

## 模糊域内基于 Retinex 的雾霾图像增强算法

贾 伟<sup>1</sup> 刘彦宾<sup>1</sup> 刘 炜<sup>1,2</sup> 葛耿育<sup>1</sup> 苏文丽<sup>1</sup> 樊里略<sup>1</sup>

(遵义师范学院计算机与信息科学学院 遵义 563002)<sup>1</sup>

(贵州大学计算机科学与技术学院 贵阳 563003)<sup>2</sup>

**摘 要** 现有 Retinex 图像增强算法在使用过程中往往会产生轻微的光晕现象,在图像清晰度、细节、保真性、适用范围等方面存在诸多不足,在模糊域内,提出的基于 Retinex 的雾霾图像增强算法可有效克服此类不足。首先利用自适应多阈值算法对图像进行分块,并确定分块区域的最佳渡越点;然后采用线性隶属度函数将图像像素值变换为模糊域,通过渡越点计算提出的模糊双曲正切函数的关联参数,对图像的各个分块区域应用 Retinex 算法进行非线性图像增强,同时对增强结果进行模糊双曲正切调整;最后采用线性加权和线性逆变换的方法恢复原图像。通过对大量图像的对比实验发现:传统处理方法产生的光晕现象得到了抑制,图像清晰度、细节、保真性以及对比度等处理效果改善明显,算法适用范围更广。

**关键词** 模糊域,雾霾图像增强,Retinex 算法,模糊双曲正切

**中图分类号** TP391

**文献标识码** A

### Foggy and Hazy Image Enhancement Algorithm Based on Retinex in Fuzzy Field

JIA Wei<sup>1</sup> LIU Yan-bin<sup>1</sup> LIU Wei<sup>1,2</sup> GE Geng-yu<sup>1</sup> SU Wen-li<sup>1</sup> FAN Li-lue<sup>1</sup>

(Department of Computer and Information Science, Zunyi Normal College, Zunyi 563002, China)<sup>1</sup>

(College of Computer Science & Technology, Guizhou University, Guiyang 563003, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The traditional Retinex algorithm always products “halo” effect in fog and haze image enhancement, and has several shortcomings, such as the poor image exposure, image sharpness, image details, image fidelity and so on. In order to overcome these shortcomings of the traditional algorithm, we proposed a foggy and hazy image enhancement algorithm based on Retinex in the fuzzy field. Firstly, the original image was classified into several blocks using the proposed adaptive multi-threshold algorithm, and then the optimal crossover points of the image blocking areas were computed. Secondly, we used a novel linear membership function to map the image pixel value into fuzzy domain, then computed the correlation parameter of the fuzzy hyperbolic tangent function by crossover points, used the Retinex algorithm to perform non-linear image enhancement, and used the fuzzy hyperbolic tangent functions to adjust the enhancement result. Finally, the method of superposition of the linear was used to map the enhancement result into original image domain. The experimental result shows that the “halo” effect is suppressed, the proposed method plays a better role in the image sharpness, image details and image fidelity, and it has more widely applicability.

**Keywords** Fuzzy field, Foggy and hazy image enhancement, Retinex algorithm, Fuzzy hyperbolic tangent function

随着工业的高速发展,机动车数量的爆炸式增长,雾霾天气出现更加频繁。在雾霾天气环境下,由于光照被大量分散在空气中的颗粒所散射,使得智能摄像系统获取的图像质量产生退化,造成图像对比度丢失,图像细节模糊,图像的视觉质量受到严重影响。很多智能算法无法实现对目标的准确识别与判断,给诸如空中无人机与卫星监控、机器人目标识别、遥感成像、智能监控、智能交通运输等相关领域带来极大的挑战<sup>[1-3]</sup>。

近年来,雾霾图像增强研究一直被认为是一项富有挑战性的工作,因而引起了国内外众多研究人员的兴趣,并成为机器人视觉与图像处理领域的热点研究问题之一。许多关于该

问题的解决方法被提出<sup>[4-6]</sup>,其中,传统的雾霾图像增强处理方法通常是将图像中感兴趣的特征量进行突出显示,而对不重要的信息进行衰减,这样处理的优点是不需要考虑图像局部降质的原因,也无需进行图像复原处理,但缺点是会导致图像信息的丢失。在该领域,Land 于 1986 年提出了基于邻域的 Retinex 理论<sup>[7]</sup>,该理论的图像处理思想是从图像中去除场景照度分量的影响,用反射分量来表述图像结果。DJ Jobson<sup>[8]</sup>等人对 Retinex 使用不同类型平滑函数的算法性能进行了评价,由此确定了高斯函数,提出单尺度 Retinex(SSR)算法。为了解决 SSR 算法存在的严重颜色失真问题,文献[9]提出了多尺度 Retinex(MSR)算法,该算法将多个尺度

