光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250702001

基于激光表面微结构的自动聚焦窗口研究

张佳俊[1,2]，李一全[1,2*]，于占江[1,2]

（长春理工大学 1. 机电工程学院；2. 跨尺度微纳制造教育部重点实验室，长春 130022）

摘　要： 针对在激光加工过程中传统自动对焦窗口构建技术在微纹理应用中实时性有限、易受背景噪声影响和计算量大的缺点，提出一种显著性窗口构建方法。该方法通过整合梯度和颜色线索，利用视觉显著性检测框架有效抑制无关背景信息，增强清晰度评估的特异性。通过引入一种结合kirsch梯度分析、LAB颜色对比计算、局部归一化和纹理抑制的窗口提取算法，在亮度变化和复杂模式下可靠地描绘微纹理区域。在激光微加工装置上实验验证了该方法，其灵敏度相较于传统的中心窗口方法提高了约83%，陡度提高了75%，锐度比提高了54%，从而产生单峰和快速响应的焦点曲线，支持稳定的微结构制造。这种显著性窗口为激光微加工平台提供了一个强大的解决方案，平衡了高精度和实时性。

关键词： 自动聚焦；评价函数；显著性检测；梯度检测；颜色亮度通道

中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2025)04－0742－08

Autofocus Window for Laser-Based Surface Microstructuring

ZHANG Jiajun[1,2], YU Zhanjiang[1,2], LI Yiquan[1,2]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering; 2. Ministry of Education Key Laboratory for Cross-Scale Micro and Nano Manufacturing, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, CHN)

Abstract: To address the shortcomings of the autofocus-window construction technology used in conventional focusing methods for laser processing, such as limited real-time performance, vulnerability to background noise, and considerable computational complexity in microtexture applications, this study proposes a saliency-window construction method. This method utilizes image saliency to isolate the region of interest for focus evaluation by integrating gradients and color cues. The main idea is to apply a visual saliency-detection framework when generating an autofocus window to suppress irrelevant background information and enhance the specificity of sharpness evaluation. A window-extraction algorithm combining Kirsch gradient analysis, LAB color-contrast calculation, local normalization, and texture suppression is introduced, thus enabling microtexture regions to be reliably depicted under brightness variations and complex modes. The method was experimentally verified on a laser microprocessing device. Compared with the conventional central-window method, the proposed method exhibits higher levels of sensitivity, steepness, and sharpness ratio by approximately 83%, 75%, and 54%, respectively, thereby enabling the generation of single-peak and fast-response focus curves and supporting stable microstructure manufacturing. Owing to its ability to balance between high precision and real-time performance, this saliency window provides an effective solution for the laser microprocessing platform.

收稿日期：2025－07－02.

基金项目：四川省科技计划资助项目（2024YFCY0028）

* **通信作者：**李一全

Key words: autofocus evaluation function; significance detection; gradient detection; color-brightness channel

0 引言

在微纹理刀具的激光微加工过程中，保持精确的焦点至关重要。刀具表面的微结构旨在改善摩擦学性能，降低切削力并延长刀具寿命，而制造过程中的任何焦点偏差都可能导致结构几何形状产生不可接受的变化，从而影响刀具的功能和工艺稳定性。基于机械视觉的自动对焦技术因其精度高、易于集成以及仅依赖图像信息在激光加工前实现对焦调整的特点，被广泛应用于此类微加工系统中。然而，设计稳健的对焦评估函数、有效的搜索算法以及适当的对焦窗口在实验中仍具有挑战性。

在基于成像的自动对焦过程中，复杂的背景干扰（如反射、周围区域的散射或不均匀的表面条件）会降低清晰度指标的准确性。此外，处理大图像区域或计算复杂的评估函数也增加了计算时间，阻碍了微结构刀具高通量微加工的实时调焦。为了解决这些问题，动态定义一个紧密包围微纹理区域的焦点区域，并将函数评估限制在该区域，可以大幅提高自动对焦的准确性、响应性和鲁棒性。

