

基于改进灰度重心法的线结构光中心提取算法

夏 鑫^{1,2,3}, 付生鹏^{2,3}, 夏仁波^{2,3}, 赵吉宾^{2,3}, 侯维广^{2,3}

¹中国科学院大学, 北京 100049;

²中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;

³中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110169

摘 要:针对传统算法无法准确提取线结构光条中曲率变化较大区域中心线的缺陷,提出了一种基于改进灰度重心法的线结构光中心线提取算法。基于阈值法提取感兴趣区域和开闭运算滤除图像中的噪声点,获取质量相对较高的待处理图像;利用灰度重心法提取光条中心点,得到初始坐标并设置一个矩形计算区域,根据最小二乘法计算每个初始点的方向向量和法向量;在设定的矩形区域内计算初始点在其法线方向上的偏移量,得到精确的中心点坐标。实验结果表明:提出的算法能在线结构光中心中曲率变化较大区域精确提取中心线,提取精度均值为 0.096 pixels,精度比率为 44.2%,平均提取速度为 0.082 s。

关键词:线结构光中心线;改进灰度重心法;区域法向量;直线拟合

中图分类号:TN249 文献标识码:A doi:10.14016/j.cnki.jgzz.2024.1.075

Extraction algorithm of line structured light center based on improved gray gravity method

XIA Xin^{1,2,3}, FU Shengpeng^{2,3}, XIA Renbo^{2,3}, ZHAO Jibin^{2,3}, HOU Weiguang^{2,3}

¹University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

²State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China;

³Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110169, China

Abstract: Aiming at the defect that the traditional gray gravity method cannot accurately extract the center line of the region with large curvature change in the line structured light strip, an algorithm for extracting the center line of line structured light based on improved gray barycenter method is proposed. The region of interest is extracted based on the threshold method, and the noise points in images are filtered through the open and close operation to obtain the image to be processed with relatively high quality. Center points of the light strip through the gray gravity method. And a rectangular calculation area is set up. The direction vector and normal vector of the initial points are extracted according to the least square method. Finally, the offset of the initial point in the normal direction is recalculated in the rectangular area to obtain the exact coordinates of the center point. Experimental results show that the proposed algorithm can accurately extract the center line from the region with large curvature change in the center of line structured light, achieving a mean precision of 0.096 pixels, a mean precision rate of 44.2%, and an average extraction speed of 0.082 seconds.

Key words: centerline of line structured light; improved gray gravity method; region normal vector; linear fitting

1 引言

线结构光测量系统中,线结构光中心线提取是测量过程中的关键步骤,直接影响测量系统的精度。线结构光图像包含被测物体表面的形貌信息,是线结构光测量系统需要计算的重要数据。理想的线结构光是一条亮度均匀的细线,但由于光散射和反射现象^[1]

收稿日期:2023-09-09

基金项目:国家自然科学基金(No. 51805527、52075532、91948203)

作者简介:夏鑫(1998-),男,硕士,主要研究方向:图像处理、机器学习和三维重建。E-mail:xiixin@sia.cn

通讯作者:付生鹏(1985-),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向:计算机视觉和智能制造技术。E-mail: fushengpeng@sia.cn

