

## 基于自适应动态范围 CLAHE 的雾天图像增强

方丹阳, 付青青\*, 吴爱平

长江大学电子信息学院, 湖北 荆州 434020

**摘要** 针对雾天图像对比度低、细节模糊的问题,提出了一种自适应动态范围 CLAHE 的雾天图像增强算法。引入自适应参数  $T_1$  和  $T_2$  自动调整图像重分配的范围,对传统的 CLAHE 进行改进,结合同态滤波改善图像过亮、过暗区域;原始图像通过多尺度细节增强算法进行细节增强处理;将处理后的细节图像与同态滤波处理后的结果相结合,达到图像对比度和细节增强的目的。通过信息熵、局部对比度、平均梯度和运行时间 4 种客观评价指标对图像结果进行对比分析,主观与客观测试结果表明,所提算法可有效增强图像对比度、凸显细节信息,便于雾天图像信息的提取。

**关键词** 图像处理; 自适应动态范围; 多尺度细节提升; 同态滤波; 图像增强

中图分类号 TP391 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212835

## Foggy Image Enhancement Based on Adaptive Dynamic Range CLAHE

Fang Danyang, Fu Qingqing\*, Wu Aiping

School of Electronic Information, The Yangtze University, Jingzhou 434020, Hubei, China

**Abstract** To address the problems of low contrasts and fuzzy details in foggy images, an adaptive dynamic range contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) algorithm for foggy image enhancement is proposed in this paper. Two adaptive parameters  $T_1$  and  $T_2$  are introduced to automatically adjust the range of image redistribution to improve the traditional CLAHE, and homomorphic filtering is further combined to improve the over-light and over-dark regions in the image. The original image is enhanced using a multi-scale detail enhancement algorithm. The processed detail image is combined with the result of homomorphic filtering to enhance the image contrast and details. The image results are compared and analyzed based on four objective evaluation indexes including information entropy, local contrast, average gradient, and running time. The subjective and objective test results reveal that the proposed algorithm can effectively enhance the image contrast and highlight the relevant details, which is convenient for image information extraction on foggy days.

**Key words** image processing; adaptive dynamic range; multi-scale detail enhancement; homomorphic filtering; image enhancement

## 1 引言

近年来,由于环境污染、尾气排放等原因,雾霾天气频频发生,智能相机采集的图像易受环境因素影响<sup>[1]</sup>,存在对比度低、细节受损等问题,导致图像所携带的信息不易被获取,为改善所获取图像的视觉质量,图像去雾的技术被广泛应用<sup>[2-3]</sup>。

图像去雾算法通常分为 3 类:图像复原、深度学习和图像增强<sup>[3]</sup>。图像复原技术主要是利用大气散射物理学模型<sup>[4]</sup>进行去雾,较具代表性的是 He 等<sup>[5]</sup>提出的暗通道先验去雾算法,该算法可有效复原无雾图像,但

其使用软抠图方法导致算法耗时较长,Salazar-Colores 等<sup>[6]</sup>在暗通道先验算法基础上改进,并在实现图像复原的同时提高了算法运算时间。基于深度学习的去雾算法使用卷积神经网络<sup>[7]</sup>建立端到端的模型进行去雾,该类算法较具有代表性的是 Cai 等<sup>[8]</sup>提出的端到端系统的去雾算法,但该算法训练较为耗时。图像增强的去雾方法通过图像增强技术去除图像噪声、增强图像信息,使处理后的图像视觉效果更好。

目前雾天图像增强的方法主要有直方图均衡化 (Histogram equalization, HE) 算法,同态滤波算法等<sup>[9-10]</sup>。HE 简单易实现,但容易出现过增强现象,针

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2021-11-26; 录用日期: 2021-12-21; 网络首发日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(51604038)

通信作者: \*36820653@qq.com

对该问题李竹林等<sup>[11]</sup>提出将传统的 HE 改为局部自适应直方图均衡化 (Adaptive histogram equalization, AHE)<sup>[12]</sup> 图像去雾算法, 使图像对比度得以改善。但 AHE 存在噪声过度放大的问题, 因而提出对比度受限自适应直方图均衡化算法 (CLAHE)<sup>[13]</sup>, CLAHE 有着提高图像对比度并对噪声进行抑制的优势, 使用 CLAHE 进行去雾可有效解决雾天图像质量下降问题<sup>[14]</sup>。许多学者对 CLAHE 算法进行改进, 如杨骥等<sup>[15]</sup>提出改进 CLAHE 的视频快速去雾算法, 可有效去除朦胧, 增强雾天图像的层次感。孙冬梅等<sup>[16]</sup>和 Li 等<sup>[17]</sup>提出对 CLAHE 引入参数  $T$  调整图像各子块像素点重分配的范围, 通过参数  $T$  影响图像增强效果, 此类算法在图像对比度增强方面效果显著。同样, 采用同态滤波算法和其他算法融合能够对雾天图像的光照进行校正, 保证有雾图像信息的正常获取。如董静薇等<sup>[18]</sup>融合同态滤波和小波变换对有雾图像进行去雾算法研究, 在保持原图信息不丢失的同时增强了图像的对比度。杨亚绒等<sup>[19]</sup>使用改进同态滤波与多尺度融合对图像进行增强处理, 能够有效改善图像对比度和清晰度。