中心窗口法是一种常用的自动对焦策略，其假设感兴趣的区域位于图像中心附近，并仅在固定的中心区域内评估焦面。然而，在刀具的激光微织构中，工件或相机视图可能发生移位，织构区域不再位于中心。此外，复杂的背景仍然会侵入固定的窗口，影响对焦精度。大多数相关文献集中在改进评估函数或搜索方案上，而对显著性窗口选择的研究相对较少。早期自动对焦研究通常集中在对焦测量定义和硬件设计上。例如，Zhang[1]等提出一种多兴趣区域窗口策略，其聚焦精度为93.7%，平均聚焦时间为11.89 s/mm^2，但鲁棒性和适用性有限。Zhou等[2]将一阶矩法与像差阴影相结合，优化了窗口锁定，提高了自动对焦效率。殷延鹤提出一种偏差驱动策略来定义光电经纬度仪器的自动对焦窗口[3]，其实验表明，该方法计算开销最小，评估曲线响应迅速，能有效抑制背景干扰，满足跟踪运动目标时的实时性和精度要求。

窗口选择算法一般分为两类：第一种是固定窗口的位置和大小（例如中心窗口、多区域提取、黄金分割搜索、非均匀采样）[4]，这限制了目标大小或位置未知可变时的适用性；另一种类型是基于对象状态动态生成焦点窗口，例如基于第一时刻的方案和利用视觉感知线索的方法。然而，第一时刻方法可能难以区分前景（例如微纹理区域）和复杂背景，导致自动对焦失败[5]。因此，改进对焦窗口结构仍然是一个关键的研究挑战，特别是对于微纹理工具的激光微加工，其中感兴趣的区域可能会发生移动或被表面反射遮挡。

为了克服传统的自动对焦窗口构建技术在微结构应用中实时性有限、易受背景噪声影响和计算量大的缺点，本文提出一种结合梯度信息、颜色和亮度线索提取视觉显著区域的新方法（TLAB）。该方法利用图像显著性识别主要微结构区域，构建了适应不同工件位置和复杂背景的最优聚焦窗口。这种显著性驱动的窗口生成在微纹理切割工具的激光微加工过程中支持更准确和高效的自动对焦。

1 自动对焦窗口的设计和方法

1.1 显著性窗口的设计原理

计算机视觉系统通过仿生学原理模拟人类视觉注意机制，分析输入图像的显著区域，提取视觉注意信息[6]。基于这些显著性数据，系统可以动态构建自适应观测窗口，在保持主客体完整性的同时实现窗口位置的智能调整。在技术发展过程中，研究者主要采用生物视觉特征建模方法，典型代表有SR，FT，HC，CA和GR等系列算法[7]。然而，这种模型普遍存在计算复杂度高、检测精度有限等问题，难以满足自动对焦系统中窗口构建的实时性需求。

为了提高算法的实用性，学术界将研究重点转向了视觉感知的基本要素——对比机制[8]。对比度本质上是图像单元之间差异的表示，可以通过颜色分布、纹理特征或灰度梯度等视觉属性对其进行定量分析。该量化过程具有空间灵活性，可以在局部像素邻域内实现，也可以扩展到整个图像进行全局评估。这种基于对比原理的简化建模方法为构建高效的自适应窗口算法提供了新的技术途径。

Itti模型通过对某一特征[9]在不同尺度下得到的特征图进行归一化处理，得到每个特征对应的显著性图。将各个特征的显著性进行线性融合并再

次归一化，得到最终的显著性图。该算法复杂且耗时长，因此对算法思路进行了改进，将亮度通道、双颜色通道和梯度变化相结合进行分析[10]。

1.2 显著性窗口设计的流程

(1) 梯度计算

利用Kirsch算子，如公式(1)，对灰度图像进行处理，计算图像在各个方向上的梯度幅值[11]，得到梯度图$G(x,y)$：

$$G(x,y)=\max\{K_i*I(x,y)\},i=1,2....8 \quad (1)$$

式中，K_i表示Kirsch算子的8向滤波核，*表示卷积运算，$I(x,y)$是灰度图像的像素值。

(2) 色彩对比计算

首先将图像从RGB空间转换为LAB空间，设L,a,b为转换后的三个通道[12]，计算每个通道的平均值($\overline{aLb}$)，然后计算出如公式(2)所示的颜色对比度：

$$C(x,y)=\sqrt{(L(x,y)-\overline{L})^2+(a(x,y)-\overline{a})^2+(b(x,y)-\overline{b})^2} \quad (2)$$

