

基于小波变换的彩色图像去雾方法

贺欢, 吐尔洪江·阿布都克力木, 何笑

(新疆师范大学数学科学学院, 新疆乌鲁木齐 830017)

摘要:针对雾天拍摄的图像模糊、对比度低、图像失真严重、获取重要信息困难等一系列问题,提出了一种基于小波变换的彩色图像去雾方法。首先在RGB颜色空间对图像的RGB三个颜色通道进行直方图均衡处理;同时在YCbCr彩色空间提取Y分量,并对其进行二维离散小波变换,得到一个低频分量和三个高频分量,对低频分量进行同态滤波处理,而对三个高频分量进行限制对比度直方图均衡处理,然后进行二维离散小波逆变换重构高低频部分,最后转换回RGB颜色空间,并将两幅图像进行线性组合,得到最终的去雾图像。仿真实验表明,通过结合主观分析和客观评价标准,该方法与其他去雾方法相比,对比度较高,视觉感较好,亮度较高,颜色恢复较逼真,去雾效果较好。

关键词:小波变换;同态滤波;MALLAT算法;YCbCr彩色空间;RGB颜色空间

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2020)09-0060-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2020.09.011

A Method of Color Image Defogging Based on Wavelet Transform

HE Huan, Turghunjian · ABDUKIRIM, HE Xiao

(School of Mathematical Sciences, Xinjiang Normal University, Urumqi 830017, China)

Abstract: Aiming at a series of problems such as blurred image, low contrast, serious image distortion and difficulty in obtaining important information, we propose a color image defogging method based on wavelet transform. Firstly, histogram equalization is performed for the three color channels of the image in RGB color space. Meanwhile, Y component is extracted from YCbCr color space, and two-dimensional discrete wavelet transform is carried out to obtain one low-frequency component and three high-frequency components. Homomorphic filtering is carried out for the low-frequency components, and restricted contrast histogram equalization is carried out for the three high-frequency components. Then, the high and low frequency parts are reconstructed by two-dimensional discrete wavelet inverse transform, and finally converted back to RGB color space, and the two images are combined linearly to obtain the final defogging image. Simulation results show that combined with the subjective analysis and objective evaluation standard, compared with other defogging methods, the proposed method has higher contrast, better visual perception, higher brightness, more realistic color recovery and better defogging effect.

Key words: wavelet transform; homomorphic filtering; MALLAT algorithm; YCbCr color space; RGB color space

0 引言

在日常生活中,雾天处处发生,雾天造成的能见度下降,视野模糊,看不清前方及周边的情况,容易出现险情,这影响着人们是否可以安全的出行或准确获取重要信息和异物的检测。

目前图像去雾技术一般分为两种:图像增强和图像复原。图像增强一般是提高图像的对比度,它不考虑雾天图像降质的根本原因,但操作起来较简单,容易理解;图像复原一般是基于物理模型或器材。而基于

物理模型的暗原色先验理论最早由何恺明提出,经过该算法处理后的雾霾图像更自然,但图像亮度偏暗,从而导致图像失真。非物理模型的图像增强算法能提高图像的对比度,增强视觉效果,不需要很多的器材。

常用的算法包括直方图均衡算法、自动颜色均衡算法、Retinex算法、线性对比度拉伸等。针对如何去雾,如何更好地获取更多的信息,研究者们提出了很多方法^[1-7]。例如,文献[8]提出一种基于HSI颜色空间的去雾算法;文献[9]提出一种基于改进的自动色彩

收稿日期:2019-10-15

修回日期:2020-02-25

基金项目:国家自然科学基金(11261061,61362039,10661010);新疆维吾尔自治区自然科学基金(200721104);新疆师范大学数学教学资源开发重点实验室招标课题(XJNUSY082017B03)

作者简介:贺欢(1994-),女,硕士研究生,研究方向为小波分析及其应用;通信作者:吐尔洪江·阿布都克力木(1962-),男,教授,博士,研究方向为小波理论及其在图像处理与计算机视觉中的研究及应用。

