

文章编号: 1672-8785(2021)11-0033-08

## 用于红外自动调焦的图像离焦 深浅度判定算法

袁祎聪 郝俊明

(中国航天科工集团第二研究院北京航天长峰股份有限公司, 北京 100039)

**摘 要:** 为了提高图像的可调焦范围, 以往的自适应清晰度自动调焦算法对深度和轻度离焦图像采取了不同的评价方式, 却未给出明确的图像离焦深浅度判定方法, 进而影响了算法的可行性。为解决该问题, 从 Sobel 算子出发来提取图像边缘, 并通过阈值选择出阶跃边缘, 从而利用阶跃边缘宽度来判别图像离焦程度。经实验分析, 该方法可以无参考地判断单张图像的清晰度。与 SMD、Laplace 等方法相比, 它具有与场景无关的优势。不同场景的相同清晰度图片的边缘宽度标准差仅为 0.0676。此外, 边缘宽度的大小与图像离焦程度成正相关, 证明了该方法的有效性。本文算法的判定准确率达到 86.8%, 与高频和算法、基于无参考结构清晰度的算法相比具有一定优势。

**关键词:** 自适应清晰度; 判定方法; 自动调焦; 离焦深浅度

**中图分类号:** TN2    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.11.005

## An Algorithm for Judging the Depth of Image Defocusing Used for Infrared Automatic Focusing

YUAN Yi-cong, HAO Jun-ming

(Beijing Aerospace Changfeng Co., Ltd., The Second Institute of China Aerospace  
Science and Technology, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In order to improve the adjustable focus range of the image, the previous adaptive sharpness auto-focus algorithm adopts different evaluation methods for deep and light defocused images, but does not give a clear method for judging the depth of defocusing of the image, which affects the feasibility of the algorithm. In order to solve this problem, the image edge is extracted from Sobel operator, and the step edge is selected through the threshold in this paper, so as to use the step edge width to judge the defocusing degree of the image. Experimental results show that this method can judge the sharpness of single image without reference. Compared with SMD and Laplace methods, it has the advantage of being scene-independent. The standard deviation of the edge width of the same definition image in different scenes is only 0.0676. In addition, the edge width is positively correlated with the defocus degree of the image, which proves the effectiveness of the proposed method. The accuracy of the algorithm in this paper has reached 86.8%, which has certain advantages

**收稿日期:** 2021-07-11

**作者简介:** 袁祎聪(1997-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事红外图像处理相关研究。

E-mail: yyc\_csu@126.com

compared with the high-frequency sum algorithm and the algorithm based on the clarity of the no-reference structure.

**Key words:** self-adaptive sharpness; judgment principle; automatic focusing; depth of defocusing

## 0 引言

由于原子和分子的无规则运动, 温度在绝对零度以上的物体都会不断向外辐射与其温度和特性相关的红外线, 所以红外线也是自然界分布最广泛的射线<sup>[1]</sup>。因此, 我们可以利用物体的红外信息在没有可见光的环境下拍摄物体, 从而达到二十四小时监控的目的。在采集红外图像的过程中, 不可避免地需要进行调焦。在成像时, 是否准确聚焦决定了成像质量的好坏, 并会对后续的处理产生影响<sup>[2]</sup>。

调焦方法一般分为手动和自动两种。传统的手动调焦利用人眼判别, 效率低且准确率差, 还会受到操作人的主观影响; 而自动调焦往往可以很好地规避这些缺陷, 其效率高, 精度也远超手动调焦。自动调焦方法主要分为测距法、对比度法、相位法以及基于图像处理的方法<sup>[3]</sup>。其中, 基于图像处理的自动调焦方法发展迅猛。该方法通过判断图像的离焦程度来完成自动调焦, 即利用传感器采集和快速实时处理信号来获取表征图像清晰度的函数值(即评价函数值), 并将判断结果反馈给电机来达到电机控制的目的, 从而找到对焦点。由于大多数被测物体都放在视场的中央, 所以一般我们优先判断中间区域的清晰度。基于图像处理的自动调焦方法具有成本低、智能化、设备小型化的优势, 因此成为目前应用最广泛的自动调焦技术, 也是未来发展的主要方向<sup>[4-5]</sup>。在这方面的研究中, 评价函数决定了聚焦的准确度, 具有非常重要的研究价值。

