

基于高斯-洛伦兹分峰拟合的线结构光条中心的提取方法

李涛涛^{1,2*}, 杨峰², 李石庚¹, 何宇¹

¹萍乡学院机械电子工程学院, 江西 萍乡 337055;

²中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083

摘要 研究了一种适用于不同类型光条图像的光条中心提取方法。构建了光条的截面能量模型, 分析了不同成像质量光条的截面能量组成, 构建了高斯-洛伦兹分峰拟合模型; 基于所构建模型, 依次对光条图像进行灰度归一化、感兴趣区域提取、高斯-洛伦兹分峰拟合、去洛伦兹分量处理, 利用灰度重心法提取出精确的光条中心。对比实验结果表明, 本文方法对不同类型光条图像的提取具有适用性强、精确度高, 但耗时长的特点; 然而对强漫反射和镜面反射光条的提取耗时仅为当前效果最好 Steger 法的 1/2。

关键词 测量; 线结构光; 高斯-洛伦兹模型; 分峰拟合; 光条中心提取

中图分类号 TG806; TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.071201

Extraction Method of Line-Structured Light Stripe Center Based on Gauss-Lorenz Decomposition Peak Fitting

Li Taotao^{1,2*}, Yang Feng², Li Shigeng¹, He Yu¹

¹ College of Mechanical and Electronic Engineering, Pingxiang University, Pingxiang, Jiangxi 337055, China;

² State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract A light stripe center extraction algorithm is proposed based on Gauss-Lorenz peak fitting, which is suitable for different types of light stripe images. The cross-sectional energy model of a light stripe is built and the cross-sectional energy compositions of light stripes with different image qualities are analyzed, thus the Gauss-Lorenz decomposition fitting model is constructed. Based on the constructed model, the successive gray normalization, extraction of regions of interest, Gauss-Lorenz decomposition peak fitting and removal of Lorentzian components are acted on the light stripe images. The accurate light stripe center can be extracted with the gray centroid method. The contrast experimental results show that the proposed method has the characteristics of high extraction accuracy, strong applicability, but long time-consumption for different types of light stripe images. However, if it is applied to strong diffuse reflection and specular reflection light stripes, its time consumption is only half of that of Steger algorithm with the best effect at present.

Key words measurement; line-structured light; Gauss-Lorenz model; decomposition peak fitting; light stripe center extraction

OCIS codes 120.6650; 150.6910; 150.4232; 100.2000

1 引言

线结构光测量作为三维测量方法之一, 以其低

成本、高精度、结构简单等特点被广泛应用于逆向工程^[1]、工业制造^[2]、路面, 以及桥梁检测^[3-4]等中。结构光测量精度及效率受相机及激光器性能、光条中

收稿日期: 2018-09-11; 修回日期: 2018-10-01; 录用日期: 2018-10-22

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ171141)、煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(SKLCRSM16KFD03)、江西省萍乡市科技计划项目(ZC201701)

* E-mail: ltaotao1988@126.com

心提取方法、透视变化模型标定精度等^[5-6]方面因素影响。光条中心提取方法是保障测量精度和效率的首要环节,因此,研究一种适用性强、提取精度高的线结构光条中心提取方法对提高线结构光三维测量效果具有重要作用。

光条中心提取方法按提取精度可分为像素级和亚像素级两类,其中亚像素级方法常通过灰度拟合或求解局部特征向量来实现。这类方法虽然提取精度较高,但运算量较大、抗干扰能力差。现有的光条中心提取方法主要可归纳为两类:基于光条形态特征和基于光条灰度特征的提取方法。基于光条形态特征的提取方法是利用了光条图像的形态学特性及光条曲线的几何特性,主要有几何中心法、阈值法、边缘法和骨架提取法等^[7-9]。基于光条灰度特征的提取方法是利用了光条截面灰度分布的特点,主要有灰度重心法、方向模板法、Steger法和曲线拟合法等^[10-15]。但现有的各类提取方法普遍对光条图像质量要求较高,无法对光条截面灰度分布复杂、光条成像质量不高的光条图像实现光条中心的精确、稳定提取。

针对上述问题,本文研究了一种基于高斯-洛伦兹(G-L)分峰拟合的光条中心提取方法,实现了不

同成像质量光条中心的稳定、精确提取。该方法将分峰拟合技术应用到光条中心提取中,通过构建光条图像的截面能量模型,分析不同类型光条能量的组成特点,进而构建G-L分峰拟合模型。在此基础上,对光条图像依次进行归一化、光条感兴趣区域(ROI)提取、G-L分峰拟合、去洛伦兹拟合分量和灰度重心法处理,最终提取出精确的光条中心。

2 结构光条成像类型及能量模型

2.1 光条成像类型

线结构光三维测量中,结构光投射到不同的待测物体上,受物体表面材质、环境光照等因素的影响,成像结果存在差异。根据光条成像质量的不同,可将成像光条划分为4类:近似理想光条、强漫反射光条、强镜面反射光条和弱反射光条。近似理想光条的光条截面灰度分布曲线接近理想的高斯曲线,其他光条的截面灰度分布复杂。光条受物体表面材质的强漫反射和镜面反射作用分别形成了强漫反射光条和强镜面反射光条。弱反射光条是由于照射光条的能量被照射表面大量吸收而形成。4类光条图像及所标注位置(S_a 、 S_b 、 S_c 、 S_d)截面的像素灰度分布分别如图1、2所示。

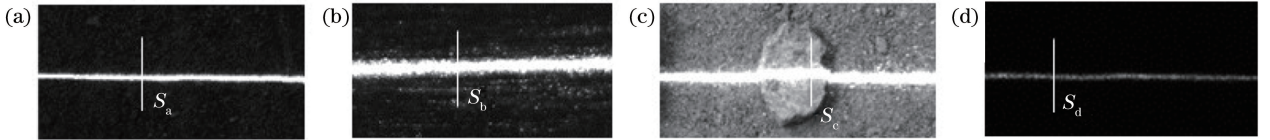


图1 线结构光光条图像。(a)近似理想反射光条;(b)强漫反射光条;(c)强镜面反射光条;(d)弱反射光条

Fig. 1 Images of line-structured light stripes. (a) Approximately ideal reflection stripe; (b) strong diffuse reflection stripe; (c) strong specular reflection stripe; (d) weak reflection stripe

