

基于线结构光中心线亚像素提取与优化算法

赵卫东, 陈为胜, 朱 军, 王鑫龙, 张可可

(安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 针对传统线结构光提取算法在速度与精度难以兼顾的不足, 提出一种融合几何中心法与灰度重心法的改进提取算法。该算法首先通过阈值化处理减少低像素值对中心线提取的干扰, 随后逐行双向搜索最大像素值坐标并存储, 若当前行的列坐标差小于设定阈值则利用几何中心法粗提取条纹中心, 否则通过计算与上一行中心坐标的距离将最近点作为当前行中心, 实现快速准确的条纹定位; 在此基础上, 在粗提取坐标的邻域内采用改进的灰度重心法进行亚像素级精提取, 在降低计算量的同时提升精度, 最后通过最小二乘拟合进一步优化光条纹位置以增强平滑性和连续性。通过与传统算法的对比实验和三维重建验证本文算法的有效性。结果表明: 本文算法在提取精度 (RMSE=1.081 pixel)、运行效率 (0.057 s) 及重建质量 (0.122 mm) 等方面均优于对比算法, 能够更好地保留工件几何特征, 其精度显著优于 5 mm 的工业误差容限, 满足亚像素的高精度工业测量需求, 为三维视觉检测提供了高效可靠的解决方案。

关键词: 线结构光; 几何中心法; 灰度重心法; 亚像素提取; 最小二乘拟合; 三维重建; 工业测量; 计算机视觉

中图分类号: TN 249 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.25001



Subpixel Extraction and Optimization Algorithm for Line-structured Light Centerline

ZHAO Weidong, CHEN Weisheng, ZHU Jun, WANG Xinlong, ZHANG Keke

(School of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: An improved extraction algorithm integrating the geometric center method and the gray centroid method was proposed to address the limitation of conventional line-structured light extraction algorithms in balancing speed and accuracy. Firstly, threshold processing was applied to reduce the interference of low pixel values on centerline extraction. Subsequently, the image was bidirectionally scanned row by row to search and store the coordinates of the maximum pixel value. If the column coordinate difference in the current row was smaller than a set threshold, the geometric center method was employed to coarsely extract the stripe center. Otherwise, the closest point to the center coordinate of the previous row was selected as the current row center based on distance calculation, enabling fast and accurate stripe localization. On this basis, an improved gray centroid method was applied within the neighborhood of the coarsely extracted coordinates to achieve sub-pixel precision extraction, which reduced computational load while improving accuracy. Finally, least squares fitting was used to further optimize the light stripe position, enhancing smoothness and continuity. The effectiveness of the proposed algorithm was verified through comparative experiments with traditional algorithms and 3D reconstruction. The results show that the proposed algorithm outperforms the comparison algorithms in terms of extraction accuracy (RMSE=1.081 pixel), operational efficiency

收稿日期: 2025-01-03

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (2108085MF225)

作者简介: 赵卫东 (1972—), 男, 安徽阜阳人, 副教授, 主要研究方向为机器视觉等。

引文格式: 赵卫东, 陈为胜, 朱军, 等. 基于线结构光中心线亚像素提取与优化算法 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(6):652-659.

(0.057 s), and reconstruction quality (0.122 mm), and can better preserve the geometric features of the workpiece, significantly exceeding the industrial error tolerance of 5 mm and meeting the high-precision industrial measurement requirements of sub-pixel level. This research provides an efficient and reliable solution for 3D visual inspection.

Keywords: structured light; geometric center method; gray-weighted centroid method; sub-pixel extraction; least squares fitting; 3D reconstruction; industrial measurement; computer vision

三维重建技术作为现代精密测量的关键手段,凭借其亚毫米级测量精度与微米级空间分辨率等优势,在智能制造^[1]、数字文物保护^[2-3]等国家战略领域发挥着重要作用。线结构光三维测量技术已在计算机断层扫描^[4-5](computed tomography, CT)、工业智能质检^[6]、机器人视觉引导^[7-8]、自动驾驶^[9-10]、环境建模^[11]等领域取得突破性进展。其典型应用包括梅卡曼德智能公司通过三维重建与深度学习技术融合,实现了复杂场景下的亚毫米级识别定位;《黑神话:悟空》研发团队运用多视角重建技术构建高保真数字文物模型,推进了文化遗产的数字化保护与传播;谷歌地图利用多视角影像重建技术构建高精度三维模型,实现了全球范围的空间可视化与精准定位。然而,双目线结构光测量系统在面临镜面反射、漫反射及复杂曲面等工况时,仍存在条纹宽度不均、边缘模糊等问题,难以满足智能制造对微米级测量的精度要求。因此,提升线结构光提取精度既是保障工业质量检测可靠性的关键技术,也是实现高端测量装备自主可控的重要研究课题。

