

复杂干扰情况下的结构光条纹中心提取方法

周渊¹, 孟祥群², 江登表³, 唐厚君^{1*}

¹上海交通大学电子信息与电气工程学院电气工程系, 上海 200240;

²上海方菱计算机软件有限公司, 上海 200240;

³江苏科技大学计算机学院, 江苏 镇江 212003

摘要 提出一种新的结构光条纹中心线提取算法, 该算法能在不同的干扰环境下稳定地提取出光条中心线, 并且具备修补断线的能力。利用密度聚类算法的无监督特性, 即使存在断线或噪声干扰, 仍能快速聚类中心线的候选像素点集合, 大幅缩小搜索范围; 经过实验数据分析发现, 不同场景的中心线还具有亮度高且趋于连续的共性特征, 使用像素点间欧氏距离和亮度值定义能量函数对该特征建模, 利用最短路径搜索算法迭代收敛实现中心线精确提取。实验结果表明, 在三种强烈干扰的结构光图像中, 算法提取中心线均方根误差约为 0.4 pixel; 处理速度相比同样抗干扰能力较强的图像接缝算法提高了 12.48 倍。所提算法在保持运算速度快、精度高的同时, 大幅提高了抗干扰能力, 有效降低了工业生产中使用结构光测量时的条件限制。

关键词 测量; 线结构光; 中心提取; 密度聚类; 图像接缝

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1204004

Centerline Extraction of Structured Light Stripe Under Complex Interference

Zhou Yuan¹, Meng Xiangqun², Jiang Dengbiao³, Tang Houjun^{1*}

¹Department of Electrical Engineering, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

²Shanghai Fangling Computer Software Co., Ltd., Shanghai 200240, China;

³School of Computer Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China

Abstract A new structured light stripe centerline extraction algorithm is proposed. This algorithm can stably extract the stripe centerline under different interference environments and has the ability to repair broken lines. Using the unsupervised feature of the density clustering algorithm, even if there is a broken line or noise interference, it can still quickly cluster the set of candidate pixels on the centerline, greatly reducing the search range. Then, after experimental data analysis, it is found that the centerline of different scenes also has the features of high brightness and tend to be continuous. The energy function is defined by the Euclidean distance between pixels and the brightness value to model the feature, and the shortest path search algorithm is iteratively converged to accurately extract the centerline. The experimental results show that in three strongly disturbed structured light images, the algorithm extracts the centerline with a root mean square error of 0.4 pixel, the processing speed is 12.48 times faster than the image seam algorithm with the same strong anti-interference ability. The proposed algorithm greatly improves the anti-interference ability while maintaining fast operation speed and high accuracy, and effectively reduces the restrictions of using structured light measurement in industry.

Key words measurement; line structured light; centerline extraction; density clustering; image seam

OCIS codes 120.6650; 140.3295; 100.2960; 100.3008

1 引 言

近年来, 线结构光三维测量技术由于其高精度、高效率和非接触等优点, 被广泛应用于汽车、纺织、

电子和机械加工等领域。该技术的主要测量原理是: 投射一个激光光条到被测量物体表面, 采用工业相机拍摄光条的图像, 提取条纹中心线, 根据中心线的像素坐标计算被测物体表面轮廓的世界坐标^[1]。

收稿日期: 2020-06-29; 修回日期: 2020-07-10; 录用日期: 2020-07-20

* E-mail: hjtang@sjtu.edu.cn

测量过程基于三角法^[2],主要包含两个步骤:一是对整个测量系统,包括相机内外参数、激光光平面等进行标定,确定图像和世界坐标系的相互转换关系;二是提取激光条纹中心线,利用提取结果精确计算被测物体轮廓的像素坐标。其中,激光条纹中心线提取是测量过程的关键问题之一,它直接决定了坐标转换的输入,是做好线结构光测量的基础。因此,需要尽可能提高激光条纹中心线提取算法的速度、精度、抗噪性和稳定性。