本文在 CLAHE 基础上进行改进, 引入自适应参数  $T_1$  和  $T_2$ , 从而获得自适应阈值  $S_{\min}$  和  $S_{\max}$ , 对不同的输入图像自动选择最佳的动态范围, 增强图像对比度, 改善图像视觉效果, 并结合同态滤波改善光照不均对雾天图像对比度增强产生的影响。同时, 对雾天图像使用多尺度细节增强算法提高图像细节, 最后将处理后的细节图与同态滤波增强后的结果相结合得到增强后的雾天图像。仿真结果表明, 该算法可有效改善图像亮度, 增强图像对比度和细节, 提高图像视觉效果, 适用于有雾图像的对比度和细节增强处理。

## 2 传统的 CLAHE 算法

CLAHE 算法通过增强局部区域对比度, 进而提升图像局部细节的可视性。该算法在 AHE 的基础上改进而来, 主要为通过对 AHE 算法的对比度进行限幅, 达到抑制噪声的目的<sup>[20-21]</sup>。CLAHE 算法将原始图像分成不重叠的若干子块, 并对每个子块使用对比度

限幅, 克服噪声放大的问题<sup>[22]</sup>。但对每个子块直方图进行裁剪限幅, 使算法极其耗时, 因而采用双线性插值加快算法的运行速度。

CLAHE 算法的具体步骤如下:

**步骤 1** 将图像划分成  $k$  个大小相等、形状相同互不重叠的  $m \times n$  固定子块, 用  $H(x)$  表示子块的直方图。

**步骤 2** 将每个子块的像素个数平均分配到每个灰度级的平均值  $N_{\text{aver}}$ , 可表示为

$$N_{\text{aver}} = \frac{N_{b,x} N_{b,y}}{L}, \quad (1)$$

式中:  $N_{b,x}$  为子块  $x$  方向的像素数个数;  $N_{b,y}$  为子块  $y$  方向的像素数个数;  $L$  为子块中所包含的灰度级数。

**步骤 3** 限定每个子块中灰度级上所包含的像素数不能超过剪切阈值  $C_{\text{limit}}$ , 公式为

$$C_{\text{limit}} = N_{\text{aver}} + N_{\text{clip}} (N_{b,x} \times N_{b,y} - N_{\text{aver}}), \quad (2)$$

式中:  $N_{\text{clip}}$  为剪切系数。

**步骤 4** 对每个子块的灰度直方图进行剪切, 如图 1(a) 所示, 将剪切下来多余的像素数平均分配到各灰度级中, 如图 1(b) 所示, 每个灰度级平均分到的像素数为

$$N_a = \frac{S_{\text{clip}}}{L}, \quad (3)$$

式中:  $S_{\text{clip}}$  为被剪切的总像素数。

重分配的过程可表示为

$$\begin{aligned} & \text{if } H(x) > C_{\text{limit}} \\ & \quad H(x) = C_{\text{limit}}; \\ & \text{else if } H(x) > H_a \&\& H(x) < C_{\text{limit}} \\ & \quad H(x) = C_{\text{limit}}; \\ & \text{else } H(x) = H(x) + N_a, \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $H_a = C_{\text{limit}} - N_a$ ;  $H(x)$  为原始区域中第  $x$  个灰度级的像素数。

经过上述分配后, 剩余没有分配的像素数均匀分配到小于  $C_{\text{limit}}$  的灰度级, 循环分配, 直至剩余像素数为零。

**步骤 5** 对每个子块对比度受限后进行 HE 处理。

**步骤 6** 双线性插值处理, 消除块状效应以及提高运算速度。

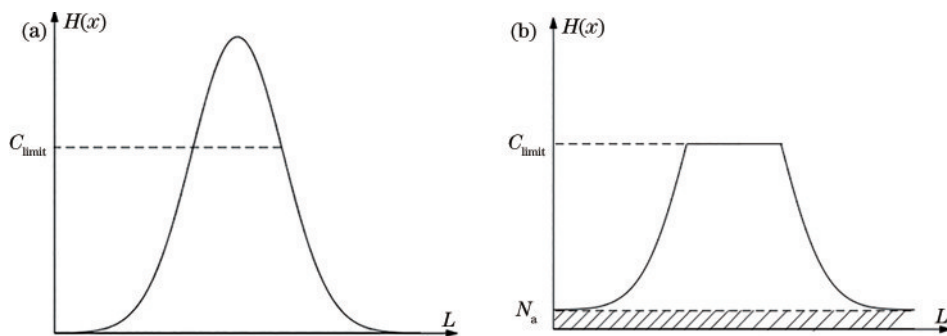


图 1 CLAHE 算法。(a) 直方图剪切; (b) 直方图重分配

Fig. 1 CLAHE algorithm. (a) Histogram clipping; (b) histogram redistribution

### 3 本文算法

本文算法框图如图 2 所示,首先对传统 CLAHE 算法进行改进,将输入雾天图像分成不重叠的若干子块,并对每个子块确定剪切阈值,通过自适应参数  $T_1$  和  $T_2$  获取动态阈值  $S_{\min}$  和  $S_{\max}$ ,确定灰度级的动态范围并重新分配,再对每个子块进行直方图均衡化,双线性插值消

除块状效应,然后使用同态滤波改善图像过亮或过暗区域。单一的雾天图像增强算法会造成图像细节丢失,故结合多尺度细节增强算法维护图像细节并增强图像对比度。输入图像应用高斯内核,获得 3 个不同的高斯模糊图像,提取精细细节、中间细节和粗细节,再将 3 层细节合并生成细节图像。最后将细节图像与同态滤波改善后的结果线性相加得到增强后的雾天图像。

