三类典型工业小型工件作为重建对象，涵盖不同材质、外形与结构特征，可全面验证不同阳光光照强度下双目结构光重建系统的适应性与鲁棒性，为后续抓取策略设计提供多样化实验数据支撑。

金属连接片为冷轧钢板，表面经镀锌处理，具有一定反光特性，工业场景中金属工件的表面属性，如图 3(a)所示；塑料定位盘为 ABS 工程塑料，表面为哑光黄色，无明显反光，工业场景中非金属工件的表面属性，如图 3(b)所示；方形金属垫片为镀锌钢板，表面呈哑光金属质感，存在轻微反光特性，可模拟工业场景中金属连接件的表面属性，如图 3(c)所示。

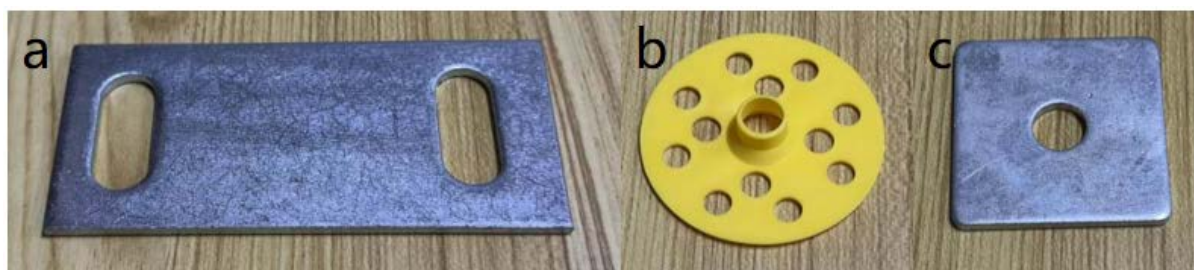


Figure 3. (a) Metal connecting sheet; (b) Plastic positioning disc; (c) Square metal gasket

图 3. (a) 金属连接片；(b) 塑料定位盘；(c) 方形金属垫片

### 3.3. 点云获取

对低、中等、高光照强度下采集的原始点云数据进行可视化与特征分析，未进行任何形式的处理，原始点云见图 4。基于提出的点云评价指标进行量化统计，结果见表 1。



Figure 4. Raw point clouds under different lighting conditions

图 4. 不同光照下的原始点云

Table 1. Evaluation results of raw point clouds under different lighting conditions

表 1. 不同光照条件下原始点云数据评价指标结果

光照强度	噪声均值	噪声标准差	点云密度	尺寸误差	特征偏差
0.3 W/m <sup>2</sup>	0.2567 mm	0.1812 mm	506.96 个/mm <sup>2</sup>	1.56 mm	0.45 mm
22.5 W/m <sup>2</sup>	0.2376 mm	0.1764 mm	508.07 个/mm <sup>2</sup>	0.99 mm	0.18 mm
51.3 W/m <sup>2</sup>	0.2393 mm	0.1796 mm	551.00 个/mm <sup>2</sup>	0.45 mm	1.89 mm

### 3.4. 不同光照强度对点云的影响规律

不同光照强度对点云质量影响显著。低光照条件下，点云噪声均值、标准差偏高，点云分布稀疏，边缘畸变严重；中等光照组噪声水平最低，点云密度均匀适中，几何细节还原效果好；高光照虽点云密度更高、尺寸误差较小，但强光引发表面反光与局部过曝，噪声波动增大、点云均匀性下降，易造成局部特征畸变与偏差。

## 4. 不同光照的差异化点云处理

### 4.1. 整体点云处理流程

基于不同光照对点云的影响，本文设计差异化点云处理进行针对性优化。消除光照干扰带来的点云噪声、空洞、密度不均等问题，提升点云质量与重建精度，点云处理整体流程见图 5。

