

基于 Shearlet 变换的 Retinex 去雾算法

章星晨, 孙刘杰

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要:通常,雾天情况下拍摄的图像会因大气粒子散射而出现对比度低、图像模糊等问题,对交通监控系统等造成了一定的影响。针对这一问题,提出一种基于 Shearlet 变换的 Retinex 去雾算法。首先对有雾图像进行 Shearlet 变换分解,得到低频信息和一系列高频信息;由于雾气大部分存在于低频分量上,优先对低频系数使用多尺度 Retinex 算法进行处理以降低雾气对图像的影响;再对高频系数采用阈值法进行处理以去除噪声;最后再进行 Shearlet 逆变换,从而实现去雾,得到最终的增强图像。实验结果表明,该算法能增强图像的视觉效果,使图像的细节更丰富,达到去雾的目的。与其他算法相比,在亮度、对比度和信息熵方面均有一定程度的提高,处理后图像的视觉效果更好,是一种有效的雾天图像清晰化算法。

关键词:图像去雾;Shearlet 变换;多尺度 Retinex 算法;阈值法

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2019)01-0040-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.01.009

Retinex Dehazing Algorithm Based on Shearlet Transform

ZHANG Xing-chen, SUN Liu-jie

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Generally, the image taken in fog will have problems such as low contrast and blurring due to scattering of atmospheric particles, which affects traffic monitoring system to some extent. To solve this problem, we propose a Retinex dehazing algorithm based on Shearlet transform. Firstly, Shearlet transform is performed to decompose the foggy image to obtain low-frequency information and a series of high-frequency information. Because fog mostly exists on the low-frequency components, the multi-scale Retinex algorithm is preferred to process the low-frequency coefficients to reduce the effect of fog on the image. Then, the high-frequency coefficients are processed by threshold method to remove noise. Finally, Shearlet inverse transformation is performed to achieve defogging and the final enhanced image is obtained. The experiment shows that the proposed algorithm enhances the visual effect of the image and makes the details of the image more abundant, achieving the purpose of defogging. Compared with other algorithms, it has a certain improvement in brightness, contrast and information entropy. The processed image has a better visual effect and is an effective algorithm for fog image sharpening.

Key words: image defogging; Shearlet transform; multi-scale Retinex algorithm; threshold method

0 引言

雾和雾霾是一种常见的天气现象。由于大气散射和吸收,雾霾会大大降低图像可视性,对比度较低。除了视觉质量恶化之外,重雾还会严重影响机器视觉系统的性能,如视频监控、智能交通监控、卫星成像、目标识别^[1]等。例如,智能交通监控系统受到雾天低对比度的影响,给交通造成不便。因此,图像去雾算法的发展对于图像质量的恢复已经成为一个非常重要的任务。

图像去雾通常分为两种方法^[2]。一种是基于大气散射物理模型图像复原方法,主要分析图像的退化原

因和特性,建立物理模型,并且利用反演算法补偿丢失的信息,侧重考虑大气散射的作用来实现雾天图像的还原。而另外一种基于图像增强方法,不用分析图像退化的原因,只需要增强雾天图像的对比度来改善图像视觉效果。直观地说,传统的图像增强方法有直方图均衡^[3]、线性映射、Retinex 映射^[4]和小波变换^[5]等方法。直方图均衡化由于其简单性和有效性而应用广泛,它的主要思想是根据概率密度函数(PDF)重新映射图像的灰度级,但缺点是易造成图像细节的消失。小波变换则可以把原图像分解为不同的子带图像,但

收稿日期:2018-03-14

修回日期:2018-07-17

网络出版时间:2018-11-15

基金项目:上海理工大学科技发展项目(16KJFZ017);上海市教委科研创新重点项目(13ZZ111)

作者简介:章星晨(1994-),男,硕士研究生,研究方向为图像处理;孙刘杰,硕导,教授,研究方向为图像处理、数字水印。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20181114.1554.020.html>

