

文章编号 1004-924X(2025)15-2414-10

道岔参数在线测量中激光条纹中心自适应提取

荆颖春^{1,2}, 何启欣^{1,2*}, 崔建英^{1,2}, 张 政^{1,2}, 冯其波^{1,2}

(1. 北京交通大学 物理科学与工程学院, 北京 100044;

2. 北京交通大学 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要: 激光条纹中心的提取精度是影响结构光视觉测量精度的核心因素。在结构光道岔参数在线测量系统中, 道岔搬动引起的激光条纹位置变化及环境干扰会造成激光条纹亮度、宽度分布不均匀, 影响系统的测量精度。针对上述问题, 提出了一种基于改进 Steger 算法的光条中心自适应提取方法, 该方法具有环境适应能力强、精度高等特点。通过 Otsu 阈值分割结合 Two-Pass 算法得到有效光条区域, 从而消除杂散光的干扰, 提高计算速度; 随后, 通过细化算法提取光条骨架并确定初始中心点, 提出一种基于邻域几何法线方向的光条宽度计算方法。最后, 通过关联光条宽度与高斯核参数 σ , 实现卷积核尺寸的自适应调整, 最终获得光条亚像素级中心点。测量结果显示, 标准量块的平均误差在 0.09 mm 以内, 适合道岔参数在线测量的应用。

关键词: 视觉测量; 线结构光; 中心线提取; Steger; 自适应

中图分类号: TP394.1; TH744.5 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253315.2414 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253315.2414

Adaptive extraction of laser stripe center for on-line measurement of turnout parameters

JING Yingchun^{1,2}, HE Qixin^{1,2*}, CUI Jianying^{1,2}, ZHANG Zheng^{1,2}, FENG Qibo^{1,2}

(1. School of Physical Science and Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. MOE Key Lab of Luminescence and Optical Information,

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

* Corresponding author, E-mail: heqixin@bjtu.edu.cn

Abstract: The accuracy of laser stripe center extraction critically determines the precision of structured-light vision measurements. In an online structured-light turnout-parameter measurement system, variations in stripe position due to turnout movement and environmental disturbances produce uneven stripe brightness and width, degrading measurement accuracy. To address these issues, an adaptive extraction method for the stripe center is proposed based on an improved Steger algorithm, offering enhanced environmental robustness and high precision. The method first isolates the effective stripe region using Otsu thresholding combined with a Two-Pass algorithm to suppress stray-light interference and accelerate com-

收稿日期: 2025-04-14; 修订日期: 2025-05-07.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 51935002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. 2023JBMC024)

putation. The stripe skeleton is then extracted and initial center points are refined. A neighborhood geometric normal-direction computation is introduced to determine the stripe cross-sectional width. By correlating the measured stripe width with the Gaussian kernel parameter σ , the convolution-kernel size is adaptively adjusted, yielding an accurate sub-pixel centroid of the stripe. Evaluation on a standard calibration block demonstrates an average measurement error within 0.09 mm. The proposed adaptive approach exhibits strong anti-interference capability and high accuracy, making it suitable for online measurement of turnout parameters.

Key words: vision measurement; line structured light; centerline extraction; Steger; adaptive

1 引 言

道岔是列车从一股轨道转换到另一股轨道的线路设备,可以实现铁路不同轨道之间的相互连接。当列车需要通过道岔改变前进方向时,由于列车车轮冲击力的影响,尖轨部分相对于基本轨的横向和纵向间隙经常发生变化,一旦间隙超过标准距离,会产生安全问题。因此,需要一套高精度的测量方法来实时测量道岔参数,以保障列车换轨过程的安全性及稳定性。

线结构光视觉测量技术作为一种主动视觉测量方法,具有实时性强、非接触、灵活性高等优点,在道岔参数在线测量中展现出优越的测量性能^[1-2]。在线结构光视觉测量中,理想的光条是一条单像素宽的细线,但通常线激光具有一定的像素宽度,条纹中心坐标提取的偏差将直接影响被测目标的测量精度^[3]。在道岔参数测量时,由于道岔的搬动,不同道岔状态测量距离不同,而测量距离的改变会导致光条偏离最佳聚焦位置。此外,在实际应用中,测量系统还需充分考虑天气、温度等环境因素的影响。这些情况均会对光条的形状、亮度以及宽度造成一定的影响,进而影响道岔参数的准确测量。

传统的线结构光中心条纹提取方法分为像素级和亚像素级两大类。其中,亚像素级方法包括灰度质心法^[4-5]、Steger算法^[6]等。灰度质心法计算速度较快,但对噪声和灰度分布敏感,不适合现场应用。Steger算法是利用Hessian矩阵计算光条的法线方向,将法线方向上的极值点作为最终的光条中心。在经典激光条纹中心提