理想光条图像和弱反射光条图像的光条中心即光条灰度曲线的极值位置,提取其位置比较容易,如图2(a)、(d)所示。而实际大多数情况下,投射光条受到物体表面材质、光照等因素影响,光条截面灰度分布曲线上存在多个极值点,如图2(b)、(c)所示,对这两类光条中心位置的准确提取难度较大,现有方法的提取效果均不理想。因此,能否同时适用于上述各类光条截面中心的准确提取是光条中心提取方法有效性和稳健性的衡量标准。

2.2 光条能量模型

由线结构光产生原理可知,理想状态下线结构光条截面能量符合高斯分布^[16]。而实际受光照条件、噪声和材质表面的影响,光条截面能量并非理想的高斯分布,但在各类有效光条的截面能量分布中,必然存在“调制”后的高斯主分量。因此,可构建各

类光条截面能量分布模型 $f(x)$,表示为

$$f(x) = \lambda G_0(x) + Q(x), \quad (1)$$

式中: x 为光条截面上的行(列)的像素坐标; $G_0(x)$ 为近似理想光条的高斯能量分布; $\lambda G_0(x)$ 为“调制”高斯主分量; λ 为“调制”系数; $Q(x)$ 为环境光、噪声等组成的次分量。表1为各类光条 $f(x)$ 模型中的 λ 、 $Q(x)$ 取值。

在近似理想光条和弱反射光条的能量模型中, $Q(x)$ 分量取值较小,相对于 $\lambda G_0(x)$ 可忽略,因而可由单高斯拟合获得光条中心位置。在强漫反射光条和强镜面反射光条的能量模型中, $Q(x)$ 分量比 $\lambda G_0(x)$ 分量小,但在整个 $f(x)$ 模型中占据一定的权重,如使用单高斯对能量分布进行拟合,其提取结果准确性较差。图3为近似理想光条和强镜面反射光条的单高斯拟合结果,理想光条的拟合中心与实际

光条中心几乎重合,如图 3(a)所示;强镜面反射光条

的拟合中心与实际中心偏差较大,如图 3(b)所示。

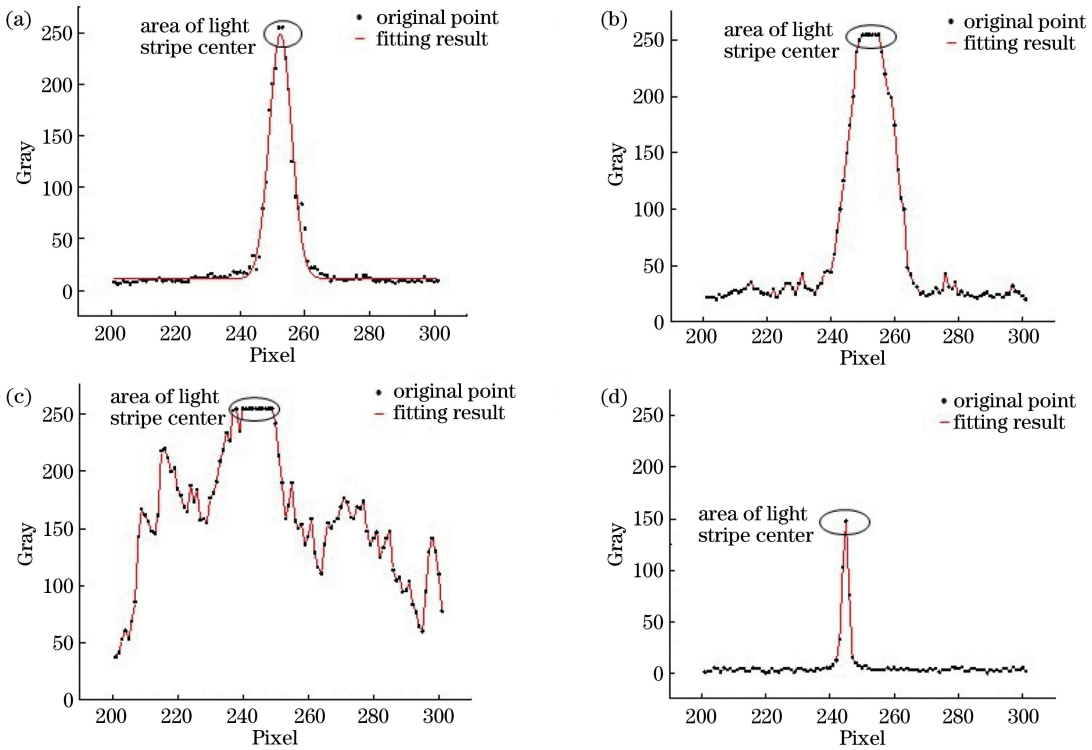


图 2 标注位置的截面灰度分布。(a) S_a处;(b) S_b处;(c) S_c处;(d) S_d处

Fig. 2 Cross-sectional gray distributions at marked positions. (a) S_a; (b) S_b; (c) S_c; (d) S_d

表 1 能量模型中的 λ 、 $Q(x)$

Table 1 λ and $Q(x)$ in energy model

Item	Ideal reflection stripe	Diffuse reflection stripe	Specular reflection stripe	Weak reflection stripe
λ	$\lambda=1$	$\lambda>1$	$\lambda>1$	$\lambda<1$
$Q(x)$	$Q(x)\ll\lambda G_0(x), Q(x)$ is negligible	$Q(x)<\lambda G_0(x), Q(x)$ has effect on $f(x)$	$Q(x)<\lambda G_0(x), Q(x)$ has great effect on $f(x)$	$Q(x)\ll\lambda G_0(x), Q(x)$ is negligible