由于位移不变性的特征而限制其发展,不能够准确表达图像的细节^[5]。基于此缺点,一些研究者提出新的尺度变换(曲波变换^[6-7]、平稳小波变换、轮廓波变换^[8]等)来解决传统 WT 中的位移不变性问题。这些新的尺度变换具有各向异性和方向性的特点,能够较好地表示图像的边缘、纹理和细节信息。Retinex 算法是基于人类视觉系统所提出的算法,简单有效,可通过反射和光照分量进行分解。基于这一原理,陆续有研究者提出了单尺度 Retinex 算法、多尺度 Retinex 算法和带色彩恢复 Retinex 算法。Retinex 算法虽然能优化突出图像的细节,但也存在一定的不足,如出现光晕、失真现象。因此,文中提出了一种基于 Shearlet 变换的 Retinex 图像去雾算法,并从主客观两方面与直方图均衡、多尺度 Retinex 算法、基于 MSR 理论的交通图像去雾霾方法^[9]进行比较,以验证该算法的有效性。

1 多尺度 Retinex 算法

Retinex 理论是 1971 年由美国物理学家 Edwin Land^[10-11]基于色彩恒常性提出的。Retinex 理论认为图像可以分为两个部分:照射分量和反射分量。通常可以概括为入射光和反射光的乘积。因此可用如下公式进行描述:

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

其中, $R(x, y)$ 为反射分量; $L(x, y)$ 为照射分量。

一般来说,入射分量被认为是低频信号,反射分量是高频信号,决定物体性质的是高频信号。Retinex 的理论原理如图 1 所示。

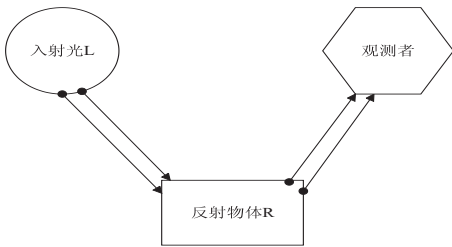


图 1 Retinex 原理

单尺度 Retinex^[12-13]是由 Jobson 和 Land 于 1997 年根据中心环绕算法提出的。与传统的中心环绕算法相比,SSR 具有更高的运算速度、更清晰的物理意义等优点。将式 1 采取对数域计算,可以把复杂的乘法形式转化为简单的加减运算,SSR 算法可表示如下:

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

单尺度 Retinex 算法一般是通过高斯滤波器来估计照射分量,它的数学表达式为:

$$L(x, y) = F(x, y) * S(x, y) \quad (3)$$

其中, $*$ 为卷积; $F(x, y)$ 为中心环绕函数,通常使用高斯函数形式,它的表达式为:

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

其中, σ 为尺度参数; K 由归一化函数决定,满足如下条件:

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

σ 为尺度因子,对单尺度 Retinex 算法影响较大,是一个很重要的参数。当 σ 取值较小时,可以较好地完成动态范围的压缩,但失真现象比较严重。反之,当 σ 取值较大时,颜色保真效果不错,但细节增强减弱,去雾效果也会随之下降。为了解决这一类问题,很多学者在此基础上研究了多尺度 Retinex 算法^[4]。MSR 是增强图像领域中最常用的算法之一,它可以在实现图像压缩的动态范围的同时保持图像的逼真度。在某些情况下,MSR 可以实现图像色彩恒常性、局部动态范围压缩、色彩增强和整体动态范围压缩。MSR 算法相当于多个 SSR 的加权求和,在对数域中的多尺度 Retinex 可以表示为:

$$R_k(x, y) = \sum_{n=1}^N W_n (\lg S_k(x, y) - \lg [F_n(x, y) * S_k(x, y)]) \quad (6)$$

其中, N 为尺度参数的总数量; W_n 为权重因子。MSR 算法同时包括了 3 个尺度的特征, n 通常选为 3。 $R_k(x, y)$ 是 k 通道中的 Retinex 输出,在灰度图像中, $k=1, 2, 3$ 分别表示 R、G、B 三个通道。

