

多场景下结构光三维测量激光中心线提取方法

宋晓凤¹, 李居朋¹, 陈后金¹, 李丰², 万成凯²

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044;

2. 北京世纪瑞尔科技股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 结构光三维测量技术是获得物体三维信息的重要途径, 激光条纹中心线提取是影响结构光三维测量精度和速度的关键因素。提出了一种适用于多场景下结构光三维测量的激光条纹中心线提取方法, 充分利用图像中激光条纹的几何信息和相关性生成自适应卷积模板, 实现激光条纹图像的滤波和增强处理, 使激光条纹横截面灰度值满足高斯分布; 经灰度加权法实现激光条纹中心线的亚像素精度定位与提取。实验测试结果表明: 该方法可实现多场景下形状、材质各异物体的条纹中心线提取, 有效克服了激光条纹亮度分布不均、噪声干扰等影响, 单幅图像处理时间缩短为 0.107 s 且相对误差减少到 0.076 5%, 有效提高了激光条纹中心线的提取精度和速度。

关键词: 三维测量; 线结构光; 条纹中心提取; 自适应卷积; 灰度加权

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0113004

Laser centerline extraction method for 3D measurement of structured light in multi-scenarios

Song Xiaofeng¹, Li Jupeng¹, Chen Houjin¹, Li Feng², Wan Chengkai²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Century Real Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: 3D measurement of structured light technology is an extremely vital approach to obtain 3D information of objects. Extraction of the centerline of laser stripe is a key factor that could affect the accuracy and speed of 3D measurement of structured light in the meantime. A method of extracting centerline of laser stripe for 3D measurement of structured light that adaptive to multiple scenarios was proposed. The adaptive convolution template was generated by making full use of the geometric information and correlation of laser stripe in the image, which can filter and enhance the image quality of laser stripe and enable the gray value of cross-section of laser stripe satisfy the Gauss distribution. The sub-pixel accurate localization and extraction of laser stripe centerline were realized by gray weighted algorithm. The experimental results show that the proposed adaptive convolutional algorithm can extract the laser stripe centerlines of the objects with different shapes and materials based on multi-scenarios and overcome the influence of uneven brightness and noise at the same time. Based on the algorithm, the

收稿日期: 2019-10-05; 修订日期: 2019-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(81671034); 北京交通大学教育基金会重点项目(9907005501)

作者简介: 宋晓凤(1994-), 女, 硕士生, 主要从事图像处理及应用方面的研究。Email: 17120021@bjtu.edu.cn

导师简介: 李居朋(1981-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事图像处理、信号处理等方面的研究。Email: lijupeng@bjtu.edu.cn

extraction time of single frame is shortened to 0.107 s and the relative error is reduced to 0.076 5%, which improves the extraction accuracy and speed of laser stripe centerline effectively.

Key words: 3D measurement; line structured light; stripe centerline extraction; self-adaptive convolution; gray weighted

0 引言

结构光三维测量技术被广泛应用于工业、医学、公路、铁路等领域。一般基于三角测量法获得物体的三维信息,由线激光器和相机组成,利用激光器投射特定的光条状信息,相机采集并经图像处理实现物体三维测量^[1]。其中,图像处理过程中激光条纹中心线的提取是影响结构光三维测量精度与速度的重要原因。理想条件下,激光条纹横截面呈高斯型亮度分布,而对于多种场景下不同应用环境的物体种类繁多、表面粗糙度和反光特性差异、环境光干扰带来的激光条纹形状各异、激光条纹亮度分布不均、大量噪声干扰等问题,大大影响激光条纹提取的精度和效率。从而,如何准确、快速地提取激光条纹中心线,是结构光三维测量亟待解决的关键问题。

最新的研究成果中,激光条纹中心线提取方法一般是以牺牲时效性换取精度的提高,主要包括 Steger 算法^[2]和 Gauss 拟合算法^[3],以及在此基础上相继提出的改进方法^[4-5]。其中 Steger 算法利用激光条纹中心的一阶导数为零、二阶导数为负的亮度分布特性实现条纹中心定位,Gauss 拟合算法则主要利用激光条纹横截面像素值进行高斯分布实现条纹中心线提取,这两类算法提取精度依赖于激光条纹亮度的高斯分布特性,同时存在算法计算量大的局限。极值法、方向模板法、灰度加权法^[6-7]处理速度可达实时性要求,但在环境干扰严重或者物体表面反光特性复杂的情况下,激光条纹中心提取精度将大大降低。在此基础上,尹小恰等人以生产线上的结构光测量为应用背景,采用 SACM 方法实现图像去噪^[8],由质心法和曲线拟合获得激光条纹中心线,但其研究成果多关注于去除工厂环境下物体激光条纹的噪声,无法适用于存在多种干扰的室外场景应用。因此,现有的激光条纹中心提取方法无法同时满足多场景下结构光三维测量的高精度、高效率的要求。

