

文章编号:1002-2082(2016)02-0321-06

高噪声背景下激光条纹亚像素中心的提取

王利,陈念年,巫玲,张琪,康宇

(西南科技大学 计算机科学与技术学院,四川 绵阳 621010)

摘要:针对线结构光三维形貌测量中大量噪声易干扰激光条纹中心提取准确度的问题,提出了一种条纹亚像素中心提取方法。分析条纹图像中的噪声,采用平均法和中值滤波预处理图像;利用迭代阈值分割及形态学方法,获取条纹目标,引入距离变换提取条纹的像素级中心;根据像素级中心、二值信息及光强灰度,结合曲线拟合及重心法精确提取条纹的亚像素中心。仿真分析和实验验证下,相邻行条纹中心列坐标最大偏差值像素小于2,平均偏差像素值约为0.3,与传统方法相比,2项指标值更小。实验结果表明,算法有效利用条纹灰度分布规律,可降低噪声对中心定位精度的影响,更逼近条纹真实中心位置,抗噪能力极强。

关键词:高噪声背景;亚像素中心;距离变换;曲线拟合;重心法

中图分类号:TN202;TP391

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201637.0207004

Extraction of laser stripe sub-pixel center in high-noise background

Wang Li, Chen Niannian, Wu Ling, Zhang Qi, Kang Yu

(Department of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Aiming at the problem that the extraction accuracy of laser stripe center can be easily disturbed by a large amount of noise in line structured light 3D shape measurement, a method for extracting the stripe sub-pixel center was proposed. First, the noise in the stripe image was analyzed and preprocessed by the average method and median filtering. Then, the stripe was obtained by iterative threshold segmentation and morphological method, and the pixel center was extracted by distance transform. Finally, on the basis of the pixel center, binary information and light intensity, the precise sub-pixel center of the stripe was extracted by combining curve fitting with barycenter method. After simulation analysis and experimental verification, the maximum value and average value of column coordinate deviation between adjacent rows of stripe center are about 2 pixels and 0.3 pixels, respectively, smaller than the traditional method. Experimental results show that, the algorithm based on the effective use of the stripe gray distribution, can effectively reduce the influence of noise, approach to the true center of stripe more closely, with extremely strong noise proof ability.

Key words: high noise background; sub-pixel center; distance transform; curve fitting; barycenter

引言

基于三角原理的线结构光三维形貌测量方

法,以其无损、快速、高精度等优点,被广泛运用于逆向工程、虚拟现实等领域。激光线投射至被测

收稿日期:2015-09-28; 修回日期:2015-12-30

基金项目:四川省科技创新苗子工程(2014-028);西南科技大学研究生创新基金(15ycx056)

作者简介:王利(1990—),女,四川广安人,硕士研究生,主要从事机器视觉与高精密测量技术研究工作。

E-mail:441541247@qq.com

物体表面,被表面形貌调制的变形光场经反射由CCD相机捕获,形成激光条纹图像。为了防止条纹过饱和、避免对反射激光线缩束,在物体与CCD相机之间加入接收屏幕^[1-2],如图1所示。通过获取激光条纹图像中条纹的中心线,解调出条纹中的变形,可将二维信息转换为三维表面形貌。然而,在CCD分辨率为4.65 μm/像素、放大倍率为10倍的三维测量系统中,条纹中心线偏移1像素,则真实形貌高度约偏差32.88 μm。因此,条纹中心提取的好坏将直接影响三维形貌测量的精度。

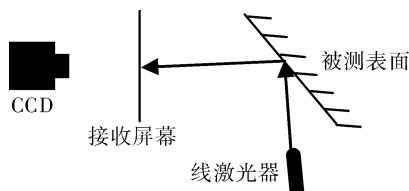


图1 线结构光三维形貌测量原理图

Fig. 1 Measurement principle of line structured light 3D shape

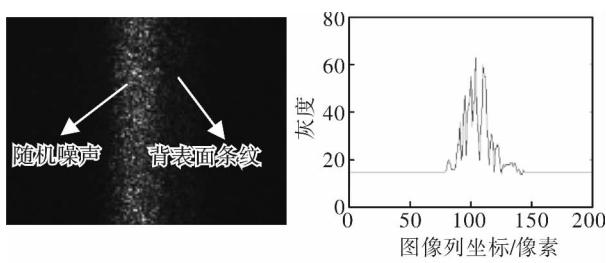
现有的条纹中心提取方法主要分为像素级和亚像素级两大类。像素级中心提取方法^[3-5]中,极值法易受噪声影响;细化法和几何中心法未结合条纹的光强灰度信息。方向模板法运算量较大,该方法提取的条纹中心最少为1像素宽,不能满足测量的精度要求,仅适用于条纹中心位置的粗略估计。

