

三维重建技术中的高效光条提取方法 (特邀)

宋丽梅^{1,2}, 佟 宇^{1,2}, 李金义^{1,2}, 王远航^{1,2}

(1. 天津工业大学 控制科学与工程学院, 天津 300387;
2. 天津工业大学 天津市电气装备智能控制重点实验室, 天津 300387)

摘 要: 近年来, 三维重建技术在工业检测、医疗成像等领域得到了广泛应用。然而, 由于被测物体形状的复杂性以及环境噪声等因素的影响, 现有的光条提取算法面临着提取速度慢和重建精度差的挑战。为了解决这些问题, 对现有技术进行了深入分析, 明确了其在处理复杂形状和噪声干扰时的局限性, 提出了一种基于三维重建的高效光条提取 (ELE-3D) 算法。在 ELE-3D 算法中, 通过 Sobel 算子精确提取图像边缘, 进行二值化处理简化图像复杂性, 并利用连通域分析区分噪声与条纹。通过设置面积和长宽比阈值, 保留关键特征, 来确定感兴趣区域 (ROI), 精确地识别并提取图像中的特定几何特征区域, 同时有效抑制背景噪声, 不仅提高了图像的质量, 还确保了能够专注于分析图像中最关键的部分。实验结果表明, ELE-3D 算法有效地提高了光条提取速度, 并有效地抑制了噪声的干扰。在保证重建精度的前提下, 测量同一物体相比较于传统的算法 Steger 和灰度重心法, 速度分别提高了 89.0% 和 85.3%。

关键词: 光条提取; 三维重建; 多视角点云; 激光扫描

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240312

0 引 言

与传统的接触式测量方法相比, 三维重建技术展现出了非接触性、数据处理能力强以及多维度深入分析等显著优势^[1-2]。经过十多年的快速发展, 已经在生物医学、航空航天、工业制造等多个关键领域得到了广泛应用^[3-4]。然而, 在从多个视角采集数据以进行复杂物体的三维重建过程中, 该技术仍然面临着一些挑战, 尤其是噪声的干扰和处理时间的延长。这些问题不仅影响了重建结果的精度, 还增加了数据处理的复杂性, 特别是在光条提取这一关键步骤中。因此, 降低光条中的噪声并提升提取速度对于三维重建整体性能的提升至关重要^[5]。

尽管现有的方法在三维重建领域取得了显著成果, 但在处理大规模物体数据时, 仍然面临着噪声干扰和处理时间过长的挑战^[6], 这些挑战凸显了对现有技术进行优化和创新的迫切需求。在这一背景下, 国内外研究人员已经开始探索新的途径, 以提升光条提

取的准确性和效率^[7]。随着深度学习的快速发展, 一些研究开始集成基于深度学习的降噪技术, 这些技术能够智能地识别和减少图像中的噪声, 从而提高光条提取的质量。YANG 等^[8]提出了一种基于深度学习的条纹中心提取算法, 利用深度神经网络出色的特征学习能力, 即使在干扰存在的情况下也能有效地检测、分割并准确提取激光条纹的中心。LI 等^[9]提出了基于 Unet 网络结合 Steger 方法的算法, 首先通过 Unet 深度学习模型对条带进行精确分割, 随后采用 Steger 算法来进一步精确地识别和定位条带的中心线。在一些与传统算法结合的方法中, 孙王倩等^[10]利用最大极值稳定区域 (MSER) 技术快速、高效地提取具有高对比度的光条有效区域, 通过采用基于开窗思想的改进灰度重心法对 MSER 检测到的光条区域进行中心提取, 解决了传统灰度重心法因光条横截面参与计算数量不同而产生的偏移误差。CHEN 等^[11]提出了一种灵活应对不同宽度变化的光条中心检测方法。通过骨架化处理来确定光条的初步中心线, 接着

收稿日期: 2024-07-11; 修订日期: 2024-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62375204)

作者简介: 宋丽梅, 女, 教授, 博士, 主要从事三维重建、机器视觉、人工智能等方面的研究。

用 Bazen 方法来调整光条的宽度,使之趋于一致,最终通过 Steger 算法精确地捕捉到光条的中心位置。HE 等^[12]提出了一种基于激光条纹特征的新型提取方法,通过极值检测和连通分量分析确定种子点,迭代生长中心线,并利用灰度重心法精确提取中心点。HUANG 等^[13]提出了一种低成本、高效率的直线激光测量系统,通过综合阈值迭代极值法和加权灰度重心法相结合来提取激光条纹的中心,选择合适的阈值来确定中心线的有效灰度值范围,成功实现了对不同物体表面的精确扫描与测量。也有一些针对特殊环境的方法,商执亿等^[14]提出了一种非相干线结构光形貌测量方法,通过自适应阈值分割和灰度重心法,有效避免了金属表面散斑噪声对条纹中心提取的影响,提高了测量精度。章秀华等^[15]在线结构光中心线提取方法的基础上,提出了邻域累积差分的结构光中心快速提取方法。尽管已有众多优化和针对特定环境设计的方法被提出,但它们在复杂环境中,如进行复杂物体或多物体扫描时,往往难以应对物体和环境对激光条纹提取的干扰,这可能导致提取出大量无效中心点,进而影响三维重建的速度和精度。因此,开发一种更加通用且鲁棒的提取方法,以适应多变的扫描环境,仍是当前研究的重要方向。