本文受贵州省科技厅、遵义市科技局、遵义师范学院联合基金项目(黔科合 J 字 LKZS[2014]23 号,黔科合 J 字 LKZS[2014]08 号),遵义师范学院教学科研项目(13-08,13-06)资助。

贾 伟 (1985—),男,硕士,主要研究方向为机器人视觉、高速图像视频处理;刘彦宾 教授,主要研究方向为大数据与数字信号处理;刘 炜 硕士,讲师,主要研究方向为数字图像处理,E-mail:ncu1013@hotmail.com。

SSR 所得结果进行线性加权运算,从而减少了图像的颜色失真。MSR 算法通过高斯滤波估计入射分量,提高了图像增强效果,但该方法本质上属于基于灰度假设的颜色非线性变换,当图像局部区域颜色不符合该假设时,图像出现轻度颜色失真,特别在图像明暗过渡区域,采用卷积运算的过程中由于像素之间的关联性,使得处理后的图像出现光晕现象。Rahman DZ 等人<sup>[10]</sup>率先研究使用 Retinex 算法做雾霾图像增强,取得了不错的效果。为了提高 Retinex 算法的图像增强效果,张新龙等<sup>[11]</sup>提出了将自适应 Retinex 增强算法与 CLAHE 增强算法结合的雾霾图像增强算法,该算法在图像细节增强及色彩保持方面,具有较好的效果,但是也出现了轻微的光晕效应。李菊霞等<sup>[12]</sup>提出了雾霾条件下的 MSR 图像增强算法,该算法具有较高的运算效率,但仍然缺乏普遍的适用性。

Pal 和 King 等最先提出模糊图像增强理论,并将该理论用于理解、描述人类视觉的模糊及不确定特性,且进行了相关的研究<sup>[13-15]</sup>。本文受此启发,针对传统 Retinex 算法的不足,提出基于模糊域内的 Retinex 雾霾图像增强算法。首先利用自适应多阈值算法将图像分为不同的区域,然后采用线性隶属度函数将图像变换为模糊域,对分类的区域运用 Retinex 算法进行图像增强,通过提出的模糊双曲正切函数调整图像增强效果;最后通过线性加权并运用线性逆运算的方法复原图像。

## 1 基于 Retinex 的图像增强

Retinex 理论率先由 land 等提出,该理论将一幅图像看成是由照度分量和反射分量组成的,用公式表示为:

$$S(x, y) = R(x, y) \cdot L(x, y) \quad (1)$$

式中,  $S$  表示人眼接收的图像,  $R$  为入射光图像,  $L$  为目标的反射光图像。在计算过程中,通常将上式两边同时取对数转换为对数域,并对  $S$  进行高斯滤波,得到入射分量的照度估计  $I_{low}(x, y)$ , 即为:

$$I_{low}(x, y) = S(x, y) * F(x, y) \quad (2)$$

式中  $F(x, y)$  定义为

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi\delta^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\delta^2}\right) \quad (3)$$

增强变换后的反射分量可表示为

$$L'(x, y) = S(x, y) / I_{low}(x, y) \quad (4)$$

式(3)中,  $\delta$  表示高斯模板尺度参数,  $\delta$  的大小可以反映图像增强的效果。 $\delta$  取值较大, 则入射分量结果越平滑, 颜色保真效果越好, 但图像细节却较差; 反之, 在图像的细节得到增强的条件下, 颜色保真度变差。

改进的 SSR 算法(MSR)采用了线性加权的思想, 其实现形式为:

$$R(x, y) = \sum_{k=1}^K w_k \{ \log I_i(x, y) - \log [I_i(x, y) * F(x, y)] \} \quad (5)$$

式中,  $i=1, 2, 3, k$  表示参数  $\delta$  的个数,  $F(x, y)$  表示参数为  $\delta_i$  的高斯函数,  $I_i(x, y)$  表示  $i$  个颜色分量图像,  $w_k$  表示  $k$  个 SSR 的加权系数, 且  $\sum_{k=1}^K w_k = 1$ 。由于 MSR 算法仍然无法有效反映图像细节, 当参数过大时, 图像细节变得模糊, 为了克服参数  $\delta$  取值过大时, 图像细节较差的缺点, 本文提出了基于模糊双曲正切的图像细节增强算法。

