

文章编号: 1001-3806(2016)04-0521-05

## 雾天偏振成像影响分析及复原方法研究

汪杰君<sup>1,2,3</sup>, 杨杰<sup>1</sup>, 张文涛<sup>1,2,3</sup>, 王新强<sup>1,2,3</sup>, 叶松<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学 广西高校光电信息处理重点实验室, 桂林 541004; 3. 桂林电子科技大学 广西自动检测技术与仪器重点实验室, 桂林 541004)

**摘要:** 为了抑制雾天图像质量的退化, 基于大气散射物理模型及偏振图像暗通道原理, 提出了一种改进的雾天偏振遥感图像去雾算法。首先依据大气散射模型对雾天偏振成像机理进行分析, 对大气偏振信息对去雾的影响进行了阐述。其次利用边缘检测和闭运算自动获取雾天偏振图像的天空区域, 估算无穷远大气光强和大气偏振度。最后, 针对图像中存在的噪声干扰等因素, 修正大气偏振度及大气光强, 恢复了退化图像的辐射强度信息。通过理论分析和实验验证, 取得了较好的雾天图像复原结果。结果表明, 该算法可以准确获取天空区域, 实现更高鲁棒性的天空区域估计方法, 有效提高图像的对比度和清晰度, 增加图像细节, 改善雾天图像的质量。该算法能够有效抑制雾天对图像造成的退化, 从而提高遥感的目标探测和识别能力。

**关键词:** 散射; 偏振; 滤波; 图像复原

中图分类号: P407

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.014

## Analysis and restoration research of fog polarization imaging

WANG Jiejun<sup>1,2,3</sup>, YANG Jie<sup>1</sup>, ZHANG Wentao<sup>1,2,3</sup>, WANG Xinqiang<sup>1,2,3</sup>, YE Song<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** To solve the quality degradation problem of fog polarization imaging, an improved defogging method was proposed based on physical model of atmospheric scattering and dark passage principle of polarization images. Firstly, based on atmospheric scattering model, fog polarization imaging mechanism was analyzed and effect of atmospheric polarization on defogging was explained. Secondly, based on edge detection operator and closing operation, sky region of fog polarization image was obtained, and light intensity of infinity atmospheric and degree of polarization of atmospheric were estimated. At last, to solve the existing factors in the image such as noise interference, radiation intensity information of the degraded image was restored by modifying the degree of polarization and light intensity distribution of atmospheric. After theoretical analysis and experimental verification, good results of foggy image restoration were achieved. The results show that the algorithm can accurately obtain the sky region and improve the contrast and sharpness of the image, and improve the degradation of the image. Therefore, the algorithm can effectively inhibit the degradation of the image caused by fog, and improved target detection and identification capability of remote sensing.

**Key words:** scattering; polarization; filter; image restoration

## 引言

雾天条件下, 探测系统受到大气散射的影响而导

致成像质量下降; 另一方面, 随着景物与成像系统距离增加, 大气散射光强度增大, 而场景光强减小, 也使得图像的噪声影响更加严重<sup>[1]</sup>。这些因素都造成遥感成像系统获得的图像严重退化, 影响了对目标的探测。因此, 研究雾天遥感图像的复原具有重要的现实意义。

目前, 国内外已有多种方法对雾天图像进行复原以提高图像质量。一类基于图像复原, 此方法不考虑图像的退化原因, 去雾后一些图像信息会丢失。另一类基于大气物理散射模型, 此方法需获得景物深度信息和大气光信息。如 FATTAL 等人利用平滑约束<sup>[2-3]</sup>或者图像的

基金项目: 广西教育厅高校科学技术研究资助项目 (ZD2014053); 广西自动检测技术与仪器重点实验室基金 (YQ14108; YQ15111)

作者简介: 汪杰君 (1974-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事光电检测和遥感信息处理等研究。