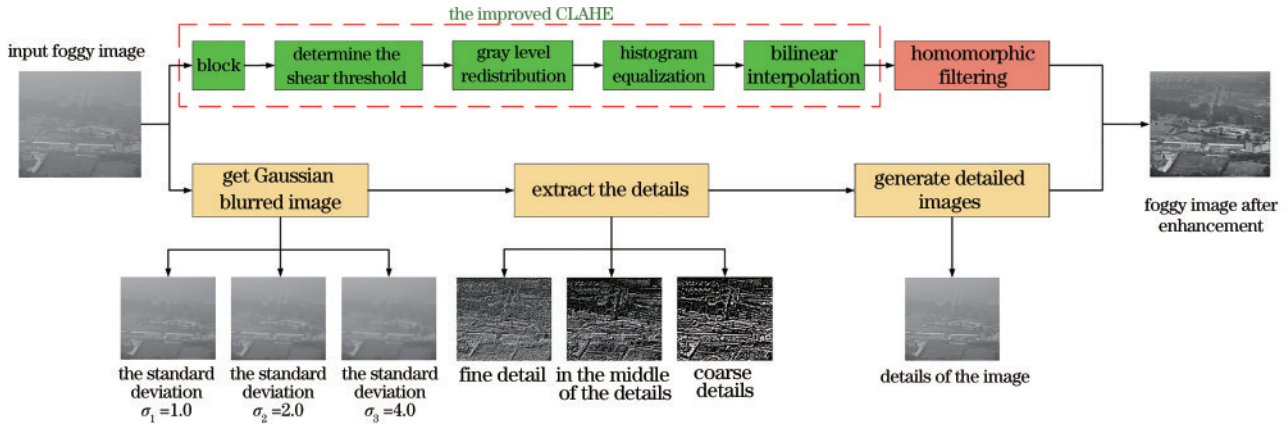


图 2 算法流程框图

Fig. 2 Flow chart of the proposed algorithm

#### 3.1 改进的 CLAHE 算法

本文算法在传统算法的基础上对第一部分中的重分配步骤 4 进行了改进,原剪切后的像素数重新分配在整个灰度级范围内,改进后的 CLAHE 算法引入了自适应参数  $T_1$  和  $T_2$ ,获得动态范围最小值  $S_{\min}$  和最大值  $S_{\max}$  (见图 3(a))。具体算法步骤如下:

图像的概率密度函数为

$$p(x) = n_x / n, \quad (5)$$

式中:  $x$  为灰度级数,取值范围为  $[0, L - 1]$ ;  $n_x$  为灰度级为  $x$  的像素数;  $n$  为图像的总像素数。

根据统计学参数估计<sup>[23]</sup>,自适应参数  $T_1$  和  $T_2$  可表示为

$$T_1 = \sum_{i=0}^{u-1.65k} p(i), \quad (6)$$

$$T_2 = \sum_{i=0}^{u+1.96k} p(i), \quad (7)$$

式中:  $u$  为概率密度函数的灰度级数学期望;  $k$  为概率密度函数的灰度级标准差。灰度级动态范围最小值  $S_{\min}$  和最大值  $S_{\max}$  的表达式为

$$S_{\min} = \left\{ x \mid \sum_{i=0}^x p(i) = T_1 \right\}, \quad (8)$$

$$S_{\max} = \left\{ x \mid \sum_{i=0}^x p(i) = T_2 \right\}. \quad (9)$$

灰度级动态范围为  $S_r = S_{\max} - S_{\min}$ 。

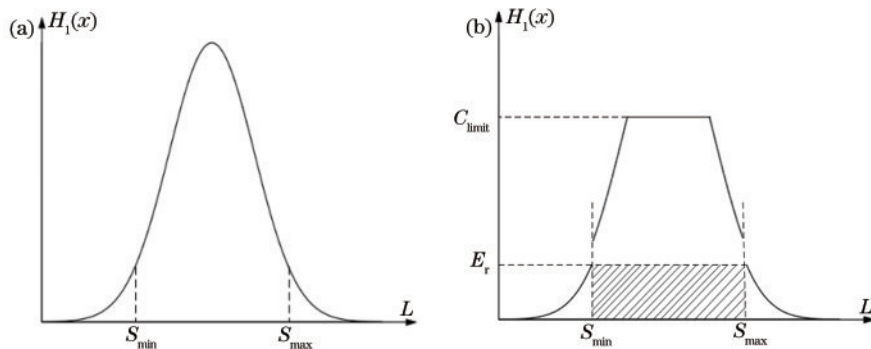


图 3 改进的 CLAHE 算法。(a) 动态范围的设定; (b) 改进后的直方图重新分配

Fig. 3 Improved CLAHE algorithm. (a) Dynamic range setting; (b) improved histogram redistribution

像素数重新分配过程 (见图 3(b)) 如下:

$$T_E = \sum_{x=0}^{L-1} [\max(H(x) - C_{\text{limit}}, 0)], \quad (10)$$

$$H_0(x) = \begin{cases} H(x), & x > S_{\max}, x < S_{\min} \\ H(x) + E_r, & S_{\min} \leq x \leq S_{\max} \end{cases}, \quad (11)$$

