

线激光光条中心内部推进提取算法

李伟明¹, 梅枫¹, 胡增¹, 高兴宇^{1*}, 喻豪勇²¹ 桂林电子科技大学机电工程学院广西制造系统与先进制造技术重点实验室, 广西 桂林 541004;² 新加坡国立大学生物医学工程系, 新加坡 新加坡 117583

摘要 线结构光三维测量系统被广泛应用在物体测量、目标检测和焊接等众多领域,而激光光条中心的提取是该系统的关键技术之一。鉴于此,提出一种新的自适应阈值光条中心提取算法,即内部推进算法。所提算法不仅提取速度快,而且具有较好的精度和鲁棒性。所提算法根据激光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,从而提高算法速度。所提算法通过改进的 Otsu 自适应阈值算法在内部推进中不断地更新阈值以计算中心。实验结果表明,所提算法具有提取速度快、算法复杂度低、鲁棒性好、精度高和抗噪性良好等优点。

关键词 测量; 结构光测量; 中心提取; 激光; 内部推进

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1104002

1 引言

线结构光测量技术是一种非接触式主动测量技术,该技术基于三角法来获得深度信息,已广泛应用在尺寸测量、逆向工程、缺陷检测、目标识别和焊缝跟踪等领域^[1]。线结构光测量系统主要由相机和线激光器组成,而经典结构由单个激光器与相机组成,线激光器与相机组成固定的三角测量结构。首先由相机拍摄线激光器投射在物体表面上的条型光束,然后通过图像处理技术来获得光条的二维中心坐标,最后利用相机与激光器之间的三角关系来获得目标的三维信息^[2]。

在应用过程中,激光光条在相机所拍摄的图像中有一定的宽度,而最关键的信息是光条的中心,因此快速、精确且鲁棒性好的光条中心提取算法是实现线结构光技术的关键^[3]。然而,许多现有算法往往顾此失彼,如何全面兼顾成为该算法的研究难点之一。传统的线结构光中心提取法主要有 Steger 法^[4]、灰度重心法^[5]、极值法^[6]和曲线拟合^[7]等。近

年来,许多研究者也提出了许多不同的改进算法。李凤娇等^[8]提出了一种基于多尺度分析的中心提取方法,该方法是基于 Steger 方法进行改进的。该方法采用骨架算法来确定激光条纹的初始中心,并根据条纹宽度来确定各初始中心处的高斯核方均误差,再对图像进行多尺度卷积以确定最优的方均误差,从而进一步提高提取光条纹中心的精度,但骨架算法和卷积算法的复杂度均较高。Usamentiaga 等^[9]注意到对图像内非光条区域进行处理会降低光条中心的提取速度,同时发现对光条中心的提取没有必要处理整幅图像,因此提出一种自动定义图像感兴趣区域的新方法,但需要离线计算成千上万的图片来寻找激光的焦点位置,前期工作量巨大,为此采用一种改进的分块归并方法来提取被测物体上的激光条纹中心,其核心部分是利用不同的逼近函数来拟合和修复光条的弱光和断线,但拟合算法的复杂度高。Yin 等^[10]提出了一种有效的两步激光条纹提取方法,其是基于激光条纹的几何信息和相关关系的自适应卷积的激光条纹中心提取方法,该方

收稿日期: 2020-11-10; **修回日期:** 2020-12-13; **录用日期:** 2020-12-23

基金项目: 广西创新驱动发展专项资金(AA18118002-3)、广西自然科学基金(2018JJA170110)、桂林电子科技大学研究生创新项目(2020YCXB01)

* **E-mail:** gxy1981@guet.edu.cn

法有效地消除了二值化激光条纹图像的噪声并可以准确提取激光条纹中心,但卷积处理速度慢。Sun 等^[11]提出了一种基于灰度矩守恒定律的光条中心提取算法(简称 Sun 算法),该算法将光条横截面的光强分布简化成脉冲函数,从而推导出从激光光条的每个横截面提取中心的封闭解,并对提取后的中心点采用平滑样条算法来拟合连续曲线。实验结果表明,该算法在存在噪声的情况下具有较高的鲁棒性,但将光条横截面的光强分布简化成脉冲函数是基于稳健光条横截面的光强分布近似为中间高平、两边低平的似高斯分布,因此对非稳健光图像的效果不佳。

长期以来,虽然已有许多不同的中心提取算法,但许多算法的复杂度相对较高,且未考虑光条图像的特点,对没有光条的图像区域进行冗余扫描会导致算法速度慢,实际上光条中心的计算只与光条本身和其周围像素值(即光强值)有关。同时,许多算法计算不均匀的光条容易引起较大的误差,且对于低亮度光条区域容易产生光条中心提取断裂和缺失的问题^[12]。在本课题组早期的研究工作^[13]中,虽然能够实现对稳健光条中心的极速提取,然而对于非稳健光条中心的提取,则存在与一些已有算法一样的断线和误差过大的问题。为了进一步解决上述问题,本文提出一种新的自适应阈值光条中心提取算法,即内部推进中心提取算法。与许多算法相比,该算法具有更强的性能。主要采用所提的内部推进方法来规划中心提取路径,可以避免扫描不含光条区域,能够提高中心提取速度;其次可以实现自适应阈值求取光条中心,而且具有良好的抗噪性。

2 中心提取算法

本文提出的中心提取算法通过规划搜索光条像素的路径,以及采用所提的内部推进方法在光条内部来推进访问光条像素,并通过改进的大津法(Otsu 算法)^[14]来自适应设置阈值,从而实现对光条中心快速和稳健的计算,在这个过程中对单个像素的噪声点或冗余点进行剔除,可以实现一定的抗噪性。内部推进算法的思想灵感源自机器学习领域的无监督迭代聚类算法,即均值漂移算法(Mean Shift 算法)^[15],所提算法借鉴了该算法的移动、更新和终止的思想。事实上,所提的内部推进算法也属于一种聚类算法,通过对像素值进行分析以确定阈值,将阈值作为相似性度量条件,用来区分背景和光条并计算中心,在不断自推进中完成分割和中心计

算。算法的核心流程:首先计算初始中心,然后向前(向后)推进一个像素并作为预测中心,计算新的分割阈值和新的中心点以更新中心点;再向前(向后)推进一个像素并作为预测中心,计算新的分割阈值和新的中心点以更新中心点,重复下去直到推进完成。

2.1 光条图像的特点与非稳健区域

实际上,线结构光技术也属于一种光学合作标记的技术,使用线激光对被测物体进行有效的光标记,可以使被测物体区别于背景,则被测物体具有更容易识别的特征信息。因此,在实际工业应用中,使线结构光测量系统中的线激光器和相机的位置固定,而特定工作背景的亮度往往是一定的,通过调节工业相机的光圈大小可以使图像背景亮度尽可能低,目的是使背景对光条提取的干扰尽可能小,这样激光光条是图像中最亮的部分。在实际观测中,当线激光束投射在物体表面上时,根据扫描物体的形貌尺寸可以在物体表面上形成不同的光段,这些不同的光段不会互相遮挡,也不会分叉。同时,当激光光条的光质稳健良好且物体表面反光良好时,光条横截面的像素值分布呈似高斯分布^[16],而且线激光器与相机一旦安装固定,由两者组成固定的三角测量系统在有效的工作距离内,光条的亮度和在图像中的宽度变化有限。