http://www.laserjournal.cn

和物体本身形状的不规则性,线结构光条通常具有一定的宽度并且形成多段曲率变化较大的区域。因此,实现对线结构光中心线的精确、快速和稳定提取具有重要意义。

随着技术发展,线结构光测量技术由于具有非接触、高精度及实时性等优点被广泛应用于装备制造、工业测量、缺陷检测、文物保护等领域^[2-6]。基于三角测距原理^[7],通过高速测量记录被测物体表面大量的密集的点的三维坐标和纹理等信息,可快速复建出被测目标的三维模型及线、面、体等各种形貌数据。目前,线结构光光条中心线提取方法主要基于极值法^[8]、灰度重心法^[9]、曲线拟合法^[10]、Hessian 矩阵法^[11]和方向模板法^[12]。苏小勤等人^[13]基于几何中心法、方向模板法和灰度重心法,提出了一种快速提取结构光中心的算法,有效地提高处理速度,但是该算法存在运算量大的问题;蔡怀宇等人^[14]对 Steger 算法进行改进,显著提高运算速度,但仍然存在提高空间;刘剑等^[15]提出了一种基于 Hessian 矩阵与区域增长的激光条纹中心提取算法,取得了不错的提取效果。王福斌等^[16]基于区域增长和主成分分析提出了一种亚像素的线结构光中心提取算法,实现了精度和时间上的提升。Steger 算法和灰度重心法是该领域的代表算法,Steger 算法具有高精度的优点,但计算量庞大,难以满足实时性要求;灰度重心法在牺牲了一定精度的情况下大大缩减了提取中心线的时间,但是对于光条中曲率变化较大的区域难以实现精确提取^[17]。

为此,基于阈值法获取感兴趣区域,并利用灰度重心法初步提取光条中心;随后基于最小二乘法得到初始点的方向向量和法向量,通过计算设定的矩形区域内的位置偏移量,对初始点的位置进行进一步修正,提高了中心线提取的精度。

2 算法描述

2.1 算法框架

针对传统算法对光条中曲率变化较大的区域提取效果不理想的问题,对灰度重心法提取的光条中心点进行最小二乘拟合,计算其方向和法向量。设定矩形区域并计算该区域内初始点在其法相上的偏移量,修正初始点的位置,实现精确提取。具体框架如图 1 所示。

2.2 感兴趣区域提取

线激光是一条具有一定宽度的细线,主体区域只占图像的一部分。有效提取线结构光的主体部分能够减少计算量,提升运算效率^[18-19]。由于线结构光的高亮度特性,其灰度值与背景区域存在明显差异。

因此,可采用阈值法对图像进行阈值分割并生成 mask 图像,再利用 mask 图像提取原图中感兴趣区域。利用阈值法生成 mask 公式如下。

$$g(x,y)=\begin{cases} 0, & \text{if } g(x,y)<\text{threshold} \\ 255, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $g(x,y)$ 为生成的二值化 mask 图像, threshold 为设置的分割阈值。获得 mask 后,利用图像相乘操作即可将原图中线结构光主体区域提取出来。具体公式如下。

