

基于蚁群算法的准直图像处理研究

曾沛颖*, 朱宝强, 朱健强

中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

摘要 准直系统用于高功率激光驱动器光路自动调整,同时也是保证光束质量的主要手段,其工作原理是在准直图像处理的基础上进行反馈控制。激光光斑与准直基准中心的识别提取是图像处理的核心。将蚁群算法引入到准直基准轮廓及光斑轮廓提取中,以图像灰度梯度作为信息素,提高对基准和光斑的边缘提取能力,同时针对准直图像的特性对蚁群算法进行优化处理,增强准直系统的自适应性。

关键词 图像处理; 蚁群算法; 高功率激光; 光路准直

中图分类号 TP751

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1011001

Alignment Image Optimization Based on Ant Colony Algorithm

Zeng Peiying*, Zhu Baoqiang, Zhu Jianqiang

National Laboratory of High Power Laser and physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The alignment system automatically adjusts the beam of a high-power laser driver; thus, it is the main method to ensure high beam quality. It performs feedback control based on the results of alignment image processing, wherein the recognition and extraction for the laser spot and reference center is key. In this paper, the ant colony algorithm is introduced into the extraction of collimating reference contour and spot contour. The image gray gradient is used as the pheromone to improve the edge extraction ability for the reference and spot. At the same time, the ant colony algorithm is optimized according to the collimating image characteristics to enhance the adaptability of the collimating system.

Key words image processing; ant colony algorithm; high power laser; optical path alignment

1 引言

高功率激光驱动器准直系统利用 CCD 采集图像并对其进行特定算法处理,获取光斑偏离中心的距离,从而通过反馈控制实现对光路的调整^[1-2]。光斑的识别与基准中心的计算直接影响准直系统的运行精度。在装置实际运行情况下,由于各种干扰因素的存在,如空间尺寸、各种杂散光和光束畸变等因素,图像质量严重下降,甚至产生了非正常图

像和受各种噪音严重影响的不良图像^[3-4],使得常用的图像分割方法如大津阈值法、边缘检测法等在实际应用过程中表现出很大的局限性^[5-7]。例如大津阈值法具有较好的计算速率,但是会误将噪声当作目标来处理;边缘检测法存在边界不连续或边界不确定的问题。当图像质量下降严重时,上述方法可能无法正常提取光斑及基准中心,从而直接影响光路准直。

蚁群算法是一种智能搜索全局最优的仿生进

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-07-17; 录用日期: 2021-08-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA25020000)

通信作者: *zengpeiying@siom.ac.cn

化算法^[8-9],首先由意大利学者 Dorigo 等于 20 世纪 90 年代提出,他们在论文中指出,蚂蚁在随机觅食过程中会释放出信息素,该信息素会随时间延续减少,因此在较短路径找到食物的蚂蚁会在相同时间段内留下更多的信息素,并以较大概率吸引其他蚂蚁按照该路径行走,形成一个正反馈的过程。另一方面,蚂蚁的随机性又可实现行动路径的创新性,既减少陷入局部最优路径情况,又能迅速在环境变化后寻找新的最优路径找到食物。由于该算法具有正反馈性、鲁棒性强、并行分布计算等特点,在解决组合优化和寻找全局最优解等问题上得到了成功应用,同时已经有部分学者尝试将蚁群算法应用到数字图像处理技术中^[10-12]。

本文拟将蚁群算法应用到近远场图像的处理中,将图像的灰度变化梯度值作为启发信息素,按照蚁群算法的设想,蚂蚁将会被灰度梯度值高的像素点所吸引并实现聚集;即便图像整体或局部受到外部环境影响导致图像效果较差时,光斑边缘的信息素也将会堆积成局部最大值并被算法所识别。