传统线结构光提取算法主要包括极值法^[12]、几何中心法^[13]、细化法^[14]、灰度重心法^[15-16]、Steger法^[17-18]及方向模板法^[19]等,这些算法普遍存在精度与效率难以兼顾的问题。为克服此类局限,学者们提出多种改进策略。在传统算法的改进方面,张小艳等^[20]提出的改进灰度重心法虽在一定程度上提升了精度与适应性,但整体优化幅度有限,性能仍存在不足。为进一步提升提取效果,研究趋势逐渐从单一算法改进转向多种算法融合的思路。在算法融合方面,曾超等^[21]将灰度重心法与方向模板法相结合,在简单场景下提高了提取精度,但在复杂场景中因需使用多方向模板而导致计算量显著增加,抗干扰性与鲁棒性仍显不足;周祥曼等^[22]在预处理阶段引入图像滤波和阈值分割,再结合传统细化法进行中心提取,但受物体漫反射影响,该方法易出现条纹中心分叉和断裂现象,导致最终精度下降;王志永等^[23]通过采用阈值法提取感兴趣区域以降低计算量,结合Steger法实现光带边界和法向宽度的自适应检测,再通过灰度重心计算中心位置,该方法在一定程度上减少了计算量,但整体提取效率仍难以满足实际

应用需求。鉴于几何中心法具有计算简便的优点,可将其用于线结构光粗定位;而灰度重心法精度较高,适合在几何中心法所确定的有效区域内进行精提取。基于此,本文提出一种融合几何中心法与灰度重心法的改进提取算法,旨在兼顾提取精度与计算效率,通过粗定位与精提取相结合的策略,在降低环境干扰影响的同时,实现光条纹中心的高效、高精度识别,以满足工业检测中对实时性与准确性的双重需求。

1 线结构光提取算法改进

1.1 线结构光工作原理

基于双目立体视觉测量原理(如图1),系统通过同步匹配左右相机采集的物体表面结构光条纹图像建立像素级视差映射,并基于三角测距原理计算三维空间坐标。

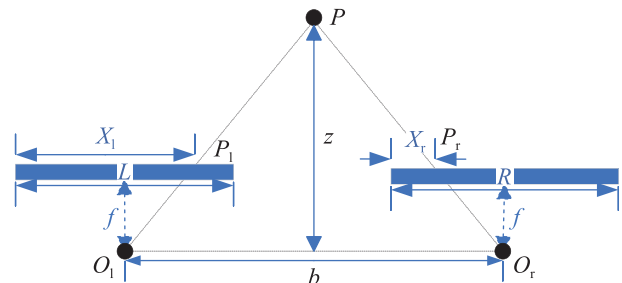


图1 双目立体视觉成像模型

Fig. 1 Imaging model of binocular stereo vision

图1中: b 为左右相机间的距离; P_1, P_r 分别为目标点 P 在左右相机中的成像点位置; X_1, X_r 分别为目标点 P 在像素坐标系中与原点之间的距离; Z 为目标点到投影中心平面的深度距离; f 为相机焦距; d 为视差,其计算公式如下:

$$d = X_1 - X_r$$

成像点 P_1 与 P_r 之间的距离为:

$$\overline{P_1P_r} = b - \left(X_1 - \frac{L}{2}\right) - \left(\frac{L}{2} - X_r\right) = b - (X_1 - X_r) \quad (1)$$

根据相似三角形定理,目标点 P 到相机投影中心平面的深度距离 Z 可由下式确定:

$$Z = \frac{bf}{X_1 - X_r} = \frac{bf}{d} \quad (2)$$

由式(2)可知视差(d)与深度信息(Z)成反比,

已知世界坐标系中物体的深度信息(Z),根据图2可知图像视差与物体深度构成的几何关系。

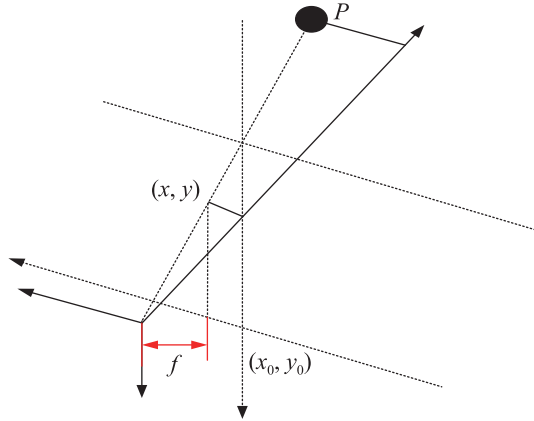


图2 视差与深度构成的几何关系

Fig. 2 Geometric relationship between disparity and depth

根据图2,物体位置信息与像素之间的关系可表示如下:

$$\begin{cases} X = \frac{x - x_0}{f} Z \\ Y = \frac{y - y_0}{f} Z \end{cases} \quad (3)$$

