

线激光光条中心快速提取算法

李伟明, 彭国, 高兴宇*, 丁畅

桂林电子科技大学机电工程学院广西制造系统与先进制造技术重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 提出一种新的快速激光条纹中心提取算法, 该算法具有较好的抗噪声或冗余点能力。该算法在传统重心算法的基础上结合轮廓跟踪算法, 根据激光条纹在图像中的分布特点, 通过阈值轮廓跟踪算法避免了对图像中不包含激光条纹区域的扫描, 以此提高了提取速度, 不用对整幅图像完成一次扫描即可计算出激光光条中心。所提算法具有复杂度低、计算简单、程序运行时间少等优点。实验结果表明: 该算法能够实现对光条中心的快速提取, 比 Steger 算法提速将近 70.37 倍, 比传统重心算法提速将近 4.48 倍; 对光条图像增加噪声(冗余)点后发现, 所提算法具有优良的抗噪效果。

关键词 测量; 结构光测量; 中心提取; 轮廓跟踪

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0304002

Fast Extraction Algorithm for Line Laser Strip Centers

Li Weiming, Peng Guo, Gao Xingyu*, Ding Chang

Guangxi Key Laboratory of Manufacturing Systems and Advanced Manufacturing Technology, School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract In this paper, a new and fast extraction algorithm for a laser strip center with the ability to effectively resist noise or redundant points is presented. The proposed method combines the traditional barycenter algorithm and the contour tracking algorithm. Based on the distribution characteristics of laser strip in the image, the threshold contour tracking algorithm is used to avoid scanning the area that does not contain a laser fringe in the image, thereby improving the extraction speed. Therefore, the center of the laser strip can be extracted without scanning the whole image. The proposed algorithm provides advantages such as low complexity, simple calculation, and less running time. Experimental results show that the proposed algorithm can achieve fast extraction of the laser strip center. Furthermore, it is nearly 70.37 times faster than the Steger algorithm and 4.48 times faster than the traditional barycenter algorithm. Moreover, the proposed algorithm achieves excellent anti-noise effect subsequent to adding noise (redundancy) points to the light bar image.

Key words measurement; structured light measurement; central extraction; contour tracking

OCIS codes 120.6650; 100.6890; 100.3008

1 引言

线结构光扫描技术是一种基于光学三角法的非接触式测量技术, 被广泛应用于三维测量、三维图像重构、质量检测、焊缝跟踪等领域。该技术将线激光器发射的条形激光束投射到被测物体表面, 匀速扫描物体表面, 用相机拍摄物体表面的激光条纹图像, 并通过图像处理计算激光条纹的二维中心坐标; 再根据相机和激光发射器间的位置关系, 用三角法^[1]

获取被测物体特征点在世界坐标系中的三维坐标^[2]。在应用中, 激光器发射出有一定宽度的线结构光, 线状光束图像有一定的像素宽度, 准确提取线结构光图像的中心线是实现高精度测量的关键^[3], 因此需要寻找快速精确且鲁棒性好的中心提取算法。传统的线结构光中心提取技术主要有几何法^[4]、Steger 法^[5]、骨架细化法^[6]、灰度重心法^[7]、极值法^[8]等^[9]。研究者也提出了许多不同的改进算法。蔡怀宇等^[10]提出利用 ROI (Region of

收稿日期: 2019-07-29; 修回日期: 2019-09-01; 录用日期: 2019-10-14

基金项目: 广西创新驱动发展专项(桂科 AA18118002-3)、广西自然科学基金(2018JJ A170110)