均衡快速去雾算法;文献[10]提出一种通过深度卷积神经网络对图像进行去雾处理的模型;文献[11-13]将暗通道先验的方法与其他方法结合来去雾;文献[14-15]对雾天图像的明亮区域进行去雾;文献[16]提出对含雾的红外图像进行去雾的算法。

借鉴上述方法,文中将在两个颜色空间处理图像,并将小波变换和同态滤波结合起来,得到的去雾图像信息含量较高,清晰度较好。

1 MALLAT 算法

MALLAT 算法是根据多分辨分析理论发展而成的小波分解和重构的快速算法^[17],图像的 MALLAT 算法采用了可分离的滤波器设计,这样既加快了运算速率,也简化了计算,大大提高了计算效率与准确率。图像的 MALLAT 算法实际上是分别对图像矩阵的行和列做一维小波变换。

文中使用二维小波变换来分解图像,其实质是将图像分解成一个低频图像和多个高频细节图像,二维小波逆变换则是基于分解的结果得到原始图像。每一层离散小波分解都使用小波函数按照行、列将图像分成四个子图像:低频图像、高频水平细节图像、高频垂直细节图像和高频对角细节图像。而四个子图像的大小均为原始图像的四分之一,其中在低频图像包含了大量的图像信息,也拥有着更多的能量,高频图像主要包含图像的细节信息,但是也含有许多影响图像质量的噪声。

MALLAT 小波分解公式如下:

$$\begin{aligned} c_{i+1}[l_1, l_2] &= \sum_{k_1, k_2} h[k_1 - 2l_1] h[k_2 - 2l_2] c_i[k_1, k_2] \\ d_{i+1}^1[l_1, l_2] &= \sum_{k_1, k_2} h[k_1 - 2l_1] g[k_2 - 2l_2] c_i[k_1, k_2] \\ d_{i+1}^2[l_1, l_2] &= \sum_{k_1, k_2} g[k_1 - 2l_1] h[k_2 - 2l_2] c_i[k_1, k_2] \\ d_{i+1}^3[l_1, l_2] &= \sum_{k_1, k_2} g[k_1 - 2l_1] g[k_2 - 2l_2] c_i[k_1, k_2] \end{aligned} \quad (1)$$

MALLAT 小波重构公式如下:

$$\begin{aligned} c_i[l_1, l_2] &= \\ &\sum_{k_1, k_2} \tilde{h}[l_1 - 2k_1] \tilde{h}[l_2 - 2k_2] c_{i+1}[k_1, k_2] + \\ &\sum_{k_1, k_2} \tilde{h}[l_1 - 2k_1] \tilde{g}[l_2 - 2k_2] d_{i+1}^1[k_1, k_2] + \\ &\sum_{k_1, k_2} \tilde{g}[l_1 - 2k_1] \tilde{h}[l_2 - 2k_2] d_{i+1}^2[k_1, k_2] + \\ &\sum_{k_1, k_2} \tilde{g}[l_1 - 2k_1] \tilde{g}[l_2 - 2k_2] d_{i+1}^3[k_1, k_2] \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $i = 0, 1, 2 \dots$ 。

分解过程中用 $\{h\}, \{g\}$ 这一对滤波器,重构过程

中用另一对滤波器 $\{\tilde{h}\}, \{\tilde{g}\}$ 。

2 同态滤波

同态滤波算法^[18]是一种频域图像增强算法,它以照射-反射模型为基础,将频率过滤和灰度变换结合起来运用于图像增强中,在压缩图像动态范围的同时提高图像对比度,从而修正图像光照并增强图像细节,使增强后的图像更加清晰且更符合人类的视觉习惯。雾天图像存在着对比度低,图像亮度整体较低的特点,利用同态滤波可以提高对比度,增强图像中的细节信息。