2 基本原理

2.1 蚁群算法模型建立

对于准直图像,基准小孔和激光光斑通常会与背景图像有一定的灰度差异,其变化程度可用灰度梯度进行表述,灰度变化越剧烈,梯度数值越高。将图像的灰度梯度当作蚁群的信息素,并建立图像的灰度梯度矩阵,矩阵中每一个元素代表一个像素点的梯度值;然后将一定数量的人工蚂蚁随机分布在像素点上,每一只蚂蚁将向周边 8 个像素点中梯度值最大的点前进,同时在经过的像素点上增加一个带权重值的信息素增量,这就会让蚁群根据信息素强度不断向梯度数值大的像素点移动。在单位时间里经过蚂蚁的数目越多,留下的信息素增加,会吸引更多蚂蚁过来,会留下更多信息素。当完成设定的最大移动步数后,蚁群将会大量经过那些在梯度数较高的光斑边缘像素点上,边缘点的信息素浓度值将会比非边缘点的信息素浓度值高,此时对梯度矩阵中的信息素与门限阈值进行对比,符合条件的像素可以判定为边缘像素点。

将准直图像看成一个二维离散值函数,每一个节点就对应一个像素点的灰度值,灰度梯度就是对这个二维离散函数的求导,用差分代替微分,求取图像的灰度梯度模^[13-14]。因此灰度梯度的定义为

$$|\nabla f(x, y)| = \left| \sqrt{dx(x, y)^2 + dy(x, y)^2} \right|, \quad (1)$$

式中: $|\nabla f(x, y)|$ 为像素点 (x, y) 的灰度梯度模; dx 、 dy 分别为像素点 (x, y) 在横向、纵向上的灰度梯度。

$$\begin{cases} dx = f(x+1, y) - f(x, y) \\ dy = f(x, y+1) - f(x, y) \end{cases}. \quad (2)$$

将数量为 N_{um} 的蚂蚁随机放置在图中像素点,蚂蚁将在当前像素点 (i, j) 内的 8 邻域范围单步移动,移动的选择概率是一个建立在启发信息、信息素强度基础上的概率,公式为

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{r \in S} \tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}, & r \notin G \\ 0, & r \in G \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 次循环后像素点 (i, j) 上的信息素总值,它会随着蚁群移动次数变化而逐渐变化; η_{ij} 表示启发信息素也就是蚂蚁爬过该像素之后留下的信息增量,将 η_{ij} 设置为像素点 (i, j) 的灰度梯度,具体的计算由式(1)得出,梯度变化越大,表示像素点的灰度值变化也越大; r 表示下一像素点位置; S 为像素点 (i, j) 的 8 邻域范围内可行路径集合; G 表示蚁群的禁忌表,模拟记录已经走过的像素点,从而避免重复像素点的移动; α 和 β 分别为信息素的权重因子和启发信息的权重因子,用于表征蚂蚁在移动过程中受到残留信息素和启发信息的影响程度。蚂蚁在每次移动中按照概率公式的计算结果进行下一次的移动。

当蚁群完成一次移动后,就需要对梯度矩阵中的信息素进行更新,信息素的更新公式为

$$\tau_{ij}(t) = \rho \tau_{ij}(t-1) + \Delta \tau_{ij}(t), \quad (4)$$

式中: $\Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^{Num} \Delta \tau_{ij}^k(t)$, $\Delta \tau_{ij}^k(t)$ 表示在该次迭代中像素点 (i, j) 处的信息素增量,相当于全部经过像素点 (i, j) 的蚂蚁散发出的信息素含量总值; ρ 表示信息素残留因子,其取值范围 $0 < \rho < 1$ 。设置残留因子的目的是让没有蚂蚁经过的像素点在后续的过程中自动地变成小概率选择。

$\Delta \tau_{ij}^k(t)$ 表示蚂蚁 k 经过像素点 (i, j) 残留的信息素,如果 $(i, j) \in G^k$ 表示像素点已经在禁忌表中,意味着蚂蚁已经过了该像素点,将会有新增的信息素出现并叠加至现有的信息素总量中,反之则说明蚂蚁还没有经过该像素点,那么信息素增量为 0。

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \nabla f(i,j)/M, & (i,j) \in G^k \\ 0, & (i,j) \notin G^k \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $\nabla f(i,j)$ 表示像素点 (i,j) 的灰度梯度; M 表示常量数值。