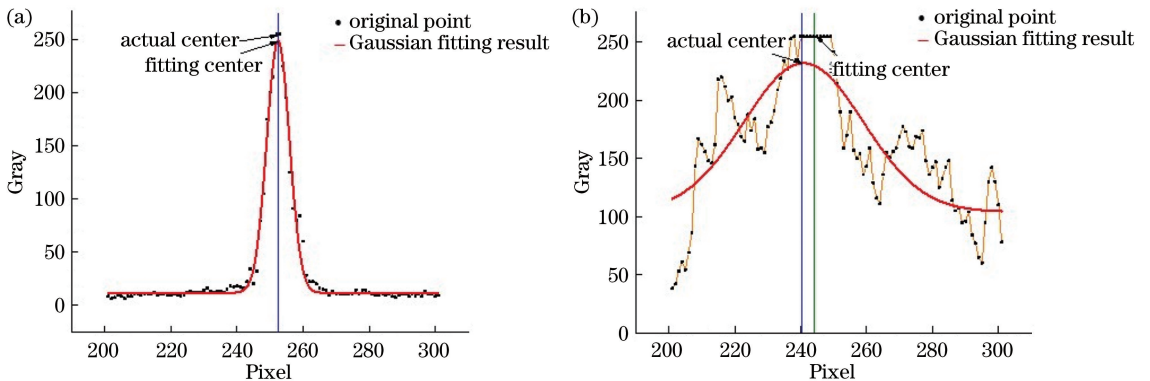


图 3 单高斯拟合结果。(a)近视理想光条;(b)强镜面反射光条

Fig. 3 Results of single Gaussian fitting. (a) Approximately ideal light stripe; (b) strong specular reflection stripe

3 G-L 分峰拟合模型

由各类光条的截面能量观察、分析可知:单曲线拟合算法能较好地提取近似理想光条和弱反射光条

的中心,但对强镜面反射光条和漫反射光条提取效果不理想,主要是因为在两类光条的能量模型中掺杂了较多的环境光或噪声能量,使得高斯主分量权重降低;光条截面能量分布曲线不再是高斯单峰

曲线,而成为由多个极值点组成的多峰曲线。为此,在单高斯拟合无法完成光条中心提取的情况下,可考虑通过分峰拟合的方式来获取准确的光条中心。

分峰拟合的基础是曲线拟合,其为光谱分析、精密测量中常用方法^[17-18]。分峰拟合主要分为多高斯拟合、多洛伦兹拟合,以及多高斯-洛伦兹拟合^[19]等。结构光条截面中明确“调制”高斯能量 $\lambda G_0(x)$ 为主分量,其余能量 $Q(x)$ 为次分量。高斯主分量为高、窄型分布,次分量呈扁、宽型分布,该特点正好符合“高斯拟合适合较高、窄分布,洛伦兹拟合更适合较扁、宽分布”的原则,因此考虑用高斯函数和洛伦兹函数线性组合的高斯-洛伦兹法实现拟合,拟合模型为

$$F(x) = pG(x) + (1 - p)L(x), \quad (2)$$

式中: $G(x)$ 为高斯主峰; $L(x)$ 为洛伦兹次峰; p 为高斯主峰部分占的比例; $G(x)$ 、 $L(x)$ 的计算过程分别为

$$G(x; A, B, C) = A \exp\left[-\left(\frac{x - C}{B}\right)^2\right], \quad (3)$$

$$L(x; D, E) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{D}{(x - E)^2 + D^2} \right], \quad (4)$$

式中: $G(x)$ 包含 3 个参数, A 、 B 为尺度相关参数, A 为主峰强度, C 为主峰位置。 $L(x)$ 包含 2 个参数, D 为次峰半峰全宽, $D \in (0, +\infty)$, E 为次峰位置, $E \in (0, +\infty)$,其中 D/π 为峰强度。图 4 为对应的分布曲线。

光条截面上 m 个像素点 $[x_j, R(x_j)]$,像素点序号 $j=1, 2, 3, \dots, m$,构建 G-L 拟合的目标函数 M :

$$M = \min \sum_{j=1}^m [R(x_j) - F(x_j; p, A, B, C, D, E)]^2. \quad (5)$$

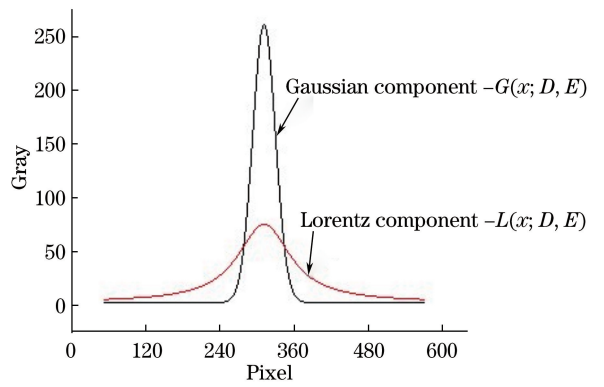


图 4 高斯和洛伦兹分量的分布曲线
Fig. 4 Distribution curves of Gaussian and Lorentz components

将 G-L 拟合问题转变成多元非线性函数的极小值求解问题。采用共轭梯度法作为该非线性优化的求解方法,采用 FR 公式来确定搜索方向,以 0.618 法完成最佳步长的一维搜索。

4 基于 G-L 分峰拟合的光条中心提取

基于 G-L 分峰拟合的光条中心提取流程如图 5 所示。首先针对各类光条在峰值能量上的差异情况,对光条图像进行归一化处理;为降低曲线拟合的运算量,加快拟合速度,对光条 ROI 进行提取;随后对光条 ROI 的光条截面能量分布进行 G-L 分峰拟合,得到光条的拟合中心初始位置;最后对光条进行去洛伦兹分量处理,对处理结果采用灰度重心法进一步精确光条中心位置。

