

3个任意角度与2个正交角度偏振图像复原实验比较

赵长霞 段 锦 王欣欣 白思克 陈天威

长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 针对雾天降质图像,提出了一种新的有雾偏振图像复原方法。对大气光强及传输率函数进行估计,并优化传输率函数,利用大气散射模型,对3个任意角度的偏振图像进行图像复原,以实现图像去雾。实验比较了3个任意角度与2个正交角度偏振图像复原质量。实验结果表明,该方法提高了图像的清晰度及对比度,有效改善了雾天的降质图像,且3个偏振图像的角度选取是任意的,不需对偏振角度进行配准,有利于工程的实际应用。

关键词 图像处理; 偏振图像; 图像去雾; 偏振角度; 大气散射模型; 暗原色先验

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101005

Experimental Comparison of Polarization Image Restoration of Three Random Angles and Two Orthogonal Angles

Zhao Changxia Duan Jin Wang Xinxin Bai Sike Chen Tianwei

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

Abstract For fog-degraded images, a new method of restoring polarization image is proposed. Estimate the atmospheric light intensity and transmission rate function are estimated, and the transmission rate function is optimized to realize image defogging based on atmospheric scattering model for three random angle polarization images. Polarization image restoration quality of 3 random angles and 2 orthogonal angles are compared in this experiment. Experimental results show that the proposed algorithm improves the image's definition and contrast, and effectively improves degraded images in the haze condition. The angles of 3 polarization images are arbitrary. It is not necessary to carry on the registration of the polarization angle, and beneficial for the practical application of the engineering.

Key words image processing; polarization image; image defogging; polarization angle; atmospheric scattering model; dark channel prior

OCIS codes 100.2960; 110.3000; 290.1310

1 引言

雾天条件下,由于大气对光的折射、散射、吸收作用,使获得的图像分辨率和对比度降低,造成图像质量退化,应用价值降低。因此,研究雾天图像的复原具有更重要的现实意义。目前已有的去雾算法大致可分为两类:图像复原和图像增强。图像增强方法不考虑退化原因,会造成一定程度的有效信息损失。图像复原是研究图像退化的物理过程,并建立退化模型,反演退化过程,从而得到退化前的图像。这种方法针对性强,有效信息损失少,复原效果更好,因此图像复原方法成为图像去雾技术研究的热点。

对于利用图像复原方法研究图像去雾技术,国内外研究者作了许多研究。夏宏丽等^[1]提出一种基于偏振特性的图像去雾算法,该算法相对于有天空区域图像准确性较好,但对于无天空区域图像该算法适用性较差。彭文竹^[2]提出了一种基于大气散射模型的偏振图像去雾算法,该算法利用两个正交角度上的偏振图像进行复原图像,但是该方法去雾效果和稳定性很大程度上依赖于大气光的部分偏振特性,有效性较低。周浦城等^[3]针对雾天退化图像,提出一种自适应图像复原方法,该方法能够改善图像质量,但没有考虑场景深

收稿日期: 2015-04-20; 收到修改稿日期: 2015-07-11; 网络出版日期: 2015-09-23

作者简介: 赵长霞(1990—),女,硕士研究生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: zhaochangxia0310@126.com.

导师简介: 段 锦(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事图像处理、环境仿真等方面的研究。

E-mail: duanjin@vip.sina.com

度对偏振度的影响,而是近似认为偏振度是全局常数,导致离视点较远的场景区域去雾效果下降;王勇等^[4]提出一种基于大气背景抑制的偏振去雾算法,结合大气散射物理模型得到场景辐射度,完成图像去雾,算法优点在于利用三个任意偏振方向的图像均实现图像去雾,有利于工程实现,但算法对于无穷远处光强求取不够精准。Nayar等^[5-7]简化大气传输模型,采集得到同一场景不同天气条件下的两幅图像,求得景物深度信息和大气光强信息,从而复原得到清晰图像,但对于分辨率退化较高的图像,该算法受到限制,随后作者又对算法进行改进,提出了基于单幅雾天退化图像的复原方法,不足是需要用户指定过多的输入,如天空区域,场景深度信息,精确的大气散射系数等信息。Schechner等^[8-9]根据大气偏振特性获取场景的深度信息,最终复原雾天降质图像,但其需要通过手工选取图像中的区域来估计相关参数,不便于计算机自动处理。

