

# 基于多尺度几何分析的雾天图像清晰化算法

郭瑞, 党建武, 沈瑜\*, 刘成

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

**摘要** 提出了一种基于非下采样 Contourlet 变换(NSCT)的雾天图像清晰化算法,将雾天图像映射到 HIS 彩色空间,对亮度分量  $H$ 、饱和度分量  $S$  分别处理。采用 NSCT 处理亮度分量  $H$ ,对含有大多数能量的低频分量取反,再进行改进的单尺度 Retinex 算法处理,将再次取反后的图像与直接进行改进的单尺度 Retinex 算法处理的低频分量线性叠加;采用一种快速双边滤波器对包含图像大多数线性细节的高频分量进行处理;对处理后的高低频分量进行 NSCT 逆变换,得到处理后的亮度分量。对饱和度分量  $S$  进行颜色拉伸,实现颜色补偿;将处理后的各分量图像反向映射到 RGB 颜色空间,得到清晰化后的雾天图像。实验结果表明,该算法可以获得较好的浓雾图像细节及颜色保真度,与其他算法相比,图像的标准差、信息熵、峰值信噪比都有所提高。

**关键词** 图像处理; 单尺度 Retinex; 非下采样 Contourlet 变换; HIS 彩色空间; 双边滤波器

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.111009

## Foggy Image Sharpening Algorithm Based on Multi-Scale Geometric Analysis

Guo Rui, Dang Jianwu, Shen Yu\*, Liu Cheng

School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

**Abstract** A foggy image sharpening algorithm based on nonsubsampling Contourlet transformation (NSCT) is proposed. The foggy image is mapped to the HIS color space, and the luminance component  $H$  and the saturation component  $S$  are processed respectively. The NSCT is used to process the luminance component  $H$ . The low-frequency component containing most energy is negated and then processed by the improved single-scale Retinex algorithm. The image is negated again and is superposed linearly with the low-frequency components processed by the improved single-scale Retinex algorithm directly. A fast bilateral-filter is applied to the high-frequency components that contain most of the linear details of the image. Then the two processed components are inversely transformed by NSCT, and the processed luminance components are obtained. Finally, the saturation component  $S$  is linearly stretched to achieve color compensation. The processed image of each component is mapped backward to the RGB color space to get a clear foggy image. The experimental results show that the proposed algorithm achieves good results of the details and color fidelity for the foggy image. Compared with other algorithms, the standard deviation, information entropy and peak signal to noise ratio are improved.

**Key words** image processing; single-scale Retinex; nonsubsampling Contourlet transformation; HIS color space; bilateral filter

**OCIS codes** 100.2000; 100.2980

## 1 引言

在雾天条件下,成像设备采集到的图像对比度

较低,图像中的细节信息也会因为悬浮在大气中的微粒遮挡而变得模糊,使观察者无法从图像中获取有用信息<sup>[1]</sup>。图像质量下降的主要原因是悬浮在大

收稿日期: 2018-04-26; 修回日期: 2018-05-26; 录用日期: 2018-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(61562057,61663021,61761027,51669010)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT\_16R36)、甘肃省教育厅科技计划(2017D-08)、甘肃省自然科学基金(17JR5RA101)、甘肃省“十三五”教育科学规划课题(GS[2016]GHB0217)、甘肃省创新创业教育改革项目(2017-44)

\* E-mail: 912064869@qq.com

气中的微粒使物体的反射光线产生一定的散射,从而减弱物体的反射光线,与此同时环境光的散射也会混杂在成像的光线当中。所以想要改善图像质量并从中获取更多有价值的信息,就要使用一定的去雾技术,使雾天图像清晰化。

目前雾天图像清晰化的处理方法主要分为基于物理模型和基于图像增强两种。基于物理模型的方法通过研究悬浮在空气中的微粒对光的散射来建立大气散射模型<sup>[2]</sup>,从而反演出清晰的图像。这类算法大多复杂度较高,需要的条件较为苛刻。目前基于物理模型的去雾方法主要有暗通道先验<sup>[3]</sup>和边界约束还原图像<sup>[4]</sup>等。基于图像增强的去雾方法是使用图像增强技术使空气中的杂质对图像的影响降到最低。它的优势在于可以对某些经典的、成熟的图像增强算法<sup>[5]</sup>进行针对性的改进。目前国内基于图像增强的去雾方法主要有四种:第一种为芮义斌等<sup>[6-7]</sup>提出的改进的 Retinex 去雾算法,并提出正态截取拉伸方法对薄雾图像有较好的处理效果;第二种是区域分割方法<sup>[8]</sup>,应用最佳正态近似分布来分割不同分布特征的天空区域,对不同深度模块进行移动模板分割,最后对模板区域进行块重叠直方图均衡化处理,实验结果证明该算法对雾天图像增强有较好的效果,不足之处是容易出现块状效应;第三种为基于小波分析<sup>[9-11]</sup>的去雾方法,Kawasaki 等<sup>[10]</sup>将雾天图像经小波分解后,对高低频分量分别处理,并对原图进行部分高斯滤波处理,通过引入新的增益/偏移操作自动导出熵值较高的输出图像,此方法极大地提高了计算速率;第四种是王萍等<sup>[12]</sup>提出的对比度增强算法,通过插值自适应直方图均衡化来实现,该算法有效地降低了算法运算量,消除了 POSHE 算法块效应。上述去雾方法虽然取得了一定的进展,但是对雾天浓度不均匀的图像处理仍然存在不足。