本文首先分析自适应清晰度自动调焦算法的评价函数的由来和原理, 然后说明其中存在的主要问题, 并据此提出离焦深浅度判定算法, 最后通过实验验证该算法的场景无关性及其与清晰度之间的关系。

## 1 传统自动调焦算法

传统的基于图像处理的自动调焦方法主要围绕聚焦区域的选择、评价函数的优化以及搜索方法的改进三个方面进行分析和研究。其中, 对于评价函数优化这一方面的研究最为深入。文献[6]将图像灰度差分绝对值和算子 SMD 作为评价函数来判断是否聚焦。文献[7]在边缘检测的基础上, 将 Roberts 梯度算子作为评价函数, 同时引入阈值参考。文献[8]利用一些灰度梯度函数来进行自动聚焦, 并使用阈值来过滤贡献值小的像素点, 然后利用邻域互相关对梯度值加权。文献[9]改进了 SML 清晰度评价函数, 并充分利用图像的边缘信息, 然后引入阈值将边缘点与非边缘点分开, 同时抑制背景噪点, 最后基于仿真结果改善评价函数的效果。文献[10]提出了一种基于高频方差熵的评价函数, 并采用灵敏度因子和清晰度比率两个指标将其与 Laplacian、Roberts 等常用函数进行比较, 证明了它的优越性。

## 2 自适应清晰度自动调焦算法

### 2.1 算法介绍

通过以上对传统自动调焦算法的介绍可以看到, 这些方法的落脚点主要是提高评价函数的单峰性和灵敏度, 其评价函数的共同特点是不能兼顾灵敏度和可调焦范围两方面, 所以出现了自适应清晰度自动调焦算法<sup>[12]</sup>。它对深度和轻度离焦图像采取不同的评价策略。文献[11]首先提出了一个更适用于人眼特征的 HVS 评价算子。他们认为人眼往往对水平方向  $H$  和垂直方向  $V$  的敏感程度最高, 朝对角线  $D$  方向的敏感程度逐渐减弱。因此对不同方向采用了不同的权值:  $H=0.4$ ,  $V=0.4$ ,  $D=0.2$ 。设坐标点  $(x, y)$  的灰度值是  $f(x, y)$ , 梯度算子如下:

$$S = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & 12 & -2 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

基于以上 HVS 算子的灰度梯度函数如下:

$$I = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |G(x,y)| \quad (2)$$

式中,  $G(x,y) = |f(x,y) \otimes S|$ ,  $I$  代表评价函数值, 目标窗口的大小是  $M \times N$ 。

灰度梯度类评价函数一般都处理相邻像素之间的关系。但深度离焦图像像素间的灰度差异较小, 相邻像素的差值被弱化, 电机难以判断搜索方向, 导致调焦失败而限制可调焦范围。针对这些问题, 文献[11]对轻度和深度离焦图像采取了不同的评价函数, 做到了自适应调焦。对于轻度离焦图像, 他们直接使用基于 HVS 加权梯度算子的评价函数。而对于深度离焦图像, 他们则通过划分子区域来达到降低采样频率的目的。在深度离焦区域使用以下策略: 假设聚焦窗口的大小为  $A \times B$ , 将该区域划分为若干个  $N \times N$  的子区域, 然后计算每一个子区域的平均灰度值来作为该区域的特征值, 并将其记为  $M(x,y)$ :

$$M(x,y) = \frac{1}{N \times N} \sum_i^N \sum_j^N f(i,j) \quad (3)$$

式中,  $f(x,y)$  表示坐标  $(x,y)$  的灰度值。将每一个子区域的特征值  $M(x,y)$  作为单个像素的灰度值(即将该区域看作一个像素点), 再使用评价函数 HVS 算子进行清晰度评价。

