

基于分数阶微分和多尺度 Retinex 联合的 雾霭图像增强算法

余萍, 郝成成*

华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003

摘要 针对传统的雾霭图像增强算法效果差, 存在晕圈伪影的现象, 提出一种基于分数阶微分和多尺度 Retinex 联合的雾霭图像增强算法。首先将原始图像用分数阶微分算法进行处理, 以保留图像低频信息, 将处理后的图像由 RGB 颜色空间转换到 HSI 颜色空间; 然后, 用引导滤波器代替多尺度 Retinex 算法中的高斯滤波器, 以提取亮度分量和反射分量, 同时以这 2 个分量之和作为新的亮度层, 对饱和层使用伽马校正功能进行增强; 最后, 将 HSI 图像再转换为 RGB 图像。采用客观评价方法对算法的有效性进行评估, 结果表明, 所提算法去除图像雾霭的效率高, 且去雾后的图像没有晕圈伪影。

关键词 图像处理; 分数阶微分; 多尺度 Retinex; HSI; 伽马校正

中图分类号 TP312 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.011012

Foggy Image Enhancement by Combined Fractional Differential and Multi-Scale Retinex

Yu Ping, Hao Chengcheng

*Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University,
Baoding, Hebei 071003, China*

Abstract Aiming at the halo artifacts caused by traditional hogging image enhancement algorithm, a fractional image enhancement algorithm combining fractional differential and multi-scale Retinex is proposed. The proposed algorithm first processes the original image with a fractional order differential algorithm to preserve its low frequency information, and converts the processed image from the RGB color space to the HSI color space. Then, the Gaussian filter in the multi-scale Retinex algorithm is replaced with a leading filter to extract the luminance component and the reflected component, and the sum of the two components is used as the new luminance layer, and the Gamma correction function is used for the saturation layer. Finally, the HSI image is converted back to RGB image. An objective evaluation method is used to evaluate the effectiveness of the algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm has high efficiency and no halo artifacts present in the processed image.

Key words image processing; fractional derivative; multi-scale Retinex; HSI; Gamma correction

OCIS codes 100.2000; 100.2980; 100.3010; 100.2960

1 引言

随着计算机技术、传感器技术的飞速发展, 数字图像处理在智能交通、侦察勘探、导航定位等领域的作用日益突出。在雾霭天气, 能见度变低, 设备所采集的图像通常会出现比较严重的退化与失真, 给智

能交通、航拍测绘等带来诸多不利影响。研究增强雾霭图像的方法对提高雾霭天气下拍摄图像的清晰度具有重要的作用。

目前, 增强雾霭图像的方法可以分为物理模型和非物理模型 2 种。物理模型包括大气散射模型^[1-3]、暗信道先验模型^[4]、神经网络模型^[5]等; 非物

收稿日期: 2017-07-14; **收到修改稿日期:** 2017-08-04

作者简介: 余萍(1963—), 女, 本科, 副教授, 主要从事图像处理、模式识别、无线通信方面的研究。

E-mail: well_yph@163.com

* **通信联系人.** E-mail: jimji.m@163.com

理模型包括直方图均衡^[6]、小波变换^[7]、图像融合^[8]和 Retinex 理论^[9]等。

采用物理模型对雾霭图像进行增强方面：大气散射模型可以较好地复原雾霭图像，但成像机制复杂，且无法去除雾气对入射光的衰减^[10]；暗信道先验模型在获得更清晰图像的同时，会增加图像的存储空间；神经网络模型可以抑制噪声，但可能导致图像模糊，且计算复杂。

