

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.02.007

# 基于多幅偏振图像的去雾研究

刘同军

(长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 通过利用大气散射退化模型, 结合光的偏振信息, 提出一种多幅偏振图像去雾算法: 通过 He 算法的暗原色理论对雾天图像的无穷远处大气光强的估计, 应用导向滤波对雾天图像传输透射率的优化, 最终有效地复原雾天图像, 得到清晰的去雾图像。实验结果说明, 本算法可以很好地改善雾天图像的质量。

**关键词:** 偏振图像; 暗原色; 图像复原; 导向滤波

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)02-0037-06

## Research of Image Dehazing Based on Multiple Polarization Images

LIU Tongjun

(School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** By using the atmospheric scattering degradation model, combined with the light polarization information and proposed a defogging algorithm with multiple polarization image: combined with the He's Dark Channel theory to estimate the atmospheric light intensity in the infinite distance of fog image, and with the optimization of guided filter to fog image transmission, recovered effectively the fog image and obtained a clear defogging image. The experiments showed that the proposed algorithm is capable of improving fogging image quality.

**Keywords:** polarization image; dark channel; image restoration; guided filter

## 0 引言

在特殊的天气条件(如大雾、沙尘暴以及雨天等)下, 由于空气中存在水滴、悬浮颗粒及其他杂质等对大气光产生散射现象, 导致设备获得的图像严重退化(如目标图像的对比度出现较大的波动, 图像目标的大量细节信息变得模糊, 出现严重失真)。因此, 对雾天图像进行去雾具有现实意义, 本文拟针对雾天图像进行去雾研究。现在, 专家学者对于雾天情况下的图像的研究, 主要有2个方向: 一个以图像增强为主; 另一个以大气散射物理模型为主。

图像增强<sup>[1-9]</sup>方向的研究, 基于数字图像处理技术, 直接利用图像像素信息, 在空间域对雾天采集到的图像信息进行处理, 主要提高目标场景的对比度, 达到图像去雾的效果。由于图像增强没有考虑到雾

天图像退化的其他原因, 如退化的图像会随着场景深度的变化的关系主要是以指数变化等, 因此处理方法简单, 对目标的一些细节信息处理稍有欠缺, 不能满足实际的需求。

大气散射物理的研究<sup>[10-12]</sup>, 基于大气散射成像模型, 对雾天成像系统建立相应的模型, 通过成像过程的反推过程, 获得目标的无雾图像。这种方法主要有2种方向: 一种利用图像中的部分关键的相关信息, 通过模型进行相关的算法处理, 该方法实现形式相对简单, 且对硬件要求小, 最近在这方面的研究比较多, 其中 He 的暗通道算法是主要的研究热点之一; 另一种是通过利用多幅图像信息(比如偏振图像、图像目标的深度信息或者正常天气情况下的图像等)作为辅助, 最终实现去雾效果。这类算法实现起来比较复杂, 可是复原的效果较之前

收稿日期: 2015-10-05

作者简介: 刘同军(1989-), 男, 陕西渭南人, 长春理工大学硕士生, 主要研究方向为图像处理, E-mail: [BruceHome@126.com](mailto:BruceHome@126.com)

的研究有明显的提高, 这为本研究提供了理论指导。本文针对 He 等提出的去雾方法存在的不足, 提出了一种基于偏振特性的图像去雾算法。

## 1 偏振去雾算法

### 1.1 光偏振态的表述

19 世纪中期, 英国科学家 G. G. Stokes 通过对光的偏振特性进行了大量的科学实验, 提出了用一个四维向量来描述光的偏振特性<sup>[2-3,9]</sup>。Stokes 矢量可以描述光的所有形态, 比如自然光、部分以及完全偏振光等。Stokes 矢量为

$$S = [I Q U V]^T \quad (1)$$

式中:  $I$  为偏振光的总光强度值;

$Q$  为水平方向线偏振光的光强度值;

$U$  为与水平方向成  $45^\circ$  线偏振光的光强度值;

$V$  为圆偏振光的光强度值。

Stokes 矢量通常用式 (2) 表示, 即

$$S = \begin{bmatrix} I = \langle E_{Ox}^2 \rangle + \langle E_{Oy}^2 \rangle \\ Q = \langle E_{Ox}^2 \rangle - \langle E_{Oy}^2 \rangle \\ U = \langle 2E_{Ox}E_{Oy}\cos\phi \rangle \\ V = \langle 2E_{Ox}E_{Oy}\sin\phi \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $E_{Ox}$  和  $E_{Oy}$  分别为偏振矢量在  $x$  轴和  $y$  轴方向的分量;