(3) 构建显著性图

如公式(3)和(4)所示，将梯度与颜色对比度归一化相乘得到显著性图$S(x,y)$[13]：

$$S(x,y)=\text{mat2gray}(G(x,y))\times\text{mat2gray}(C(x,y)) \quad (3)$$

式中，mat2gray($G(x,y)$)和mat2gray($C(x,y)$)分别为梯度和颜色对比归一化后的结果，mat2gray的表达式为：

$$\tilde{Z}(x,y)=\frac{(Z(x,y)-\min Z)}{\max Z-\min Z} \quad (4)$$

对$S(x,y)$进行阈值处理：

$$S(x,y)=\begin{cases}0, \text{if } S(x,y)<T \ (T=0.02)\\ S(x,y), \quad \text{Other}\end{cases} \quad (5)$$

舍弃强度最低的2%响应，这一取值参考了Achanta[14]中对归一化显著性图的实验，保留95%～99%动态范围可在抑制背景噪声的同时，保持主要目标结构完整。

(4) 提取连通区域，确定ROI

通过对$S(x,y)$的连通区域分析，检测所有连通区域R_j，计算每个区域的面积和质心，选择面积最大的区域R_{max}，设置质心为(xc, yc)。然后将ROI的大小定义为公式(6)和(7)，即原始图纸大小的一半[15]：

$$ROIwidth=W=\frac{imgwidth}{2} \quad (6)$$

$$ROIheight=H=\frac{imgheight}{2} \quad (7)$$

然后，计算ROI的左上角坐标，使ROI矩形居中，ROI的横坐标为$roiX$，纵坐标为$roiY$。如公式(8)和(9)所示：

$$roiX=\max(1,\min(x_c-\frac{W}{2},imgwidth-W)) \quad (8)$$

$$roiY=\max(1,\min(y_c-\frac{H}{2},imgheight-H)) \quad (9)$$

最后，ROI的边界框表示为：

$$ROI=[roiX,roiY,W,H] \quad (10)$$

使用这个边界框来裁剪图像以获得感兴趣的区域：

$$roi=imcrop(imgResized,ROI) \quad (11)$$

该方法包括以下步骤：

(1)梯度和色彩对比：通过Kirsch算子和LAB空间公式计算图像的梯度$G(x,y)$和色彩对比$C(x,y)$；

(2)显著性图：显著性图由公式(3)和Threshold生成；

(3)连通区域分析：从显著性图中提取最大连通区域，计算其质心(xc,yc)；

(4)感兴趣区域定义：以质心为中心，定义一个固定大小的矩形区域(图像尺寸的一半)作为感兴趣区域。

颜色信息(通过LAB)可捕获图像中的颜色差异，并帮助识别颜色上的重要区域。然而，仅依靠颜色信息可能会导致一些相似颜色的区域被误认为是重要区域，特别是在颜色变化很小的背景中。通过两者的结合，可以更全面地考虑图像中的重要区域，既能反映物体的颜色对比，又能捕捉到物体的边界和轮廓，从而提高显著性检测的准确性和鲁棒性。

图1显示了所提出的窗口形成过程。在此过程中，梯度信息可帮助捕捉图像的边缘信息，突出图像的结构特征。仅依靠梯度信息可能会导致过多的噪点和不必要的细节，特别是当图像对比度较低或背景复杂时。为解决这一问题，所提出方法将图像预处理、显著性检测和连通区域分析相结合，自动选择图像中信息量最大的区域。