$$F(x,y)=f(x,y) * (g(x,y)/255) \quad (2)$$

将 mask 图像的灰度值除以 255,使得背景区域像素值为 0,目标区域像素值为 1。与原图相乘后,背景区域像素值为 0,线结构光区域像素值保持不变。

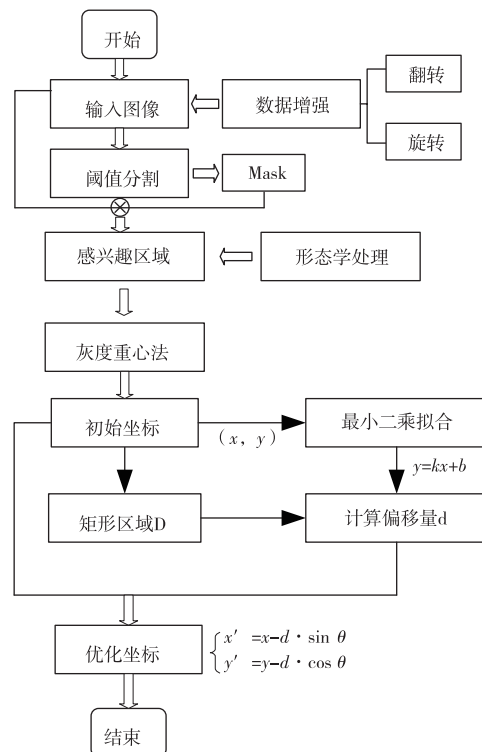


图 1 改进的灰度重心法算法框架

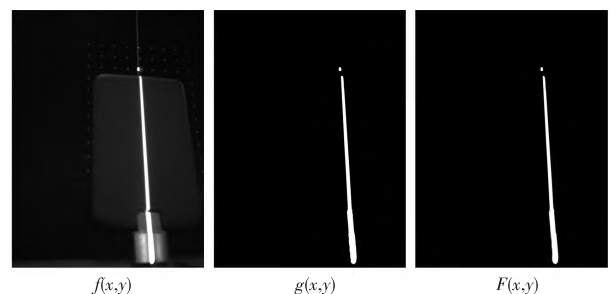


图 2 感兴趣区域提取。从左到右依次表示原图、mask 图像和提取的感兴趣区域图像

2.3 改进的灰度重心法

传统灰度重心法^[10]计算简单,模型轻便,在实际环境中应用广泛。该方法遍历图像中线结构光区域,

根据光截面光强服从高斯分布的特点,将灰度值作为“能量”,依次计算出在每行(每列)的线结构光的重心位置,并将此位置作为所要提取的中心点。假设 $f(i,j)$ 为图像 f 在 (i,j) 位置处的像素值,则灰度重心法计算方式如下^[20]。

$$y = \frac{\sum_k j * f(i,j)}{\sum_k f(i,j)} \quad (3)$$

其中, k 表示横坐标为 i 的列中灰度值超过阈值 $threshold$ 的坐标个数。由计算公式可以看出,传统灰度重心法只能有效提取一定方向变化内的线结构光中心线,因为它是按照图像的列(行)方向进行提取。在实际应用中,由于成像环境和物体表面的不确定性,形成的线结构光条很难是一条光滑直线。通常一条光条可能存在多段方向曲率变化较大的部分,传统的灰度重心法对于该区域的提取效果并不理想。具体结果见图3所示。

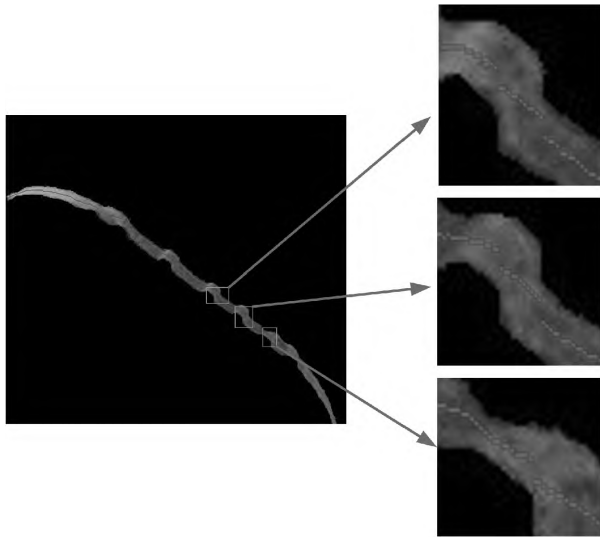


图3 传统灰度重心法提取光条中心线。

从图3中可以看出,传统灰度重心法对于线结构光条的部分区域提取效果不理想。结果中会出现提取中心点的位置偏移较大的情况。这是由于传统灰度重心法在提取中心点时实际上计算的是该列的列方向上的中心位置。当线结构光条平缓时,传统灰度重心法能提供较好的提取效果;当光条方向和曲率变化较大时,按列方向提取中心点会造成提取误差过大的情况。此时,应按照光条的法线方向进行中心点的提取,提高提取精度。

为解决上述问题,对传统灰度重心法进行改进,利用传统灰度重心法提取得到初始点,计算其方向和法向量。设定矩形区域并计算该区域内初始点在其法线上的偏移量,修正初始点的位置,实现精确提取。算法示意图见图4。