国内外学者对结构光条纹中心线提取进行了广泛的研究,其中比较传统的算法包括极值法、灰度重心法、几何中心法、曲线拟合法等^[3]。这些方法利用图像的灰度特性进行中心线提取,优点在于简单、快速,但缺点是精度不高,容易受到噪声干扰的影响。对此,研究者提出了方向模板法^[4]、Hessian 矩阵法^[5]等更具有特征性的方法,提高了算法的精度和稳健性,但是其复杂度较大。改进的方法包括杨尉^[6]提出的将脊线跟踪法结合 Hessian 矩阵用于光条中心提取,兼具了脊线跟踪法处理图像点数少和 Hessian 矩阵法精度高的特点;蔡怀宇等^[7]提出利用主成分分析方法代替 Hessian 矩阵法求取条纹法线过程,避免了多次卷积计算,运算速度相对 Hessian 矩阵法提高了 3 倍。李涛涛等^[8]对光条建立截面能量模型,利用高斯-洛伦兹分峰拟合处理感兴趣区域(ROI)并结合灰度重心法提取光条中心,在强漫反射和镜面反射的条件下将 Hessian 法运算速度提高了 1 倍。李伟明等^[9]结合阈值轮廓跟踪算法和灰度重心法,避免对整幅图像进行搜索,大幅提高了光条中心提取速度。其他新的方法包括 Jang 等^[10]使用欧氏距离映射提取出候选骨架,再对骨架像素进行分类提取中心线,稳定性较好但实时性不足。Li 等^[11]将已知的激光条纹模式定义为不同符号,然后根据模型进行符号序列模板匹配来提取中心线,对于已知模式的激光条纹具有良好的抗干扰能力。Shi 等^[12]从局部图像中检测一组平行的条纹边缘,通过滑动窗口搜索并连接剩余部分边缘来提取中心线,用于对接型焊缝时效果显著。Chen 等^[13]提出使用图像接缝算法,对光条图像建立有向无环图模型,利用最短路径搜索提取光条中心,具有良好的抗干扰能力。

虽然研究者对结构光条纹中心提取问题提出了很多不同的算法,但这些算法往往假定光条质量较好,光质均匀且稳定,因此不能很好地处理光条图像带有强烈干扰的情况。对于有干扰的情形则采用相

应的图像预处理算法,复杂度高,通用性不强。本文通过研究光条内部的像素灰度分布特性,应用密度聚类算法思想从光条原始图像在像素的层级提取可能构成条纹中心线的核心点,然后通过改进的图像接缝算法对中心线进行提取,具备了同时抵抗多种强烈干扰的能力,并且保持了运算的快速性和测量的精确性。

2 算法描述

本文提出的稳定算法提取结构光条纹中心的原理如下:采用自适应性良好的大津阈值法对原始图像进行二值化,使用密度聚类算法按照平面坐标对二值化后的所有亮点进行聚类,划分出不同的线段,并获得组成线段的核心点,最后利用改进的图像接缝算法计算并连接核心点上的最短路径,得到目标中心线。在运算过程中,聚类算法可剔除噪声点和激光条纹边界点,仅保留条纹的核心点,大幅降低了图像接缝算法的复杂度;此外,它还基于按密度处理的特性将断开的条纹识别为同一对象,提供了修补断线的能力。

2.1 常见噪声类型

在应用结构光测量技术的工业生产环境中,通常应尽可能控制材质、光照等因素,以获得质量较好,光质均匀且稳定的激光条纹。但是,对这些因素的控制不一定能够实现,例如常见的阻碍因素包括成本限制、操作空间限制、加工工艺限制等。以激光切割和焊缝追踪为例,常见的强烈干扰包含以下几种:

- 1) 由于被测量物体表面污损造成部分区域反射率显著下降,结构光条纹出现明显中断(图 1);
- 2) 由于加工环境的照明设施安装或者自然光线的不当引入,结构光条纹被明显的光斑干扰(图 2);
- 3) 由于特定加工工艺的根本特点,例如焊接时产生难以避免的火花,结构光条纹受到大量颗粒状噪声的干扰(图 3)。

传统的激光条纹中心线提取算法在面对上述干扰时,或使用各种图像分割算法作为预处理步骤^[14-15],尝试分离出激光条纹区域;或在提取后使用线段拟合算法对激光条纹进行修正^[16]。这些算法复杂度不一,且通常只能处理一种特定的干扰类型,通用性有待提高。

2.2 激光线密度聚类

密度聚类思想最早由 Ester 等^[17]在研究无监督



图 1 受被测物体表面污损影响发生断裂的激光条纹(模拟)
Fig. 1 Laser stripe that breaks due to surface contamination of the object being measured (simulation)

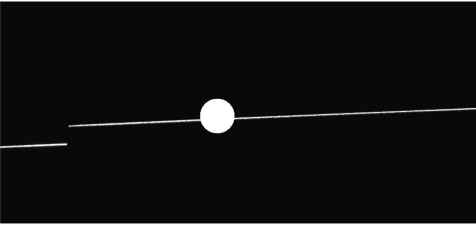


图 2 受光斑干扰的激光条纹(模拟)

Fig. 2 Laser stripe disturbed by light spot (simulation)

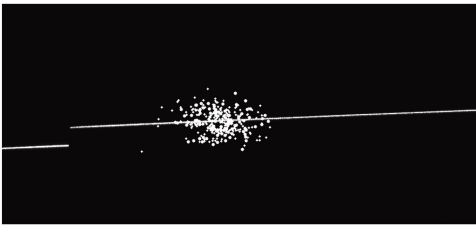


图 3 受火花干扰的激光条纹(模拟)

Fig. 3 Laser stripe disturbed by sparks (simulation)