亚像素级中心提取方法^[5-10]中,阈值法^[5]定位精度差;Steger方法^[6]鲁棒性好,但需多次二维高斯卷积,运算量大。曲线拟合法^[7-8]拟合灰度得到曲线峰值,精度虽受局部灰度极值影响,但有效利用了条纹灰度分布规律。重心法^[9-10]求取条纹灰度或梯度重心,可减小条纹灰度分布不对称性引起的误差。然而,实际的条纹图像受环境、测量系统的影响,含有大量噪声(如图2),光强偏离理想的高斯分布,采用效果较好的曲线拟合法或重心法也难以保证条纹中心提取的精度。

针对激光条纹图像中含有大量噪声的问题,对相关算法进行研究,提出了一种高噪声背景下条纹亚像素中心的提取方法。预处理条纹图像去除噪声;在二值图像中引入距离变换,获取条纹像素级中心;利用曲线拟合和重心法,精确提取条纹亚像素中心。

1 激光条纹图像的预处理

理想的激光条纹在其行方向上光强灰度呈对称的高斯分布,但实际上很难达到。外界环境的变化、激光的散射、CCD相机内部的电热噪声、被测表面相邻部分相互反射光的干扰、接收屏幕表面反射率不一致等的影响,导致实际获取的激光条纹图像中含有大量的随机噪声。而激光线经被测物体背表面反射也将在图像中形成条纹,如图2(a)所示。



(a) 局部激光条纹图像

(b) 某行条纹灰度分布

图2 激光条纹图像分析

Fig. 2 Analysis of laser stripe image

噪声密度过大及背表面条纹的存在,使激光条纹的灰度呈不对称的非高斯分布,如图2(b)所示,给条纹中心的精确提取带来了较大的困难。故提取条纹中心之前,需预处理图像,滤除随机噪声和背表面条纹。

1) 在激光线同一位置采集4帧激光条纹图像,对其求平均,消除部分随机噪声。

2) 采用滤波算法滤除接收屏幕表面反射率不一致带来的影响。常用的滤波算法有高斯滤波、中值滤波等,而图像中主要的噪声类似椒盐噪声,中值滤波后的条纹灰度更近似高斯分布,如图3所示。

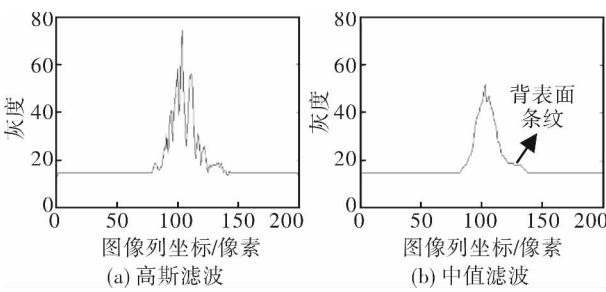


图3 滤波后某行条纹的灰度分布

Fig. 3 Stripe intensity distribution after filtering

3) 图3(b)中滤波后背表面条纹灰度比实际条纹灰度小,可通过设置灰度阈值将其滤除。为提高算法效率,在后续迭代阈值分割获取二值图像时同时将其去除。

2 条纹像素级中心的提取

中心提取算法首先需二值分割激光条纹图像,获取条纹目标,并在二值图像中引入距离变换,提取初步的条纹像素级中心。

2.1 二值分割

由于后续处理将利用条纹的二值信息,故需分割预处理后的条纹图像,获取激光条纹目标区域。分析图像可知,条纹目标与背景较分明,而背表面条纹的灰度介于目标与背景灰度之间,可采用迭代阈值算法分割条纹图像,仅需几次迭代,就可获得最佳分割阈值。然后采用形态学开闭可平滑二值条纹目标的边界、去除孤立点、填充细小空洞等。