$\phi$  为偏振方向与  $x$  轴的夹角。

由式 (2) 可知, Stokes 矢量能完成部分偏振光在内的偏振光的表示, 且这 4 个参数都可以在实验中测量得到。对于非偏振光中的自然光,  $I > 0$ ,  $U = Q = V = 0$ , 如果对它进行归一化处理, 则  $(1 \ 0 \ 0 \ 0)^T$  即为自然光的 Stokes 矢量。

通常完全偏振光满足一个性质, 即

$$I^2 = Q^2 + U^2 + V^2 \quad (3)$$

完全偏振光中不同偏振光的 4 个参数也有不同。比如圆偏振光满足  $U = Q = 0$ ,  $V \neq 0$ , 可是线偏振光却与它相反,  $U \neq 0$ ,  $Q \neq 0$ ,  $V = 0$ 。

所有不同角度的偏振光的状态不仅可以通过 Stokes 矢量表示, 而且可以获得图像的相应的偏振度, 即

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (4)$$

偏振度  $0 \leq P \leq 1$ , 对于非偏振光 (即自然光),  $P = 0$ ; 完全偏振光的  $P = 1$ ; 而部分偏振光  $0 < P < 1$ <sup>[4]</sup>。在实际应用中, 由于圆偏振光出现的情况很少, 因此, 通常假设  $V = 0$ , 代入式 (4), 可得:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (5)$$

其对应偏振相位角为

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{U}{Q} \right) \quad (6)$$

假设在平面  $xOy$  内, 与水平方向 (即  $x$  方向) 夹角为  $\beta$ , 观测所得到的光强可以通过式 (7) ~ (8) 求得:

$$I(\beta) = \langle E_{Ox}^2 \rangle \cos^2 \beta + \langle E_{Oy}^2 \rangle \sin^2 \beta + \langle E_{Ox}E_{Oy} \rangle \sin 2\beta \quad (7)$$

$$I(\beta) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\beta + U \sin 2\beta) \quad (8)$$

式 (7) 中  $I(\beta)$  是出射光的偏振光强, 即偏振设备在  $\beta$  角度下采集的偏振图像。

转动采集设备的偏振片得到不同偏振角度的图像。旋转偏振片时, 可能会导致采集图像的目标场景产生位移而发生变化, 因此可以用偏振相机来代替需要旋转偏振片的普通数码相机, 这样可以节约图像采集时间, 这种情况下可假设 3 个不同角度的场景变化很微小。

### 1.2 基于偏振特性的去雾算法

通过 Stokes 矢量以及大气散射模型, 建立了一个新的偏振模型, 即将

$$I^c(x) = J^c(x)t(x) + A^c(1-t(x)) \quad (9)$$

改为

$$\frac{2}{3}(I_a(x) + I_\beta(x) + I_f(x)) = J(x)t(x) + A_\infty(1-t(x)) \quad (10)$$

式 (9) ~ (10) 中:  $I^c(x)$  为雾天图像的其中一个颜色通道  $x$  处的像素值,  $c$  为某个颜色通道, 即 R、G 或 B 通道;

$J^c(x)$  为去雾后图像的其中一个颜色通道  $x$  处的像素值;

$t(x)$  为雾天图像  $x$  处的传输透射率;

$A^c$  为雾天图像的其中一个颜色通道大气光值;

$I_a(x)$ ,  $I_\beta(x)$ ,  $I_f(x)$  为不同角度的偏振图像  $x$  处的像素值;

$A_\infty$  为无穷远处的大气光值。

#### 1.2.1 算法描述

通过式 (10), 可以发现通过雾天图像传输透射率  $t(x)$  和无穷远处大气光值  $A_\infty$  的估计, 便可以获得去雾后的图像, 其步骤如下。

##### 1) 雾天图像传输透射率的估计

结合 He 的暗原色先验理论, 首先对式 (9) 进行归一化处理, 其次对等号两侧完成 2 次的最小值滤波: 第一次是对 R、G、B 3 个颜色通道求最小值, 第二次是在一个窗口区域  $\Omega(x)$  内部求最小值, 即