式中:  $E_r = T_E / S_r$  为在动态范围内每个灰度级上增加



的像素数。

在第一次分配结束后,可能还有一些像素数会超过  $C_{\text{limit}}$ ,所以需要进行二次分配。

$$H_1(x) = \begin{cases} H_0(x), & H_0(x) < E_{r_0} \\ C_{\text{limit}}, & H_0(x) \geq E_{r_0} \end{cases}, \quad (12)$$

式中:  $E_{r_0} = C_{\text{limit}} - E_r$ 。



图 4 CLAHE算法改进前后效果图。(a)原图;(b)传统的CLAHE算法;(c)改进的CLAHE算法

Fig. 4 Effect diagram of CLAHE algorithm before and after improvement. (a) Original image; (b) traditional CLAHE algorithm; (c) improved CLAHE algorithm

### 3.2 同态滤波器

同态滤波器能够校正雾天图像非均匀照明,将其与改进的CLAHE算法结合可进一步增强图像的对比度。同态滤波器是一种把频率过滤和灰度变换相结合的对有雾图像清晰化的处理方法,依靠图像的照度/反射率模型作为频域处理的基础,利用压缩亮度范围和增强对比度来达到消除雾气的目的。采用同态滤波的算法对雾天图像进行处理,能够抑制照度分量,同时增强反射分量,减少光照情况对图像的影响。

一幅有雾图像  $f(x, y)$  表示为照度分量  $i(x, y)$  与反射分量  $r(x, y)$  的乘积,即

$$f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y). \quad (13)$$

同态滤波的基本原理为:将图像的灰度值看作是照度  $i(x, y)$  和反射率  $r(x, y)$  两个分量的乘积 ( $0 < i(x, y) < \infty, 0 < r(x, y) < 1$ )。由于照度  $i(x, y)$  相对变化很小,可看作图像的低频成分,而反射率  $r(x, y)$  则是高频成分。分别通过处理照度  $i(x, y)$  和反射率  $r(x, y)$  对图像灰度值的影响,达到揭示阴影区细节特征的目的。

同态滤波处理的基本流程如图 5 所示。图 5 中:  $\ln$  为对数变换;FFT 为傅里叶变换;  $H(u, v)$  为同态滤波函数;  $\text{FFT}'$  为傅里叶逆变换;  $\exp$  为指数变换。

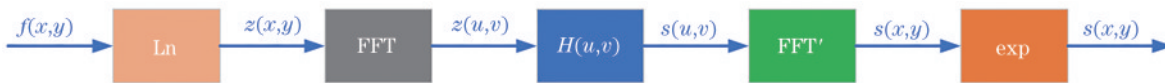


图 5 同态滤波器增强流程图

Fig. 5 Flow chart of homomorphic filter enhancement

针对有雾天气对获取图像的影响,采用指数型函数作为同态滤波器的传递函数,能够有效滤除雾天对图像的影响。传统的指数型传递函数为

$$H(u, v) = \exp(-D_0/D(u, v))^n. \quad (14)$$

优化后的指数传递函数为

$H(u, v) = (r_H - r_L) \exp(-D_0/D(u, v))^{2n} + r_L$ , (15)  
式中:  $D(u, v)$  为频率  $(u, v)$  到中心频率  $(u_0, v_0)$  的距离;  $D_0$  为截止频率;  $r_H$  为高频增益;  $r_L$  为低频增益。当  $r_L < 1, r_H > 1$  时,则此滤波器将减少低频、增强高频,其结果是同时使灰度动态范围压缩和对比度增强。

### 3.3 多尺度细节提升

为进一步提升雾天图像细节效果,采用多尺度细节增强算法对细节部分进行处理。多尺度细节提升的思想是通过 3 个不同尺度的高斯模糊,和原图做减法

获取不同的细节信息,再通过一定的组合方式将细节信息融合到原图中,从而加强原图的细节信息。

多尺度方法使用高斯差分(Difference of Gaussians, DoGs)提高图像细节,DoGs算子剔除了信号中高频的部分(一般被认为是噪声),也剔除了低频的部分(一般被认为是图像中同质化区域,也就是非边缘信息的区域)。

1) 在原雾天图像  $I^*$  中应用高斯内核,获得 3 个不同的高斯模糊图像:

$$A_1 = G_1 * I^*, A_2 = G_2 * I^*, A_3 = G_3 * I^*, \quad (16)$$

式中:  $G_1, G_2, G_3$  分别为标准偏差为  $\sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 2.0, \sigma_3 = 4.0$  的高斯核。

2) 提取细节  $D_1, D_2, D_3$ :

$$D_1 = I^* - A_1, D_2 = A_1 - A_2, D_3 = A_2 - A_3. \quad (17)$$

3) 合并生成整体细节图像:

$$D^* = [1 - w_1 \times \text{sgn}(D_1)] \times D_1 + w_2 \times D_2 + w_3 \times D_3, \quad (18)$$

式中:  $w_1 = 0.3; w_2 = 0.3; w_3 = 0.9$ ;  $\text{sgn}$  为符号函数。

## 4 实验结果与分析

实验均采用配置为 Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU@2.30 GHz 8G 内存, 操作系统为 Windows 10 专业版的计算机, 利用仿真工具 Matlab(R2019a) 进行测试验证本文算法对雾天图像的处理效果。为验证本文算法的有效性, 使用现实世界中经常使用的自然有雾图像作为测试集<sup>[24]</sup>, 对大量有雾图像进行了测试。并将本文提出的算法与全局 HE、CLAHE、文献[25]、文献[6]及文献[8]处理结果进行了比较, 最终通过主观与客观相结合的方法证明了本文算法的可行性和有效性。