2.2 模型参数分析设定

在蚂蚁搜索初始阶段, 将 $\Delta\tau_{ij}(0)\eta_{ij}$ 设定成初始值 $\tau_0 = 0.0001$, 既确保每只蚂蚁都能以相同的启动信息进入工作模式, 又可降低启动信息对后续搜索工作的影响程度。

蚂蚁启动后从出发像素点开始受到高梯度值启发信息 η_{ij} 的吸引, 灰度梯度越大的像素点被蚂蚁选为下一步爬行方向的概率也越大, 使得蚂蚁将会大概率沿着连续的边缘点爬行, 从而确保了边缘的连续性。选择式(3)中的 α 为信息素的权重因子, 其主要表征图像的初始灰度信息对整个搜索过程的数值影响, 如果取值过大将会使得后续的信息素变化太小, 起不到蚁群算法的正反馈放大性效果, 同时 α 的取值不得小于 1, 以免丢失原有图像信息。如果此时爬行步数 N_c 设置过多, 将会导致禁忌列表中包含过多边缘点, 从而将蚂蚁驱赶至其他像素点上, 同时导致图像处理的时间成倍增加; 而过少又会导致提取不完全。选择蚂蚁数量 N_{um} 时也存在类似的问题, 如果 N_{um} 过大, 会导致计算效率降低且提前收敛, 因为大量的信息素增量会堆叠在局部最优

解上; N_{um} 偏小, 则会受到信息素挥发时效性影响无法获得预期最优解。为解决上述问题的出现, 取 $N_{um} = \sqrt{M \times N}$, 其中 $M \times N$ 为准直图像的大小, 并根据准直图像通常有 4 个基准小孔的特点, 取 $N_c = \sqrt{M \times N} / 4$ 。信息素残留因子 ρ 用于表征原有信息素的消失速度, 其取值应该与爬行步数 N_c 相关联, 避免出现蚂蚁没执行完全部步数信息就已经全部消失的情况, 且信息素消失的速度越慢越有利于蚁群寻找高梯度值像素点, 因此最终采用 $\rho = 1/N_c$, 确保每只蚂蚁都可以在信息素都消失前完成运动步数。

为提高算法效率, 特别是对大尺寸的远场图像进行处理时的效率, 增加蚂蚁提前消亡的条件, 避免蚂蚁进行无效的移动。如果蚂蚁周围邻域灰度梯度总小于阈值, 可以认为该蚂蚁已经完全进入背景区域, 可以终止该蚂蚁的后续移动; 如果蚂蚁周围邻域已经全部进入禁忌表 G 中, 可以认为该蚂蚁已经被困于点状噪声中, 可以提前终止该蚂蚁的后续移动。

3 实验验证与分析

图 1(a) 为光路准直过程中成像效果良好的准直用图, 图像尺寸为 782×582 , 图像灰度为 8 bit, 分布在四个角落的基准中心和激光光斑均有较好的辨识度。其处理结果如图 1(b) 所示。

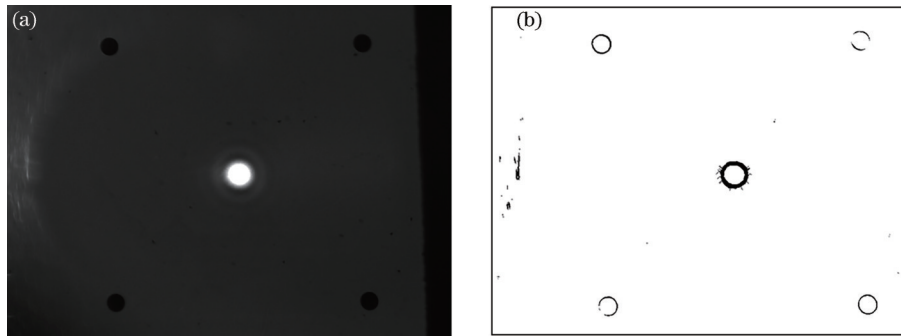


图 1 清晰图像的处理结果。(a) 原始图像; (b) 边缘提取结果

Fig. 1 Processing result of clear image. (a) Original image; (b) edge extraction result