针对上述问题,提出了一种基于三维重建的高效光条提取 (ELE-3D) 算法。通过边缘提取、图像简化

和特征阈值化,来确定感兴趣区域 (ROI),能够有效去噪并精确提取关键几何特征,并进一步提取光条中心,使得光条中心提取更加高效和准确,不仅显著提升了光条的提取速度,而且确保了三维重建的精度,为多视角三维重建系统提供了优化。

1 基本原理

1.1 算法流程

首先, ELE-3D 算法采用 Sobel 算子对这些区域进行边缘增强。Sobel 算子通过计算图像的一阶导数来强化边缘特征,显著提高了边缘的对比度和清晰度。在边缘增强之后进行二值化处理,将激光条带与背景噪声有效分离。接下来,通过预设的面积阈值和长宽比进行噪声等干扰的过滤,调整激光条带投影的宽高比,减少杂散数据点的影响,确保仅保留显著的特征来定义 ROI。这种方法通过仅关注与激光条带相关的区域,减少不必要的计算量,从而优化提取过程并提升效率。最后,采用亚像素技术对分割后的区域进行精确的中心线提取,确保中心线的精确性和可靠性,为三维重建提供高质量的输入数据,原理如图 1 所示。ELE-3D 算法增强了几何特征提取的精度,有助于详细分析和应用,在保持高效性的同时也提高了光条提取的准确性和三维重建的质量。

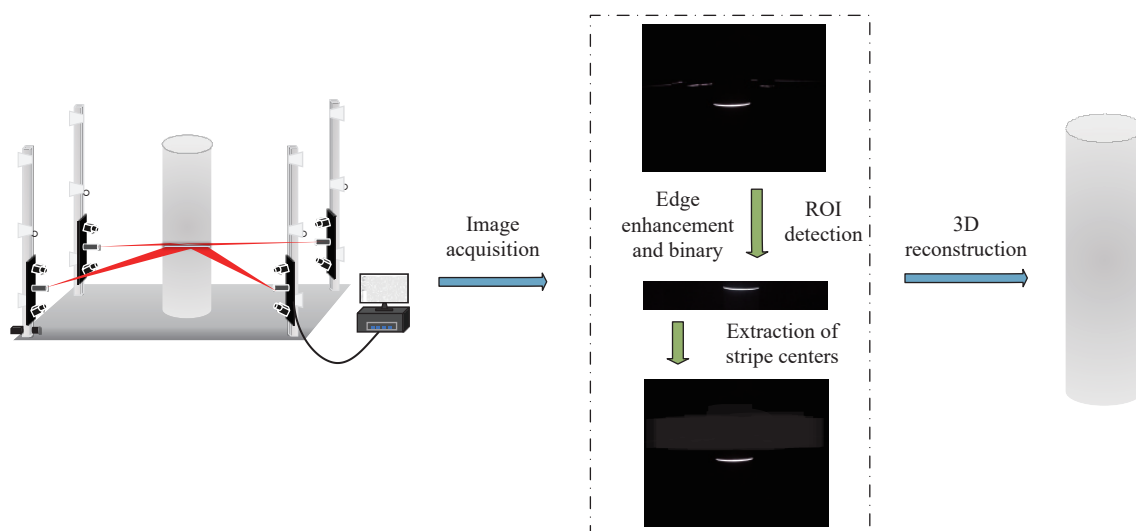


图 1 算法原理图

Fig.1 Method principle diagram

1.2 边缘增强与 ROI 定义

求取图像边缘的灰度梯度值,使用 Sobel 算子对图像进行卷积。如公式 (1) 所示,使用 Sobel 算子可以提取条纹更为清晰的边缘,将提取到的边缘图像与原图进行叠加,保证条纹图像形状的完整。

$$\begin{aligned} g_1 &= (t_7 + 2t_8 + t_9) - (t_1 + 2t_2 + t_3) \\ g_2 &= (t_3 + 2t_6 + t_9) - (t_1 + 2t_4 + t_7) \\ \nabla f &= |g_1| + |g_2| \end{aligned} \quad (1)$$

式中: g_1 和 g_2 分别表示其在水平和垂直方向上的梯度; ∇f 指其梯度; $t_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示像素点行列顺序。

文中以图像的最大灰度值对图像进行二值化处理,同时查找图像连通域外接矩形,分析噪声部分呈聚集分布,且条纹的连通域长宽比比值较大,所以依据几何形状特点区分噪声和条纹,来进行 ROI 区域的定义,具体流程如下:

1) 识别图像中的所有连通区域,并为每个区域计算其外接矩形。对于每个连通区域,计算其面积并存储在数组中。根据系统设置,噪声产生的连通域面积通常较小,因此设定了 25 个像素面积阈值来过滤掉小面积的连通区域,认为它们是噪声,设置面积阈值 T_{area} 。