采用非物理模型对雾霭图像进行增强方面：Pei 等^[11]依据目标图像和统计校正对雾霭图像进行颜色转换，然后通过双边滤波改善图像效果，该算法对目标图像依赖性强，稳健性差；Rahman 等^[12]提出了单尺度 Retinex(SSR)和多尺度 Retinex(MSR)算法，SSR 主要用于增强灰度图像，难以使图像的动态压缩和色彩恒定性达到平衡，MSR 算法通过 SSR 形成不同尺度的线性加权组合来进行彩色图像增强^[13]，但增强后的图像边缘区域会出现晕圈伪影；He 等^[14]提出一种引导图像滤波算法，在亮度较高的图像上效果较好，但对于低光照图像效果较差；Hao 等^[15]提出一种基于 MSR 算法的双向过滤图像去雾算法，虽然双边过滤器可以平滑波动，且在大多数情况下可以有效地去除光晕现象，但会在图像边缘产生梯度反转现象；Zhang 等^[16]利用 Gamma 校正平衡图像亮度，然后利用入射光颜色特征来去除入射光对场景的颜色影响，但由于未考虑入射光的衰减，去雾后图像存在局部失真、细节模糊等现象。

鉴于上述问题，本文提出一种基于分数阶微分和多尺度 Retinex 联合的去雾算法。该算法先根据分数阶微分的定义设计分数阶微分模板对原始雾霭图像进行预处理，以保留图像低频信息，并增强图像的中频、高频及边缘信息，然后在 HSI 颜色空间，采用引导滤波器代替传统 MSR 算法中的高斯滤波器来提取图像的照射分量。引导滤波器不仅可以保持图像边缘信息，有效地消除晕圈伪影，而且提取的照射分量可以反映雾霭图像的整体结构。

2 基本原理

2.1 分数阶微分

Grunwald-Letnikov 分数阶微分定义^[17]的数学表达式为

$${}^R D_t^\nu = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\nu} \sum_{j=0}^{\frac{t-a}{h}} (-1)^j \frac{\Gamma(\nu+1)}{j! (\nu-j+1)!} f(t-jh), \quad (1)$$

式中 $\Gamma(n)$ 为 Gamma 函数，其定义为

$$\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-t} t^{n-1} dt = (n-1)!. \quad (2)$$

对于一维函数 $\Gamma(n)$ 在区间 $[a, t]$ 上有定义，对其按单位 $m=1$ 等分，可推出：

$$n = \left[\frac{t-a}{h} \right]^{h=1} = (t-a), \quad (3)$$

则一维信号的差分表达式为

$$\begin{aligned} \frac{d^\nu f(t)}{d^\nu t} &\approx f(t) + (-\nu)f(t-1) + \\ &\frac{(-\nu)(-\nu+1)f(t-2)}{2} + \dots + \\ &\frac{\Gamma(-\nu+1)}{n! \Gamma(-\nu+n+1)} f(t-n). \end{aligned} \quad (4)$$

由(4)式可知，只有第 1 个系数的值是常数 1，其他 $n-1$ 个都是分数阶微分阶次的函数。 n 个非零系数值按顺序分别表示为

$$\left\{ \begin{aligned} a_0 &= 1 \\ a_1 &= -\nu \\ a_2 &= \frac{(-\nu)(-\nu+1)}{2} \\ a_3 &= \frac{(-\nu)(-\nu+1)(-\nu+2)}{6} \\ &\vdots \\ a_n &= \frac{\Gamma(-\nu+1)}{n! \Gamma(-\nu+n+1)} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

在数字图像处理中，一幅图像的最大变化量是有限的，最短距离的变化是 2 个相邻像素之间，且二维数字图像的变化方向可分为 x 方向、 y 方向及对角方向^[18-19]。因此，根据分数阶微分的定义， x 轴方向的差分表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial^\nu f(x, y)}{\partial x^\nu} &\approx f(x, y) + (-\nu)f(x+1, y) + \\ &\frac{(-\nu)(-\nu+1)}{2} f(x+2, y) + \dots + \\ &\frac{\Gamma(-\nu+1)}{n! \Gamma(-\nu+n+1)} f(x+n, y), \end{aligned} \quad (6)$$

y 轴方向的差分表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial^\nu f(x, y)}{\partial y^\nu} &\approx f(x, y) + (-\nu)f(x, y-1) + \\ &\frac{(-\nu)(-\nu+1)}{2} f(x, y-2) + \dots + \\ &\frac{\Gamma(-\nu+1)}{n! \Gamma(-\nu+n+1)} f(x, y-n). \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 Retinex 理论

