

3D 线激光相机的激光条纹中心提取方法

陈哲¹, 王生怀¹, 钟明²

¹湖北汽车工业学院机械工程学院; ²武汉筑梦科技有限公司

摘要: 线激光条纹中心提取是实现线激光相机三维扫描的关键。根据激光三角测量法研制了线激光相机, 基于传统 Steger 法对其进行优化并提出一种适用于提取线激光相机光条中心的方法。对图像进行预处理, 结合 Canny 算子找出光条边缘, 求取光条边缘极值并计算确定 ROI 区域, 利用高斯滤波处理提取后的图像, 利用 Hessian 矩阵求取光条中心法线方向, 在法线方向进行二阶泰勒展开确定光条中心点, 最后对中心点连接并平滑处理, 实现中心线精确提取。实验表明, 采用本方法能够准确找到不同背景与光源环境下的光条中心, 不同条件下的光条中心均方根误差平均值小于 0.4, 并能够准确扫描出零件三维点云。

关键词: 线激光; 三角测量; ROI; Steger 法; 中心线

中图分类号: TG87; TH124

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2023.10.032

Laser Stripe Center Extraction Method for 3D Line Laser Cameras

Chen Zhe, Wang Shenghuai, Zhong Ming

Abstract: This paper develops a line laser camera based on laser triangulation, optimizes the traditional Steger method and proposes a method to extract the center of the light bar of the line laser camera. The image is pre-processed, the edge of the light bar is found by combining the Canny operator, the extreme value of the edge of the light bar is obtained and the ROI region is determined by calculation, the extracted image is processed by Gaussian filtering, then the normal direction of the light bar center is obtained by using the Hessian matrix, the center point of the light bar is determined by second-order Taylor expansion in the normal direction, and the center points are connected and smoothed to achieve accurate extraction of the center line. The centerline is extracted accurately. The experiment shows that the method can accurately find the center of the light bar under different background and light source environments, and the root mean square error of the center of the light bar under different conditions is less than 0.4, and can accurately scan the 3D point cloud of the part.

Keywords: line laser; triangulation; ROI; Steger method; centerline

1 引言

三维线激光相机是一种非接触式三维测量系统, 三维线激光测量技术被广泛应用于三维形貌重构、汽车自动驾驶、表面质量重构和文物数字化等领域。

线激光相机是以单个相机与线激光发射器为硬件核心, 以三角测量法为基本原理的一种高度集成化应用。线激光相机的工作原理为: 将激光器的条形光束发射到被测物表面, 匀速扫描被测物或者被测物相对于线激光进行匀速运动, 相机拍摄条纹图像, 并通过相关的图像处理计算二维中心线坐标; 根据相机和激光发射器之间的位置关系, 用三角法获取被测物体特征点在世界坐标系中的三维坐标^[1]。相比于双目 3D 相机, 线激光检测技术具有检测速

基金项目: 国家自然科学基金(51675167); 湖北省重点研发计划(2021BAA056); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划(T2020018)
收稿日期: 2022 年 9 月

[13] 余永维, 韩鑫, 杜柳青. 基于 Inception-SSD 算法的零件识别[J]. 光学精密工程, 2020, 28(8): 1799-1809.

[14] Woo S, Park J, Lee J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module [C]//European Conference on Computer Vision. Cham: Springer, 2018: 3-19.

[15] Zheng Z, Wang P, Liu W, et al. Distance-IoU loss: faster and better learning for bounding box regression [C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020, 34(7): 12993-13000.

第一作者: 张新伟, 硕士研究生, 青岛科技大学机电工程

学院 266061 山东省青岛市

First Author: Zhang Xinwei, Postgraduate, School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China

通信作者: 陈东, 博士, 副教授, 青岛科技大学机电工程学院 266061 山东省青岛市

Corresponding Author: Chen Dong, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong, 266061, China

度快、精度高和成本低等特点。

线激光光条中心的提取质量是线激光相机成像的关键之一,光条提取质量以光条提取的速度、稳定性以及精准度作为评判标准^[2]。因此,快速准确地提取线激光光条中心成为线激光相机准确提取被测物三维点云的关键,也是进一步准确实现三维重建的重要环节。传统的线激光中心提取方法有几何中心法^[3]、极值法^[4]、骨架细化法^[5]、灰度重心法以及 Steger 法^[6]等。研究者们通过对传统方法优化改进,或者将不同方法进行结合提出了新方法。