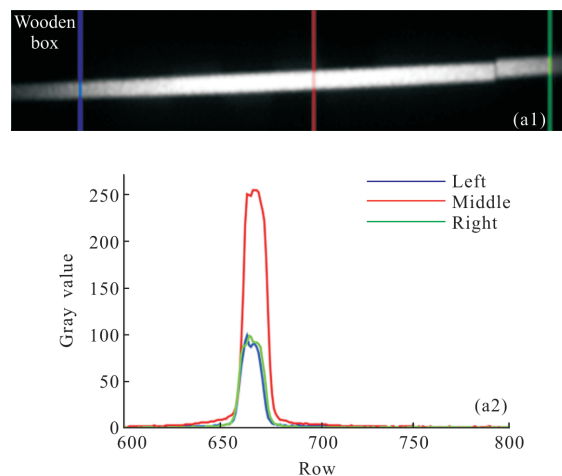
文中提出了一种适用于多种场景下结构光三维测量的线激光条纹中心线提取方法。该方法可以准确、快速地提取各异形状、亮度不均匀的激光条纹中心线,并且有效地去除环境光干扰带来的噪声,满足结构光三维测量的准确性和快速性。

1 多种场景中物体线激光图像特性分析

以多种场景下出现的木箱、织物、车轮和石头这四类表面粗糙性差异大的物体为研究目标。线激光条纹是否满足高斯型亮度分布是影响条纹中心提取精度的关键,为分析四类物体激光条纹亮度分布特性,截取分辨率为 1 374×1 920 原始图像中的包含激光条纹的部分,如图 1 所示。

从图 1(a)~(d)直观分析,可以看出四类条纹普遍存在两端亮度较中心部分低的现象,为此选取条纹图像所标左右边界和中间列的三个截面,以像素纵向位置为横轴坐标,画出三个截面的亮度分布曲线。对图 1 分析可得激光条纹的亮度分布具有以下特征:

- (1) 各类物体的条纹形状、整体明暗程度各不相同,边界位置呈现偏暗现象;
- (2) 不同类型物体反射条纹宽度存在较大差异;
- (3) 激光条纹截面亮度曲线非高斯分布,存在噪声干扰。



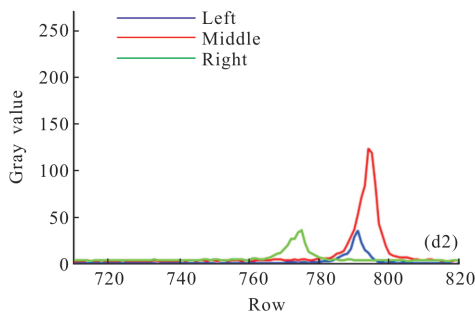
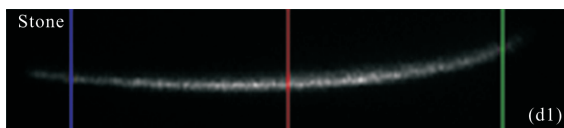
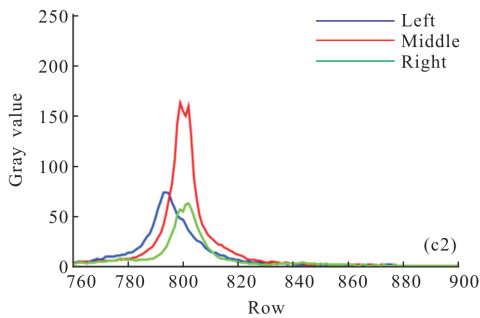
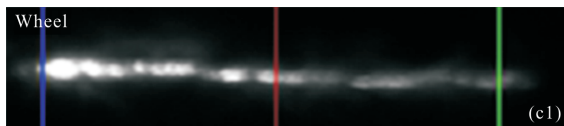
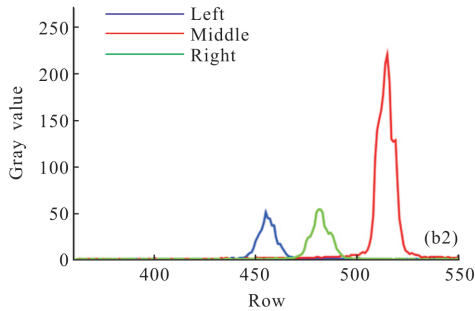
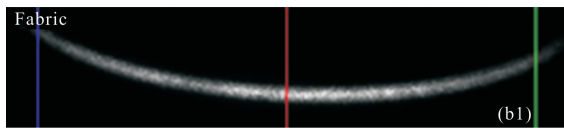