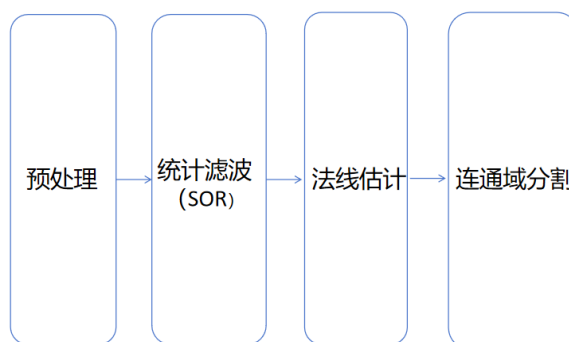


Figure 5. Overall flow of point cloud processing

图 5. 点云处理整体流程

## 4.2. 点云预处理与噪声去除

采用体素格下采样对原始点云进行预处理, 分别设置 1.0 mm、0.5 mm、0.2 mm、0.1 mm 四组阈值开展对比实验。见表 2、表 3、表 4, 不同光照强度下在 0.2 mm 能够在保留工件几何特征的同时有效精简点云、降低噪声, 且继续减小阈值对精度提升不明显。因此, 三种光照强度下均采用 0.2 mm 作为统一下采样阈值。

**Table 2.** Evaluation results after downsampling under low light intensity

**表 2.** 低光照强度下采样初筛后评价指标结果

下采样阈值	噪声均值	噪声标准差	点云密度
1 mm	0.2602 mm	0.1935 mm	569.14 个/mm <sup>2</sup>
0.5 mm	0.2404 mm	0.1737 mm	499.54 个/mm <sup>2</sup>
0.2 mm	0.2404 mm	0.1737 mm	499.54 个/mm <sup>2</sup>
0.1 mm	0.2404 mm	0.1737 mm	499.54 个/mm <sup>2</sup>

**Table 3.** Evaluation results after downsampling under medium light intensity

**表 3.** 中等光照强度下采样初筛后评价指标结果

下采样阈值	噪声均值	噪声标准差	点云密度
1 mm	0.2512 mm	0.1892 mm	508.83 个/mm <sup>2</sup>
0.5 mm	0.2336 mm	0.1712 mm	505.56 个/mm <sup>2</sup>
0.2 mm	0.2336 mm	0.1712 mm	505.56 个/mm <sup>2</sup>
0.1 mm	0.2336 mm	0.1712 mm	505.56 个/mm <sup>2</sup>

**Table 4.** Evaluation results after downsampling under high light intensity

**表 4.** 高光照强度下采样初筛后评价指标结果

下采样阈值	噪声均值	噪声标准差	点云密度
1 mm	0.2589 mm	0.1995 mm	499.75 个/mm <sup>2</sup>
0.5 mm	0.2376 mm	0.1778 mm	325.85 个/mm <sup>2</sup>
0.2 mm	0.2376 mm	0.1778 mm	325.85 个/mm <sup>2</sup>
0.1 mm	0.2376 mm	0.1778 mm	325.85 个/mm <sup>2</sup>

采用统计滤波(SOR)进行去噪, 固定邻域点数  $k = 6$ , 设置  $nSigma = 1.0$ 、 $1.5$ 、 $2.0$  三组参数对比, 根据噪声抑制效果确定最优参数。见表 5, 低光照强度时,  $nSigma = 1.5$  时噪声均值与标准差均达到最小值, 去噪效果最优, 可扩大滤波范围, 剔除离散噪声点且不丢失有效点云。见表 6, 中等光照时,  $nSigma = 1.0$  时噪声均值降至最低, 综合去噪效果最优。见表 7, 高光照时, 滤波后噪声均值由 0.2376 mm 微升至 0.2376 mm、0.2392 mm、0.2392 mm, 噪声标准差由 0.1778 mm 变为 0.1766 mm、0.1771 mm、0.1775 mm, 变化幅度均在 1% 以内, 表明高光照下点云噪声水平较低, 滤波对其影响有限, 综合考虑细节保留与噪声控制, 选取  $nSigma = 1.5$ 。