E-mail: wangjiejun@guet.edu.cn

收稿日期: 2015-04-30; 收到修改稿日期: 2015-06-08

先验条件<sup>[46]</sup>使用单幅图像实现去雾。ENESI 等人<sup>[7]</sup>利用同一场景不同天气状况下的图像获取场景信息,但该方法时效性比较差。SCHECHNER 等人<sup>[8-11]</sup>使用两幅偏振方向的场景图像获取场景信息对图像复原。ZHOU 等人<sup>[12]</sup>提出自适应图像复原。XIA 等人<sup>[13]</sup>提出结合暗原色先验原理复原得到场景的辐射强度信息,达到恢复雾天图像细节信息效果。

本文中针对目前去雾算法在获取天空区域和修正大气光信息存在的不足,改进了偏振滤波去雾算法,提高了遥感图像的去雾效果。

### 1 偏振成像影响分析

根据大气散射模型(如图1所示),在雾天条件下成像系统得到的强度信息由两部分组成:场景光强  $D(x,y)$  和大气光强  $A(x,y)$ 。

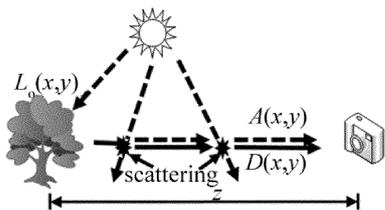


Fig. 1 Atmospheric scattering model

$$D(x,y) = L_0 e^{-\beta z} \quad (1)$$

式中,  $L_0$  表示无散射时景物的辐射强度;  $\beta$  表示大气的散射系数;  $z$  表示场景到观测点的距离。

$$A(x,y) = A_\infty (1 - e^{-\beta z}) \quad (2)$$

式中,  $A_\infty$  表示无穷远处的大气光强。传统成像系统获取的图像总光强  $I_1(x,y)$  可表示为:

$$I_1(x,y) = D(x,y) + A(x,y) \quad (3)$$

由(1)式~(3)式得到去雾后景物辐射强度的表达式:

$$L_0(x,y) = [I_1(x,y) - A(x,y)] / [1 - A(x,y)/A_\infty] \quad (4)$$

场景深度信息  $\beta z$  的表达式为:

$$\beta z = -\ln[1 - A(x,y)/A_\infty] \quad (5)$$

为进一步分析大气光强  $A(x,y)$  对采集信号的影响,定义:

$$\alpha = A(x,y)/I_1(x,y) \quad (6)$$

由(1)式、(2)式、(3)式和(6)式得:

$$\alpha = A(x,y)/I_1(x,y) = 1 / \{1 + 1/[\kappa(e^{\beta z} - 1)]\} \quad (7)$$

式中,  $\kappa = A_\infty/L_0$ 。  $\alpha$  与  $\beta z$  的关系曲线如图2所示。

由图2可以看出:当场景深度满足  $\beta z \geq 0.2$  时,  $I_1(x,y)$  主要由大气光  $A(x,y)$  决定;当  $\beta z = 1$  ( $\kappa = 5.0$ ) 时,  $\alpha = 0.8957$ , 因此大气光的信息对去雾图像质量的影响较大。当使用偏振成像的方式时,以偏振片方向与大气散射光偏振方向平行的情况为例,(6)式可表示为:

$$\alpha_{//} = A_{//}(x,y)/I_{//}(x,y) = \{1 + 1/[\kappa(e^{\beta z} - 1)(1 - p)]\}^{-1} \quad (8)$$

