

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314730

基于空间灰度重心推进的线结构光中心提取^{*}卜民众^{1,2} 吴国新^{1,2} 黄金鹏^{1,2} 左云波^{1,2} 刘秀丽^{1,2}

(1.北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192; 2.北京信息科技大学机电工程学院 北京 100192)

摘要: 利用线结构光对工件进行三维测量时,快速、准确提取激光光条中心是测量系统的关键技术之一。提出一种基于空间灰度重心推进的激光中心提取方法。该方法基于激光条纹空间灰度重心向前推进,结合八邻域判定法进行光条空间区域的选取,接着对选取的区域进行新的空间灰度重心坐标提取;在完成整幅图像提取后,采取 3σ 准则剔除异常中心点,最终获得激光中心坐标信息。实验结果表明,所提算法对不同类型条纹的适用性强,提取效果稳定。提取中心均方根误差为0.492 pixel,相较于提取精度最优的Steger改进算法提升了9.8%,提取速度提高了5倍;相较于处理速度最优的内部推进算法,在保持提取速度基础上,提取精度提升了24.1%。同时,所提算法极大增强了对欠曝光光条图像的处理能力,有效降低了环境对线结构光测量的限制。

关键词: 测量;线结构光;空间灰度重心; 3σ 准则

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.2

Center extraction of linear structured light based on spatial gray centroid progression

Bu Minzhong^{1,2} Wu Guoxin^{1,2} Huang Jinpeng^{1,2} Zuo Yunbo^{1,2} Liu Xiuli^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. School of Mechanical Electrical Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: It is one of the key technologies to extract the center of laser stripe quickly and accurately when using linear Structured light for 3D measurement of workpiece. In this paper, a method that a laser center extraction method based on spatial gray gravity center advancing is proposed. which method bases on advancing the gray center of gravity in the laser stripe space, combining the eight neighborhood decision method to select the light stripe space area, then extracting the new spatial gray Barycentric coordinate system coordinates of the selected area; The pauta criterion eliminates abnormal center points and ultimately obtains the laser center coordinate information behind completing the entire image extraction. The experimental shows that the Root-mean-square deviation of the extraction center of the proposed algorithm is 0.492 pixel, which is 9.8% higher than the optimal extraction precision Steger improved algorithm, and the extraction speed is 5 times higher. Compared to the internal advancement algorithm with the best processing speed, while maintaining the extraction speed, the accuracy has been improved by 24.1%. At the same time, the proposed algorithm greatly enhances the processing ability of under exposed light stripe images, effectively reduces the restriction of the environment on the measurement of line Structured light.

Keywords: measurement; linear structured light; spatial grayscale center of gravity; pauta criterion

0 引言

近年来,随着工业水平的不断提高,如何精确获取工件外形尺寸的三维数据成为了测量领域的重要研究方向之

一^[1]。线结构光三维测量技术具有非接触、结构简单、稳定性强、精度较高等优点,被广泛应用在尺寸测量、焊缝跟踪、缺陷检测等领域^[2-3]。线结构光测量系统主要由工业相机和线结构激光发射器组成^[4],基于激光三角法测量原理:激

收稿日期:2023-10-10

* 基金项目:国家重点研发计划课题(2020YFB1713203)、北京信息科技大学勤信人才项目(QXTCP202120)、机电系统测控北京市重点实验室开放课题(KF20222223201)项目资助

光器将线结构光投射到被测工件,相机采集被测工件表面的激光条纹图像,通过结合线结构光激光器、工业相机的三角关系对获取的激光条纹图像进行分析,即可获得被测工件的表面尺寸信息^[5]。测量过程主要包含两个步骤^[6]:1)测量系统的标定,根据激光器与工业相机的位置关系以及工业相机的内部参数,建立激光条纹图像像素坐标与被测工件实际物理坐标的对应关系。2)激光条纹中心线的提取。由工业相机采集到的激光条纹通常在图像中占有像素宽度,需要进行激光中心线的提取。激光中心线的提取精度直接影响整个系统的测量精度。因此,一种快速、稳定、准确的激光中心线提取算法对三维测量系统的测量精度尤为重要。