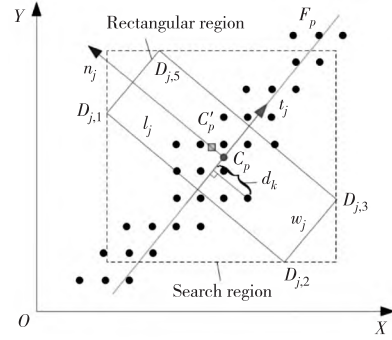


图4 改进灰度重心法算法示意图。

其中, C_p 是使用传统灰度重心法计算的第 j 列的中心坐标; n_j 和 t_j 分别是 C_p 处的法向量和方向向量。 F_p 表示与 C_p 相交并与 t_j 重合的线函数,利用该进的算法计算得到的新中心点 C'_p 的坐标在矩形区域内实现。矩形区域的宽度 w_j 适应于 C_p 处的曲率半径。算法具体实现方式如下。

由传统灰度重心法得到一组大小为 n 的点集 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, 对于每个矩形区域 D 内的点,数量为 w , 假设所要拟合的直线方程为

$$y = kx + b \quad (4)$$

通过最小化点集上的点到直线的距离和找到最优直线方程,具体公式如下。

$$f = \sum_{i=1}^w (y_i - k * x_i - b)^2 \quad (5)$$

对参数 k 和 b 分别求偏导,求解一阶导数值为0的值,即可求解。

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial k} = \sum_{i=1}^w (y_i - kx_i - b)x_i = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial b} = \sum_{i=1}^w (y_i - kx_i - b) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

令 $A = \sum_{i=1}^w (x_i^2)$, $B = \sum_{i=1}^w (x_i)$, $C = \sum_{i=1}^w (x_i y_i)$, $D = \sum_{i=1}^w (y_i)$, 则公分别求出 k 和 b 的值如下:

$$\begin{cases} k = \frac{Cw - BD}{Aw - BB} \\ b = \frac{AD - CB}{Aw - BB} \end{cases} \quad (7)$$

求得以 C_p 为中心的线函数 F_p 后,计算矩形区域 D 内所有点到 F_p 的距离 d_w :

$$d_w = \text{sign} \cdot \frac{|kx - y + b|}{\sqrt{1+k^2}} \quad (8)$$

若计算的点在 F_p 上方,则 sign 为正,否则为负。那么,法线方向上的距离可以修正为

$$d = \sum_{w=1}^W d_w \cdot I(x, y) / \sum_{w=1}^W I(x, y) \quad (9)$$

其中, $I(x, y)$ 为该点的灰度值。此时, 新的中心点 $C'_p(x', y')$ 可以计算为

$$\begin{cases} x' = x - d \cdot \sin\theta \\ y' = y + d \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (10)$$

其中, θ 为 F_p 与横轴之间的夹角。

综上, 提出的改进灰度重心法的线结构光中心提取算法流程如下:

- (1) 设置分割阈值 T , 生成 mask 图像 $g(x, y)$;
- (2) 将 mask 图像 $g(x, y)$ 与原图 $f(x, y)$ 相乘, 提取线结构光主体部分图像 $F(x, y)$;
- (3) 对于 $F(x, y)$, 采用传统灰度重心法提取线结构光中心线的初始坐标;
- (4) 对于每个提取到的初始坐标, 设定矩形区域 D , 采用最小二乘法拟合区域内点的直线 $y = kx + b$;
- (5) 考虑正负关系, 计算区域内所有点到直线的距离 d_w ;
- (6) 在法线方向上修正得到的距离 d ;
- (7) 计算新的中心点坐标 $C'_p(x', y')$ 。

3 实验结果与分析

所有实验均部署在 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-7200U, 内存为 4 G 的标准计算机上, 编程语言为 C++, 实验环境为 Visual Studio 2015。实验所用样本由型号为 MER-230-168U3M 的大恒工业相机采集, 线激光光源为 COHERNET 公司一字线激光器。