2) 对于面积大于阈值的连通区域,进一步计算其外接矩形的长宽比,并将结果存储在另一个数组中。设置长宽比阈值 T_{ratio} ,仅保留长宽比在这个阈值范围内的连通区域。

3) 条件过滤,对于每个连通区域,检查其长宽比和面积是否满足以下条件:如果长宽比小于 T_{ratio} 且面积小于 T_{area} 、长宽比小于 T_{ratio} 且面积大于 T_{area} 以及长宽比大于 T_{ratio} 且面积小于 T_{area} ,则认为该区域是噪声或不相关的特征。

$$f(X) \approx f(X^{(m)}) + \left[\frac{\partial f(X^{(m)})}{\partial x_1} \quad \frac{\partial f(X^{(m)})}{\partial x_2} \right] \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} dx_1 & dx_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(X^{(m)})}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(X^{(m)})}{\partial x_1 \partial x_2} \\ \frac{\partial^2 f(X^{(m)})}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f(X^{(m)})}{\partial x_2^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $X^{(m)} = [x_1, x_2]^T$ 。

进一步得到一阶导数和二阶导数,可得到公式 (6):

$$\begin{aligned} f(X) &\approx f(X^{(m)}) + [\nabla f(X^{(m)})]^T [X - X^{(m)}] + \\ &\quad \frac{1}{2} [X - X^{(m)}]^T \nabla^2 f(X^{(m)}) [X - X^{(m)}] \end{aligned} \quad (6)$$

线性激光产生的光斑近似地服从高斯分布,在二

4) 像素操作,对于满足上述任一条件的连通区域,将其像素值设置为 0,表示这些区域在后续处理中将被忽略。未满足上述条件的连通区域将被保留,作为进一步分析的候选区域。如公式 (2) 所示:

$$g(x, y) = \begin{cases} 0, & r(x, y) < T_{\text{ratio}}, \quad a(x, y) < T_{\text{area}} \\ 0, & r(x, y) < T_{\text{ratio}}, \quad a(x, y) > T_{\text{area}} \\ 0, & r(x, y) > T_{\text{ratio}}, \quad a(x, y) < T_{\text{area}} \\ 1, & r(x, y) > T_{\text{ratio}}, \quad a(x, y) > T_{\text{area}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $g(x, y)$ 表示连通区域像素值; $r(x, y)$ 表示连通区域长宽比; $a(x, y)$ 表示连通区域面积。

5) 使用形态学操作来进一步清理和平滑剩余的连通区域,以确保条纹的连续性和完整性通过腐蚀减去结构元素与图像中的连通区域相交的部分来实现。去除小的噪声和细节,平滑区域边界,如公式 (3) 所示:

$$D = I \ominus B \quad (3)$$

式中: D 为腐蚀后的图像; I 为原始图像; B 为结构元素。

1.3 条纹中心提取与重建

利用 Hessian 矩阵来分析图像中每个点的局部曲率,有助于识别和提取激光条纹的边缘。对于图像中的激光条纹上任一点的坐标为 $M(x, y)$,则 Hessian 矩阵可用公式 (4) 来表示:

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: r_{xx} 、 r_{xy} 、 r_{xy} 、 r_{yy} 为高斯函数对 x 与 y 方向的二阶导数。

对二元函数 $M = f(x_m, y_m)$ 进行泰勒展开并改写成矩阵形式,如公式 (5) 所示:

$$f(X) \approx f(X^{(m)}) + \left[\frac{\partial f(X^{(m)})}{\partial x_1} \quad \frac{\partial f(X^{(m)})}{\partial x_2} \right] \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} dx_1 & dx_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(X^{(m)})}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(X^{(m)})}{\partial x_1 \partial x_2} \\ \frac{\partial^2 f(X^{(m)})}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f(X^{(m)})}{\partial x_2^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

维图像中,光条中心点的 Hessian 矩阵 $H(x, y)$ 是通过二阶偏导数与图像 $I(u, v)$ 的卷积而获得的,其结果由公式 (7) 所得:

$$\begin{pmatrix} I_{uu} & I_{uv} \\ I_{uv} & I_{vv} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y^2} \end{bmatrix} \otimes I(u, v) \quad (7)$$

通过 Hessian 的特征值与特征向量可以求得激光

条纹的法向量。设定激光条纹的法线方向向量为 (n_x, n_y) , 令 (x_0, y_0) 为基准点, 则光条中心的亚像素坐标值能够用公式 (8) 来表示:

$$(p_u, p_v) = (x_0 + tn_x, y_0 + tn_y) \quad (8)$$

式中: $t = -\frac{r_x g_x + r_y g_y}{g_{xx} n_x^2 + 2g_{xy} n_x n_y + g_{yy} n_y^2}$; (tn_x, tn_y) 为认定基准点 (x_0, y_0) 与亚像素坐标点 (p_u, p_v) 的偏移量。

经过 ELE-3D 算法的处理, 进一步结合相机的成像模型以及标定参数, 通过公式 (9) 求解出三维空间中的坐标。这一过程显著降低了点云数据量, 而且在进行激光中心线提取时进一步提高了点云生成的速度和质量。