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left( \min_c \left( \frac{I^c(x)}{A^c} \right) \right) = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left( \min_c \left( \frac{I^c(x)}{A^c} \right) \right) + (1 - \tilde{t}(x)) \quad (11)$$

式中  $\tilde{t}(x)$  为雾天图像的粗略传输透射率。

去雾后图像的性质应该适合晴天图像的暗通道定义, 即

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left( \min_c (J^c) \right) = 0 \quad (12)$$

通常, 大气光值的每个通道的  $A^c > 0$ , 可得

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left( \min_c \left( \frac{I^c(x)}{A^c} \right) \right) = 0 \quad (13)$$

式中  $\min_{y \in \Omega(x)} \left( \min_c \left( \frac{I^c(x)}{A^c} \right) \right)$  为雾天图像的像素点  $x$  归一化后的暗通道的强度值。

将式 (13) 代入式 (11) 可得

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left( \min_c \left( \frac{I^c(x)}{A^c} \right) \right) \quad (14)$$

在对图像中天空区域的处理中, 可以把天空区域的光强值看成是和大气光值接近, 即:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left( \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \rightarrow 1 \quad (15)$$

将其代入式 (13), 可得天空区域的传输透射率  $\tilde{t}(x) \rightarrow 0$ , 此图像天空区域不需要做单独的分析处理。为了使复原结果更接近真实情况, 在去雾的过程中仍然会保留一部分的雾, 因此引入了修正参数  $\omega$  ( $0 < \omega < 1$ ), 修改后传输的透射率为:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left( \min_c \left( \frac{I^c(x)}{A^c} \right) \right) \quad (16)$$

修正参数的大小可视情况而定, 在此取值为 0.98, 即去掉雾的程度是 98%。

如果雾天图像的复原图像在  $t(x)$  很小时, 复原图像容易受到噪声干扰, 使得复原图像有可能出现失真。为了避免这种情况的发生, 课题组给传输透射率  $t(x)$  设置了一个  $t_0$  因子, 作为对它的修正, 即

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (17)$$

## 2) 雾天图像传输透射率的优化

由于 He 使用软抠图算法细化传输透射率, 耗费大量时间, 导致算法的实用性降低, 因此课题组提出采用引导滤波器对粗略传输透射率进行快速优化。在以雾天图像中像素点  $x$  为中心的窗口  $\omega_x$  中, 输出图像  $t(y)$  是导向图像  $I(y)$  的局部线性变化<sup>[5-8]</sup>, 即

$$t(y) = a_x I(y) + b_x, \forall y \in \omega_x \quad (18)$$

式中: 假设窗口  $\omega_x$  是保持不变的, 则  $(a_x, b_x)$  是一组线性系数;

$y$  为该区域内的像素。

在处理雾天图像的时候, 主要是选取常规的雾

天图像作为导向滤波器的输入图像 (即  $I(y)$ ), 因为它含有雾天图像目标的所有初始边缘细节信息。由于输入图像和导向图像都是已知, 为了使输出图像  $t(y)$  和导向图像之间的关系和线性系数  $(a_x, b_x)$  相似, 课题组在窗口的设计中提出一个代价函数:

$$E(a_x, b_x) = \sum_{y \in \omega_x} \left( (a_x I(y) + b_x - \tilde{t}(y))^2 + \varepsilon a_x^2 \right) \quad (19)$$

式中  $\varepsilon$  是为了调节  $a_x$  大小的一个系数。

然后采取线性回归法对式 (19) 进行求解, 即

$$a_x = \left( \sum_x + \varepsilon U \right)^{-1} \left( \frac{1}{|\omega_x|} \sum_{y \in \omega_x} I(y) \tilde{t}(y) - \mu_x \tilde{t}(x) \right) \quad (20)$$

$$b_x = \tilde{t}(x) - a_x \mu_x \quad (21)$$

式 (20) ~ (21) 中:  $\sum_x$  为窗口  $\omega_x$  的系数矩阵;

$\tilde{t}(x)$  为  $\tilde{t}(y)$  在窗口区域的像素点均值;

$U$  为单位矩阵;