相比于单尺度 Retinex 算法,多尺度 Retinex 算法处理图像在动态范围和细节增强上有更好的平衡,产生了更好的视觉效果。

2 Shearlet 变换

Shearlet 变换是近年来提出的小波理论的一种新的扩展,这种转换基于多分辨率和多方向的分析,并改进了多维数据的表示。小波方法对于一维信号具有最佳逼近特性,但是在多维领域表现不佳,Shearlet 变换就克服了这一缺点。当维数 $n=2$ 时,具有合成膨胀的二维仿射系统定义如下:

$$M_{AB}(\psi) = \{\psi_{j,l,k}(x) = |\det A|^{j/2} \psi(B^l A^j x - k) : j, l \in \mathbb{Z}, k \in \mathbb{Z}^2\} \quad (7)$$

其中, Shearlet 变换是由 j, l, k 三个变量组成的函数, j 是尺度参数, l 是剪切的方向, k 是平移量。 $\psi \in L^2(\mathbb{R}^2)$, A 和 B 都是可逆矩阵, $|\det B| = 1$, 若满足以下 Parseval 紧框架,即:

$$\sum_{j,l,k} |\langle f, \psi_{j,l,k} \rangle|^2 = \|f\|^2, \forall f \in L^2(\mathbb{R}^2) \quad (8)$$

$$\text{当 } A = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & \sqrt{a} \end{pmatrix} (a > 0), B = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} (s \in \mathbb{R}),$$

$M_{AB}(\psi)$ 被称为 Shearlet。这里, A 和 B 分别表示各向异性膨胀矩阵和剪切矩阵,通常 $a=4, s=1$ 。

剪切波变换过程的分解由两部分组成:多尺度分

解和多方向分解,与 Contourlets 类似。但 Contourlets 在方向表示方面效率较低。用剪切矩阵代替定向滤波,可以提供更多方向。由于多向性的特点,Shearlets 能够更好地捕获图像的边缘。

3 文中算法处理

3.1 低频系数的多尺度 Retinex 算法处理

首先将有雾图像进行 Shearlet 变换分解,得到低频信息和一系列高频信息。由于雾天情况下雾通常集中于低频部分,所以优先对低频系数使用多尺度 Retinex 算法进行处理,从而进行去雾。需要注意的是,Shearlet 变换后得到的系数有正负之分,如果系数为负,那么将会对去雾效果产生影响。所以,可以采取线性映射的方法把低频系数 $f(i, j)$ 映射到区间 $[0, 255]$ 内,线性映射的表达式如下:

$$f'(i, j) = \frac{f(i, j) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \times 255 \quad (9)$$

其中 f_{\min} 和 f_{\max} 分别是低频系数最小值和最大值。

将线性映射的结果作为输入,利用式 6 对低频系数进行多尺度 Retinex 算法处理,并且把处理后的系数进行线性映射反变换,从而映射到区间 $[f_{\min}, f_{\max}]$,这样才能进行 Shearlet 重构。

3.2 高频系数的阈值处理

图像的纹理信息、边缘信息以及噪声大都存在于高频分量中,所以需要调整高频系数来抑制噪声并且强化边缘,使图像的细节信息更丰富。为了更好地对高频系数进行处理,合适的阈值极其重要,所以文中采用阈值法。阈值定义为:

$$\lambda_l = (\sigma \sqrt{2 \ln(M \times N)}) / \ln(l + 1) \quad (10)$$

$$\sigma = \text{median}(|\text{HH}_1|) / 0.674 \quad (11)$$

其中, $M \times N$ 为图像大小; l 为分解尺度; $\text{median}()$ 为中值函数; HH_1 为高频子带系数。

若对高频图像采用全局增强,则会出现过度增强和伪影现象。文中使用清晰度参数进行调节可以避免这一现象。图像清晰度是由局部梯度矩阵奇异值得到的,局部清晰度定义为:

$$Q = s_1(s_1 - s_2) / (s_1 + s_2) \quad (12)$$

其中, s_1 和 s_2 分别为局部梯度矩阵奇异值。图像越模糊,说明 Q 越小。一幅图像有清晰像素点和不清晰像素点,对于清晰的地方不需要增强,对于不清晰的地方进行适度增强。选择增强系数的公式如下:

$$E = \begin{cases} E_0(T_2 - Q) / (T_2 - T_1), & T_1 \leq Q \leq T_2 \\ E_0, & Q < T_1 \end{cases} \quad (13)$$