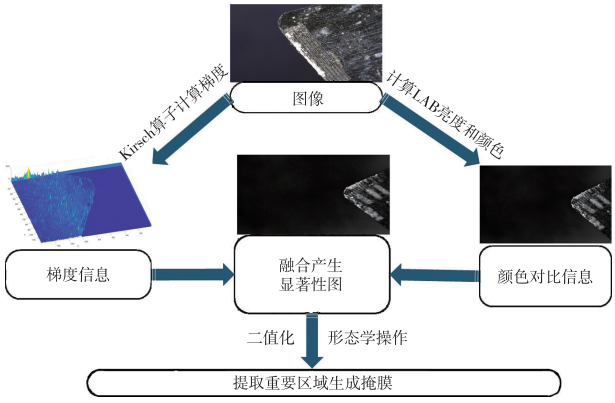


图 1　显著性窗口计算形成过程示意图

2　实验方法

2.1　实验配置

测试设置如图 2 所示，包含摄像机、物镜、光源和 PC 机。测试选用 CCD 工业相机型号 MER-1070-14U3M，其工作分辨率为 3840×2748，帧率为 14 fps，像元尺寸为 1.67 μm。镜头选择 Mitutoyo 平场复消色差物镜，放大倍率为 20x，焦距为 20 mm。光源选择为 OUCI-3-M1M12 接口同轴照明观察装置，加工工件采用金刚石刀具。为实现自动对焦系统的状态仿真，通过人工调节 Z 轴向定位平台的物镜间距，精确控制光学系统的焦平面位移。该操作可诱导成像系统产生“离焦-正焦-离焦”的连续状态转换，通过人工调节物镜间距引发视觉信号动态变化，实现“模糊-清晰-模糊”的焦点状态循环模拟。图像传感器捕获的动态序列数据通过高速传输协议实时回传至中央处理单元，在计算平台完成视觉关注区域的自适应构建及聚焦度量化分析。该实验架构有效复现了自动对焦系统工作时的焦点变化特性，为后续聚焦评价算法的验证提供了可控的仿真环境。

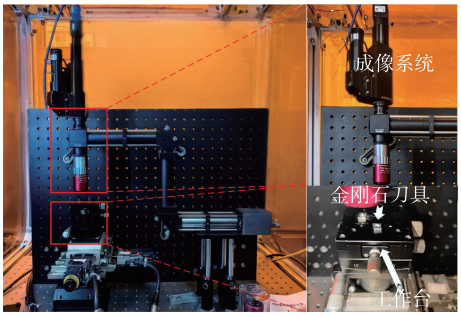


图 2　实验设备

2.2　定量评价指标

（1）清晰度比率

清晰度比定义为聚焦评价函数的最大值与最小值之比[16]，表示为：

$$R=\frac{f_{\max}}{f_{\min}} \tag{12}$$

其中，比值越高，表明评价函数区分清晰图像和模糊图像的能力越好。

（2）陡度

陡度响应于评价函数区分不同程度失焦图像的能力。由于对焦评价函数的左右不同需要将其分为左右陡度，左陡度表达式为：

$$S_{\mathrm{L}}=2(f_{\max}-f_{\mathrm{lp}})/W \tag{13}$$

式中，f_{lp} 为左临界点对焦函数的值，W 为陡区宽度。同样推理得出右侧陡度 S_{R}，则陡度的表达式如下：

$$S=\frac{1}{2}(S_{\mathrm{L}}+S_{\mathrm{R}})=\frac{2f_{\max}-f_{\mathrm{lp}}-f_{\mathrm{rp}}}{W} \tag{14}$$

（3）灵敏度

灵敏度表示评价函数在最大值附近变化的剧烈程度，灵敏度越大表明评价函数对图像清晰度变化的敏感度越高，其表达如下：

$$SE=\frac{f_{\max}-f(x_{\max}+\Delta x)}{x_{\max}+\Delta x} \tag{15}$$

2.3　窗口设置对聚焦效果的影响

聚焦窗口是显微镜图像自动聚焦系统中的关键模块，其作用是在图像中选择一个特定的区域，以便在自动对焦过程中计算该区域图像的对焦评价函数值[17]。该模块对自动对焦的计算效率和精度有重要影响。显微图像通常由两部分组成：主体和背景[18]。如果不选择聚焦窗口，直接在整幅图像上计算聚焦评价函数值，一方面计算量过大，影响实时聚焦的响应速度；另一方面，如果图像背景信息过多，系统可能会错误地将背景识别为主体，导致主体客体模糊[19]。因此，需要合理选择聚焦窗口的大小和位置。太小的窗口可能不包含被摄对象的图像，而且容易受到噪声的干扰；如果窗口太大，则可能会引入过多的背景信息，降低对焦精度。为了评估焦点窗口尺寸和空间位置对自动对焦过程的影响，实验获得了不同离焦水平的晶圆图像集。在每张图像中，在不同尺寸和位置的窗口上计算清晰度指标[20-22]。

为了阐明焦点窗口尺寸对自动对焦结果的影响，将以图像质心为中心的中心窗口定义为坐标原点[23-24]，然后分别计算对应于完整图像、1/2、1/3 和 1/4 原始帧的窗口的焦点评估指标。实验中的中心