王利等^[7]在高噪声背景环境下提出了一种激光条纹亚像素中心提取方法,运用多种图像处理方法降低图像噪声,实现对光条中心较为精确的提取,但是算法复杂且图像处理过程较冗杂,造成提取速度较慢。李伟明等^[8]提出基于传统灰度重心与轮廓跟踪法结合的光条中心快速算法,此算法通过减少非光条区域的计算来降低计算复杂度,从而提高运行速度,但是此方法仅能精确提取光条质量好的图像。曹慧峰等^[9]对 Steger 法进行优化,通过高斯滤波、形态学等方法得到去复杂背景的激光条纹图像,采用自适应阈值和霍夫变化对图像进一步优化处理,用改进算法提取中心坐标,提高了鲁棒性和提取精度。为解决摄像机采集的激光条纹图像不稳定现象,提高光条中心提取的精度和实时性,严婷婷等^[10]利用高斯加权的二维灰度重心法提取激光条纹中心,但此方法在复杂背景下有较大干扰。聂佩晗等^[11]利用线激光三角测量原理研制了三维测量装置,利用极值法提取中心线,实现了三维重建目标物品。易京亚等^[12]提出光条双边最邻近搜索方法,该方法通过光条梯度局部极大值获取光条双边缘,采用最邻近搜索算法快速获取局部法向,根据局部法向逐行进行灰度重心法计算,获取各行激光中心点亚像素坐标,获取复杂工件的点云。Wan Zhuoren 等^[13]提出了亚像素提取方法,可以快速确定光条的法线方向,通过改进灰度重心精确提取光条中心,利用斜率差和动态邻域优化的自适应轮廓对图像分割,最后采用所提出的方法来测量复杂制造件的几何尺寸。Li Wenguo 等^[14]设计了一种三维测量装置,对相机与激光平面进行标定,并用 Steger 法精确提取激光条中心,基于系统标定参数与中心线提取结果实现对物体表面三维测量。

光条中心的提取方法是实现线激光三维测量系统精确测量或者线激光相机良好成像的基础与关键,因此对激光光条中心提取方法进行优化改进,是提高

精度速度以及提高方法与硬件结合的重要手段。

2 线激光相机结构及工作原理

搭建线激光相机的主要原理为激光三角测量法^[15],该方法可以从测量方式、光线原理以及入射光形态等方面进行分类。按测量方式分为直射式与斜射式,按光线原理分为反射式与透射式,按入射光形态分为单束光与结构光^[16]。直射式用于测量表面粗糙或轮廓起伏较大的被测物或细小零件,斜射式用于测量被测物表面比较光滑或者较大物体。本文根据激光三角测量法搭建相应的线激光相机与实验台架,利用优化的线激光条纹中心提取算法获取精确的激光条纹中心,从而获得更加精确的零件三维点云。

本文采用的是直射式三角激光法,其原理见图1,图2为利用激光三角测量法搭建的线激光相机。三维点云获取的原理为通过求解激光条纹中心点坐标拟合对应的激光平面方程,利用已知的光线束方向与激光平面相交求物体表面点的三维坐标。图3为根据线激光相机成像原理以及三维点云获取原理所搭建的实验平台。

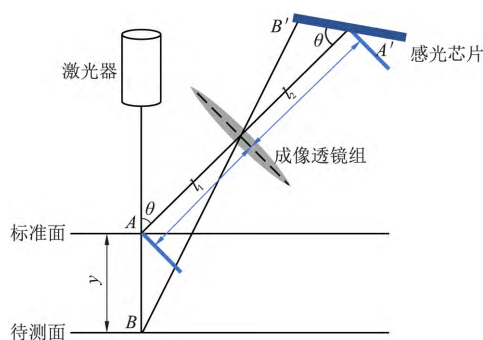


图1 直射式三角测量法

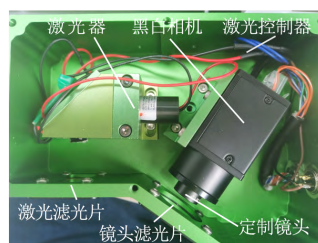


图2 线激光相机



图3 实验台架

3 激光条纹中心提取方法

3.1 预处理——优化自适应 ROI 区域与滤波

对输入图像进行灰度转化,图像灰度化相较于彩色图像灰度图占用内存更小,计算机处理速度更快,同时灰度图像能在视觉上增加对比,突出目标区域。创建 ROI 区域,切割整个图像,设置一个包含