取算法的基础上,王福斌等^[7]采用二次加权灰度重心法来得到初始坐标,并结合主成分分析分解特征矩阵获得亚像素级别的坐标点,该方法降低了计算复杂度,具有自适应性,精度与Steger相当,但其方法抗噪声能力一般。李伟明等^[8]根据光条在图像中的分布特点,通过所提的内部推进方法,在光条内部沿光条中心向前或向后推进,避免对图像内不含光条区域的访问,解决了中心提取断线的问题,方均根误差为0.27 pixel,但对起始点的定位和初始阈值的选取存在较高要求。王月华等^[9]通过Steger算法对不同类型的光条提取中心点,并利用这些结果作为训练样本来训练BP神经网络,在精度和效率方面具有显著优势。该方法光条中心提取误差均值达到0.12 pixel,但需要大量的训练数据来调整网络权值,计算消耗相对较大。在Steger方法中,通过高斯卷积计算图像中每个像素的Hessian矩阵。 σ 是高斯函数的均方差,控制着平滑效果, σ 越大,平滑程度越好,但 σ 过大会造成图像特征过分模糊。而 σ 的选取与光条的宽度有关,且影响光条中心的提取精度^[10]。因此,当图像中光条宽度变化较大时,采用单一的均方差 σ 会造成提取误差。

为了实现精度高、抗干扰性强的道岔参数测量,本文提出了一种基于改进Steger算法的自适应光条中心提取方法。首先,对采集的道岔线结构光图像进行预处理,如滤波和阈值分割,以减少环境光干扰。随后,采用Zhang快速并行细化算法提取光条骨架,并将骨架点作为后续步骤的初始点。基于邻域内相邻点的几何关系,提出光

条中心点法线方向的计算方法,并通过计算光条中心像素点处的宽度,确定相应位置的均方差 σ 。最后,结合 Steger 算法获取高精度的线结构光条纹亚像素中心坐标,该方法可根据光条在不同位置的宽度自适应调整卷积高斯核参数 σ ,具有较好的稳定性和精确度。

2 图像采集与分析

2.1 测量系统结构

道岔的关键几何参数包括尖轨密贴量、斥离量、基本轨爬行量与尖轨爬行量。如图 1 所示,为左开道岔实物图,左侧尖轨与基本轨处于密贴状态,其尖轨与基本轨之间的横向间隙称为密贴量;右侧处于斥离状态,此时,尖轨与基本轨之间的横向间隙称为斥离量;尖轨与基本轨沿平行于轨道方向发生的位移量称为尖轨爬行量和基本轨爬行量。

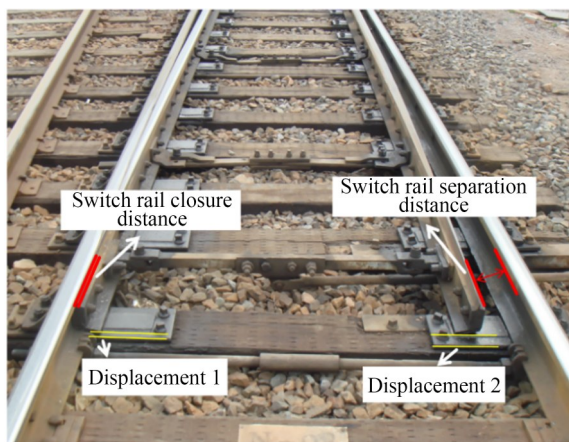


图 1 道岔实物图与关键几何参数

Fig. 1 Physical drawings and key geometric parameters of turnouts

为了实现道岔参数测量,设计的道岔测量系统如图 2 所示。该系统由工业相机、线激光器、道岔试块、标准量块、计算机及数据处理软件组成。每次道岔搬动后,测量系统进行图像采集和处理,提取基本轨试块、尖轨试块及标准量块上特征点的空间坐标,并计算基本轨试块与尖轨试块相对于标准量块的位移量,进一步求取尖轨、基本轨爬行量,以及道岔处于密贴或斥离状态时尖轨位移量,实现对道岔参数的测量。