聚类算法时建立。所提的 DBSCAN(Density-based spatial clustering of applications with noise)算法由于其广泛的适用性,一经提出就受到广泛关注和大量使用。它把数据集中的高密度邻近点聚集在一起,忽略低密度区域的数据,但是对高密度区域的形

状没有要求。首先把数据集中的点划分为三类:

- 1) 核心点,在它的 ϵ 邻域内至少包含 P 个其他点的像素点;
- 2) 边界点, ϵ 邻域内不足 P 个点,但自身被包含在其他核心点的 ϵ 邻域内;
- 3) 噪声点,数据集中除核心点和边界点之外的点。

在此基础上,定义:

- 1) 核心点 p 对于它的 ϵ 邻域内的所有点是直接可达的;
- 2) 如果存在一条道路 p_1, p_2, \dots, p_n ,其中每个 p_{i+1} 是由 p_i 直接可达的,那么称 p_n 是由 p_1 可达的。
- 3) 如果 p 是一个核心点,那么它和所有它可达的点形成一个聚类。

考虑到受干扰的投影激光线本身是一组相互邻接的高密度亮点,这些亮点由于噪声污染、光照条件等原因可能产生中断,由于被投影物体表面不平整或光照条件的影响可能失去线性性质。因此聚类算法的可中断、无形状限制的密度聚集特性适用于从图像中对高亮度的激光线进行提取,同时过滤掉随机发生的噪声信息。

对灰度图像应用密度聚类算法的结果如图 4 所示,将光条局部放大,并按照上述定义对每一个像素进行分析。图中取 $\epsilon=1.5$ 和 $P=4$,也即,在每个像素点半径 1.5(8-邻域)范围内至少包含另外 4 个像素点时,该点被视为核心点,在图中以圆形表示;本身不是核心点,但位于其他核心点的 8 邻域内的点为边界点,在图中以三角形表示;其他所有点为噪声点,在图中以正方形表示。

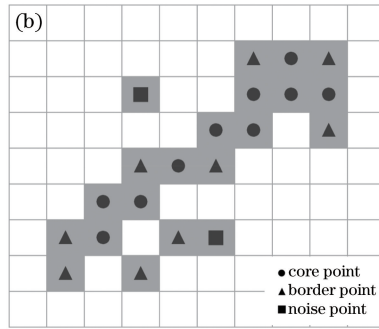
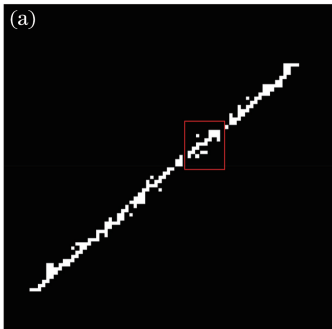


图 4 密度聚类算法演示。(a)像素化处理的激光线图像;(b)对局部激光线图像的密度聚类分析

Fig. 4 Demonstration of density clustering algorithm. (a) Pixelated laser stripe image;
(b) analysis of density clustering for local laser stripe image

在后续的处理中,仅使用聚集其他像素点的核心点作为光条中心线的候选点,故可以对算法进行

进一步简化,即将边界点也当作噪声点滤除,最终设计密度聚类算法流程如图 5 所示。

Algorithm 1: Pseudo-code of Density Clustering Algorithm For Binary Image

```

Input: DB: white pixels in the binary image
Input:  $\epsilon$ : radius
Input: minPts: density threshold
Input: dist: distance function
Output: label: point labels, initially not_classified
Neighbors  $\leftarrow$  GETNEIGHBORS(DB,  $\epsilon$ , minPts, dist) // Calculate neighborhoods
foreach point p of DB do // Iterate all points
    if label(p)  $\neq$  not_classified then continue // Skip processed points
    N  $\leftarrow$  Neighbors(p)
    if  $|N| < \text{minPts}$  then // Set a noise point
        label(p)  $\leftarrow$  noise
        continue
    c  $\leftarrow$  next cluster label // Start a new cluster
    label(p)  $\leftarrow$  c // Set a core point
    Seed set S  $\leftarrow$  N
    foreach point q of S do // Grow a cluster
        if label(q)  $\neq$  not_classified then continue // Skip processed points
        N  $\leftarrow$  Neighbors(q)
        if  $|N| < \text{minPts}$  then // Set a noise point
            label(q)  $\leftarrow$  noise
            continue
        label(q)  $\leftarrow$  c // Set a core point
        S  $\leftarrow$  S  $\cup$  N // Connect a core point
    
```

图 5 对二值化图像进行密度聚类算法处理的伪代码

Fig. 5 Pseudo-code of density clustering algorithm for binary image

其中 GetNeighbors 函数查询每个像素点邻域并统计邻域内的点的数量。朴素的 DBSCAN 算法检查所有数据点两两之间的距离,这会造成 $O(N^2)$ 的时间复杂度^[18]。基于图像本身的分布特性,本文算法仅检查每个像素点的邻域空间,统计邻域空间内的其他像素点,将时间复杂度降低为 $O(N)$ 。