图 1 为光质稳健的激光照射在反光效果良好的物体表面上所呈现的效果。从图 1 可以看到,光条明亮且均匀稳健。图 2 为图 1 的光条横截面像素值



图 1 线结构光的光条

Fig. 1 Laser stripe of linear structured light



图 2 线结构光的光条截面

Fig. 2 Stripe cross section of linear structured light

的分布曲线。从图 2 可以看到,像素值呈近似高斯分布,光条中心两边的像素值平滑下降且近似对称,峰值部分存在饱和区域。

虽然在激光调试选型中会尽可能地保证光条整体

保持稳健明亮,但在许多工业环境中,被测物体的表面存在污垢和锈迹等不确定且反光差的突变区域,以及激光器的出光质量差等不利因素,这将会导致光条图像存在低亮度和不均匀的非稳健区域,如图 3 所示。

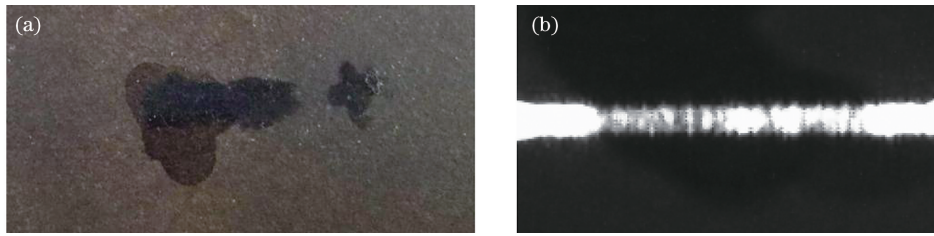


图 3 反光差的区域。(a)钢板污垢区域;(b)光条弱光不均匀区域

Fig. 3 Area with poor reflection. (a) Fouling area of steel plate; (b) laser stripe weak light uneven area

此外,当被测物体的表面斜率较大时,这将会导致单位面积上的反射光线减少,也会导致光条图像存在低亮度和不均匀的非稳健区域^[12],如图 4 所示。

上述不良区域的存在,不仅对中心提取算法的鲁棒性提出更高的要求,也对激光器的选择提出更高的要求。如果重新选择激光器来提高功率亮度以及出光质量,这不仅有可能增加能耗成本,而且也会增加价格成本,此外也会面临反光良好的位置变得过亮,过亮的光条将会导致相机所拍摄的光条变粗,进而导致精度降低,因此通过提高中心提取算法的鲁棒性来解决该问题是最佳的选择之一。光条低亮不均匀区域的截面像素直方图如图 5 所示。

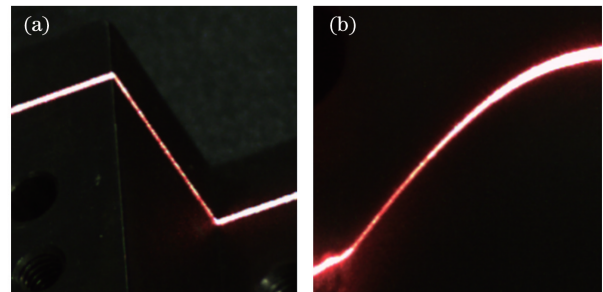


图 4 大斜率变化光条的弱光不均匀区域。(a)平面区域;(b)曲面区域

Fig. 4 Weak light uneven area of laser strip with large slope change. (a) Plane area; (b) surface area

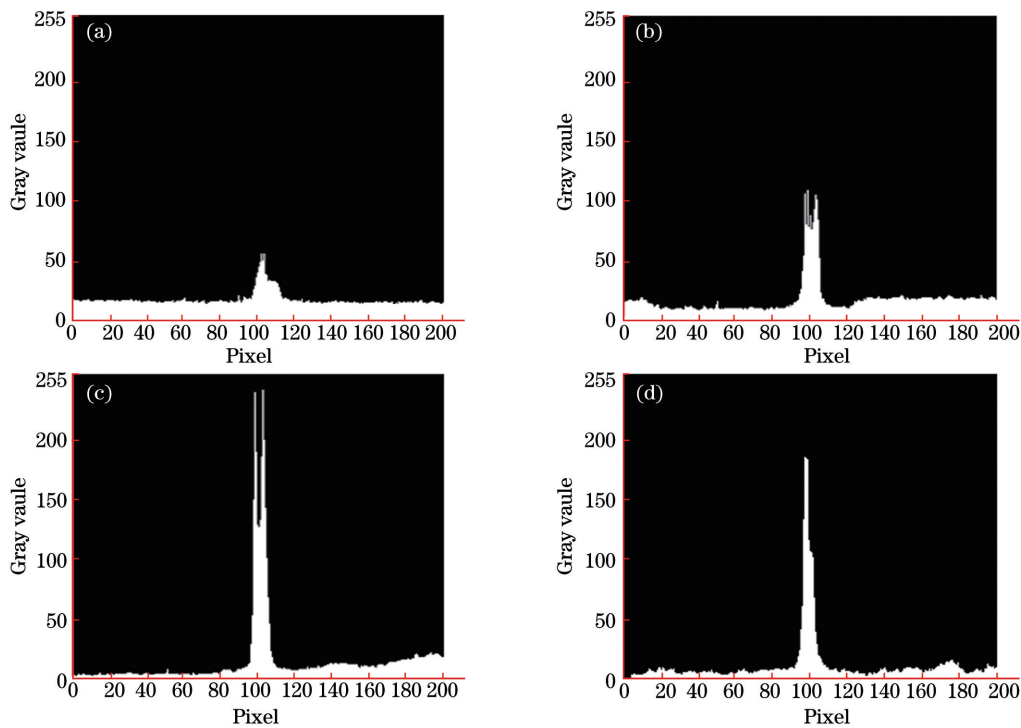


图 5 光条低亮不均匀区域的截面像素直方图。(a)低亮区域 1;(b)低亮区域 2;(c)不均匀区域 1;(d)不均匀区域 2

Fig. 5 Cross section pixel histogram of uneven area and low brightness with laser strip. (a) Low brightness area 1; (b) low brightness area 2; (c) uneven area 1; (d) uneven area 2