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: s 为尺寸因子; A 为相机的内参数矩阵; R 、 T 分别代表旋转矩阵和平移向量; $(u, v)^T$ 为像素坐标系下的坐标; $(X_w, Y_w, Z_w)^T$ 为世界坐标系下的坐标。

2 实验分析与对比

2.1 光条中心线提取算法效率实验

为验证 ELE-3D 算法的可行性, 将 ELE-3D 算法与传统灰度重心法、Steger 算法进行了实验对比, 通

过对同一物体投射激光进行光条中心线提取实验。

在实验设置中, 选择了 MV-CU013-A0UC 型号的工业相机, 配备 M0814-MP 型号的 8 mm 镜头, 以及 HO-Y635P5-1 030 型号的 780 nm 红外激光发射器作为主要的实验工具。分别对玻璃杯和金属工件进行了光条中心线提取实验, 实验结果如图 2 所示。图 2(a) 为玻璃杯实验, 图 2(b) 为金属工件实验。图 2(a1) 和 (b1) 分别为激光投射到玻璃杯和金属工件的原始图, 可以从图 2(a2) 和 (b2) 灰度重心法的提取效果中看出, 中心线提取效果并不是很好, 提取的光条中心线非常稀疏, 对折射光的处理也不理想; 从图 2(a3) 和 (b3) 中可以看到 Steger 算法在处理折射光时效果不佳, 杂光没有被滤除从而误提取, 这会导致后续在三维重建过程中生成异常点云; 图 2(a4) 和 (b4) 表明 ELE-3D 算法有效避免了环境噪声和折射光的干扰, 生成的光条中心线较灰度重心法提取的更为精确。

通过对比不同方法提取的中心线并拟合直线方程来计算方差, 得到的结果如表 1 所示。其中, ELE-3D 算法在条纹中心提取方面的方差最小, 这表明它在稳定性和抗干扰能力方面展现出了卓越的性能。这些特性不仅提升了光条提取的精度, 还显著提高了生成点云的质量。

为了验证 ELE-3D 算法的效率, 笔者设计了一项

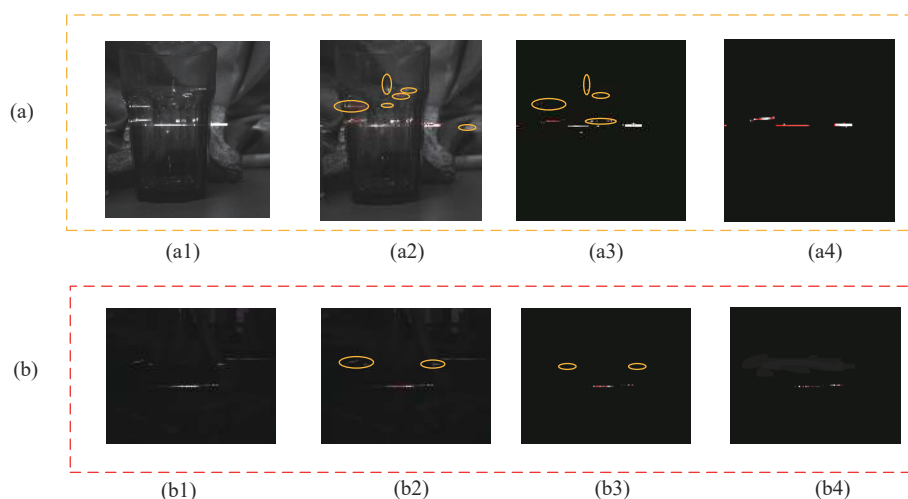


图 2 光条中心线提取效果图。(a1) 玻璃杯原始图; (a2) 灰度重心法玻璃杯效果图; (a3) Steger 算法玻璃杯效果图; (a4) ELE-3D 算法玻璃杯效果; (b1) 金属工件原始图; (b2) 灰度重心法金属工件效果图; (b3) Steger 算法金属工件效果图; (b4) ELE-3D 算法金属工件效果图

Fig.2 Light bar centerline extraction effect. (a1) Original image of a glass cup; (a2) Gray-gravity method result for a glass cup; (a3) Steger method result for a glass cup; (a4) ELE-3D method result for a glass cup; (b1) Original image of a metal workpiece; (b2) Gray-gravity method result for a metal workpiece; (b3) Steger method result for a metal workpiece; (b4) ELE-3D method result for a metal workpiece

表 1 条纹中心提取结果的比较

Tab.1 Comparison of stripe center extraction results

Subject	Method	Fitting linear equations	Variance
Glass cup	Gray-gravity method	$y = -0.03x + 611.82$	1.1218
	Steger method	$y = -0.01x + 481.00$	1.8616
	Ours	$y = 0.01x + 470.71$	0.6304
Metal workpiece	Gray-gravity method	$y = 0.01x + 590.28$	0.9819
	Steger method	$y = 0.02x + 582.68$	1.9675
	Ours	$y = -0.01x + 600.88$	0.4897