图 1 四类物体激光图像及对应图像左右和中间位置亮度分布
Fig.1 Brightness distribution of laser image and corresponding left-right and middle position of four kinds of objects

以上特征表明,受物体粗糙程度、反光特性、距离差异的影响,物体反射激光条纹成像具有较大的不确定性。同时,受环境光带来的噪声干扰,条纹横

截不满足高斯分布,理想高斯分布的条纹对准确定位条纹中心线起决定性作用。这些问题都将直接影响激光条纹中心线提取的精度。

2 基于自适应卷积的激光条纹中心线提取算法

为消除物体反射激光条纹不确定性的影响,使得激光条纹亮度近似高斯分布,需对激光条纹图像进行去噪与增强处理。现有的研究中,主要通过中值滤波方法实现含噪激光图像预处理^[9],图 2 为图 1(c)激光条纹图像经[5×5]中值滤波处理后亮度分布曲线。与图 1(c)比较,中值滤波后的亮度曲线较为平滑,但边界区域仍偏暗,由于中值滤波是采用一像素点邻近模板区域中间值替代该像素值,暗区域中像素点邻近模板区域中间值与该像素点的差值较小,仅仅实现了一定程度上的去噪平滑的效果,而无法获得暗区域激光条纹的增强。鉴于此,为了充分利用激光条纹的亮度和宽度信息,设计了基于自适应卷积的激光条纹增强算法,通过自适应设定卷积核模板达到消除噪声干扰和减弱条纹亮度不均的目的。

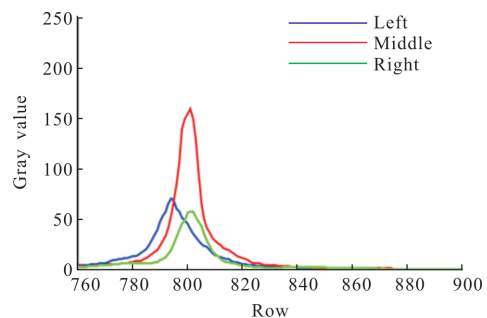


图 2 经中值滤波处理后的激光图像亮度分布

Fig.2 Brightness distribution of laser image after median filtering

利用激光条纹和噪声的几何信息和相关性生成自适应模板,与原图像卷积得到去噪和增强的图像。其中,激光条纹和噪声的几何信息包括横截面条纹期望宽度和最大值,相关性即条纹横截面噪声范围宽度与条纹期望宽度的和为几何信息中的最大值。

激光条纹原始图像 I 经大津阈值法进行二值化处理得到其二值图像 B ,统计二值图像 B 中心第 j 列的非零元素的个数 $w(j), j=0, \dots, N-1$,其中含有非零元素的总列数为 N ,代表激光条纹长度,将自适应卷积模板行数 H 设定为:

$$H = \begin{cases} w(j)_{\max}, w(j)_{\max} \text{ 为奇数} \\ w(j)_{\max} + 1, w(j)_{\max} \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (1)$$

为了更好地平衡整条激光条纹的亮度分布,需要重点设计合适的自适应卷积模板宽度。定义激光条纹 N 列的均值为 M :

$$M = \lceil \sum_{j=0}^{N-1} w(j) / N \rceil \quad (2)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。则通过 M 和 H 得到卷积模板列数,如下:

$$W = \begin{cases} n^*(H-M), n^*(H-M) \text{ 为奇数} \\ n^*(H-M) - 1, n^*(H-M) \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (3)$$

M 为激光条纹宽度的均值,理想条件下激光条纹截面中非 0 像素的个数记为条纹宽度,为了降低条纹中可能包含噪声对条纹宽度的影响,将激光条纹中的所有截面宽度求取平均,视为该图像中条纹的期望宽度。将 $w(j)$ 中的最大值 $w_{\max}(j)$ 作为模板的行数 H ,则 $(H-M)$ 为激光扩散噪声范围。同时,将模板的列数也视为 $(H-M)$,但列数太小可能会导致噪声范围大于模板尺寸而增强噪声,因此将该模板的列数扩大 n 倍保证能够包含条纹和噪声图像。