**Table 5.** Evaluation results after statistical filtering under low light intensity**表 5.** 低光照强度下统计滤波后评价指标结果

统计滤波阈值	噪声均值	噪声标准差
nSigma = 1.0	0.2399 mm	0.1741 mm
nSigma = 1.5	0.2377 mm	0.1732 mm
nSigma = 2.0	0.2403 mm	0.1737 mm

**Table 6.** Evaluation results after statistical filtering under medium light intensity**表 6.** 中等光照强度下统计滤波后评价指标结果

统计滤波阈值	噪声均值	噪声标准差
nSigma = 1.0	0.2119 mm	0.1752 mm
nSigma = 1.5	0.2219 mm	0.1754 mm
nSigma = 2.0	0.2292 mm	0.1746 mm

**Table 7.** Evaluation results after statistical filtering under high light intensity**表 7.** 高光照强度下统计滤波后评价指标结果

统计滤波阈值	噪声均值	噪声标准差
nSigma = 1.0	0.2376 mm	0.1766 mm
nSigma = 1.5	0.2392 mm	0.1771 mm
nSigma = 2.0	0.2392 mm	0.1775 mm

### 4.3. 基于法线估计的点云特征优化

采用 k-NN 算法进行法线估计, 对比邻域半径 0.4、0.6、0.8 mm, 以法向一致性为评价指标。见表 8, 低光照条件下, 邻域搜索半径为 0.4 mm 和 0.8 mm 时, 面片数均为 34, 反转数均为 48, 法线一致性表现相当, 0.8 mm 大半径具有更强的抗噪声能力, 鲁棒性更优。见表 9, 中等光照条件下, 邻域搜索半径为 0.4 mm 和 0.8 mm 时, 面片数均为 3, 反转数均为 81, 法线一致性表现相当, 0.8 mm 大半径具有更强的抗噪声能力, 鲁棒性更优。见表 10, 高光照条件下, 邻域搜索半径为 0.4 mm, 面片数均为 5, 反转数均为 46, 大半径鲁棒性更优。

**Table 8.** Normal vector consistency with different neighborhood radii under low light**表 8.** 低光照条件下不同邻域搜索半径的法向量一致性

领域搜索半径	法向量一致性
0.4 mm	面片数: 34 反转数: 48
0.6 mm	面片数: 34 反转数: 48
0.8 mm	面片数: 34 反转数: 49

**Table 9.** Normal vector consistency with different neighborhood radii under medium light**表 9.** 中等光照条件下不同邻域搜索半径的法向量一致性

领域搜索半径	法向量一致性
0.4 mm	面片数: 3 反转数: 81
0.6 mm	面片数: 3 反转数: 95
0.8 mm	面片数: 3 反转数: 81

**Table 10.** Normal vector consistency with different neighborhood radii under high light**表 10.** 高光照条件下不同邻域搜索半径的法向量一致性

领域搜索半径	法向量一致性
0.4 mm	面片数: 5 反转数: 46
0.6 mm	面片数: 5 反转数: 54
0.8 mm	面片数: 5 反转数: 47

#### 4.4. 连通域分割

固定最小连通域尺寸为 50, 对比 Octree 层级 4、6、8, 以体素匹配率为指标。见表 11, 低光照时, 调整 Octree 层级, 体素匹配率变化微小, 最终选取 Octree 层级 8。见表 12, 中等光照时, 层级 4 与 6 体素匹配率相同。但由于层级 4 网格太粗, 容易吞掉边缘细节, 层级 6 网格更精细, 可以保留更多边缘信息, 选择层级 6。见表 13, 高光照时, 不同 Octree 层级下的分割轮廓差异极小, 体素匹配率均稳定在 79% 左右, 无明显梯度变化。综合考虑计算效率与边缘保留能力, 选择层级 6 作为最优参数, 可在保证分割精度的同时, 兼顾后续三维重建的细节完整性。