$\mu_x$  为  $\omega_x$  内均值。

把式 (18) 和 (19) 代入式 (20), 就可以获得雾天图像细化后的传输透射率。

## 3) 雾天图像的大气光值 A 的估计

通过 He 算法对大气光值进行估计, 其步骤如下: 对雾天图像的暗原色里面的像素进行从大到小排序, 选取其中最大的 0.1%, 然后再通过索引, 找到它们对应的雾天图像的像素值, 通过比较, 选取这些像素值里面的最大值近似地作为无穷远处大气光值。这样估计的大气光值容易受到高亮噪声或者白色非天空区域的影响, 因此课题组做了改进, 把这个最大值的  $15 \times 15$  的区间的均值作为大气光值。

### 1.2.2 算法的框图

本文复原算法框图如图 1 所示。

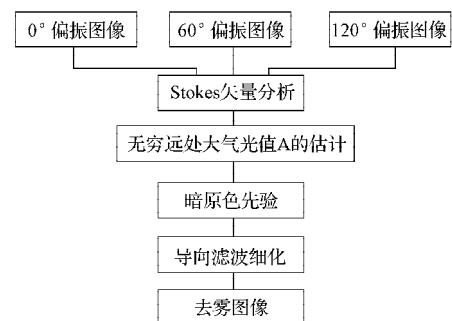


图1 基于偏振特性的图像复原方法

Fig. 1 Image restoration method using polarization characteristics

## 2 实验结果及分析

本次实验的运行环境: ACER E1-470G 笔记本, CPU 为第三代智能英特尔酷睿 i3-3217U, 内存为 4 G, 操作系统为 Windows 7 系统, 雾天复原算法的运行环

境为美国 MathWorks 公司制作的 Matlab 2013b。

### 2.1 主观效果分析

实验中，第 1 组采集的是早晨浓雾图像。如图 2 所示。图 3 为应用不同算法对早晨浓雾图像的去雾效果图。



a) 0°



b) 60°



c) 120°

图2 早晨浓雾下不同角度的偏振光图像  
Fig. 2 Polarization images of different angles in the morning fog



a) He算法



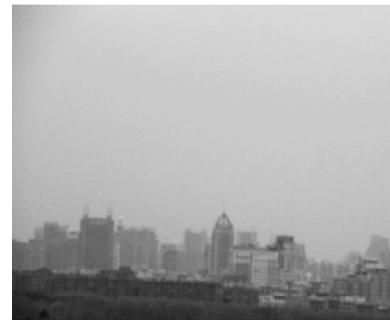
b) Tarel算法



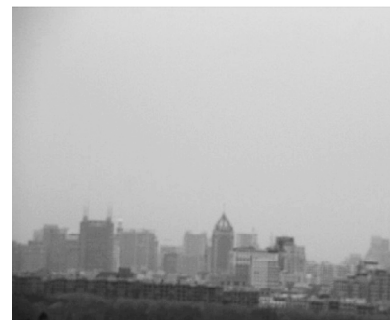
c) 本文算法

图3 基于不同算法的早晨浓雾去雾效果  
Fig. 3 The defogging effects of morning fog using different algorithms

实验第 2 组采集的是傍晚远景薄雾的图像，如图 4 所示。图 5 为应用不同算法对傍晚远景薄雾图像的去雾效果图。



a) 0°



b) 60°



c) 120°

图4 傍晚远景薄雾下不同角度的偏振光图像  
Fig. 4 Polarization images of different angles in the evening mist



a) He算法



b) Tarel算法



c) 本文算法

图5 基于不同算法的傍晚远景薄雾去雾效果

Fig. 5 The defogging effects of evening mist using different algorithms

通过这2组图像数据的分析, 本文的算法在边缘处理的时候有些差错, 但是本算法与其他2种算法相比, 处理后的结果更接近于自然, 图像的细节信息更加明显, 且图像的清晰度有了明显的改善。

## 2.2 客观分析

为了定量地描述图像复原前后的图像质量, 本文主要采用了图像信息熵、标准差和灰度平均值3种参数对图像质量进行评估。这3个参数都是值越大, 表明图像复原的结果越好, 即去雾图像质量越好。第1组实验图像的比较结果如表1所示。

表1 近景不同方法的去雾的客观分析结果

Table 1 The analysis results of different methods about image defogging at near scene

图 像	熵	标准差	灰度均值
He 算法	7.156 0	86.740 3	110.639 6
Tarel 算法	7.348 5	55.112 4	93.569 3
本文算法	7.645 7	105.436 4	175.394 1