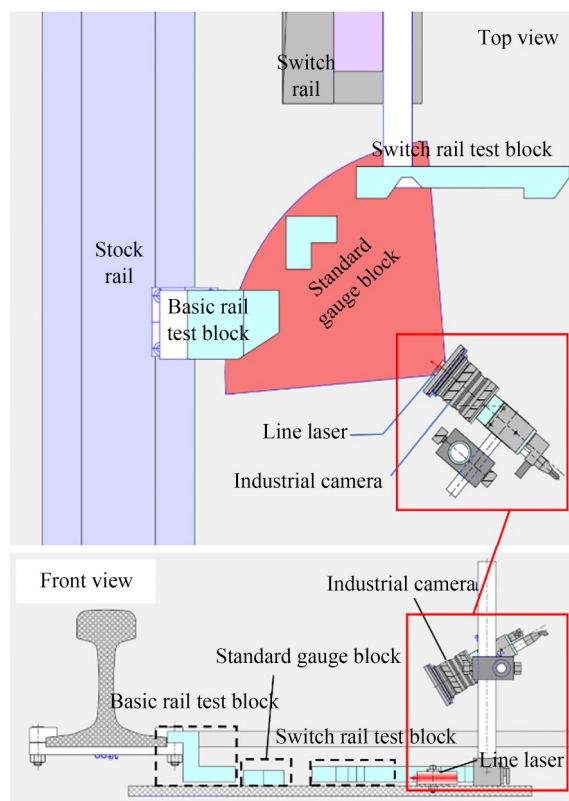


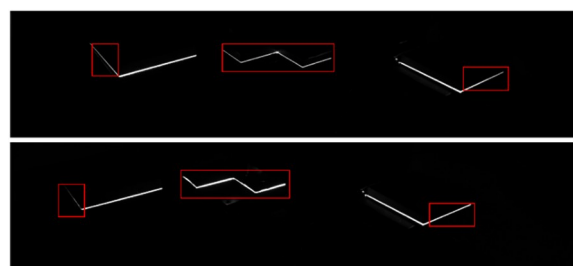
图 2 道岔测量系统

Fig. 2 Turnout measuring system

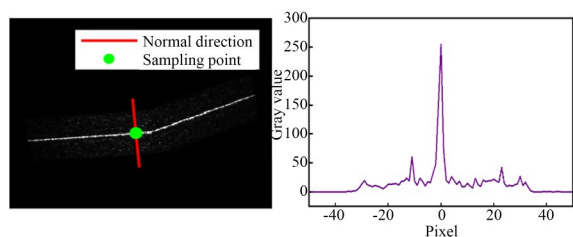
2.2 光条特性分析

理想情况下,激光器投射出的线结构光光条截面光强呈现高斯分布且光条宽度一致^[11]。然而,在现实测量中,光条灰度分布受测量位置、现场环境干扰、激光器发光质量及被测物体表面材质等因素的影响。

在道岔参数测量系统的应用中,由于道岔搬动导致激光器与被测物体的距离发生变化,光条可能偏离最佳焦平面,导致条纹宽度发生变化且分布不均匀。道岔搬动前后光条图像如图 3(a)所示,可见在同一幅图像中,不同试块上的条纹宽度不同,且在搬动前后,同一试块的条纹宽度发生了明显变化。对于室外在线测量环境,环境光照的变化较大,测量系统所处环境存在显著温差,昼夜温度变化可能导致小水珠附着在被测物体表面,形成水雾层。水雾层会导致光的吸收、反射及多次散射,从而增加光条的背景噪声,使图像亮度不均匀,光条灰度分布失真。有水雾干扰时的光条图像如图 3(b)所示,由于水雾的附着,光条截面的灰度分布发生改变,激光条纹的亮度明显变小,且



(a) 道岔搬动前后光条图像
(a) Light bar image before and after turnout movement



(b) 有水雾干扰时的光条图像
(b) Light bar image with water spray interference

图 3 光条变化图像

Fig. 3 Light bar change images

分布不均匀,光条宽度显著减小。在道岔参数测量过程中,这些因素均会不同程度地影响光条的亮度和宽度,进而影响光条中心的准确提取,降低测量系统的精度^[12]。基于此,本文提出相应的光条中心提取方法,以提高道岔参数测量系统在复杂环境下的精度和稳定性。

3 光条中心提取

3.1 光条宽度对传统 Steger 法的影响

Steger 算法的基本原理包括两个步骤:第一步,激光条纹中心线的法线方向可以从 Hessian 矩阵求出;第二步,沿着法线方向进行泰勒展开,即可求出激光条纹中心点的亚像素位置。Hessian 矩阵可以表示为:

$$H(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y^2} \end{pmatrix} \otimes Z(x, y) = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: $g(x, y)$ 为二维高斯函数, r_{xx}, r_{xy}, r_{yy} 为图像二阶偏导数,由图像像素点 $Z(x, y)$ 分别与高斯

核卷积得到。

在 Steger 方法中,通过与相应微分形式的高斯核函数进行卷积,以计算激光条纹图像上每个像素点的 Hessian 矩阵。高斯函数的均方差 $\sigma = w/\sqrt{3}$,它直接影响平滑效果:较大的 σ 值可以增强平滑度,降低噪声干扰,但如果 σ 过大,则可能导致光条纹模糊化,进而影响提取精度。因此, σ 的选取需要根据激光条纹的宽度进行调整。然而,传统的 Steger 算法采用固定的 σ 值,这可能会影响光条纹中心线提取的准确性和稳定性。