**Table 11.** Voxel matching rate of different Octree levels under low light**表 11.** 低光照条件下不同 Octree 层级的体素匹配率

Octree 层级	体素匹配率
4	79.6%
6	79.6%
8	79.7%

**Table 12.** Voxel matching rate of different Octree levels under medium light**表 12.** 中等光照条件下不同 Octree 层级的体素匹配率

Octree 层级	体素匹配率
4	82.7%
6	82.7%
8	82.3%

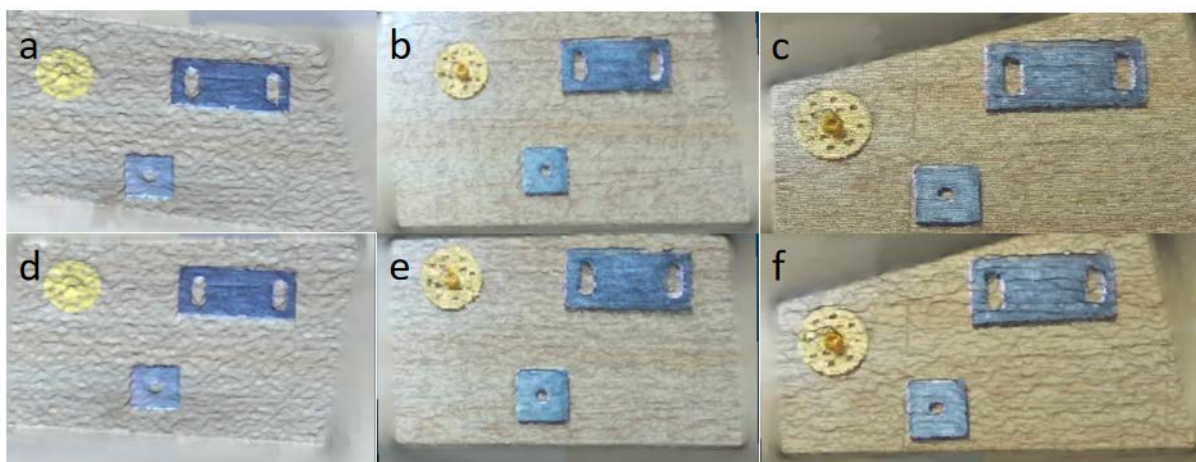
**Table 13.** Voxel matching rate of different Octree levels under high light  
**表 13.** 高光照条件下不同 Octree 层级的体素匹配率

Octree 层级	体素匹配率
4	79.0%
6	79.0%
8	79.0%

## 5. 结果分析

### 5.1. 三维重建

采用泊松重建生成三维模型，只进行法线估计和经过点云处理的不同太阳光强度下的三维重建见图 6。未优化重建存在空洞多、边缘断裂、反光畸变；经差异化处理后，点云密度均匀、噪声降低、边缘清晰、特征完整。



**Figure 6.** 3D reconstruction images. (a)~(c) are 3D reconstruction images with only normal estimation under different sunlight intensities; (d)~(f) are 3D reconstruction images under different sunlight intensities after point cloud processing

**图 6.** 三维重建图。(a)~(c)分别为只进行法线估计的不同太阳光强度三维重建图；(d)~(f)分别为经点云处理后的不同太阳光强度三维重建图

### 5.2. 不同光照条件下精度分析

量化结果如表 14、表 15 所示，综合不同太阳光强度下的三维重建数据可知，光照强度对重建精度存在显著影响，尺寸误差随光照强度提升而降低，而强光照强度下仅依赖法线估计会导致特征偏差急剧放大，严重影响重建鲁棒性。

**Table 14.** 3D reconstruction analysis of point clouds under different solar intensities with only normal estimation  
**表 14.** 只法线估计后的不同太阳光强度点云三维重建分析

光照强度	噪声均值	噪声标准差	尺寸误差	特征偏差
0.3 W/m <sup>2</sup>	0.0147 mm	0.0359 mm	1.32 mm	0.34 mm
22.5 W/m <sup>2</sup>	0.0164 mm	0.0379 mm	0.81 mm	0.15 mm
51.3 W/m <sup>2</sup>	0.0149 mm	0.0393 mm	0.40 mm	0.99 mm

**Table 15.** 3D reconstruction analysis of point clouds under different solar intensities after point cloud processing  
**表 15.** 点云处理后的不同太阳光强度点云三维重建分析