## 2 基于双曲正切的模糊域图像细节增强

### 2.1 基于 OTSU 算子的图像多阈值分块

OTSU 算子的原理是利用方差作为判断依据, 利用最小二乘法计算类间方差最大的图像灰度值, 并以该值作为最佳阈值<sup>[16]</sup>。设一幅图像灰度级为  $m$ , 灰度值为  $x$ , 像素数为  $n$ , 图像中各个像素的概率为  $p_i$ , 其中前景像素点数定义为  $r_0 = \{1, 2, \dots, k\}$ , 背景点数定义为  $r_1 = \{k+1, k+2, \dots, m\}$ , 则前景与背景点数所占的均值分别可表示为  $u_0 = \sum_{i=1}^k i p_i / w_{r_0}$ ,  $u_1 = \sum_{i=k+1}^m i p_i / w_{r_1}$ ,  $w_{r_0}, w_{r_1}$  分别为前景与背景点数所占的概率, 于是类间方差为  $\delta(k)^2 = w_{r_0} (u_0 - u)^2 + (u_1 - u)^2 = w_{r_0} w_{r_1} (u_1 - u_0)^2$ , 则当阈值  $T$  满足  $\max \delta(k)^2$  时,  $T=k$ 。

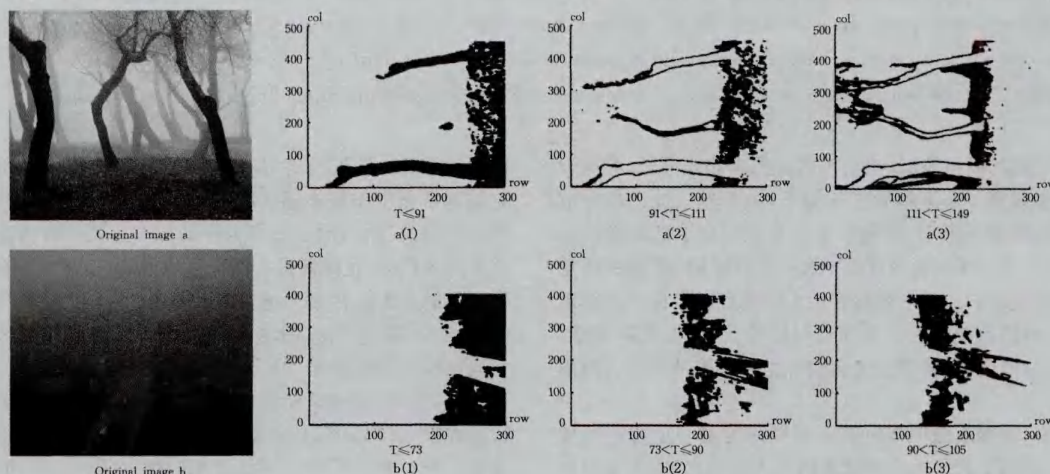


图1 基于多阈值分割的图像分块

本文选择 OTSU 算子进行图像分块的依据为:(1)OTSU 对环境变化具有较强的自适应能力,特别适用于前景与背景区分较明显的场景;(2)对光照以及对对比度变化具有自适应性;(3)OTSU 算子是一种自适应阈值算法,适应于各类图像

分类,得到了普遍的应用,且计算效率较高。传统的阈值 OTSU 方法均是在统计直方图的两个波峰之间确定最佳阈值,然而复杂图像的直方图往往呈现多峰值的特点。为了解决单阈值方法在图像分类时出现的误分块的问题,本文基于文献

[17]的直方图区间划分思想,提出了基于 OTSU 的图像自适应多阈值分块方法,其具体实现过程为:

(1)为了使雾霾图像中前景与背景显示较为明显,提高算法的执行效率,对图像直方图进行一次均值滤波,得到较为平滑的直方图。

(2)循环两次在平滑后的直方图中找出满足条件的峰值集合,即  $Q_0 = \{hl, h(l) \geq h(l-1) \& hl \geq h(l+1)\} \& \delta \geq 2$ , 其中  $h(l)$  为直方图原始值,灰度级  $L=255$ ,其中  $\delta$  表示峰值个数,循环两次保留较明显的峰值<sup>[18]</sup>。

(3)删除大小相近的峰值,若两个峰值所对应的图像的灰度差值距离小于  $\delta(\delta=15)$ ,则从  $Q_0$  中去除小的峰值<sup>[18]</sup>。

(4)将最后剩下的峰值进行直方图区间划分,若剩下的峰值用  $h_0, h_1, h_2, \dots, h_m$  表示,则区间可以划分为  $[0, h_0)$ ,  $[h_0, h_1), \dots, [h_m, L)$ 。

(5)在划分好的区间上应用 OSTU 求取图像分块阈值。

图 1 所示为应用多阈值算法对前景图像分块的结果。

## 2.2 渡越点的选择

在模糊图像增强理论中,渡越点通常指图像中背景区域与前景区域的分界点,设经 2.1 小节中图像分块运算后的图像  $x_{ij}$  领域中的前景像素和背景像素分别表示为  $x_i, x_j$ ,其数目分别为  $n_1, n_2 (n_1 + n_2 = n)$ ,