对比实验。在相同的条件下,对同一被测物体进行 10 次光条图像的采集,旨在评估三种不同算法在提取光条中心线时所需的时间,以进行效率对比。如图 3 所示,记录了每种算法在 10 次实验中提取光条中心线的时间,其中三种颜色代表 Steger 算法、灰度重心法和 ELE-3D 算法的运行时间。图 3 不仅展示了三种算法在稳定性上的表现,而且通过虚线表示了 10 次提取的平均时间,而实线则详细记录了每次实验的具体运行时间。

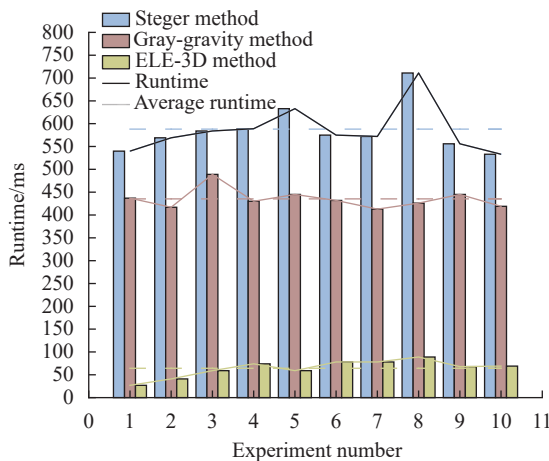


图 3 三种中心线提取算法时间对比

Fig.3 Comparison of time for three centerline extraction methods

从图 3 和表 2 可以看出, ELE-3D 算法运行速度表 2 三种中心线提取算法 10 次实验平均时间对比

Tab.2 Comparison of average time for 10 experiments of three centerline extraction methods

Experiments	Average time/ms
Gray-gravity method	435.3
Steger method	588.2
Proposed method	64.2

相比于 Steger 算法提升了 89%,与灰度重心法相比,速度提升了 85.3%,且运行时间较稳定,保证了系统的运行稳定性。

2.2 光条中心线提取算法鲁棒性验证实验

如图 4 所示,对同一物体用三种不同的方法提取光条中心线图像。在图像中加入不同强度的高斯噪声,并提取出条纹中心,图 4 所示为分别加入方差 $\sigma^2 = 10$ 、 $\sigma^2 = 30$ 、 $\sigma^2 = 40$ 和 $\sigma^2 = 50$ 的高斯噪声。当噪声强度增加时,用 Steger 算法和灰度重心法提取的中心线不同程度地受到干扰。虽然与灰度重心法相比较而言,Steger 算法对噪声的抑制效果相对较好,但也存在对背景区域的噪声进行错误识别的情况。然而,在实验中 ELE-3D 算法与无噪声场景相比差别不大。实验结果表明,该方法具有良好的鲁棒性。

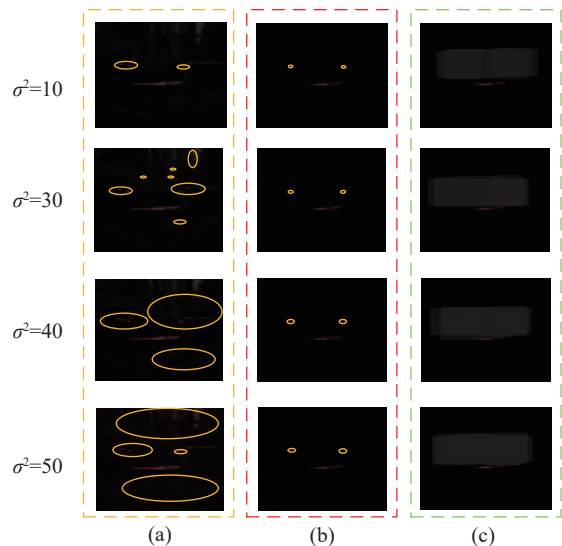


图 4 三种算法加入不同等级噪声。(a) 灰度重心法提取效果;(b) Steger 算法提取效果;(c) ELE-3D 算法提取效果

Fig.4 Three methods to add different levels of noise. (a) Extraction effect of gray-gravity method; (b) Extraction effect of steger method; (c) Extraction effect of ELE-3D method

2.3 三维重建精度实验

为验证 ELE-3D 算法的有效性并确保数据的准确性,使用直径 130.5202 mm 的标准球、玩偶以及人体进行误差实验。使用实验室自主研发的线激光三维重建系统作为实验平台,对模型进行了重建。

三维重建系统考虑了相机的景深、观测角度以及红外激光器的覆盖区域等因素,由四根扫描支柱组成,它们在空间中精确排布,形成一个边长为 2.5 m 的

正方形框架。这些支柱不仅支撑了整个系统的结构,还确保了工作范围的全覆盖,即 1.3~1.9 m 的高度区间。每个扫描支柱上配备了与 2.1 节中相同型号的相机、镜头,以获得最佳的景深和测量角度。此外,HO-Y635P5-1030 型号的 780 nm 红外激光发射器负责提供稳定的激光投射,以实现高精度的表面扫描。E6B2-CWZ6C 型号的编码器和 CAN 总线步进电机及其驱动器的结合,为系统提供了精确的定位和运动控制,确保了扫描过程的稳定性和可靠性。