传统的激光中心线提取算法根据不同的理论基础主要可以分为两类。其中一类基于光条的几何特征进行光条中心提取,主要有几何中心法^[7]、阈值法^[8]和骨架细化法^[9],其中最常见的是阈值法和骨架细化法。另外一类基于激光条纹的能量中心进行中心提取,主要有灰度重心法^[10]、方向模板法^[11]、Steger法^[12]。其中最近常见的是灰度重心法和Steger法。阈值法操作简单,处理速度快。但其对于复杂结构测量时易受噪声影响,提取获得的中心线精度较低,适用于条纹质量好且精度要求低的大型物体测量;骨架细化法引入了图像形态学算法,能够提取细化的激光条纹中心线,但计算较为复杂,对计算资源要求较高,且复杂结构或噪声较多的情况下提取效果不稳定;灰度重心法原理简单,运行速度快,可以实现亚像素提取。但易受噪声影响,在光条方向变化较大时,提取效果不佳;Steger算法通过计算一阶和二阶导数,提高了对中心线的精确性,适用于高精度要求的场景。但运算量巨大,无法保证光条的实时提取。

由上可知,这些传统方法往往不能同时兼顾提取精度和提取速度。近年来,许多国内外学者提出了许多激光中心线提取的改进算法。李凤娇等^[13]基于Steger法提出通过采用骨骼化图像处理确定光条初始中心,结合其所在的条纹宽度对图像进行卷积,得到最优的 σ 值,实现了宽度变化较大的激光图像光条中心线的精确提取。梅峻华等^[14]提出了一种极值法和灰度重心法相结合的灰度重心算法,在保证较快的提取速度的同时又兼顾了提取精度。李涛涛等^[15]建立高斯-洛伦兹衍峰模型进行像素值的拟合,而后采用灰度重心法进行光条中心提取,提升了算法对不同图像的适应性。张伟康等^[16]采用最小二乘法获的激光条纹骨架的法向,之后结合灰度重心法进行其法向的灰度重心坐标,避免了卷积运算,进一步提升了运行速度。虽然国内外学者针对激光中心线提取的传统算法提出了许多改进算法,但这些算法往往不能很好的兼顾算法稳定性、提取精度和提取速度。Steger算法精度高,但其提取速度较慢,且高斯核的选取不当会对提取效果产生较大影响。同时,其对于图像质量要求较高,提取图像质量差的激光中心线效果不佳^[17]。灰度重心法和阈值型心法运算速度较快,

但易受噪声影响,对于图像质量差的激光条纹图像提取精度较低,且对于欠曝光光条图像易出现断点和缺失的问题^[18]。

为解决上述问题,本文提出一种基于空间灰度重心推进的激光中心提取方法。此方法基于八邻域判定法与上一列激光条纹空间灰度重心定位下一列激光条纹区域起始点,以起始点为基点分别向上、向下扩展获得所在列光条区域。并针对获得的相邻三列激光条纹空间区域进行当前列空间灰度重心的提取。最后,针对因搜寻光条范围区域遗漏错误导致的异常激光中心坐标点,引入 3σ 准则对异常点进行剔除。实验结果表明,所提方法可实现稳定、快速、精确提取激光中心线,满足工业测量实时性要求。

1 基本原理

1.1 自适应二值化分割阈值选取

Otsu法^[19]是日本学者OTSU于1979年提出的一种对图像进行二值化的高效算法,又称最大类间方差法。其基本原理是通过选取一个阈值将图像分为背景和前景两部分,使目标和背景像素的类间方差最大,将此阈值作为图像二值化分割的最佳阈值。通常灰度图像像素深度为8,对应像素值的范围为 $0\sim 255$ 。设图像像素长度 L ,宽度为 W ,像素总数为 $L\times W$ 。遍历图像像素点,记灰度值 i 的像素点数目为 n_i ,灰度值为 i 的像素点在图像中出现的概率为 p_i , $p_i=n_i/(L\times W)$ 。针对激光条纹图像,灰度值较大的一方为目标像素。选择二值化分割阈值为 t ,记 $P_0(t)$ 和 $P_1(t)$ 分别为背景像素和目标像素在图像中出现的概率。则有:

$$P_0(t) = \sum_{i=0}^t p_i \quad (1)$$

$$P_1(t) = \sum_{i=t+1}^{255} p_i \quad (2)$$

记 $u(t)$, $u_0(t)$, $u_1(t)$ 分别为整幅图像、背景像素、前景像素的平均值,则有:

$$P_0(t) = \sum_{i=0}^{255} i p_i \quad (3)$$

$$u_0(t) = \frac{\sum_{i=0}^t i p_i}{P_0(t)} \quad (4)$$

$$u_1(t) = \frac{\sum_{i=t+1}^{255} i p_i}{P_1(t)} \quad (5)$$

可得,类间方差 $\delta_b(t)$ 为:

$$\delta_b(t) = P_0(t)[u_0(t) - u(t)]^2 + P_1(t)[u_1(t) - u(t)]^2 \quad (6)$$

当二值化分割阈值 t 使类间方差最大时,记作最优阈值 T 。

激光条纹图像的条纹区域和背景区域的像素灰度值差异较大,可选择Otsu法对图像进行二值化。但传统的Otsu算法对于激光条纹亮度对于亮度分布不均匀的图像存在断点过多,提取效果不佳等问题。故改进Otsu法对图

像的每一列进行自适应阈值的选取,完成激光条纹图像的二值化。

1.2 光条提取区域选取

首先从左到右,从上到下逐列、逐行的遍历 Otsu 算法分割得到的激光条纹图像像素点,若遍历当前点的像素值为 255,则采用八邻域判定法判定当前点的性质,直到定位到激光条纹区域起始列的起始点。图像的八邻域示意图如图 1 所示。

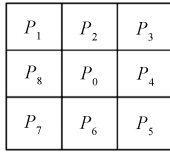


图 1 八邻域示意图

其中,八邻域判定法原理为统计八邻域像素亮点数目对当前点的性质做出判定,记 i 为八邻域像素点亮点个数,若 $i \leq 5$,则判定当前点为噪声点;若 $i > 5$,则认为该点为光条区域起始点。基于当前列光条区域起始点坐标分别向上、向下搜寻像素亮点,扩展得到光条起始列的目标光条区域。

由于激光条纹具有连续特性,可基于上一区域的空间灰度重心坐标结合八邻域判定法快速定位下一列光条起始点。假设二值化分割后的激光条纹如图 2 所示,推进方式如图 3 所示。

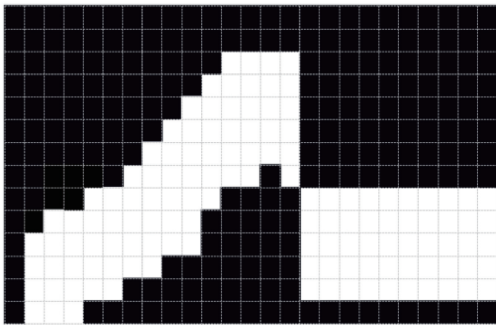


图 2 二值化光条图像

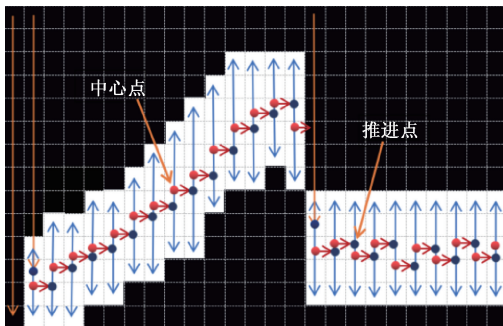


图 3 推进方式示意图

记上一列空间灰度重心坐标为 (x, y) 。基于此坐标沿骨架方向推进一列,判断像素点 $(x+1, y)$ 灰度值是否为

零。若为零,则重新按顺序遍历图像,寻找下一段光条起始列的起始点;若不为零则采用八邻域判定法判断是否符合光条起始点要求。如若符合,则以此点为起始点分别向上、向下搜寻像素亮点,扩展得到当前列的目标光条区域;若判定为噪声点,则重新按顺序遍历图像。以此类推,直至遍历完整幅图像。