取窗法如图3所示。

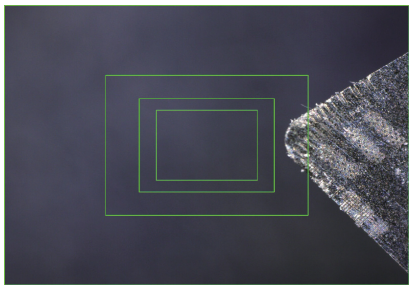


图3 中心开窗示意图

在实验中，采用所提出的定义评价函数作为评价函数，并为图像内不同尺寸的窗口计算了一套定量评估指标，结果如图4所示。在“离焦-对焦-离焦”序列中，在原有的窗口大小（红色曲线）下，焦度指标在明显离焦时保持较低，在最佳对焦时急剧上升至最大值，在过焦或再离焦时迅速下降，从而产生一个明显的峰值，其位置对应于最优对焦。当窗口减半（绿色虚线）时，曲线变得明显平滑：峰值幅度减小，宽度变宽，而峰值两侧的斜率不那么陡峭，导致整体动态范围变小。对于1/3和1/4窗口大小（蓝色和紫色曲线），焦点度量始终保持在一个相对较高的波动水平（大约归一化为0.95～1.0），这样任何峰值特征都不清晰，并且很难区分焦点位置和散焦位置。这种现象的产生是因为焦点度量依赖于在窗口上计算的像素统计和梯度信息：较大的窗口提供更稳定的统计数据，并突出离焦和聚焦之间的差异，而较小的窗口样本量不足，更容易受到噪声和局部纹理变化的影响，并且表现出较小的动态范围。

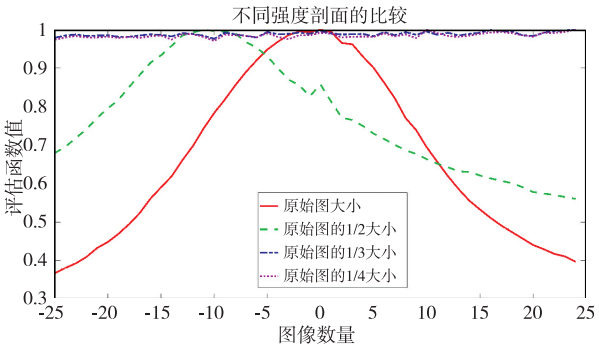


图4 内容在中间的不同大小中心窗口效果

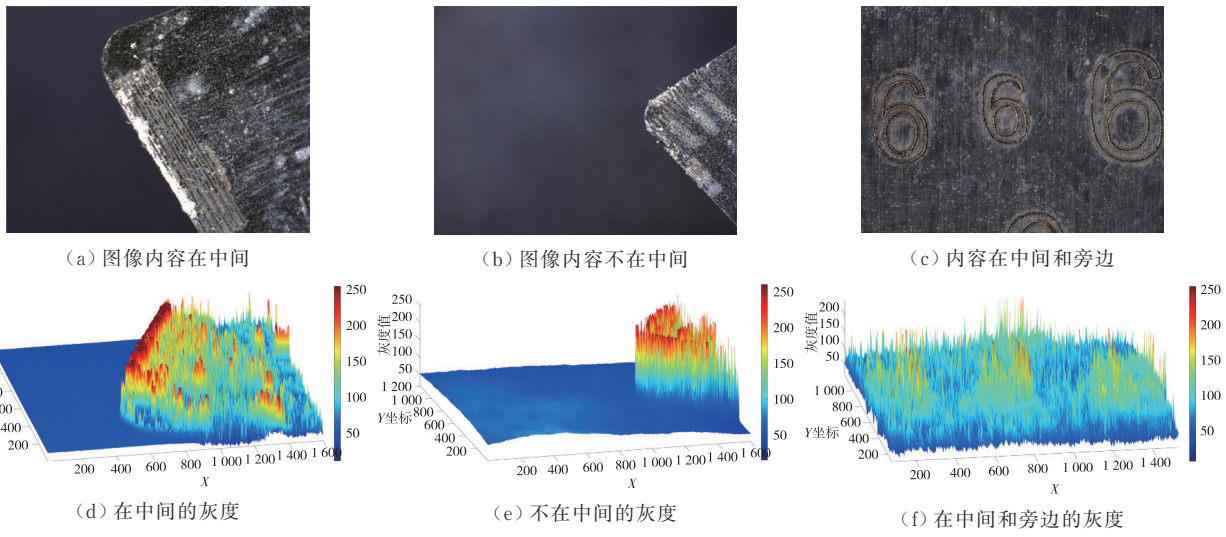
此外，计算时间大致与窗口面积成比例：边长减半可以将窗口面积减少到四分之一，从而大大缩短了处理时间；如表1所示，类似地，将边长减少到三分之一或四分之一，可以使计算成本减少大约2倍。