### 4.1 主观评价

图 6 展示了本文算法与其他算法对雾天图像进行增强的比对结果。图 6(a) 是从自然雾天图像数据集中选取的 5 张雾天图像, 分别是乡村图、街景图、城市图、庄稼图和市郊图。图 6(b) 是全局 HE 效果图, 图像存在对比度过度增强的现象, 比如乡村图、城市图、庄稼图和市郊图的背景过亮, 导致细节部分不够明显, 以及街景

图右上角存在局部区域过暗的现象。图 6(c) 是 CLAHE 效果图, 其对比度较原始图像明显提高, 但去雾效果不佳, 不能清晰地凸显图像当中细节纹理部分。图 6(d) 是文献[25]的结果图, 其对比度与原雾天图像相比有所提高, 相较于 CLAHE 效果图, 图像过亮、过暗部分有所改善, 但图中还存在薄雾, 去雾效果不明显。图 6(e) 是文献[6]效果图, 图像前景去雾效果较好, 但背景还存在雾气, 远处景物不能很好地显现, 且图像存在亮度偏低、部分细节丢失的现象。图 6(f) 是文献[8]效果图, 该算法可有效复原图像, 但依然存在远景区域去雾不彻底及局部区域偏暗的问题。图 6(g) 是本文算法效果图, 从图中可知, 本文算法与其他对比算法相比在图像对比度增强方面具有更好的效果, 且细节部分明显增强。比如: 乡村图背景的高楼大厦得以凸显, 农田里的细节层次分明, 清晰可见; 街景图中房屋建筑的细微结构与广告牌中的字母均得到有效增强; 城市图、庄稼图及市郊图中被雾霾掩盖的物体得以显露, 市郊图右上角高亮区域明显消减, 庄稼图中细节清晰, 去雾较彻底, 城市图中图像下方树叶的微小轮廓清晰可见, 图像整体效果更好。经测试, 本文算法对雾天图像对比度增强效果更好, 凸显了图像细节部分, 增强了图像的自然感, 更适合人眼及机器对雾天图像信息的获取。

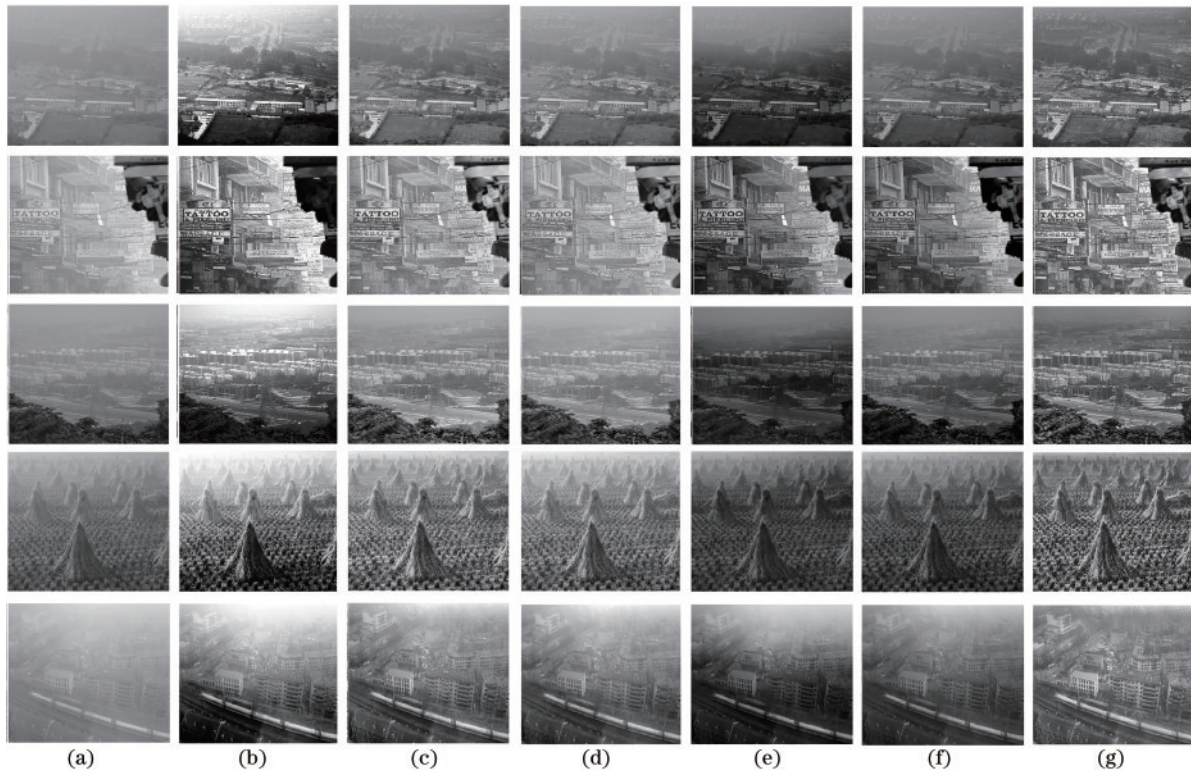


图 6 各种算法处理结果。(a)原始图像;(b) HE;(c) CLAHE;(d)文献[25];(e)文献[6];(f)文献[8];(g)本文算法  
Fig. 6 The processed results of various algorithms. (a) Original image; (b) HE; (c) CLAHE; (d) reference[25]; (e) reference[6]; (f) reference[8]; (g) proposed algorithm