通过对比图 2 与图 5 可以看到,这些区域的像素值较低且不均匀,不易确定,与光条高亮稳健区域不同,该区域的像素值与背景差距大且接近 255,而且可以很容易地设置阈值来找到光条高亮稳健区域并计算中心。但这些低亮不均匀区域的像素值具有随机不确定性,通过固定阈值法很难准确选出合适的阈值,如果选取不当很容易导致断线等不良的提取结果,如图 6 所示。此外,即使能够通过持续试探性地降低阈值来消除断线,但又会导致计算更多无效的像素,这不仅降低计算速度也会增大无效像素对中心提取带来的误差干扰。在众多光条中心提取算法中,像素值阈值的设置又是中心提取算法中不可缺少的条件之一。虽然这类不良区域的像素值具有随机不确定性,阈值不容易确定,但毕竟这些区域是被激光照射补光所产生的结果,其亮度依然会高于周围背景,则光条与其周围背景像素值产生明显的梯度下降,这个特点为提取低亮度区域的中心线提供了可行性。

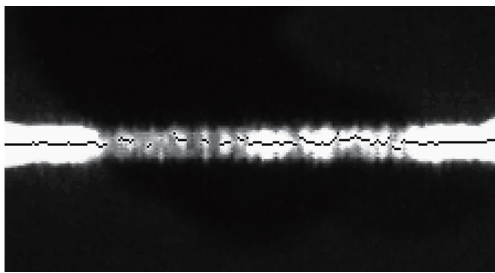


图 6 低亮度不均匀区域的中心断线

Fig. 6 Center break in low brightness uneven area

2.2 阈值形心法原理

采用阈值形心法提取光条中心是以适当的阈值来分割光条^[17],并以光条截面上、下边界的形心作为光条中心。实际上,“光条中心”本身就是一个几何概念。在理想的光条图像中,光条截面上的像素值在中心两侧呈对称分布。假设图像某列(行)为图像截面,则其中某段满足阈值的连续像素为光条截面,光条截面的上边界坐标为 (x, y_1) ,下边界坐标为 (x, y_2) ,则中心 U 的位置可表示为

$$U = \frac{y_1 + y_2}{2}. \quad (1)$$

在物理学中,形心是指截面图形的几何中心,质心是针对实物体而言的,而形心是针对抽象几何体而言的。对于密度均匀的实物体,质心和形心重合,当物体密度不均匀时,形心未必发生变化,而质心将会受到较大的影响,两者差距可能就会较大,因此相较于质心,形心对激光光条的密度不会特别敏感。

当光条像素值不均匀时,质心法所计算的质心就会偏向密度更大的位置,而密度更大的位置有可能是偏离真实的中心位置,则形心受像素值分布密度的干扰更低^[18]。

2.3 八邻域链码

八邻域链码被广泛应用在轮廓跟踪和细化等算法中^[19]。假设当前边界点坐标为 (x, y) ,则下一个与其相邻的边界点必定在 (x, y) 的八邻域内,该邻域内像素位置的链码表示和坐标表示如图 7 所示,图 7(a)为链码表示,链码值 D_{dir} 为 0~7,按顺时针旋转递增,图 7(b)为链码的坐标表示。

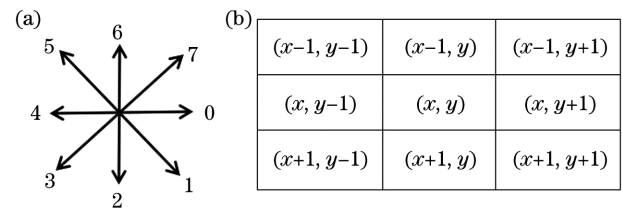


图 7 链码表示。(a)八邻域链码表示;(b)八邻域坐标表示
Fig. 7 Chain code representation. (a) Eight-neighborhood chain code representation; (b) eight-neighborhood coordinate representation

2.4 Otsu 自适应阈值算法

Otsu 算法是一种自适应阈值分割算法,由日本学者 Nobuyuki Otsu 提出,最开始应用于图像二值化分割处理,通过该算法可以实现对灰度图像的自适应阈值二值分割。Otsu 算法的核心思想是将图像像素分为背景和前景(目标)两类并计算像素值的类间方差,当类间方差最大时,确定其为图像二值分割的最佳阈值。因方差是像素灰度分布均匀性的一种度量,背景和前景之间的类间方差越大,说明构成图像的两部分差别越大,分割效果越好。设图像的像素值范围为 $[0, L-1]$,图像的像素总数为 $M \times N$,像素值 i 的像素个数为 m_i ,则像素值 i 出现的概率 $p_i = m_i / MN$,其中 L 为小于等于 256 的正整数, M 为图像长的像素数, N 为图像宽的像素数。假设像素值 t 为分割阈值,则图像内像素值小于 t 值的像素为背景类,即像素值位于 $[0, t]$,大于 t 值的像素为前景类,即像素值位于 $[t+1, L-1]$ 。若 $P_0(t)$ 与 $P_1(t)$ 分别表示图像内像素为背景类和前景类的概率, $u(t)$ 为整幅图像的像素值平均值, $u_0(t)$ 和 $u_1(t)$ 分别表示背景类和前景类像素的平均像素值,则有

$$P_0(t) = \sum_{i=0}^t p_i, \quad (2)$$

$$P_1(t) = \sum_{i=t+1}^{L-1} p_i = 1 - P_0(t), \quad (3)$$

$$u_0(t) = \sum_{i=0}^t \left[i \frac{p_i}{P_0(t)} \right], \quad (4)$$

$$u_1(t) = \sum_{i=t+1}^{L-1} \left[i \frac{p_i}{P_1(t)} \right], \quad (5)$$

$$u(t) = \sum_{i=0}^{L-1} i p_i. \quad (6)$$

因此可得类间方差 $\delta_b(t)$ 为

$$\delta_b(t) = P_0(t) [u_0(t) - u(t)]^2 + P_1(t) [u_1(t) - u(t)]^2. \quad (7)$$

其中任意 t 又满足

$$P_0(t) + P_1(t) = 1, \quad (8)$$

$$P_0(t)u_0(t) + P_1(t)u_1(t) = u(t). \quad (9)$$

为了计算方便,类间方差 $\delta_b(t)$ 进一步简化为

$$\delta_b(t) = P_0(t)P_1(t) [u_1(t) - u_0(t)]^2. \quad (10)$$

当 t 值为最大类间方差时,即为最优阈值,表达式为

$$t_{\text{best}} = \operatorname{argmax}_{0 \leq t \leq L-1} [\delta_b(t)]. \quad (11)$$