* E-mail: gxy1981@guet.edu.cn

Interest)区域和两次高斯卷积的方法对 Steger 算法进行改进提速,虽然他们注意到了对非光条区域作卷积会大大降低计算速度,但创建 ROI 区域的过程依然无法避免对非光条区域的计算。王胜春等^[11]提出利用深度学习对光条进行分割,再利用模板重心法计算光条中心,使算法复杂度增加。刘巍等^[12]将高分辨率图像压缩为低分辨率图像,通过二次拟合求解低分辨率图像中激光光条中心的法线斜率,然后将低分辨率图像中求得的法线斜率还原到高分辨率激光光条图像中,进而利用灰度重心判断准则快速计算激光光条的亚像素中心。陈云赛等^[13]提出一种多阈值算法,采用不同的阈值可以有效地滤除背景噪声,采用基于极值法的高斯拟合法则可对部分激光条纹进行拟合,结合多阈值算法和基于极值法的高斯拟合法提出了一种条纹中心提取算法。此外,在市场上,随着 FPGA (Field-Programmable Gate Array)技术的发展,现在许多知名的线结构光测量传感器制造商如 AT、KEYENCE、LMI 等都采用 FPGA 硬件来提高光条中心的提取速度,但采用 FPGA 硬件加速成本较高。

虽然研究者们提出了许多不同的算法,但是这些算法的复杂度高,且未考虑光条图像的特点,对没有光条的图像区域冗余扫描,导致算法速度慢。本文研究了光条图像灰度分布规律,光条在图像中的布局存在规律。通过选取合适的像素值阈值,结合分段轮廓跟踪算法,有效地避免对图像非光条区域的扫描以提高算法的速度,再利用重心法求取光条中心。为了有效地验证本文算法,选择质量好、光质均匀稳健的线激光光条为研究对象。

2 快速重心算法

快速重心算法原理如下:规划搜索光条像素的路径,采用 8 邻域轮廓跟踪算法沿光条上边缘访问光条像素,并采用重心法实现光条中心的快速计算。在计算过程中对单个像素的噪声点或冗余点进行剔除,以实现抗噪性。

2.1 光条图像的特点

高斯函数曲线如图 1 所示。通过观测采集的图像发现:当线激光以合适的高度和亮度照射在被测物体表面时,线激光光束在物体表面会形成连续或者非连续的光条线段;光条线段在图像中分布在某条线的单侧或两侧,形成的线段会因扫描物体的形状、高低不同而不同,即使是非连续的线段,这些光条也不会互相遮挡,如图 2 所示;光条线段会弯曲但

不会分叉,且光条横截面的像素值分布呈似高斯分布^[14],如图 3 所示。这些特点是本文算法实现的关键。

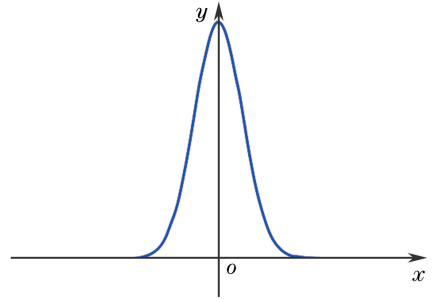


图 1 高斯曲线图

Fig. 1 Gauss curve



图 2 线结构光光条

Fig. 2 Line structured light strip

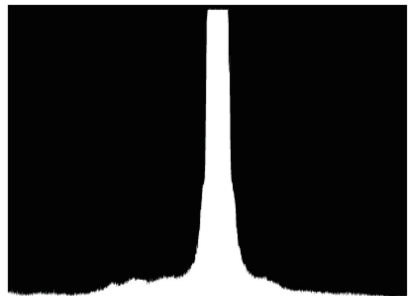


图 3 似高斯分布的线结构光光条截面

Fig. 3 Cross section of line structured light strip with Gaussian like distribution

通过图 3 不难发现,以某列为横截面,光条图像的横截面像素呈似高斯分布,光条位于分布图中的波峰部分,波峰部分存在饱和区域,饱和峰值区域附近的像素平滑下降,光条像素的这些分布特点为选择适当的像素阈值及沿光条上边缘进行轮廓跟踪提供了可行性。

2.2 重心法原理

灰度重心法^[15-16]中将光条纹截面的灰度值分布中的质心作为光条纹的中心。在线激光条纹的灰度分布图中,假设某行(列)所有大于阈值 K 的像素的列(行)坐标为 $U_i (i = 0, 1, 2, \dots)$,其相应的灰度值