## 2.2 需要解决的问题及研究意义

通过对以上算法的研究分析发现, 自适应清晰度自动调焦算法将问题的侧重点聚焦在如何扩大可调焦范围上。它对深度和轻度离焦图像采取了不同的评价方式, 但是没有明确离焦深浅度的判定标准。因此, 无法判断使用深度和轻度离焦算法的时机。研究人员往往依赖人眼判别, 导致效率低、准确度差。而上述问题又是十分重要的。如果我们将深度离焦的图像错判为轻度离焦, 那么该算法就会失效。此时若将该方法直接运用到工程实践中则会造成很

大的失误。由此可见, 制定一种合适的判定方法是必不可少的。本文的主要研究正是聚焦于解决这个问题。

## 3 红外图像离焦深浅度判定算法

### 3.1 基本思想

经过以上分析, 我们的目标是设计一种合理的离焦深浅度判定算法, 以判断采用深度和轻度离焦算法的时机。由于实际拍摄的场景是不断变化的, 为了使算法有更好的普适性, 需要制定一种与场景无关的清晰度判定方法。这也就是本文的核心之一。清晰度越高的图片细节越多, 高频频谱越多, 边缘部分越清晰。也就是说, 如果把一张图片的细节抹掉, 图像就会变得模糊, 边缘部分也会随之扩散, 导致边缘宽度变大。但不同类型的边缘扩散程度是不同的, 弱边缘(带有渐变的边缘)比强边缘(阶跃变化的边缘)的扩散程度要高。通过理论分析可知, 对于相同的离焦程度, 阶跃边缘的扩散程度相同<sup>[12]</sup>。因此可以通过检测阶跃边缘宽度来确定图像的离焦程度。一般来说, 被观察物体都被放在视场中央, 所以我们截取中心区域图像来进行边缘宽度检测。这样在提高准确度的同时, 也可以提高检测速度。

### 3.2 边缘检测算子介绍

我们主要用 Sobel 算子进行边缘提取。从技术上来说, Sobel 算子是一个离散性差分算子, 对一些灰度渐变较多的图像处理得较好, 并且对噪声较多的图像能体现出较强的优势<sup>[13]</sup>。Sobel 算子是一个研究得比较成熟的算子, 但是它计算简单, 能大大提高算法的计算速度。我们的算法对噪声敏感且需要利用灰度变化计算阶跃边缘, 所以用该算子求取边缘比较合适。对 Sobel 算子来说, 邻域像素对当前像素的影响不尽相同。因此需要对不同距离的像素点赋予不同的权值。距离与产生的影响是成反比的。Sobel 算子对图像进行卷积, 实质上就是求梯度值, 然后利用阈值去判别边缘位置。其水平和垂直边缘的计算公式如下<sup>[14]</sup>:

$$h_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$h_2 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

该算子由两个  $3 \times 3$  矩阵组成, 分别从横向和纵向对图像进行平面卷积。  $f(x, y)$  表示坐标  $(x, y)$  的灰度值, 图像的大小为  $M \times N$ , 那么水平和垂直边缘检测方法如下:

$$G_1 = \sum \sum h_1 \otimes f(x, y) \quad (6)$$

$$G_2 = \sum \sum h_2 \otimes f(x, y) \quad (7)$$

式中,  $G_1$  表示水平边缘,  $G_2$  表示垂直边缘。 Sobel 算子利用像素左右、上下邻域灰度加权的差。在边缘处, 该值达到最大; 边缘阶跃性越显著, 该值就越大。