Retinex(视网膜 Retina 和大脑皮层 Cortex 的

缩写))理论是建立在科学实验和科学分析基础上的基于人类视觉系统的图像增强理论。该算法的基本原理最早由 Land^[9]于 1971 年提出。基于他所提出的理论,对于给定的图像 $S(x, y)$,可以分解成 2 幅不同的图像,用公式表示为

$$S(x, y) = R(x, y) \cdot L(x, y), \quad (8)$$

式中 $R(x, y)$ 为反射物体图像, $L(x, y)$ 为入射光图像。图 1 为原理示意图。

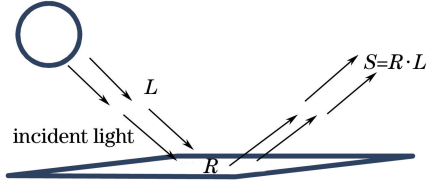


图 1 Retinex 理论示意图

Fig. 1 Theoretical diagram for Retinex

2.3 MSR 算法

MSR 算法是由 Jobson 等^[12]提出的,其基本公式为

$$R_i(x, y) = \sum_{n=1}^N U_n \cdot$$

$$\{\lg[I_i(x, y)] - \lg[F_n(x, y) \cdot I_i(x, y)]\}, \quad (9)$$

式中 $R_i(x, y)$ 是 Retinex 的输出, $I(x, y)$ 表示原始输入像, $i \in R, G, B$ 表示 3 个颜色谱带; $F(x, y)$ 是高斯滤波函数, U_n 表示尺度的权重因子, N 表示使用尺度的个数。由(9)式可知, MSR 算法的特点是能产生包含色调再现和动态范围压缩特性的输出图像。

3 本文算法

3.1 分数阶微分增强

以模板中心为坐标原点,令模板中心位置坐标为 $w(0, 0)$, 则 x 轴正方向的坐标为 $w(1, 0), w(2, 0), w(3, 0), \dots$; x 轴负方向坐标为 $w(-1, 0), w(-2, 0), w(-3, 0), \dots$; y 轴正方向的坐标为 $w(0, 1), w(0, 2), w(0, 3), \dots$; y 轴负方向的坐标为 $w(0, -1), w(0, -2), w(0, -3), \dots$, 模板对角方向的坐标值以此类推。根据(4)式得到水平、对角、垂直方向模板的系数:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{(v^2 - v)}{2} & 0 & \frac{(v^2 - v)}{2} & 0 & \frac{(v^2 - v)}{2} \\ 0 & -v & -v & -v & 0 \\ \frac{(v^2 - v)}{2} & -v & 8 & -v & \frac{(v^2 - v)}{2} \\ 0 & -v & -v & -v & 0 \\ \frac{(v^2 - v)}{2} & 0 & \frac{(v^2 - v)}{2} & 0 & \frac{(v^2 - v)}{2} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

通过多次实验发现,当 $v=0.5$ 时,直接选用上述分数阶微分模板处理图像会使输出图像靠近边缘的地方亮度过高。依据构造分数阶模板原则^[19],应利用图像目标像素点的邻近像素点的信息来决定所采用的分数阶微分模板,因此对上述参数进行调整,分数阶微分模板:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{v^2}{8} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-v}{4} & 0 & 0 \\ \frac{v^2}{8} & \frac{-v}{4} & 1 & \frac{-v}{4} & \frac{v^2}{8} \\ 0 & 0 & \frac{-v}{4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v^2}{8} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

用上述微分模板遍历一幅 $M \times N$ 图像后,得到

处理后的图为

$$\bar{f}(x, y) = \sum_{i=-M/2}^{M/2} \sum_{j=-N/2}^{N/2} w(i, j) f(x + i, y + j), \quad (12)$$