3.1 线结构光中心线提取实验

为验证所提算法的有效性, 将激光照射在不同物体上, 从不同方向和角度拍摄, 得到的图像作为实验样本。分别利用传统灰度重心法和本算法进行提取, 实验结果如下。

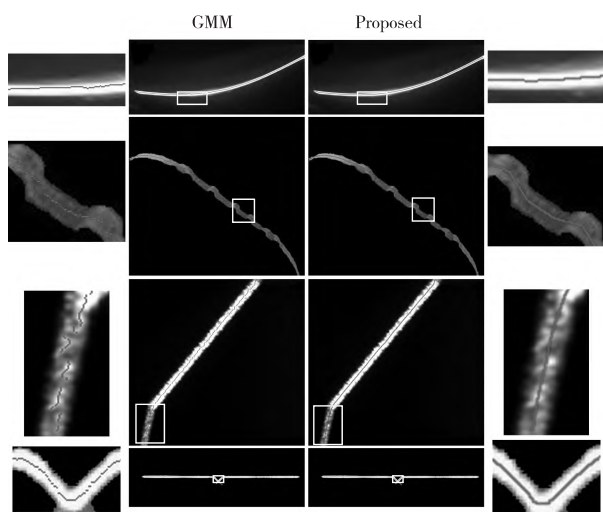


图5 不同算法对线结构光中心的提取效果。第二列为传统灰度重心法的提取效果, 第三列为所提出算法的提取效果。第一列和第四列为红色框中同一张图片不同算法提取效果局部放大图

部放大图

由于采集的图像尺寸过大, 完全显示时不能很好地观察算法的提取效果, 因此, 将图像的局部区域进行放大显示。观察图5可知, 传统的灰度重心法对于平缓的光条区域能够有效提取中心线, 但是对于方向和曲率变化较大区域的提取效果不够理想。提出的算法能够在传统灰度重心法的提取基础上, 在法线方向上对提取的中心点坐标进行进一步修正, 使其更贴近光条中心, 提高了提取精度。

3.2 提取精度和效率对比实验

线结构光中心线提取效果的优劣主要有两个评价指标。一是提取中心线所需时间, 另一个是提取的中心线的精度。由于图像中线结构光中心线的实际坐标不可得, 无法计算算法有效精度。借鉴于该领域相关文献[16][21]等的精度度量方法, 提供了一种统一的计算方式。利用残差值代替真值, 计算提取的中心点与所有的点的平均值的距离误差和, 用均方根误差作为衡量算法精度标准。具体公式如下:

$$Error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (11)$$

其中, n 为提取的点的个数, \bar{x} 为所有的点坐标的平均值。为更好地体现出本算法相对于传统灰度重心法在精度方面的提升, 将计算得到的标准差进行转换, 得到各算法的精度比率。计算公式如下。

$$Precision = \frac{\frac{1}{E_i}}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \dots + \frac{1}{E_n}} \quad (12)$$

其中, n 为所有算法个数, E_i 为公式(11)计算得到该算法的均方根误差。具体实验结果见表1所示。

表1 各算法提取多方向光条中心线均方根误差及精度比率

图像	算法 (Error/Precision)		
	灰度重心法	本算法	Steger 算法
1	0.187 (14.2%)	0.063 (42.4%)	0.062 (43.1%)
2	2.007 (2%)	0.089 (45.0%)	0.076 (52.8%)
3	1.340 (5.8%)	0.131 (54.0%)	0.174 (40.6%)
4	1.443 (1.5%)	0.064 (34.8%)	0.035 (63.6%)
5	3.252 (1.3%)	0.126 (33.3%)	0.064 (65.4%)
6	2.450 (2.9%)	0.165 (43.2%)	0.132 (53.9%)
7	0.137 (16.5%)	0.040 (56.6%)	0.084 (26.9%)
均值	1.545 (6.3%)	0.096 (44.2%)	0.089 (49.4%)

实验对比了传统灰度重心法、Steger 算法和提出的算法对不同光条中心线的提取误差。按照公式(11), (12) 计算各算法均方根误差和精度比率。表1

中数据显示提出算法的均方根误差和精度比率分别为 0.096 pixels 和 44.2%,相较于传统灰度重心法分别提高了 1.449 pixels 及 37.9%;与 Steger 算法仅相差 0.007 pixels,精度比率仅相差 5.2%,实现了较高的精度,证明了所提算法在精度方面的前瞻性水平,满足实际工业应用环境的需求。