对图像进行聚类计算之后,取结果中的核心点作为图像接缝算法的候选点。这一步骤具备多项优势:1)通过聚类算法可以分离出图中的不同激光条纹线段,并且分离过程根据参数的设置能够容忍断线,如图 6 所示,对断线处的像素点进行聚类分析可以连通断线;2)聚类过程既能在运算过程中进行简单去噪,运算结束后还能根据聚类规模过滤较大的颗粒噪声;3)通过仅保留核心点作为后续处理过程的输入,在保持条纹中心线信息的前提下降低了运

算复杂度。

2.3 中心线提取

图像接缝是指图片中一条能量最低的连通路径。接缝算法由 Avidan 等^[19]在研究可感知内容的图像缩放时提出。Chen 等^[13]提出图像接缝算法可用于结构光激光条纹提取。其基本思想是将图片中像素点视为节点,连接相邻的节点构成计算机科学中的图数据结构,并根据目标节点的灰度定义节点之间的距离(或称能量),从而使用最短路径搜索算法找到能量最低的路径,也即灰度最高的路径。接缝可以在水平方向或垂直方向定义,不失一般性,下面仅讨论在水平方向定义的情况。

给定一幅 $n \times m$ 的图像 I , 一条图像接缝定义为

$$S = \{s_i\}_{i=1}^m = \{i, y(i)\}_{i=1}^m, \quad \text{s. t. } \forall i, |y(i) - y(i-1)| \leq k, 0 \leq k \leq m, \quad (1)$$

式中: m 表示图像的列数; $\{i, y(i)\}$ 表示图像第 i 列第 $y(i)$ 行的像素点。非负整数 k 保证接缝的连续性,数值越小,接缝越平滑。随后,根据给定的能量函数 e , 可以定义一条接缝的总能量为

$$E(S) = \sum_{i=1}^m e[I(s_i)]. \quad (2)$$

因此,提取激光条纹中心线的问题转化为了对图像接缝总能量的优化问题,故可以将条纹中心线重新描述为

$$S^* = \underset{S}{\operatorname{argmin}} E(S). \quad (3)$$

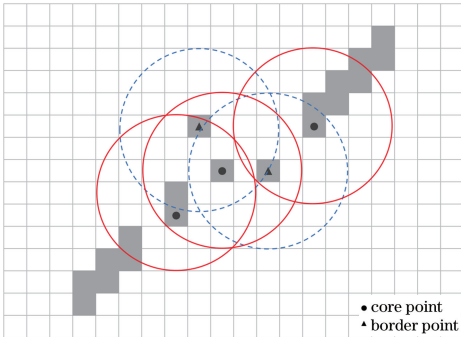


图 6 密度聚类算法修补断线能力的演示, $\epsilon = 3, P = 4$

Fig. 6 Demonstration of density clustering algorithm to repair broken stripe, $\epsilon = 3, P = 4$

图像接缝算法需要扫描整幅图像,或至少感兴趣区域,而且对于一幅图像仅搜索一条接缝。利用密度聚类的结果,可以定义基于密度聚类核心点的图像接缝。设一个聚类 C 由 n 列核心点 c_1, c_2, \dots, c_n 构成,则可以定义一条基于核心点的图像接缝为一个核心点序列,其中每一个点都与它的下一列中某个点连接。

$$S = \{s_i\}_{i=1}^n, \forall i, s_i \in c_i. \quad (4)$$

类似地,可以限制 s_i 只能与 c_i 中距离其最近的

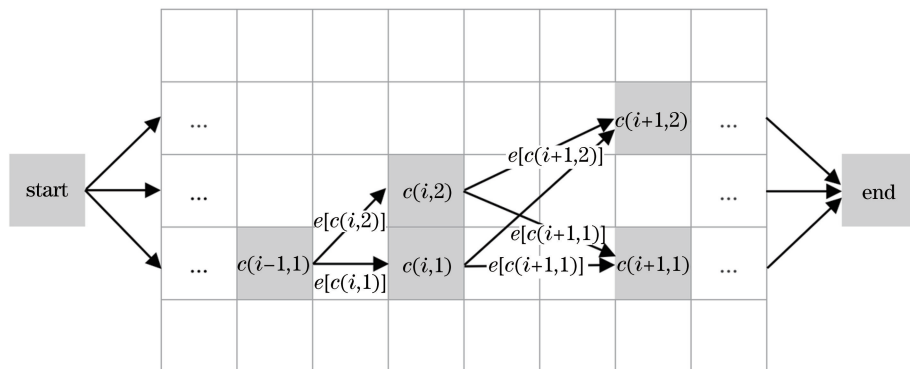


图 7 基于核心点的图数据结构

Fig. 7 Graph data structure based on core points

在图中插入起始节点和终止节点,即可应用标准的最短路径算法,如拓扑排序算法^[20]、Dijkstra 算法^[21]等,在相对有限的复杂度内计算出能量最低的路径,也即激光条纹中心线。