近年来,有许多研究者提出了各种 Otsu 法的改进算法。Ng^[20] 提出了 VE (Valley-Emphasis) 算法,其根据谷值信息发生概率小的特点对类间方差目标函数给予加权,使所求阈值更接近直方图的谷底值,但当缺陷较小时,谷值信息欠缺,将导致所求阈值不佳。针对此问题,Fan 等^[21] 提出了一种改进的 VE(NVE) 算法,其考虑了更多的谷值邻域信息;Yuan 等^[22] 又提出了加权目标方差(WOV)法,其以目标类发生的概率作为权重以加权目标方差函数,从而确定阈值;Hu 等^[23] 根据背景与目标的比例限制了 Otsu 阈值的取值范围,在此范围内对人脑图像和断层图像进行分割,可以取得良好的效果;Malarvel 等^[24] 提出了一种基于威布尔分布的 Otsu 改进算法,该算法使用自适应的最小权重参数来自动确定阈值,并应用于 X 射线焊接图像的缺陷分割;Liao 等^[25] 提出了一种快速的多 Otsu 阈值算法,并提出了一种与常用的最大类间方差准则等价的改进方法,然后根据新准则设计了一种递推算法来有效寻找最优阈值,且修改后的类间方差可以预先计算并存储在查找表中;Zheng 等^[26] 提出了一种基于局部信息的自适应加窗距离约束的 Otsu 阈值分割方法,其可以实现全局计算过程中为每个窗口计算一个阈值,可以对更多细节进行保留;Moghaddam 等^[27] 提出了一种多尺度二值化框架(AdOtsu),该框架通过在空间域上的本地化特性来实现,且通过

引入快速的网格模型在不同的规模上进行几次二值化处理,能够恢复文本中的弱连接和笔画,特别是在退化的历史文档中,但算法的复杂度极高。

上述算法无论所求为单阈值还是多阈值,都需要对图像进行全局计算,计算量大,速度慢,没有预估目标,限制了图像内的计算范围,只在目标区域附近求 Otsu 阈值。结合所提出的内部推进策略,提出了一种多阈值 Otsu 法,该算法适用于光条中心的提取,但仅对目标区域进行多阈值计算。原理:对光条的每一列以推进的预测光条中心为中心来统计限定长度区域内的像素值,并分别求取区域内像素值的最大类间方差来确定阈值,使光条区域的每一列都有一个最佳中心计算阈值,这样可以解决全局阈值对一些光条细节中心提取不适用和计算量大的问题,又使光条中心的计算更加稳健。

设光条存在于每一列限定 2ω 像素长度的竖直窗口区域,区域内像素值范围为 $[a, b]$,其中 $0 \leq a < b \leq 255$, ω 为光条的实际宽度,像素总数为 2ω 。像素值 i 的出现概率 $p_i = m_i / 2\omega$,假设像素值 T 为某列光条的中心提取阈值,则像素值在 $[a, T]$ 之间的像素为背景类,像素值在 $[T+1, b]$ 之间的像素为光条类。若 $P_2(T)$ 与 $P_3(T)$ 分别表示像素在光条每一列 2ω 长度的区域内是背景类和光条类的概率, $u_2(T)$ 和 $u_3(T)$ 分别表示背景类和光条类像素的平均像素值,则由(2)~(9)式可得光条每一个长度区域内的类间方差,表达式为

$$\delta_b(T) = P_2(T)P_3(T) [u_3(T) - u_2(T)]^2. \quad (12)$$

当 T 值为最大类间方差时,即每一列光条的最优中心提取阈值为

$$T_{\text{best}} = \operatorname{argmax}_{a \leq T \leq b} [\delta_b(T)]. \quad (13)$$

2.5 内部推进算法

在实际应用中,为了满足光学合作标记的要求,即使物体表面部分区域存在不确定的反光差的区域而导致光条部分区域存在弱光和不均匀区域,但所选择的激光器能够满足激光照射在物体表面的绝大部分区域保持光条明亮。因此通过设定一定的阈值可以很容易地找到激光光条的位置,一般来说阈值要大于背景的像素最大值,小于最大饱和峰值。经过大量的实验观测,线激光器所投射的激光光条在实验相机所拍摄的图像中的最大饱和和峰值为 251,因此选择比最大饱和值稍小一些的 210 作为光条寻找阈值,记该阈值为 H ,该阈值用于定位光条,寻找内部推进的起始点;当定位到光条时,自起始点向上

计算 5 个连续像素的平均像素值并作为光条中心的计算阈值,记该阈值为 S ,使用该阈值计算所得的中心并作为内部推进的起始中心。自光条当前的中心点向前推进一个像素,并以该推进点为中心计算 $2w$ 长度内像素的 Otsu 阈值,将其作为中心提取阈值以计算中心,并不断前进和更新阈值,直到到达光条末尾为止。

根据光条图像的特点,可以对光条的搜索和访问路径进行优化,减少对图像内非光条区域的访问。图 8 为模拟的激光光条,图 9 为该算法的基本搜索策略,箭头为访问走过的大致路线,箭头未走过的不含光条区域为应该尽量避免访问的区域。