为 $g_i (i=0,1,2,\dots)$ 。对图像每一行(列)的像素进行扫描,找出每一行(列)中满足阈值 K 的像素,则图像某行(列)光心的位置可表示为

$$U = \frac{\sum_{i=0}^m (g_i \times U_i)}{\sum_{i=0}^m g_i} \quad (1)$$

传统重心算法简单易于实现,同时光条中心的提取精度也能达到亚像素级别。但是该算法在计算图像中的光条中心时需要访问所有像素点,这带来了大量的不必要的冗余计算,而且这种方法在计算过程中也容易受到噪声的影响。

2.3 轮廓跟踪原理

链码是指给定方向的单位长度的线段(在这里单位长度就是单个像素),用来表示轮廓或者边界,链码的建立是按逆时针或顺时针方向进行边界(轮廓)跟踪提取的过程^[17]。顺时针方向的边界跟踪示意图如图 4 所示。

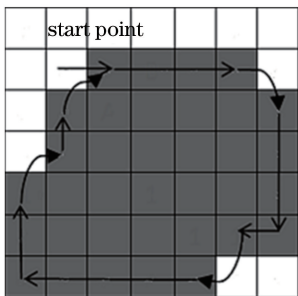


图 4 边界跟踪示意图

Fig. 4 Schematic of boundary tracking

若当前点 (x, y) 为一个边界点,如果相邻的位置还存在边界点,则下一个边界点必定在当前点 (x, y) 的 8 邻域内,该邻域内 8 像素位置的链码表示和坐标表示如图 5 所示。图 5(a) 为像素位置的链码表示,链码值 D_{ir} 为 0~7,按顺时针旋转递增;图 5(b) 为链码的坐标表示。轮廓跟踪算法的具体流程如下:

1) 从图像左上角开始,自上而下自左而右,开始搜索起始点 P_0 ,发现边界的起始点 P_0 后,将该起始点作为当前点,从其链码值 $D_{ir_start} = 7$ 的方向开始顺时针搜索下一个边界点。从起始点开始,将每一个搜索到的边界点 P_j 作为搜寻下一个新边界点 P_{j+1} 的当前点,并记录每一个边界点的链码值 D_{ir} 。

2) 当搜索到的当前边界点 P_j 的链码值 D_{ir} 为偶数时,按顺时针搜索下一个边界点的起始方向为当前边界点链码值逆时针旋转 45° (即链码值减 1) 对应的方向,即 $D_{ir_start} = D_{ir} - 1$ 。

3) 当搜索到的当前边界点 P_j 的链码值 D_{ir} 为

奇数时,按顺时针搜索下一个边界点的起始方向为当前边界点链码值逆时针旋转 90° (即链码值减 2) 对应的方向,即 $D_{ir_start} = D_{ir} - 2$ 。

4) 如果相减后起始链码值 D_{ir_start} 为负则加 8,即 $D_{ir_start} = D_{ir_start} + 8$;如果按顺时针旋转累加搜索时,链码值 D_{ir} 大于 7 则减 8,即 $D_{ir} = D_{ir} - 8$ 。这样可以保证链码值始终在 0~7 之间,搜索到的第一个满足阈值的像素即为新的边界点 P_{j+1} 。

5) 重复以上步骤,直到轮廓跟踪到满足停止条件的像素点,则停止轮廓跟踪。

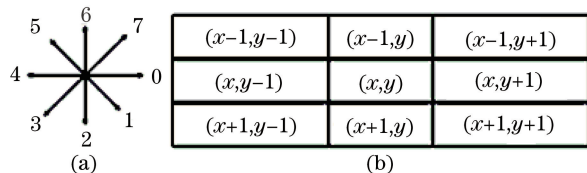


图 5 边界点领域内的像素位置。(a) 链码表示;(b) 坐标表示
Fig. 5 Pixel positions domain of boundary point. (a) Chain code representation; (b) coordinate representation