由于激光条纹近似符合高斯型亮度分布,模板中元素值通过“中间高、两边低”的原则设定,增强条纹中心信息而削弱两侧干扰,使每列亮度值最大可能地接近高斯分布。其中,模板中心 M 行的元素值被设为 f ,其余行模板值设为 $f \cdot \varphi$, φ 的取值范围为 $(0-1)$,且模板中所有元素的和为 1,可得到参数 f 的取值,自适应卷积模板 T 为

$$T = \begin{pmatrix} \varphi \cdot f & \varphi \cdot f & \cdots & \varphi \cdot f \\ : & : & \cdots & : \\ \varphi \cdot f & \varphi \cdot f & \cdots & \varphi \cdot f \\ f & f & \cdots & f \\ : & : & \ddots & : \\ f & f & \cdots & f \\ \varphi \cdot f & \varphi \cdot f & \cdots & \varphi \cdot f \\ : & : & \cdots & : \\ \varphi \cdot f & \varphi \cdot f & \cdots & \varphi \cdot f \end{pmatrix}_{H \times W} \quad (4)$$

式中: φ 和 n 的大小需根据物体条纹图像的亮度分布特性确定。随机选取 $(0-1)$ 的 φ 值固定不变,设定为 0.25,分析宽度调节变量 n ,分别取 2, 5, 8。通过构建上述模板 T 对原始条纹图 1(b) 和图 1(c) 进行自适应卷积处理并分析对应图像中间列的灰度值分布选

取 n 的最佳取值,结果如图 3 所示。

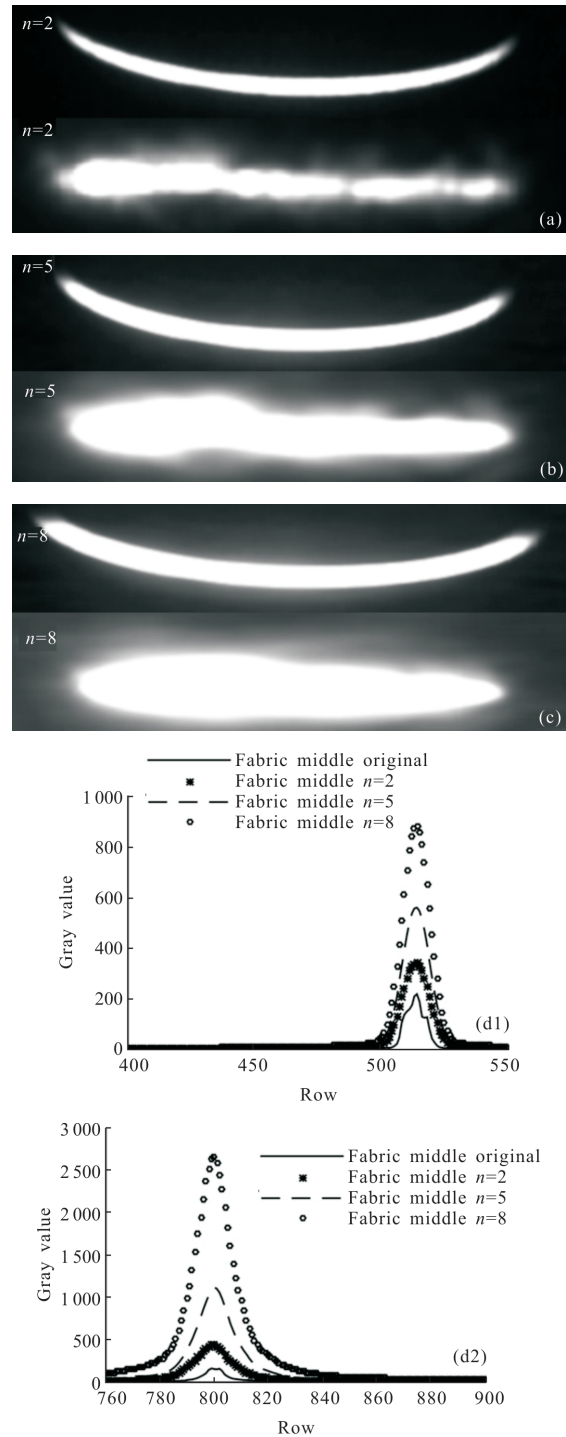


图 3 不同 n 值的自适应卷积结果

Fig.3 Adaptive convolution results with different n values

测试结果显示该算法完全可以消除亮度不均的区域,达到激光条纹图像增强的目的。从图 3(a)~(c) 中可以观察到 n 达到 5 时,图 1(c) 亮度区域过大导致激光条纹变形, n 为 2 时图像增强效果明显,条纹

不变形,且图 3(d)显示 n 为 2 时,两幅条纹图像最接近原始图像列条纹灰度值分布。在此基础上,改变 φ 值大小分别取 0.1 和 0.9,与图 1(b)和图 1(c)卷积并分析对应图像中间列灰度值分布确定最佳 φ 值,结果如图 4 所示。

