

一种激光散斑光条中心提取方法

刘松 朱丹 佟新鑫 李英杰

(中国科学院沈阳自动化研究所中国科学院光电信息处理重点实验室 辽宁 沈阳 110016)

(中国科学院机器人与智能制造创新研究院 辽宁 沈阳 110016)

摘要 现有的激光光条中心提取方法中,无法很好解决散斑激光条中心的提取问题。对这种激光散斑图像建立光强分布模型,通过分析提出一种基于自适应对比度增强改善算法的图像增加方法和光条中心提取方法。该方法根据原始图像先验部分和激光投影模型对高频增益系数进行计算,对图像中光斑部分进行图像增强操作,并对增强后图像出现的断点进行处理。基于 Steger 算法提取增强后图像的激光光条中心坐标,并利用直线光条在平面成像的线性特征,将光条中心点到先验直线的平均距离作为光条中心提取精度的评价标准。通过实验验证该方法的有效性。

关键词 光条中心散斑 光强分布 自适应对比度增强

中图分类号 TP3 **文献标识码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2019.01.048

A METHOD OF LASER SPECKLE STRIPE CENTER EXTRACTION

Liu Song Zhu Dan Tong Xinxin Li Yingjie

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, Liaoning, China)

(Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

Abstract In the existing methods of extracting laser stripe centers, the problem of extracting speckle laser stripe centers cannot be solved very well. In this paper, the intensity distribution model of this laser speckle image was established. Through analysis, an image adding method and a stripe center extraction method based on adaptive contrast enhancement algorithm was proposed. The method calculated the high frequency gain coefficient based on the priori part of the original image and the laser projection model, performed image enhancement on the spot part of the image, and processed the breakpoints appearing in the enhanced image. Based on Steger algorithm, the center coordinates of laser stripes were extracted from the enhanced image, and the average distance between the center points of the stripes and the priori lines was used as the evaluation criterion of the accuracy of the stripe center extraction by utilizing the linear characteristics of the straight stripes in plane imaging. The validity of this method was verified by experiments.

Keywords Speckle in light stripe center Intensity distribution Adaptive contrast enhancement

0 引言

基于辅助激光的结构光测量方法因其非接触性、高精度、高效率而广泛应用于制造业、医疗、机器人等领域。结构光视觉测量中,采集图像中激光光条中心

的快速、高精度提取方法是影响测量速度和精度的关键因素^[1-5]。常见的图像光条中心提取方法主要有极值法、重心法、曲线拟合法以及 Hessian 矩阵法,可以解决理想光条中心提取问题,并在一定程度上拥有抗噪声能力。激光光条成像质量受环境光、被测物体表面材质等影响,会出现光条亮度极度不均匀、散斑、光条

宽度变化剧烈的情况,普通方法提取精度不高,为此国内外学者对此在光学和图像处理方面做出了很多研究。在光学方面,诸多文献指出在光强上进行空间或时间积分平均实现散斑抑制,如偏振多样性、角度多样性和波长多样性对散斑进行抑制^[12,22]。在图像处理方面,于永涛等^[6]针对在激光投影中出现的镜面反射干扰问题,采用去除异常值方法解决光条中心提取问题。文献^[23]提出利用模板来完成两步卷积过程,消除了虚假光斑,利用重心法提取光条中心亚像素坐标。张瑞瑛等^[7]对一种基于感兴趣区域的大视场下线结构光光条中心快速提取方法。刘巍等^[9]等提出了高斯混合分布激光中心线提取方法,解决了激光条非高斯对称问题,但是无法很好解决由于被激光投射的物体吸光特性而形成的连续散斑激光条中心提取问题。在工业零件制造领域,为了防锈、防伤,在关键部位通常会被一层具有吸光特性漆面所覆盖。激光条在同一光照情况下,投射到被测零件表面,由于表面材料吸光特性不同,在相机成像中会出现光条和散斑相间的情况,上述方法无法高精度提取光条中心。

本文首先对这种光条和散斑相间图像的光强分布情况进行分析。通过改进的自适应对比度增强算法结合线激光光条的物理特性,对散斑进行对比度增强操作,并对增强后的图像中光条整体光强的一致性进行了评估。去噪声后利用 Steger 方法,通过高斯卷积计算图像中每个像素的 Hessian 矩阵,提取光条亚像素中心。最后通过仿真实验验证了该方法的精度与稳定性。