### 3.3 具体策略

分别用 Sobel 水平算子和垂直算子与原图像进行卷积, 得到水平与垂直边缘图像。为了得到对应的阶跃边缘, 需要设置合适的阈值来选出边缘。为了准确算出边缘位置, 需要对  $G_1$  和  $G_2$  进行二值化处理, 具体方式如下:

$$P_1 = \begin{cases} 1, & G_1(x, y) > Th \\ 0, & G_1(x, y) \leq Th \end{cases} \quad (8)$$

$$P_2 = \begin{cases} 1, & G_2(x, y) > Th \\ 0, & G_2(x, y) \leq Th \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $P_1$  和  $P_2$  表示二值化以后的水平、垂直边缘图像,  $Th$  表示阈值(根据实验判定)。

然后对边缘宽度进行计算。对二值化后的水平边缘图像  $P_1$  逐列遍历, 通过计算每列连续为 1 的像素点的个数来检测每列各个边缘的宽度。检测到的水平边缘的总个数为  $p$ , 各边缘的宽度记为  $x_1, x_2, \dots, x_p$ 。具体计算方式如图 1 所示。其中第  $j$  列边缘宽度分别为 1 和 2。以此类推, 图 1 中共有 10 个边缘。水平边缘的平均宽度为

$$mean_1 = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p x_k \quad (10)$$

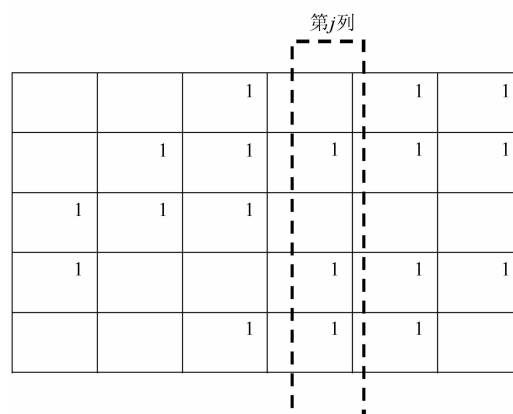


图 1 二值化边缘示意图

同理, 对二值化后得到的垂直边缘图像  $P_2$  逐行遍历, 从而检测每行各个边缘的宽度。检测到的垂直边缘的个数为  $q$ , 各边缘宽度记为  $y_1, y_2, \dots, y_q$ 。垂直边缘的平均宽度为

$$mean_2 = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q y_k \quad (11)$$

最后, 利用以上结果得到最终加权平均宽度:

$$T = a \cdot mean_1 + b \cdot mean_2 \quad (12)$$

式中,  $a = mean_1 / (mean_1 + mean_2)$ ,  $b = mean_2 / (mean_1 + mean_2)$ ,  $T$  为表征图像离焦度的指标。  $T$  越大, 边缘宽度越大, 图像离焦度越大;  $T$  越小, 图像离焦度越小。

这种方法最大的问题是对噪声非常敏感。由于噪声为高频信号, 在使用 Sobel 算子的过程中, 计算出的梯度值往往非常大。在边缘检测过程中, 它会被误判为边缘点, 影响最终边缘宽度的大小。针对该问题, 我们一方面采用了式(10)和式(11)求取边缘宽度平均值的策略, 另一方面还进行了降噪的预处理。对于降噪方法, 我们对基于均值滤波的方法进行了一些改进, 具体如下: 针对图像非外侧的像素点(即除像素点  $(i, 1)$ 、 $(1, j)$ 、 $(i, N)$ 、 $(M, j)$  以外的其他点), 保留了原来的均值滤波方法(见图 2)。

取一块  $3 \times 3$  方形区域, 将该区域像素点灰度值的均值作为中心像素点的灰度值。均值滤波即对整张图片进行以下操作:

$$g(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{j \in S} f(i, j) \quad (13)$$

0.04	0	0	0	0
0.17	0.04	0	0.04	0.08
0.35	0.17	0	0.13	0.30
0.47	0.31	0.04	0.22	0.52
0.43	0.35	0.21	0.30	0.65