表1 不同大小Windows的运行时间

窗口尺寸	原窗口	1/2	1/3	1/4
t/ms	75.72	13.59	5.09	2.35

3 实验及结果验证

如图5所示，生成一组散焦图像并选择其作为样本，包括物体位于中心、偏离中心、中心和外围的情况。



（a）图像内容在中间 （b）图像内容不在中间 （c）内容在中间和旁边

（d）在中间的灰度 （e）不在中间的灰度 （f）在中间和旁边的灰度

图5 散焦及其灰度图像

图6展示了所提出的窗口选择方法的示意图。计算并比较各样本的焦点评价函数，并将结果绘制成折线图。图7，8和9分别给出了内容位于中心、内容位于非中心以及内容位于中心和外围的散焦

图像的比较。从这些图中可以明显看出，与其他开窗策略相比，中心窗方法只计算中心区域的焦点度量。当选择的窗口太小（如图 8 所示），目标落在中心区域之外时，无法包含目标，聚焦失败。



图 6　本文提出的取窗示意图

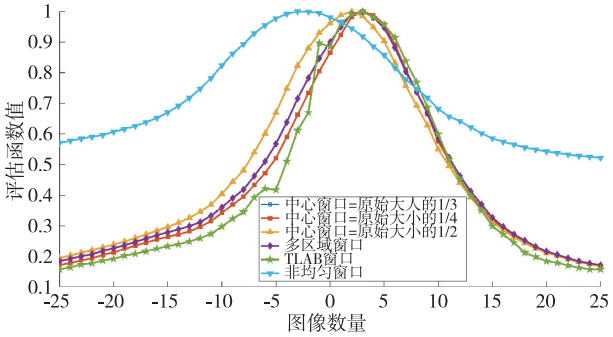


图 7　内容在中间的窗口效果

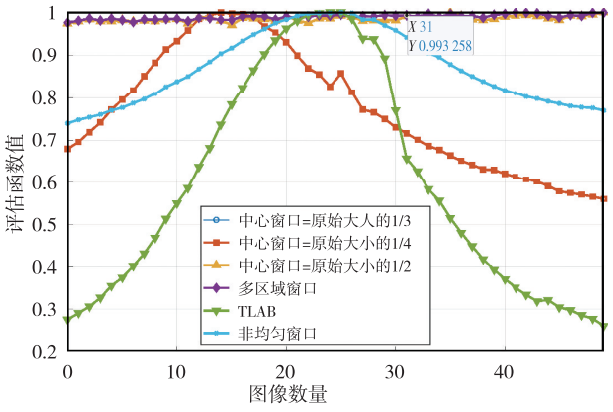


图 8　内容在边上的窗口效果

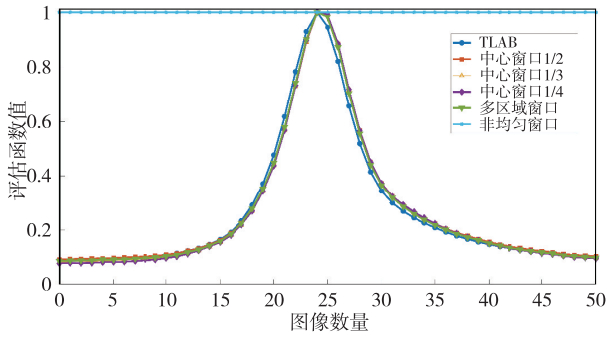


图 9　内容在中间和两侧的窗口效果

尽管多区域窗口方法对目标移动提供了一定的适应性，从而解决了中心窗口方法的缺点，但也引入了过多的背景信息，并且仍然不能防止主体偏离焦点窗口。非均匀采样涉及大量的采样操作，计算量大、计算复杂，给实时聚焦带来了挑战。相比之下，所提出的窗口选择方法对物体位移不敏感：所得到的焦点评估曲线仍然表现出单一的、明确的峰值和最优周围的单调行为。因此，基于显著性的窗口化方法是可行的。

如表 2 所示，在处理时间方面，每张图像的平均时间最短为 2.51 ms，效率最高。评估指标计算到小数点后两位。如表 3 所示，对于图像序列 2 和 3，本文方法的灵敏度分别达到 0.30 和 1.41，优于其他两种方法；对于图像序列 1，不同方法的敏感性具有可比性。