1 光条中心提取算法基础

1.1 激光散斑光强分布分析

为了更好地分析这种光条和光斑相间的图像光强分布情况,采用吸光材料和普通材料制作棋盘格。在同一线性激光器投射下,普通材料区域,形成明亮清晰的光条,记作“亮条”。在吸光材料区域形成散斑,记作“散斑”,如图 1 所示。提取一组“亮条”和“散斑”相间图像的光强三维分布图像进行分析,如图 2

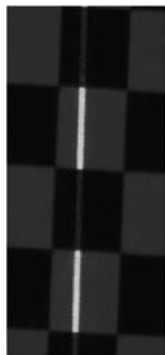


图 1 散斑激光条

所示,“亮条”与背景灰度平均对比度比“散斑”高得多。

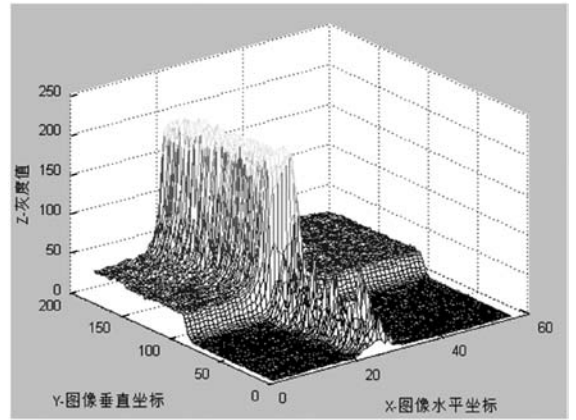
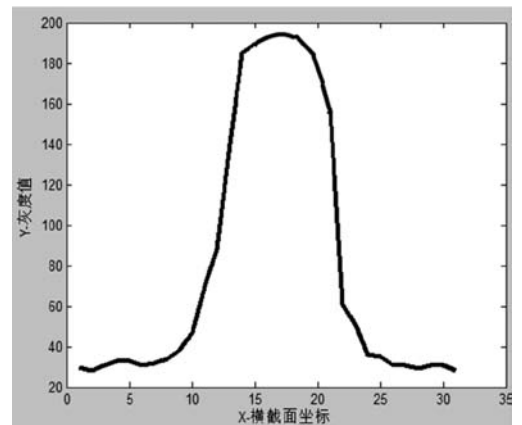
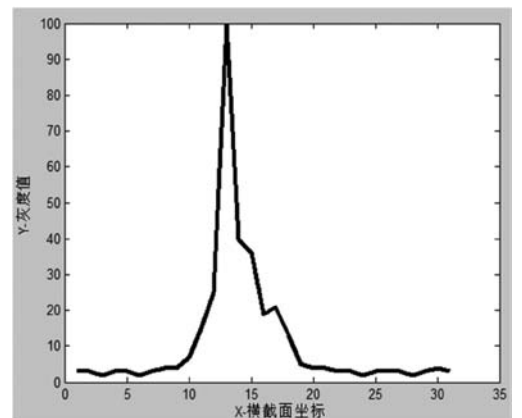


图 2 激光条光强三维分布

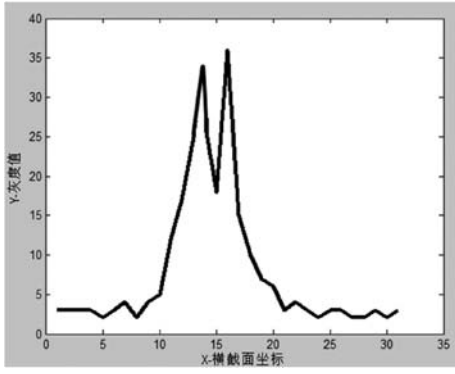
在光强分布方面,分别提取激光光条横截面像素进行灰度统计,图 3(a)为“亮条”的横截面灰度二维分布图,符合高斯混合分布模型的特征,经过图像去噪,光条有效特征中心提取等步骤,可以直接提取光条中心。“散斑”的横截面灰度二维分布如图 3(b) - (d) 所示,出现了单峰、双峰、三峰等情况,直接利用上述的光条中心的方法无法直接高精度提取。本文为解决这个问题,利用改善后的自适应对比度增强算法对“散斑”进行灰度增强操作,使其在平均灰度对比度接近理想光条平均灰度。