图 2 为一组准直系统实际运行过程中采集到的原始用图。图 2(a) 整体成像环境较差且下方基准已经完全被外部干扰, 基准识别困难; 图 2(b) 在 CCD 曝光增益已经调大的情况下仍然无法清晰成像, 右侧两个基准小孔已无法正常识别。

在初始参数为 $\tau_0 = 0.0001$, $\alpha = 8$, $\beta = 0.01$, $\rho = 0.05$, $N_{um} = 675$, $N_c = 169$ 的条件下, 蚁群算法

的搜索结果如图 3 所示, 边缘提取的结果并不满足需求。图 2 两张原始用图的特点是缺乏足够的照明光源, 导致图像整体灰度偏低, 需要增加启发信息素在整个提取过程中的权重值, 使得图像的细微灰度梯度变化能够通过正反馈放大得以识别, 因此需对启发因子权重因子 β 进行适当放大来提升识别效果, 处理结果如图 4 所示。

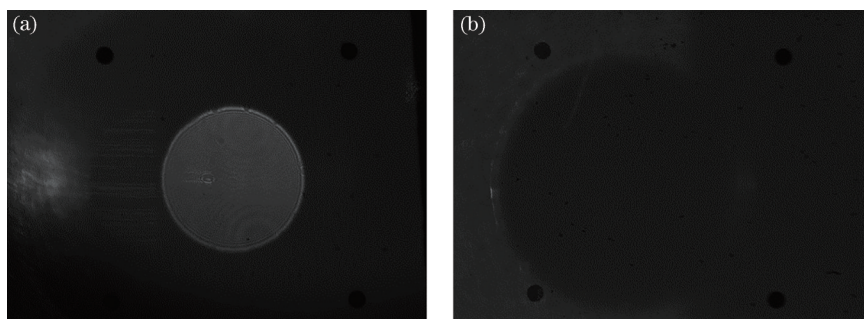


图 2 原始实验图像。(a)近场成像图;(b)远场基准成像图

Fig. 2 Original images for experiment. (a) Near-field image; (b) far-field reference image

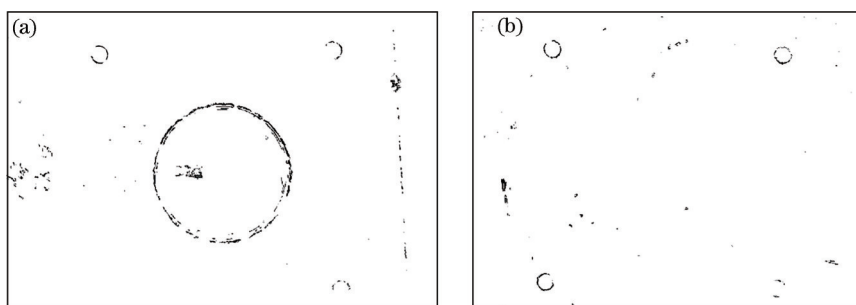


图 3 初始参数处理后的边缘信息。(a)近场成像处理结果;(b)远场成像处理结果

Fig. 3 Edge information after initial parameter processing. (a) Processing result of near-field imaging; (b) processing result of far-field imaging