4.1 灰度归一化

4 种类型光条图像的对比度区别较大,亮度分布不平衡,比如弱反射光条图像和强镜面反射光条图像的光条峰值位置虽均为光条中心,但峰值能量

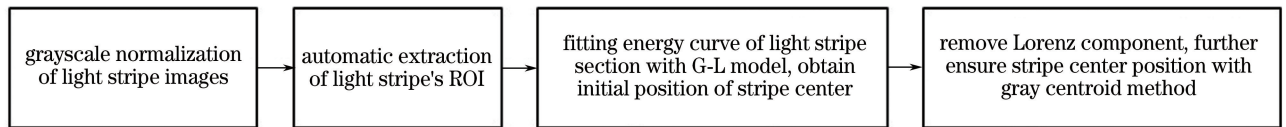


图 5 G-L 分峰拟合提取光条中心流程

Fig. 5 Flow chart of light stripe center extraction process based on G-L decomposition peak fitting

区别较大。为方便后续处理,降低外部环境对图像造成的影响,对光条图像进行灰度归一化处理,归一化原理为

$$n(z) = 255 \times \left(\frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \right), \quad (6)$$

式中: z 、 $n(z)$ 为归一化前、后值; z_{\min} 、 z_{\max} 为原始图

像的灰度最小值和最大值。图 6 为弱反射光条图像的归一化前后对比图。

4.2 光条 ROI 自动提取

线结构光条图像中,用于测量的有效信息仅为光条所在区域及其附近区域的像素点。拟合法提取光条中心时,如对整个图像的光条截面进行拟合处

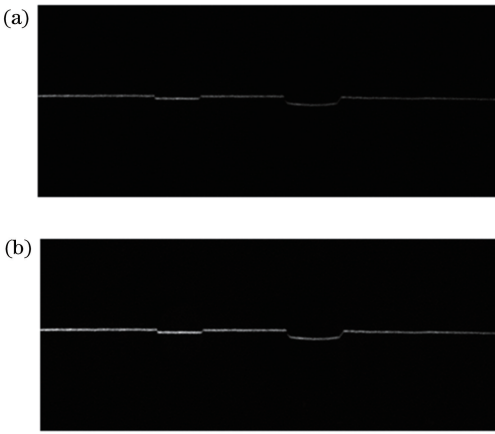


图6 弱反射光条图像的归一化。(a)归一化前;(b)归一化后
Fig. 6 Normalization of weak reflection light stripe image.
(a) Before normalization; (b) after normalization

$$\begin{cases} M_{i1} = \sum_{k=0}^i k \cdot h_k / \sum_{k=0}^i h_k \\ M_{i2} = \sum_{k=i+1}^{255} k \cdot h_k / \sum_{k=i+1}^{255} h_k \end{cases}, \sigma_i^2 = \sum_{k=0}^i h_k \cdot \sum_{k=i+1}^{255} h_k \cdot (M_{i1} - M_{i2})^2, \quad (7)$$

式中: h_k 为前图像中灰度等级为 k 的像素个数, $0 \leq i, k \leq 255$ 。

2) 连通分量提取

对 Otsu 处理后光条图像 P 采用基于条件膨胀的连通分量提取算法,得到 P 中符合条件的连通区域。算法原理为

$$X_k = (X_{k-1} \oplus T) \cap P, k = 1, 2, 3, \dots, \quad (8)$$

式中: X_0 为 P 中灰度值为 i_{\max} 的任意一点; T 为 3×3 的方形结构元; $X_k = X_{k-1}$ 为连通区域提取收敛条件,提取结果存入有效区域集 Y 。

3) 干扰区域去除

连通区域提取结果 Y 中仍然存在散乱分布的面积大小不一的干扰区域,如图 7(b)中标注的 #1、

理,不仅运算量大,而且会因为引入的噪声过多而影响提取精度,因此提取光条 ROI 是非常有必要的。

光条 ROI 的提取算法流程如下:

1) 采用 Otsu 初步提取光条

结合结构光图像对比度较大的特点,采用最大类间方差(Otsu)法^[20]区分归一化光条图像的背景和目标,以初步提取光条。先选定 Otsu 法的初始灰度划分级 $i=128$,分别对划分后的两部分像素数值求加权平均 M_{i1}, M_{i2} ,求 2 个加权平均值的方差 σ_i^2 ,如下式所示;依次递增灰度划分级 i ,以方差最大的灰度划分级 i_{\max} 作为阈值,区分光条图像的背景和目标,灰度值大于 i_{\max} 的像素点保留原灰度,小于 i_{\max} 的置 0。对图 7(a)光条原始图的 Otsu 初步提取结果如图 7(b)所示。

#2、#3、#4 等区域,因此必须先剔除这些非光条的干扰区域。此处,以各连通区域的形状因子作为干扰区域与光条有效区域的判别条件,形状因子 r 的计算公式为

$$r = S_{y_i} / (\pi d_{\max}^2), \quad (9)$$

式中: S_{y_i} 为连通区域 y_i 的面积, $y_i \in Y$; d_{\max} 为 y_i 的中心到该连通区域边缘轮廓像素的最大距离。由于光条有效区域为细长带状连通区域,而干扰区域为类圆形连通区域。带状光条区域的 r 偏小,类圆形干扰区域的 r 偏大,因此可以比较 r 值的大小,即通过设定 r 的阈值 r_0 来剔除干扰区域。 r_0 通常取 0.15,大于 r_0 的为待剔除干扰区域,其他为光条 ROI。干扰区域去除结果如图 7(c)所示。