本文针对雾天浓度不均匀的图像,提出基于多尺度几何分析的雾天图像清晰化算法。首先将浓度不均匀的图像进行彩色空间转换,在 HIS 彩色空间中保持色调分量不变,对其他两分量分别处理;对亮度分量采用非下采样 Contourlet 变换(NSCT),对高低频分量分别处理;对饱和度分量采用颜色拉伸来提高色彩保真度。最后,将处理后的各个分量反向映射至 RGB 彩色空间,得到清晰化后的图像。

## 2 研究算法

雾天空气中的悬浮颗粒对景物有褪色效果,经

图像采集设备捕获到的雾天图像通常整体偏灰色<sup>[13]</sup>。为了弥补这一缺陷并增强图像细节信息,将图像由 RGB 空间映射至 HIS 空间,对亮度分量  $I$  和饱和度分量  $S$  分别进行处理。NSCT 具有多方向性、多尺度性和平移不变性,对捕获图像的几何特征有明显的优势。将经过彩色空间转换的雾天图像的亮度分量进行 NSCT 处理,对高低频分量分别处理,不仅可以实现图像的细节增强,还能避免过增强现象的产生<sup>[14]</sup>;再对饱和度分量进行拉伸,以达到保持图像色彩一致性的目的。

### 2.1 算法流程

- 1) 将雾天浓度不均匀的图像转换至 HIS 彩色空间,分别得到亮度分量  $I$ , 饱和度分量  $S$ , 色调分量  $H$ ;
- 2) 对亮度分量  $I$  进行 NSCT, 分解为高低频分量  $I_H$  和  $I_L$ ;
- 3) 采用双边滤波器滤除高频分量  $I_H$  噪声, 得到去噪后的边缘信息  $I_{HC}$ ;
- 4) 对低频分量  $I_L$  取反, 利用改进的单尺度 Retinex 算法进行处理后再取反得到  $I_{LN}$ ;
- 5) 将  $I_{LN}$  与直接进行单尺度 Retinex 算法处理的  $I_{LS}$  线性叠加, 得到处理后的低频信息  $I_{LC}$ ;
- 6) 将处理后的高低频分量进行反向 NSCT, 得到处理后的亮度分量  $I_C$ ;
- 7) 对饱和度分量  $S$  进行拉伸, 得到处理后的饱和度分量  $S_S$ ;
- 8) 将处理后的各个分量反向映射到 RGB 空间, 得到清晰化后的雾天图像  $F_C$ 。

算法流程如图 1 所示。

### 2.2 NSCT

NSCT 具有多尺度特性, 对捕获图像边缘奇异点有较好的效果, 由非下采样金字塔(NSP)和非下采样方向滤波器组(NSDFB)构成, NSP 确保其多尺度性、NSDFB 满足多方向性。分解图像时, 为了得到各尺度、各方向的子带图像, 先对图像进行 NSP 多尺度分解, 再使用 NSDFB 对得到的各个尺度的子带图像进行多方向分解。图 2 为 NSCT 实现过程。

相对于 Contourlet 变换, NSCT 采用 NSDFB, 在分解和重构过程中不存在上、下采样, 因而具有较好的多方向性、多尺度性和平移不变性<sup>[15]</sup>。拉普拉斯金字塔将图像分解为低频和高频分量, 高频分量经方向滤波器组被分解为频率子带, 逐个将奇异点连接成线结构, 实现多方向的分解; 同时低频分量继续被分解为低频和高频部分, 实现更精细的轮廓划