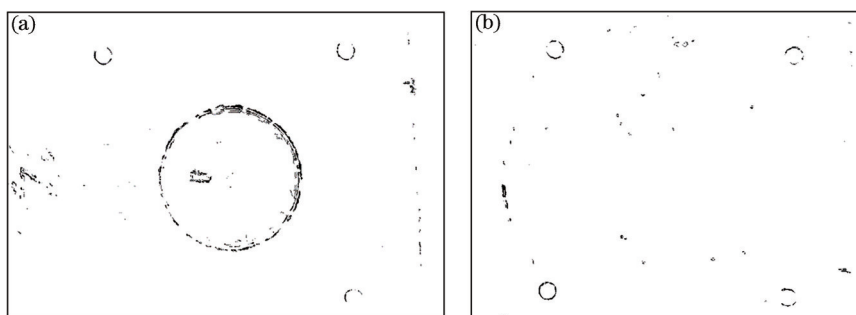


图 4 $\beta = 0.05$ 时的边缘提取结果。(a)近场成像处理结果;(b)远场成像处理结果

Fig. 4 Edge extraction results under $\beta = 0.05$. (a) Processing result of near-field imaging; (b) processing result of far-field imaging

从图 4 可以看出,图像查找边缘轮廓的效果有所加强,但是算法结果仍然无法达到预期要求,此时考虑到信息素残留因子 ρ 参数的值太大,导致信

息素在蚂蚁还未完成全部爬行动作之前就已经全部消失,因此修改为 $\rho = 0.005$,得到的处理结果如图 5 所示,可以看出,能够识别出来的边缘已经得到

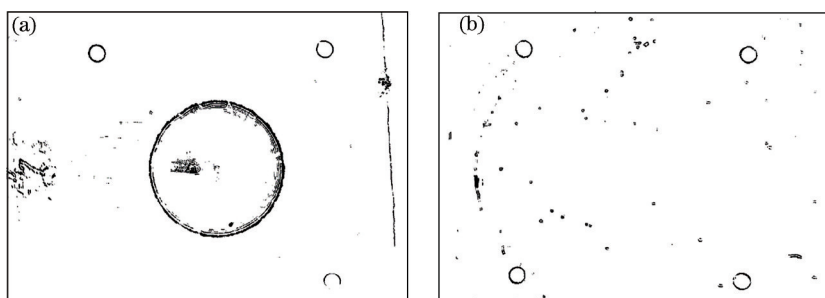


图 5 $\rho = 0.005$ 时的边缘提取结果。(a)近场成像处理结果;(b)远场成像处理结果

Fig. 5 Edge extraction results under $\rho = 0.005$. (a) Processing result of near-field imaging; (b) processing result of far-field imaging

了很好的识别与提取。

在参数为 $\tau_0 = 0.0001$, $\alpha = 8$, $\beta = 0.1$, $\rho = 0.001$, $N_{um} = 675$, $N_c = 200$ 的条件下,得到了图 6 的处理结果,达到了预期的边缘提取结果。其中从

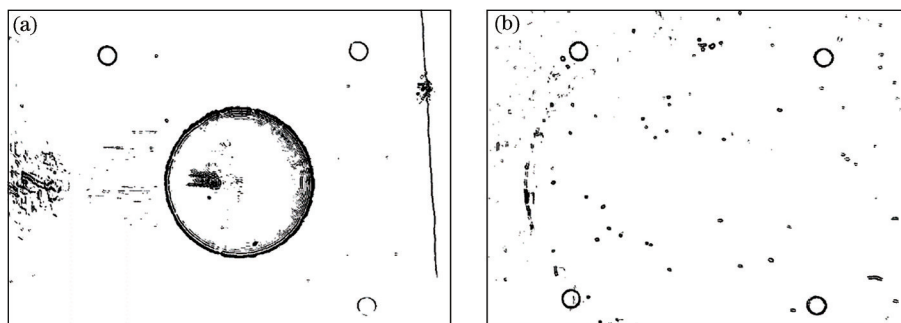


图 6 最终参数设定下的边缘提取结果。(a)近场成像处理结果;(b)远场成像处理结果

Fig. 6 Edge extraction results under final parameter setting. (a) Processing result of near-field imaging; (b) processing result of far-field imaging