按顺时针方向旋转搜索时边界的链码表示如图 6 所示,实心直箭头为当前点的链码方向,虚线箭头为自当前点搜索下一个边界点时的链码起始方向。

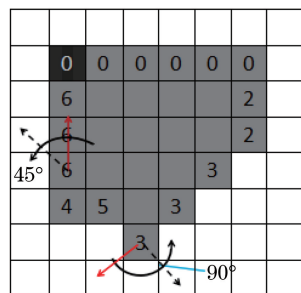


图 6 边界的链码表示

Fig. 6 Chain code representation of the boundary

2.4 激光条纹的快速访问

实际上,在许多的线结构光测量中,图像背景对光条提取的干扰并不强烈,且激光光条是图像中最亮的部分,因此通过设定一定的阈值即可找到激光光条的位置。阈值的选择需要根据图像内像素值的情况来定,类似于图像处理中的另一个算法——灰度图像二值化算法。阈值的选择不唯一,需要根据图片背景以及需要提取的目标像素值凭经验设置阈值,一般来说要大于背景最大值,靠近或等于光条最大饱和峰值。经过大量实验观测,本文实验所用线激光器所投射的激光光条在实验相机所拍摄的图像内的最大饱和峰值为 251,因此选择比最大饱和值稍小一些的 210 作为阈值。

2.1 节已经提到,激光条纹分布具有它特定的

特点,即激光条纹分布在激光平面与背景交线的两侧,为连续或非连续分布,且不存在重叠或分叉。因此,采用重心法对激光光条进行搜索访问时,可以根据这些特点优化搜索策略,避免对不含光条的图像区域的搜索。图 7 为假设的激光光条图,图 8 为该算法的搜索策略图,箭头位置表示扫描走过的路径,其他区域为需避免访问的不含光条的图像区域。

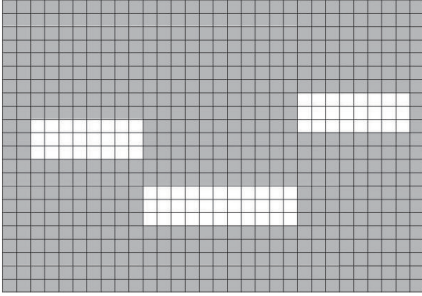


图 7 假设的激光光条图
Fig. 7 Hypothetical laser stripe

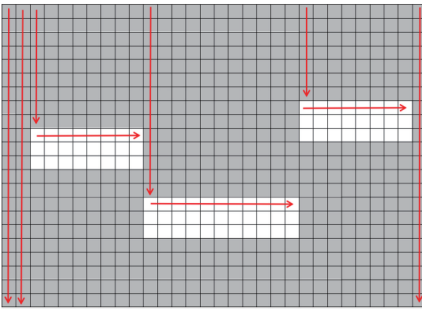


图 8 本文算法的搜索策略图
Fig. 8 Search strategy of the proposed algorithm

本文算法的详细搜索流程如下:

1) 从图像左上角开始,自上而下、自左向右地扫描图像。

2) 当遇到大于等于阈值的像素时停止扫描,并自该点像素开始进行顺时针八邻域搜索,如果 8 个方向皆为空,即未发现新的满足阈值的边界点,则判定该像素为噪声点,不保存。然后继续自该噪声点起,自上而下、自左到右地扫描寻找新的满足阈值的像素,如果发现新的满足大于等于阈值的点则返回步骤 2) 的起始步骤进行判断,如果没有发现新的满足大于等于阈值的像素,则继续扫描直到图像扫描结束。

3) 对满足阈值的点进行八邻域搜索,如果搜索不为空,则记该点为轮廓跟踪起始点,自该起始点向下搜索该列满足大于等于阈值的像素,直到遇到不满足阈值的像素时停止向下搜索,记录该列所有满足阈值的像素值、坐标及像素个数 t ,利用重心法计