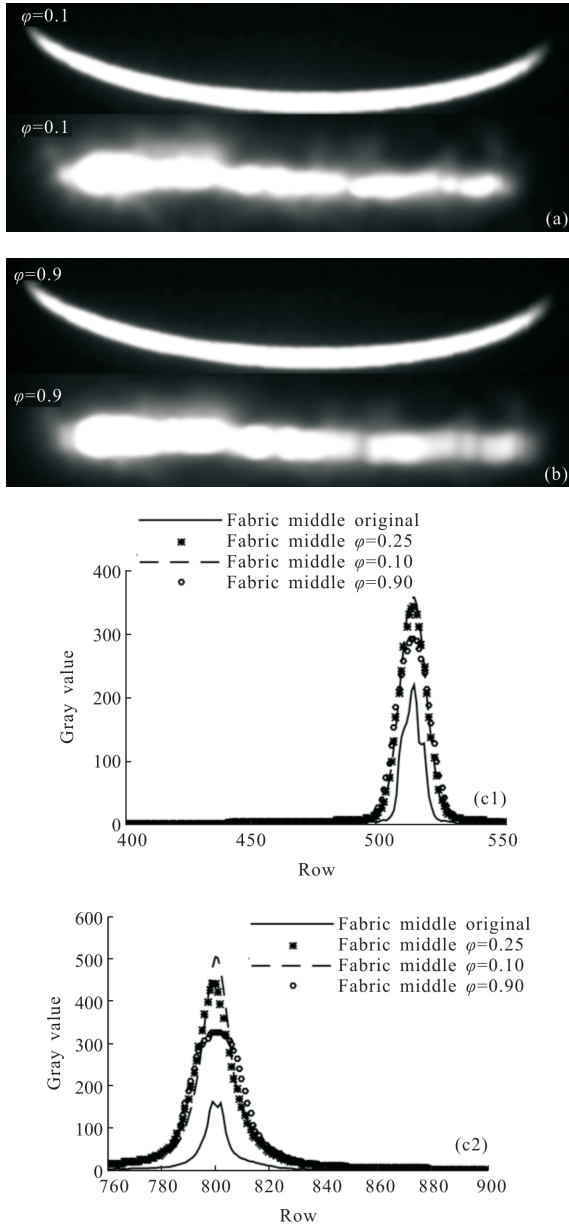


图 4 不同 φ 值的自适应卷积结果

Fig.4 Adaptive convolution results with different φ values

图 4(a)~(b)和图 3(a)从视觉上观察 φ 在 0~1 范围内条纹图像并无较大变化,保留原条纹形状,图 4(c)显示随 φ 值增大,条纹亮度变强,与 n 值相比 φ 在 0~1 的条纹亮度分布相差较小。综合以上结论,将 n 值确定为 2, φ 值确定为 0.25。因此,利用条纹几

何信息和相关性,图 1(b)、图 1(c)的模板尺寸大小分别为 15×7 和 21×9 ,每幅图像条纹期望宽度 M 分别为 11 和 9, f 通过计算均为 0.095 2,体现了条纹图像的自适应卷积过程。与经典条纹中心提取方法比较^[10],理想条纹状态下,灰度加权法可以获得很高的亚像素中心定位精度,且算法处理速度快,但在受噪声干扰条件下,该方法不能得到一个精确的条纹中心线。其中,条纹横截面无限接近高斯分布利于灰度加权准确得到中心点。

文中通过自适应卷积处理获得每列近似高斯分布的激光条纹图像,并利用灰度加权法提取条纹中心线,有效提高数据处理的速度和条纹中心提取的准确率,灰度加权提取的准确性依赖于条纹横截面灰度值是否满足高斯分布。灰度加权法算法提取激光条纹中心线是将光条纹截面的灰度值分布中的质心记作光条纹的中心。

激光条纹亚像素精度中心定位算法具体步骤如下:

首先,找到二值图像每一列的非零元素的中心点 i_{center} 由下式表示:

$$i_{center} = \frac{i_1 + i_w}{2} \quad (5)$$

式中: i_1 表示二值图像每一列第一个非零元素所在的行; i_w 表示每一列最后一个非零元素所在的行。

其次,确定条纹宽度。条纹宽度一般由激光条纹截面所有元素值或者给定宽度决定,所有元素参与加权影响激光条纹中心提取的速率,给定宽度中的灰度值参与加权则影响条纹中心提取的精度,需选择最佳条纹宽度。文中将处理后的图像通过大津阈值得到二值图像,再次统计所有列非全零元素个数的均值 w_0 ,将该值作为该幅图像条纹宽度。

最后,通过 w_0 得到条纹中心线的亚像素坐标 (x, y) 记作公式(6), $I(i, j)$ 为第 i 行,第 j 列的像素值。

$$y = \sum_{i=i_{center}-\frac{w_0}{2}}^{i=i_{center}+\frac{w_0}{2}} \frac{I(i, j) \cdot i}{I(i, j)}, x=j \quad (6)$$