### 4.2 客观评价

为验证本文算法对图像处理的有效性, 现使用信

息熵( $E$ )、局部对比度( $C$ )、平均梯度( $M$ )及运行时间( $T$ )作为评价指标进一步验证。



信息熵  $E$  为

$$E = - \sum_{i=0}^{255} p(i) \lg p(i), \quad (19)$$

式中:  $i$  为图像灰度值;  $p(i)$  为图像灰度值  $i$  在整幅图像中出现的概率。信息熵用来反映图像的质量, 一般情况下, 该值越大, 则图像当中细节信息越丰富。

局部对比度  $C$  为

$$C = \frac{1}{mn} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \frac{I_{x,y}^{\max} - I_{x,y}^{\min}}{I_{x,y}^{\max} + I_{x,y}^{\min} + c_1}, \quad (20)$$

式中:  $m$  和  $n$  为图像的大小;  $I_{x,y}^{\max}$  和  $I_{x,y}^{\min}$  分别为以像素点  $(x, y)$  为中心的某一子块中像素灰度最大值和最小值, 本文中子块大小取为  $8 \times 8$ ;  $c_1$  为常数取值为 0.0001, 以避免分母出现 0 的情况。图像的局部对比度用来反映图像像素灰度分布的动态范围, 动态范围越大, 则图像的对比度越高。

平均梯度  $M$  为

$$M = \frac{1}{m_1 n_1} \sum_{x=1}^{m_1} \sum_{y=1}^{n_1} \sqrt{[\partial f(x, y) / \partial x]^2 + [\partial f(x, y) / \partial y]^2}, \quad (21)$$

式中:  $m_1$  和  $n_1$  分别为图像的长和宽。图像的平均梯度可以反映图像微小细节的反差和纹理变换特征, 一般情况下, 平均梯度越大, 说明图像的层次越丰富, 清晰度也越高。

运行时间  $T$  反映图像算法的复杂度及实用性, 运行时间越长, 则表明图像算法的复杂度越高, 实用性越

差; 反之, 运行时间越短, 证明算法的复杂度越低, 实用性越强。图 6 中不同雾天图像增强算法的客观评价指标计算结果见表 1~表 4, 可视化结果如图 7 所示。

表 1 不同算法处理不同图像的信息熵

Table 1 Information entropy of different images processed by different algorithms

Picture	Original	HE	CLAHE	Ref. [25]	Ref. [6]	Ref. [8]	Proposed algorithm
Village	6.36	6.29	6.93	6.92	7.23	6.96	6.91
Street	7.27	6.98	7.50	7.31	7.64	7.46	7.75
City	6.81	6.66	7.24	7.17	6.84	7.15	7.22
Crops	7.13	7.05	7.57	7.54	6.95	7.23	7.44
Outskirt	6.82	6.77	7.59	7.61	7.57	7.41	7.14

表 2 不同算法处理不同图像的局部对比度

Table 2 Local contrast of different images processed by different algorithms

Picture	Original	HE	CLAHE	Ref. [25]	Ref. [6]	Ref. [8]	Proposed algorithm
Village	0.06	0.29	0.17	0.13	0.25	0.15	0.22
Street	0.18	0.41	0.31	0.25	0.43	0.41	0.42
City	0.14	0.30	0.23	0.20	0.29	0.29	0.33
Crops	0.22	0.47	0.41	0.34	0.39	0.40	0.50
Outskirt	0.06	0.27	0.23	0.19	0.30	0.19	0.24

表 3 不同算法处理不同图像的平均梯度

Table 3 Average gradient of different images processed by different algorithms

Picture	Original	HE	CLAHE	Ref. [25]	Ref. [6]	Ref. [8]	Proposed algorithm
Village	10.85	33.70	48.70	39.36	35.56	34.87	62.91
Street	33.59	59.67	113.09	86.15	104.66	98.89	159.05
City	17.13	35.61	65.38	52.46	39.47	46.48	84.94
Crops	28.76	110.07	117.81	93.26	64.11	68.66	146.81
Outskirt	9.86	51.17	58.70	47.40	39.89	36.95	71.98

表 4 不同算法处理不同图像的运行时间

Table 4 Running time of different images processed by different algorithms

Picture	Running time / s					
	HE	CLAHE	Ref. [25]	Ref. [6]	Ref. [8]	Proposed algorithm
Village	1.49	0.17	0.56	1.11	4.20	0.44
Street	1.23	0.10	0.35	0.48	2.27	0.41
City	1.39	0.16	0.44	1.26	3.10	0.39
Crops	0.80	0.16	0.23	0.98	4.76	0.54
Outskirt	0.84	0.14	0.29	0.87	2.30	0.45