其中: x_0, y_0 为像素原点坐标; x, y 为物体逆向投影在像素坐标系中的位置信息。

1.2 线结构光条纹中心提取优化

本文提出一种融合几何中心法与灰度重心法的改进算法,其整体流程如图3。首先对图像进行阈值化处理,并利用几何中心法快速粗定位条纹中心位置;随后在几何中心法提取的条纹邻域内应用灰度重心法,实现亚像素级的精确定位;最后在选定区域内对中心坐标进行最小二乘拟合,求解条纹斜率与截距并修正中心点坐标,从而提升中心线与点云的平滑性和精度。

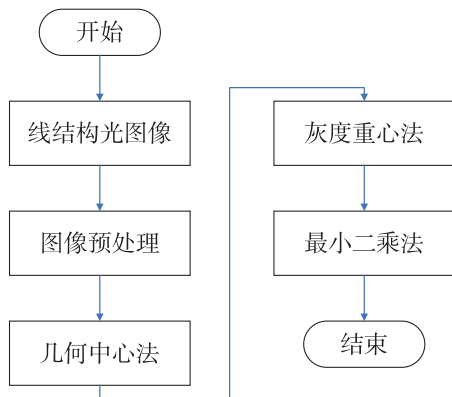


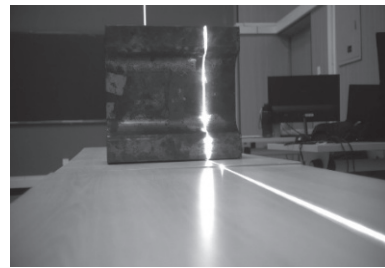
图3 本文算法框架

Fig. 3 Framework of the proposed algorithm

1.2.1 图像预处理优化

在实际工程应用中,结构光在物体表面产生的漫反射与金属杂光干扰会显著降低测量精度。为提

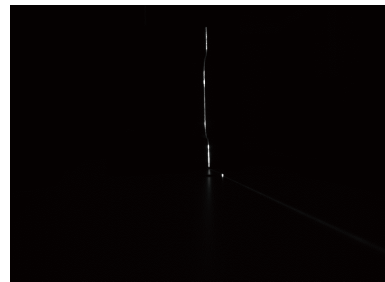
升计算效率并抑制杂光干扰,本文依据物体表面反射合理调整相机曝光参数。以尺寸为 $35\text{ cm} \times 32\text{ cm}$ 的H型钢试件为研究对象,通过调整相机曝光度获取线结构光照射下的图像,分析曝光参数对光条纹成像质量与边界清晰度的影响。图4为不同曝光度下的光条纹成像效果。由图4可发现:曝光度过高(5 000)时,条纹因过亮导致边界模糊、提取区域扩大,精度下降;曝光度过低(110)时,条纹清晰度较差,难以提取有效信息;曝光度适中(1 000)时,条纹亮度均匀、边界清晰,成像质量最优。因此,根据物体材料反光特性合理设定相机曝光度,可有效降低杂光干扰、保障光条纹信息的清晰可靠提取。



(a) 曝光度为5 000



(b) 曝光度为1 000



(c) 曝光度为110

图4 不同曝光度下的光条纹成像效果

Fig. 4 Imaging effect of light stripe under different exposure levels

选取图4(b)所示的图像,采用以下函数进行阈值化处理。

$$G(x, y) = \begin{cases} 0, & g(x, y) < T \\ g(x, y), & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $g(x, y)$ 为原图像像素值; $G(x, y)$ 为阈值化结果; T 为预设阈值。当 $g(x, y) < T$ 时,将像素值低于 T 的点置零;当 $g(x, y) \geq T$ 时,保留原像素值。图5为阈值化处理后的图像效果。



图5 图像阈值化处理后的效果

Fig. 5 Effect of image thresholding

1.2.2 几何中心线粗定位

针对传统几何中心法在竖直线结构光应用中易受像素干扰(如无光照时每行首像素值可被误判为最大像素值), 本文提出改进的双向搜索算法: 对图像每行分别执行左→右与右→左双向搜索, 记录首个最大像素值坐标 (x_l, i) 和 (x_r, i) , 其中 x_l, x_r 分别表示左右方向搜索时的列坐标范围, 其中 i 表示当前处理的行坐标, 具体数学表示如式 (6):

$$\begin{cases} X_i = \frac{x_l + x_r}{2} \\ Y_i = i \end{cases} \quad I > 0 \quad (5)$$