综上所述,本文算法的详细流程为:

1) 采用大津阈值法对采集图像进行二值化,获得可能成为激光条纹的所有像素点;

2) 使用图 5 描述的密度聚类算法对所得像素点进行聚类分析,每条激光线为一个聚类,过滤噪声点和边界点,取每个聚类的核心点作为中心线的候选像素点;同时将总点数小于阈值的聚类视为噪声过滤;

3) 针对每个聚类,按照图 7 所示方法从左到右连接相邻列中的核心点构建图数据结构,根据能量函数 $e[I(s_i)] = d_{\text{dist}} \times \exp[-\text{intensity}(s_i)]$ 计算节点之间连接的权重,在图中使用拓扑排序算法搜索最短路径;

4) 依次连接每个聚类中的最短路径节点,形成提取中心线的结果。

3 实验和结果分析

对以上算法展开实验分析,在 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-6267U CPU 2.90 GHz,内存为 8 G

k 个点连接来控制条纹中心线的光滑程度,并利用同样的能量函数定义转化中心线提取问题。根据激光线的本征特点,亮度更高的点有更大的概率位于条纹中心线上,并且激光线通常为连续的线段,邻近的像素点更有可能位于同一条激光线上。因此可以选取 $e[I(s_i)] = d_{\text{dist}} \times \exp[-\text{intensity}(s_i)]$ 作为能量函数。其中 d_{dist} 是两个像素节点之间的几何距离。根据以上描述,可以归纳激光条纹中心线问题为图数据结构的最短路径搜索问题。

的电脑上,使用 CLion 开发环境,C++11 和 OpenCV 4 进行编程,对实际拍摄的长为 883 pixel、宽为 408 pixel 的线激光图像及其添加了模拟干扰的图像进行处理。根据所选用的器材和测试环境,在调试后选取算法参数如表 1 所示,其中 ϵ 和 P 表示核心点半径 8 范围内至少应包括 5 个点; N 表示像素点数量低于 200 的聚类被当作噪声过滤; k 表示在最短路径搜索时仅连接核心点和它后一列距其最近的 3 个点。后述所有处理均使用相同参数。

表 1 实验时密度聚类算法的参数设置

Table 1 Parameter setting of density clustering algorithm during experiment

Parameter	Value
P	5
ϵ	8
N	200
k	3

为了验证本文算法的抗干扰能力,采用红色线激光作为光源,JAI 相机拍摄图像,截取 ROI 区域,首先,模拟被测物体表面污损造成断线情况,并进行分析。在原始图像上以激光条纹上某点为中心,按照二维高斯分布添加 300 个污损点,得到图像如图 1 所示。对图 1 使用本文算法进行处理得到图 8,可以看出算法实现了修补断线的效果。然后,模拟被

测物体受到照明光源或自然光源影响形成光斑的情况,并进行分析。在原始图像上以激光条纹上某点为中心,绘制一个半径为 32 的圆,得到图像如图 2 所示。对图 2 使用本文算法进行处理得到图 9,其中黑线为中心线的提取结果。可以看出,本文算法能够有效补偿光斑带来的影响,根据最短路径的特性使用直线连接光斑两端的激光条纹中心线。最后,模拟被测物体受到加工过程火花干扰的情况,并

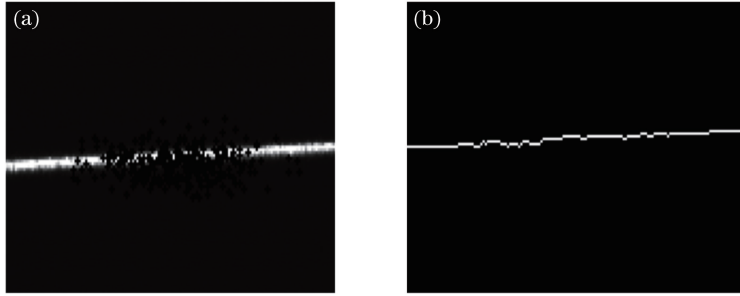


图 8 断线干扰处理演示。(a)模拟断线干扰局部放大图;(b)对断线干扰的实验处理结果

Fig. 8 Demonstration of broken stripe processing. (a) Enlarged view of simulated broken stripe interference; (b) experimental results on broken laser stripe