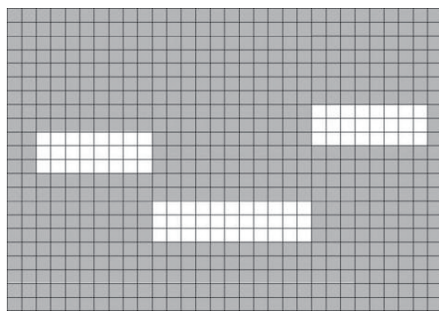


图 8 假设的激光光条

Fig. 8 Hypothetical laser stripe diagram

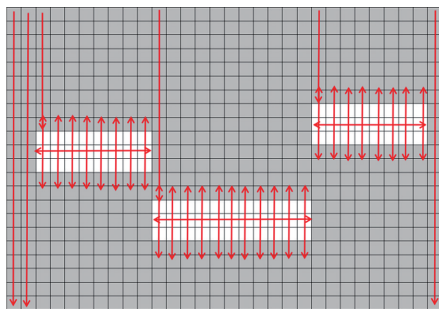


图 9 搜索策略图

Fig. 9 Search strategy map

所提算法的详细步骤如下,内部推进示意图如图 10 所示,其中 A 为起始中心点, B 为向后推进点, C 为向前推进点,流程如图 11 所示,其中 w' 为

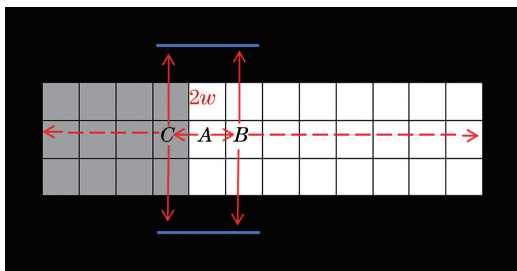


图 10 内部推进示意图

Fig. 10 Internal propulsion diagram

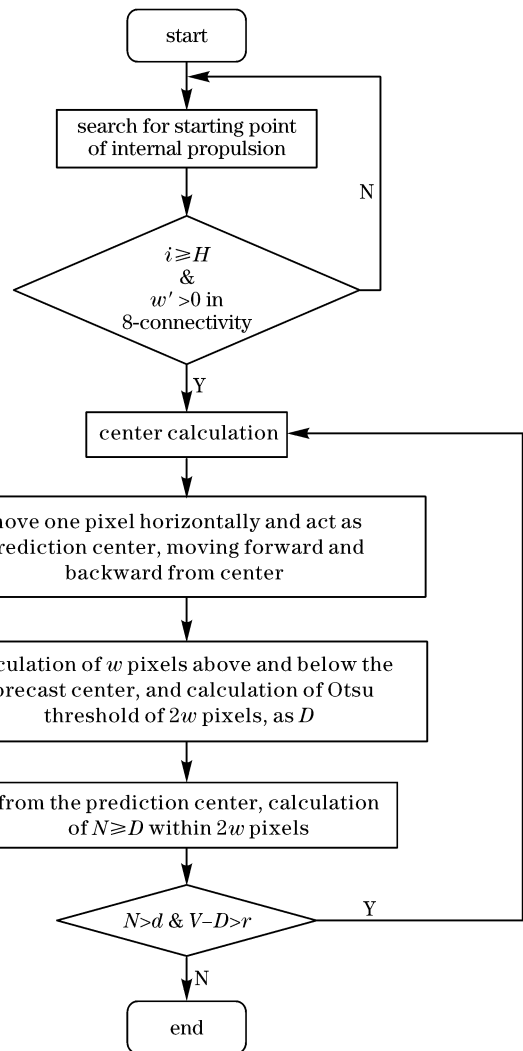


图 11 所提算法的流程

Fig. 11 Flow chart of proposed algorithm

八邻域内满足阈值 H 的像素数。

1) 从图像左上角的原点开始,自上而下、自左向右扫描图像。

2) 当发现大于等于阈值 H 的像素时,停止扫描,在该像素坐标处进行顺时针八邻域搜索,如果在 8 个方向上未发现新的满足阈值 H 的像素,则该像素为噪声点,则继续从该噪声点起开始扫描,自上而下、自左到右扫描图像,如果再发现新的满足阈值 H 的像素则返回,如果没有发现新的满足阈值 H 的像素,则继续扫描直到图像扫描结束;如果在 8 个方向上发现新的满足阈值 H 的像素,则该像素为光条的起始点,自该像素坐标分别向下、向上搜索该列满足阈值 S 的像素,直到遇到不满足阈值 S 的像素停止搜索,并运用中心公式计算该列的中心。

3) 自该起始点所在列的中心坐标作为起始中

心,分别向后、向前推进,每次仅推进一个像素(一行);假设当前中心点坐标为 (k, l) ,则向前推进点为 $(k, l-1)$,则向后推进点为 $(k, l+1)$;然后以推进点为中心,分别向上和向下统计 w 个像素,计算该 $2w$ 个像素的 Otsu 自适应阈值,记该阈值为 D ,再以推进点为中心,在 $2w$ 像素长度内分别统计大于等于 D 的像素个数 N 和推进点的像素值 V 。如果 $N > d$ 且 $V - D > r$ (d 和 r 均为大于0的整数),则以推进点为中心,在 $2w$ 像素长度内计算该列的光条中心并更新当前中心位置,不断推进和更新阈值 D 和中心,直到条件不满足则停止推进。此外,为了避免重复推进,当向前推进时,如果计算的新中心的列坐标与上一个起始点向后推进所计算的最后一个中心的列坐标相同,则停止向前推进。

4) 自 $l+1$ 列开始,自上而下、自左向右扫描图像,转至步骤 2)。

3 实验结果与分析

根据算法展开实验,搭建两个实验平台,如图 12 所示。前期实验的被测物体的尺寸相较于焊缝较大,因此在实验平台 1 上完成,随着研究的循序渐进,实验平台 2 搭建完成,最后的焊接环境光测试在实验平台 2 上完成。实验平台均以红色线激光为光源,中心波长为 650 nm,功率为 100 mW,线宽为 0.1 mm,焦距与线长可调;CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor)工业相机的分辨率为 2592 pixel \times 1944 pixel;在实验平台 2 上的工业相机镜头前安装中心波长为 650 nm,带宽为 ± 15 nm 的窄带滤光片;软件环境为 Win7 系统、Visual Studio 2013 和 OpenCV3.0。

此外,为了便于画线直观以显示亚像素级的坐标数值,对其进行取整处理,提取结果的局部放大图如图 13 所示。

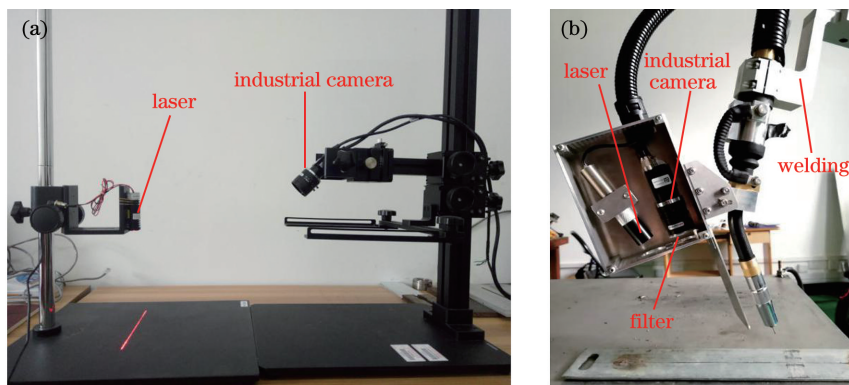


图 12 实验平台。(a)平台 1;(b)平台 2

Fig. 12 Experimental platform. (a) Platform 1; (b) platform 2

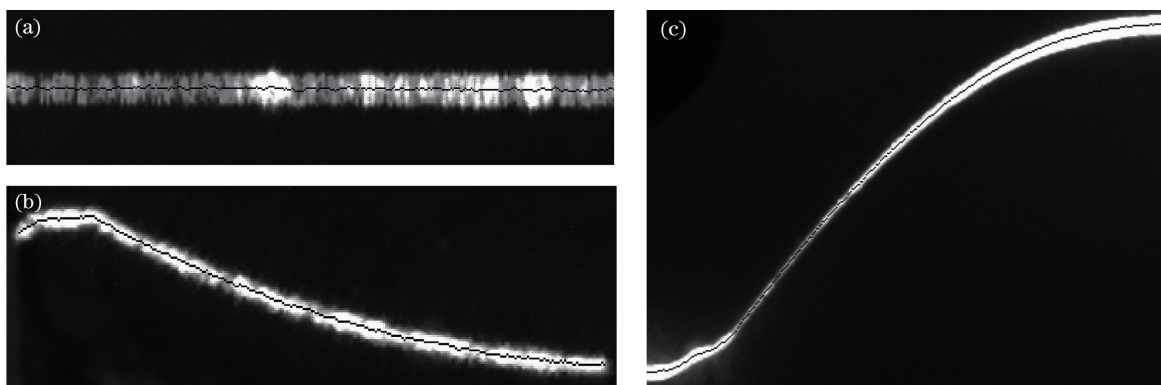


图 13 非稳健光条的提取结果。(a)全局非稳健的光条;(b)弯曲非稳健的光条;(c)大斜率非稳健的光条

Fig. 13 Extraction results of non-robust laser stripes. (a) Globally non-robust laser stripes; (b) bending non-robust laser stripes; (c) large slope non-robust laser stripes