令

$$s_{c1} = \sum_{i=1}^{n_1} x_i, s_{c2} = \sum_{j=1}^{n_2} x_j \quad (6)$$

若设  $n_1, n_2$  总大于 0,于是  $n_1, n_2$  对应像素的均值可表示为:

$$AV_{c1} = \frac{s_{c1}}{n_1}, AV_{c2} = \frac{s_{c2}}{n_2} \quad (7)$$

若  $AV_c$  表示  $AV_{c1}$  与  $AV_{c2}$  的平均值,则有

$$AV_c = \frac{AV_{c1} + AV_{c2}}{2} \quad (8)$$

于是本文中渡越点可表示为

$$x_c = \frac{AV_{c1}}{AV_c} \quad (9)$$

雾霾图像中背景区域通常不够清晰,图像细节也较模糊,然而图像背景区域往往包含了丰富的信息,因此,为了反映背景区域的更多的细节信息,本文渡越点选择方法考虑了图像中背景像素点分布情况,这样使得原来图像中比较清晰的区域得到保持,同时图像中信息不确定区域也得到了增强。

## 2.3 模糊双曲正切的图像增强算法

模糊双曲正切理论主要用于智能模糊控制领域,在智能控制、模式识别领域具有广泛的适用价值<sup>[19,20]</sup>。在高等数学中,双曲正切函数定义为

$$g(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, x \in (-\infty, +\infty), g(x) \in (-1, 1) \quad (10)$$

对上式沿 y 轴平移变换得

$$g(x) = \frac{1}{2} \left( \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} + 1 \right) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}}, x \in (-\infty, +\infty),$$

$$g(x) \in (0, 1) \quad (11)$$

本文定义模糊双曲变换函数为

$$G(x) = \frac{e^{\alpha x - \beta}}{e^{\alpha x - \beta} + e^{-\alpha x + \beta}}, x \in (-\infty, +\infty), G(x) \in (0, 1) \quad (12)$$

其中,  $\alpha, \beta$  为模糊因子且  $\alpha > 0, \beta > 0$ ,由函数性质可知该函数连续且可导,且函数的二阶导数存在拐点。于是

$$G(x)' = \frac{2\alpha}{(e^{\alpha x - \beta} + e^{-\alpha x + \beta})^2} > 0 \quad (13)$$

故该函数在定义域内为增函数。

定义 1<sup>[21]</sup> 假设  $C$  表示模糊域内图像局部区域对比系

数,且  $C = \frac{x(i,j)_{\max}}{x(i,j)_{\min}}$ ,其中  $x(i,j)_{\max}, x(i,j)_{\min}$  为模糊域图像局部区域灰度最大值(图 2 中 c 点值)和最小值(图 2 中 a 点值),令线性变换函数为  $F(x)$ 。则

$$x(i,j)_{\max} = F(c), x(i,j)_{\min} = F(a) \quad (14)$$

经  $G(x)$  变换后,则有

$$x(i,j)'_{\max} = G(c), x(i,j)'_{\min} = G(a) \quad (15)$$

则

$$C_{\text{before}} = \frac{F(c)}{F(a)}, C_{\text{after}} = \frac{G(c)}{G(a)} \quad (16)$$

由图 2 可知

$$C_{\text{before}} < C_{\text{after}} \quad (17)$$

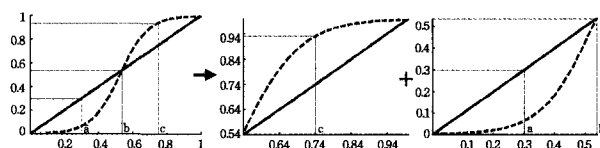


图 2 本文模糊双曲正切函数曲线

由此可知,本文模糊双曲变换可以将图像对比度进行非线性扩展,使得距中心点的值远的灰度变化大,而中心区域变化小,从而使得图像灰度值低的区域得到有效增强。在模糊域内,该变换幅度与原像素域线性变换相比,图像像素在拉伸变换过程中,减少了由于原图像像素值维数过高而造成的图像的扭曲、信息丢失,因此更多地保留了图像细节信息。

对式(13)求得

$$G(x)'' = \left( \frac{2\alpha}{(e^{\alpha x - \beta} + e^{-\alpha x + \beta})^2} \right)'$$

$$= \frac{-4\alpha^2 (e^{\alpha x - \beta} + e^{-\alpha x + \beta}) (e^{\alpha x - \beta} - e^{-\alpha x + \beta})}{(e^{\alpha x - \beta} + e^{-\alpha x + \beta})^4}$$

$$= \frac{4\alpha^2 (e^{-\alpha x + \beta} - e^{\alpha x - \beta})}{(e^{\alpha x - \beta} + e^{-\alpha x + \beta})^3} \quad (18)$$