表 2　不同取窗方法的平均运行时间

窗口	TLAB	1/2	1/3	1/4	多区域	非均匀
平均时耗	2.51	12.97	5.13	2.81	10.23	63.012

表 3　评价指标

指标	图像序列	1/2窗口	多区域窗口	非均匀窗口	TLAB
清晰度比率	1	5.93	5.83	1.92	6.35
	2	1.78	1.02	1.35	3.83
	3	10.73	11.45	0	10.96
陡峭度	1	0.01	0	0	0.04
	2	0.05	0.06	0.07	0.2
	3	0.12	0.12	0	0.12
灵敏度	1	0.32	0.35	0.06	0.3
	2	0.05	0.01	0.04	0.3
	3	1.21	1.27	0	1.41

此外，陡度值分别为 0.04，0.20 和 0.12，均高于其他三种方法。清晰度比分别为 6.65 和 3.38，虽然第三组的清晰度比多区域开窗法略低，但差异很小。所提出算法处理这些序列的时间消耗分别为 3.85 和 4.26 ms，表明相对于其他三种方法效率有所提高。

本文提出的方法相对于经典显著性算法的三大独特贡献：

（1）局部归一化（LN）——动态调整对比度范围：

如 Itti 等多尺度融合模型通常在全局或固定尺度上计算显著图，难以兼顾图像中不同亮度区间的细节。本文的局部归一化模块自适应调整每个像素邻域内的灰度分布，将局部亮度差异映射到统一的对比度范围，从而放大微小焦点区域的响应，避免了全局方法对低对比度目标不敏感的不足。

（2）纹理抑制（TS）——滤除非焦点伪峰：

频率调谐方法（FT）和基于图割的 GBVS 强调

频域或图结构,但对表面微结构(如金属微坑或磨痕)产生的高频“噪声”无特定抑制机制,容易在显著图中形成伪峰。本文引入基于局部能量和梯度统计的纹理抑制模块,通过自适应阈值去除非目标纹理响应,确保显著图中只有真实焦点区域保留峰值。

(3)协同增益——兼顾峰度、平滑性与实时性:

单独的局部归一化可提高对比度,单独的纹理抑制可降低噪声,两者结合后不仅能够保持对焦峰值尖锐度,还能保证显著响应曲线的平滑性与鲁棒性。与经典算法不同,本文方法在算法流程中将局部归一化和纹理抑制合并,消除了两阶段处理中的重复计算,将平均处理时间控制在毫秒级,满足自动对焦系统的实时性需求。

总的来说,所提出的方法每幅图像只需要2.51 ms,与多区域取窗方法相比,效率提高了81%。与传统的中心取窗方法相比,本文介绍的基于显著性检测的方法的灵敏度提高了83%,陡峭度提高了75%,锐度比提高了54%。综上所述,与其他几种取窗方法相比,该方法具有明显的优势。

4 结论

鉴于自动对焦系统中传统的焦点窗口生成技术实时性有限、易受背景干扰、计算开销高等问题,本研究引入了一种融合图像梯度和颜色特征的焦点窗口构建策略,以识别视觉上显著的区域。该方法利用图像的显著性信息,有效地识别主场景,构建最优聚焦窗口。与传统的中心开窗方法相比,基于显著性检测的方案可将灵敏度、陡度和锐度比值分别提高83%,75%和54%,优势明显。

参考文献:

[1] Zhang C, Jia D, Wu N, et al. Autofocus method based on multi regions of interest window for cervical smear images[J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81(13): 18783-18805.

[2] Zhou W, Yang D. Analysis and comparison of automatic image focusing algorithms in digital image processing[J]. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 2023, 16(4): 100672.

[3] 殷延鹤. 光电经纬仪快速被动调焦技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
Yin Yanhe. Research on fast passive focusing technology of photoelectric theodolite [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018.

[4] Torgunakov V A, Loginov V A, Khorov E M, et al. Algorithm for adaptative selection of a contention window in IEEE 802.11bd networks [J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2022, 67(2): S241-S247.

[5] Bibi A, Merahi F. Moment method estimation of first-order continuous-time bilinear processes [J]. Communications in Statistics - Simulation and Computation, 2019, 48(4): 1070-1087.

[6] Ji Y, Meng Y, Geng X, et al. Retina-inspired flexible visual synaptic device for dynamic image processing[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2025, 17(5): 7948-7957.