从图 13 可以看到,光条每列的中心均被提取,该算法对不同质量的光条具有较强的适应性,特别是对低亮度不均匀的非稳健光条具有良好的提取效

果,可见算法具有较强的鲁棒性。

对于算法精度和速度的量化分析,分别采用所提算法与不同算法展开对比实验。

在实际中,由于中心真值未知,常用标准差 σ 分析误差^[28-29],设 x_s 为测量值, \bar{x} 为均值, n 为中心点数,则残差 $v_s = x_s - \bar{x}$,则 σ 值可表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^n v_s^2}{n-1}} \quad (14)$$

表 1 中心坐标的误差分析

Table 1 Error analysis of central coordinates

unit: pixel

Number	Gray gravity algorithm	Steger algorithm	Proposed algorithm	Sun algorithm
1	(573.636,30.452)	(573.211,1.770)	(570.071,1.623)	(572.560,49.428)
2	(574.493,30.452)	(573.779,1.752)	(570.942,1.612)	(573.589,44.502)
3	(299.957,76.573)	(298.428,82.420)	(292.035,1.758)	(292.696,27.070)
4	(368.848,90.788)	(370.131,92.979)	(368.782,90.569)	(369.500,90.603)
5	(300.862,82.576)	(303.439,83.472)	(300.547,82.487)	(301.376,83.518)

为了克服在实际中的中心真值未知的问题以及进一步验证算法的精度,制作一张光条中心真值已知,尺寸为 500 pixel×500 pixel 且服从高斯分布的光条仿真图像,并对光条增加弱光不均匀区域,其中光条的实际长度为 449 pixel,中心为 $y = 250$ 的一条水平直线。光条仿真图像如图 14 所示。

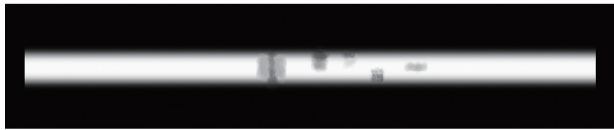


图 14 光条仿真图像

Fig. 14 Laser stripe simulation image

设每个提取的中心点偏离真实中心 $y = 250$ 的误差为 R_s ,则方均根误差(RMSE)可表示为

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^n R_s^2}{n}} \quad (15)$$

表 2 为对仿真图像运用 4 种算法的方均根误差对比结果。

表 2 中心的方均根误差分析

Table 2 RMSE analysis of center unit: pixel

Gray gravity algorithm	Steger algorithm	Proposed algorithm	Sun algorithm
0.815355	4.142400	0.271103	0.601000

从表 2 可以看到,所提算法依然保持最低的误差,相较于前期的工作^[13],所提算法可以克服其缺点,实现对非稳健光条中心的良好提取,性能实现极大的提升。在初始阈值为 210 的情况下,以

表 1 为运用 4 种算法对 5 张图像提取中心的误差对比结果。

从表 1 可以看到,所提算法的误差比另外三种算法都低,这进一步证明所提算法具有更好的鲁棒性和精确性,特别是应对光质差的光条更具优势。

图 13(a)为例,文献[13]虽然能够快速提取光质稳健良好的光条,但为光质差的光条选择合适的阈值是个难点,若阈值选择不当,则效果不理想,阈值为 210 的中心提取结果如图 15 所示。

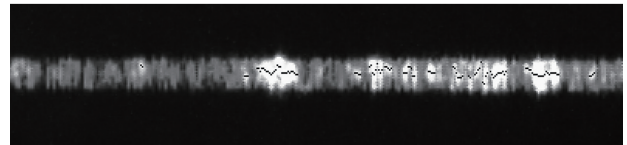


图 15 阈值为 210 的中心提取结果

Fig. 15 Center extraction result with threshold of 210

即使通过手动大幅度降低阈值到 100,结果依然不理想,如图 16 所示。相较于图 13(a)所提算法所提取的中心,文献[13]所提取的中心波动较大,误差明显,且依然存在中心断裂的问题,难以确定合适的阈值,这不仅是文献[13]的缺点也是许多单一固定阈值算法的普遍问题。

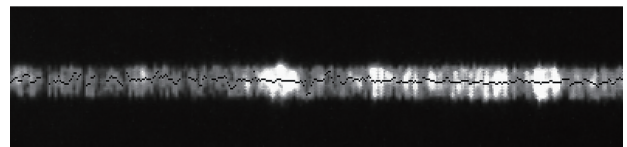


图 16 阈值为 100 的中心提取结果

Fig. 16 Center extraction result with threshold of 100

通过以上数据综合分析,又进一步证明了所提算法具有良好的性能,通过自适应阈值方法可以极大地提高所提算法的鲁棒性和精确性。

接下来对所提算法的速度进行实验分析。表 3 为 5 张图像运用 4 种算法,每张图像运行 10 次后的平均运行时间对比结果。

表 3 各算法的运行时间

Table 3 Running time of each algorithm

unit: s

Number	Gray gravity algorithm	Steger algorithm	Proposed algorithm	Sun algorithm
1	0.509	6.560	0.205	0.348
2	0.519	6.522	0.211	0.340
3	0.642	3.775	0.405	0.437
4	0.536	4.414	0.306	0.357
5	0.579	3.553	0.408	0.416

从表 3 可以看到,所提算法的平均运行时间约为传统重心算法的 2 倍,约为 Steger 算法的 19 倍,约为 Sun 算法的 1.2 倍,可见所提算法具有较快的提取速度。因为所提算法通过内部推进算法来规划访问路径,可以极大地去除对不含光条区域的访问,减少图像的访问面积,从而提高了提取速度,不像另外三种算法对图像进行全局计算。此外,所提算法的复杂度相对简单,而 Steger 算法涉及高斯滤波和 Hessian 矩阵等操作,这些操作的计算量大,导致提取速度慢。

关于抗噪性测试,对实验图像全局添加 20000 个椒盐噪声 (SPN) 以及标准差为 2 和均值为 0 的高斯噪声 (GN),从而制作成仿真噪声图像,再采用所提算法对噪声图像进行中心提取。对噪声图像的提取结果进行量化分析,设 σ_1 为原图光条中心的标准误差, σ_2 为噪声图光条中心的标准误差, Δ 为绝对误差, e 为相对误差,则有

$$e = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1} = \frac{\Delta}{\sigma_1} \quad (16)$$