2.3.1 标准球实验

为检验点云的精度,设计了一项精度检测实验。

将一个标准球体放置于三维扫描系统的正中央,利用三维重建系统,并基于激光三角法测量原理对在不同位置的标准球进行实验。采集到的点云数据使用 Geomagic 软件进行处理。

完成扫描和数据处理后,获得了标准球的最大直径截面数据。图 5(a)展示了进行标准球实验时的模拟示意图;图 5(b)展示了通过三维重建技术得到的点云效果图,生动地呈现了标准球的立体形态;图 5(c)展示了标准球的最大直径截面图,其中点云数据以不同颜色区分,每种颜色代表不同视角的相机所捕捉到的视图,从而形象地呈现了多视角数据融合的效果。

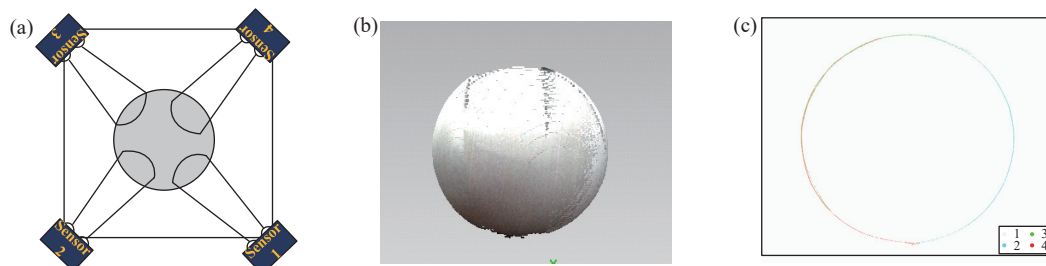


图 5 标准球实验效果图。(a) 标准球实验示意图;(b) 标准球实验效果图;(c) 标准球截面图

Fig.5 Standard ball experiment effect diagram. (a) Schematic diagram of the standard ball experiment; (b) Effect diagram of the standard ball experiment; (c) Cross-section of the standard ball

表 3 所示为 ELE-3D 算法 10 次测量的结果。采用均方根误差作为评价标准,经过计算,得出标准球直径的均方根误差为 0.4099 mm。

表 3 标准球三维重建数据

Tab.3 Standard sphere 3D reconstruction data

Measurement count	Diameter measurement/mm	Error/mm
1	130.372 5	0.147 7
2	131.101 9	-0.581 7
3	130.346 3	0.173 9
4	130.147 1	0.373 1
5	130.097 7	0.422 5
6	131.151 7	-0.631 5
7	130.040 1	0.480 1
8	130.155	0.365 2
9	130.456 6	0.063 6
10	130.066 2	0.454 4

对三种条纹中心提取方法进行 10 次实验的结果表明,ELE-3D 算法的精度高于灰度重心法,且与

Steger 算法的结果接近,如表 4 所示。

表 4 条纹中心提取结果精度对比实验

Tab.4 Stripe center extraction result accuracy comparison experiment

Method	Error/mm
Gray-gravity method	0.422 4
Steger method	0.382 4
Proposed method	0.409 9

2.3.2 玩偶扫描实验

为检验 ELE-3D 算法对复杂形面的扫描效果,选择了一个表面复杂的玩偶作为被测物体进行扫描。这种玩偶因其多变的表面特征,对算法的准确性和细节捕捉能力提出了更高的要求。

图 6 所示为使用 ELE-3D 算法与未使用该算法时生成的点云效果对比图。图 6(a)~(e)展示了应用 ELE-3D 算法重建的点云效果,从不同视角捕捉了玩偶的精细细节,包括细微的纹理和复杂的几何特征。

图 6(f)~(j) 展示了未使用 ELE-3D 算法的效果, 其中由于噪声干扰, 生成了错误的点云。这些数据不仅展示了玩偶的全貌, 还清晰地展现了其纹理信息, 这些细

节对于评估扫描算法的性能具有关键意义。通过这些点云数据, 验证了 ELE-3D 算法在处理复杂形状时的性能。

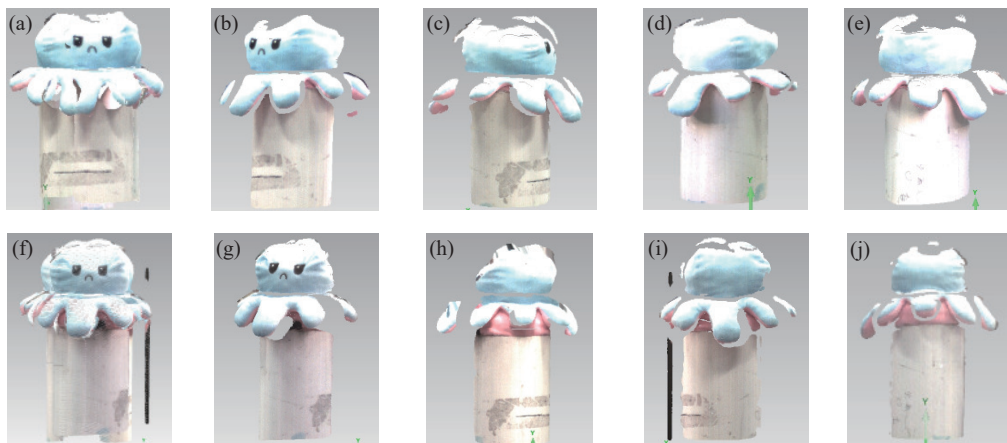


图 6 玩偶重建点云效果对比图

Fig.6 Comparison diagram of the reconstructed point cloud effect of the doll

2.3.3 人体扫描实验

为进一步验证 ELE-3D 算法在处理复杂形面扫描时的有效性与精确度, 选择了具有丰富细节和不规则表面的人体模特作为测试对象。人体模特的表面特征包括了凹凸不平的曲线、细微的纹理变化以及复杂的几何结构。