对基于 Hessian 矩阵的 Steger 算法中的高斯卷积核进行坐标规范化,得到 γ 规范化后的算子 $C^{[13]}$,如下:

$$C(u, v) = \sigma^2 |\lambda|_{\max}, \quad (2)$$

式中: $|\lambda|_{\max}$ 为 Hessian 矩阵的模最大特征值, C 值最大时,算法对光条中心的提取效果最好。

为验证 σ 对光条纹中心提取精度的影响,分析了 σ 对光条中心提取精度的影响,结果如图 4 所示。仿真生成 250×250 pixel 的光条图像,光条宽度 w 从 2 变化至 20 pixel,并在图像中加入均值为 0、方差为 5 的高斯噪声,以模仿实际成像条件下的噪声影响。图 4 展示了 σ 由 $1/\sqrt{3}$ 变化到 $70/\sqrt{3}$ (间距为 $1/\sqrt{3}$)时,光条中心点对应的 C 值变化曲线。光条宽度一定时,随着 σ 值的增大, C 值呈现出先增大后减小的形式,波峰 $C_{\max}$ 对应于 σ 的最优值。可以看出,不同宽度的光条对应

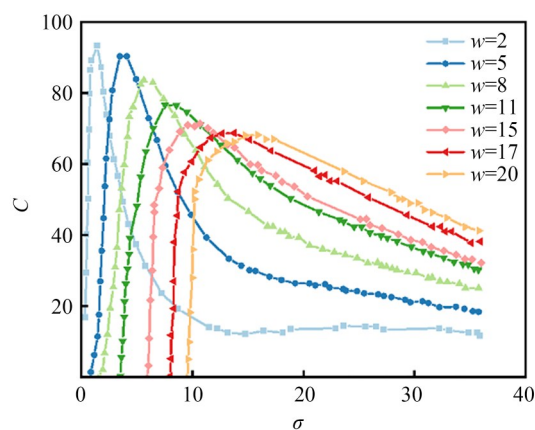


图 4 不同宽度光条对应的 C 值随 σ 的变化曲线

Fig. 4 Curves of C -values corresponding to light bars of different widths as a function of σ

的最优 σ 值不同。这证明了通过确定光条宽度来确定最优 σ 值的有效性。

3.2 宽度自适应 Steger 算法

为了在室外环境中精确获取光条中心的亚像素坐标,本文提出了一种改进的 Steger 算法自适应光条中心提取方法,该方法主要包括三个步骤:图像预处理、骨架提取和亚像素精度的激光条纹中心提取,算法流程如图 5 所示。

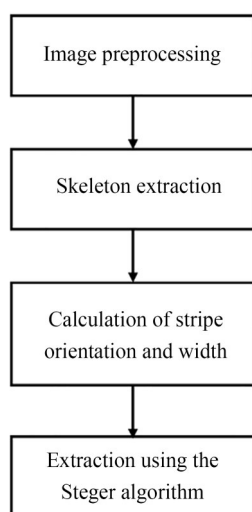


图 5 改进算法流程

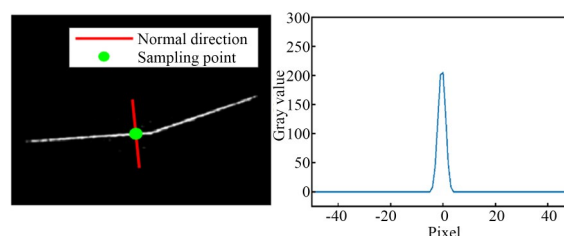
Fig. 5 Flowchart of improved algorithmic

激光条纹分割的目的是从原始图像中分离出代表激光条纹的区域,光条作为前景保留原始灰度,其余部分作为背景。针对室外环境下道岔测量时存在的光条灰度不均匀的影响,本文采用 Otsu 阈值分割^[14]结合直方图均衡化的方法,通过直方图均衡化改善光照不均匀问题、增强对比度,凸显光条区域,通过 Otsu 阈值分割自动适应图像,实现自动分割。

激光主体区域只占图像的一部分。因此,在对图像进行阈值分割后,保留图像中正确的连通域,不仅可以减少计算冗余、提高处理效率,还可以进一步消除杂散光对测量精度的影响;采用连通区域标记 Two-Pass 算法,使用四邻域进行连通区域标记,完成连通域的标记的同时也能获得各个连通域的面积,此时可以将面积过大或过小的连通域视为杂光予以去除,只保留下所预期的光条区域,减少计算冗余,提高测量精度^[15]。预处理后的光条及其灰度值分布如图 6(a)所示,与

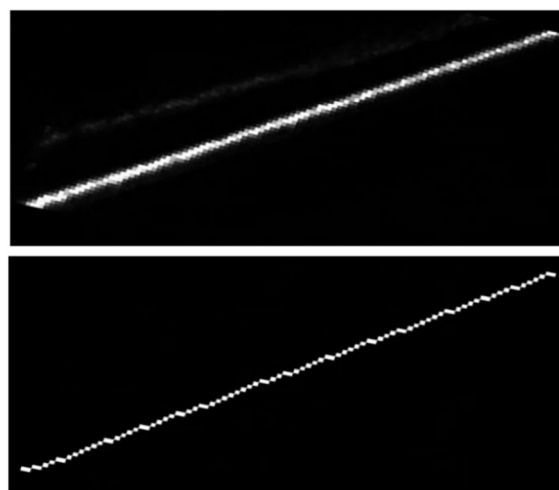
图 3(b)相比,预处理后的光条噪声显著降低且灰度值分布更符合激光的高斯分布。

下一步是提取该图像光条的骨架。骨架化是将原始多像素宽度的线结构细化为单像素宽度的过程,所提取的骨架点后续用于估算光条方向,并作为中心提取的初始参考点。并行细化算法^[16]是一种用于获取二值图像骨架的八邻域并行细化算法,该算法能准确地保留直线和角点的特征,具有细化后保持骨架完整的连通性和毛刺较少等优点,且迭代次数少,处理速度快,为后续法线方向计算与光条中心的提取奠定了基础^[17]。光条骨架提取结果如图 6(b)所示,光条骨架作为后续处理的初始中心点。