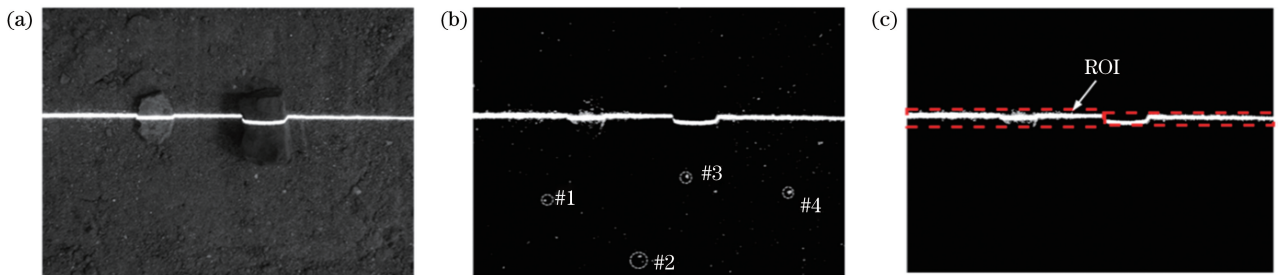


图7 光条 ROI 提取。(a)原始图;(b) Otsu 初步提取后;(c)干扰区域去除后
Fig. 7 Extraction of light stripe ROI. (a) Original image; (b) after Otsu initial extraction;
(c) after removal of interference regions

4.3 G-L 分峰拟合

基于前述 G-L 分峰理论,利用构建的 G-L 模型对 4 类光条图像的截面灰度曲线进行拟合。在进行 G-L 分峰拟合之前,为了提高拟合速度和精度,需先确定拟合模型的相关参数初始值。图像 I 的光条 ROI 区域大小为 $m \times n$,对其第 c 列上光条 I_c 截面灰度分布进行拟合。先将 I_c 以灰度阈值 240 进行划分,定义小于 240 的像素集为 U ,含 N 个像素点,其余为像素点组成集合 V 。

首先确定拟合分量的分峰强度参数 A 和 D 。光条能量分布中饱和像素多为邻近光条中心像素,对拟合模型而言,饱和像素多为高斯主分量拟合像素,其余多为洛伦兹分量拟合像素,因此可用像素集

U 确定 A 、 D 的初始值。高斯主分量的峰顶位置参数 C 以像素集 V 中最长连续像素段 m 的起始位置 i_m 作为初值。高斯主分量的方差参数 B 取最长连续像素段的长度 l_m 为初值。洛伦兹次分量的峰顶位置参数 E 的取值因不同的截面灰度分布而不同,因此 E 的初值取 1。拟合模型的参数初始取值为

$$[A, B, C, D, E] = \left[255 - D, l_m, i_m, N/\pi \sum_{i=1}^N u_i, 1 \right]. \quad (10)$$

图 8 为各种类型光条截面灰度分布的 G-L 分峰拟合结果,每种类型光条的截面灰度分布均能拟合得到一条高斯主分量曲线和一条洛伦兹次分量曲线。

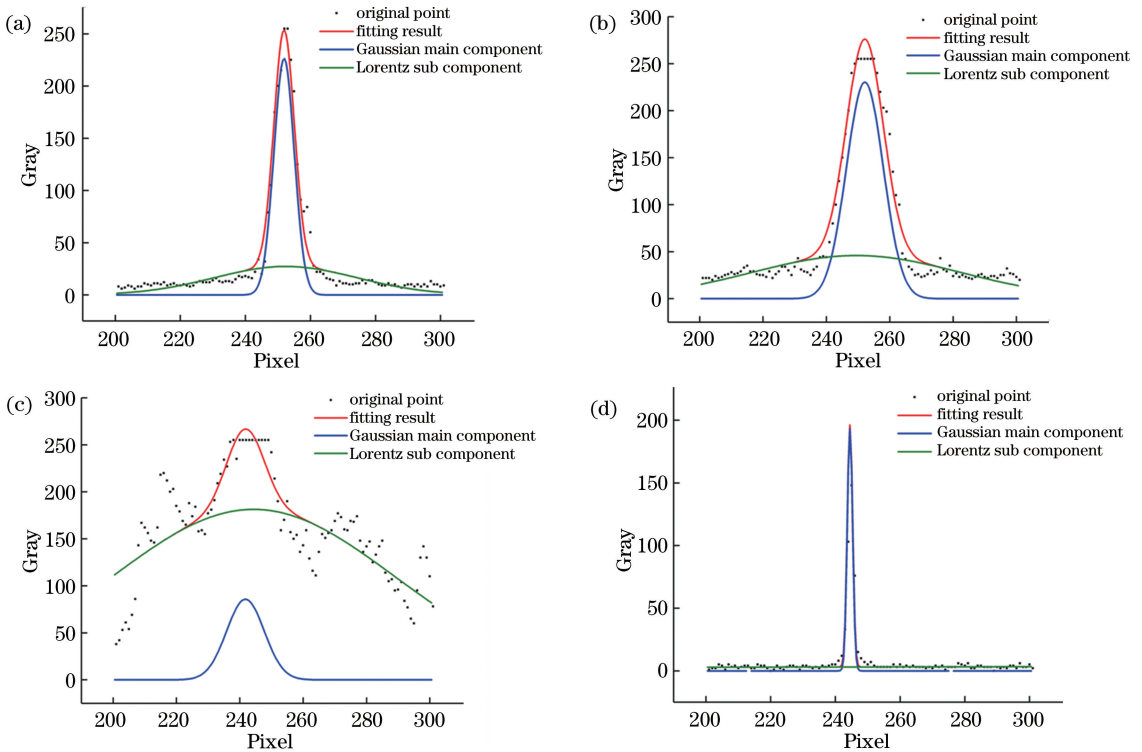


图 8 各类光条 G-L 拟合结果。(a)近似理想光条;(b)强漫反射光条;(c)强镜面反射光条;(d)弱反射光条

Fig. 8 G-L fitting results of various types of light stripes. (a) Approximately ideal light stripe; (b) strong diffuse reflection stripe; (c) strong specular reflection stripe; (d) weak reflection stripe