通过对人体模特进行全面扫描, ELE-3D 算法不

仅能够捕捉到其复杂的几何特征, 而且能够有效地抑制噪声, 生成完整的三维点云数据, 确保了点云数据的完整性和可靠性。图 7(a)~(e) 所示为各个视角下生成的点云效果图, 其中, 点云的稠密性、光滑平顺性以及图中人体模特中衣物的褶皱都得到了精细的捕捉和再现, 表明了算法在处理高细节表面时的有效性。

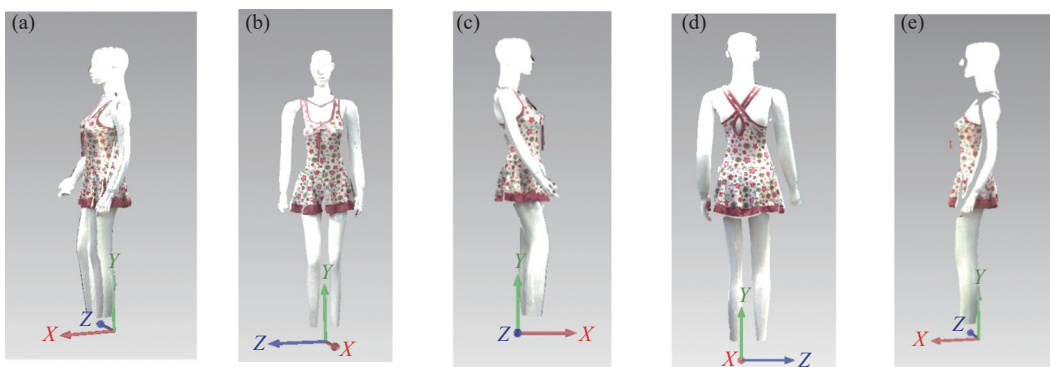


图 7 人体重建点云效果图

Fig.7 Human 3D reconstruction point cloud image

3 结 论

文中针对三维扫描前光条中心线提取, 提出了一种 ELE-3D 算法。根据噪声和光条条纹具有不同几何特征的特点, 通过设置连通区域长宽比和面积阈值的

方法, 确定 ROI, 对噪声进行筛选, 减少了计算量, 有效提高了光条提取的速度和精度。实验结果表明, 相比于传统 Steger 算法和灰度重心法, 速度分别提升了 89.0% 和 85.3%。最后针对多视点云三维重建, 对标准球、玩偶和人体进行了扫描, 说明针对复杂形面

的三维扫描,在点云的细节捕捉等方面达到了预期的效果。这不仅证明了 ELE-3D 算法在复杂形面扫描方面的高效性和精确度,也为未来在更广泛领域的应用提供了坚实的基础。随着技术的不断进步和优化,期待 ELE-3D 算法能够在三维扫描领域发挥更大的作用,为用户提供更加精确和高效的扫描解决方案。

参考文献:

- [1] ZHANG Zonghua, LIU Wei, LIU Guodong, et al. Overview of the development and application of 3D vision measurement technology [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2021, 26(6): 1483-1502. (in Chinese)
- [2] SONG Limei, ZHANG Jipeng, LI Yunpeng, et al. 3D reconstruction method based on multi-view infrared sensor [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(6): 759-769. (in Chinese)
- [3] 熊思博, 王琦, 刘光洁. 三维重建技术的发展与现状研究综述 [J]. 电脑知识与技术, 2022, 18(36): 114-117.
- [4] 邱益, 曹若彦, 梁杰. 基于单线激光的小型零件三维重建研究 [J]. 现代制造工程, 2023(12): 95-100, 139.
- [5] JI Zhenyan, SONG Xiaojun, FU Wenjie, et al. Review on centerline extraction for laser stripe [J]. *Measurement & Control Technology*, 2021, 40(6): 1-8. (in Chinese)
- [6] HU Yaoqi. Metro infrastructure detection based on laser scanning imaging and point cloud processing [D]. Changsha: Hunan University, 2022. (in Chinese)
- [7] GAO Jiayue. Research on target edge detection based on 3D point cloud [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [8] YANG G, Wang Y. Three-dimensional measurement of precise shaft parts based on line structured light and deep learning [J]. *Measurement*, 2022, 191: 110837.
- [9] LI Z, MA L, LONG X, et al. Hardware-oriented algorithm for high-speed laser centerline extraction based on Hessian matrix [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-14.
- [10] SUN Wangqian, QI Zhuo, LI Shaochen, et al. Method for extracting the centerline of line structured laser light based on MSER [J]. *Applied Laser*, 2022, 42(2): 71-77. (in Chinese)
- [11] CHEN Y, ZHOU Y. Laser stripe centerline extraction with large width variation [C]//2021 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). IEEE, 2021: 1-3.
- [12] HE Z, KANG L, ZHAO X, et al. Robust laser stripe extraction for 3D measurement of complex objects [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(6): 065002.
- [13] HUANG K, YANG J, XU D, et al. Line laser based researches on a three-dimensional measuring system [C]//2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2019: 657-660.
- [14] SHANG Zhiyi, WANG Jianhua, YIN Peili, et al. Extraction of incoherent linear structured light stripe center on metal surface [J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(3): 503-509. (in Chinese)
- [15] ZHANG Xiuhua, HONG Hanyu, XU Yangyang, et al. Real time 3D vision screening method of ore under complex lighting conditions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210125. (in Chinese)