算该列的重心坐标,并保存该重心坐标。

4) 自该起始点沿光条上边缘进行轮廓跟踪(轮廓跟踪规则见 2.3 节),对每一个新发现的轮廓边界像素自该点向下搜索该列满足大于等于阈值的像素,直到遇到不满足阈值的像素时停止向下搜索(即到达光条下轮廓边界点),记录该列所有满足阈值的像素值、坐标及像素个数 t ,并运用重心公式计算和保存每一列像素的重心坐标(即边轮廓跟踪边计算每一列重心);同时对新搜索到的边界点与当前边界点进行比较,如果列坐标相同则不向下搜索,以避免重复计算该列重心;继续进行轮廓跟踪,重复以上步骤,直到搜索到上轮廓边界的末尾点,即该像素点的右方、右下方、下方均为空,则停止该条轮廓跟踪,记录当前列数 n 。

5) 自 $n+1$ 列,从第 0 行开始,自上而下、自左向右地扫描图像,转至步骤 2) 寻找新的轮廓跟踪起始点。

3 实验结果

根据以上算法展开实验,实验时:以中心波长为 650 nm、功率为 100 mW、线宽为 0.1 mm 的红色线激光为光源;以陕西维视 5×10^6 pixel 的 CMOS 工业相机为采图相机,图像大小为 2592 pixel \times 1944 pixel;软件环境为 Win7 系统,visual studio2013 在 Win32Debug 模式下用 OpenCV3.0 进行编程以提取光条中心。采用上述相机采集的 5 张不同的光条图片,5 张图片分别编号为 1、2、3、4、5,然后采用本文算法、Steger 算法、传统重心算法对 5 张图片展开实验,在这里为了便于画线显示对亚像素级的坐标数值进行了取整处理。以 1 号图像为例,图 9 为本文算法提取的光条中心,图 10 为 Steger 算法提取的光条中心,图 11 为传统重心算法提取的光条中心。



图 9 本文算法提取的光条中心
Fig. 9 Stripe centers extracted by the proposed algorithm

进一步对图 9~11 作精度分析。关于精度分析,孙晓明博士曾在其博士论文^[18]中指出,对于光条中心提取精度的分析并没有统一而明确的方法。同时,由于光条中心真值无法测得,因此真差 δ 未知,这导致不能直接测得光条中心的标准误差 σ 。

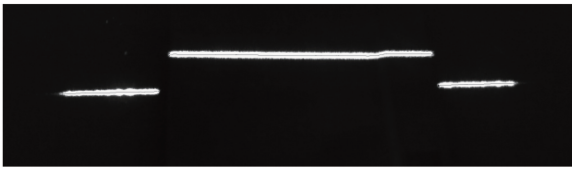


图 10 Steger 算法提取的光条中心

Fig. 10 Stripe centers extracted by Steger algorithm



图 11 传统重心算法提取的光条中心

Fig. 11 Stripe centers extracted by traditional barycenter algorithm

因此实际测量中,当真值未知时,常用残差 $v_i = x_i - \bar{x}$ 代替真差 ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), 并利用 Bessel 公式求得 σ 的值^[19-21]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{(n-1)}} \quad (2)$$

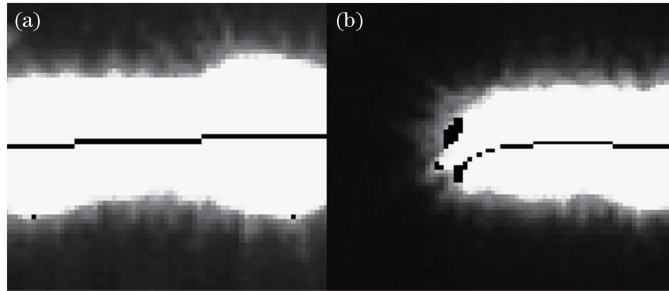


图 12 Steger 算法提取的光条中心外点放大图。(a)光条中部外点区域;(b)光条末端外点区域

Fig. 12 Enlarged image of the point outside the stripe center extracted by Steger algorithm.