式中: X_i 为粗提取的列坐标; Y_i 为粗提取的行坐标; I 为该坐标的像素值。

为保证像素位置的有效性, 需同时满足该点像素值等于当前行最大像素值且左右坐标差小于预设的条纹宽度阈值。若条件满足, 则直接将该坐标点存储为条纹中心; 否则, 需提取该行所有最大像素值的坐标点至动态数组, 分别计算各点与上一行条纹中心点的欧氏距离, 并选取其中最小距离的点作为当前行的中心点。图 6 中蓝色条纹为采用改进几何中心法粗提取的条纹中心坐标分布, 可看出蓝色线条已较为接近光条纹的实际中心位置。

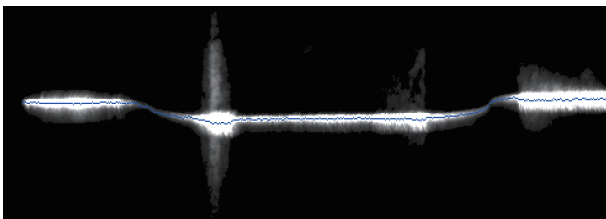


图6 几何中心法的粗定位

Fig. 6 Rough positioning by geometric center method

1.2.3 灰度重心法精提取

在实际应用中, 几何中心法提取的条纹易出现毛刺和凹凸畸变现象(图 6 所示)。为抑制该现象并缩小计算范围, 本文采用阈值化处理以剔除小于设定阈值的像素区域。考虑到线结构光照射物体表面通常呈现非对称的光强分布, 在改进几何中心法粗提取的基础上, 进一步引入灰度重心法进行精提取。

具体实现过程为: 首先基于几何中心法获取粗定位点 (x_i, y_i) , 然后以其为中心在其邻域窗口内应用灰度重心法计算亚像素级的精确定位坐标 (X_i, Y_i) , 传统灰度重心法的计算公式如下:

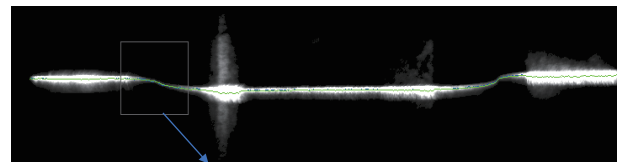
$$\sum_{j=-w}^w (x_i - a_i) \cdot I(j, i) = 0 \quad (6)$$

针对传统灰度重心法计算量大的问题, 本文通过对图像进行预处理并结合几何中心法进行粗提取, 以降低光照干扰对线结构光提取的影响, 并有效缩小灰度重心法的执行区间。具体地, 在几何中心法粗提取获得的坐标邻域内划定局部窗口, 仅在此区域内应用灰度重心法实现亚像素级精提取, 从而获取更精确的光条纹中心坐标, 其具体计算公式如下:

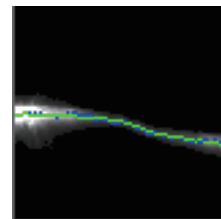
$$\begin{cases} X_i = \frac{\sum_{j=-w}^w (x_i + j) \cdot I(y_i, x_i + j)}{\sum_{j=-w}^w I(y_i, x_i + j)} \\ Y_i = y_i \end{cases} \quad (7)$$

其中: j 为第 i 行中以 x_i 为中心沿水平方向在 $[-w, w]$ 区域进行灰度重心法处理的偏移量, $I(y_i, x_i + j)$ 为在 (x_i, y_i) 处沿 x 轴偏移 j 个像素的图像灰度值。

采用本文灰度重心法对图 6 所示的光条纹进行精提取, 结果如图 7。从图 7 可看出: 精提取得到的绿色中心线条较粗提取的蓝色线条, 毛刺显著减少、整体连续性更好, 且更贴近条纹的真实中心位置。



(a) 整体效果



(b) 局部放大效果

图7 粗提取与精提取结果对比

Fig. 7 Comparison of coarse and refined extraction results

1.2.4 条纹中心线优化

为使精提取后的线结构光条纹更加均匀, 并提升三维重建所得点云的整体光滑度, 本文在灰度重心法精提取的基础上引入最小二乘法对条纹中心坐标进行修正。考虑到线结构光以近似垂直于物体表面的方式照射, 其中心点在图像中的横向偏移为主