光条中心的矩形方框,在 OpenCV 中提取该区域图像至理想的图像背景中,实现对 ROI 区域操作。在后续进行中心线提取时,算法无需遍历整个图像,仅运算 ROI 区域,从而提高运行速度。常用的 ROI 区域方法可以直接绘制 ROI 区域,运算速度较快,但是检测运动物体时不易找到所需目标区域;另一方法为根据灰度图像利用边缘检测算子得出图像边缘轮廓^[17]。图 4 为 Canny、Sobel 和 Laplace^[18] 边缘检测算子的对比结果。

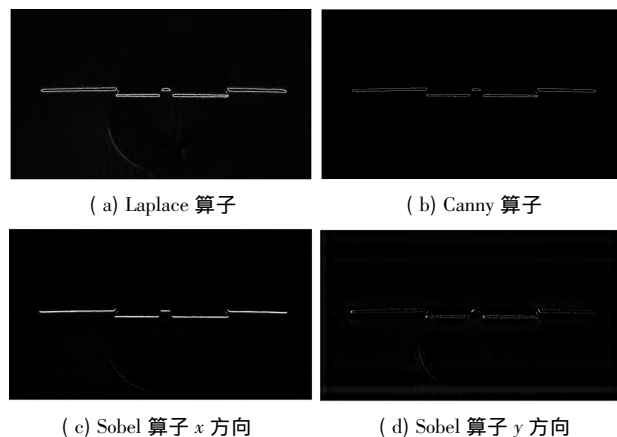


图 4 边缘图像

由图可知,Canny 算子检测的线激光边缘更清晰和准确。利用 Canny 算子作为边缘检测方法,设计了自适应 ROI 范围算法。

获取图像边缘后,在 y 方向上选取边缘极大值 x_k^a 以及极大值 x_k^b ,则 ROI 矩形的宽度 h 可表示为

$$h = \frac{\sum_{k=1}^0 |x_k^a - x_k^b|}{k} \quad (1)$$

确定宽度后计算 ROI 位置,以边缘轮廓重心为中心点,可以完全获取所需要的 ROI 区域。此算法计算复杂度较低,同时根据线激光相机的扫描特性,仅需对线激光相机扫描的第一帧图像进行 ROI 选取,后续每帧图像均可用同一个 ROI,运行效率较高。图 5a 为 ROI 区域,求出图像边缘且确定好 ROI 区域后需对图像进行滤波处理。由于选取了 ROI 区域,滤波器所需遍历的图像范围变小,所以这一过程中的速度变快。

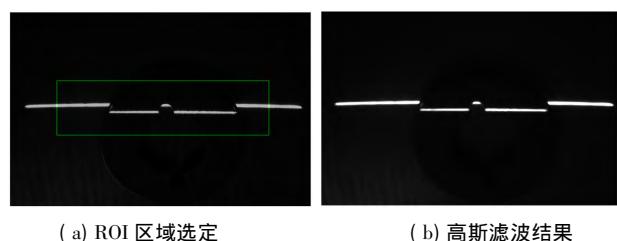


图 5

一般常见的图像滤波器有均值滤波、中值滤波和高斯滤波^[19]。高斯滤波算法复杂度低,运行速度非常快,又由于激光光条的光质良好且物体表面反光良好,同时根据光条横截面特性,选用高斯滤波对图像进行一次粗滤波,图 5b 为经过滤波处理之后的光条图像。

3.2 激光条纹中心提取算法

得到预处理图像后对激光条纹进行精确处理。激光光条中心的提取精度关系三维点云的精确结果,光条中心提取得越精确,三维点云图也会越精确,同时,受环境和相机自身的噪声影响会更小。本文对传统的极值法、灰度重心法、几何中心法、骨架细化法以及 Steger 法等进行了实验复现,通过对比实验结果确定以 Steger 法为基础的改进 Steger 方法作为激光光条精确提取方法。