图 2 均值滤波示意图

0.04	0	0	0	0
0.17	0.04	0	0.04	0.08
0.35	0.17	0	0.13	0.30
0.47	0.31	0.04	0.22	0.52
0.43	0.35	0.21	0.30	0.65

图 3 边缘像素均值滤波

式中,  $S$  表示这个  $3 \times 3$  区域,  $g(x, y)$  为取代后该区域中心像素点的灰度值。

对于图像外侧一圈像素点  $(i, 1)$ 、 $(1, j)$ 、 $(i, N)$ 、 $(M, j)$  来说, 由于无法使用  $3 \times 3$  区域均值, 需要对它们单独处理来加以改进(见图 3)。

取  $2 \times 2$  区域, 用该区域像素点的均值代替左上角像素点的灰度值:

$$g(x, y) = \frac{1}{4} \sum_{j \in S} f(i, j) \quad (14)$$

式中,  $S$  表示这个  $2 \times 2$  区域,  $g(x, y)$  为取代后该区域左上角像素点的灰度值。

## 4 实验分析

为了证明该算法可以有效分辨出深度和轻度离焦图像, 主要从以下两方面分析: 一是研究这种判定方法是否与场景无关; 二是研究边缘宽度与图像清晰度的关系。第一组图像是不同场景的清晰度相同(已对焦)的图像。通过计算边缘宽度的标准差来判断该方法是否可以做到与场景无关。第二组图像是相同场景的离焦程度不同的图像, 用来研究边缘宽度与清晰度之间的关系。

### 4.1 与场景无关的论证分析

选择 340 幅不同场景的均在最佳清晰位置

的图片。通过计算  $T$  的标准差来论证该判定方法是否具有场景无关性。部分图像如图 4 所示。

计算得到的这 340 张不同场景图片的边缘平均宽度  $T$  值如图 5 所示。可以看出, 对焦图片边缘宽度的均值在一个较小的范围内波动。对其进行标准差计算, 得到标准差为 0.0676。由此可见, 这些不同场景图片的阶跃边缘宽度的波动较小, 可以证明它们与场景并不相关。常见的清晰度判定方法包括一些基于 SMD、Laplace 算子等的统计学方法。虽然它们对清晰度的判定较为准确, 但是共同的问题是与场景相关。而本文方法的优势就在于此。

### 4.2 边缘宽度与清晰度关系的分析

选择同一场景不同清晰度的一组图片, 然后通过分别计算边缘宽度  $T$  来判定边缘宽度与图片清晰度的关系。部分实验图如图 6 所示。

选择调焦过程中由离焦到对焦再到离焦的一组图像, 分别计算变化过程中不同清晰度下的  $T$  值(结果见图 7)。可以看出, 在图像由模糊变清晰的过程中, 边缘宽度变小。对焦时最小边缘宽度大概在 1.62 左右, 与 4.1 节中对焦图像的实验结果一致。在图像由清晰变模糊的过程中, 边缘宽度逐渐变大。由此可见, 实验结果与预期相符。随着图像离焦程度变大, 边缘宽度也变大。因此, 边缘宽度的大小可以反映图像的离焦程度。

### 4.3 准确率评估及比较

利用红外探测器采集了 500 张不同场景且离焦深浅度各异的红外图像。根据文献[11]进行实验, 判定正向离焦大于 4.5 倍焦深(或负向离焦小于 -4.5 倍焦深)的图像为深度离焦图像, 并由此将图像(贴标签)分为深度离焦图像、轻度离焦图像和对焦图像。将这些图像作为实验素材, 对比算法结果与人眼感受结果之间的差异, 从而确定算法的准确度。然后采用相同的实验图像, 将本文方法的结果与高频和算法[15]、基于无参考结构清晰度的算法[16]的结果进行比较。