要误差来源,因此仅需对 X 轴坐标进行拟合优化。设由灰度重心法提取的条纹中心点为 (X_i, Y_i) , 选取包含 w 个相邻中心点的矩形区域, 其坐标序列为 $(X_0, Y_0) \dots (X_{w-1}, Y_{w-1})$, 在该区域内采用一阶最小二乘法对中心线进行拟合, 所得直线方程为:

$$X = a_1 Y + a_0 \quad (8)$$

通过计算各数据点到拟合直线的距离并求平方和, 以最小化该误差平方和为目标函数, 即可确定最优的直线方程, 其数学表达式如下:

$$f = \sum_{i=0}^w (X_i - a_1 Y_i - a_0)^2 \quad (9)$$

将式(10)分别对 a_0, a_1 求导, 令一阶导数 $f' = 0$ 可得到 a_0, a_1 的方程:

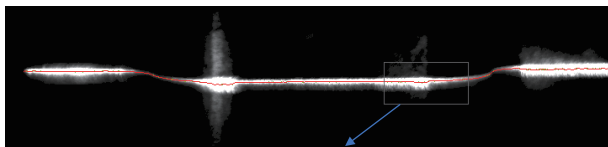
$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial a_0} = \sum_{i=0}^w (X_i - a_1 Y_i - a_0) = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial a_1} = \sum_{i=0}^w (X_i - a_1 Y_i - a_0) Y_i = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{令 } A = \sum_{i=0}^w Y_i^2, B = \sum_{i=0}^w Y_i, C = \sum_{i=0}^w (X_i Y_i), D = \sum_{i=0}^w X_i,$$

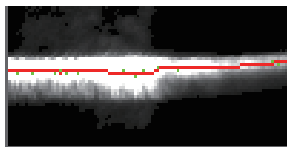
并对式(10)进行化简, 采用式(11)可求出 a_0, a_1 的值。

$$\begin{cases} a_0 = \frac{AD - CB}{wA - BB} \\ a_1 = \frac{wC - BD}{wA - BB} \end{cases} \quad (11)$$

将所求参数 a_0, a_1, Y 代入式(8), 即可完成对 X 轴坐标的优化。图8为线结构光精提取结果与经最小二乘优化后的中心线对比。从图8可看出: 优化后的红色中心线相较于精提取的绿色曲线具有更好的平滑性和连续性, 能够更精确地贴合条纹的真实中心位置。该结果验证了所提算法在提升中心线定位精度方面的有效性, 尤其在条纹边缘区域表现出更稳定的鲁棒性和抗干扰能力。



(a) 整体效果



(b) 局部放大效果

图8 中心线优化前后效果对比

Fig. 8 Comparison of effect before and after centerline optimization

2 实验验证与分析

为验证本文算法的有效性, 对图4(b)所示的H型钢试件(35 cm×32 cm)为对象开展对比实验。参考杨毅等^[24]和赵卫东等^[25]所采用的评估方法, 选取细化法、传统灰度重心法、Steger法及本文算法进行性能测试, 基于提取精度、计算效率及三维重建效果三方面展开定量分析。实验平台配置包括波长为530 nm紫色线结构光发生器、2台BASLER工业相机(acA1920-150 μm)、精密步进电机及Intel i5-8300H(2.30 GHz)数据处理终端, 硬件系统布局如图9。软件开发基于Visual Studio 2019+OpenCV3.4.1+PCL1.10.0环境。

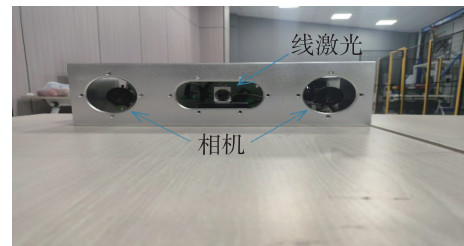
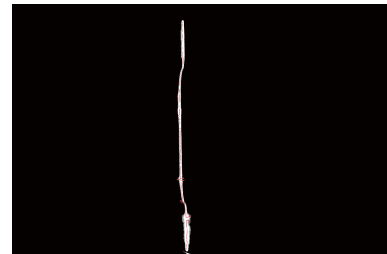


图9 实验平台布局

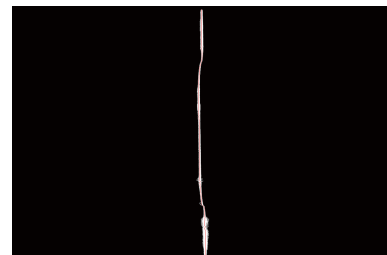
Fig. 9 Experimental platform layout

2.1 线结构光提取质量

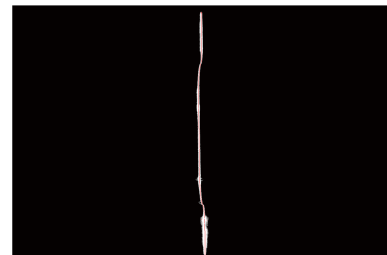
细化法、传统灰度重心法、Steger法及本文算法在H型钢侧面扫描中的条纹中心提取效果如图10。