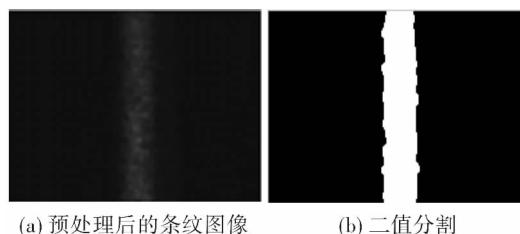


图 4 二值分割结果

Fig. 4 Result of binary segmentation

2.2 距离变换

细化法常被用于条纹像素级中心的提取,通过不断剥离二值条纹的边界像素,获取单像素条纹骨架,较为耗时。本文采用距离变换^[11],仅需 2 次扫描,计算每行最大距离的均值,就可获得条纹像素级中心,如图 5 所示。距离变换主要分为欧氏距离和非欧式距离,本文采用非欧式的城市街区距离,对二值图像进行前向和后向的 2 次串行扫描,求取目标像素点到背景的最短距离:

$$d = |m - k| + |n - l| \quad (1)$$

式中:(k, l)为边界像素;(m, n)为区域像素。

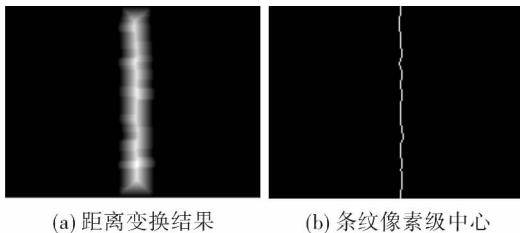


图 5 条纹像素级中心的提取

Fig. 5 Extraction of stripe pixel center

3 条纹亚像素中心的精确提取

将条纹的二值信息与光强灰度相结合,以条纹像素级中心及每行宽度为基准,对预处理后的条纹灰度进行曲线拟合,再用重心法即可求得条纹精确的亚像素中心。

3.1 曲线拟合

理想的条纹灰度呈对称的高斯分布:

$$f(x) = A \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2}{\rho^2}\right] \quad (2)$$

式中: A 是激光条纹灰度幅值; ρ 决定条纹宽度; x_c 为高斯分布的条纹中心坐标。

用传统的曲线拟合法对公式(2)两边取对数,采用最小二乘法求解多项式参数,计算曲线极值,得到条纹的亚像素中心。然而,激光条纹即使预处理后也并不完全对称,若直接将拟合后的曲线极值作为条纹中心,结果将受噪声引起的局部灰度极值所限制。为了结合条纹灰度分布规律、降低局部灰度极值对条纹中心定位精度的影响,仅采用高斯曲线模拟激光条纹的灰度分布。

3.2 亚像素中心的提取

重心法使多个像素及其灰度参与加权计算,具有抗噪强、精度高及能减小灰度分布不对称引起的误差等优点。利用曲线拟合后的条纹灰度,对每行条纹宽度内的像素计算重心,求得最终精确的条纹亚像素中心:

$$x_c = \frac{\sum_n x \cdot f(x, y)}{\sum_n f(x, y)} \quad (3)$$

$$y_c = \frac{\sum_n y \cdot f(x, y)}{\sum_n f(x, y)} \quad (4)$$

式中: x 和 y 是条纹宽度 n 内的像素点; $f(x, y)$ 为高斯拟合后的条纹灰度值; (x_c, y_c) 即最终的亚像素中心坐标。

4 实验及分析

采用仿真实验和实验室开发的三维测量系统,验证算法在高噪声背景下条纹亚像素中心提取的准确度。并利用在噪声背景下结果较有效的曲线拟合法^[7-8]、灰度重心法^[9]以及梯度重心法^[10],与本文算法进行对比。

实验中条纹真实中心为位于激光条纹图像中的一条垂直线,理想算法提取的亚像素中心线应

逼近真实条纹中心,而若受噪声的干扰,条纹中心线的列坐标会有明显的跳变。因此,可采用条纹亚像素中心相邻行的列坐标偏差来量化算法的抗噪能力,统计条纹中心线坐标偏差的最大值和平均值,若该2项指标值越小,则提取的亚像素中心受噪声影响的波动幅度越小,算法抗噪能力越强。

4.1 仿真分析

仿真 $150 \text{ 像素} \times 200 \text{ 像素}$ 的高斯分布条纹图像,条纹中心位于列坐标100像素处。加入密度为0.6的椒盐噪声后,各条纹亚像素中心提取算法的对比结果如图6所示。由于条纹亚像素中心无法在图像中直接显示,采用MATLAB软件将其绘制到条纹图像上。