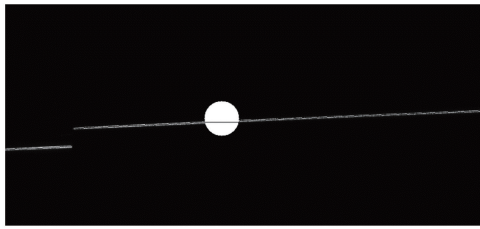


图 9 对光斑干扰的实验处理结果

Fig. 9 Experimental results of light spot interference

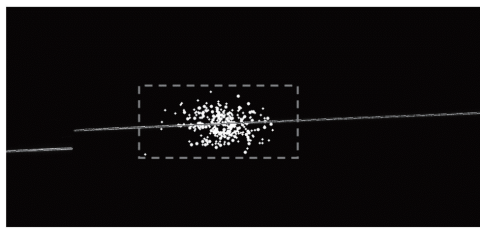


图 10 对火花干扰的实验处理结果

Fig. 10 Experimental results of spark interference

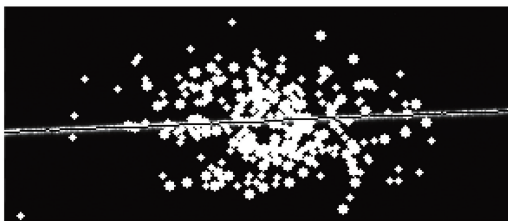


图 11 图 10 的虚线框局部放大图

Fig. 11 Enlarged view of the dotted framed area of Fig. 10

为了验证算法的准确性,使用灰度重心法对未加干扰的激光条纹图像进行处理,将其中中心线的提

进行分析。在原始图像上以激光条纹上某点为中心,按照二维高斯分布添加 300 个火花,得到图像如图 3 所示。对图 3 使用本文算法进行处理得到图 10,图 11 为图 10 的局部放大图,可以看出,本文算法能够较好地处理火花干扰的情况,其中孤立的火花在密度聚类的过程中已经被滤除,而与激光条纹紧密连接的火花则由于最短路径算法作为优化算法本身收敛的特性,不对中心线提取结果造成影响。

取结果作为比较基准,与本文算法在多种干扰情况下的提取结果进行对比。孙晓明^[22]指出,结构光条纹中心线的分析不存在统一且明确的方法。但是,对于光质均匀而且稳定的激光条纹,灰度重心法可以获得较好的提取结果。因此,可以使用灰度重心法提取未加干扰的原始图像,利用提取结果作为参考,对比分析本文算法的提取精度。图 12 为误差分析结果。针对每幅图片,从左到右依次为整个激光线区域的误差、不受干扰的激光线区域的误差和受干扰激光线区域的误差。其中误差值计算方法为:针对图像每列中提取的中心线位置使用灰度重心法结果减去本文算法结果。灰度重心法提取结果为亚像素精度,密度聚类算法提取结果由于其按照图结构进行最短路径搜索的节点不可再分,为像素级精度。对结果绘制误差分析中常用的箱形图,每组误差数据依次从上到下显示出最大值、上四分位数、中位数、下四分位数和最小值,以及单独的离群值,如图 12 所示。对其定性分析可知,所有图像的处理误差不超过 2 pixel,其中整个激光线区域的 50% 像素点误差均不超过 0.5 pixel。非干扰区域的误差率略低,受干扰区域的误差率稍高,但 50% 像素点的误差均不超过 1 pixel。此外,断线干扰、光斑干扰和火花干扰的误差范围依次减小。其中后两种干扰的误差差别不大,而断线干扰的误差更大,是因为断线时剩余的亮点位置是随机的,可能位于原本激光

线边界的位置,由于算法要求最短路径必须位于核心点上,故此情况可能引入额外误差。

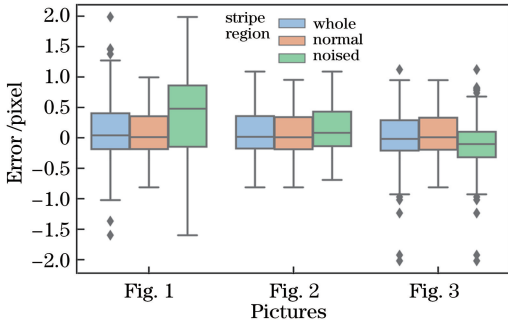


图 12 不同受干扰图像提取结果相对于参考中心线的误差
Fig. 12 Errors of different disturbed image extraction results relative to the reference centerline

误差定量计算结果如表 2 所示,三幅图像的提取结果平均均方根误差(RMSE)约为 0.4 pixel,干扰区域误差范围 0.4~0.8 pixel;不同区域数值分布情况与图 12 相吻合。作为对比,传统图像接缝算法直接处理干扰区域的误差约为 1.3~2.0 pixel。

表 2 受干扰图像提取结果相对于参考中心线的均方根误差
Table 2 RMSE of the disturbed image extraction results relative to the reference centerline unit:pixel

Picture	Whole region	Normal region	Noised region	Noised region (image seam)
Fig. 1	0.423	0.371	0.807	2.028
Fig. 2	0.367	0.362	0.399	1.952
Fig. 3	0.384	0.362	0.455	1.306