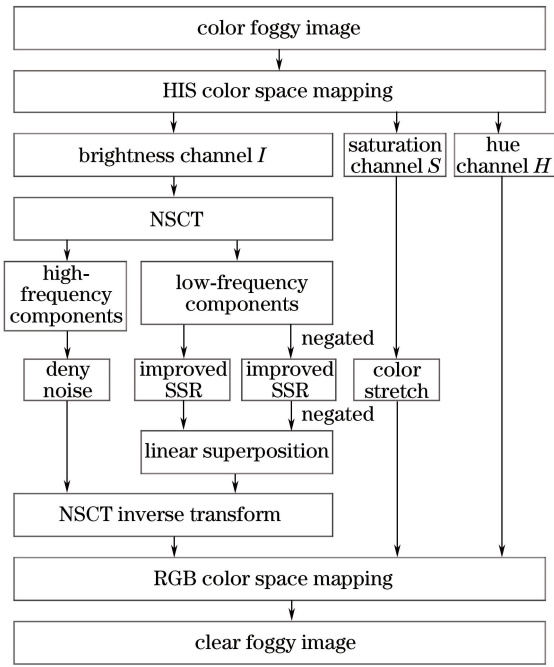


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

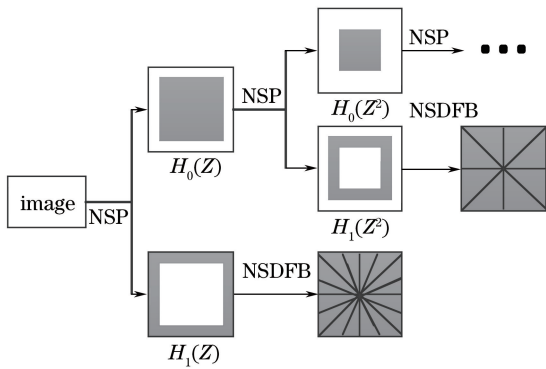


图 2 非下采样滤波器模型

Fig. 2 Non-subsampling filter model

分。NSP 的优点在于其一般性和通用性，并且能取得更好的滤波结果。

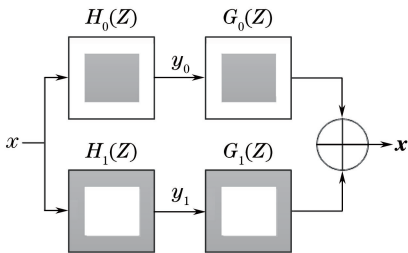


图 3 非下采样塔式分解与重构图

Fig. 3 Diagram of nonsubsamped pyramid decomposition and reconstruction

非下采样塔式滤波器组由低通分解滤波器模块  $H_0(Z)$  和高通分解滤波器模块  $H_1(Z) = 1 -$

$H_0(Z)$ ，以及相关的低通合成滤波器模块和高通合成滤波器模块  $G_1(Z) = G_0(Z) = 1$  构成。双通道非采样滤波器采用基于  $\hat{a}$ trous 算法的一维非下采样小波变换设计，它的平移不变性是由于其本身不存在下采样处理，有效地防止了重新构建图像中可能出现的伪吉布斯现象。图 3 为双通道 NSP 的分解与重构结构图。对第一层滤波器进行上采样操作，就可以得到随后一层的滤波器。下一级分解时，对滤波器进行上二采样，采样矩阵为  $D = (2 \ 0 \ 0 \ 2)$ ，对前一层分解到的低频分量进行相同的迭代分解，从而实现多尺度分解。方向滤波器组使用标准的扇形滤波器将图像中的水平及垂直分量分离，然后用上采样构成的上级滤波器进行分解。用最终形成的树状滤波器对二维频域子带进行方向分解。图 4 为双通道非采样滤波器组的分解与重构结构图。

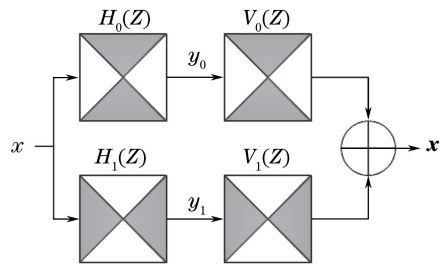


图 4 双通道非采样扇形滤波器组结构图

Fig. 4 Structure diagram of dual-channel nonsubsamped fan filter banks

### 3 亮度通道的清晰化处理

图像经 NSCT 分解后，图像的整体特征和轮廓由低频系数体现。目前常用来选择低频子带系数的方法有偏袒法和平均法<sup>[16]</sup>，二者对图像中的噪声有较好的阻抑作用，但是会使图像色彩对比度下降。基于此，提出一种基于单尺度 Retinex 的增强方法处理图像低频分量，使处理后的图像保持色彩一致性并且保留有效信息。

#### 3.1 低频分量增强

##### 3.1.1 单尺度 Retinex 理论

传统的 Retinex 理论以照明-反射模型为基础<sup>[17]</sup>，认为观察者所看到的事物色彩主要取决于事物本身对光线的反射能力，而与光线的反射强度无关，认为事物的颜色具有一致性，与光照的非均匀性无关。基于这两点，可将图像成像过程表示为

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

式中： $I(x, y)$  表示图像采集设备所收集到的图像； $L(x, y)$  表示大气环境光的照射分量； $R(x, y)$  表示

所观察的物体的反射分量。对(1)式进行对数运算,其目的是忽略入射光的特性,从而得到所观察物体的原貌。经过对数变换后的关系式为

$$\lg[R(x, y)] = \lg[I(x, y)] - \lg[L(x, y)]. \quad (2)$$

通过以上思路得出单尺度 Retinex 关系式为

$$R_i(x, y) = \lg I_i(x, y) - \lg[F(x, y) * I_i(x, y)] = \lg\{I_i(x, y)/[F(x, y) * I_i(x, y)]\}, \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, 3, \dots$ ;  $R_i(x, y)$  为每个色彩分量的算法结果;  $*$  为卷积算子;  $F(x, y)$  为中心/围绕函数, 可用高斯函数来实现。

$$F(x, y) = K \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{e^2}\right], \quad (4)$$

$$\iint F(x, y) dx dy = 1, \quad (5)$$

式中,  $K$  由归一化函数决定,  $e$  为高斯函数的尺度参数。

由于高斯函数的尺度参数的作用, 单尺度 Retinex 算法无法兼顾图像细节和颜色保真度。当高斯函数的尺度参数较小时, 此算法能压缩图像动态范围, 增强图像暗区域细节, 但处理后的图像颜色偏灰; 取较大值时, 图像色感较协调, 但细节不够清晰<sup>[18]</sup>。

### 3.1.2 改进的单尺度 Retinex 算法

由于大雾天气的影响, 彩色图像的亮度直方图通常呈现非常集中<sup>[19]</sup>的特点。经典的单尺度 Retinex 算法采用对数算法对图像进行直方图的展宽, 研究中将 Sigmoid 函数与对数函数进行比较, 发现 Sigmoid 函数具有更好的展宽效果。一般的 Sigmoid 函数公式为

$$S_{\text{ig}}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (6)$$

Sigmoid 函数是一个在生物学中常见的 S 型函数, 称为 S 型生长曲线<sup>[20]</sup>。它同对数函数一样有界且单调递增, 值域维持在  $[0, 1]$  之间, 如图 5 所示。