令  $G(x)'' = 0$  得拐点

$$x_d = \frac{\beta}{\alpha} \quad (19)$$

式中,参数  $\alpha$  控制  $G(x)$  的曲线变化情况,为了使  $G(x)$  更接近  $(0, 1)$  的变化范围,根据双曲正切函数与反正切函数性质相似的特点,取  $\beta = \pi$ 。根据拐点的定义及函数  $G(x)$  的凹凸性,此时取拐点为渡越点效果最佳,即

$$x_c = x_d = \frac{\pi}{\alpha} \quad (20)$$

当  $\beta = \pi$  时,图 2 所示为不同的  $\alpha$  值所对应的函数  $G_1(x), G_2(x)$  与渡越点之间的关系。

图 3 所示为本文模糊双曲正切函数与渡越点的变化关系。在图 3 所示的渡越点附近,图像像素以渡越点为中心参考点对称地向两侧拉开。本文在多阈值图像分块中,根据不同的阈值,将图像分为多块。采用不同阈值分割后,由于图像前景与背景像素的比值不同,渡越点的值随着图像中背景与前景像素比例的不同而变化,同时,式(20)表明,当  $\alpha$  取值愈小,则表明图像增强偏向于前景区域,反之则偏向于背景区域,通过调节图像像素的变换优化了算法的自适应性。

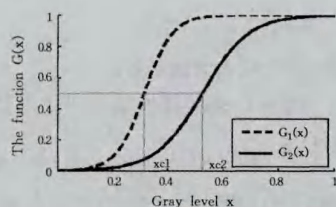


图3 模糊双曲正切函数与渡越点关系

### 3 本文算法实现

本文提出了模糊域内的雾霾天气图像增强算法,并实现了基于模糊域内图像的单尺度 Retinex 增强和多尺度 Retinex 增强,算法基本流程如图4所示。

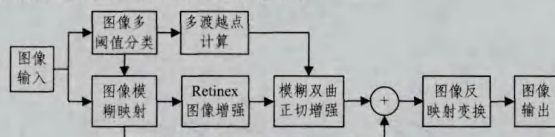


图4 本文算法流程图

算法的具体实现步骤如下:

步骤1 利用线性隶属度函数将原图像映射为模糊域,本文中提出的映射函数为:

$$R_{i,j}(x) = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} + x_{\min} + \eta} \quad (21)$$

式中,  $\eta$  表示图像像素补偿因子,本文补偿因子为  $\eta = 1 \times 10^{-4}$ ,  $x_{\min}$  为  $3 \times 3$  图像区域内 RGB 各分量的最小值,  $x_{ij}$  表示原图像中 RGB 分量的值。

步骤2 对图像进行多阈值分类,本文处理彩色图像时,分别对图像 RGB 分量进行多阈值分类,并选择  $3 \times 3$  的窗口计算渡越点  $x_c$  与双曲正切变换的参数  $a$ 。

步骤3 对模糊域内的图像进行 Retinex 图像增强。

步骤4 根据图像的分类情况,对步骤3进行模糊双曲增强。

步骤5 将步骤4的结果与原始模糊图像进行加权运算。具体方法为:

设  $S(i, j)$  表示模糊域原始图像,  $S_n(i, j)$  表示步骤4增强后的图像,最终图像表示为  $S'(i, j)$ , 其中  $n$  表示原图像分块数,则本文加权运算可表示为:

$$S'(i, j) = \begin{cases} S(i, j) + S_1(i, j), & n=1 \\ S(i, j) + \sum_{k=1}^n \frac{1}{n} L_k(i, j), & n>1 \end{cases} \quad (22)$$

步骤6 最后对将原图像由模糊域进行反映射变换,即:

$$X_{ij} = (x_{\max} + x_{\min}) S'(i, j) + x_{\min} \quad (23)$$

### 4 实验分析

为了测试本文算法的有效性,我们收集了近年来经典学术作品中涉及到的雾霾图像,以及来源于 Google、百度、搜狗等各大搜索引擎的雾霾、黑天、沙尘暴等降质图像。实验图像库共有 2000 幅不同大小的各类图像组成。实验分别使用 SSR、MSR 算法、文献[11,12]算法与本文提出的算法进行比较。在计算机(配置 CPU: Pentium 2.2GHz, 内存 2GB)上采用本文提出的基于模糊域的 SSR 算法(Fuzzy Single Scale Retinex, FSSR)处理  $600 \times 400$  大小的图像所需的时间大约为 2~4s, 基于模糊域的 MSR 算法(Fuzzy multi-scale Retinex, FMSR)的运行时间约为 3~9s。