(a) Outer points of the laser strip central region; (b) outer points of the laser strip end region

表 2 各算法的平均运行时间

Table 2 Average running time of each algorithm s

Picture number	Traditional barycenter algorithm	Steger algorithm	Proposed algorithm
1	0.552317	8.405580	0.161122
2	0.530983	8.322510	0.126929
3	0.531634	8.349070	0.127565
4	0.518670	6.118450	0.096054
5	0.536748	10.687900	0.101935

通过实验数据对比发现,本文算法比以上两种算法都快,平均比传统重心算法约提速 4.48 倍,平均比 Steger 方法约提速 70.37 倍,可见本文算法在计算速度上提高显著。不难理解本文算法的快速

表 1 为利用三种算法计算得到的光条中心坐标误差值。

表 1 各算法的标准误差

Table 1 Standard error of each algorithm

Method	Traditional barycenter algorithm	Steger algorithm	Proposed algorithm
(σ_x, σ_y)	(594.1700, 83.2706)	(595.0080, 83.3052)	(594.0390, 83.2567)

由表 1 可知:本文算法的标准误差最小,Steger 算法提取光条中心的标准误差比其他两种算法都大;传统重心算法的标准误差比本文算法大,但两者相差甚小。实际上,放大观察时会发现 Steger 算法所提取的光条中心存在大量的光条外点,而在本文算法和传统重心算法提取的光条中心则没有发现外点,该问题其他研究者也早已发现,后期需要通过一些拟合算法来消除外点^[22]。图 12 为图 10 两处外点区域的局部放大图。

为验证本文算法的快速性,分别运用三种算法对本文的 5 张图片进行中心提取,共进行 10 次,平均运行时间如表 2 所示。

性;经典 Steger 方法首先对图像进行高斯滤波,再求图像的一、二阶导数,同时又涉及 Hessian 矩阵的计算,算法复杂度相当大;传统重心算法是对图像全局进行扫描,对没有光条的图像区域进行了没必要的访问,降低了算法的速度;而本文算法通过轮廓跟踪算法规划搜索路径,极大地避免了对不含光条图像区域的访问,因此算法速度提升显著。

为了验证本文算法的抗噪性,分别在上述 5 张图片中全局随机添加 5000 个亮度为 255 的单像素噪声点。抗噪效果以 3 号图片为例进行展示,图 13 为原图,图 14 为添加噪声后的图,图 15 为从原图提取的光条中心图,图 16 为从噪声图中提取的光条中心图。