为了验证算法的快速性,使用 Chen 等^[13]提出的图像接缝算法处理上述三幅图像,与本文算法所用时间进行对比。其中每种算法对每幅图像处理 20 次,平均运行时间如表 3 所示。

由表 3 数据可知,本文算法速度明显快于利用原始图像接缝算法进行条纹中心线提取的算法,提

表 3 不同算法的平均运行时间比较

Table 3 Comparison of the average running time of

Picture	different algorithms		unit:ms
	Image seam algorithm	Proposed algorithm	
Fig. 1	257.13	6.26	
Fig. 2	248.12	24.30	
Fig. 3	247.94	25.33	

高了 12.48 倍,效果显著。特别地,具有断线干扰的图 1 的处理速度在传统图像接缝算法中最慢,而在本文算法中,断线部分与其他黑色背景部分等价,增大了搜索范围,带来了负面影响;而在本文算法中,断线部分在密度聚类时仅保留少数核心点,因此反而减少了路径搜索的候选节点,从而提高了算法运行速度。不难理解,本文算法的快速性是由于传统的图像接缝算法即使提前获取 ROI 区域,也要对 ROI 矩形区域内的所有像素点进行连接和扫描;而使用了密度聚类算法之后,路径搜索的候选点去除了背景点、噪声点和激光条纹边界点,数量大幅下降,因此搜索时间也大幅减少。另外,传统图像接缝算法将整幅图像处理为一条接缝,既不符合实际图像,同时也进一步增加了算法运行开销。虽然可以采用图像边缘检测等方法进行图像分割以得到不同线段,但是常规的边缘检测方法如 Canny 算子无法较好地处理断线问题,此处不予讨论。综合分析,本文算法在具备很强抗干扰能力的情况下,显著提高了结构光条纹中心线提取的速度。

最后,为了验证算法在实际图像中的表现,使用其他研究者处理干扰问题的图像和车间采集的图像来测试算法的运行速度和提取效果,结果分别展示于图 13 和表 4。图 13(a)所示为贺俊吉等^[23]提出

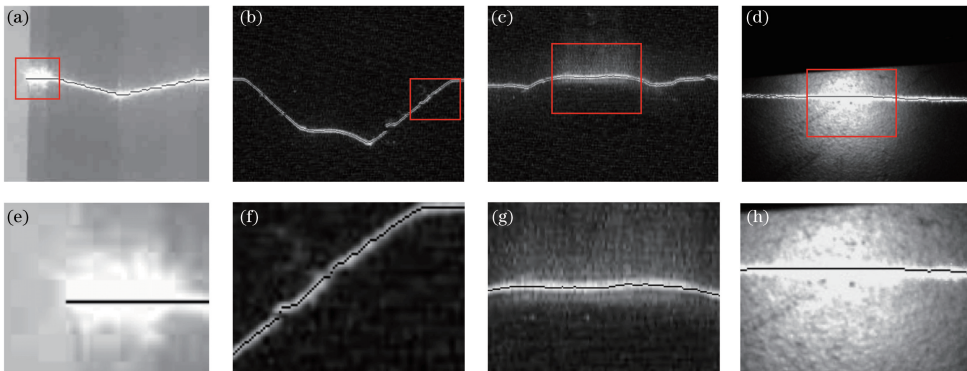


图 13 本文算法应用于实际光条图像时的提取结果。(a)~(d)原图;(e)~(h)局部放大图
Fig. 13 Extraction results of the proposed algorithm when applied to the actual stripe images.

(a)~(d) Original images; (e)~(h) enlarged views

参 考 文 献

用于研究强烈反光情况下的光条提取,图 13(b)、(c)所示为林欣堂等^[24]提出分别用于研究焊缝追踪时焊豆导致光条间断和不均匀反射导致光条分布不均的情况,图 13(d)为本文作者在合作车间中拍摄,用于研究不良照明引发的光斑对光条提取的影响。从图中可以看到,本文算法在所有四幅图像中均取得了较好的提取结果,有效地克服了各幅图像中相应的干扰。同时也应注意到,对于如图 13(a)中光条倾斜且较粗的情形,本文算法由于在能量函数中引入了核心点之间的距离,会导致倾向于在光条内部生成小段的直线,影响整体提取精度。此问题可以通过精细地调整聚类参数和距离在能量函数中的权重改善,但随着相关技术的发展,在实际生产中,通常能够使用常规的激光器投射出较细的激光线,故可以不加更改地将同一参数配置应用于多种场景的中心线提取。

表 4 不同算法应用于实际图像的平均运行时间比较

Table 4 Comparison of the average running time of different algorithms used for practical images unit:ms

Picture	Image seam algorithm	Proposed algorithm
Fig. 13(a)	123.69	9.03
Fig. 13(b)	126.82	6.13
Fig. 13(c)	120.58	10.26
Fig. 13(d)	70.90	20.76