由线激光器发射出的激光线本质为连续且具有一定厚度的空间光平面,在该空间光平面厚度方向上的光强近似服从高斯分布,越接近光条中心,灰度值越大,越远离中心灰度值越小。因而在摄像机采集的光条图像中,沿光条宽度方向或沿光条法线方向的灰度也会呈现类似的高斯分布特点。图 6a 为理想情况的激光光条分布,图 6b 为实际光条分布,但是在实际使用中光条不可能呈理想状态。

在工程优化问题中,目标函数通常会以非线性多元函数的形式出现,该函数非常复杂,不便于后续进一步处理。为了解决这一问题,开展基于 Hessian 矩阵的光条中心线提取算法研究,该算法具有较好的鲁棒性和通用性,而且在提取线激光中心时能够达到亚像素级精度。

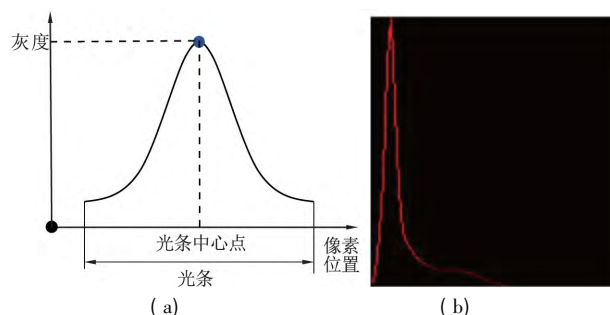


图 6 理想光条截面图与实际光条截面

在图像预处理中,对光条图像进行增强滤波切割等工作时需引入 Hessian 矩阵来确定光条中心点法线方向^[20]。将图像视为一个二维离散函数 $T(m, n)$,表示图像中不同像素的灰度值。将图像函数 $T(m, n)$ 进行泰勒展开,用多项式进行函数逼近,从而找到灰度值顶点。

Hessian 矩阵可表示为

$$H(m, n) = \begin{pmatrix} T_{mm} & T_{mn} \\ T_{mn} & T_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 m, n 分别表示像素的列坐标和行坐标,即为像素 (m, n) 的灰度; T_{mn}, T_{mm} 和 T_{nn} 分别表示二维高斯函数 $G(m, n)$ 的二阶偏导数与图像 $T(m, n)$ 进行卷积运算的结果。

卷积运算过程为

$$\begin{cases} T_{mn} = \frac{\partial^2}{\partial n \partial m} G(m, n) \otimes T(m, n) \\ T_{nn} = \frac{\partial^2}{\partial n^2} G(m, n) \otimes T(m, n) \\ T_{mm} = \frac{\partial^2}{\partial m^2} G(m, n) \otimes T(m, n) \end{cases} \quad (3)$$

设 Hessian 矩阵所求的单位向量 $u = (u_m, u_n)$, 其上有任意一点 (n_0, m_0) , 在此点处对激光横截面二维离散函数 $T(m, n)$ 沿单位向量 (u_m, u_n) 方向进行二阶泰勒展开, 则激光条纹横截面上点 $(m_0 + tu_m, n_0 + tu_n)$ 的灰度 T 可表示为

$$\begin{aligned} T(m_0 + tu_m, n_0 + tu_n) &= T(m_0, n_0) \\ &+ tu(T_m, T_n)^T + \frac{t^2}{2!} uH(m, n) u^T \end{aligned} \quad (4)$$

式中 T_m, T_n 为图像像素点与高斯核的卷积。

式(4)中一阶偏导数为0的点即为待提取光条的中心点, 经变化求解可得

$$t = \frac{u_m T_m + u_n T_n}{u_m^2 T_{mm} + 2u_m u_n T_{mn} + u_n^2 T_{nn}} \quad (5)$$

求解出 t 后, 就能求得准确的光条中心点坐标 $(m_0 + tu_m, n_0 + tu_n)$, 将光条中心点线性连接并平滑处理可得到准确的光条中心线。

4 实验与分析

4.1 搭建实验平台和软件环境

实验平台是企业研发的非标准产品试验台, 激光扫描相机由海康威视的 1280×960 像素黑白相机、8mm 微型工业镜头、滤光片、相机外壳型材以及 Coherent 公司生产的 StingRay-405 激光器组成。