1.3 空间灰度重心算法

灰度重心法是指根据各坐标点的像素灰度值大小,赋予各坐标点不同的加权值,灰度重心计算公式为:

$$(X, Y) = \left(\frac{\sum_{i=0}^n x_i I(x_i, y_i)}{\sum_{i=0}^n I(x_i, y_i)}, \frac{\sum_{i=0}^n y_i I(x_i, y_i)}{\sum_{i=0}^n I(x_i, y_i)} \right) \quad (7)$$

空间灰度重心法基于选取的光条区域坐标信息,对原始激光条纹灰度值进行空间灰度重心的提取。算法原理为设置 3 个点集右列、中间列、左列,分别记作 $next_points$, $current_points$, old_points , 用于储存提取得到的相邻三列激光光条区域坐标信息。首先使用 $next_points$ 点集存储基于推进点扩展得到的后列光条区域位置信息 (x, y) ($j=0, 1, 2, \dots, n$), 然后采用空间灰度重心法对 3 个点集选取区域进行重心提取。之后首先清空 old_points 点集, 将 $current_points$ 中存储的点集转移到 old_points 后, 清空 $current_points$; 然后将 $next_points$ 中存储的点集转移到 $current_points$ 后, 清空 $next_points$ 。最后基于提取得到的当前列光条中点向前推进, 并使用 $next_points$ 点集继续储存下一列新提取到的光条区域区域坐标信息, 完成光条区域的更新, 再次进行空间灰度中心的提取, 直至完成整幅图像中心线的提取。若推进的过程中遇到断点, 则清空 $current_points$, old_points 点集, 重新定位光条起始列。

根据当前存储的光条区域数量不同,空间灰度重心法提取光条中心可分为以下 3 种情况:

1) 当 $current_points$, old_points 点集均为空时, 采用灰度重心法针对 $next_points$ 点集区域进行当前列光条灰度重心提取。

2) 当 $current_points$ 点集非空, old_points 点集为空时, 针对 $next_points$ 点集与 $current_points$ 点集区域进行空间灰度重心的提取。

3) 当 $current_points$, old_points 点集均非空时, 针对 $next_points$ 点集、 $current_points$ 点集与 old_points 点集区域进行空间灰度重心的提取。

空间灰度重心法示意如图 4 所示。

1.4 异常中心点的剔除

当激光光条亮度分布不均匀时,二值化后的激光图像列光条区域将会存在像素值为零的暗点。在基于推进点坐标进行光条区域扩展的过程中,暗点的存在会导致扩展得到的光条区域不完整,进而导致提取到错误的空间灰度重心坐标点,如图 5(a)、(b)所示。

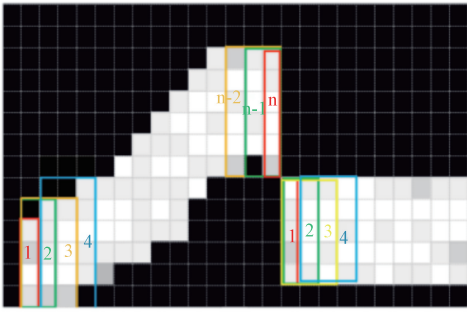


图4 空间灰度重心法示意图

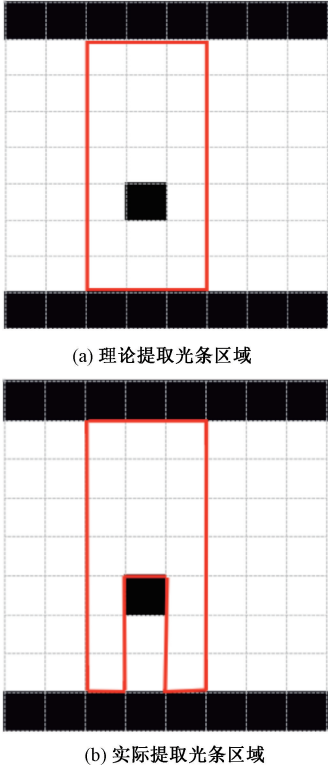


图5 提取光条区域

3σ 准则基本原理为假设一组数据只含有随机误差,对其进行计算得到标准偏差,按一定概率确定一个区间,认为超过这个区间的误差,不属于随机误差而是粗大误差,应将其剔除。