从比较结果中可以看出, Sigmoid 函数具有自适应调节的中心点, 可以随着输入信号均值的变换而变化, 同时也反映出此函数相较于对数函数有较宽的调节范围。将单尺度 Retinex 算法中的对数函数用 Sigmoid 函数替换后可得

$$R_i(x, y) = S_{\text{ig}}\left[\frac{I_i(x, y)}{F(x, y) * I_i(x, y)}\right]. \quad (7)$$

可以将(7)式的输入看作两个图像之间的比率, 意味着结果总是大于 0。所以在这里只需要考虑  $x > 0$

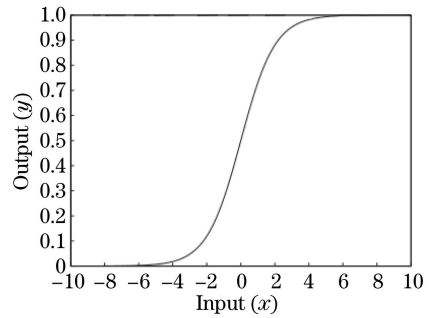


图 5 Sigmoid 函数图形

Fig. 5 Diagram of the Sigmoid function

的情况, 当比率等于 1 时, 表示当前像素的亮度与周围像素的加权平均亮度相同, 且输出值在 0.5 左右, 可以看作图像的中等亮度, 符合人类视觉感受。为了使函数过  $(0, 0)$  和  $(1, 0.5)$  且当输入趋于正无穷时, 输出结果为 1, 将 Sigmoid 函数经数学变换为

$$S_{\text{ig}}(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} + b, \quad (8)$$

式中:  $a$  是决定 S 型函数陡峭程度的因素,  $a$  越大, 图像越陡峭, 表示可调节的范围越宽, 函数图像如图 6 所示;  $b$  是确保函数过  $(0, 0)$  和  $(1, 0.5)$  且当输入趋于正无穷时, 输出结果为 1 的参数。对同一图像进行对数、Sigmoid 函数展宽, 处理后的直方图比较如图 7、图 8 所示。

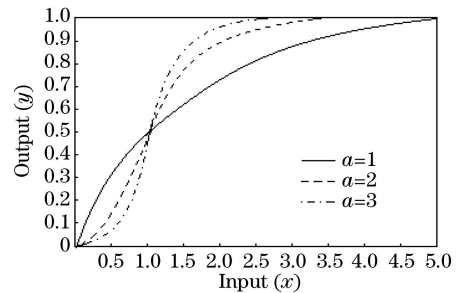


图 6 不同  $a$  值的 Sigmoid 函数图形

Fig. 6 Sigmoid curves with different values of  $a$

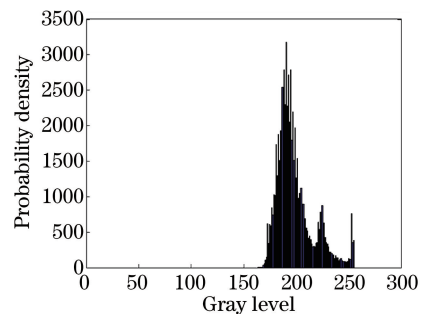


图 7 对数函数处理后的直方图

Fig. 7 Histogram after logarithmic function processing



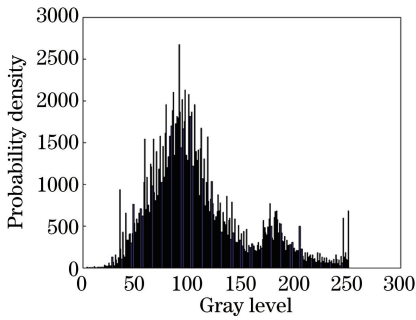


图 8 Sigmoid 函数处理后的直方图

Fig. 8 Histogram processed by Sigmoid function

针对浓雾天气的图像亮度较大的特点,在图像细节增强处理时应用取反操作,目的是将原本亮度较大的浓雾或浓度不均匀的雾天图像变暗,然后用对暗区域增强效果较好的改进的单尺度 Retinex 算法处理,处理后的图像再取反。虽然图像亮度减小,但其浓雾区域的细节得到提升。

### 3.1.3 图像远近景的平衡

雾天图像经过上述步骤处理后,图像浓雾区域的去雾效果得到提升,该区域细节突出。但对雾天图像的近景区域的处理效果不够明显。所以将经过上述步骤处理后的图像与原图像经过改进的单尺度 Retinex 算法后的图像线性叠加,以达到平衡图像景深较深和较浅区域的目的。线性叠加公式如下:

$$f(x, y) = k \cdot f_1(x, y) + (1 - k) \cdot \ln f_2(x, y), \quad (9)$$

式中:  $f_1(x, y)$  为经过上述步骤处理后的图像;  $f_2(x, y)$  为原始雾天图像经过改进的单尺度 Retinex 算法的图像;  $f(x, y)$  为叠加后的图像;  $k$  为线性叠加系数,数值与图像细节信息和噪声成正比,实验结果发现,  $k=0.5$  时,线性叠加效果最好。

## 3.2 高频分量的保边去噪

### 3.2.1 双边滤波器

高频分量包含图像大多数轮廓信息,而大多数噪声都存在于图像边缘。双边滤波器能在充分保护边缘的前提下对输入图像进行平滑处理。图像中每个像素的灰度值经过滤波后等于其邻域像素的加权平均,空间邻近度因子与灰度相似度因子的乘积为邻域像素的加权系数<sup>[21]</sup>。