图 5 为上述模板得到的左右边界和中间列的灰度值分布和提取的激光条纹中心线结果。红色加号标记为文中方法提取对应图 1 中间列中心点,黑色点为 中值滤波与灰度加权法提取对应图 1 中间列中心点。

图 5 条纹列曲线分布无限接近高斯分布, 与原始图像和经中值滤波方法处理相比, 有效去除了条纹横截面曲线上的噪声干扰且使边界处的灰度值变强。条纹横截面灰度值分布不同, 通过灰度加权得到的中心线位置也不同, 与中值滤波和灰度加权算法提取的中心点相比, 文中提取的中心点位置更接近

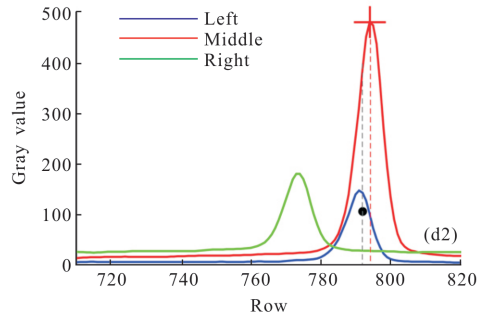
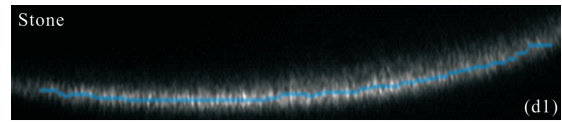
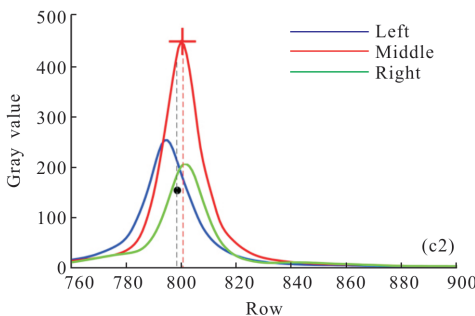
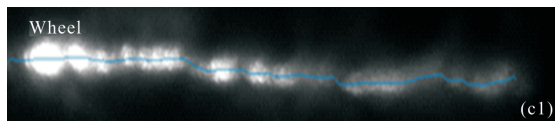
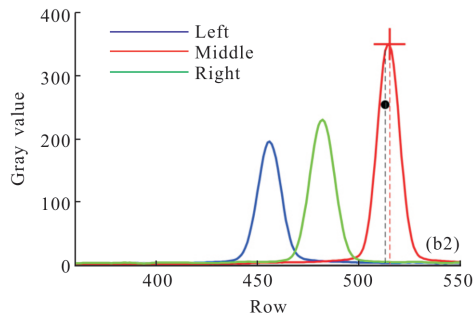
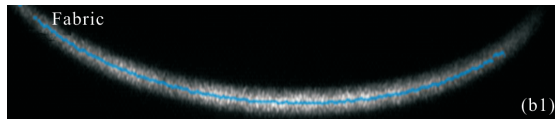
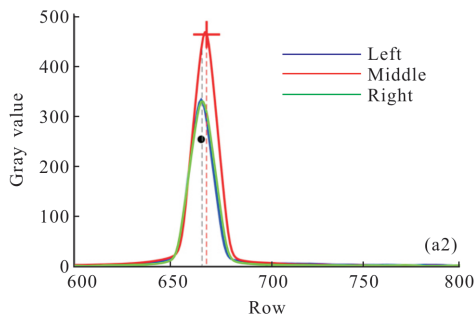
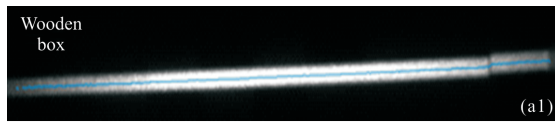


图 5 四类物体激光中心线提取结果和自适应卷积处理后激光图像亮度分布

Fig.5 Laser centerline extraction results and brightness distribution of laser image after adaptive convolution of four kinds of objects

高斯拟合曲线的中心位置, 可见条纹无限接近高斯分布对提高提取条纹中心线准确性具有决定性作用。图 5 条纹中心线提取结果显示, 文中方法可对各异形状、亮度不均匀、具有噪声的激光条纹图像实现不间断、稳定地条纹中心线提取。