图5所示为亮度较暗雾霾图像的处理效果对比。从实验结果可知,文献[12]算法尽管在运行效率方面有了大的提高,但图5(b1)中出现了局部轻微曝光的现象,同时,所得图像总体视觉性较差(见图5(a1)、图5(c1));使用 SSR 算法的执行结果存在颜色失真现象,视觉保真度也欠佳(见图5(a2)、图5(b2)、图5(c2));MSR 算法使得图像亮度提高,但图5(b3)出现了局部曝光现象;采用 FSSR 算法使得图像清晰度提高,但图5(b4)中出现了颜色失真,采用加权的 FMSR 算法处理后,解决了颜色失真问题,图像整体效果变好,图像保真性得到了提高。另外,从图5(c)黑暗、重雾霾图像的处理结果来看,本文算法处理的结果也较理想,天空部分云彩对比度也比较明显,地面楼房的色彩更接近原图,整体保真性较好,图像增强效果较其它算法优越。

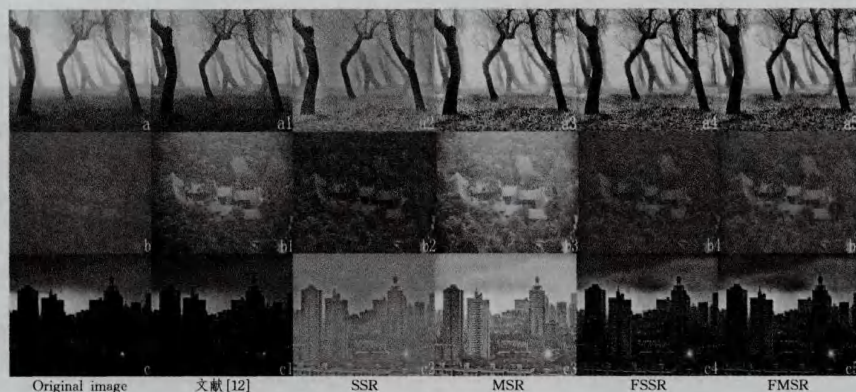


图5 亮度较暗雾霾图像处理效果(图a局部较亮,图b雾霾较浓,图中图像大小:图a为  $450 \times 300$ 、图b为  $600 \times 323$ 、图c为  $600 \times 392$ )

图6采用多种颜色的雾霾图像测试本文算法的有效性。由图可知,本文算法的执行效果较佳,跟原图像相比,实验结果图像整体在色饱和度、保真性以及对比度方面更接近原图像。而在文献[12]的运行结果中,图6(e1)中目标颜色过饱和,跟原始图像有较大的差别;SSR 算法存在颜色失真现象,MSR 运行效果虽然优于前两种方法,但跟原始图像色彩相比,亦出现较大程度的异同(见图6(d3)、图6(e3)、图6(f3))。

图7所示为天空、光照条件下的实验效果对比。其中,采用文献[12]方法所得实验结果中,图7(g1)失去了原来图像的天空效果,图像颜色变化较大,图7(h1)中天空部分过亮,而图7(i1)、图7(j1)、图7(k1)亮度却较暗,视觉效果不理想;SSR 算法执行结果中图像颜色出现“灰化”现象,从而影响了图像的整体质量;在 MSR 算法执行结果中,图7(g3)出现了颜色失真,图7(i3)出现了一层薄雾,图7(j3)整体过度曝光,

且天空部分出现了光晕现象,图 7(k3)色彩效果跟原图像差别很大。本文算法实验结果中,采用 FSSR 方法的运行结果在亮度方面稍优于 FMSR,天空部分的增强处理效果更加符

合人眼的视觉习惯,但两种方法均保持了原图像的细节,表明模糊域内的双曲变换使得图像保持了更多的细节,图像的对比度也有了一定程度的提高,图像变得更加清晰。

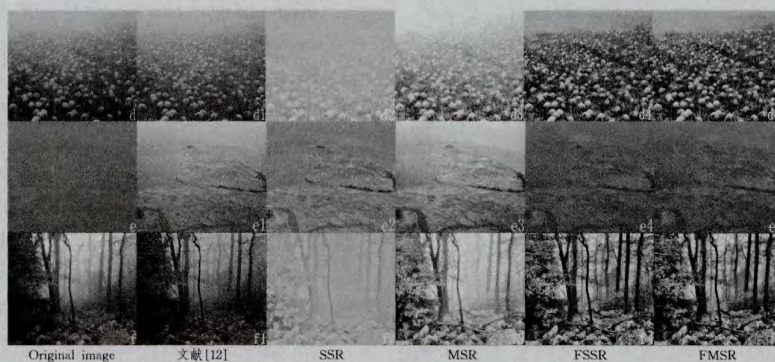


图 6 色彩丰富雾霾图像处理效果(图像大小:图 d 为  $400 \times 266$ 、图 e 为  $500 \times 325$ 、图 f 为  $500 \times 366$ )