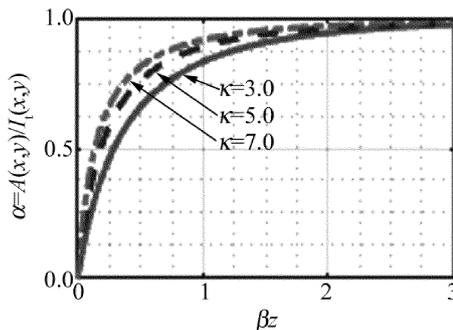


Fig. 2 Relationship of  $\alpha$  and  $\beta z$

式中,  $p$  为大气偏振度。

$\alpha_{//}$  与  $\beta z, p$  的关系曲线如图3所示,其中  $\kappa = 5.0$ 。由图3a与图2的比较可以看出,使用偏振片后减弱了大气光强在总光强中的比重。图3b中显示了当  $\beta z$  为定值时大气偏振度  $p$  对  $\alpha$  的影响,当  $\beta z \geq 2.0$  时,大气偏振度  $p$  对  $\alpha$  的影响很小。在自然条件下,一般  $p \leq 0.75$ <sup>[14]</sup>,同时地面物体的反射率一般比较小,因此,在利用大气偏振特性去雾时,可以把大气光强偏振度作为常量处理。

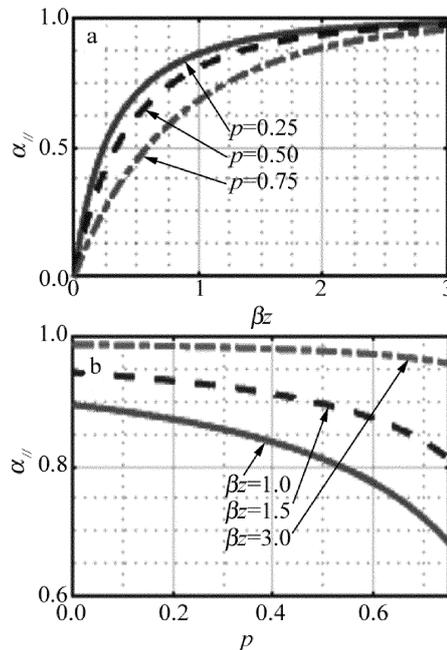


Fig. 3 Relationship of  $\alpha, \beta z$  and  $p$  after using the polarizer  
a— $p$  is fixed b— $\beta z$  is fixed

### 2 去雾算法描述

基于偏振滤波算法的图像去雾质量主要受  $A_\infty$  和  $p$  的影响,而能否准确获取天空区域直接影响这两个参量的估算精度。目前获取天空区域的方法多以天空亮度与非天空区域的亮度差异为依据,当图像中存在高反射物体或白色物体则影响天空区域的准确获取,

从而影响去雾效果。针对上述不足,作者提出以边缘检测和闭运算对场景进行图像分割的思路分离天空区域,经实验验证,这种方法可有效避免高亮度和高反射物体的影响,实现了更高鲁棒性的天空区域估计方法。

### 2.1 获取天空区域

首先定义偏振图像的暗通道<sup>[12]</sup>:

$$I_d(x,y) = \min_{\theta_i \in \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k\}} (\min_{(s,t) \in W(x,y)} (I_{\theta_i}(s,t))) \quad (9)$$

式中,  $W(x,y)$  是以像素点  $(x,y)$  为中心的局部区域。 $I_{\theta_i}$  是当确定起偏器  $0^\circ$  参考方向后,第  $i$  个偏振方向  $\theta_i$  的图像。使用边缘检测对暗通道图像  $I_d(x,y)$  进行边缘分割,然后对获得的边缘图像闭运算操作,初步分离图像的天空区域  $I_s(x,y)$ 。此时,获得天空区域灰度值为 0,非天空区域灰度值为 1 的二值图像  $I_s(x,y)$ 。

结合天空区域的亮度信息和场景亮度信息的差异特性,进一步分离场景的天空区域。在区域  $(I_s(x,y) = 0)$  寻找  $I_d(x,y)$  中对应亮度最大的局部区域:

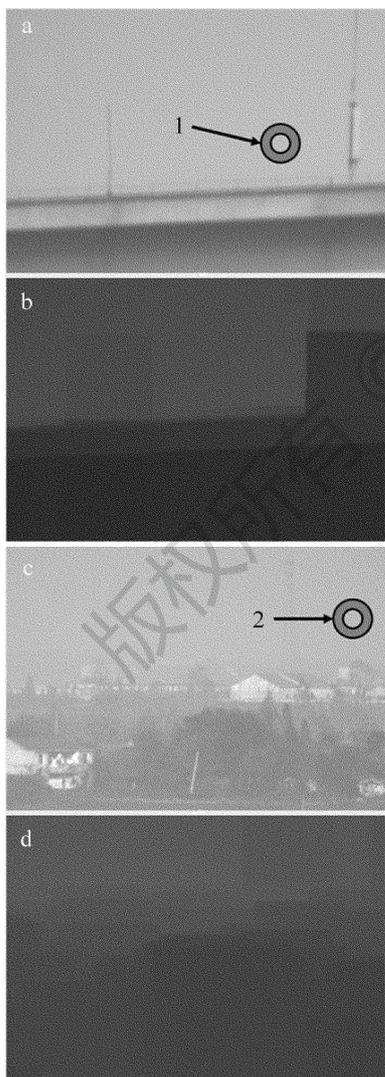


Fig. 4 Image segmentation of sky region

a—scene 1 b—dark-channel image of scene 1 c—scene 2 d—dark-channel image of scene 2

$$\Psi = (x,y) | I_d(x,y) \geq T, \\ ((x,y) \in I_s(x,y) = 0) \quad (10)$$

式中, 阈值  $T$  选取在  $I_d(x,y)$  区域  $(I_s(x,y) = 0)$  中最大值的 0.98 倍。

本文中选取如图 4 所示两组不同场景图像(由中国科学院安徽光学精密机械研究所研发的地面偏振相机拍摄的 443nm 波段图像)检验此算法的可行性。为方便观察,图 4 中截取近天空区域,图 4a 中的 1 标记为场景 1 的天空区域;图 4b 为场景 1 的暗通道图像;图 4c 中的 2 标记为场景 2 的天空区域;图 4d 为场景 2 的暗通道图像。通过图 4 所示,证明这种方法能够准确地获取天空区域,能够有效消除场景中高反射率和高亮度物体对获取天空区域的干扰。

### 2.2 估算大气散射光强度及偏振度

光波的偏振态可用 Stokes 参量  $[I_1 \ Q \ U \ V]^T$  表示,其中  $V$  分量一般可忽略不计。当确定起偏器  $0^\circ$  参考方向后,偏振方向  $\theta_i$  的光强表示为:

$$I(\lambda, \theta_i) = [I_1 + Q \cos(2\theta_i) + U \sin(2\theta_i)]/2 \quad (11)$$

由偏振方向  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$  的 3 幅偏振图像,根据 (11) 式求解 Stokes 参量  $I_1(x,y), Q(x,y)$  和  $U(x,y)$ :

$$\begin{cases} I_1(\lambda) = \frac{2}{3}[I(\lambda, 0^\circ) + I(\lambda, 60^\circ) + I(\lambda, 120^\circ)] \\ Q(\lambda) = \frac{2}{3}[2I(\lambda, 0^\circ) - I(\lambda, 60^\circ) - I(\lambda, 120^\circ)] \\ U(\lambda) = \frac{2}{\sqrt{3}}[I(\lambda, 60^\circ) - I(\lambda, 120^\circ)] \end{cases} \quad (12)$$

由 Stokes 参量可得到线偏振度图像:

$$P_{l_1}(x,y) = \sqrt{Q(x,y)^2 + U(x,y)^2}/I_1(x,y) \quad (13)$$

当  $z \rightarrow \infty$  时,大气透过率  $t(z) \rightarrow 0$ ,此时可得到:

$$I_1 \rightarrow L_0 t(z) + A_\infty [1 - t(z)] \rightarrow A_\infty \quad (14)$$

$$P_{l_1} \rightarrow p \quad (15)$$

根据第 2.1 节中估算的天空区域  $\Psi$  估算大气光信息:无穷远处大气光  $A_\infty$ 、大气偏振度  $p$  为:

$$\begin{cases} A_\infty = \frac{1}{N} \sum I_1(\Psi) \\ p = \frac{\Delta I(\Psi)}{I_1(\Psi)} = \frac{1}{N} \sum P_{l_1}(\Psi) \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $N$  为区域  $\Psi$  元素个数。则大气光强  $A(x,y)$  为:

$$A(x,y) = P_{l_1}(x,y) I_1(x,y)/p \quad (17)$$

### 2.3 修正大气散射光信息

由于图像噪声等因素的影响,即使上述  $A_\infty$  和  $p$  的计算准确,也会降低最终的去雾图像质量。例如,不稳定噪声的存在,使得  $A \rightarrow A_\infty$ ,造成估算的景物辐射度趋于无穷大。针对上述因素的影响,需要对  $p$  进行修正:

$$p \rightarrow \varepsilon p \quad (18)$$

式中,  $\varepsilon$  为修正因子 ( $1 \leq \varepsilon \leq 1/p$ )。当  $\varepsilon = 1$  时, 则得到 (4) 式; 当  $\varepsilon p = 1$  时, 大气光为完全偏振光,  $D(x, y) = I_{//}(x, y)$ 。本文中采用归一化互信息估算  $\varepsilon$  值:

$$p \rightarrow \varepsilon p = \arg \max(H(A, D)) \quad (19)$$

式中,  $1 \leq \varepsilon \leq 2$ , 步长取值为 0.01。  $H(A, D)$  为  $A, D$  归一化互信息。

由 (3) 式分析可知, 在大气光强  $A(x, y)$  中的噪声也同样存在场景光强  $D(x, y)$ , 因此为提高场景光强  $D(x, y)$  的信噪比, 应对大气光去噪, 此时 (3) 式可表示为:

$$I_1(x, y) = D_s(x, y) - A_d(x, y) \quad (20)$$

式中,  $D_s(x, y)$  是去噪后的场景光强,  $A_d(x, y)$  是去噪后的大气光强。

基于大气光强  $A(x, y)$  随场景由远及近变化时, 呈指数衰减的规律, 采用顺序滤波和高斯平滑对  $A(x, y)$  进行修正。由修正后的  $A(x, y)$  和  $p$  计算得到  $L_o(x, y)$ 。

### 2.4 算法流程

综上所述, 本文中去雾算法流程简述如下: (1) 由  $0^\circ, 60^\circ$  和  $120^\circ$  偏振图像根据 (12) 式计算 Stokes 参量, 由 (13) 式计算  $P_{I_1}(x, y)$ ; (2) 根据 (9) 式计算  $I_d(x, y)$ , 利用边缘检测算子和闭运算获取天空区域  $I_s(x, y)$ , 由 (10) 式估算天空区域  $\Psi$ ; (3) 根据 (16) 式估算  $A_o$  和  $p$ , 由 (17) 式计算  $A(x, y)$ ; (4) 根据 (19) 式、(20) 式修正  $p$  和  $A(x, y)$ , 由 (4) 式计算去雾后图像  $L_o$ 。