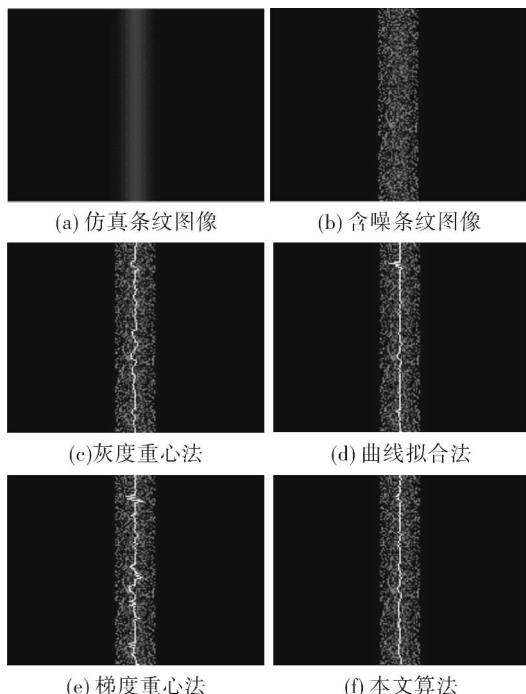


图6 仿真条纹亚像素中心提取结果对比1

Fig. 6 Comparison results 1 of simulated stripe sub-pixel center

图7将各算法提取的条纹亚像素中心以不同的颜色绘到一幅图中。由图可知,本文算法在高噪声背景下更接近真实的条纹中心,条纹中心线更逼近列坐标为100像素处。

表1计算了各算法提取的条纹亚像素中心相邻行的列坐标偏差的最大值和平均值。图6、图7和表1显示,本文提取的条纹亚像素中心更为平缓,相邻中心点列坐标差的最大值和平均值均为最小,而其他算法受图像中噪声影响,条纹中心坐标波动较大。

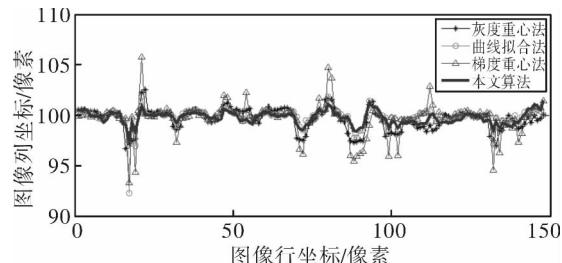


图7 仿真条纹亚像素中心提取结果对比2

Fig. 7 Comparison results 2 of simulated stripe center

表1 仿真条纹中心相邻行的列坐标差对比

Table 1 Column coordinate difference of simulated stripe sub-pixel center

亚像素中心 提取算法	最大列坐标差/ 像素	平均列坐标差/ 像素
灰度重心法	2.605 6	0.440 5
曲线拟合法	7.370 0	0.508 1
梯度重心法	6.548 0	1.007 0
本文算法	1.823 6	0.331 6

4.2 实验分析

采用由波长为632.8 nm的He-Ne线激光器、平坦表面、接收屏幕、微视图像CCD相机(MVC1450DAM-GE15-S00)组成的线激光三维测量系统,获取真实的激光条纹图像,图像尺寸 $1392 \text{ 像素} \times 1040 \text{ 像素}$ 。为使结果显示更直观,仅截取 $150 \text{ 像素} \times 200 \text{ 像素}$ 尺寸的条纹图像区域进行处理,如图8所示。由图8、图9及表2可知,本文算法提取的条纹亚像素中心线在高噪声背景下更能逼近真实条纹中心,条纹中心线相对平缓,相邻中心点列坐标差的最大值和平均值均为最小,抗噪能力极强。

表2 实验条纹中心相邻行的列坐标差对比

Table 2 Column coordinate difference of experimental stripe sub-pixel center

亚像素中心 提取算法	最大列坐标差/ 像素	平均列坐标差/ 像素
灰度重心法	1.285 3	0.310 8
曲线拟合法	1.546 8	0.348 0
梯度重心法	4.408 3	0.717 8
本文算法	1.084 5	0.203 0