从表 1~表 4 数据分析及图 7 可视化结果展示可知, 6 种增强算法处理后的图像局部对比度、平均梯度

这 2 个客观评价指标均高于原始图像, 说明 6 种算法对图像都有增强效果。从表 1 可知, 本文算法、文献[8]、文献[25]和 CLAHE 算法在信息熵上的值均高于 HE 算法, 说明这 4 种算法在细节增强方面优于 HE 算法, 文献[6]的庄稼图由于处理后的效果图整体亮度过暗, 导致图中细节部分不够清晰, 故存在信息熵偏低的现象。结合表 2 可知, HE 算法中局部对比度的值在乡村图中最高, 在街景图、城市图和庄稼图中仅次于本文算法, 但 HE 测试结果图显示图像过度增强, 因此 HE 的局部对比度值越高, 并不代表质量越好。从本文算法的局部对比度值可知, 虽然该值在每个实验结果不一定是最好的, 但是仍会接近最高值, 且比较稳定, 结合综合指标及视觉效果来看, 本文算法在雾天图像对比度增强方面仍具有最佳的效果。从表 3 可知, 针对平

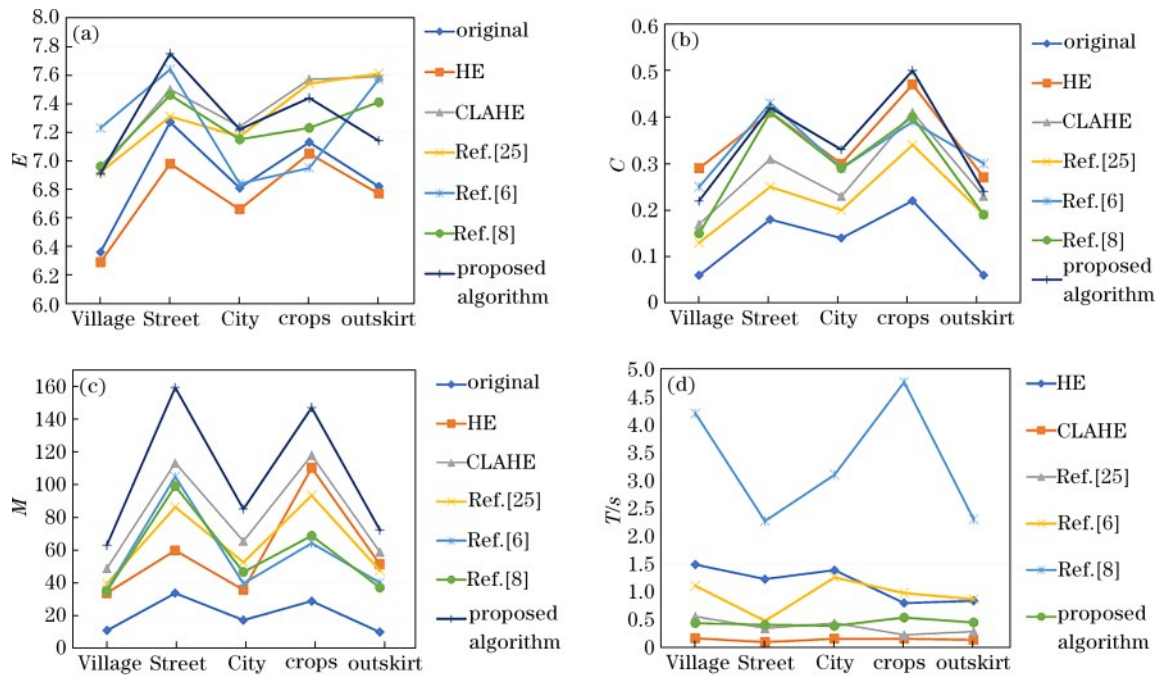


图 7 评价化展示。(a)信息熵;(b)局部对比度;(c)平均梯度;(d)运行时间

Fig. 7 Visual presentation of evaluation results. (a) Information entropy; (b) local contrast; (c) average gradient; (d) running time

均梯度,本文算法一直处于最优值,表明该算法在细节增强方面优于其他算法。结合表 4 数据分析可知,针对运行时间,相较于文献[8]去雾算法的运行时间来说,本文算法运行速度明显提高。在信息熵、局部对比度、平均梯度和运行时间的指标比较中,本文算法在整体上具有很强的优势,能有效达到雾天图像增强的目的。

## 5 结 论

针对对比度不强、噪声过大、细节模糊等有雾图像提出了一种自适应动态范围的 CLAHE 的雾天图像增强算法,测试结果表明,本文算法在图像对比度和细节增强方面有较好的效果,且不同的输入图像能够自动选择最佳的动态范围,从而达到图像增强的目的。此外,本文算法结合了同态滤波、多尺度细节增强算法,在增强对比度的同时提高了图像的细节,为雾天图像的处理提供了良好的方法。主观和客观结果证明了本文算法的优越性。