假设图像  $f$  在坐标点  $x = (x_1, x_2)$  的灰度值为  $f_x$ , 滤波后得到的图像  $f_b$  在坐标点  $x$  的灰度值定义为  $f_{bx}$ , 那么双边滤波器表达式为

$$f_{bx} = \frac{1}{W_x} \sum_{y \in P} G_{\sigma_s}(\|x - y\|) G_{\sigma_r}(|f_x - f_y|) f_y, \quad (10)$$

$$W_x = \sum_{y \in P} G_{\sigma_s}(\|x - y\|) G_{\sigma_r}(|f_x - f_y|) f_y, \quad (11)$$

式中,  $y = (y_1, y_2)$  为中心像素  $x$  的邻域像素点,邻域像素点集合为  $P$ ,  $W_x$  为归一化因子,  $G_{\sigma_s}$  为空间邻近度因子,  $G_{\sigma_r}$  为灰度相似因子,它们的表达式为

$$G_{\sigma_s}(\|x - y\|) = \exp \left[ -\frac{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2}{2 \sigma_s^2} \right], \quad (12)$$

$$G_{\sigma_r}(|f_x - f_y|) = \exp \left[ -\frac{(f_x - f_y)^2}{2 \sigma_r^2} \right], \quad (13)$$

式中,  $\sigma_s$  和  $\sigma_r$  为基于高斯函数的距离标准差和灰度标准差,分别决定空间域和灰度滤波核函数的径向作用范围,它们的大小决定了双边滤波器的性能,通过控制像素之间的相对位置和灰度变化来调节加权重值。且分别表示保持图像特征的大小和对比度,通过调整二者的数值大小,使图像呈现适当的平滑度。

图 9 为双边滤波器在边缘附近的特性示意图,可以看到它在去噪的同时还具有优良的边缘保护能力。

### 3.2.2 快速双边滤波器

传统的双边滤波器属于非线性滤波器,通过平均邻域像素来平滑图像,在灰度值差异较大时,通过减少权重来保留图像边缘。由于其较好的保边去噪能力,现已广泛应用于图像处理中。然而,双边滤波器的实现往往要通过冗长复杂的计算过程<sup>[22]</sup>,所以提出了一种在保留其较好的保边去噪能力的同时,缩减计算量的快速双边滤波器算法。改进如下:

$$H_p = \frac{\sum_{q \in P} G(\|p - q\|) G(r) I_p}{\sum_{q \in P} G(\|p - q\|) G(r)}, \quad (14)$$

式中:  $I_p$  为图像  $I$  在中心像素点  $p(x, y)$  处的灰度值,经过双边滤波器后,该点的像素值变为  $H_p$ ;  $p(x, y)$  点的邻域像素点为  $q(x, y)$ ;  $I_q$  为邻域像素点  $q(x, y)$  的灰度值,所有的  $q(x, y)$  构成了邻域像素点集  $P$ ;  $G$  代表滤波的核函数,采用高斯函数的形式;  $r$  代表  $p(x, y)$  点和  $q(x, y)$  点上的灰度值差,具体可表示为

$$r = \begin{cases} I_p - I_q, & I_p - I_q \neq 0 \\ 1, & I_p - I_q = 0 \end{cases}. \quad (15)$$

将某一像素点与该点邻域像素灰度值作差,当灰度值相同时,将其看作图像边缘,当灰度值不同时,将二者差值作为新的灰度值。  $G(\|p - q\|)$  代表空间邻近度因子,表达式为

$$G(\|p - q\|) =$$

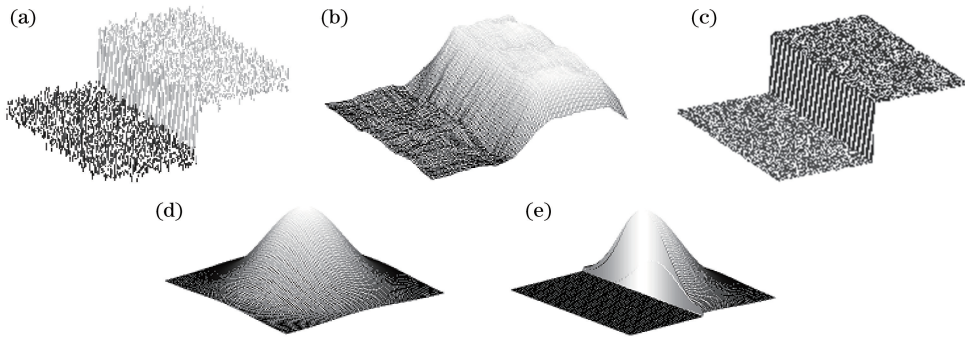


图9 双边滤波器在图像边缘附近的作用效果。(a)包含噪声的图像区域;(b)值域滤波的作用效果;(c)双边滤波的作用效果;(d)空间域滤波函数;(e)空间域滤波与值域滤波的组合函数

Fig. 9 Effect of the bilateral filter near the edge of the image. (a) Image area containing noise; (b) effect of value-domain filtering; (c) effect of bilateral filtering; (d) spatial domain filter function; (e) combination function of spatial domain filtering and value domain filtering

$$\frac{\lambda}{2} \exp \left[ -\lambda \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} \right], \lambda > 0, (16)$$

$$G(r) = 1/r, (17)$$

式中,  $G(r)$  为改进后的滤波核函数, 邻域像素参与滤波时的作用由  $G(\|p-q\|)$  和  $G(r)$  共同决定。这样, 局部窗口的计算量由原来的  $N^2$  缩减到  $1+$