4.4 光条中心提取

经过上述步骤可获得各类光条中心的初始拟合位置,但仍需进一步精确。依据高斯分布特点,光条 (I_c) 95% 的能量集中在 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 范围内,对于拟合得到的高斯主分量 $G(x)$,该范围 Q 为 $(C - \sqrt{2}B, C + \sqrt{2}B)$ 。截取光条 (I_c) 截面落在范围 Q 内的光条信息 I_Q ,去除其中的洛伦兹分量 (L_Q) 信息后,得到范围 Q 内剩余的光条信息 R_Q ,再对 R_Q 内像素点采用灰度重心法得到更加精确的光条中心

位置 v ,计算公式为

$$\begin{cases} R_Q = I_Q - L_Q \\ v = \frac{\sum_{w=C-\sqrt{2}B}^{C+\sqrt{2}B} w \cdot g(w)}{\sum_{w=C-\sqrt{2}B}^{C+\sqrt{2}B} g(w)}, \end{cases} \quad (11)$$

式中: w 为 Q 内像素点行(列)位置; $g(w)$ 为 w 处的灰度值, $g(w) \in R_Q$ 。

5 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性,及其相对于其他

方法在提取精度及效率方面的表现情况,选用了传统的几何中心法、单高斯曲线拟合法、Steger法与本文方法进行对比实验。为表述方便,上述方法依次称为方法1、方法2、方法3、方法4。选用不同光照条件、不同类型路面采集的4类典型光条图像作为对比实验的源图像,如图9所示。

4种方法对各类光图像的光条中心提取结果如图10所示,每个子图中从上至下依次为4种算法的提取结果。由结果可知:方法1、2、4对近似理想光

条和弱反射光条均有较好地提取效果;方法3受高斯模板大小的影响对这两类光条的中心提取效果较差,出现多处断裂(D1、D2)和两端丢失(A1、A2)的情况。方法1、2、3对强漫反射光条和强镜面反射光条均无法得到准确地提取结果,方法1中出现了不同程度的提取偏差(C1、C2、B1);方法2对漫反射的直线光条提取不稳定(比较C3、C5)。只有方法4能准确得到强镜面反射光条中心位置,其他3种方法均不理想(比较B1、B2、B3、B4)。

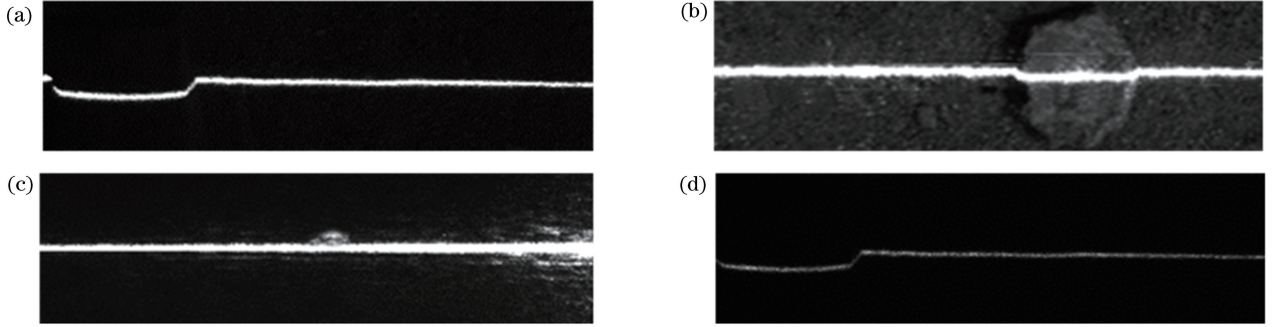


图9 对比实验用4类光条图像。(a)近似理想光条;(b)强漫反射光条;(c)强镜面反射光条;(d)弱反射光条
Fig. 9 Four types of light stripe images used in contrast experiment. (a) Approximately ideal light stripe; (b) strong diffuse reflection stripe; (c) strong specular reflection stripe; (d) weak reflection stripe

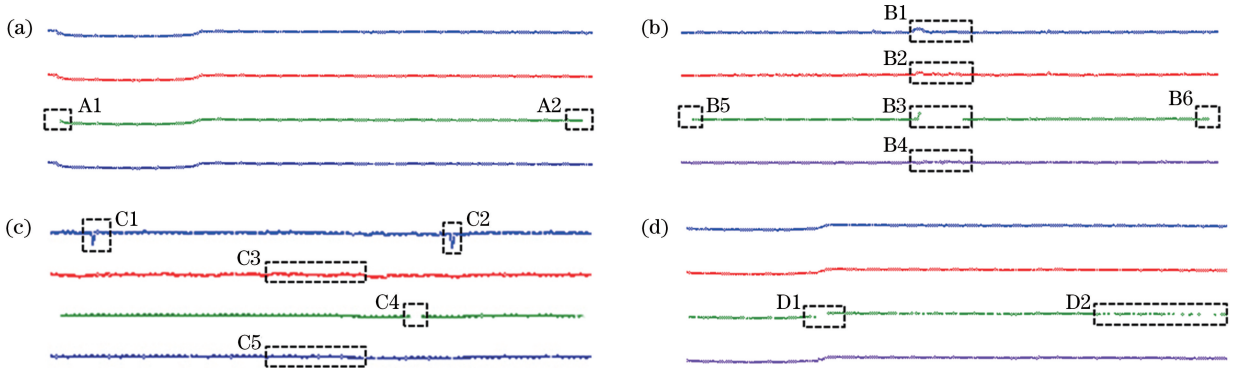


图10 光条中心提取结果。(a)近似理想光条;(b)强漫反射光条;(c)强镜面反射光条;(d)弱反射光条

Fig. 10 Extraction results of light stripe centers. (a) Approximately ideal light stripe; (b) strong diffuse reflection stripe; (c) strong specular reflection stripe; (d) weak reflection stripe