激光器参数: 波长 405nm, 功率 10mW, 线激光相机的中激光线到镜头最佳对焦点为 14cm, CMOS 相机与激光线的最佳偏射角度为 45° 。

软件组成: 以 C++ 为编程语言, 采用 Visual Studio 2019 软件与 OpenCV 4.5.3 软件进行联合编程。

计算机硬件组成: Windows11 系统, AMD Ryzen5 处理器, 3050Ti 图形处理器, 16G 运行内存。整个系统运行流程见图 7。

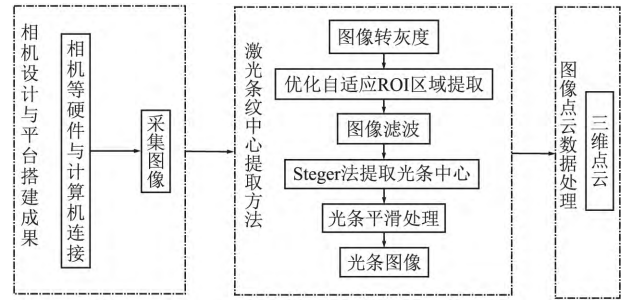


图7 系统运行流程

4.2 实验方法

为了验证本文所提方法的运行速度、稳定性与环境适应性, 使用搭建的线激光相机与实验平台, 利用实验平台匀速运动托盘, 托盘运行速度设为每分钟步长 750mm, 利用线激光相机拍摄 5 个不同位置的图像, 同时使用光源模拟六种不同使用环境, 每种环境拍摄 5 张图像, 最后图像数量为 150 张。六种模拟环境分组为光源白背景、光源黑背景、强环境光白背景、无环境光白背景、无环境光黑背景及有环境光黑背景。分别使用极值法、灰度重心法、骨骼细化法、法向质心法与本文所提方法对六组图像进行图像处理对比, 记录运行时长。平均运行时间如表 1 所示。

表1 不同环境的各算法平均运行时间 (ms)

图像组编号	极值法	灰度重心法	骨骼细化法	法向质心法	改进法
1	97.110	159.847	205.418	100.102	109.733
2	91.118	159.050	169.378	107.852	108.056
3	98.103	172.078	179.316	96.672	112.511
4	92.300	142.265	170.084	98.3275	104.122
5	97.347	141.097	158.457	104.297	112.675
6	93.246	141.187	169.187	99.915	106.626

由表 1 数据可知, 每种算法所需时间均不同, 运算量越大的方法其处理速度越慢, 其中骨骼细化法速度最慢, 平均速度比极值法慢 1.6 ~ 2.1 倍。本文所提方法运行速度与法向质心法相接近, 比骨骼细化法快 40.6% ~ 87.2%, 比灰度重心法快 25.2% ~ 53.2%。

对比不同组别的结果可以发现, 不同环境下的运行速度也不一样, 在弱光环境下算法速度更快。分析原因是弱光环境下激光光条的成像效果会变差, 光条中点的数量变少, 同时环境的噪点也变少, 图像滤波与光条中点的遍历计算均会变快。但该结果使光条中心的提取质量变差, 光条提取的质量图像如图 8 所示, 在六组不同环境下线激光提取的质量差别也较大。