$N$ , 极大地加速了滤波过程, 降低了算法复杂度。

图10为传统的双边滤波器与快速双边滤波算法处理结果对比, 其中双边滤波距离标准差和灰度值标准差各取20, 滤波结果与传统算法相比视觉效果较好。对比两种方法处理图像的峰值信噪比和处理时间, 发现本研究提出的快速双边滤波有较为优越的效果。

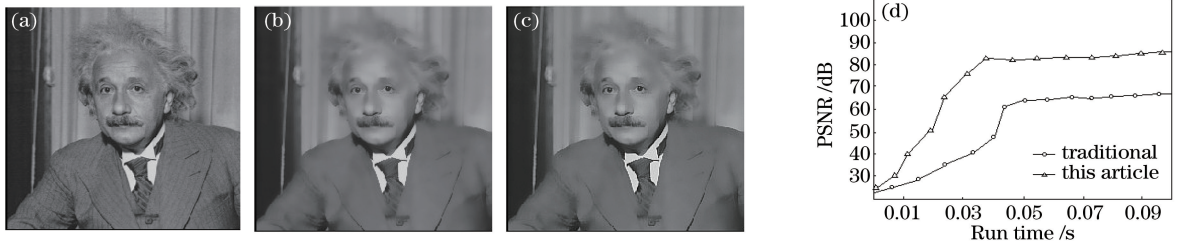


图10 两种算法比较结果。(a)原图;(b)传统双边滤波结果;(c)改进算法结果;(d)数据比较

Fig. 10 Comparison of two algorithms. (a) Original image; (b) traditional bilateral filter result; (c) improved algorithm result; (d) comparison of data

## 4 颜色通道色彩拉伸

日常捕获到的真实雾天图像通常整体偏灰色, 这是由雾天对景物的褪色效果所导致的。为了弥补这一缺陷以及上述步骤处理后图像亮度减小导致色彩不突出的缺陷, 需要对 HIS 空间中的饱和度分量进行处理。即保持其他分量不变, 对颜色分量进行线性拉伸。

将输入图像中的灰度值重新调整, 使原本灰度值变化较小的图像转换为较大的区间, 从而达到提升对比度的目的。其中, 转换关系为

$$l_{\text{out}} = \begin{cases} 255l_1, & l < l_1 \\ \frac{h_2 - h_1}{l_2 - l_1} \times (l - l_1) \times 255 + 255h_1, & l_1 < l < l_2 \\ 255l_2, & l > l_2 \end{cases} (18)$$

式中,  $l$  表示原图像中某一像素的灰度值,  $l_{\text{out}}$  表示原图像映射到新图像中像素的灰度值,  $l_1$  和  $l_2$  表示输入图像的最大和最小灰度值,  $h_1$  和  $h_2$  表示映射后图像想要达到的灰度值范围。

## 5 实验结果与分析

为了验证本研究算法的有效性, 将不同雾天浓度原始图像分别经不同的图像去雾算法处理, 并进行比较。在 Matlab 7.0.1 中对各个算法仿真并对比。为了使图像表现出更多的细节, 高斯函数的尺度参数取较小值  $e=80$ 。

### 5.1 主观评价

将本研究算法与多尺度 Retinex 算法及目前常见的图像去雾算法 (Kawasaki 等<sup>[10]</sup> 提出的基于小波分析的雾天图像增强算法、Wang 等<sup>[12]</sup> 提出一种

基于插值自适应直方图均衡化的去雾算法)作对比。这些算法对图像增强效果如图 11 所示。

图 11(b)为多尺度 Retinex 算法处理结果,对于雾天浓度不均匀的图像,此方法在估计光照图像时将其假设为缓慢变化即平滑的图像,但实际并非如此,所以在图 11 左二和左四这样亮度差异较大的图像边缘会产生光晕,某些图像色彩发生扭曲,且对图像亮度较大区域的细节改善效果较差;图 11(c)为 Kawasaki 等提出的基于小波分析的雾天图像增强算法处理结果,由图 11(c)看出此方法对薄雾图像的处理效果比较理想,但无法凸出浓雾区域或浓度不均匀图像的景物细节;图 11(d)为 Wang 等提出的一种基于插值自适应直方图

均衡化的雾天降质图像增强算法处理结果,对提供的四幅图像都能较好地增强图像细节信息,消除 POSHE 算法的块效应,但图像色彩不够鲜明。图 11(e)为本研究算法处理结果,从图中可以看出不论是在凸显图像细节还是色彩体现上都有较为出色的效果,相较于传统的多尺度 Retinex 算法,本研究算法处理后的图像在细节和色彩方面都相对较好,相较于 Kawasaki 等提出的算法,本研究算法对浓度不均匀图像和浓雾图像的处理效果较好,与 Wang 等提出的算法比较,本研究算法处理后的图像亮度、饱和度适宜,且去雾更彻底。所以,从视觉效果上看,本研究算法对浓度不均匀或浓雾图像有较好的处理效果。