## 参 考 文 献

- [1] 韦春苗, 徐岩, 李媛. 基于小波变换的迭代融合去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 2010018.  
Wei C M, Xu Y, Li Y. Iterative fusion defogging algorithm based on wavelet transform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(20): 2010018.
- [2] 赵春丽, 董静薇, 徐博, 等. 融合直方图均衡化与同态滤波的雾天图像增强算法研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(6): 93-97.  
Zhao C L, Dong J W, Xu B, et al. Research on finger-image enhancement algorithm based on fusion histogram
- [3] 王道累, 张天宇. 图像去雾算法的综述及分析[J]. 图学学报, 2020, 41(6): 861-870.  
Wang D L, Zhang T Y. Review and analysis of image defogging algorithm[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(6): 861-870.
- [4] Zhu S, Guo E L, Gu J, et al. Imaging through unknown scattering media based on physics-informed learning[J]. Photonics Research, 2021, 9(5): B210-B219.
- [5] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [6] Salazar-Colores S, Moya-Sánchez E U, Ramos-Arreguín J M, et al. Fast single image defogging with robust sky detection[J]. IEEE Access, 2020, 8: 149176-149189.
- [7] Zhang H, Duan D Y. Computational ghost imaging with compressed sensing based on a convolutional neural network[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(10): 101101.
- [8] Cai B L, Xu X M, Jia K, et al. DehazeNet: an end-to-end system for single image haze removal[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(11): 5187-5198.
- [9] 王智奇, 李荣冰, 刘建业, 等. 基于同态滤波和直方图均衡化的图像增强算法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 75-80.  
Wang Z Q, Li R B, Liu J Y, et al. Image enhancement algorithm based on homomorphic filtering and histogram equalization[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(24): 75-80.
- [10] 阿卜杜如苏力·奥斯曼, 艾力米努·阿布力江. 小波变换和直方图均衡化的保持色调不变彩色图像增强算法[J]. 光电子·激光, 2021, 32(1): 14-18.

- Abudurusuli A, Ailiminuer A. Color image enhancement algorithm based on wavelet transform and histogram equalization[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2021, 32(1): 14-18.
- [11] 李竹林, 车雯雯, 钱梦杭, 等. 一种改进的直方图均衡化图像去雾算法[J]. *河南科学*, 2021, 39(1): 1-6.  
Li Z L, Che W W, Qian M H, et al. An improved image defogging algorithm based on histogram equalization[J]. *Henan Science*, 2021, 39(1): 1-6.
- [12] Kim J Y, Kim L S, Hwang S H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, 11(4): 475-484.
- [13] Kumbhar M M, Godbole B B, . Dehazing effects on image and video using AHE, CLAHE and dark channel prior[J]. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2020, 9(3): 119-125.
- [14] 黎秀玉, 宋树祥, 夏海英. 基于 CLAHE 和图像分解的去雾方法[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2016, 41(5): 1552-1559.  
Li X Y, Song S X, Xia H Y. Single image dehazing method based on CLAHE and image decomposition[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2016, 41(5): 1552-1559.
- [15] 杨骥, 杨亚东, 梅雪, 等. 基于改进的限制对比度自适应直方图的视频快速去雾算法[J]. *计算机工程与设计*, 2015, 36(1): 221-226.  
Yang J, Yang Y D, Mei X, et al. Fast video dehazing based on improved contrast limited adaptive histogram equalization[J]. *Computer Engineering and Design*, 2015, 36(1): 221-226.
- [16] 孙冬梅, 陆剑锋, 张善卿. 一种改进 CLAHE 算法在医学试纸条图像增强中的应用[J]. *中国生物医学工程学报*, 2016, 35(4): 502-506.  
Sun D M, Lu J F, Zhang S Q. The application of an improved CLAHE algorithm in image enhancement of medical test strip[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2016, 35(4): 502-506.
- [17] Li Y C, Zhang H. Modified clipped histogram equalization for contrast enhancement[C]//2012 13th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, December 14-16, 2012, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2012: 653-658.
- [18] 董静薇, 赵春丽, 海博. 融合同态滤波和小波变换的图像去雾算法研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2019, 24(1): 66-70.  
Dong J W, Zhao C L, Hai B. Research on image de-fog algorithm based on fusion homomorphic filtering and wavelet transform[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2019, 24(1): 66-70.
- [19] 杨亚绒, 李恒, 赵磊, 等. 改进的同态滤波与多尺度融合的水下图像增强[J]. *机械科学与技术*, 2022, 41(8): 1231-1239.  
Yang Y R, Li H, Zhao L, et al. Improved homomorphic filtering and multi-scale fusion of underwater image enhancement[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2022, 41(8): 1231-1239.
- [20] 刘陈瑶, 胡梦竹, 张龙飞. 基于改进 CLAHE 的 SF<sub>6</sub> 红外图像增强[J]. *光学技术*, 2021, 47(1): 107-112.  
Liu C Y, Hu M Z, Zhang L F. Infrared image enhancement of SF<sub>6</sub> based on improved CLAHE[J]. *Optical Technique*, 2021, 47(1): 107-112.
- [21] Camacho-Morales R, Rocco D, Xu L, et al. Infrared upconversion imaging in nonlinear metasurfaces[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(3): 036002.
- [22] 张发军, 彭文刚, 虞成俊, 等. 对比度受限下直方图均衡化处理的木板纹路图像增强算法[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(21): 8629-8636.  
Zhang F J, Peng W G, Yu C J, et al. Algorithm for image enhancement of wood texture based on contrast-limited adaptive histogram equalization[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(21): 8629-8636.
- [23] 贾俊平, 何晓群, 金勇进. 统计学[M]. 第 6 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2004: 153-174.  
Jia J P, He X Q, Jin Y J. *Statistics*[M]. 6th ed. Beijing: China Renmin University Press, 2004: 153-174.
- [24] 寇大磊, 钱敏, 权冀川, 等. 基于多尺度卷积网络的快速图像去雾算法[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(20): 191-198.  
Kou D L, Qian M, Quan J C, et al. Fast image dehazing algorithm based on multi-scale convolutional network[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(20): 191-198.
- [25] Lasrado J T, Sathish D. Enhancement of underwater images using homomorphic filtering and CLAHE technique [J]. *Journal of Innovation in Information Technology*, 2020, 4(1): 34-39.