线结构光条纹图像具有连续特性,通过对激光条纹图像相邻中心点像素垂直距离进行统计学分析,可得相邻中心点像素距离分布如图6所示。

可知激光条纹图像相邻像素点垂直距离分布近似正态分布。对于相邻中心点像素距离较大的点,应认作异常点,可采用 3σ 准则剔除。计算所有相邻像素点垂直距离的平均值 μ 以及标准差 σ ,将垂直像素距离大于 $\mu + 3\sigma$ 或者小于 $\mu - 3\sigma$ 的中心点认作野值点予以剔除。

2 实验与分析

为验证所提算法的合理性,搭建线结构光图像采集平

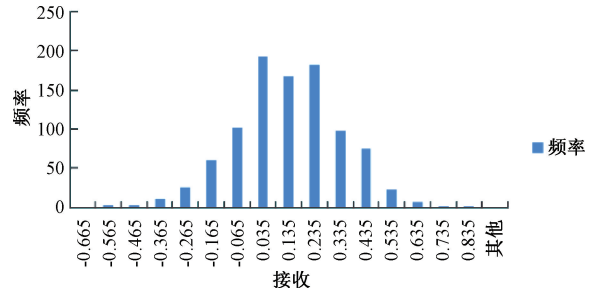


图6 像素距离分布直方图

台,如图7所示。实验平台采用波长为 450 nm 的蓝紫色线结构激光器作为光源,功率为 150 mW。相机采用大恒水星系列 CMOS 工业相机 MER-502-79U3C,分辨率 2448×2048 。所提算法基于 Visual Studio2019 开发工具,采用 C++ 和 OpenCV4.5 编程,计算机处理器为 Intel(R) Core (TM) i5-8250U CPU@1.60 GHz,内存 8 GB,操作系统为 Win10。

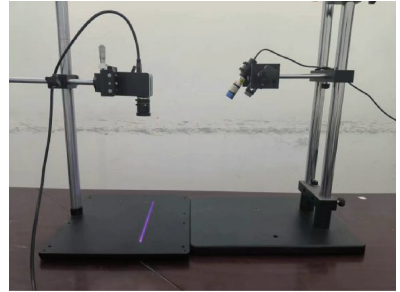
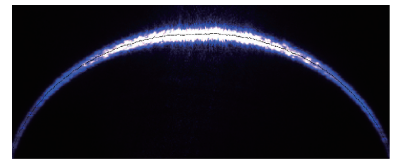
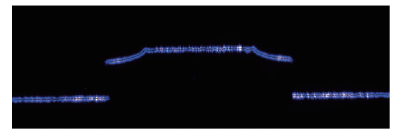


图7 线结构光图像采集平台

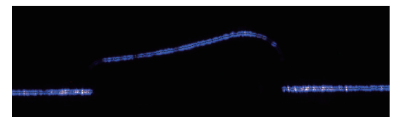
运行所提算法分别对不同类型的激光条纹图像进行提取,提取效果如图8所示。



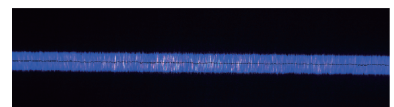
(a) 弧形条纹提取效果图



(b) 间断条纹提取效果图



(c) 欠曝光条纹提取效果图



(d) 亮度不均匀条纹提取效果图

图8 条纹提取效果图

可见,所提算法具有较强的稳定性,针对不同形状、光条亮度不均匀、不连续的光条图像都能实现较为准确的中心线提取。

为进一步衡量所提算法的提取精度和提取速度,采用所提算法分别与灰度重心法、内部推进算法、Steger 法进行分析对比。其中,灰度重心法减小了光条灰度不均带来的误差,运算速度较快。但易受噪声影响,鲁棒性较差;内部推进法避免了对背景像素的访问,且采用阈值形心法快速定位光条中心,加快了算法的提取速度。但易受噪声影响,提取精度较差;Steger 法精度较高,稳健性好。缺点为运算量巨大,无法达到实时效果,同时对激光图像质量要求较高,高斯核选取不当会导致图像信息失真。

首先对各算法的提取精度进行量化分析。由于在实际测量过程中,激光中心线理论位置无法确定,对于激光条纹中心提取算法的准确性分析通常采用标准差 σ 分析误差^[20]。设 Y_i 为算法提取获得的像素纵坐标, \bar{Y} 为均值, n 为中心点个数,则 σ 可表示为:

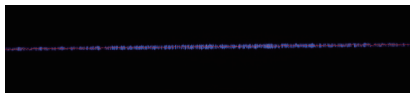
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (8)$$

本文采取对已知为直线的激光条纹进行中心线提取。基于提取获得的全部激光中心点,采用最小二乘拟合法进行直线拟合,获得直线方程。通过分析各中心点坐标与直线方程之间的标准差大小对算法提取精度做出评价。

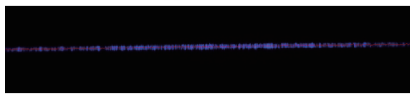
各算法对图像质量较差的欠曝光图像提取效果如图 9、10 所示。其中,图 9 为光条亮度分布不均匀图像;图 10(a)~(d)分别为本文算法、灰度重心法、内部推进算法、Steger 算法的提取效果图。



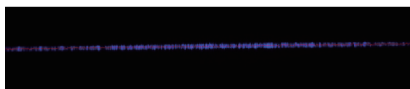
图 9 欠曝光条纹图像



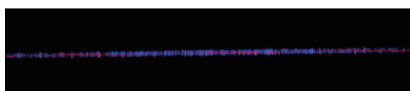
(a) 本文算法



(b) 灰度重心法



(c) 内部推进算法



(d) Steger 算法

图 10 不同算法提取效果对比

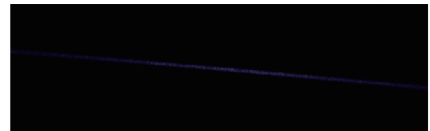
各算法中心点坐标与直线方程之间的标准差 σ 如表 1 所示。

表 1 图像质量较差图像提取效果像素标准差分析

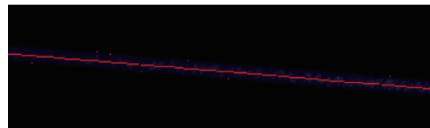
图像	pixel			
	本文算法	灰度重心法	内部推进算法	Steger 算法
图 10	0.410	0.584	0.739	9.342

由表 1 可知,本文算法提取效果最优,相较于灰度重心法和内部推进算法提取精度分别提升 29%、45%;灰度重心法和内部推进算法提取效果虽弱于本文算法,但仍能较稳定得提取激光中心线;Steger 算法则对于图像质量较差的图像提取效果不佳。

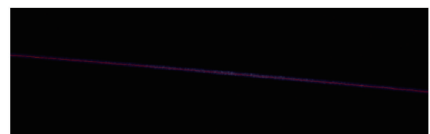
由于传统的 Steger 法对于光条质量要求较高,对于欠曝光条纹图像提取效果欠佳。经分析,其提取产生的少量野值误差点会极大的影响 Steger 法的提取精度。故针对 Steger 法做出改进,采用拉依达准则进行野值点的剔除,如图 11 所示。图 11(a)为激光条纹原始图像,图 11(b)为传统的 Steger 法提取图像的局部效果图,其中存在个别野值点。图 11(c)为 Steger 改进算法提取图像的局部效果图, 3σ 准则对野值点进行了精准剔除。计算获得传统的 Steger 法提取像素标准差为 1.046pixel;Steger 改进算法提取像素标准差为 0.628pixel,提取误差降低了 40%。可见,基于 3σ 准则的野值剔除方法极大的改善了 Steger 法针对欠曝光条纹图像的提取精度。



(a) 原始激光条纹图像



(b) Steger 传统算法提取效果



(c) Steger 改进算法提取效果

图 11 拉依达准则方法野值点剔除效果

为验证本文算法对不同亮度条纹图像的提取效果,针对 10 幅亮度逐渐增大的激光直线条纹图像分别采用本文所提算法、灰度重心法、Steger 改进算法和内部推进算法进行中心线提取,为更好的衡量所提算法对比效果,所有算法均采用 3σ 准则进行异常中心点剔除。记录各幅图的标准差大小,如表 2 所示。