式中 $w(i, j)$ 是滤波系数, $f(x, y)$ 是输入图像像素值。

3.2 亮度层增强

对于一幅 RGB 色彩空间的图像,需要获取 3 个照明分量,分别为 Red(R)、Green(G)和 Blue(B),获取时间长,图像容易扭曲。有鉴于此,本文将分数阶微分处理后的图像从 RGB 颜色空间转换为 HSI 颜色空间。HSI 颜色空间基于人类的视觉特征,直接使用色度 H ,饱和度 S 和亮度 I 这 3 个要素来描述图像颜色,更符合人的视觉特征空间。在 HSI 色彩空间中,3 个元素分离,可以在不改变色阶层的条件下调整亮度和饱和度。这样不仅可以抑制图像色

彩失真,而且可以减少图像增强的时间。对于 HSI 色彩空间,只需提取亮度层的照明分量和反射分量。根据(9)式,亮度层的照射分量 $L_I(x, y)$ 和反射分量 $R_I(x, y)$ 分别为

$$L_I(x, y) = \sum_{n=1}^N W_n [q_n(x, y) \cdot I(x, y)], \quad (13)$$

$$\lg R_I(x, y) = \sum_{n=1}^N W_n \{ \lg I(x, y) - \lg [q_n(x, y) \cdot I(x, y)] \}, \quad (14)$$

$$I_{en}(x, y) = L_I(x, y) + R_I(x, y), \quad (15)$$

式中 W_n 代表不同引导滤波器的权重因子; $q_n(x, y)$ 表示尺度参数为 n 的引导滤波器; $I(x, y)$ 和 $I_{en}(x, y)$ 分别表示增强前和增强后的亮度层; N 的值为 3, 表示使用 3 个尺度, $W_1 = W_2 = W_3 = 1/3$ 。由(13)式可知,增强后的亮度层为入射分量和反射分量之和。

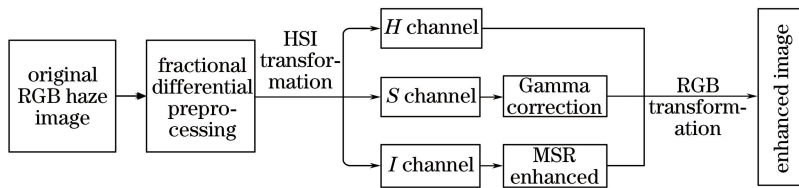


图 2 算法去雾流程图

Fig. 2 Flow chart for proposed algorithm

4 仿真与结果分析

4.1 仿真

为了验证本文算法的有效性,分别利用本文算法、直方图算法、传统的 MSR 算法及 Hao 算法对多个雾霭图像进行增强。实验在 Matlab 2015b 环境下完成,操作系统为 Windows 10, CPU 为 Intel i5-6200U, 主频 2.3 GHz, 内存 8 G, 实验所用图片均来自互联网中有雾环境下拍摄的图片。通过这 4 种算法增强的 5 组图像,如图 3 所示。

可以看出,本文算法在雾霭图像增强的主观视觉效果方面相较其他算法更具优势,在图像清晰度和亮度上有很大的提高,图像的整体色彩也更自然。

4.2 结果分析

为客观评价图像质量,本文使用 3 种常用的客观评价指标——信息熵(IE)、绝对平均亮度误差(AMBE)和峰值信噪比(PSNR)进行测评。IE 反映了图像信息,值越大,图像包含信息越多,表明图像

3.3 算法流程

图像的亮度层增强,图像的饱和度将会降低。为了使彩色图像清晰,需要调整饱和度。本文在 HSI 颜色空间使用伽马校正函数来增强饱和度:

$$S' = S^\gamma, \quad (16)$$

式中 S 和 S' 分别代表增强前和增强后的饱和度, γ 是用于控制饱和度增强度的拉伸系数,根据经验,通常取值在 0.5~1 之间,本文取 $\gamma=0.6$ 。