表 2 各算法提取多方向光条中心线耗时

图像	算法(时间/s)		
	灰度重心法	本算法	Steger 算法
1	0.057	0.065	0.262
2	0.042	0.053	0.209
3	0.052	0.062	0.432
4	0.039	0.053	0.295
5	0.112	0.173	0.891
6	0.025	0.061	0.393
7	0.095	0.110	0.367
均值	0.060	0.082	0.406

除精度外,提取中心线的所需时间也是评价算法性能的重要指标之一。对比了各算法的提取耗时,具体数据见表 2 所示。

观察表 2 中数据可得:传统灰度重心法的平均耗时为 0.060 s,本算法在此基础上计算了中心点的法向量和方向向量以及偏移距离,所以耗时相对增加,平均耗时为 0.082 s,而 Steger 算法平均耗时为 0.406 s。相较于 Steger 算法,本算法提取速度提升了 4.95 倍,实现了更高效提取。综上,所提算法综合考虑了精度和时间因素,实现相对最优的提取效果。

4 结论

针对传统算法对于线结构光条中方向和曲率变化较大区域中心线提取效果不理想的问题,对传统灰度重心法的提取结果进行进一步优化,计算初始点在其法线方向上的偏移量,修正了中心点的位置。实验表明,所提算法在精度上相较于灰度重心法提高了 1.449 pixels,精度比率提高了 7.3 倍;在提取时间上相较于 Steger 算法提高了 4.95 倍,兼顾了提取精度和效率,具有较高的前瞻性水平。

参考文献

[1] 毕超,周鹏,郝雪. 十字线结构光的光条中心线提取算法研究[J]. 航空精密制造技术,2020,56(06):15-18.
[2] 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.
[3] 胡鹏. 基于线结构光和 3D 打印的定制包装填充物制造

方法与实现[D]. 广州:广东工业大学,2018.
[4] 彬德尔. 基于线结构光视觉的机器人智能三维测量方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
[5] 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(02):175-184.
[6] 武培轩. 适于文物的三维扫描技术研究[D]. 西安:西北农林科技大学,2019.
[7] 迟克浩,陈梦雯,吴彦达,等. 基于双三角测距原理的双线激光三维扫描系统的研制[J]. 物理与工程,2019,29(06):71-76.
[8] 杨雪娇,池海红. 一种改进的光条中心提取方法[J]. 应用科技,2009,36(12):41-44.
[9] Wang H, Wang Y, Zhang J, et al. Laser Stripe Center Detection Under the Condition of Uneven Scattering Metal Surface for Geometric Measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(5): 2182-2192.
[10] Liu S Y, Zhang Y C, Zhang Y H, et al. Research on 3D measurement model by line structure light vision[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2018, 2018(1):1-10.
[11] Carsten S. Extracting curvilinear structures: A differential geometric approach[J]. Lecture Notes in Computer Science, 1996, 1064(1): 630-641.
[12] 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(11):59-60+109.
[13] 苏小勤,熊显名. 快速线结构光中心提取算法[J]. 计算机应用,2016,36(01):238-242.
[14] 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(03):278-283.
[15] 刘剑,刘丽华. 基于海森矩阵与区域增长的激光条纹中心提取[J]. 激光与光电子学进展,2019,56(02):113-118.
[16] 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(03):350-356.
[17] 南方,李大华,高强,等. 改进 Steger 算法的自适应光条纹中心提取[J]. 激光杂志,2018,39(01):85-88.
[18] 司绍峰,张赛强,李庆,等. 基于数据增强和监督均衡的鱼眼图像行人检测优化方法[J]. 计算机科学,2022,49(S2):371-376.
[19] Zhang T, Cong Y, Sun G, et al. Visual-Tactile Fused Graph Learning for Object Clustering[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022,52(11):12275-12289.
[20] 彭铖,张爱军. 一种线结构光亚像素中心坐标提取方法[J]. 激光杂志,2023,44(01):56-61.
[21] 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(03):192-199.