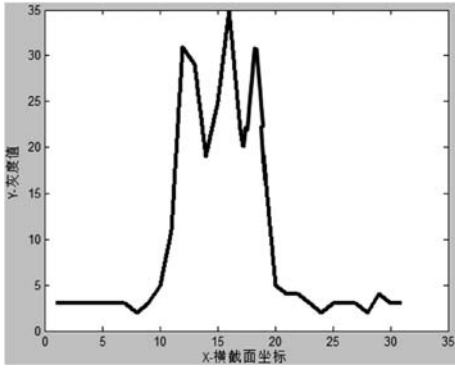
(a) 高斯分布亮条



(b) 单峰散斑



(c) 双峰散斑



(d) 三峰散斑

图 3 激光条横截面光强二维分布

1.2 自适应对比度增强原理

自适应对比度增强算法原理^[13-14]是将一幅图像分成低频部分和高频部分:低频部分可以通过图像的低通滤波获得;高频部分由原图减去低频部分得到。本文重点是增强代表细节的高频部分,即对高频部分乘以某个增益值 $G(i, j)$, 得到增强的图像。假设一幅图像中像素点表示为 $x(i, j)$, 那么以 (i, j) 为中心, 窗口大小为 $(2n + 1) \times (2n + 1)$ 的区域内, 其局部均值如下:

$$m_x(i, j) = \frac{1}{(2n + 1)^2} \sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-n}^{j+n} x(k, l) \quad (1)$$

增强后的图像 $f(i, j)$ 如下:

$$f(i, j) = m_x(i, j) + G(i, j) [x(i, j) - m_x(i, j)] \quad (2)$$

自适应对比度增强算法的核心就是高频部分增益系数的计算^[17-18], 通常方案是将增益 G 设为一个固定值, 由先验参数确定。在图像的高频区域, 增益值设置较小, 出现增强不足的情况; 在图像平滑的区域, 增益值设置比较大, 从而可能会放大噪声信号。所以本文利用理想光条的横截面灰度对比度为基础, 结合结构光模型和激光器投的物理特性, 设计高频增益系数计算模型。

1.3 改进的高频增益系数计算

首先将增益值表示为与方差相关的量均值 m_x 可

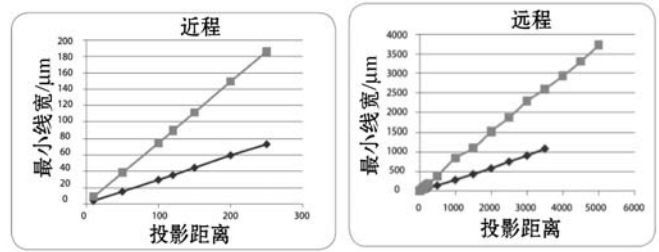
以近似认为是背景部分, 此时 m_x 即是高频细节部分, 高频作增益系数, 公式如下:

$$\sigma_x^2(i, j) = \frac{1}{(2n + 1)^2} \sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-n}^{j+n} [x(k, l) - m_x(i, j)]^2 \quad (3)$$

$$G(i, j) = \frac{1}{\sigma_x(i, j)} \quad (4)$$

式中:窗口参数 n 规定了增加的有效范围, 必须和实际激光投影情况来设定。引入参数投影最小线宽 w_{\min} 与投影距离为 D_p 成线性比例关系, 比例系数为 k , 如图 4 所示。 u 为相机靶面的像元尺寸, p 为相机轴向放大倍数, 激光理想光条的横截面有像素效宽度为 W_v , 公式如下:

$$W_v = \frac{k \times D_p}{p \times u} \quad (5)$$



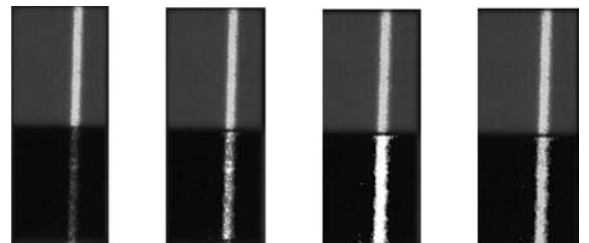
(a) 最小线宽与短投影距离 (b) 最小线宽与长投影距离

图 4 激光器物理参数

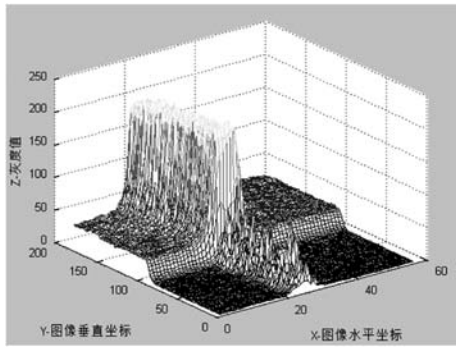
带入高频作增益系数:

$$\sigma_x^2(i, j) = \frac{1}{(2W_v + 1)^2} \sum_{k=i-W_v}^{i+W_v} \sum_{l=j-W_v}^{j+W_v} [x(k, l) - m_x(i, j)]^2 \quad (6)$$

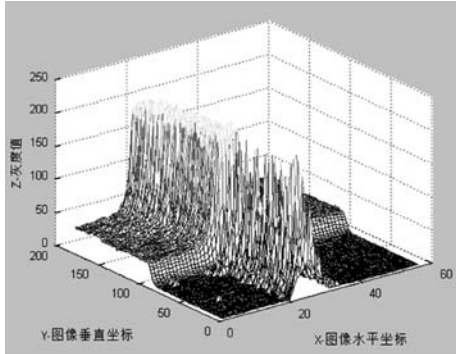
改进的自适应对比度增强模型所增强效果与固定增益值对比如图 5 所示。(a) 和 (e) 为原始图像和原图三维分布图。(b) 和 (f) 为 5 倍增益的复原图像和 5 倍增益的复原图像三维分布图, 通过分析被增强部分, 部分光条横截面被还原, 其他部分还保持原始状态。(c) 和 (g) 为 20 倍增益的复原图像和 20 倍增益的复原图像三维分布图, 通过分析被增强部分, 光条横尖部部分被削平。(d) 和 (h) 为本方法复原图像和本方法复原图像三维分布图, 通过分析被增强部分, 和原来“亮条”部分在灰度峰值和分布模型上保持一致, 符合高斯分布模型。