表 4 为 5 张噪声图像提取的中心坐标误差结果。

表 4 相对误差分析

Table 4 Relative error analysis

Noise	1	2	3	4	5
SPN	$(8.4 \times 10^{-4}, 3.7 \times 10^{-3})$	$(0, -5.6 \times 10^{-4})$	$(0, 1.0 \times 10^{-3})$	$(0, -3.4 \times 10^{-5})$	$(1.1 \times 10^{-3}, 8.8 \times 10^{-4})$
GN	$(1.4 \times 10^{-4}, 6.8 \times 10^{-3})$	$(-2.0 \times 10^{-4}, -9.8 \times 10^{-3})$	$(1.3 \times 10^{-3}, 4.7 \times 10^{-2})$	$(0, -4.6 \times 10^{-4})$	$(-8.2 \times 10^{-4}, -1.8 \times 10^{-4})$

从表 4 可以看到,噪声所带来的误差极小,并未对结果造成实质的影响,在像素级单位坐标下这些微小的误差完全可以接受,因此该算法也具有较好的抗噪性;另一方面,事实上仿真噪声图像模拟的是极端情况,现在工业相机成像技术已经相当成熟,成像质量良好,大量噪声的情况几乎已不存在,模拟结果可以接受。

此外,所提算法在焊缝识别中也具有良好的抗反光效果,使用线激光视觉传感器对 V 型坡口焊缝进行识别,当焊缝侧面光滑反光时,将会导致光条被调制成复杂的层叠现象。这种层叠现象对中心的提取带来极大的干扰,许多算法均会导致巨大的误差,而所提算法却能很好地屏蔽掉由反光带来的干扰,图 17 为所提算法对该现象提取的中心。

最后,结合实际应用对环境光干扰噪声进行测试。通常情况下,环境光对光条图像的影响较小,但在少数恶劣的情况下,环境光的干扰依然存在,特别

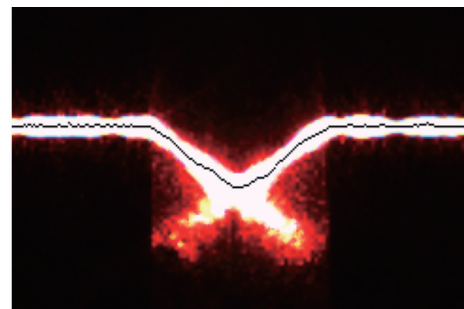


图 17 V 型坡口焊缝的反光层叠现象

Fig. 17 Reflective lamination of V-groove welds

是在恶劣的焊接环境下强烈的弧光和飞溅光,即使镜头前已经安装滤波片,依然会有一定弧光和飞溅光的干扰。结合实际应用选择具有代表性的焊接环境中的弧光和飞溅光作为干扰环境光,用来测试所提算法对环境光的抗干扰性。图 18 为不同图像的测试结果。从图 18 可以看到,在环境光的干扰下,光条中心的提取依旧保持良好的稳健性。

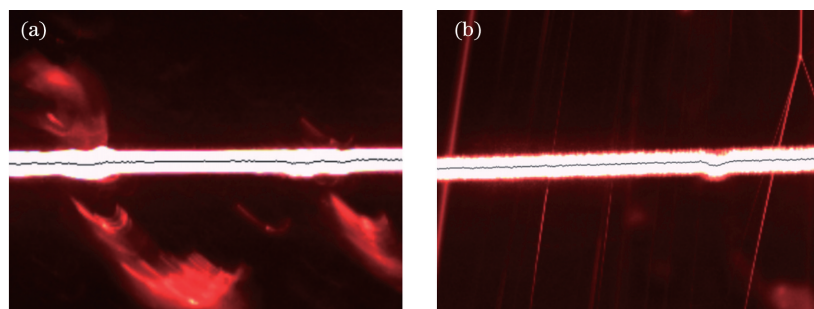


图 18 不同干扰环境下的光条提取结果。(a)弧光干扰结果;(b)飞溅干扰结果

Fig. 18 Extraction results of laser stripes in different interference environments. (a) Arc interference result;
(b) splash interference result

4 结 论

本文提出一种新的光条中心提取算法,即内部推进算法,并对所提算法的理论进行详细的讲解和实验验证。该算法的优点在于光条中心的提取速度快、鲁棒性好和精度高,对不同成像质量的光条具有较强的适应性。该算法在尽可能去除图像内非光条区域的同时,可在推进中实现自适应阈值,从而提高激光光条中心提取的速度、精度和鲁棒性。实验结果表明,与传统算法相比,该算法具有更高的鲁棒性、更快的速度以及更高的精度,而且具有良好的抗噪和抗环境光的能力。当存在低亮度不均匀区域时,所提算法具有较好的提取效果,能够解决中心提取断线和误差较大的问题。这些优点可以使线结构光传感器具有更好的应用,特别在工业不良条件下的在线扫描、检测、测量以及焊缝跟踪等领域。

参 考 文 献

- [1] Wang S C, 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.
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.
- [2] 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.
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.
- [3] Li C H, Zhang Y J, Han J T, et al. Asymmetric stripe adjustment method for stripe center extraction[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0504005.
李程辉, 张英杰, 韩江涛, 等. 应用于条纹中心提取的非对称条纹调整方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0504005.
- [4] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113-125.
- [5] Yang Y, Yan B, Dong D W, et al. Method for extracting the centerline of line structured light based on quadratic smoothing algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101504.
杨毅, 闫兵, 董大伟, 等. 基于二次平滑算法的线结构光中心线提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 101504.
- [6] Trucco E, Fisher R B, Fitzgibbon A W, et al. Calibration, data consistency and model acquisition with laser strippers[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1998, 11(4): 293-310.
- [7] Blais F, Rioux M. Real-time numerical peak detector[J]. *Signal Processing*, 1986, 11(2): 145-155.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Yin X Q, Tao W, Feng Y Y, et al. Laser stripe extraction method in industrial environments utilizing self-adaptive convolution technique[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2653-2660.
- [11] Sun Q C, Chen J, Li C J. A robust method to extract a laser stripe centre based on grey level moment[J].