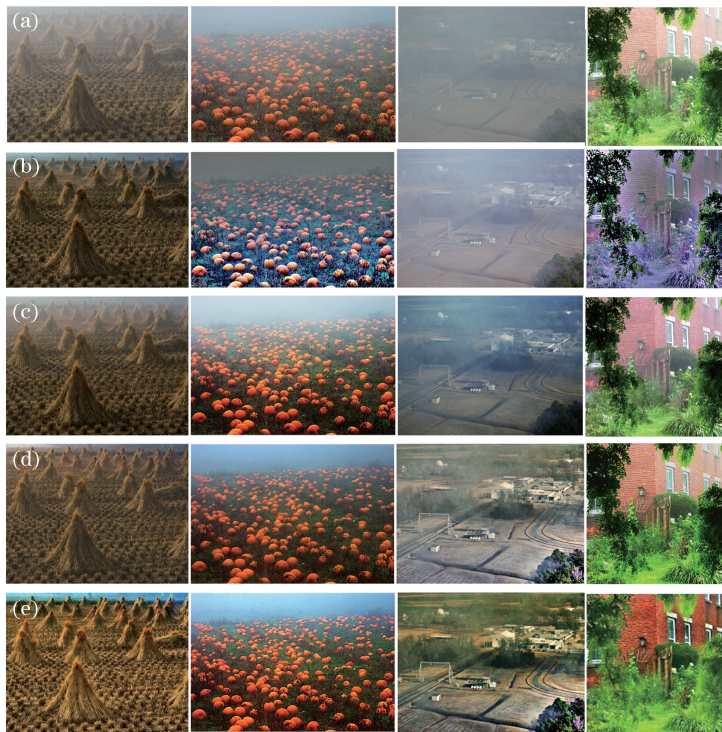


图 11 实验结果对比。(a)原始图像;(b)多尺度 Retinex 算法;(c) Kawasaki 方法<sup>[10]</sup>;(d) Wang 方法<sup>[12]</sup>;(e)本研究算法

Fig. 11 Comparison of experiment results. (a) Original images; (b) multiscale Retinex method;

(c) Kawasaki's method<sup>[10]</sup>; (d) Wang's method<sup>[12]</sup>; (e) method in this paper

## 5.2 客观评价

目前,还没有完备的针对图像去雾算法的客观评价标准。在客观评价标准中,从标准差、信息熵、峰值信噪比、运行时间四个方面对几种算法进行比较。图像的对比度表示图像细节清晰程度,对比度图像信号峰值与均方误差决定,表示图像重建质量的好坏。

图 12 给出了四种方法的客观评价数据。发现本研究对雾天浓度不均匀的图像处理效果不论从标

越大细节越清晰;标准差  $S_D$  用来衡量图像灰度对比度的强度,通常标准差越大,灰度对比度越高;信息熵表示图像中每个灰度级像素所传达的平均信息量,体现了景物在图像中的重要性,信息熵越高,表示图像蕴含的信息量越大;峰值信噪比(PSNR)由标准差、信息熵、峰值信噪比或者运行时间上,都有较好的表现。说明本研究提出的算法在增强图像对比度、保留图像细节、视觉效果上都呈现了较好的效果。



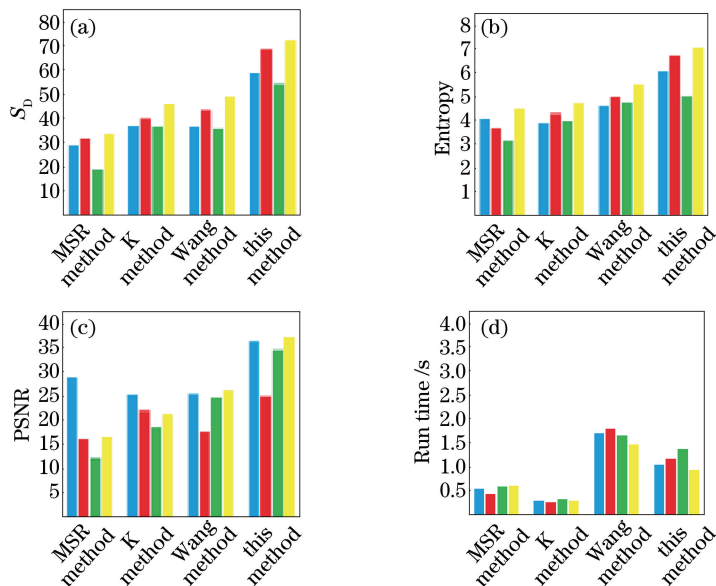


图 12 客观评价数据。(a)标准差;(b)信息熵;(c)峰值信噪比;(d)运行时间

Fig. 12 Objective evaluation data. (a) Standard deviation; (b) information entropy; (c) PSNR; (d) run time

## 6 结 论

以对比 Sigmoid 函数与对数函数的可调节性为基础,提出了改进的单尺度 Retinex 算法。由于雾天对图像的退化效果,在将图像转化到 HIS 彩色空间后对其饱和度分量进行映射拉伸;对其亮度分量进行 NSCT 分解,将含有绝大多数边缘信息的高频分量进行去噪处理,提出一种相较于双边滤波更快速且有效的快速双边滤波算法;对含有图像大多数细节信息的低频分量提出一种改进的单尺度 Retinex 算法,将低频分量与取反后的低频分量进行改进的单尺度 Retinex 算法处理,将处理结果线性叠加,以取得远近景之间的平衡。实验结果表明,经过本研究算法,解决了单尺度 Retinex 算法无法同时保留图像细节和颜色保真度的问题,对雾天图像的景深不同而导致无法凸显远处景物的细节信息的问题进行了针对性处理。标准差、信息熵、峰值信噪比的提高,表明此方法在体现图像细节、平均信息量、重建效果方面有着较好的处理效果。

## 参 考 文 献

- [1] Yu J, Xu D B, Liao Q M. Image defogging: a survey [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(9): 1561-1576.  
禹晶, 徐东彬, 廖庆敏. 图像去雾技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1561-1576.
- [2] Xiao J S, Shan S S, Duan P F, *et al.* A fast image enhancement algorithm based on fusion of different

color spaces [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40 (4): 697-705.