表2 各算法提取像素标准差分析

图像	pixel			
	本文算法	灰度重心法	内部推进算法	Steger算法
1	0.578	0.662	0.783	0.628
2	0.407	0.489	0.588	0.435
3	0.560	0.632	0.741	0.620
4	0.450	0.499	0.562	0.502
5	0.655	0.723	0.818	0.712
6	0.360	0.407	0.502	0.419
7	0.513	0.574	0.679	0.567
8	0.479	0.530	0.613	0.529
9	0.418	0.462	0.555	0.485
10	0.503	0.547	0.646	0.558
平均精度	0.492 3	0.552 5	0.648 7	0.545 5

由表2可知:本文算法提取效果稳定,所有激光条纹图像的中心线提取效果均优于其余3种对比算法,提取平均精度为0.492 3 pixel。对比算法中提取精度最优的为Steger改进算法,其提取平均精度为0.545 5 pixel。本文算法相较于Steger改进算法提取精度提升9.8%。

为验证本文算法对不同拍摄角度条纹图像的提取效果,对同一条激光条纹进行不同角度拍摄,直线条纹斜率分别为 $k=0$ 、 $k>0$ 、 $k<0$ 的激光条纹图像,如图12所示。

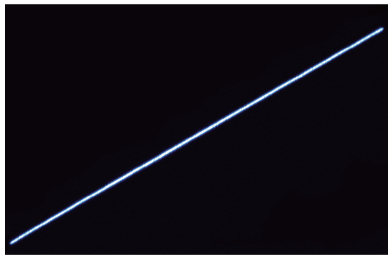
(a) 斜率 $k=0$ 激光条纹图像(b) 斜率 $k>0$ 激光条纹图像(c) 斜率 $k<0$ 激光条纹图像

图12 不同拍摄角度的激光条纹图像

记录各算法针对图12(a)~(c)进行光条中心提取的标准差大小,如表3所示。

表3 不同角度条纹图像提取像素标准差分析

图像	pixel			
	本文算法	灰度重心法	内部推进算法	Steger算法
$k=0$	0.442	0.579	0.732	0.514
$k=0.5$	0.465	0.613	0.755	0.503
$k=-0.5$	0.454	0.607	0.786	0.487

由表3可知,针对不同拍摄角度的激光条纹图像,本文算法提取精度差别很小,且均优于另外3种对比算法。

对各算法的提取速度进行量化分析。分别用所提算法、灰度重心法、Steger改进算法、内部推进算法针对image_1提取激光条纹中心线,重复10次。逐次记录每个算法的提取时间,并计算其均值,如表4所示。

表4 激光中心线提取时间

图像	s			
	本文算法	灰度重心法	内部推进算法	Steger算法
1	0.077	0.088	0.075	0.375
2	0.076	0.068	0.069	0.350
3	0.081	0.086	0.065	0.381
4	0.072	0.082	0.074	0.368
5	0.068	0.082	0.065	0.352
6	0.075	0.072	0.072	0.356
7	0.082	0.075	0.070	0.352
8	0.070	0.070	0.071	0.344
9	0.082	0.083	0.063	0.356
10	0.069	0.080	0.062	0.347
平均时间	0.075 2	0.078 6	0.068 6	0.358 1

由表4可知,本文算法平均提取速度为0.075 2 s,仅略低于内部推进算法6 ms,明显高于提取精度最优的Steger改进算法。如图13所示,为基于各算法的提取精度和提取速度数据对比图。

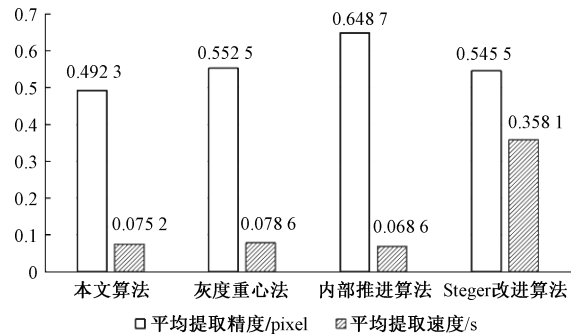


图13 提取精度对比 & 提取速度对比图

由图 13 可知,本文算法提取精度为 0.492 3 pixel,提取速度为 0.075 2 s。相较于对比算法中精度最高的 Steger 改进算法提取精度提升了 9.8%,处理速度提升了近 5 倍;相较于对比算法中处理速度最快的内部推进算法,本文算法在保证提取速度的基础上,提取精度提升了 24.1%。同时,本文算法针对 3 列光条区域进行空间灰度重心的提取,将激光图像的像素点利用率提高了 3 倍,极大的提升了算法处理复杂图像和欠曝光光条图像的稳定性,降低了算法对图像质量的要求。