由于 MSR 对图像的增强是在 HSI 颜色空间进行的,因此需将图像从 HSI 颜色空间转换到 RGB 颜色空间,以得到增强后的最终图像。本文算法去雾流程如图 2 所示。1) 读入一幅待去雾图像;2) 用分数阶微分算法对图像进行预处理,以保留图像低频信息,并增强图像的中频、高频信息;3) 将处理后的图像转换到 HSI 颜色空间,对其亮度层用 MSR 进行增强,饱和层用伽马函数进行校正增强;4) 将 H 分量和增强后的 S 分量、 I 分量合并,然后把图像从 HSI 颜色空间转换到 RGB 颜色空间,即得到去雾后的图像。

质量越好; AMBE 反映图像亮度信息,值越大,图像越亮; PSNR 越大,表示处理前后图像的差异越小,图像失真越小。此外,还引入计算耗时对算法进行评价。为了验证该算法的适用性,选择 20 张雾霭图像进行实验,得到各评价指标的平均值,如表 1 所示。

由表 1 可知,利用本文算法增强的图像具有最大的信息熵,表明该算法增强后的图像具有比原始图像更多的信息。基于 MSR 算法增强的图像具有最大的 AMBE 值,表示增强图像的亮度过高,即仅经 MSR 算法增强后的雾霭图像会出现失真,丢失一些细节信息。基于直方图算法增强的图像具有最低的 AMBE 值,说明利用直方图算法对雾霭图像进行增强后,效果较差,亮度低。基于 Hao 算法增强的图像具有最大的 PSNR 值,表明增强图像与原始图像相比变化不大,但 Hao 算法的运行时间最长,效率较低。综合各项指标可知,本文算法相对于其他算法耗时短、效率高,在雾霭图像增强方面效果更好。

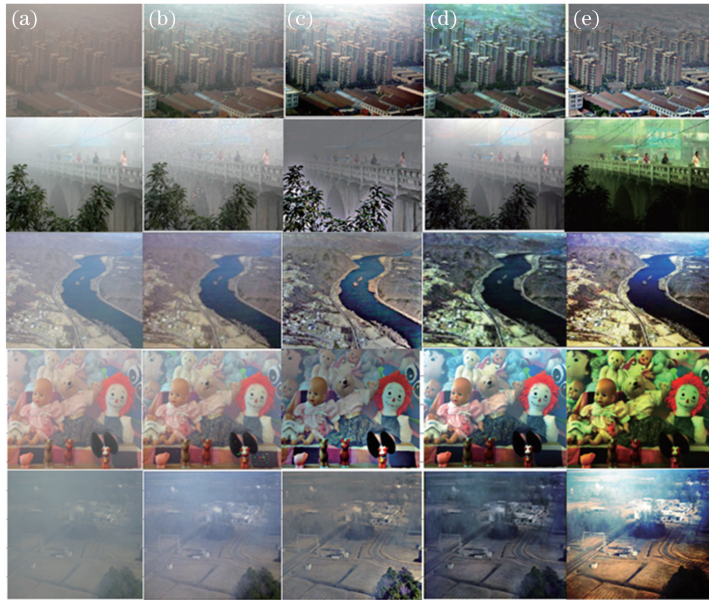


图3 不同去雾算法效果对比。(a)原始图像;(b)直方图算法;(c) MSR算法;(d) Hao算法;(e)本文算法
Fig. 3 Comparison of de-fog effects by different algorithms. (a) Original images; (b) histogram algorithm; (c) MSR algorithm; (d) Hao algorithm; (e) proposed algorithm

表1 算法评价指标

Table 1 Evaluation index of different algorithms

Algorithm	IE	AMBE	PSNR	t / s
Histogram	8.235	30.434	14.338	2.637
MSR	13.641	84.253	13.651	11.259
Hao	14.749	50.266	15.236	20.145
Proposed	15.068	62.114	10.869	10.005