4 结 论

蚁群算法是一种较新的启发式搜索算法。在分析蚂蚁算法优点的基础上,尝试利用蚂蚁算法对准直图像的光斑与基准进行边缘识别。针对光斑边缘将会与背景图像有灰度差这一特性,蚁群算法计算出梯度并将其设置为蚁群启发信息素,利用正反馈性将灰度差放大至可识别阈值范围,实现对边缘像素点的搜索,在实际应用中可以作为增强准直系统自适应性的手段。在全图基础上随机分布蚂蚁,为保证每只蚂蚁能够搜寻出有效的边缘像素点,对蚂蚁的爬行步数 N_c 设定了取值范围,其数值太低则无法找出像素点就结束搜索过程,而数值太高则导致计算时间增加,因为 N_c 决定了每次循环中的全局灰度计算次数。考虑到准直图像 4 个基准中心光斑和激光光斑位置是大致固定在指定区域的,在后续的优化过程中可以将全图随机分布改为指定区域随机分布,通过减少蚂蚁爬行步数 N_c 来缩短计算时间。

参 考 文 献

- [1] 刘代中, 丁莉, 高妍琦, 等. 基于同轴照明和光栅取样的激光束准直远场监测系统[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1101-1104.
Liu D Z, Ding L, Gao Y Q, et al. Far-field detection system of laser beams alignment based on gratings sampling and on-axial illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1101-1104.
- [2] 许瑞华, 何俊华, 王伟, 等. 高功率激光光束的自准

图 6(a)的主激光光斑中心提取出来的边缘点是准直过程中的反射光造成的,在图 2(a)的原始图像中并不明显,在此处被蚁群算法识别出来也有助于在后续的光路改进中予以消除。

- 直算法[J]. 光子学报, 2015, 44(2): 0214002.
Xu R H, He J H, Wang W, et al. Automatic alignment algorithm of high-power laser beam[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(2): 0214002.
- [3] Candy J V, Awwal A A S, et al. Detection of off-normal images for NIF automatic alignment[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5907: 59070B.
- [4] 周维, 胡东霞, 赵军普, 等. 高功率固体激光器光路自动准直算法与流程优化[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 78-81.
Zhou W, Hu D X, Zhao J P, et al. Optimizing on algorithm and flow of beam alignment in high power solid-state laser driver[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 78-81.
- [5] 潘登, 李艳丽, 高东, 等. 基于椭圆拟合的多光斑/重叠光斑中心提取方法[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1410001.
Pan D, Li Y L, Gao D, et al. Center extraction method of multiple and overlapping faculae based on ellipse fitting[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1410001.
- [6] 吴正平, 马占稳, 颜华, 等. 基于图像的多方向灰度波动局部阈值分割方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(6): 061016.
Wu Z P, Ma Z W, Yan H, et al. Local threshold segmentation method based on multi-direction grayscale wave for image[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(6): 061016.
- [7] 陈骏, 廖一鹏. 基于分数阶微分的噪声图像 NSCT 域边缘检测[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0810021.

- Chen J X, Liao Y P. Edge detection of noisy images in NSCT domain based on fractional differentiation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0810021.
- [8] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1996, 26(1): 29-41.
- [9] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53-66.
- [10] Nezamabadi-Pour H, Saryazdi S, Rashedi E. Edge detection using ant algorithms[J]. *Soft Computing*, 2006, 10(7): 623-628.
- [11] Lu D S, Chen C C. Edge detection improvement by ant colony optimization[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(4): 416-425.
- [12] Shao M, Xu X H. Edge detection using ant colony system algorithm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8334: 83341X.
- [13] 何春, 叶永强, 姜斌, 等. 一种基于分数阶微积分模板的新型边缘检测方法[J]. *自动化学报*, 2012, 38(5): 776-787.
- He C, Ye Y Q, Jiang B, et al. A novel edge detection method based on fractional-order calculus mask[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(5): 776-787.
- [14] 杜亚志, 王学滨, 冯威武, 等. 基于一阶及二阶灰度梯度的散斑图质量评价方法[J]. *光学技术*, 2017, 43(2): 169-175.
- Du Y Z, Wang X B, Feng W W, et al. Method for speckle pattern quality assessment based on one-order and two-order intensity gradients[J]. *Optical Technique*, 2017, 43(2): 169-175.