一幅图像 $f(x, y)$ 可以表示成照射分量 $i(x, y)$ 与反射分量 $r(x, y)$ 的乘积:

$$f(x, y) = i(x, y) r(x, y) \quad (3)$$

对式(3)两边取对数:

$$\ln f(x, y) = \ln i(x, y) + \ln r(x, y) \quad (4)$$

对式(4)两边取傅里叶变换:

$$F(u, v) = I(u, v) + R(u, v) \quad (5)$$

用一频域函数 $H(u, v)$ 处理 $F(u, v)$, 其中 $H(u, v)$ 是同态滤波函数:

$$H(u, v) F(u, v) = H(u, v) I(u, v) + H(u, v) R(u, v) \quad (6)$$

同态滤波函数一般采用如下形式:

$$H(u, v) = (\gamma_H - \gamma_L) H_h(u, v) + \gamma_L \quad (7)$$

通常可用高斯高通滤波器:

$H_h(u, v) = 1 - \exp(-c[D^2(u, v)/D_0^2])$ 来对图像进行处理。

其中, $\gamma_H > 1, \gamma_L < 1$ 可以达到衰减低频,增强高频的目的,常数 c 控制函数坡度的锐利度, $D(u, v)$ 和 D_0 分别表示和频率中心的距离和截止频率。 D_0 越大,对细节的增强越明显,最后归一化之后显示的图像越亮。

将式(6)再反变换到空域:

$$h_t(x, y) = h_i(x, y) + h_r(x, y) \quad (8)$$

再对式(7)两边取指数:

$$g(x, y) = \exp |h_t(x, y)| = \exp |h_i(x, y)| \cdot \exp |h_r(x, y)| \quad (9)$$

可见增强后的图像 $g(x, y)$ 是由分别对应的照射分量和反射分量两部分叠加而成的。

3 YCbCr 彩色空间

YCbCr 彩色空间^[19]是在 YUV 的基础上衍生而来的, Y 为亮度分量, Cb 和 Cr 都指色彩。YCbCr 与 RGB 的互换关系如下:

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.148 & -0.291 & 0.439 \\ 0.439 & -0.368 & -0.071 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} / m \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.164 \times (Y - 16/m) + 1.596 \times (Cr - 128/m) \\ 1.164 \times (Y - 16/m) - 0.813 \times (Cr - 128/m) - 0.392 \times (Cb - 128/m) \\ 1.164 \times (Y - 16/m) + 2.017 \times (Cb - 128/m) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, m 是根据数据类型进行选择的, 如果为 double 类型, RGB 数据的取值范围为 $[0, 1]$, 则 $m = 256$; 如果为 uint8 类型, 数据的取值范围为 $[0, 255]$, 则 $m = 1$ 。YCbCr 彩色空间与 RGB 彩色空间的变换关系, 保证了变换结果一定会在数据类型的表示范围内。

4 实验过程与分析

以 MATLAB R2016a 为实验平台, 选取两张大小均为 366×550 , 格式为 png 的含雾图片作为研究对象。首先在 RGB 空间对图像的 RGB 三个通道进行直方图均衡; 同时在 YCbCr 彩色空间提取 Y 分量, 并对其进行小波变换, 对低频分量进行同态滤波处理, 对三个高频分量进行限制对比度直方图均衡处理, 利用小波逆变换重构高低频部分, 再转换空间, 最后将两幅图像进行线性组合, 得到最终的去雾图像。

4.1 实验步骤

文中对两幅含雾图像进行以下处理:

(1) 在 RGB 空间对图像的 RGB 三个通道直方图的平均值进行直方图均衡, 得到增强图像。

(2) 同时在 YCbCr 空间提取 Y 分量, 并对其进行小波变换, 图 1 是 Y 分量小波分解图, 得到一个低频子图 and 三个高频子图。



图 1 小波分解图

(3) 对低频分量进行同态滤波处理, 对三个高频分量进行限制对比度直方图均衡处理, 如图 2 所示。

(4) 利用小波逆变换重构高低频部分, 再进行空间转换, 得到增强图像 2。



图 2 同态滤波对低频子图处理效果图

(5) 最后将两幅增强图像进行线性组合, 得到最终的去雾图像。

4.2 实验的主观分析

主观视觉评价是一种简单可行而又重要的图像质量评价方法。文中方法与其他方法对图像做去雾处理, 得到的主观效果如图 3 和图 4。对其进行详细分析:

(1) 在图 3 中, 图(a)为原始图像, 图(b)是文献[18]的方法处理的, 可以看到图像整体偏灰白, 部分轿车得到了增强, 但效果不够明朗; 图(c)是采用双边滤波的方法, 和原图像差异不大; 图(d)是文献[20]的方法处理的, 图像的对比度得到提高, 图像整体偏白, 颜色部分失真, 不利于人眼观察; 图(e)是 Retinex 方法处理的, 图像的亮度提高, 对比度增强, 但里面物体的边缘部分产生了很强的光晕现象, 不利于人眼观察; 而图(f)是文中方法处理的, 图像整体亮度较好, 没有明显的光晕现象, 适合人眼观察, 颜色得到了一定的恢复, 失真较少, 去雾效果较明显。

(2) 在图 4 中, 图(a)为原始图像, 图(b)是文献[18]的方法处理的, 图像整体偏灰白, 去雾效果不明显; 图(c)是采用双边滤波的方法处理的, 和原图像没有很明显的区别; 图(d)是文献[20]的方法处理的, 图像的对比度得到提高, 图像有了一定的去雾效果, 但是不够明显; 图(e)是 Retinex 方法处理的, 光晕现象很明显, 图像整体亮度偏高, 有颜色失真现象; 而图(f)

是文中方法处理的,图像整体亮度较好,颜色得到了一定的恢复,失真较少,去雾效果较明显。



(a)原图



(b)文献[18]



(c)双边滤波



(d)文献[20]



(e)Retinex



(f)文中方法

图3 几种方法的效果图(1)



(a)原图



(b)文献[18]



(c)双边滤波



(d)文献[20]



(e)Retinex



(f)文中方法

图4 几种方法的效果图(2)

4.3 实验的客观分析

主观视觉虽然可以直观快速地对图像的质量做出

评价,但一定程度上会受到人的主观感受等的影响,对图像做出的质量评价可靠性不是很好。为进一步说明文中方法的优势,采用信息熵、时间、清晰度和标准差等客观评价标准进行评价,如表 1 所示。

(1)信息熵表示图像的平均信息量,值越大表示图像信息越丰富。

(2)清晰度是衡量图像质量优劣的重要指标,图像的清晰度越高,图像越清晰。

(3)标准差能反映一个数据集的离散程度。

在表 1 中,文中方法在信息熵方面仅次于文献[20];在时间方面优于 Retinex、文献[18]和双边滤波;在清晰度方面仅低于 Retinex;标准差均高于其他方法。

在表 2 中,文中方法的信息熵和清晰度优于其他方法,而在时间方面优于 Retinex、文献[18]和双边滤波;标准差均高于其他方法。

表 1 几种方法的客观评价(1)

方法	信息熵	时间/s	清晰度	标准差
Retinex	7.143 2	0.914 4	10.182 9	46.885 3
文献[18]	6.762 0	0.959 8	0.019 3	0.148 9
文献[20]	7.563 7	0.464 2	0.044 1	0.221 1
双边滤波	6.818 5	5.263 2	0.010 8	0.149 0
文中方法	7.496 2	0.545 9	9.475 7	73.887 1

表 2 几种方法的客观评价(2)

方法	信息熵	时间/s	清晰度	标准差
Retinex	6.635 2	0.954 4	8.115 2	43.343 5
文献[18]	6.371 4	1.963 8	0.012 1	0.096 2
文献[20]	7.061 2	0.548 7	0.026 5	6.277 8
双边滤波	6.245 1	5.068 1	0.005 3	0.078 1
文中方法	7.208 0	0.614 5	8.697 8	69.468 8