3 算法测试与结果分析

为了测试线结构光中心线提取的有效性, 采集系统采用 940 nm 激光器作为线结构光激光光源, 经 MER-1070-10GM 工业相机采集四类激光条纹图像。激光条纹中心定位处理算法的测试环境为 Visual Studio 2015。在可见到红外波段整层大气连续光谱透光率在 940 nm 附近最低^[11], 可见环境光的该波段对非自然光的该波段影响最小, 选择 940 nm 激光器可使图像在一定程度上减弱外界环境光带来的干扰。

3.1 激光条纹中心线提取精度测试与分析

为了确定条纹法线方向对提取精度的影响, 文中通过对自适应处理之后的图 1(c)添加方向模板得到激光条纹法线方向亮度分布, 曲线如图 6(a)所示。

与文中方法列灰度值曲线分布图 6(b)比较, 条纹法线方向分布曲线存在过多转折点不满足高斯分布。为进一步确定添加方向模板对提取精度的影响, 采用光平面法对比了方向模板法和文中方法对条纹

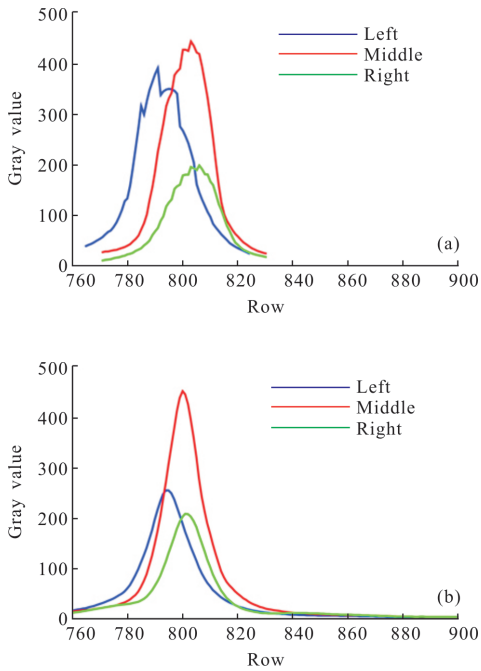


图 6 方向模板法和文中方法处理后的激光图像亮度分布对比
Fig.6 Comparison of brightness distribution of laser image after directional template method and the method of this paper

中心线提取精度。同时也采用了中值滤波处理后的灰度加权、高斯拟合、SACM、Steger 方法通过光片面法与文中方法进行比较。实验过程中,采集了 10 张与棋盘格角点重合的激光条纹图像进行精度统计对比。光平面法利用棋盘格的行角点与激光条纹重合实现验证中心提取结果是否准确。利用 MATLAB 相机标定工具确定棋盘格角点坐标,确定棋盘格角点对应提取的像素坐标与棋盘格基准坐标求距离均值,表示提取的绝对误差,该绝对误差可评价激光条纹中心线提取的精度。由于棋盘格列坐标与提取的像素列坐标值相同,光条中心点与棋盘格角点的距离均值 AAD 定义如下

$$AAD = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |y_i - y_i^{corner}|}{n} \quad (7)$$

式中: y_i 表示通过文中方法提取第*i*个角点对应的行坐标; y_i^{corner} 表示棋盘格角点在图像上基准行坐标; n 表示与条纹中心线重合的棋盘格角点数量,第*i*个角点对应的列值相同。该值越小,光条中心线提取的精度越高。不同激光条纹中心线提取方法对比结果如图 7 所示。

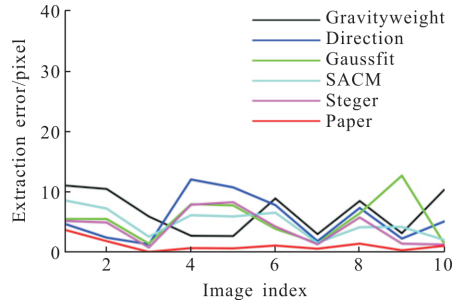


图 7 不同激光条纹中心提取精度对比
Fig.7 Precision comparison of different laser stripe center extraction methods

图中红色线表示文中方法,在多幅图像中占有较低水平,且误差值不存在大幅度波动,提取结果具有较高鲁棒性。表 1 为 10 幅图像采用不同方法的绝对误差均值以及相对误差均值 AARD。AARD 为距离均值占棋盘格两角点距离的百分比,更能反应测量的可信度,由下式表示:

$$AARD = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |y_i - y_i^{corner}| / y_h}{n} \quad (8)$$

式中: y_h 表示两棋盘格角点像素距离。

表 1 条纹中心线提取精度对比
Tab.1 Precision comparison of stripe centerline extraction

	Gray weighting	Direction template	Gaussian fitting	SACM	Steger	Method of this paper
AAD	6.725 9	5.606 8	5.458 1	4.946 5	4.138 8	1.180 9
AARD	0.623 5	0.457 9	0.420 4	0.370 7	0.329 8	0.076 5