- Optics and Lasers in Engineering, 2015, 67: 122-127.
- [12] Yang X R. Research on key technologies of CMM and line structured light vision sensor integrated reverse engineering system[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013: 54.
杨雪荣. CMM 与线结构光视觉传感器集成的逆向工程系统关键技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013: 54.
- [13] Li W M, Peng G, Gao X Y, et al. Fast extraction algorithm for line laser strip centers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304002.
李伟明, 彭国, 高兴宇, 等. 线激光光条中心快速提取算法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304002.
- [14] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [15] Cheng Y Z. Mean shift, mode seeking, and clustering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(8): 790-799.
- [16] Steger C. Unbiased extraction of lines with parabolic and Gaussian profiles [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2013, 117(2): 97-112.
- [17] Jordan J R. Interpolating digital data processing apparatus for correlation type flow measurement: US4254470 [P/OL]. 1981-03-05 [2020-11-09]. <https://www.freepatentsonline.com/4254470.html>.
- [18] Cui X J, Yang C, Liu B H, et al. Self-adaptive iterative method of extracting center of linear-structured light stripe[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1): 73-76.
崔希君, 杨川, 刘保华, 等. 线性结构光心的自适应迭代提取法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 73-76.
- [19] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image processing, analysis and machine vision[M]. Boston: Springer, 1993.
- [20] Ng H F. Automatic thresholding for defect detection [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(14): 1644-1649.
- [21] Fan J L, Lei B. A modified valley-emphasis method for automatic thresholding [J]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(6): 703-708.
- [22] Yuan X C, Wu L S, Peng Q J. An improved Otsu method using the weighted object variance for defect detection[J]. Applied Surface Science, 2015, 349: 472-484.
- [23] Hu Q M, Hou Z, Nowinski W L. Supervised range-constrained thresholding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(1): 228-240.
- [24] Malarvel M, Sethumadhavan G, Bhagi P C R, et al. An improved version of Otsu's method for segmentation of weld defects on X-radiography images[J]. Optik, 2017, 142: 109-118.
- [25] Liao P S, Chen T S, Chung P C. A fast algorithm for multilevel thresholding[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2001, 17(5): 713-727.
- [26] Zheng J, Zhang D H, Huang K D, et al. Adaptive windowed range-constrained Otsu method using local information[J]. Journal of Electronic Imaging, 2016, 25(1): 013034.
- [27] Moghaddam R F, Cheriet M. AdOtsu: an adaptive and parameterless generalization of Otsu's method for document image binarization[J]. Pattern Recognition, 2012, 45(6): 2419-2431.
- [28] Liu N, Lu R S, Xia R X, et al. A novel algorithm for computing the plane of line structured light in 3D vision measurement [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(2): 179-184.
刘宁, 卢荣胜, 夏瑞雪, 等. 一种用于计算三维视觉测量中线结构光平面的新型算法[J]. 光子学报, 2012, 41(2): 179-184.
- [29] Sun X M. Research on key technologies of pavement crack inspection based on structure light [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 31.
孙晓明. 基于结构光的公路路面裂缝检测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 31.

Internal Propulsion Algorithm for Extracting Center of Line Laser Stripe

Li Weiming¹, Mei Feng¹, Hu Zeng¹, Gao Xingyu^{1*}, Yu Haoyong²

¹ Guangxi Key Lab of Manufacturing System and Advanced Manufacturing Technology, School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

² Department of Biomedical Engineering, National University of Singapore, Singapore 117583, Singapore

Abstract

Objective Line-structured light three-dimensional (3D) measurement system is widely used in object measurement, target detection, and other fields. The laser stripe center extraction algorithm is the key technology in the system. The center of robust and uniform laser stripe is easily extracted. However, in many industrial environments, there are some uncertain poor reflection factors, such as dirt and rust on the surface of the measured object and the bad laser emitting quality, leading to the existence of low and uneven brightness areas in the laser stripe images. Compared with the robust region, the pixel value of the robust region is close to 255 and differs greatly from the background pixel value. However, the pixel value of these low and uneven brightness areas is random and uncertain. Thus, it is not easy to select the appropriate pixel threshold accurately using the fixed threshold method. If the threshold is not selected properly, it can easily lead to a bad extraction result. Many existing algorithms cannot easily determine the appropriate pixel threshold in these areas. They tend to cause a larger calculation error and disconnection of the laser stripe centers in these areas. Thus, it is essential to improve the self-adaptability of the center extraction algorithm to solve this problem and improve robustness. At the same time, the complexity of many existing algorithms is high, and redundant scanning for the image region without laser stripe decreases the speed of the algorithms. The laser stripe center calculation is only related to the laser stripe itself and its surrounding pixels.

Methods This study proposes an internal propulsion algorithm for laser stripe center extraction. First, according to the distribution characteristics of the laser stripe in the image, the algorithm uses an internal propulsion strategy to plan the search path. The search path moves forward or backward along the center of the stripe to reduce processing image regions without laser stripes; thereby, improving the computational speed of the laser stripe center. Besides, the 8-connectivity search is used to eliminate noise points when searching the starting point of internal propulsion. Second, the proposed internal propulsion algorithm is inspired by the mean shift algorithm, which is an unsupervised iterative clustering algorithm in the field of machine learning. This algorithm draws lessons from the idea of moving, updating, and ending of the mean shift algorithm. The internal propulsion algorithm also belongs to a clustering algorithm. The core process is as follows: calculate the initial center first, move forward or backward a pixel as prediction center, calculate the new threshold using the proposed adaptive threshold method, calculate the new center point, update the center point, and repeat until the end. Among them, the calculation of the center uses the geometric center method. The geometric center method extracts the laser stripe center using the geometric centroid of the upper and lower boundaries of the laser stripe cross-section. The stripe boundary is determined by the pixel threshold. The proposed algorithm uses the improved Otsu adaptive threshold method to update the threshold during internal propulsion continuously. The traditional Otsu method is a global threshold method. However, the global threshold method is not easy to consider the detailed segmentation, and it requires high calculation. In this study, the traditional Otsu method is improved to extract the laser stripe center. Let the global threshold become multi-threshold, and the maximum between-class variance is computed for each column pixel of the laser stripe within a limited length to determine the threshold so that each column of the laser stripe has an optimal center calculation threshold.

Results and Discussions The proposed algorithm uses an internal propulsion strategy to plan the search path and reduce processing image regions without laser stripes. Thus, it improves the computational speed of the laser stripe center (Table 3). The improved Otsu adaptive threshold method overcomes the inappropriateness of the global threshold to detailed segmentation and reduces computational effort. Besides, it makes the laser stripe center extraction more robust. Using the improved Otsu adaptive threshold method, the proposed algorithm significantly improves the robustness and accuracy of center extraction. It solves the problem of disconnection in the low and

uneven brightness stripe areas (Fig. 13). It also reduces center extraction error, especially in low and uneven brightness areas (Tables 1 and 2). Finally, the proposed algorithm has good anti-noise properties when adding noise to the experiment images (Table 4).

Conclusions This study proposes an internal propulsion algorithm for laser stripe center extraction. The experimental results show that the proposed algorithm has low complexity, fast running speed, good robustness, and high accuracy. The proposed algorithm achieves excellent anti-noise effect after adding noise points. In particular, the internal propulsion algorithm can reduce processing image regions without laser stripes and has a good extraction effect on the non-robust laser stripe with low and uneven brightness areas. Owing to these advantages, the proposed algorithm will be of great significance in many industrial applications, such as online product inspection and welding seam tracing, especially when fast speed and good robustness are required in real working conditions where the reflectivity of the object surface is complicated and bad.

Key words measurement; structural light measurement; center extraction; lasers; internal propulsion

OCIS codes 120.6650; 100.6890; 140.3460