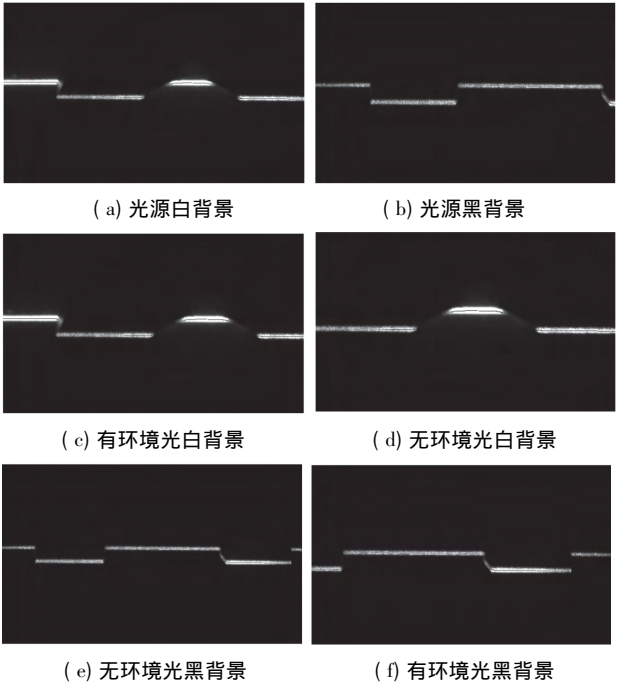


图 8 处理结果

在表 1 中能看到 ,不同算法运算时间的波动也不同 ,运算时间的波动可以作为算法稳定性的一个评判标准 ,时间波动越大 ,算法稳定性越差。同时 ,每种方法的运行速度均为毫秒级 ,将实验平台扫描速度控制在匀速、中速时 ,相机采集并通过计算机处理图像后所用总时间并无较大区别 ,与线激光相机成像速度差 0.2s。

为了验证本文方法的提取精度 ,分别使用灰度重心法、法向质心法与本文方法对表 1 中六组图片进行 20 次分析处理 ,记录 300 ~ 600 列的中心点行坐标数据。

利用 Bessel 公式求取标准误差 s 为

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \tag{6}$$

式中 ,残差 $v_i = x_i - \bar{x}$ 代替真差。

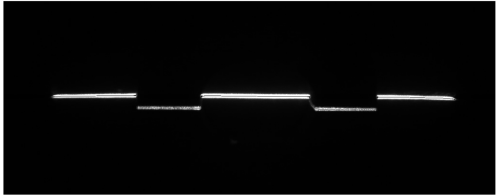
由表 2 可知 ,在背景良好光照良好的条件下 ,三种方法的提取精度均较高;在光照条件不好、背景较差的条件下 ,法向质心法的光条中心点波动较大 ,误差大幅度提高 ,灰度重心法精度与本文方法比较接近 ,但是在弱光环境下误差较高 ,本文方法提取精度最高 ,不同条件下的均方根误差均低于 0.5。采用本文方法对第一组光条图像进行处理的过程及结果如图 9 所示。

利用搭建好的测量系统与线激光相机基于标定块对线激光相机进行标定 ,计算被测物平移运动速度与激光扫描参数(激光扫描间隔、扫描步长和扫

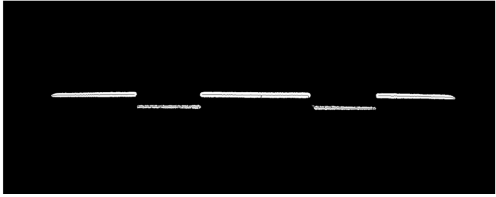
描长度) 之间的关系 ,对注塑零件进行点云图像获取 ,获取结果如图 10 所示。

表 2 六组图像均方根误差

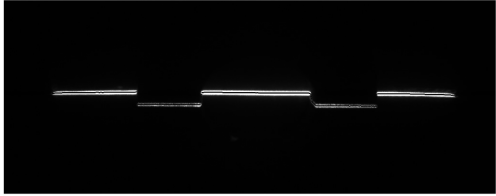
图像组	均方根误差(pixel)		
	本文方法	灰度重心法	法向质心法
1	0.256	0.327	0.463
2	0.445	0.549	0.627
3	0.241	0.330	0.437
4	0.352	0.471	0.503
5	0.477	0.586	0.685
6	0.462	0.573	0.658



(a) 本文算法



(b) 法向质心法



(c) 灰度重心法

图 9 处理过程及结果

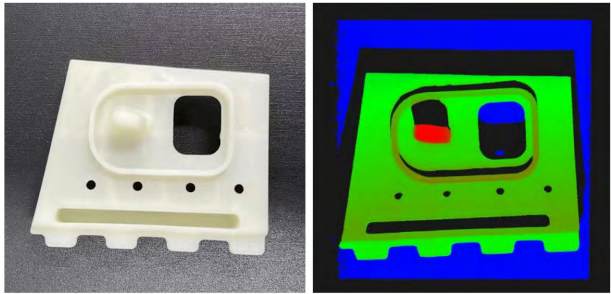


图 10 注塑零件及其点云图像

5 结语

基于三角激光测量法研制了线激光相机 ,搭建了相关实验系统 ,提出了激光条纹中心提取方法。对图像进行预处理 ,结合 Canny 算子优化的自适应 ROI 处理 ,对提取后的图像进行滤波处理。基于 Hessian 矩阵的 Steger 法提取中心线 ,并且对中心线进行拟合平滑处理。对 3D 线激光相机进行标定 ,