从表 1 可以看出,通过法线方向上的灰度值确定条纹中心线,与棋盘格角点平均相差 5.606 8 个像素,文中方法仅差 1.180 9 个像素,明显优于方向模板法。与其他方法提取结果对比,文中算法的平均绝对误差和平均相对误差最低,平均相对误差为 0.076 5%,具有更精确的提取结果。

3.2 激光条纹中心线算法提取速度分析

为了验证激光条纹中心线提取的速率,文中通过统计 Steger、高斯拟合、中值滤波处理后的灰度加权、SACM 方法、方向模板法和本文方法提取图 1(a)激光条纹中心线的时间对比速率,结果如表 2 所示。

从表中观察, 中值滤波处理后的灰度加权法中心线提取时间相对最快, 文中方法与该方法处理时间平均仅差 0.009 s。同时, 因去掉搜索条纹法线方向, 与方向模板相比缩短约 1/2 的时间。与其他方法相比, 文中方法平均提取时间可达 0.107 s, 具有更快的处理速度。

表 2 条纹中心线提取时间对比(单位: 秒)

Tab.2 Computational time comparison of stripe centerline extraction (Unit: s)

Fig.1	Steger	Gaussian fitting	Gray weighting	SACM	Direction template	Method of this paper
(a)	0.174	0.255	0.096	0.107	0.243	0.1
(b)	0.151	0.242	0.082	0.122	0.274	0.103
(c)	0.159	0.249	0.107	0.127	0.252	0.125
(d)	0.15	0.229	0.109	0.135	0.248	0.103

上述结果表明, 结合物体激光条纹中心线提取精度与速率, 文中方法明显优于 Steger、高斯拟合、中值滤波处理后的灰度加权、SACM 方法和方向模板法, 可以很好的满足条纹检测的准确性和快速性。

4 结 论

文中针对结构光三维测量技术对多场景下不同物体粗糙度和环境噪声的敏感性, 提出了一种准确、快速的激光条纹中心线提取算法。通过分析多种场景下物体激光条纹的几何信息和相关性确定卷积模板并与激光条纹图像卷积, 可有效去除环境光造成的干扰, 同时增强图像暗区域, 使每列条纹灰度值近似高斯分布。经灰度加权法可快速提取亚像素精度条纹中心线。与现有方法相比, 条纹提取的 AAD 和 AARD 分别达到 1.180 9 和 0.076 5%, 每幅图像处理的速度达到 0.107 s, 有效的提高了条纹提取的速率和精度, 为后续三维空间信息重建奠定了基础。

参 考 文 献:

[1] Wu Fang, Mao Jian, Zhou Yufeng, et al. Three-line

structured light measurement system and its application in ball diameter measurement [J]. *Optik- International Journal for Light and Electron Optics*, 2018, 157: 222-229.

[2] Li Qi, Zhang Yixin, Zhang Xuping, et al. Statistical behavior analysis and precision optimization for the laser stripe center detector based on Steger's algorithm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13442-13449.

[3] Chang Yaceng, Chen Jing, Tian Junwei. Sub-pixel edge detection algorithm based on Gauss fitting [J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, 31(1): 179-181. (in Chinese)

[4] Yang Yongming, Wang Zhenzhou. An efficient and robust stripe extraction method for structured light measurement system [C]//Proceedings of the International Conference on Advances in Image Processing. Bangkok, Thailand-August 25-27, 2017: 103-107.

[5] Sun Panqing, Yang Yongyue, Liangliang He. An improved Gaussian fitting method used in light-trap center acquiring [J]. *Electronic Design Engineering*, 2012, 20(13): 179-185. (in Chinese)

[6] Li Yuehua, Zhou Jingbo, Huang Fengshan. Sub-pixel extraction of laser stripe center using an improved gray-gravity method [J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 1-13.

[7] Wang Zehao, Zhang Zhongwei. Adaptive direction template method to extract the center of structured light [J]. *Laser Journal*, 2017, 38(1): 60-64. (in Chinese)

[8] Yin Xiaoqin, Tao Wei, Feng Yiyang, et al. Laser stripe extraction method in dustrial enviroments utilizing self-adaptive convolution technique [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2653-2660.

[9] Jin Jun, Li Dehua, Li Heping. New method for obtaining the center of structured light stripe [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 42(4): 42-44. (in Chinese)

[10] Fisher R B, Naidu D K. A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection [M]. Berlin Heidelberg: Springer Press, 1996: 285-404.

[11] Fan Wei, Wang Yi, Rao Ruizhong. Measurement of the atmospheric transmittance from visible to near infrared bands [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(3): 402-407. (in Chinese)