Efficient light bar extraction in 3D reconstruction techniques (*invited*)

SONG Limei^{1,2}, TONG Yu^{1,2}, LI Jinyi^{1,2}, WANG Yuanhang^{1,2}

(1. School of Control Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Control of Electrical Equipment, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract:

Objective As an advanced measurement tool, 3D reconstruction technology has demonstrated significant application advantages in a number of key areas such as biomedicine, aerospace, and industrial manufacturing due to its unique non-contact nature, efficient data processing capability, and ability to provide in-depth multi-dimensional analysis. However, as the application of the technology continues, the existing light bar extraction methods face the dual challenges of slow reconstruction speed and large accuracy errors when dealing with objects with complex geometries and under variable environmental noise conditions. These challenges not only

affect the accuracy of 3D reconstruction results, but also constrain the efficiency of data processing, limiting the potential application of 3D scanning technology in a wider range of scenarios. In order to overcome the limitations of existing techniques and enhance the overall performance of 3D scanning technology, proposes an efficient light bar extraction method based on 3D reconstruction (ELE-3D). The ELE-3D method is developed with the goal of achieving a significant speed-up of the light bar extraction process, while at the same time guaranteeing or even improving the accuracy and reliability of the 3D reconstruction. Specifically, the ELE-3D method aims to accurately extract the centerline of the light bar through advanced image processing techniques and methodic optimisation, effectively reduce noise interference and increase data processing speed.

Methods The ELE-3D method is optimized for its limitations in dealing with complex-shaped objects and noise interference through an in-depth analysis of the shortcomings of existing light strip extraction techniques. The method first uses the Sobel operator to perform edge enhancement to improve the contrast and clarity of the edges. Subsequently, binarization is performed based on the maximum gray value of the image to effectively separate the laser stripes from the background noise. Noise filters with area and aspect ratio thresholds are then applied to refine the extraction process, ensuring that only the most relevant features are preserved. It adjusts the laser strip projection ratio to significantly reduce computational demands. Finally, the ELE-3D method adopts a sub-pixel technique for accurate centerline extraction of the segmented region (Fig.1).

Results and Discussions In the comprehensive experimental analysis of the ELE-3D method, first compare the extraction speed and effect of the ELE-3D method with the traditional Gray-gravity method and Steger method in light bar centerline extraction by efficiency test, which shows that the ELE-3D method significantly outperforms the other two methods by an average time consuming of 64.2 ms, demonstrating excellent extraction speed and stability. (Fig.2-3, Tab.1-2). Then, in the robustness validation experiment, we added Gaussian noise of different intensities to the standard image, and the ELE-3D method can maintain high accuracy in centerline extraction even in a high noise environment, showing stronger anti-interference ability compared with the traditional methods (Fig.4). Finally, in the 3D reconstruction accuracy experiments, the ELE-3D method scanned a standard ball, a doll and a mannequin from multiple viewpoints, and the complex shapes and details were clearly captured by the generated point cloud data, which verified the validity and reliability of the ELE-3D method in practical applications (Fig.5-7, Tab.3-4). Taken together, these experimental results show that the ELE-3D method performs well in terms of efficiency, robustness and accuracy, providing solid technical support for the advancement of 3D scanning technology.

Conclusions The experimental results show that the ELE-3D method has improved the light bar extraction speed by 89.0% compared to the traditional Steger method and by 85.3% compared to the Gray-gravity method, and the running time is stable, showing high efficiency and stability. In terms of robustness, the ELE-3D method can maintain high extraction accuracy under different noise levels, showing good anti-noise performance. Through the multi-view point cloud 3D reconstruction experiments, the ELE-3D method is able to capture rich details on different test objects, such as standard balls, dolls, and mannequins, which proves its high efficiency and accuracy in scanning complex shapes and surfaces. These results not only prove the feasibility of the ELE-3D method, but also lay the foundation for future applications in a wider range of fields, which indicates that the ELE-3D method has a broad application prospect in the field of 3D scanning.

Key words: lightbar extraction; 3D reconstruction; multi-view point cloud; laser scanning

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (62375204)