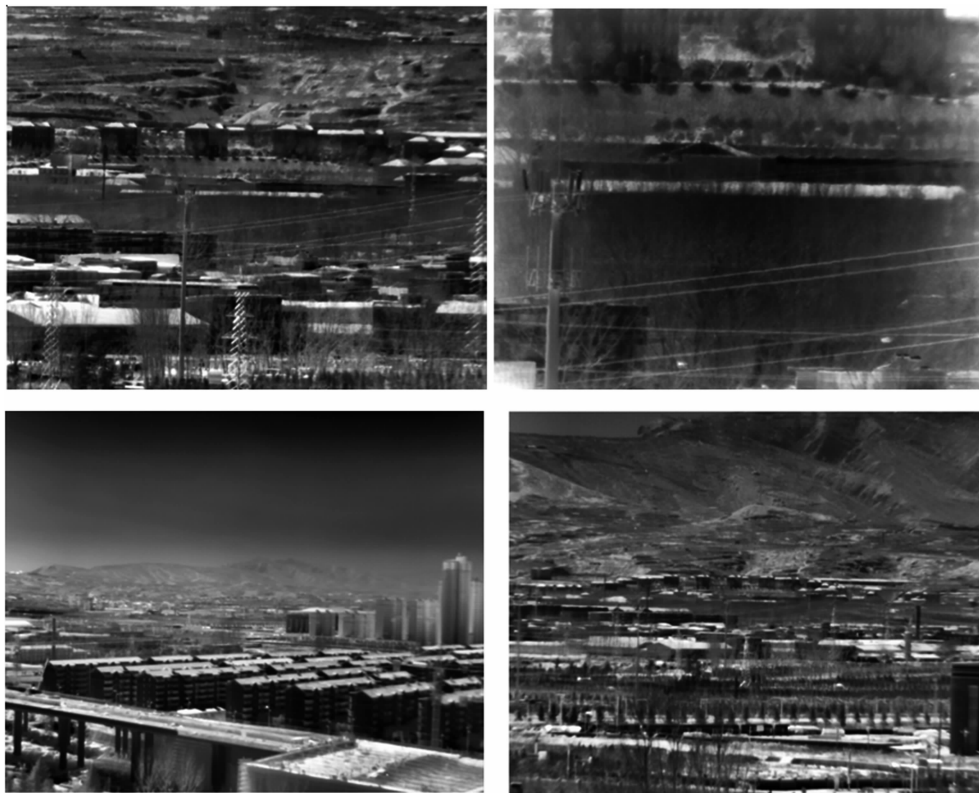


图 4 不同场景的图片

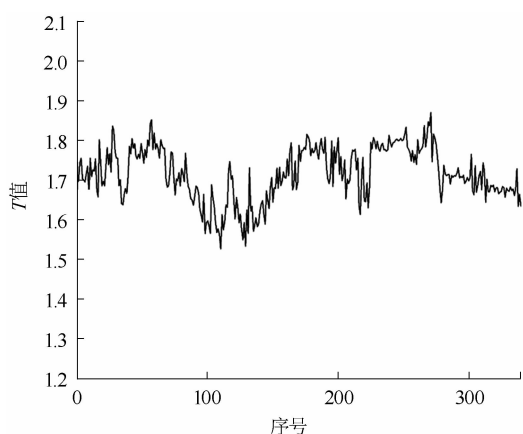


图 5 不同场景清晰图片的 T 值

实验结果表明,采用本文算法的 500 张图片中有 434 张的判定结果与标签相符,准确率达到 86.8%。而高频和算法的准确率为  $394/500=78.8\%$ ,基于无参考结构清晰度的算法的准确率为  $418/500=83.6\%$ 。可以看出,本文算法的准确率大于其它两种。