5 结 论

提出了一种基于分数阶微分和 MSR 联合的雾霭图像增强算法,算法的处理主要在 HSI 颜色空间进行,使用引导滤波器代替了 MSR 算法中的高斯滤波器,提高了算法的执行效率,而且在抑制光晕现象方面具有较好的效果。对本文算法的有效性进行验证,结果表明,本文算法在增强雾霭图像方面弥补了现有算法的缺陷,且具有更好的性能。但本文算法也存在一些不足,如使用分数阶微分模板对图像进行预处理时,如何评价所选取模板的滤波系数的适当性,在对图像进行饱和度增强时,拉伸系数选多大才最合适等,这些问题还有待于进一步研究。

参 考 文 献

[1] Gao Y, Yun L J, Shi J S, *et al.* Enhancement dark channel algorithm of fog image based on the TV model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0809001.
高银, 云利军, 石俊生, 等. 基于 TV 模型的暗原色

理论雾天图像复原算法[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0809001.

- [2] Feng W Y, Chen Q, He W J, *et al.* A defogging method based on hyperspectral unmixing [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0110002.
冯维一, 陈钱, 何伟基, 等. 基于高光谱图像混合像元分解技术的去雾方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0110002.
- [3] Li Y M, Ren T T. Image enhancement method based on car secondary safety system in smog days [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041003.
李雅梅, 任婷婷. 雾霾天车载辅助安全系统图像增强方法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041003.
- [4] Yu T, Riaz I, Piao J, *et al.* Real-time single image dehazing using block-to-pixel interpolation and adaptive dark channel prior [J]. IET Image Processing, 2015, 9(9): 725-734.
- [5] Tang L, Chen S, Liu W, *et al.* Improved Retinex image enhancement algorithm [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11: 208-212.
- [6] Rong Z, Li Z, Li D N. Study of color heritage image enhancement algorithms based on histogram equalization[J]. Optik, 2015, 126(24): 5665-5667.
- [7] Nikam S D, Yawale R U. Color image enhancement using daubechies wavelet transform and HIS color model [C]. International Conference on Industrial Instrumentation and Control, IEEE, 2015: 1323-

- 1327.
- [8] Jordanski M, Arsic A, Tuba M. Dynamic recursive subimage histogram equalization algorithm for image contrast enhancement [C]. Telecommunications Forum Telfor, IEEE, 2015: 819-822.
- [9] Land E H. Recent advances in Retinex theory and some implications for cortical computations: color vision and the natural image[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1983, 80(16): 5163-5169.
- [10] Yang A P, Bai H H. Night image abstraction algorithm based on Retinex theory and dark channel a prior[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041002.
杨爱萍, 白煌煌. 基于 Retinex 理论和暗通道先验的夜间图像去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041002.
- [11] Pei S C, Lee T Y. Nighttime haze removal using color transfer pre-processing and Dark Channel Prior [C]. IEEE International Conference on Image Processing, IEEE, 2012: 957-960.
- [12] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale Retinex for color image enhancement [C]. International Conference on Image Processing, IEEE, 2002: 1003-1006.
- [13] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. A multiscale Retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976.
- [14] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [15] Hao W, He M, Ge H, *et al.* Retinex-like method for image enhancement in poor visibility conditions [J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 2798-2803.
- [16] Zhang J, Cao Y, Wang Z. Nighttime haze removal based on a new imaging model [C]. IEEE International Conference on Image Processing, IEEE, 2014: 4557-4561.
- [17] Garg V, Singh K. An improved Grunwald-Letnikov fractional differential mask for image texture enhancement [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2012, 3(3): 130-135.
- [18] Wang C, Lan L, Zhou S. Grunwald-Letnikov based adaptive fractional differential algorithm on image texture enhancing [J]. Journal of Computational Information Systems, 2013, 9(2): 445-454.
- [19] Gou R. Imageenhancement template construction based on fractional differential [J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(10): 3554-3557.
勾荣. 基于分数阶微分的图像增强模板构造 [J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(10): 3554-3557.