图 7 天空、光照雾霾图像处理效果(图 g 为沙尘暴图像,图 h、图 j 为浓雾图像,图 i、图 k 为薄雾图像。原图像大小:图 g 为  $600 \times 450$ 、图 h 为  $400 \times 299$ 、图 i 为  $448 \times 336$ 、图 j 为  $499 \times 309$ 、图 k 为  $225 \times 300$ )

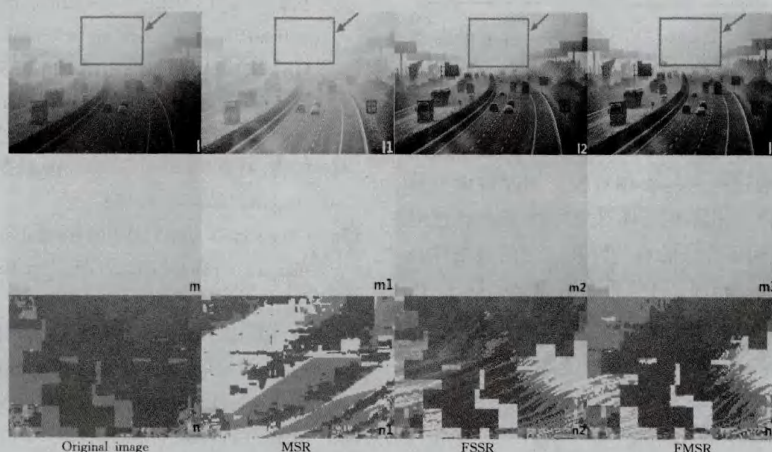


图 8 天空雾霾图像处理效果(图 l 为原始图像,图 m、图 m1、图 m2、图 m3 分别为图 l、图 l1、图 l2、图 l3 中线框部分的处理效果,图 n、图 n1、图 n2、图 n3 分别为图 m、图 m1、图 m2、图 m3 色饱和度值扩大 100 倍、亮度值缩小 30 倍后的结果)

图 8 所示为天空雾霾图像处理效果,从图 8(m)、图 8(m1)、图 8(m2)、图 8(m3)可知,MSR 算法处理结果中出现了明暗变化的“光晕”现象。为了使得现象更加明显,实验将图

8(m)、图 8(m1)、图 8(m2)、图 8(m3)的色饱和度值同时扩大 100 倍,亮度值缩小 30 倍,结果分别如图 8(n)、图 8(n1)、图 8(n2)、图 8(n3)所示。由此可见,FSSR 与 FMSR 运行效果最

好,其颜色分布特征更加接近原始图像,无“光晕”现象产生,而 MSR 算法的执行结果与原始图像差别较大,且分布呈“圈”状,“光晕”现象较明显。

表 1 分别从图像的颜色相似度、平均梯度、信息熵等参数对实验结果进行客观评价。其中颜色相似度反映了增强图像与原图像的图像相似程度<sup>[22]</sup>,平均梯度反映了图像的清晰度,而信息熵用来评价图像的细节表现能力。从表 1 可知,对于图 5(b)、图 7(k),FMSR 方法效果最好,颜色相似度均更加接近原图像,但平均梯度与信息熵较 FSSR 方法小,表明 FSSR 算法在清晰度方面表现更好,细节表现力更强,这跟人的主观判断完全吻合;图 6(d)、图 7(g)中 FSSR 信息熵值大于 FMSR,图像的平均梯度均小于 FMSR,但两者颜色相似度差别明显,考虑到颜色的吻合程度,FMSR 方法总体效果优于 FSSR。