(a) 预处理后的光条及其灰度值分布

(a) Preprocessed light bars and their grey value distribution



(b) 骨架提取前后的光条图

(b) Laser streak map before and after extraction

图 6 图像处理结果

Fig. 6 Image processing result

在细化得到光条骨架基础上,本文提出一种基于相邻点几何关系的法线方向计算方法。其核心思想是通过局部线段法线的向量合成得到光条法线方向,计算示意图如图 7(a)所示。其中,

向量1与向量2分别表示线段 BC 和 AB 的法向量,向量3为待求 B 点的法向量。对于骨架图像中的每个中心点 $B(x_B, y_B)$,其法线方向的计算依赖于前后两点 $A(x_A, y_A)$ 和 $C(x_C, y_C)$ 。以点 B 为中心,在8邻域内搜索,遍历邻域内所有非零像素点。

$$N(B) = \{(x, y) \mid \max(|x - x_B|, |y - y_B|) \leq 1\}. \quad (3)$$

排除点 B 自身后,得到候选邻域点集合 $N'(B)$ 。若 $|N'(B)| < 2$,跳过该点(无法构造切线);否则,计算各邻域点与 B 的欧氏距离:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_B)^2 + (y_i - y_B)^2}, \forall (x_i, y_i) \in N'(B). \quad (4)$$

按距离升序排序,选取前两个最近邻点,分别标记为前驱点 A 和后继点 C ,以计算线段 AB 和 BC 在逆时针方向的单位法向量。线段 AB 的方向向量和法向量分别为:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{AB} &= (x_B - x_A, y_B - y_A) \\ \mathbf{n}_{AB} &= \left(-\frac{y_B - y_A}{|\mathbf{v}_{AB}|}, \frac{x_B - x_A}{|\mathbf{v}_{AB}|} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

线段 BC 的方向向量和法向量分别为:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{BC} &= (x_B - x_C, y_B - y_C) \\ \mathbf{n}_{BC} &= \left(-\frac{y_B - y_C}{|\mathbf{v}_{BC}|}, \frac{x_B - x_C}{|\mathbf{v}_{BC}|} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

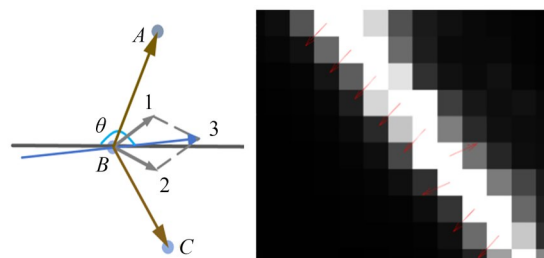
将两个单位法向量相加并单位化,得到点 B 的最终法线方向:

$$\mathbf{n}_B = \frac{\mathbf{n}_{AB} + \mathbf{n}_{BC}}{|\mathbf{n}_{AB} + \mathbf{n}_{BC}|}. \quad (7)$$

由此得到的光条中心初始点法线方向如图7(b)所示,该方法基于光条局部几何特征,能够精确捕捉光条宽度的变化。与其他法线求取方法相比,该方法采用全局最近邻点搜索的轻量化向量运算,具有更高的运算效率,更适用于实时测量场景。

在光条的灰度图像横截面中,一般光条宽度定义为光强下降到峰值强度 $1/e^2$ 时的宽度,设灰度最大值为 A ,则阈值为 $0.2A$,光条的初始宽度记为 $2w$ 。在中心点法线方向上遍历灰度值,记录满足上述条件的点,进而计算得到该光条的宽度矩阵。在Steger方法中, σ 的选取与激光条纹的宽度有关。由于传统Steger算法使用固定的 σ ,这会导致中心线提取的准确性和稳定性下降。

由于 $\sigma = w/\sqrt{3}$,本方法根据宽度矩阵中每个中心点的宽度值,动态设定匹配的 σ 值,并逐点应用Steger算法进行中心线提取。



(a) 法向量计算原理 (b) 光条法线方向的计算结果
(a) Measuring principle for line and circle geometry (b) Calculation result of the normal direction of the light bar

图7 基于相邻点几何关系的法线方向计算

Fig. 7 Calculation of normal direction based on geometrical relationship between neighboring points