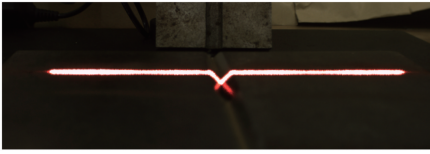


图 13 原图
Fig. 13 Original image



图 14 噪声图
Fig. 14 Noise image



图 15 原图提取的光条中心
Fig. 15 Stripe center extracted from the original image

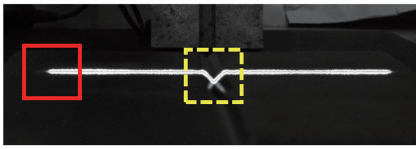


图 16 噪声图提取的光条中心
Fig. 16 Stripe center extracted from the noise image

对从原图和噪声图中提取的光条中心结果进行局部放大显示,如图 17~20 所示。

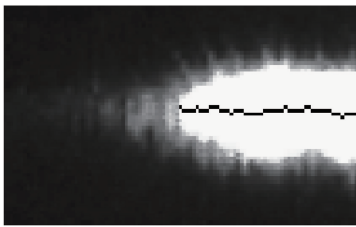


图 17 图 15 实线框放大图
Fig. 17 Enlarged view of solid frame in Fig. 15

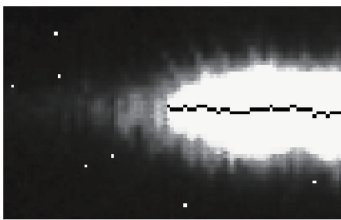


图 18 图 16 实线框放大图
Fig. 18 Enlarged view of solid frame in Fig. 16

通过对比图 17~20 发现,增加噪声点前后,从图像中提取的光条中心结果相差无几,极其相似,即

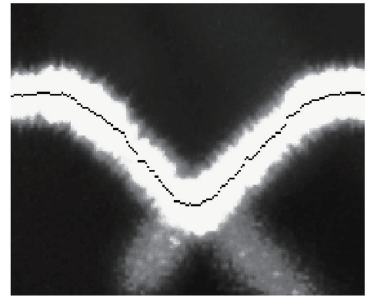


图 19 图 15 虚线框放大图
Fig. 19 Enlarged view of dotted box in Fig. 15

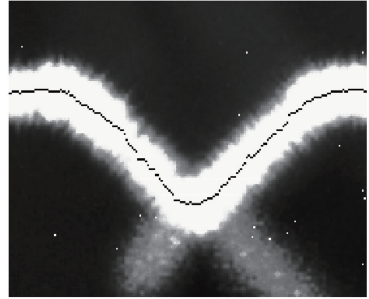


图 20 图 16 虚线框放大图
Fig. 20 Enlarged view of dotted box in Fig. 16

噪声未对提取结果造成明显影响。但为了进一步验证,对添加噪声前后的光条中心坐标进行对比,设 σ_1 为原图光条中心标准误差, σ_2 为噪声图光条中心标准误差, Δ 为绝对标准误差, e 为相对标准误差,则有:

$$e = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\Delta}{\sigma_1} \quad (3)$$

噪声图像的光条中心相对标准误差分析如表 3 所示。

表 3 相对标准误差分析

Table 3 Relative standard error analysis results

Figure number	Number of original image center points	Number of noise image center points	(e_x, e_y)
1	1995	1996	$(7.98 \times 10^{-4}, -0.24 \times 10^{-4})$
2	2143	2144	$(7.30 \times 10^{-4}, 1.36 \times 10^{-4})$
3	2137	2138	$(5.85 \times 10^{-4}, 3.75 \times 10^{-2})$
4	2259	2260	$(5.16 \times 10^{-4}, 5.16 \times 10^{-2})$
5	2286	2287	$(5.11 \times 10^{-4}, 14.37 \times 10^{-4})$

通过对比表 3 中的数据可知, x 坐标的最大相对误差为 7.98×10^{-4} , y 坐标的最大相对误差为

5.16×10^{-2} 。两误差的产生主要是由于全局随机添加的噪声点会落在光条上,特别是落在光条边界上,这些点改变了原有光条数据结构,形成了光条内点,引起计算结果的轻微波动,而落在光条外部的噪声点被完全排除,没有产生影响。在像素级单位坐标下,这些微小数量级的误差完全可以接受,噪声没有对光条中心计算产生实质性不利影响;另一方面,事实上添加如此多的噪声相当于极端情况,以现在工业相机的技术水平,图像内出现大量噪声的情况几乎不会存在,这样的模拟误差可以接受。综上实验分析,本文算法具有一定的抗噪声的能力。

4 结 论

本文提出一种线激光光条中心快速提取算法,与传统算法相比,该算法优点为光条中心提取速度快,这对于线结构光在工业在线质量检测、在线测量、焊缝跟踪等要求速度快的领域的应用具有重要意义。本文算法结合了轮廓跟踪的思想和重心算法,特别是采用轮廓跟踪的思想最大限度地避免了对图像内不存在激光光条区域的搜索,从而提高了激光光条中心的计算速度。最终经实验验证:该算法提取速度比 Steger 算法和传统重心算法都快,且具有一定的抗噪性。但当背景复杂、线激光光质不好、光条非均匀稳健时,本算法需要结合更多的算法进行操作,后续将继续深入开展相关方面的研究。