5 结束语

针对户外雾天场景下采集到的图像中包含有大量浓雾,使得图像质量降低、影响图像重要信息的提取等问题,根据小波变换和同态滤波的优点,提出一种基于小波变换和同态滤波的彩色图像去雾方法。通过大量实验得到相关数据,综合主观分析图 3、图 4 和客观评价表 1、表 2,并分别将文中方法与其他方法相比,结果表明文中方法获取的信息含量较高,清晰度较好,时间短,操作简便,能有效去除图像光晕,得到细节信息丰富、颜色和亮度增强适中的图像,并满足人眼的需求,是一种行之有效的去雾方法。

参考文献:

[1] KAPOOR R, GUPTA R, SON L H, et al. Fog removal in im-

ages using improved dark channel prior and contrast limited adaptive histogram equalization[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(16): 23281-23307.

[2] YUE Boxuan, LIU Kangling, WANG Ziyang, et al. Accelerated haze removal for a single image by dark channel prior[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2019, 20(8): 1109-1118.

[3] SALAZAR-COLORES S, RAMOS-ARREGUÍN J, PEDRAZA-ORTEGA J, et al. Efficient single image dehazing by modifying the dark channel prior[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2019, 2019(1): 1-8.

[4] 李晓聪. 图像去雾与增强技术的研究与应用[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2019.

[5] 顾振飞, 张登银. 基于变分 Retinex 模型的雾天图像增强方法[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(6): 1386-1394.

[6] SHI Zhenwei, LONG Jiao, TANG Wei, et al. Single image dehazing in inhomogeneous atmosphere[J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(15): 3868-3875.

[7] HODGES C, BENNAMOUN M, RAHMANI H. Single image dehazing using deep neural networks[J]. Pattern Recognition Letters, 2019, 128: 70-77.

[8] 王建新, 张有会, 王志巍, 等. 基于 HSI 颜色空间的单幅图像去雾算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(10): 2990-2995.

[9] 官洪运, 吴 炜, 杨益伟, 等. 基于改进 ACE 算法的快速去雾方法[J]. 计算机仿真, 2019, 36(8): 242-246.

[10] 李晓戈, 薛倩茹. 基于深度卷积神经网络的图像去雾算法[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(8): 189-195.

[11] 张泽浩, 周卫星. 基于暗原色和 Retinex 的夜间图像去雾算法[J]. 电子技术与软件工程, 2019(7): 60-61.

[12] 王高峰, 杨宇宇, 王嘉锐, 等. 基于暗原色先验的自适应参数优化的图像去雾算法研究[J]. 电子设计工程, 2019, 27(7): 1-4.

[13] 朱 维. 基于暗通道先验的数字图像去雾算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.

[14] 龚昌来, 罗 聪, 申志强. 基于暗原色与逆暗原色融合的含明亮区域图像去雾[J]. 液晶与显示, 2016, 31(8): 831-839.

[15] 暴婉婷, 王俊平, 魏书蕾, 等. 天空区域分割修正的图像去雾新算法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2019, 46(2): 164-169.

[16] 董浩伟, 陈 洁. 一种基于大气散射模型和 Retinex 的红外图像去雾算法[J]. 红外技术, 2019, 41(4): 347-356.

[17] 吐尔洪江·阿布都克力木. 小波信号处理基础[M]. 北京: 北京邮电大学, 2014.

[18] 汪秦峰, 陈 莉, 樊泰亭, 等. 基于同态滤波和 Retinex 的图像去雾算法[J]. 火控雷达技术, 2016, 45(2): 44-51.

[19] 高展宏, 徐文波. 基于 MATLAB 的图像处理案例教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.

[20] 吴颖斌. 基于 HSV 颜色模型的直方图均衡化图像去雾技术[J]. 运城学院学报, 2016, 34(6): 60-62.