4 实验结果与分析

4.1 光条中心提取精度仿真测试

为验证本文方法的精度,采用仿真图像进行测试。使用MATLAB仿真 250×250 pixel的光条图像,图像中加入均值为0,方差为5的高斯噪声。首先,采用本文方法和传统Steger法对 $w=2$ 的光条进行中心提取,传统Steger法的高斯核参量 σ 设置为 $2/\sqrt{3}$,两者提取的10个光条中心点坐标及其误差如表1所示,可见本文方法精度高于传统Steger法。实验表明,对于特定宽度的光条,噪声的增加会干扰光条提取,基于光条宽

表1 两种方法测量结果

Tab. 1 Results of two methods (pixel)					
True value		Steger method		Proposed method	
x	y	x	y	x	y
61.00	25.00	0.13	0.11	0.02	0.01
61.00	26.00	0.13	0.02	0.06	0.01
61.00	27.00	0.13	0.11	0.06	0
61.00	28.00	0.07	0.13	0.02	0
61.00	29.00	0.16	0.14	0.02	0.01
61.00	30.00	0.09	0.11	0.11	0.02
61.00	31.00	0.13	0.09	0.01	0.01
61.00	32.00	0.14	0.11	0.04	0
61.00	33.00	0.12	0.01	0.03	0.01
61.00	34.00	0.09	0.15	0.02	0

度自适应调整 σ 值有助于降低影响。

分别使用本文方法和传统 Steger 方法(选用 $\sigma=5/\sqrt{3}$ 和 $\sigma=20/\sqrt{3}$)对 $w=10$ 的模拟光条进行中心提取,实验结果如图 8 所示。从图中可以看出,传统 Steger 法在 $\sigma=5/\sqrt{3}$ 时,光条两端提取的中心点发生断裂;传统 Steger 法

在 $\sigma=20/\sqrt{3}$ 时,提取的条纹中心存在大量离散点。依据前述理论分析可知,出现上述情况的原因 σ 值不适合当前光条宽度。由于本文所提算法可根据光条不同宽度自适应选取相应的卷积高斯核参数 σ ,从而获得了更好的提取效果。

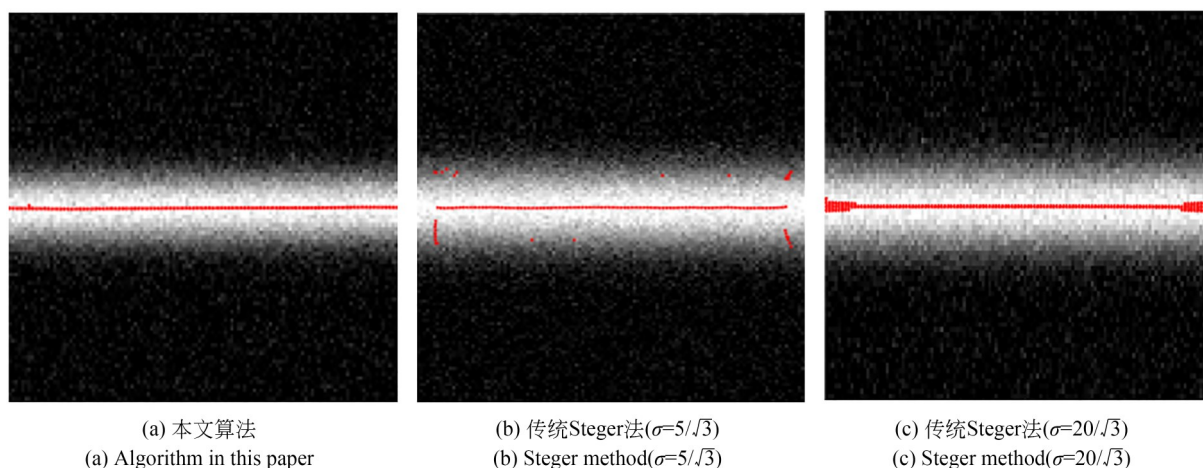


图 8 本文算法与 Steger 提取光条中心

Fig. 8 Light bar center maps extracted by algorithm of this paper and Steger's method

4.2 应用实验

为验证本文提出方法在现场测量中的有效性,采用搭建的道岔几何参数测量系统进行了测量实验。为了模拟水雾现象,实验在环境试验箱中进行,如图 9(a)所示。试验箱型号为 DHTH-100-40,相机分辨率 $2\,448 \times 2\,048$ pixel,镜头为 HM0614MP5 型,焦距为 6 mm。激光器的功率为 25 mW,波长为 650 nm,工作距离为 0.2 m。图像像素当量为 0.141 mm/pixel。实验采用精度为 0.01 mm 的标准量块作为被测目标,如图 9(b)所示。该试块可提供 A, B, C 3 个特征点, AB, BC 之间的距离为 20 mm。实验中使激光垂直入射试块表面,获取激光条纹图像,计算标准量块边 AB 和 BC 的长度。