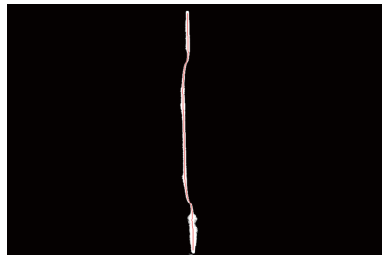
(a) 传统细化法



(b) 灰度重心法



(c) Steger法



(d) 本文算法

图 10 4 种算法的条纹中心提取效果

Fig. 10 Stripe center extraction effect of the four algorithms

由图 10 可看出: 细化法提取的中心线存在明显断裂和分叉现象; 传统灰度重心法虽整体保持连续, 但仍存在明显毛刺与局部断裂问题; Steger 法与本文算法表现出优异的提取质量, 中心线连续规整且无明显毛刺或断裂。本文算法通过引入最小二乘优化, 在保持与 Steger 法相当连续性的同时, 进一步提升了中心线的定位精度, 尤其在试件边缘转折区域展现出更稳定的提取性能。综上表明, 本文算法在复杂工业场景中具有更优的实用性与可靠性。

2.1.1 线结构光提取精度

在线结构光条纹提取领域, 精度评估通常以 Steger 法基准, 采用提取坐标点与理想中心点之间的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为标准度量指标, 其计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^w (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (12)$$

其中: n 为图像中提取的坐标点总数; x_i 为第 i 个点的横坐标; \bar{x} 为所有横坐标的平均值。

采用细化法、灰度重心法、Steger 法及本文算法对 8 组不同时刻的 H 型钢线结构光进行条纹中心提取, 根据式 (12) 计算 4 种算法的均方根误差, 结果如表 1。

表 1 4 种算法提取条纹中心线的均方根误差

Tab. 1 RMSE of the four algorithms for extracting the fringe centerline

条纹中心	RMSE			
	细化法	灰度重心法	Steger法	本文算法
1	2.662	1.482	1.271	1.122
2	2.891	1.501	1.103	1.137
3	2.466	1.434	1.246	1.015
4	2.192	1.397	1.181	1.056
5	2.544	1.452	1.051	1.029
6	2.620	1.429	1.187	1.097
7	2.083	1.336	1.134	1.075
8	2.256	1.473	1.208	1.119
均值	2.204	1.438	1.173	1.081

由表 1 可看出: 本文算法提取中心点的均方根误差为 1.081 像素, 较灰度重心法 (1.438) 和细化法 (2.204) 分别提升 24.8%, 51.0%, 这一结果验证了本文算法在条纹中心提取方面具有亚像素级的精度优势。

2.1.2 线结构光提取效率

为评估本文算法的运行效率, 随机选取 8 张线结构光图像进行测试, 比较细化法、传统灰度重心法、Steger 法及本文算法的提取时间, 结果如表 2。

表 2 4 种算法的中心线提取时间

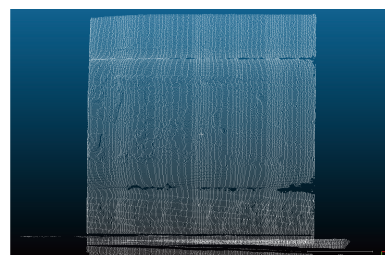
Tab. 2 Centerline extraction time of the four algorithms

条纹中心	时间/s			
	细化法	灰度重心法	Steger法	本文算法
1	0.168	0.377	0.824	0.062
2	0.204	0.384	0.801	0.060
3	0.156	0.364	0.768	0.055
4	0.172	0.359	0.784	0.049
5	0.194	0.395	0.824	0.061
6	0.159	0.348	0.741	0.057
7	0.165	0.372	0.768	0.062
8	0.186	0.379	0.805	0.057
均值	0.176	0.372	0.789	0.057

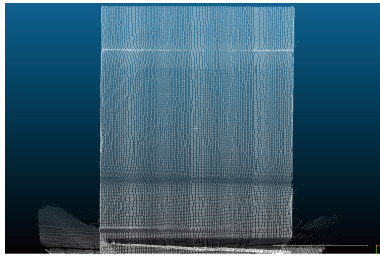
表 2 中的数据显示: 细化法、传统灰度重心法、Steger 法及本文算法的提取时间分别为 0.176, 0.372, 0.789, 0.057 s。本文算法处理速度较最快的基准算法 (细化法) 提升 67.6%, 较 Steger 法提升 92.8%, 在保证精度的同时显著提高了条纹中心的提取效率。进一步分析发现, 在 8 次测试中, 本文算法单次提取时间稳定在 0.049~0.062 s 区间, 时间波动幅度仅 0.013 s, 展现出优异的实时性和稳定性优势。