4 结 论

本文提出了一种稳定的结构光条纹中心线提取算法,与传统算法相比,能够适应各种具有强烈干扰的结构光工作环境,并且可以实现快速检测。这对于结构光在焊缝追踪、激光切割等工业生产中的应用具有重要意义,意味着加工工件在使用前不需要仔细清理,厂房选址布局、照明设备安装时无需为结构光做专门设计,以及加工过程中产生的火花等干扰可以仅用少量的计算过程就可消除影响。本文算法主要使用了激光线的密度聚类算法,并结合基于核心点的改进图像接缝算法,利用计算机科学中被广泛研究的最短路径搜索算法来实现中心线的提取。最终经实验验证,该算法抗干扰能力强,在断线、强光和光斑等干扰情况下也可得到较好的结果;精度可靠,与经典算法在无干扰情况下提取结果非常接近;运算速度较快,比同样具有较强抗干扰能力的经典图像接缝算法速度提高 12.48 倍。但是,由于算法本身的特性,无法做到亚像素级的检测精度,后续需要结合其他算法思想,开展进一步的研究。

[1] Li Y H, Zhou J B, Liu L J. Research progress of the line structured light measurement technique [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(2): 115-124.
李玥华, 周京博, 刘利剑. 线结构光测量技术研究进展[J]. 河北科技大学学报, 2018, 39(2): 115-124.

[2] Zhan K F, Chen W J, Li W S, et al. Line laser 3D scene reconstruction system and error analysis [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1204004.
詹坤烽, 陈文建, 李武森, 等. 线激光三维场景重建系统及误差分析[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1204004.

[3] Li Y Y, Zhang Z Y, Yuan L. Survey on linear structured light stripe center extraction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100002.
李莹莹, 张志毅, 袁林. 线结构光光条中心提取综述[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 100002.

[4] Hu B, Li D H, Jin G, et al. New method for obtaining the center of structured light stripe by direct on template [J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(11): 59-60, 109.
胡斌, 李德华, 金刚, 等. 基于方向模板的结构光条纹中心检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(11): 59-60, 109.

[5] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.

[6] Yang W. Research on method for extracting center of structured light stripe[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
杨尉. 结构光光条中心提取方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

[7] 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.

[8] Li T T, Yang F, Li S G, et al. Extraction method of line-structured light stripe center based on gauss-Lorenz decomposition peak fitting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 071201.
李涛涛, 杨峰, 李石庚, 等. 基于高斯-洛伦兹分峰拟合的线结构光条中心的提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 071201.

[9] 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.
- [10] Jang J H, Hong K S. Detection of curvilinear structures and reconstruction of their regions in gray-scale images[J]. Pattern Recognition, 2002, 35(4): 807-824.
- [11] Li X D, Li X H, Ge S S, et al. Automatic welding seam tracking and identification [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7261-7271.
- [12] Shi F H, Lin T, Chen S B. Efficient weld seam detection for robotic welding based on local image processing [J]. Industrial Robot: an International Journal, 2009, 36(3): 277-283.
- [13] Chen J S, Su G D, Xiang S B. Robust welding seam tracking using image seam extraction[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(2): 155-161.
- [14] Zhang R Y, Zhou P, Feng X, et al. Rapid extraction of line-structured light stripe in large field of view [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(3): 432-436.
张瑞瑛, 周萍, 冯煦, 等. 大视场下线结构光光条中心的快速提取 [J]. 应用光学, 2010, 31(3): 432-436.
- [15] Tao L. Study on key techniques for color 3D laser scanning system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
陶立. 彩色三维激光扫描测量系统关键技术的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [16] 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.
- [17] Ester M, Kriegel H P, Sander J, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise [C] // KDD' 96: Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, August 1996: 226-231.
- [18] Schubert E, Sander J, Ester M, et al. DBSCAN revisited, revisited [J]. ACM Transactions on Database Systems, 2017, 42(3): 1-21.
- [19] Avidan S, Shamir A. Seam carving for content-aware image resizing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 10.
- [20] Cormen T, Leiserson C, Rivest R, et al. Introduction to algorithms[M]. 3rd ed. Cambridge: MIT Press, 2009: 612-615.
- [21] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numerische Mathematik, 1959, 1(1): 269-271.
- [22] Sun X M. Research on key technologies of pavement crack inspection based on structured light [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
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.
- [23] He J J, Zhang G J. Study on method for processing image of strip in structured-light 3D vision measuring technique [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(7): 593-597.
贺俊吉, 张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理方法研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(7): 593-597.
- [24] Lin X T, Zhu L, Zhang H B. Centerline extraction of multi-layer multi-passes structured light stripe [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(7): 105-108, 118.
林欣堂, 朱莉, 张海波. 多层多道焊接结构光中心线提取 [J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 105-108, 118.