[7] Xu K, Hassan Arbab M. Terahertz polarimetric imaging of biological tissue: Monte Carlo modeling of signal contrast mechanisms due to Mie scattering [J]. Biomedical Optics Express, 2024, 15(4): 2328-2342.

[8] Xu K, Hassan Arbab M. Terahertz polarimetric imaging of biological tissues: Monte Carlo modeling of signal contrast mechanisms due to Mie scattering[J]. Research Square, 2023: rs. 3. rs-3745690.

[9] 王雪迎. 基于改进Itti模型算法的小目标识别方法[J]. 辽宁师专学报(自然科学版), 2024, 26(4): 85-90.
Wang Xueying. Small target recognition method based on improved Itti model algorithm[J]. Journal of Liaoning Normal Colleges (Natural Science Edition), 2024, 26(4): 85-90.

[10] 张 铮. 基于Lab的多通道投影图像校正技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
Zhang Zheng. THE research of correction technology of multi-channel projection image based on LAB[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.

[11] 梁利利, 毛露露, 高 楠. 基于Kirsch算子与数学形态学的马铃薯图像芽眼识别与定位方法[J]. 微型电脑应用, 2024, 40(1): 92-95.
Liang Lili, Mao Lulu, Gao Nan. Recognition and location method of potato image bud eye based on kirsch operator and mathematical morphology [J]. Microcomputer Applications, 2024, 40(1): 92-95.

[12] 于 皓. 基于自导向图像和多尺度特征融合的单幅图像去雾方法研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2024.
Yu Hao. Research on a single image de-fogging method based on self-guided image and multi-scale feature fusion [D]. Qufu: Qufu Normal University, 2024.

[13] 李家安. 基于多尺度特征融合的协同显著性检测算法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
Li Jia’an. Research on collaborative saliency detection algorithm based on multi-scale feature fusion[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2024.

[14] Achanta R, Hemami S, Estrada F, et al. Frequency-tuned

salient region detection [C]//2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009: 1597-1604.

[15] Shijin Kumar P S, Dharun V S. Extraction of texture features using GLCM and shape features using connected regions[J]. International Journal of Engineering and Technology, 2016, 8(6): 2926-2930.

[16] 郑博文, 刘绍锦, 沈铖武, 等. 基于区域加权的图像清晰度评价算法[J]. 电子测量技术, 2024,47(11): 44-50.
Zheng Bowen, Liu Shaojin, Shen Chengwu. Image sharpness evaluation based on regional weighted algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement Technology, 2024, 47(11): 44-50.

[17] Zhang F S, Li S W, Hu Z G, et al. Fish swarm window selection algorithm based on cell microscopic automatic focus [J]. Cluster Computing, 2017, 20(1): 485-495.

[18] Zhang H, Yao J. Automatic focusing method of microscopes based on image processing[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(1): 8243072.

[19] 高玮宁, 马善涛, 何勇军, 等. 图像灰度投影的聚焦窗口选择方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2021, 26(5): 60-67.
Gao Weining, Ma Shan-Tao, He Yong-Jun, et al. Image gray-level projection of the focusing window selection method [J]. Journal of Harbin university of science and technology, 2021, 26(5): 60-67.

[20] 杨　海, 冯选璋, 刘家屹, 等. 基于图像评价的显微镜自动对焦方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(4):305-315.
Yang Hai, Feng Xuanzhang, Liu Jiayi, et al. Automatic focusing method of microscope based on image evaluation[J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2023, 60(4): 305-315.

[21] Alerini M, Ursin B. Adaptive focusing window for seismic angle migration[J]. Geophysics, 2009, 74(1): S1-S10.

[22] Tian Y, Feng H, Xu Z, et al. Dynamic focus window selection strategy of digital camera[J]. Proc. SPIE, 2005, 5678: 219-229.

[23] Tian Y. Dynamic focus window selection using a statistical color model[J]. Proc. SPIE, 2021, 6069:60690A .

[24] Zhao H, Feng H, Xu Z, et al. An aerial focusing method based on frequency domain focusing window selection and variable threshold focusing evaluation function [J]. Proc. SPIE, 2020, 11567: 115673P.

作者简介：

张佳俊(1999—),男,河北省秦皇岛市人,硕士研究生,主要研究方向微纳制造技术研究;

李一全(1968—),男,吉林省长春市人,教授,主要研究方向微切削、界面力学。