2.2 三维重建效果

上述实验结果表明, 传统灰度重心法在提取精度上优于细化法, 同时较 Steger 法显著缩短了运行时间。为验证本文算法的实际应用效果, 进一步选取灰度重心法与本文算法对图 4(b) 所示的 H 型钢试件进行三维重建对比实验, 其重建结果如图 11。通过对比可直观评估不同算法在实际测量场景中的性能差异。



(a) 传统灰度重心法



(b) 本文算法

图11 H型钢试件的三维重建结果

Fig. 11 3D reconstruction result of H-shaped steel specimen

图 11 所示结果表明:传统灰度重心法生成的点云存在明显的稀疏和完整性缺失问题;而本文算法在有效抑制杂散点的同时,更好地保留了工件侧壁等关键部位的细节特征,所得点云整体更光滑完整、分布均匀,且噪声干扰显著降低。为进一步量化分析,从图 11 中随机选取 8 组点云数据并计算其深度值的差,结果如表 3。由表 3 可知:传统灰度重心法的平均标准差为 0.730 mm,本文算法将该指标降至 0.122 mm,降幅达到 83.3%,充分体现了所提算法在提升点云整体质量方面的显著效果。

表 3 H型钢三维重建深度标准差

Tab. 3 Standard deviation of depth in 3D reconstruction of H-beam

条纹序号	标准差/mm	
	灰度重心法	本文算法
1	1.082	0.013
2	0.719	0.308
3	1.198	0.319
4	1.274	0.053
5	0.310	0.147
6	0.152	0.049
7	0.944	0.065
8	0.159	0.024
均值	0.730	0.122

综合实验结果表明,本文算法在提取精度(RMSE=1.081pixel)、运行效率(0.057 s)及三维重建质量(0.122 mm)等关键指标上均优于传统线结构光提取算法,不仅能更完整地保留工件几何特征,且其误差远低于 5 mm 的工业误差容限,完全满足高精度工业测量的实际需求。

3 结论

线结构光提取是三维重建的关键环节,其提取质量直接影响重建结果的完整性与精度。为解决传

统提取算法难以兼顾速度与精度的问题,提出一种线结构光亚像素提取与优化算法。首先通过图像阈值化处理缩小计算区间;随后融合几何中心法与灰度重心法,实现粗细结合的条纹提取,兼顾效率与精度;最后采用最小二乘拟合优化中心线,进一步提高定位精度与平滑性。实验结果表明:本文算法的提取精度较细化法、传统灰度重心法和 Steger 法相比分别提高 51.0%, 24.9%, 7.8%;处理时间分别减少 67.6%, 84.7%, 92.8%;在标准工件测量中,点云质量标准差较传统灰度重心法提高了 83.3%,显示出在多性能指标上的综合优势,能够满足亚像素级高精度工业测量需求。尽管本文算法改进显著,但在复杂环境和高反光工件下的适应性仍有提升空间,后续将重点优化其在复杂环境下的鲁棒性,进一步降低误差对点云成像质量的影响。

参考文献:

- [1] 曹广如, 黄石甫. 基于机器视觉的尺寸测量研究进展 [J]. 轨道交通材料, 2023, 2(6):29-33.
CAO G R, HUANG S F. Research progress in dimension measurement based on machine vision[J]. Materials for Rail Transportation System, 2023, 2(6):29-33.
- [2] HUA G, GAO H, HUANG J. Research on integration of digital protection of "cultural relics" architecture and virtual reality technology[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546(5):052026.
- [3] LIU H, HOU M, HU Y. A review of digital watermarking and copyright control technology for cultural relics[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-3-1055-2018.
- [4] 张鲁, 刘鹏举, 刘侍刚. 基于跨域和高感受野的低剂量计算机断层扫描图像去噪方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(14):305-313.
ZHANG L, LIU P J, LIU S G. Low-dose computed tomography image denoising method based on cross domain and high receptive field[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(14):305-313.
- [5] WU Y, HUANG L, GE B, et al. Application of 3D-printed resin guides for the removal of molar fiber posts[J]. Journal of Dentistry, 2024, 153105462.
- [6] 程荫. 中国 AI 赋能的工业质检解决方案市场分析 [J]. 电子产品世界, 2021, 28(9):7-9,66.
CHENG Y. Market analysis of AI enabled industrial quality inspection solutions in China[J]. Electronic Engineering & Product World, 2021, 28(9):7-9,66.
- [7] ZHANG X, YANG Y. Research on road pattern recognition