为模拟铁路现场的温度变化,实验中以每 10 °C 为一个温度梯度,将温度从 60 °C 降低至 0 °C,在每个温度梯度下,均采集一组图像。在温度降低至 20 °C 时,光条图像出现明显的水雾干扰。将有无水雾情况下标准量块的激光条纹图像分别采用传统 Steger 算法与本文方法进行处理,计算得到的标准量块长度平均值和误差如表

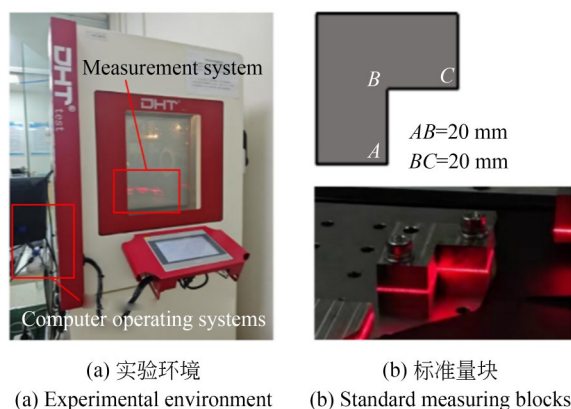


图 9 道岔参数测量实验

Fig. 9 Turnout parameter measuring experiment

2 和表 3 所示。由表可知,无水雾时,本文所提算法能够针对试块不同位置光条宽度自适应调整算法参数,精度略高于传统 Steger 法,且标准差较小,体现了较好的稳定性;在水雾干扰时,传统 Steger 法的测量误差增大,测量精度降低,本文方法的平均误差在 0.09 mm 内,精度高于传统 Steger 法。由此可见,本文方法测量精度在传统 Steger 的基础上有所提升,且具有较好的抗干扰性,

表 2 无水雾下的测量结果					表 3 水雾干扰下的测量结果				
Tab. 2 Measurement results without water spray (mm)					Tab. 3 Measurement results under water spray (mm)				
No.	Steger method		Proposed method		No.	Steger method		Proposed method	
	AB	BC	AB	BC		AB	BC	AB	BC
1	20.163	20.137	20.162	20.151	1	19.811	20.352	20.091	20.033
2	20.215	20.240	20.155	20.200	2	19.800	20.342	20.102	20.031
3	20.204	20.154	20.165	20.160	3	19.740	20.345	20.089	20.035
4	20.152	20.141	20.157	20.143	4	19.764	20.197	20.090	20.031
5	20.154	20.167	20.154	20.139	5	19.790	20.357	20.078	20.030
6	20.150	20.148	20.147	20.131	6	19.776	20.408	20.099	20.026
7	20.161	20.137	20.141	20.146	7	19.776	20.221	20.060	20.023
8	20.146	20.145	20.155	20.144	8	19.820	20.350	20.078	20.035
9	20.160	20.146	20.154	20.146	9	19.790	20.382	20.082	20.044
10	20.152	20.140	20.200	20.140	10	19.770	20.355	20.070	20.043
Mean	20.166	20.156	20.159	20.150	Mean	19.796	20.331	20.084	20.033
ME	0.166	0.156	0.159	0.150	ME	0.204	0.331	0.084	0.026
SD	0.023	0.029	0.015	0.018	SD	0.022	0.064	0.012	0.006

能够适应现场测量环境。

前文实验分别验证了该方法的可行性与有效性。该方法通过关联光条宽度与高斯核参数 σ ,实现了卷积核尺寸的自适应调整,从而保证了在宽度变化较大的复杂条纹中,中心提取的准确性。宽度计算增加了算法的运算量,实验显示,传统 Steger 方法算法的运行时间为 1.522 s,所提算法的运行时间为 1.705 s,增加了约 12%。

为了进一步验证道岔参数测量系统的测量精度及本文所提算法的优越性,本文对尖轨进行了大范围移动测量实验。尖轨的真实位移由激光干涉仪测出,通过测量斥离状态下的误差,全面评估了系统的测量性能,如表 4 所示,所提方法的最大误差为 0.07 mm,满足对道岔参数测量系统的精度要求。

表 4 道岔参数测量系统大范围移动实验结果					
Tab. 4 Experimental results of turnout parameter measurement system with large-scale movement (mm)					
Measurement	True value	Steger method		Proposed method	
		Opening value	Deviation	Opening value	Deviation
Initial	0.00	166.10	—	166.10	—
3.00	3.00	162.97	0.13	163.05	0.05
6.00	5.99	159.88	0.10	160.02	0.04
9.00	8.99	156.78	0.10	156.95	0.07
12.00	11.97	153.67	0.13	153.95	0.02
15.00	14.98	150.54	0.12	150.91	0.03
18.00	17.98	147.43	0.11	147.87	0.04

5 结 论

针对道岔动态测量过程中由于道岔搬动以及环境变化引起的激光条纹宽度分布不均问题,本文提出了一种改进 Steger 的自适应光条中心提取方法。首先,在图像预处理时采用 Otsu 阈值法结合直方图均衡化进行光条分割,然后采用 Two-pass 算法保留有效的光条区域,有效地消除