### 3 去雾算法实验结果与分析

为验证本文中算法的去雾效果, 采用由中国科学院安徽光学精密机械研究所研发的地面多波段偏振

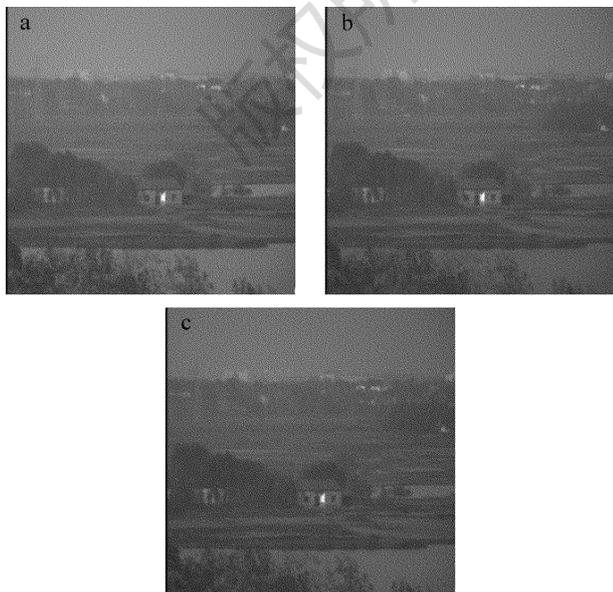


Fig. 5 Foggy images of different polarization directions

a— $0^\circ$  polarized image b— $60^\circ$  polarized image c— $120^\circ$  polarized image

CCD 相机拍摄 443nm 波段的偏振图像进行测试。偏振相机获取的原始图像分别为偏振方向在  $0^\circ, 60^\circ$  和  $120^\circ$  的偏振辐射图像, 如图 5 所示。

本文中, 暗通道  $W$  窗口像素大小为  $7 \times 7$ , 顺序滤波的窗口像素大小为  $3 \times 3$ , 高斯平滑参量取为: 窗口像素大小  $5 \times 5$ , 标准差  $\sigma = 0.45$ 。本文中算法获得的天空区域如图 6 中黑色区域所示。

由图 6 可见, 本文中算法能够准确获取天空区域, 提高了后续对无穷远大气光强  $A_o$  和大气偏振度  $p$  的估算精度, 大气光强  $A$  修正前后的对比如图 7 所示。



Fig. 6 Sky region

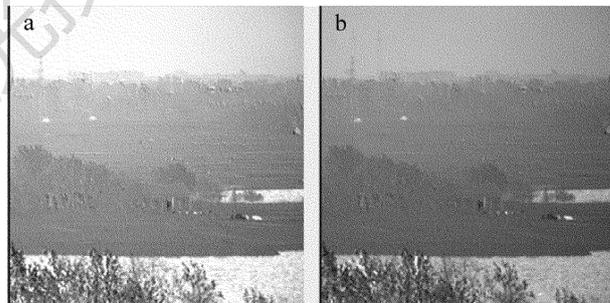


Fig. 7 Contrast of airlight before and after correction

a—before correction b—after correction

对比图 7a 和图 7b 可以发现, 通过本文中的算法对大气光修正后, 有效抑制了大气光强  $A$  的噪声对去雾质量的影响, 本文中算法最终去雾后图像复原结果如图 8 所示。与源图像对比可以发现, 本文中算法有效改善了雾天造成的图像退化, 提高了图像的清晰度和细节信息。



Fig. 8 The image after defogging

本文中去雾后图像的景深信息,由(5)式可得场景的深度信息,如图 9 所示。由图 8 变化表明,本文中算法去雾后的深度信息比较符合图像场景目标的实际位置,复原了景深信息。

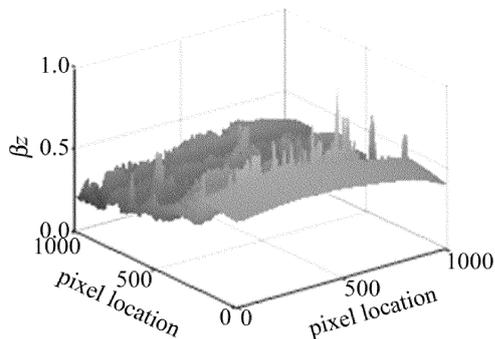


Fig. 9 The depth information map  $\beta_z$

去雾后与去雾前图像的直方图对比如图 10 所示,横坐标为遥感影像像元亮度值。由图 10 可知,去雾后图像的灰度级分布较均匀,在整个灰度级上得到了显著扩展,即去雾后的图像灰度级的动态范围特性得到增加,对比度得到了提高。