表 1 实验结果的客观评价

| Image ID | Method | 颜色相似度 <sup>[22]</sup> | 平均梯度   | 信息熵         |
|----------|--------|-----------------------|--------|-------------|
| b        | 文献[12] | 0.61350               | 8.2903 | 0.0014690   |
|          | 文献[11] | 0.76543               | 14.774 | 0.037651    |
|          | SSR    | 4.1583e-010           | 8.0479 | 3.3307e-016 |
|          | MSR    | 1.2751                | 15.070 | 0.0056803   |
|          | FSSR   | 0.66112               | 16.373 | 0.014728    |
|          | FMSR   | 2.3121                | 16.343 | 0.013709    |
| d        | 文献[12] | 4.1072e-009           | 8.8799 | 0.014122    |
|          | 文献[11] | 2.0812e-006           | 3.5678 | 0.096571    |
|          | SSR    | 2.0859e-006           | 4.4839 | 1.7051e-004 |
|          | MSR    | 1.7176e-005           | 12.991 | 0.026635    |
|          | FSSR   | 0.36148               | 18.754 | 0.10478     |
|          | FMSR   | 0.79106               | 18.800 | 0.10471     |
| g        | 文献[12] | 0.017355              | 3.8237 | 1.3693e-004 |
|          | 文献[11] | 0.31630               | 7.4182 | 1.3693e-004 |
|          | SSR    | 3.6497e-029           | 3.5376 | 1.3693e-004 |
|          | MSR    | 1.9049e-012           | 8.4512 | 0.013508    |
|          | FSSR   | 0.39900               | 8.4965 | 0.020276    |
|          | FMSR   | 5.9778                | 8.5215 | 0.019375    |
| k        | 文献[12] | 0.0074429             | 9.4879 | 0.0075250   |
|          | 文献[11] | 6.6433                | 18.324 | 0.054311    |
|          | SSR    | 2.8006e-005           | 6.7692 | 3.3307e-016 |
|          | MSR    | 8.5316                | 16.078 | 0.018346    |
|          | FSSR   | 11.856                | 20.365 | 0.085887    |
|          | FMSR   | 16.959                | 20.305 | 0.085193    |

**结束语** 本文提出了一种模糊域内基于 Retinex 的雾霾图像增强算法,算法首先对原始图像进行分类,并确定分类区域的最佳渡越点,由于图像被分为多类,因此可求得多个渡越点;然后进行线性模糊变换,使用 Retinex 对图像的各个分类区域进行图像增强,并通过提出的模糊双曲正切函数调整分类区域的图像像素;最后采用线性变换恢复原图像。通过对大量图像的对比实验证明了算法的有效性和广泛的适用性。

本文算法由于使用了 OTSU 的自适应图像分类算法,因此对环境具有较强的自适应能力,同时非线性变换也使得图像清晰度、细节、保真性以及对比度等处理效果改善明显;但可能使得图像出现区域畸变,如本文算法对极少数图像会产生细节区域轻度过增强现象,以及对色彩显明的图像容易出现细节区域颜色过饱和。为此,我们将在此基础上开展进一步的研究。

## 参 考 文 献

[1] Koschmieder H. Theorie der horizontalen sichtweite[J]. Beitr. Phys. Freien Atm., 1924, 12: 171-181

[2] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254

[3] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization[C]// Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001 (CVPR 2001). IEEE, 2001

[4] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353

[5] Lan X, Zhang L, Shen H, et al. Single image haze removal considering sensor blur and noise[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013, 2013(1): 1-13

[6] Serikawa S, Lu H. Underwater image dehazing using joint trilateral filter[J]. Computers & Electrical Engineering, 2014, 40(1): 41-50

[7] Land E H, McCann J. Lightness and Retinex theory[J]. JOSA, 1971, 61(1): 1-11

[8] Jobson D J, Rahman Z U, Woodell G A. Properties and performance of center/surround Retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462

[9] Rahman Z U, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale Retinex for color image enhancement[C]// Proceedings. International Conference on Image Processing, 1996. IEEE, 1996, 3: 1003-1006

[10] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A, et al. Image enhancement, image quality, and noise[C]// International Society for Optics and Photonics Optics & Photonics 2005, 2005

[11] 张新龙, 汪荣贵, 张璇, 等. 雾天图像增强计算模型及算法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(8): 1359-1368

[12] 李菊霞, 余雪丽. 雾天条件下的多尺度 Retinex 图像增强算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(3): 299-301

[13] Pal S K, King R A. Image enhancement using fuzzy set[J]. Electronics letters, 1980, 16(10): 376-378

[14] Pal S K, King R A. On edge detection of X-ray images using fuzzy sets[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983(1): 69-77

[15] Pal S K, King R A. Image enhancement using smoothing with fuzzy sets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 1981, 11(7): 494-501

[16] Otsu N. A threshold selection method from gray level histogram[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66

[17] 刘艳, 赵英良. Otsu 多阈值快速求解算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(12): 3363-3365

[18] Cheng H D, Sun Y. A hierarchical approach to color image segmentation using homogeneity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(12): 2071-2082

[19] Zhang H, Wang Z, Liu D. Chaotifying fuzzy hyperbolic model using adaptive inverse optimal control approach[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2004, 14(10): 3505-3517

[20] Wang Y, Zhang H. Robust  $H_{\infty}$  Control of Stochastic Hyperbolic Tangent Model [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2008, 29(1): 2

[21] 门绍雄, 谭冠荣. 图象的双曲正切函数变换[J]. 仪器仪表学报, 1984, 3: 104-108

[22] 薛向阳, 罗航哉. 一种新的颜色相似度定义及其计算方法[J]. 计算机学报, 1999, 22(9): 918-922