了杂散光的影响;在光条中心提取过程中,提出了基于邻域几何法线方向的光条宽度计算方法和基于光条宽度的 Steger 卷积核尺寸自适应调整算法。与传统的 Steger 算法相比,获得的条纹亚像素坐标精度更高且具备良好的抗干扰能力,适用于室外环境下道岔参数的在线测量。后期将对图像背景过亮、线结构光断裂等情况展开深入研究,进一步提高该方法在实际应用中的稳定性。

参考文献:

- [1] LI Z N, QI S K, ZHANG M M, *et al.* A structured light vision sensor for online measurement of steel-plate width[J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2023, 59(5): 601-610.
- [2] 龙陵波, 赵宏, 杨聪, 等. 铁路道岔参数机器视觉在位测量方法与装置[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(4): 80-89.
LONG L B, ZHAO H, YANG C, *et al.* Machine-vision based method and apparatus for in-situ measurement of railway turnout parameters[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(4): 80-89. (in Chinese)
- [3] 咎慧新, 周哲海, 陈丽. 一种应用于复杂场景的线结构光激光中心线提取方法[J]. *激光杂志*, 2024, 45(10): 74-79.
ZAN H X, ZHOU ZH H, CHEN L. Method for extracting centerline offline structured light in complex scenes[J]. *Laser Journal*, 2024, 45(10): 74-79. (in Chinese)
- [4] LI Y H, ZHOU J B, HUANG F S, *et al.* Sub-pixel extraction of laser stripe center using an improved gray-gravity method [J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 814.
- [5] 孙传富, 彭涛, 陆永刚, 等. 连铸坯三维测量多线结构光的中心条纹快速提取[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(3): 380-392.
SUN CH F, PENG T, LU Y G, *et al.* Fast extraction center stripe of multi-line-structured light for three-dimensional measurement of casting slab[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(3): 380-392. (in Chinese)
- [6] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113-125.
- [7] 王福斌, 刘贺飞, 王蕊, 等. 线结构光条纹中心亚像素自适应提取算法[J]. *激光技术*, 2021, 45(3): 350-356.
WANG F B, LIU H F, WANG R, *et al.* Sub-pixel adaptive center extraction of line structured light stripe[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(3): 350-356. (in Chinese)
- [8] 李伟明, 梅枫, 胡增, 等. 线激光光条中心内部推进提取算法[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 105-117.
LI W M, MEI F, HU Z, *et al.* Internal propulsion algorithm for extracting center of line laser stripe[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 105-117. (in Chinese)
- [9] 李玥华, 刘朋, 周京博, 等. 基于BP神经网络的结构光光条中心提取[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1212005.
LI Y H, LIU P, ZHOU J B, *et al.* Center extraction of structured light stripe based on back propagation neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1212005. (in Chinese)
- [10] ZHANG Z, LIU Y. Adaptive scale selection for linear structure extraction in laser stripe images [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(12): 1625-1632.
- [11] ZHANG S S, CHEN J Y, VESALA G T, *et al.* Linear structured light system with optimized laser stripe extraction for measurement of large-sized workpieces[J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2024, 60(9): 1084-1106.
- [12] 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.

作者贡献声明:

荆颖春:测量方法提出,实验设计,数据整理和分析,及论文构思和撰写;

何启欣:资助提供,测量实验设计及验证,论文审核;

崔建英:实验系统的技术支持与资源提供,测量实验设计与可行性分析;

张政:研究实施和执行;

冯其波:研究策划、执行及指导。

- WANG SH CH, 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. (in Chinese)
- [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): 1110002.
- LI F J, LI X J, LIU ZH. A multi-scale analysis based method for extracting coordinates of laser light stripe centers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1110002. (in Chinese)
- [14] 刘健庄, 栗文青. 灰度图象的二维 Otsu 自动阈值分割法[J]. 自动化学报, 1993, 19(1): 101-105.
- LIU J ZH, LI W Q. The automatic thresholding of gray-level pictures *via* two-dimensional otsu method [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993, 19(1): 101-105. (in Chinese)
- [15] SHAPIRO L G, STOCKMAN G C. Computer Vision [D]. 1st edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2001.
- [16] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [17] CHEN W, SUI L C, XU Z C, *et al.* Improved Zhang-Suen thinning algorithm in binary line drawing applications [C]. 2012 *International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012)*. May 19-20, 2012, Yantai, China. IEEE, 2012: 1947-1950.

作者简介:



荆颖春(2001—),女,山东泰安人,硕士研究生,主要从事激光测量方面的研究。E-mail: 23126645@bjtu.edu.cn

通讯作者:



何启欣(1992—),男,山东菏泽人,博士,副教授,2013年、2018年于吉林大学分别获得学士和博士学位,主要从事光电检测及激光测量方面的研究。E-mail: heqixin@bjtu.edu.cn