匹配相机扫描速度与被测物运动速度,实现对目标零件的三维点云获取。由实验结果可知,本文所提方法在不同环境下运行较为稳定,处理图像的时间波动小于10ms,精度较高,均方根误差小于0.4。

利用本文方法,线激光相机能够较好地提取零件点云。但该方法依然存在一定的局限性,即物体在试验台上运动速度与相机采集的匹配速度不快,影响整个系统的运行速度,后续将进行相关优化。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 詹坤峰, 陈文建, 李武森, 等. 线激光三维场景重建系统及误差分析[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 173-182.
- [3] 陈璐, 关立文. 基于改进 Zernike 矩的亚像素钻铆圆孔检测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(6): 438-447.
- [4] Trucco E, Fisher R B, Fitzgibbon A W, et al. Calibration data consistency and model acquisition with laser strippers[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1998, 11(4): 293-310.
- [5] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structure[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- [6] 李莹莹, 张志毅, 袁林. 线结构光光条中心提取综述[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 13-22.
- [7] 王利, 陈念, 巫玲, 等. 高噪声背景下激光条纹亚像素中心的提取[J]. 应用光学, 2016, 37(2): 321-326.
- [8] 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.
- [9] 曹慧峰, 朱均超, 刘欣宜, 等. 一种快速光栅条纹中心亚像素坐标提取方法[J]. 激光杂志, 2021, 42(3): 52-57.
- [10] 严婷婷, 李锋, 王琦. 高斯加权的二维灰度重心法提取光条中心[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(12): 3570-3574.
- [11] 聂佩晗, 缪慧敏, 张雅婷, 等. 线激光三维测量装置研制[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(8): 36-40.
- [12] 易京亚, 孙闯, 苏金宇, 等. 基于双边最邻近搜索的光条中心线提取方法[J]. 激光杂志, 2022, 43(12): 1-11.
- [13] Wan Zhuoren, Lai Leijie, Jian Mao, et al. Extraction and segmentation method of laser stripe in linear structured light scanner[J]. Optical Engineering, 2021, 60(4): 1-5.
- [14] Li Wenguo, Hou Dameng, Luo Xixin, et al. 3D measurement system based on divergent multi-line structured light projection, its accuracy analysis [J]. Optik, 2021, 231: 166396.
- [15] 王晓嘉, 高隽, 王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(S2): 601-604, 608.
- [16] 徐瑞超, 胡艳凯, 线晨. 激光三角法微位移测量的算法比较[J]. 上海电气技术, 2021, 14(4): 75-78.
- [17] 杜绪伟, 陈东, 马兆昆, 等. 基于 Canny 算子的改进图像边缘检测算法[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(2): 410-413, 457.
- [18] Zhao Congyang, Yang Jianing, Zhou Fuqiang, et al. A Robust laser stripe extraction method for structured-light vision sensing[J]. Sensors, 2020, 20(16): 4544.
- [19] 张德保, 刘普吉, 姜寿山. 激光条纹图像处理算法的研究[J]. 微型机与应用, 2011, 30(2): 47-50.
- [20] 陈念, 郭阳宽, 张晓青. 基于 Hessian 矩阵的线结构光光条中心提取[J]. 数字技术与应用, 2019, 37(3): 126-127.

第一作者: 陈哲, 硕士研究生, 湖北汽车工业学院机械工程学院 442002 湖北省十堰市

First Author: Chen Zhe, Postgraduate School of Mechanical Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan, Hubei 442002, China

通信作者: 王生怀, 博士, 教授, 湖北汽车工业学院机械工程学院 442002 湖北省十堰市

Corresponding Author: Wang Shenghuai, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan, Hubei 442002, China