光照强度	噪声均值	噪声标准差	尺寸误差	特征偏差
0.3 W/m <sup>2</sup>	0.0138 mm	0.0347 mm	1.12 mm	0.31 mm
22.5 W/m <sup>2</sup>	0.0125 mm	0.0324 mm	0.76 mm	0.13 mm
51.3 W/m <sup>2</sup>	0.0144 mm	0.0383 mm	0.38 mm	0.87 mm

差异化参数点云处理技术在不同光照强度下均展现出明确的优化价值，它不仅能同步降低表面光滑度均值、减小尺寸误差，有效抑制了强光引发的特征漂移问题，同时在弱光照强度和中等光照强度下也能持续改善各项精度指标。

## 6. 结论

本文针对自然光下消费级双目结构光相机受太阳光干扰导致重建稳定性差、点云质量退化的问题，开展多光照下小型工件三维重建与点云优化研究，得出以下结论：

- (1) 揭示光照影响规律：弱光点云稀疏噪声高；中等光重建质量最优；强光金属反射导致特征偏差剧增。
- (2) 构建“预处理 - 去噪 - 法线估计 - 连通域分割”差异化点云处理方案，形成适配不同光照的最优参数组合。
- (3) 优化后系统精度达 0.5 mm，强光下特征偏差降低约 12%，可有效抑制太阳光与金属反光干扰。
- (4) 该方法无需硬件改造、成本低、易部署，可为中小企业低成本三维检测、机器人自动化抓取提供工程化方案。

未来可结合机器人抓取位姿估计，实现重建与抓取一体化系统。

## 致 谢

作者衷心感谢天津普达软件技术有限公司在“机器视觉成像干扰问题关键技术研究”项目中提供的资金支持与技术协作。

## 参考文献

- [1] Zhang, X., Wang, Z., Cai, Z., Liu, X. and Peng, X. (2024) Phase-Aided Online Self-Correction Method for High-Accuracy Three-Dimensional Measurement. *Optics Express*, **32**, 2293-2305. <https://doi.org/10.1364/oe.515118>
- [2] Liu, X.L., Yang, L.T., Chu, X.X. and Zhou, L. (2023) A Novel Phase Unwrapping Method for Binocular Structured Light 3D Reconstruction Based on Deep Learning. *Optik*, **279**, Article 170727. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.17072>
- [3] 丁佰勇. 基于深度学习的RGB-D图像分析与重建模型研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京服装学院, 2021.
- [4] Zhao, S., Wu, J. and Zhang, H. (2025) A Binocular Structured Light Reconstruction Method Based on Disparity Fusion. *Optics and Lasers in Engineering*, **194**, Article 109208. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2025.109208>
- [5] 陈登红, 庞宁, 邱宇, 等. 巷道形变轻量化点云扫描装备研制与应用分析[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(8): 141-155.
- [6] 胡立楷, 黄云, 张坤球, 等. 基于 RANSAC-LS 的拱结构的三维激光点云线形重构技术[J/OL]. *建筑钢结构进展*: 1-13. <https://doi.org/10.13969/j.jzgjgz.20251023005>, 2026-03-19.
- [7] Hai, Z., Li, C., Guo, B., Wei, X., Yang, Z. and Zheng, J. (2026) Airborne Lidar Point Cloud Building Reconstruction Based on Planar Optimal Combination and Feature Line Constraints. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **15**, Article 92. <https://doi.org/10.3390/ijgi15020092>
- [8] Huang, F., Shen, C., Fang, D. and Xiao, J. (2026) A Multi-Constraint Point Cloud Registration Method for Machining Error Measurement of Thin-Walled Parts. *Applied Sciences*, **16**, Article 1003. <https://doi.org/10.3390/app16021003>
- [9] Chu, H., Cheng, Y., Li, Y., Fan, J., Chen, N. and Wang, Y. (2025) Fine Extraction of Geometric Contour Feature Based on Spherical Thinning. *Optics & Laser Technology*, **192**, Article 113784. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.113784>