其中, T_1 和 T_2 为阈值; E_0 为常数; Q 表示清晰度。对高频系数利用下式进行增强:

$$f(i, j) = \sqrt[n]{f(i, j)} \times E \times f(i, j) \quad (14)$$

其中, $f(i, j)$ 表示增强后的高频系数。

3.3 算法的具体步骤

(1) 对有雾图像进行 Shearlet 变换分解,得到低频信息和一系列高频信息。

(2) 优先对低频系数使用多尺度 Retinex 算法进行处理。

(3) 对高频系数采用阈值法进行处理。

(4) 进行 Shearlet 逆变换,得到最终的增强图像。

4 实验结果与分析

为了验证文中算法的性能,选出三幅具有代表性的去雾图像进行去雾增强,软件平台为 Matlab2014a。实验中将文中算法与直方图均衡化、多尺度 Retinex 算法和文献[9]中的方法进行对比分析。一般采取主观评价和客观评价两种评价方法。主观评价就是各增强方法视觉效果的对比,而客观评价依据峰值信噪比(PNSR)、信息熵、亮度、对比度、平均梯度等指标。

图 2 和图 3 给出两组去雾实验的效果对比图。

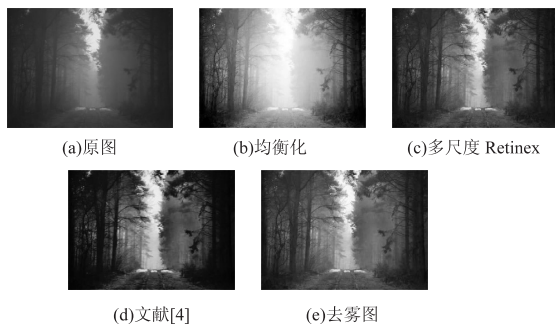


图 2 实验对比(树林)

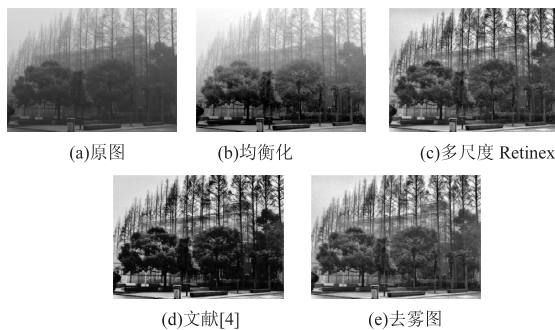


图 3 实验对比(教学楼)

4.1 主观评价分析

以上两组图分别是均衡化算法、多尺度 Retinex 算法、文献[9]算法和文中算法处理后的去雾图。从视觉效果上看,原图受雾气影响较大,景物比较模糊;均衡化的处理效果不是很好,还存在很多雾,细节不够丰富,图像不是很清晰;多尺度 Retinex 算法处理后的图像较均衡化方法好,但色彩存在失真;文献[9]算法处理后图像偏暗,但是对比度较好。而文中算法处理后,景物自然清晰,雾气消除的也比较好,没有过增强和失真现象,具有很好的视觉效果。

4.2 客观评价分析

文中选取亮度、对比度和信息熵这三个指标对有雾图像进行分析。亮度值反映了图像的明暗程度。对比度越大,图像越清晰。信息熵体现了图像的细节信息,其值越大,图像细节越丰富,图像越清晰。计算公式如下:

均值:

$$AVE = (\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x,y)) / (M \times N) \tag{11}$$

标准差:

$$STD = \sqrt{ (\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x,y)^2 - AVE^2) / (M \times N) } \tag{12}$$

信息熵:

$$H = - \sum_{i=1}^{255} P_i \log P_i \tag{13}$$

其中, $f(x,y)$ 为图像在 (x,y) 处的灰度值; $M \times N$ 为图像大小。

所测数据如表 1 和表 2 所示。

表 1 客观对比(1)			
	亮度	对比度	信息熵
原图	69.490 6	39.085 3	6.833 7
均衡化	127.456 0	44.804 9	5.967 3
MSR	76.037 0	48.661 6	7.249 3
文献[9]	58.265 2	55.682 0	7.009 3
文中方法	82.586 8	57.350 8	7.314 9

表 2 客观对比(2)			
	亮度	对比度	信息熵
原图	108.928 4	57.734 4	7.342 2
均衡化	127.417 5	74.915 3	7.335 3
MSR	107.891 1	62.551 0	7.544 1
文献[9]	90.647 9	77.668 9	7.586 8
文中方法	110.756 2	63.068 2	7.766 5

由表 1 和表 2 可以看出,均衡化方法在去雾后,亮度增加较多,对比度也有提升,但是信息熵有所降低,说明存在过增强现象,图像部分区域存在高亮部分,细节有所损失,去雾效果不是很好。文献[9]方法处理后在对比度和信息熵上有所提高,但是在亮度上有所降低,整体图像偏暗,色彩不是很自然。而文中算法处理后各个方面的数值都有所提高,对比度更好,细节更加突出,整体图像的色彩更自然,图像的去雾效果更好。通过整体对比可以发现,与其他算法相比,文中算法处理效果更好。

5 结束语

文中提出了一种基于 Shearlet 变换的 Retinex 方法来进行图像去雾。通常情况下,雾大部分集中在低

频谱上,所以对 Shearlet 变换后得到的低频系数进行多尺度 Retinex 处理,并且在高频上进行阈值处理。实验结果表明,经过文中算法处理后得到的去雾图像较其他算法处理后得到的图像细节更丰富,清晰度更高且色彩更加自然,具有不错的视觉效果。

参考文献:

[1] GIBSON K B, VO D T, NGUYEN T Q. An investigation of dehazing effects on image and video coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(2): 662–673.

[2] 吴迪, 朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. 自动化学报, 2015, 41(2): 221–239.

[3] ZHU Hui, CHAN F H, LAM F K. Image contrast enhancement by constrained local histogram equalization[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 73(2): 281–290.

[4] JOBSON D J, RAHMAN Z U, WOODDELL G A. A multi-scale 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.

[5] ZHAN Bichao, WU Yiquan. Infrared image enhancement based on wavelet transformation and Retinex[C]//Proceedings of the 2nd international conference on intelligent human-machine systems and cybernetics. Nanjing, China: IEEE, 2010: 313–316.

[6] STARCK J L, MURTAGH F, EMMANUEL J C, et al. Gray and color image contrast enhancement by the curvelet transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(6): 706–717.

[7] 李飞, 丁若修, 张志佳. 基于曲波变换的图像去雾算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(7): 65–67.

[8] DO M N, VETTERLI M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image enhancement[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091–2106.

[9] 李长领, 宋裕庆, 刘晓锋. 基于 MSR 理论的交通图像去雾霾方法[J]. 计算机应用, 2015, 35(S2): 234–237.

[10] LAND E H. The retinex theory of color vision[J]. Scientific America, 1977, 237(6): 108–128.

[11] ZHANG He, LIU Xin, CHEUNG Y M. Efficient single image dehazing via scene-adaptive segmentation and improved dark channel model[C]//International joint conference on neural networks. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2016: 3440–3445.

[12] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. Properties and performance of a center/surround retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451–462.

[13] LAND E H. An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1986, 83(10): 3078–3080.