上述比较仅从宏观上对光条中心提取结果进行了比较,可以判断提取的准确性。为了量化比较4种方法对不同类型光条的中心提取精度,选择文献^[21-22]中提出的基于光条能量的置信度评价算法对光条中心提取结果进行准确性评价,置信度值越高,提取结果越准确。以上述各光条的提取中心位置 x_c 及其灰度 p_c 作为高斯置信度评价模型的 μ 值和峰值 A 。图11为4种方法提取中心的置信度评价结果,表2为平均置信度 C_a 统计结果。

由图11和表2结果可知,光条不同位置提取的光条中心置信度值波动较大,但对同类光条的相同

位置,置信度最大的提取中心多由本文方法(方法4)得到。对近似理想光条和弱反射光条,各种方法的平均置信度值 C_a 较为接近。对强漫反射和强镜面反射光条,本文方法的 C_a 值均大于其他3种方法,同类光条图像的 C_a 最大相差1618.36。由此可见,本文方法相较于其他3种方法不仅具有良好的提取准确性,而且具备较高的提取精度。

在准确度和精度比较的基础上,进一步统计4种方法对各类光条的提取时间,比较其提取效率。图12为提取耗时统计结果。由此可知:针对不同类型的光条,方法1的提取效率最高且稳定,其他方法

均有所变化;方法3耗时波动最大,对强漫反射光条耗时最长,约为42 s,而对弱反射光条耗时仅约为1 s;方法2和本文方法的耗时相对较稳定。所有方

法中,本文方法对弱反射光条和近似理想光条的提取耗时最长,但对强漫反射和镜面反射光条而言,其耗时小于方法3。

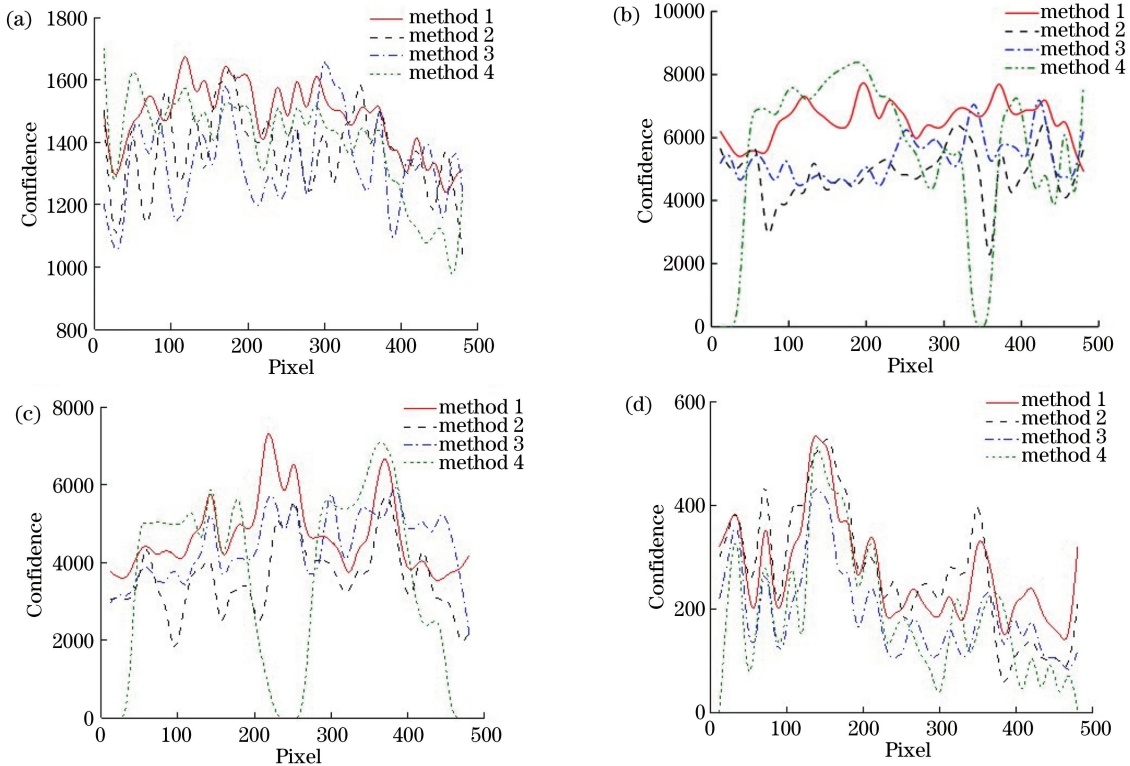


图 11 光条中心信度评价结果。(a)近似理想光条;(b)强漫反射光条;(c)强镜面反射光条;(d)弱反射光条
Fig. 11 Reliability evaluation results of light stripe centers. (a) Approximately ideal light stripe; (b) strong diffuse reflection stripe; (c) strong specular reflection stripe; (d) weak reflection stripe

表 2 平均置信度统计表

Table 2 Statistics of average confidence

Method	Average confidence of extracted centers C_a			
	Approximately ideal light stripe	Strong diffuse reflection stripe	Strong specular reflection stripe	Weak reflection stripe
Method 1	1372.15	4903.02	3592.5	189.08
Method 2	1332.15	5041.37	4401	192.15
Method 3	1394.65	5550.82	3588.93	271.15
Method 4	1407.35	6521.38	4685	275.13

由上述对比实验结果可知:本文方法对不同类型光条图像的提取适用性强、准确度高,其他3种方法的适用性较差。如Steger法能较好地提取漫反射光条中心,但受高斯模板尺度的影响,却不适用于弱反射光条;几何中心法虽能快速、准确提取弱反射光条中心,却不适用于受干扰较大的漫反射光条图像。在提取精确性方面,本文方法提取结果的平均置信度值均高于其他3种方法,对强漫反射和强镜面反射光条图像的优势尤为明显。在提取效率方