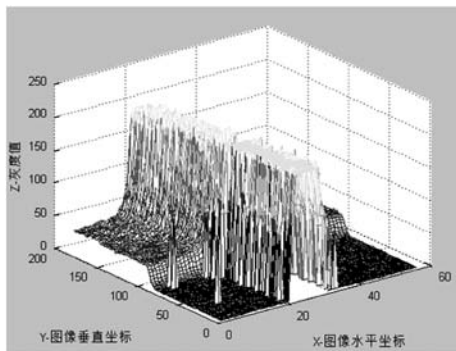
(a) 原图 (b) 5 倍增益 (c) 20 倍增益 (d) 本文方法



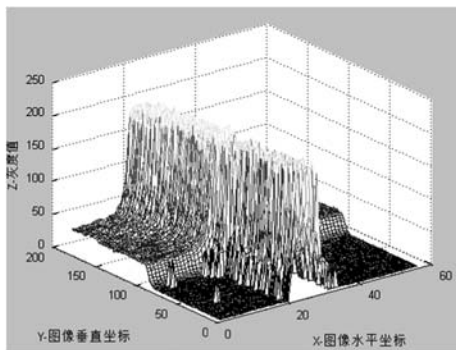
(e) 原图三维分布图



(f) 5 倍增益三维分布图



(g) 20 倍增益三维分布图



(h) 本方法三维分布图

图5 增强效果图

2 光条中心线提取方法

2.1 光条散斑图像预处理

图6为光条中心提取流程图,对光条的散斑部分利用改进后的自适应对比度增强算法进行图像预

处理。

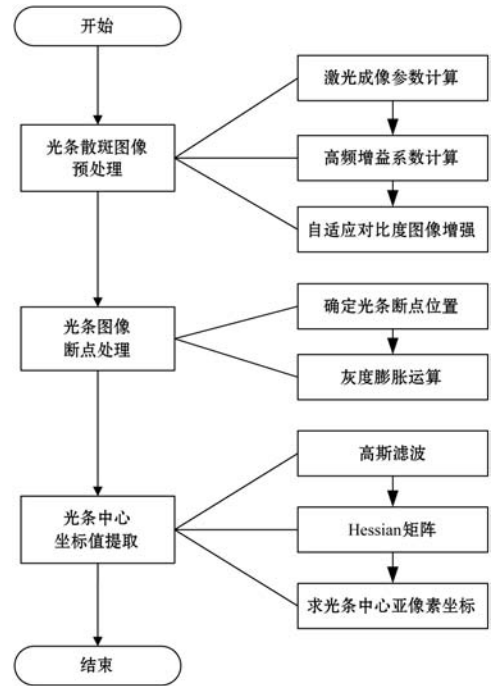


图6 光条中心提取流程图

2.2 光条图像断点处理

由图5可见,增强后的图像,光条结合部有一小段段层区域,利用形态学中灰度图像膨胀运算进行处理。膨胀运算是由结构元素确定的邻域块中选取图像值与结构元素值的和的最大值在灰度形态学中,选择平坦的结构元素, B 的值在 D_b 的定义域内的所有坐标均处均为0,公式如下:

$$g(x, y) = \text{dilate}[f(x, y), B] = \max \{f(x - x', y - y') \mid (x', y') \in D_b\} \quad (7)$$

2.3 光条中心坐标值提取

Steger 算法基于 Hessian 矩阵,能够实现光条中心亚像素精度定位。首先利用 Hessian 矩阵得到光条的法线方向,在法线方向通过泰勒展开得到亚像素位置。图像中激光条上的任意一点 (x, y) , Hessian 矩阵表示为:

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix}$$

式中: r_{xx} 表示图像沿 x 方向二阶偏导数,其他参数以此类推。在求 Hessian 矩阵之前,对图像进行高斯滤波,设置高斯方差 $\sigma < \frac{w}{\sqrt{3}}$,其中 w 为光条宽度。用 $(n_x,$

$n_y)$ 表示 Hessian 矩阵最大特征值对应向量光条的法线方向。以点 (x_0, y_0) 为基准点,则激光光条中心的亚像素计算坐标公式如下:

$$(P_x, P_y) = (x_0 + tn_x, y_0 + tn_y) \quad (8)$$

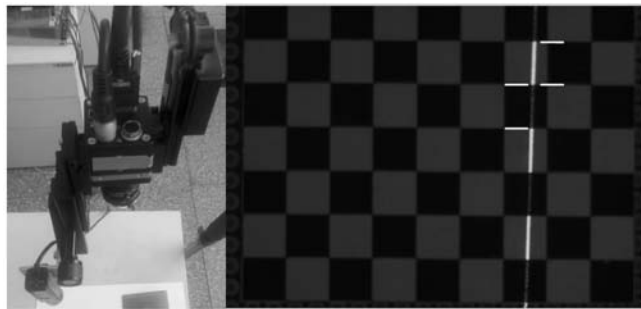
$$t = -\frac{n_x r_x + n_y r_y}{n_x^2 r_{xx} + 2n_x n_y r_{xy} + n_y^2 r_{yy}} \quad (9)$$

如果 $(tn_x, tn_y) \in [-0.5, 0.5]$, 且 (n_x, n_y) 方向的二阶导数大于设计的阈值, (x_0, y_0) 为激光光条的中心点, (P_x, P_y) 则为亚像素坐标。

3 实验与分析

3.1 实验环境

实验采用 IMPEX CAMMRA-LINK 接口数字相机 B1310M, 相机分辨率为 $1\ 280 \times 720$, 像元为 $3.75\ \mu\text{m}$, 初始曝光时间为 $5\ 000\ \mu\text{s}$ 。镜头采用 Computar 25 mm 变焦镜头, 激光投影机采用 V-405-005-AS-10-L01-N 型号。通过三维机械结构组件形成固定的物理位置, 相机镜头光学中心距离被测物体 40 mm, 激光器距被测物体 20 mm, 与相机成 45 度夹角, 系统结构如图 7(a) 所示。采用特殊材质标定板, 激光投影机投射在特殊材质标定板上激光直线图像如图 7(b) 所示。实验目的是在同一幅激光条图像, 利用传统方法和本文方法对激光直线进行中心坐标提取, 并对提取光条中心的精度进行对比与分析。