第2组实验图像的比较结果如表2所示。

表2 远景不同方法的去雾的客观分析结果

Table 2 The analysis results of different methods about image defogging at distant scene

图 像	熵	标准差	灰度均值
He 算法	7.498 7	169.483 7	71.009 7
Tarel 算法	6.045 5	64.584 6	17.458 6
本文算法	7.893 2	207.629 3	77.952 1

通过对表1~2几组数据的对比分析可以得出, 本文算法在熵、标准差和灰度平均值上明显优于其他2个算法, 并且这3个值较大, 表明去雾图像的质量更好, 所含的信息量更大, 清晰度更高, 说明本算法有效地改善了去雾图像质量、清晰度以及细节信息。

## 3 结语

随着科技的发展, 人们对自身生存环境也越来越重视, 也越来越深入地了解特殊天气(如雾天、霾、沙尘暴等等)的形成机理; 加之偏振理论的应用也越来越深入, 结合之前的去雾算法, 使得图像去雾方面的研究取得了更大的进步, 图像的细节处理也成为了未来计算机视觉和图像处理领域的一个非常热点的问题。

总体来说, 基于大气散射物理模型并且结合偏振特性的图像以及视频的雾天复原方法是图像研究者研究的大趋势, 而且已经取得了一定的成果。本文在大气散射物理模型的基础上, 结合He的暗原色理论, 很好地解决了算法的计算的复杂度上的问题, 利用光的偏振特性有效地实现了雾天等特殊天气下的图像复原。通过本实验的多组实验数据表明: 本文的算法不仅可以有效地去除图像中的雾, 还可以有效地提高图像的细节信息。

## 参考文献:

- [1] 杨 婷. 多幅图像去雾算法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.  
YANG Ting. Research on Fog Removal Methods of Multiple Images[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.
- [2] 周 明. 偏振信心在雾天图像分析中的应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.  
ZHOU Ming. Research of Polarization-Based Analysis of Hazy Image[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [3] 胡 伟, 袁国栋, 董 朝, 等. 基于暗通道优先的单幅

- 图像去雾新方法[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(12): 2132-2139.
- HU Wei, YUAN Guodong, DONG Zhao, et al. Improved Single Image Dehazing Using Dark Channel Prior[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(12): 2132-2139.
- [4] 王帆, 杨燕, 白海平. 基于物理模型的单幅图像对比复原算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(8): 2291-2294, 2300.
- WANG Fan, YANG Yan, BAI Haiping. Contrast Restoration Algorithm for Single Image Based on Physicals Model[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(8): 2291-2294, 2300.
- [5] HE K, SUN J, TANG X. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior[C]//Proceeding of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Miami: IEEE Computer Society, 2009: 1956-1963.
- [6] 杜雨芝. 指导滤波在单幅图像快速去雾算法中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- DU Yuzhi. Applications of Guided Filter in Fast Single Image Dehazing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [7] 夏宏丽, 李钢, 张仁斌, 等. 基于偏振特性的图像去雾算法[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(10): 224-230.
- XIA Hongli, LI Gang, ZHANG Renbin, et al. Image Defogging Algorithm Based on the Polarization Characteristics[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(10): 224-230.
- [8] 彭文竹. 基于大气散射模型的偏振图像去雾算法[J]. 电子测量技术, 2011, 34(7): 43-45.
- PENG Wenzhu. Polarization Dehazing Algorithm Based on Atmosphere Scattering Model[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(7): 43-45.
- [9] 周浦城, 薛模根, 张洪坤, 等. 利用偏振滤波的自动图像去雾[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(7): 1178-1183.
- ZHOU Pucheng, XUE Mogen, ZHANG Hongkun, et al. Automatic Image Dehaze Using Polarization Filtering[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(7): 1178-1183.
- [10] 王勇, 薛模根, 黄勤超. 基于大气背景抑制的偏振去雾算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(4): 271-275.
- WANG Yong, XUE Mogen, HUANG Qinchao. Polarization Dehazing Algorithm Based on Atmosphere Background Suppression[J]. Computer Engineering, 2009, 35(4): 271-275.
- [11] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Chromatic Framework for Vision in Bad Weather[C]//Computer Vision and Pattern Recognition 2000 IEEE Conference. Hilton Head Island: IEEE, 2000: 598-605.
- [12] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the Atmosphere[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.

(责任编辑: 申剑)