- of a vision-guided robot based on improved-YOLOv8[J]. Applied Sciences, 2024, 14(11):4424
- [8] 李青栋, 许茂庭. 基于3D视觉引导的工业机器人轮胎装配线设计[J]. 汽车制造业, 2024(6):51-54.
LI Q D, XU M T. Design of tire assembly line of industrial robot based on 3D vision guidance[J]. Automobil Industrie, 2024(6):51-54.
- [9] KANG M, SHI Z, CHEN H, et al. A comprehensive overview of architectural analysis and testing evaluation for autonomous driving decision-making and planning methods[J]. IAENG International Journal of Computer Science, 2025, 52(8):157-179.
- [10] LI Z Y, CHEN Z H, LIU X M, et al. Depth former: exploiting long-range correlation and local information for accurate monocular depth estimation[J]. Machine Intelligence Research, 2023, 20(6):837-854.
- [11] KIM H, HILTON A. 3D scene reconstruction from multiple spherical stereo pairs[J]. International Journal of Computer Vision, 2013, 104(1):94-116.
- [12] 杨镇豪, 杨柳, 李辉, 等. 复杂环境下结构光中心线提取算法[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(9):7-10.
YANG Z H, YANG L, LI H, et al. Stripe center extraction algorithm for structured-light in complex environment[J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(9):7-10.
- [13] 刘天赐, 刘桂华, 胡莉, 等. 基于法线引导的激光中心线提取方法[J]. 应用光学, 2023, 44(1):211-218.
LIU T C, LIU G H, HU L, et al. Laser center-line extraction method based on normal guidance[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1):211-218.
- [14] 李庆圣, 张志伟. 基于FPGA的干涉条纹细化法[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(1):78-82.
LI Q S, ZHANG Z W. Interference fringes refinement method based on FPGA[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(1):78-82.
- [15] 孙彦超, 方遒, 张磊. 法向邻域加权灰度重心的光条中心提取法[J]. 厦门理工学院学报, 2023, 31(1):57-65.
SUN Y C, FANG Q, ZHANG L. Laser fringe center extraction based on gray center of gravity optimized by normal neighborhood weight[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2023, 31(1):57-65.
- [16] WANG J, WU J J, JIAO X, et al. Research on the center extraction algorithm of structured light fringe based on an improved gray gravity center method[J]. Journal of Intelligent Systems, 2023, 32(1): 20220195.
- [17] 崔卫星. 基于Canny-Steger的零件边缘精度检测研究[J]. 通化师范学院学报, 2025, 46(4):34-38.
CUI W X. Research on edge accuracy detection of parts based on Canny-Steger[J]. Journal of Tonghua Normal University, 2025, 46(4):34-38.
- [18] NICOLA G, PAOLO C, MARCO G R. Automated measurement of geometric features in curvilinear structures exploiting Steger's algorithm [J]. Sensors, 2023, 23(8): 4023.
- [19] 王泽浩, 张中炜. 自适应方向模板线结构光条纹中心提取方法[J]. 激光杂志, 2017, 38(1):60-64.
WANG Z H, ZHANG Z W. Adaptive direction template method to extract the center of structured light[J]. Laser Journal, 2017, 38(1):60-64.
- [20] 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.
ZHANG X Y, WANG X Q, BAI F Z, et al. Improved gray centroid method for extracting the centre-line of light-stripe[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(5):622-626.
- [21] 曾超, 王少军, 卢红, 等. 线结构光光条中心提取算法[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(10):1772-1780.
ZENG C, WANG S J, LU H, et al. Center extraction algorithm of line structured light stripe[J]. Journal of Image and Graphics, 2019, 24(10):1772-1780.
- [22] 周祥曼, 王华, 李立军, 等. 基于改进细化法的线激光中心提取方法[J]. 激光杂志, 2023, 44(9):70-74.
ZHOU X M, WANG H, LI L J, et al. Line laser center extraction method based on the improved thinning method[J]. Laser Journal, 2023, 44(9):70-74.
- [23] 王志永, 于宇, 王武越, 等. 基于改进Steger算法流程的线激光中心提取[J]. 电子测量技术, 2023, 46(1):84-89.
WANG Z Y, YU Y, WANG W Y, et al. Line laser center extraction based on improved Steger algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1):84-89.
- [24] 杨毅, 闫兵, 董大伟, 等. 基于二次平滑算法的线结构光中心线提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 309-315.
YANG Y, YAN B, DONG D W, et al. Method for extracting the centerline of line structured light based on quadratic smoothing algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10):309-315
- [25] 赵卫东, 陈香梅, 程星. 基于改进结构光条纹中心提取的三维视觉检测技术[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2023, 40(1):82-88.
ZHAO W D, CHEN X M, CHENG X. 3D vision inspection technology based on improved structured light stripe centre extraction[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2023, 40(1):82-88.