面,本文方法整体耗时较高,但对强漫反射和强镜面反射光条的提取耗时最短时仅为当前提取效果最好的Steger法的1/2。

6 结 论

为精确提取不同成像质量结构光条的中心位置,研究了基于G-L分峰拟合的光条中心提取方法。首先根据光条成像质量不同的对光条进行分类;结合光条能量模型,分析了各类光条能量组成;

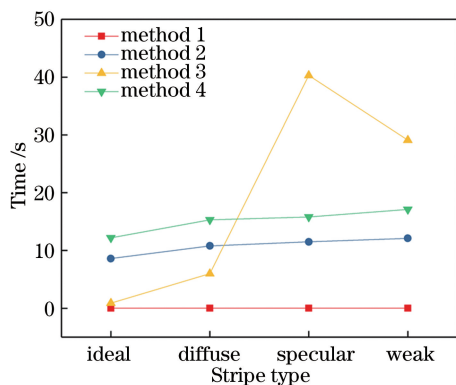


图 12 提取耗时对比

Fig. 12 Time consumption comparison of extraction

依据组成特点,构建了 G-L 分峰拟合模型;依次对光条图像进行归一化、自动光条 ROI 提取和 G-L 分峰拟合处理;最后通过去洛伦兹分量和灰度重心提取得到精确的光条中心。本文方法与其他传统方法的提取精确度和效率的对比实验表明:本文方法对不同质量光条图像的提取适用性强、精确度高,但整体耗时较长,然而对于强漫反射和强镜面反射光条的提取耗时要优于当前提取效果最好的 Steger 法。由于耗时较长,本文方法仅限于光条中心的离线提取,因此,如何优化拟合模型以提高拟合速度成为后续研究的重点。

参 考 文 献

- [1] di Paola F, Inzerillo L. 3d reconstruction-reverse engineering-digital fabrication of the egyptian palermo stone using by smartphone and light structured scanner [J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, XLII-2: 311-318.
- [2] Zhang H M, Yang X C, Chen G G. 3D reconstruction of parts to be processed by laser remanufacturing robot [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11): 2937-2944.
张海明, 杨洗陈, 陈高贵. 激光再制造机器人待加工零件形貌三维重建 [J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2937-2944.
- [3] Li W, Sun Z, Hao X, *et al.* Measuring method for asphalt pavement texture depth based on structured-light technology [J]. Advances in Transportation Studies, 2015, 36: 75-84.
- [4] Zhan D, Yu L, Xiao J, *et al.* Multi-camera and structured-light vision system (MSVS) for dynamic high-accuracy 3D measurements of railway tunnels [J]. Sensors, 2015, 15(4): 8664-8684.

- [5] Xie Z X, Zhang A Q. Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of ultra-large-scale line structured-light sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0315001.
解则晓, 张安祺. 超大尺度线结构光传感器内外参数同时标定 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0315001.
- [6] Zhong K, Li Z W, Zhou X H, *et al.* Enhanced phase measurement profilometry for industrial 3D inspection automation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76 (9/10/11/12): 1563-1574.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Jiang Y F, Jiang K Y, Lin J Y. Extrication method for sub-pixel center of linear structured light stripe [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52 (7): 071502.
江永付, 江开勇, 林俊义. 线结构光光条中心亚像素精确提取方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52 (7): 071502.
- [10] 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.
- [11] Liu Z, Li S, Feng C. Laser stripe center extraction based on cross-correlation algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 0508004.
刘振, 李声, 冯常. 基于互相关算法的激光条纹中心提取 [J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0508004.
- [12] Wang Z H, Zhang Z W. Adaptive direction template method to extract the center of structured light [J]. Laser Journal, 2017, 38(1): 60-64.
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.
- [13] He L Y, Wu S S, Wu C Y. Robust laser stripe

- extraction for three-dimensional reconstruction based on a cross-structured light sensor [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 823-832.
- [14] Wang Y, Jiang S S. Extracting center pixel coordinates from human body laser stripe image with Bezier curve fitting method [J]. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 2015, 8(3): 575-584.
- [15] 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条纹中心提取方法 [J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0308006.
- [16] Li T T, Yang F, Li C, *et al.* Exposure time optimization for line structured light sensor based on light stripe reliability evaluation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0112005.
李涛涛, 杨峰, 李策, 等. 基于光条信度评价的线结构光传感器曝光时间优化 [J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0112005.
- [17] Li Y, Xu Y, Zhao X M, *et al.* Multispectral image segmentation by fuzzy clustering algorithm used Gaussian mixture model [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 509-518.
李玉, 徐艳, 赵雪梅, 等. 利用高斯混合模型的多光谱图像模糊聚类分割 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 509-518.
- [18] Wang H, Zhao J, Zhao J W, *et al.* Ultra-precision position detection for linear motor mover based on multi-peak fitting [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(4): 935-945.
王辉, 赵静, 赵吉文, 等. 基于多峰拟合的直线电机定子位置精密测量方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(4): 935-945.
- [19] Grabovskis A, Marcinkevics Z, Rubins U, *et al.* Two-stage multi-Gaussian fitting of conduit artery photoplethysmography waveform during induced unilateral hemodynamic events [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2015, 20(3): 035001.
- [20] Sha C S, Hou J, Cui H X. A robust 2D Otsu's thresholding method in image segmentation [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2016, 41: 339-351.
- [21] Xu J Z. Research on methods and evaluation of stripe center extraction in structured light 3D measurement [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012: 45-59.
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: 45-59.
- [22] Wang S, Xu J Z, Zhang Y X, *et al.* Reliability evaluation method and application for light-stripe-center extraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1115001.
王顺, 徐静珠, 张益昕, 等. 结构光光条中心点信度评价方法与应用 [J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1115001.