(a) 实验系统 (b) 系统成像

图 7 实验图像

3.2 评价方法

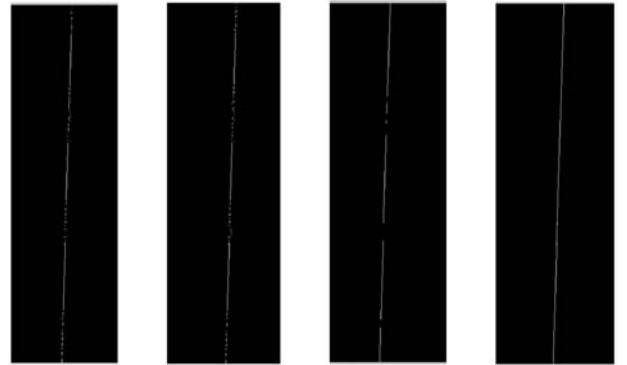
选取理想亮条直线部分, 如图 7(b) 所示, 利用本文第 2 节所述方法进行光条中心提取, 用最小二乘法进行直线拟合, 记作 L_r 。散斑部分, 提取的中心坐标点记作 P_n 。被投射物体为一完整平面, L_r 可以作为散斑部分光条中心点 $P_n(x, y)$ 的参考直线 $ax + by + c = 0$ 。所有点到 L_r 距离的平均差为 S_n 。作为评价各个光条中心提取算法的评价准则, 数值越小, 光条中心提取精度越高。

$$S_n = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{ax_i + by_i + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right|}{n} \quad (10)$$

3.3 数据分析

利用 MATLAB R2014a 作为软件仿真平台, 以图 7

(b) 为输入图像, 采用极值法、重心法、高斯混合分布激光中心线提取方法^[9], 提取图像如图 8(a) - (c) 所示。根据第 2 节所述的本文方法对散斑部分进行光条中心坐标提取步骤, 提取图像如图 8(d) 所示。



(a) 重心法 (b) 极值法 (c) 高斯混合法 (d) 本文方法

图 8 光条中心提取结果

从提取图像上可以看出, 极值法和重心法对散斑部分进行光条中心坐标提取极不稳定。高斯混合分布激光中心线提取方法虽然稳定, 但在散斑不符合高斯分布的部分, 提取困难。本文方法提取光条的中心坐标连续且稳定。

表 1 为分别利用极值法、重心法、高斯混合分布激光中心线提取方法和本文方法对散斑部分进行光条中心坐标提取的 S_n 值, n 为参加评价的中心点个数。从实验结果来看, 随着参与评价的中心点数增多, 4 种方法的评价系数 S_n 的值呈现减小趋势。本方法在 n 为 10、50、200 时, S_n 值均小于其他方法 S_n 值。通过评价原则可以得出, 本文方法对于激光散斑光条中心精度高于参与对比的其他方法。

表 1 4 种算法的 S_n 比较

n	重心法	极值法	高斯混合法	本文方法
10	2.45	2.34	1.87	1.02
50	2.17	2.54	1.43	0.94
200	1.12	1.89	1.22	0.52

为了提升处理效率, 本文方法可以在 FPGA + DSP 的嵌入式架构中加以实现。利用 FPGA 流处理的特性, 实现本文方法中膨胀、滤波等算子性卷积运算, DSP 可实现参数计算、断点连接、矩阵及光条中心提取等复杂操作。FPGA 和 DSP 通过数据交换得出最后的处理结果, 可以达到实时处理的效果。

4 结 语

本文针对光条和散斑相间的激光光条中心提取问题, 提出一种基于自适应对比度增强算法的图像增强

方法和光条中心提取方法。该方法通过对原始图像先验部分和激光投影模型计算高频增益系数,根据高频增益系数对图像中散斑部分进行图像增强操作。基于Steger算法提取增强后图像的激光光条中心坐标,并利用直线光条在平面成像的线性特征,将光条中心点到先验直线的平均距离 S_n 作为光条中心提取精度的评价标准。通过实验对已有方法和本文方法在光条中心提取精度进行分析和对比,验证了本文方法的有效性。本文方法目前应用于特殊材料的表面检测领域,比如机翼表面漆面破损检测等实际应用,解决了在实际被检测产品中吸光材料区域出现的激光光条散斑问题,提高了测量精度。