参 考 文 献

- [1] Zhan K F, Chen W J, Li W S, et al. Line laser 3D scene reconstruction system and error analysis [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1204004.
詹坤烽, 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): 1204004.
- [2] Jia Q Q, Wang B X, Luo X Z. Extraction of central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light sectioning method [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 390-396.
贾倩倩, 王伯雄, 罗秀芝. 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 390-396.
- [3] Li C H, Zhang Y J, Han J T, et al. Asymmetric stripe adjustment method for stripe center extraction [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0504005.
李程辉, 张英杰, 韩江涛, 等. 应用于条纹中心提取的非对称条纹调整方法 [J]. 中国激光, 2017, 44

- (5): 0504005.
- [4] Lyvers E P, Mitchell O R, Akey M L, et al. Subpixel measurements using a moment-based edge operator [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(12): 1293-1309.
- [5] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- [6] Huo L. The research on 3D measurement of free form surface based on computer vision technique [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2004: 22-25.
霍龙. 基于视觉的复杂曲面几何形状三维测量技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2004: 22-25.
- [7] Zhou P, Xu K, Wang D D. Rail profile measurement based on line-structured light vision [J]. IEEE Access, 2018, 6: 16423-16431.
- [8] 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.
- [9] Li Y Y, Zhang Z Y, Yuan L. Survey on linear structured light stripe center extraction [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100002.
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): 100002.
- [10] Cai H Y, Feng Z D, Huang Z H. Centerline extraction of structured light stripe based on principal component analysis [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0308006.
蔡怀宇, 冯召东, 黄战华. 基于主成分分析的结构光光条纹中心提取方法 [J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308006.
- [11] Wang S C, Han Q, Wang H, et al. Laser stripe center extraction method of rail profile in train-running environment [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0212004.
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): 0212004.
- [12] Liu W, Zhang Y, Gao P, et al. Sub-pixel center extraction method of laser stripe center based on hierarchical processing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(10): 1017010.
刘巍, 张洋, 高鹏, 等. 结合分层处理的激光光条亚像素中心提取方法 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1017010.
- [13] Chen Y S, Yang L, Gong Y, et al. Underwater target scanning and location method based on line

- structured light[J]. Robot, 2018, 40(6): 786-793, 802.
- 陈云赛, 杨磊, 宫垠, 等. 基于线结构光的水下目标扫描定位方法[J]. 机器人, 2018, 40(6): 786-793, 802.
- [14] Usamentiaga R, Molleda J, García D F. Fast and robust laser stripe extraction for 3D reconstruction in industrial environments [J]. Machine Vision and Applications, 2012, 23(1): 179-196.
- [15] Yang S M, Cho M H, Lee H Y, et al. Weld line detection and process control for welding automation [J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(3): 819-826.
- [16] He L Y, Wu S S, Wu C. Robust laser stripe extraction for three-dimensional reconstruction based on a cross-structured light sensor [J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 823-832.
- [17] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image processing, analysis, and machine vision [M]. 4th ed. USA: Cengage Learning, 2015: 333-370.
- [18] Sun X M. Research on key technologies of pavement crack inspection based on structure light [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 31.
- 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.
- [19] Qian Z, Wang Z Y, Liu G L. Test error analysis and data processing [M]. Beijing: Beihang University Press, 2008: 19.
- 钱政, 王中宇, 刘桂礼. 测试误差分析与数据处理 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 19.
- [20] Li F J, Li X J, Liu Z. A multi-scale analysis based method for extracting coordinates of laser light stripe centers [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1110002.
- 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): 1110002.
- [21] Xu J Z. Research on methods and evaluation of stripe center extraction in structured light 3D measurement [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012: 60-62.
- 徐静珠. 结构光三维测量中光条中心提取方法及其评价的研究[D]. 南京: 南京大学, 2012: 60-62.
- [22] Liu N, Lu R S, Xia R X, et al. A novel algorithm for computing the plane of line structured light in 3D vision measurement [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(2): 179-184.
- 刘宁, 卢荣胜, 夏瑞雪, 等. 一种用于计算三维视觉测量中线结构光平面的新型算法[J]. 光子学报, 2012, 41(2): 179-184.