3 结 论

本文提出了一种基于空间灰度重心推进的激光中心线提取方法,并针对所提算法的处理步骤进行了原理介绍。此算法按列选取二值化阈值解决了全局阈值带来的光条不连续的问题;基于上一列提取得到的空间重心坐标结合线结构光骨架走势推进,避免了对图像背景像素点的访问,提升了算法的运行速度;采用空间灰度重心法对存储的三列光条区域进行中心坐标的提取,实现了光条区域像素的重复利用,提高了算法的提取精度,同时增强了算法的稳定性;采用 3σ 准则进行野值剔除,避免了光条区域选取缺失带来的误差。通过实验验证,所提算法具有提取速度快、提取效果稳定、精度高等优点,并极大的增强了算法对欠曝光图像的处理能力。实验结果表明,对于成像质量较差的图像,所提算法提取精度相对于灰度重心法和内部推进算法分别提升了 29%、45%;对于成像质量较好的图像,相较于对比算法中提取精度最优的 Steger 改进算法,所提算法提取精度提升了 9.8%,提取速度提高了近 5 倍。相较于对比算法中提取速度最快的内部推进算法,本文算法在保证其提取速度的基础上,提取精度提升了 24.1%。所提算法具有速度快、精度高、提取效果稳定等优点,同时降低了对成像质量的要求,适用于工业的在线检测领域。

参考文献

- [1] MOLLEDA J. Uncertainty propagation analysis in 3D shape measurement using laser range finding[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2012, 61(5): 1160-1172.
- [2] 王胜春,韩强,王昊,等. 行车环境下钢轨轮廓激光条纹中心的提取方法[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 175-184.
- [3] 张宇,黄丹平,田颖,等. 复杂物体线结构光中心线提取方法研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(1): 167-172.
- [4] LI Y H, ZHOU J B, LIU L J. Research progress of the line structured light measurement technique [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(2): 115-124.

- [5] 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.
- [6] 周渊,孟祥群,江登表,等. 复杂干扰情况下的结构光条纹中心提取方法[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 172-180.
- [7] 韩洁,刘亚文. 线结构光光条中心提取的变阈值分割算法[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(3): 20-23.
- [8] 甘宏,张超,李林,等. 复杂背景下激光条纹中心亚像素提取方法[J]. 光电工程, 2019, 46(2): 85-92.
- [9] 潘硕,邵新杰,李晓磊,等. 基于块匹配的激光条纹亚像素中心提取[J]. 激光与红外, 2021, 51(6): 814-819.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 李凤娇,李小菁,刘震. 基于多尺度分析的激光光条中心点坐标提取方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 111-116.
- [14] 梅峻华,赖磊捷. 结构光测量系统光条中心提取算法研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(21): 8-13.
- [15] 李涛涛,杨峰,李石庚,等. 基于高斯-洛伦兹分峰拟合的线结构光条中心的提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 175-184.
- [16] 张伟康,甄国涌,单彦虎,等. 激光条纹亚像素中心精确提取方法[J]. 激光杂志, 2023, 44(3): 75-80.
- [17] XU G, SUN L, LI X, et al. Adaptable center detection of a laser line with a normalization approach using hessian-matrix eigenvalues [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2014, 18(4): 317-329.
- [18] 杨雪荣. CMM 与线结构光视觉传感器集成的逆向工程系统关键技术研究[D]. 广东: 广东工业大学, 2013: 54.
- [19] 李思寒. 基于机器视觉三维成像与卷积神经网络的目标识别研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021: 14.
- [20] 孙晓明. 基于结构光的公路路面裂缝检测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 31.

作者简介

卜民众, 硕士研究生, 主要研究方向为非接触式三维重建与精密测量。

E-mail: 748053403@qq.com

吴国新, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为仪器仪表与精密测量。

E-mail: wgx1977@bistu.edu.cn