肖进胜, 单姗姗, 段鹏飞, 等. 基于不同色彩空间融合的快速图像增强算法 [J]. 自动化学报, 2014, 40 (4): 697-705.

- [3] 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.
- [4] Wagdy M, Faye I, Rohaya D. Border noise removal and clean up based on Retinex theory [C] // Proceedings of the First International Conference on Advanced Data and Information Engineering (DaEng-2013). Singapore: Springer, 2014, 285: 345-352.
- [5] Schwarz M W, Cowan W B, Beatty J C. An experimental comparison of RGB, YIQ, LAB, HSV, and opponent color models [J]. ACM Transactions on Graphics, 1987, 6(2): 123-158.
- [6] Rui Y B, Li P, Sun J T. Images defogging techniques based on color constancy theory [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2006, 30(5): 622-625.  
芮义斌, 李鹏, 孙锦涛. 基于色彩恒常理论的图像去雾技术 [J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2006, 30(5): 622-625.
- [7] Rui Y B, Li P, Sun J T. Method of removing fog effect from images [J]. Journal of Computer Applications, 2006, 26(1): 154-156.  
芮义斌, 李鹏, 孙锦涛. 一种图像去薄雾方法 [J]. 计



- 计算机应用, 2006, 26(1): 154-156.
- [8] Chen G, Zhou H Q, Yan J F. A novel method for moving object detection in foggy day [C] // Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing (SNPD 2007), July 30-August 1, 2007, Qingdao, China. New York: IEEE, 2007: 53-58.
- [9] Zeng H D, Zhang R. Restoring and enhancing of thin fog and cloud degraded images based on wavelet analysis[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science), 2005, 6(1): 76-80.  
曾好德, 张韧. 基于小波分解的薄云薄雾模糊图像的恢复与增强[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6(1): 76-80.
- [10] Kawasaki K, Taguchi A. A multiscale retinex based on wavelet transformation [C] // 2014 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, November 17-20, 2014, Ishigaki, Japan. New York: IEEE, 2015: 33-36.
- [11] Feng Y, He M Y, Liu W H. A new method for foggy image enhancement [C] // 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, May 25-27, 2009, Xi'an, China. New York: IEEE, 2009: 2416-2419.
- [12] Wang P, Zhang C, Luo Y X. Fast algorithm to enhance contrast of fog-degraded images [J]. Computer Applications, 2006, 26(1): 152-153, 156.  
王萍, 张春, 罗颖昕. 一种雾天图像低对比度增强的快速算法[J]. 计算机应用, 2006, 26(1): 152-153, 156.
- [13] Jia Z, Wang H C, Caballero R, *et al.* Real-time content adaptive contrast enhancement for see-through fog and rain [C] // 2010 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, March 14-19, 2010, Dallas, State of Texas. New York: IEEE, 2010: 1378-1381.
- [14] Wu Y Q, Shi J P. Image enhancement in non-subsampled Contourlet transform domain based on multi-scale Retinex[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0310002.  
吴一全, 史骏鹏. 基于多尺度 Retinex 的非下采样 Contourlet 域图像增强[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0310002.
- [15] Chen M S, Cai Z S. Study on fusion of visual and infrared images based on NSCT [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 061002.  
陈木生, 蔡植善. 基于 NSCT 的红外与可见光图像融合方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 061002.
- [16] Kong W W, Lei Y J, Lei Y, *et al.* Fusion technique for gray-scale visible light and infrared images based on NSCT and IHS transform[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(7): 1389-1393.  
孔韦韦, 雷英杰, 雷阳, 等. 基于 NSCT 和 IHS 变换域的灰度可见光与红外图像融合方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(7): 1389-1393.
- [17] Li Q Z, Liu Q. Adaptive enhancement algorithm for low illumination images based on wavelet transform [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0209001.  
李庆忠, 刘清. 基于小波变换的低照度图像自适应增强算法[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0209001.
- [18] Shensa M J. The discrete wavelet transform: wedding the a trous and Mallat algorithms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(10): 2464-2482.
- [19] Zhang Y Y. Research of haze color image enhancement based on multi-scale Retinex [J]. Packaging Journal, 2016, 8(3): 60-65.  
张雅媛. 基于多尺度 Retinex 算法的彩色雾霾图像增强研究[J]. 包装学报, 2016, 8(3): 60-65.
- [20] Zhao C L, Dong J W. Image enhancement algorithm of haze weather based on dark channel and multi-scale Retinex[J]. Laser Journal, 2018, 39(1): 104-109.  
赵春丽, 董静薇. 基于暗通道及多尺度 Retinex 的雾霾天气图像增强算法[J]. 激光杂志, 2018, 39(1): 104-109.
- [21] Wang Y F, Yin C L, Huang Y M, *et al.* Image haze removal using a bilateral filter [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(3): 386-392.  
王一帆, 尹传历, 黄义明, 等. 基于双边滤波的图像去雾[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(3): 386-392.
- [22] Li H X, Zhang B, Liu D, *et al.* Surface crack detection algorithm based on double threshold and tensor voting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 051010.  
李慧娴, 张斌, 刘丹, 等. 基于双重阈值和张量投票的表面裂纹检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 051010.