参 考 文 献

- [1] 徐光佑,刘立峰,曾建超,等.一种新的基于结构光的三维视觉系统标定方法[J].计算机学报,1995,18(6):450-456.
- [2] 许丽,张之江.结构光测量系统的误差传递分析[J].光学精密工程,2009,17(2):306-313.
- [3] 韩建栋,吕乃光,董明利.线结构光传感系统的快速标定方法[J].光学精密工程,2009,17(5):949-963.
- [4] 陈天飞,马孜,吴翔.基于主动视觉标定线结构光传感器中的光平面[J].光学精密工程,2012,20(2):256-263.
- [5] 魏振忠,张广军,徐园.一种线结构光视觉传感器标定方法[J].机械工程学报,2005,41(2):210-214.
- [6] Yu Y, Li J, Jia F, et al. Three-dimensional object matching in mobile laser scanning point clouds[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 12(3):492-496.
- [7] 张瑞瑛,周萍,冯煦,等.大视场下线结构光光条中心快速提取[J].应用光学,2010,31(3):432-436.
- [8] 孙军华,王恒,刘震,等.钢轨磨耗动态测量中激光光条中心的快速提取[J].光学精密工程,2011,19(3):690-696.
- [9] 刘巍,张驰,刘阳,等.高斯混合分布激光中心线提取方法[J].激光与红外,2015,11(45):1397-1402.
- [10] 李云鹏,田庆国,张翔宇.线激光人体三维扫描仪多传感器同步标定方法[J].中国激光,2013,40(10):215-221.
- [11] 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):197-202.
- [12] 徐美芳,丁俊文,王冠军,等.角度多样性激光散斑抑制方法的比较[J].红外与激光工程,2017,46(8):68-73.
- [13] Wang C, Ye Z. Brightness preserving histogram equalization with maximum entropy: A variational perspective[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005, 51(4): 1326-1334.
- [14] Jafar I, Ying H. Image contrast enhancement by constrained variational histogram equalization [C]//Proceedings of the International Conference on Electro/Information Technology, 2007: 120-125.
- [15] Yeganeh H, Ziaei A, Rezaie A. A novel approach for contrast enhancement based on histogram equalization [C]//Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering, 2008: 256-260.
- [16] Kim Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1997, 43(1): 1-8.
- [17] Wang Y, Chen Q, Zhang B. Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45(1): 68-75.
- [18] Chen S D, Ramli A R. Contrast enhancement using recursive mean-separate histogram equalization for scalable brightness preservation [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(4): 1301-1309.
- [19] Sire K S, Tso C P, Tan Y Y. Recursive sub-image histogram equalization applied to gray scale images [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(10): 1209-1221.
- [20] 江巨浪,张佑生,薛峰,等.保持图像亮度的局部直方图均衡算法[J].电子学报,2006,34(5):861-866.
- [21] 吕宗伟.基于亮度保持的子图像加权对比度增强[J].电子学报,2013(2):281-287.
- [22] 白可,贺锋涛,张敏,等.基于灰度共生矩阵的激光散斑评价方法[J].激光技术,2016,40(4):479-482.
- [23] Xi J H, Bao H, Li T. Research on the algorithm of noisy laser stripe center extraction [C]//The 30th Chinese Control and Decision Conference (2018 CCDC). IEEE, 2018: 6297-6300.

(上接第245页)

- [19] Kim J, Bae S H, Kim M. An HEVC-Compliant Perceptual Video Coding Scheme Based on JND Models for Variable Block-Sized Transform Kernels [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2015, 25(11): 1786-1800.
- [20] Chou C H, Li Y C. A perceptually tuned subband image coder based on the measure of just-noticeable-distortion profile [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, 5(6):467-476.
- [21] Li B, Li H, Li L. Adaptive bit allocation for R-lambda model rate control in HM [C]//JCT-VC of ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 13th Meeting, Incheon, Rep. of Korea, Doc JCTVC-M0036, 2013.
- [22] Zhou Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Trans Image Process, 2004, 13(4):600-612.