## 5 总结与展望

本文从传统调焦方法入手,引出了已提出的自适应自动调焦算法。该方法虽然兼顾了灵

敏度和可调焦范围,却并未指出深度离焦算法和轻度离焦算法的切换原则,影响了算法的实用性。由此我们提出了基于 Sobel 算子的改进策略,并通过计算边缘宽度来判别离焦程度。从实验结果来看,这种方法可以做到与场景无关,并且离焦程度与边缘宽度成正相关关系。那么也就可以推出,该方法能够判别不同场景图像的离焦程度。本文方法的优势在于经过前期的数据计算后,可以无参考地判断单张图像的清晰度。当然,本文方法也存在一些局限性,比如因基于边缘检测而对均匀面(如一面白墙或无云的天空)不适用。此外,该方法还要求物体的边缘宽度可以被明确测出。如果图片中存在无法识别明确边缘轮廓的极小高亮物体,那么本文方法也无法适用。这也是未来需要改进和研究的地方。

## 参考文献

- [1] 程玉兰. 红外热成像系统的基本原理 [J]. 华北电力技术, 1988, 4(12): 1-7.
- [2] 张倩, 刘纪洲. 红外系统调焦组件的回程间隙

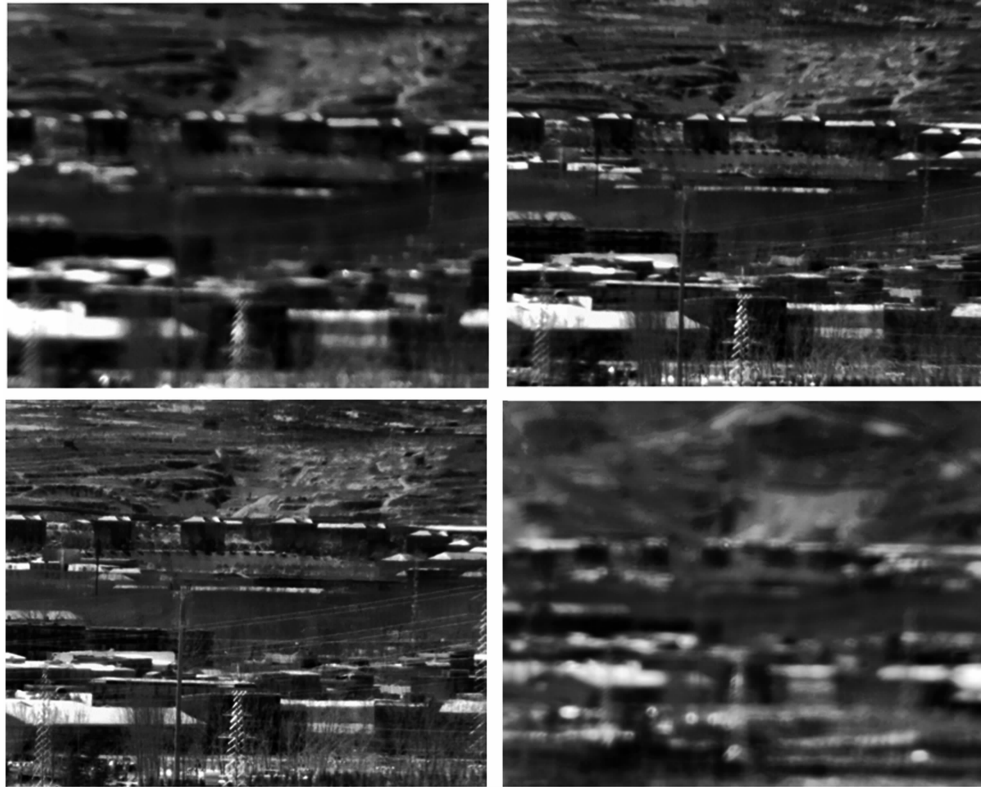
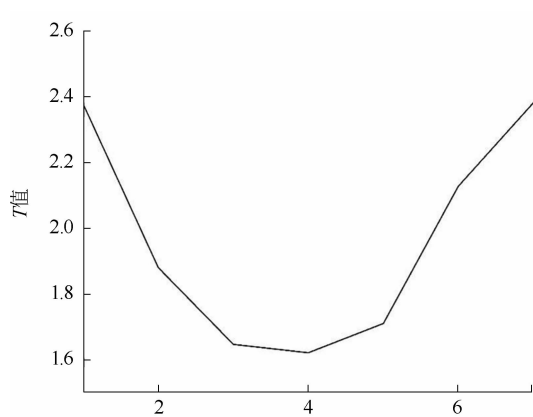