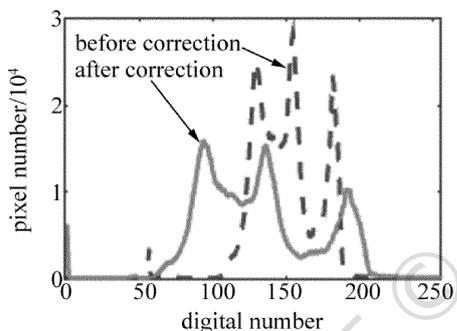


Fig. 10 Comparison of Histogram before and after restoration

为分析本文中算法的去雾效果,选择图像熵、平均梯度和灰度方差 3 个评价指标与自适应偏振滤波去雾算法<sup>[12]</sup>传统偏振去雾算法<sup>[15]</sup>进行对比,结果见表 1。表 1 中的数据表明,本文中算法在这 3 个评价指标中都有较大的提高,平均梯度和灰度标准差的改善更为明显,即本文中算法去雾后图像的细节更好,图像质量较好。

Table 1 Quantitative comparison of different algorithms

	entropy	average gradient	standard deviation
intensity image	6.1764	2.0958	21.5003
traditional algorithm	6.5974	2.7036	49.4600
adaptive filter	6.8112	3.7102	29.3653
paper algorithm	7.2278	5.2401	55.6308

#### 4 结束语

在获取天空区域和大气光信息修正这两个方面改进了偏振去雾算法。通过对偏振暗通道图像采用边缘

检测和闭运算的方法分离天空区域,实现一种更高鲁棒性的天空区域估计方法,经验证分析,此方法能够较准确地分离出天空区域,提高了场景深度信息和大气光信息的估算准确度。针对图像中存在的噪声干扰等因素,对大气偏振度和大气光信息进行修复,优化了场景深度信息。通过实验分析比较,本文中算法提高了图像的平均梯度、灰度标准差和图像熵,改善了去雾后图像的对比度和清晰度,实现了较好的去雾效果。

#### 参考文献

- [1] TREIBITZ T, SCHECHNER Y Y. Recovery limits in pointwise degradation [C] //Computational Photography. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2009:1-8.
- [2] FATTAL R. Single image dehazing[J]. ACM Transaction on Graphics, 2008, 27(3):72-80.
- [3] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C] //Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2008:1-7.
- [4] KOPF J, NEUBERT B, CHEN B, et al. Deep photo: Model-based photograph enhancement and viewing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5):1-10.
- [5] TAN K, OAKLEY J. Physics-based approach to color image enhancement in poor visibility conditions[J]. Journal of the Optical Society of America, 2001, A18(10):2460-2467.
- [6] 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.
- [7] ENESI I, MIHO R. A fast algorithm for contrast restoration of weather degraded images [C] //Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS). Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2012:636-641.
- [8] NAMER E, SHWARTZ S, SCHECHNER Y Y. Skyless polarimetric calibration and visibility enhancement[J]. Optics Express, 2009, 17(2):472-493.
- [9] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Polarization-based vision through haze[J]. Applied Optics, 2003, 42(3):511-525.
- [10] KRAFTORY R, SCHECHNER Y Y, ZEEVI Y Y. Variational distance-dependent image restoration [C] //Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2007:1-8.
- [11] SCHECHNER Y Y, AVERBUCH Y. Regularized image recovery in scattering media[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(9):1655-1660.
- [12] ZHOU P Ch, XUE M G, ZHANG H K, et al. Automatic image dehaze using polarization filtering[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(7):1178-1183 (in Chinese).
- [13] XIA H L, LI G, ZHANG R B, et al. Image defogging algorithm based on polarisation characteristics[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(10):224-226 (in Chinese).
- [14] TREIBITZ T, SCHECHNER Y Y. Polarization: beneficial for visibility enhancement [C] //Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2009:525-532.
- [15] LIANG T Q, ZHAO Q, SUN X B, et al. Research on image restoration by polarized remote sensing through haze [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(2):244-247 (in Chinese).