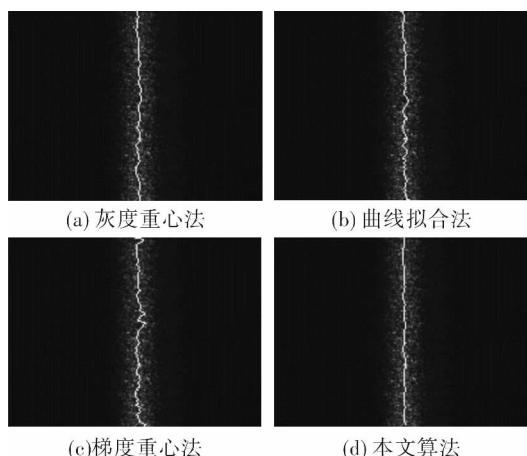


图 8 实验条纹亚像素中心提取结果对比 1

Fig. 8 Comparison results 1 of experimental stripe sub-pixel center

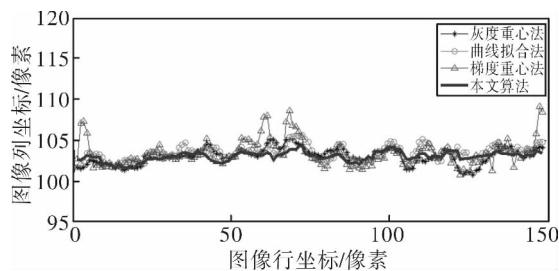


图 9 实验条纹亚像素中心提取结果对比 2

Fig. 9 Comparison results 2 of experimental stripe sub-pixel center

5 结论

为了在含有大量噪声的激光条纹图像中精确获取条纹的中心位置,提出了一种条纹亚像素中心提取方法。采用平均法和中值滤波预处理条纹图像,滤除噪声;利用迭代阈值分割及形态学开闭方法,去除背表面条纹,获取条纹目标及其宽度信息,并引入距离变换提取条纹的像素级中心;再采用曲线拟合和重心相结合的方法提取精确的条纹亚像素中心。算法有效结合条纹的二值宽度与光强灰度信息,降低噪声引起的局部灰度极值对中心定位精度的影响,弥补条纹不对称性引起的误差。仿真和实验结果表明,本文算法具有良好的抗噪性,提取的条纹亚像素中心在高噪声背景下逼近真实条纹中心。

参考文献:

[1] Raphael D W, Gary A A, Melvyn L S, et al. A sys-

tem for the dynamic industrial inspection of specular freeform surfaces[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50: 632-644.

- [2] Raphael D W, Gary A A, Melvyn L S, et al. Dynamic deflectometry: A novel approach for the online reconstruction of specular freeform surfaces[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50: 1765-1778.
- [3] Yin Qingji. Stripe image processing for 3D model reconstruction of object[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- 尹庆吉. 物体 3D 模型恢复中条纹图像的处理[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
- [4] Liu Yubao. Key techniques for 3D line structured light[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2014.
- 刘玉宝. 线结构光三维测量关键技术研究[D]. 泉州:华侨大学,2014.
- [5] Yang Wei. Research on method for extracting center of structured light stripe[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- 杨尉. 结构光光条中心提取方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [6] Liu Changjie, Li Bin, Guo Yin, et al. Research of rapid laser stripe extraction in real-time guiding of welding robots[J]. Laser Technology, 2015, 39(5): 642-647.
- 刘常杰,李斌,郭寅,等. 焊接机器人实时引导中光条快速提取算法研究[J]. 激光技术,2015,39(5): 642-647.
- [7] Liu Tao, Wang Zongyi, Yu Xiuhui, et al. Curve fitting method based on adaptive window for center extracting of structured light stripe[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(2): 151-154.
- 刘涛,王宗义,于秀辉,等. 基于自适应窗曲线拟合的结构光条纹中心提取[J]. 半导体光电,2010,31(2): 151-154.
- [8] Gao Shiyi, Yang Kaizhen. Research on central position extraction of laser stripe based on varied-boundary Gaussian fitting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1132-1137.
- 高世一,杨凯珍. 变边限高斯拟合提取激光条纹中心线方法的研究[J]. 仪器仪表学报,2011,32(5): 1132-1137.
- [9] Qian Lidan, Yang Junwei. Research on extraction

- method of sub-pixel laser-knife centre[J]. Measurement and Control Technology, 2014, 33(2): 27-31.
- 钱丽丹,杨军伟. 亚像素级光刀中心提取方法研究[J]. 测控技术,2014,33(2):27-31.
- [10] Wu Jiayong, Wang Pingjiang, Chen Jihong, et al. Method of linear structured light sub-pixel center position extracting based on gradient barycenter[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14 (7): 1354-1360.
- 吴家勇,王平江,陈吉红,等. 基于梯度重心法的线结构光中心亚像素提取方法[J]. 中国图象图形学报, 2009,14(7):1354-1360.
- [11] Wang Li, Xiong Zhao, Chen Niannian, et al. Segmentation for overlapped laser spot in large optical components topography measurement system[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20 (3): 621-626.
- 王利,熊召,陈念年,等. 大口径光学元件面形检测中重叠激光光斑的分离[J]. 计算机测量与控制,2012, 20(3):621-626.