图 6 不同清晰度的图片

图 7 不同清晰度下的  $T$  值

对自动调焦的影响分析与算法优化 [J]. 红外, 2020, 41(7): 11-17.

- [3] 邹昌帆, 刘秉琦, 黄富瑜, 等. 基于多向最大梯度阈值的自动调焦评价函数 [J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 115-118.
- [4] 黄德天, 刘雪超, 张红胜, 等. 基于人类视觉的快速自动调焦法 [J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 768-776.
- [5] 张来线, 孙华燕, 郭惠超, 等. 基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法 [J]. 光子学报, 2013, 42(5): 605-610.

[6] 吴振峰, 左宏富, 邱根良. 光学显微镜的自动聚焦技术 [J]. 光学仪器, 2000, 22(4): 10-12.

[7] 高赞, 姜威, 朱孔凤, 等. 基于 Roberts 梯度的自动聚焦算法 [J]. 红外与激光工程, 2006, 4(1): 117-121.

[8] 朱倩, 姜威, 贲晔焯, 等. 梯度与相关性结合的自动聚焦算法 [J]. 光学技术, 2016, 42(4): 329-332.

[9] Ma X Y, Li Q L. Auto-focus algorithm based on improved SML evaluation function [C]. SPIE, 2019, 11338: 113381Z.

[10] 刘斌, 谯倩, 赵静, 等. 基于高频方差熵清晰度评价函数的聚焦三维测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(5): 210-218.

[11] 李洪宇, 杨帆, 谭文斌, 等. 基于 HVS 算子的自适应清晰度自动调焦评价函数 [J]. 红外技术, 2017, 39(7): 632-637.

[12] Caviedes J, Oberti F. A new sharpness metric based on local kurtosis, edge and energy information [J]. Signal Processing Image Communication, 2004, 19(2): 147-161.

[13] 郑欢欢, 白鱼秀, 张雅琼. 一种基于 Sobel 算子

的边缘检测算法 [J]. *微型电脑应用*, 2020, **36**(10): 4-6.

- [14] Hadi S V, Herwindiati D E, Sutrisno T. Car shape clustering using sobel edge detection with divisive average linkage and single linkage algorithm (case: bus, sedan, citycar, mpv, and truck) [J]. *Materials Science and Engineering*,

2020, **1007**(1): 130-136.

- [15] Firestone L, Cook K, Culp K, et al. Comparison of autofocus methods for automated microscopy [J]. *Cytometry*, 1991, **12**(3): 195-206.
- [16] 谢小甫, 周进, 吴钦章. 基于无参考结构清晰度的自适应自动对焦方法 [J]. *光电工程*, 2011, **38**(2): 84-89.

(上接第 14 页)

- [7] Christophe G, Michel D, Francis B. Methane Pyrolysis: Thermodynamics [J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, **52**(5): 815-827.
- [8] Palmer H B, Hirt T J. The Activation Energy For the Pyrolysis of Methane [J]. *The Journal of Physical Chemical A*, 1963, **67**(3): 709-713.

- [9] Harold M S, Peter G, Harry T R, et al. Pyrolysis of Methane: US2061597 [P]. 1936-11-20.
- [10] 何书平, 胡先志, 郑多洪. 石英玻璃管的高温软化性能研究 [J]. *光通信研究*, 1993, **68**(4): 39-43.
- [11] 郭关柱, 罗亚南. 一种石英安瓿壁面熏碳装置: CN202011567959.5 [P]. 2020-11-30.