本文在大气散射模型的基础上,利用光的偏振特性,通过实验比较了3个任意角度与2个正交角度偏振图像的复原效果,并通过图像质量评价指标进行去雾效果验证和评价^[10]。

2 大气散射模型

McCartney于1975年提出了著名大气散射模型,即在雾天情况下,大气散射模型中起主导作用的是其中的衰减模型和环境光模型两个模型。衰减模型描述了光从场景点传播到观测点之间的削弱过程。若用 $D(d, \lambda)$ 表示观测点接收到的场景点光强,则这一过程可以表示为

$$D(d, \lambda) = D_0(\lambda) \exp[-\beta(\lambda)d], \quad (1)$$

式中 d 是场景点到观测点的距离,通常称为光程, λ 是光的波长, $\beta(\lambda)$ 称作大气的散射系数,表示单位体积的大气对光的散射能力, $\beta(\lambda)d$ 一般称为光学深度, $D_0(\lambda)$ 是场景点处的辐照度,其代表发出的光强。

环境光模型描述了周围环境中的各种光经过大气粒子散射后,对观测点所观测到的光强的影响。环境光包括直射的阳光、天空漫射的光线和地面反射的光线等。若用 $A(d, \lambda)$ 表示观测点接收到的环境光强, $A_\infty(\lambda)$ 代表周围环境光的总强度,则这一模型可表示为

$$A(d, \lambda) = A_\infty(\lambda) \{1 - \exp[-\beta(\lambda)d]\}, \quad (2)$$

式中参数 d 、 λ 、 $\beta(\lambda)$ 的定义与(1)式相同。

根据以上两个模型描述,雾天情况下,观测者接收到的点光强主要由两部分组成。雾天的物理模型可表示为

$$I(d, \lambda) = D(d, \lambda) + A(d, \lambda). \quad (3)$$

传输率函数 $t(x)$ 反映了光线对雾的穿透能力,且 $t(x) = \exp[-\beta(\lambda)d(x)]$ 。综上,雾天图像的去雾模型为

$$D(x) = \frac{I(x) - A_\infty[1 - t(x)]}{t(x)}. \quad (4)$$

3 偏振图像探测的基本原理

一束光通过光学系统后,出射光的斯托克斯矢量 S_{out} 和入射光的斯托克斯矢量 S_{in} 之间有如下关系^[11]

$$S_{out} = MS_{in}, \quad (5)$$

式中 M 为穆勒矩阵,用来描述光学系统中元件的特性,若经过 n 个器件,则

$$S_{out} = M_n M_{n-1} \cdots M_2 M_1 \cdot S_{in}. \quad (6)$$

由于自然界中圆偏振分量极少,易被噪声覆盖,在实际的探测中,圆偏振对整个探测结果几乎没有影响,故只考虑线偏振光的情况。当线偏振的偏振方向与 X 轴的夹角为 θ 时,穆勒矩阵可以表示为

$$M_\theta = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

代入(1)式,可得:

$$\begin{bmatrix} I'(\theta) \\ Q'(\theta) \\ U'(\theta) \\ V'(\theta) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 $S_{in} = [I \ Q \ U \ V]'$, $S_{out} = [I'(\theta) \ Q'(\theta) \ U'(\theta) \ V'(\theta)]'$ 。 $I'(\theta)$ 即为接收端探测到的光强图像,其表达式为

$$I'(\theta) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\theta + U \sin 2\theta). \quad (9)$$

利用任意3个角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的偏振图像,可求得斯托克斯矢量 (I, Q, U) ^[12]:

$$\begin{cases} Q = \frac{[\sin(2\theta_2) - \sin(2\theta_1)][2I'(\theta_3) - 2I'(\theta_1)] - [\sin(2\theta_3) - \sin(2\theta_1)][2I'(\theta_2) - 2I'(\theta_1)]}{[\cos(2\theta_3) - \cos(2\theta_1)][\sin(2\theta_2) - \sin(2\theta_1)] - [\cos(2\theta_2) - \cos(2\theta_1)][\sin(2\theta_3) - \sin(2\theta_1)]} \\ U = \frac{[\cos(2\theta_2) - \cos(2\theta_1)][2I'(\theta_3) - 2I'(\theta_1)] - [\cos(2\theta_3) - \cos(2\theta_1)][2I'(\theta_2) - 2I'(\theta_1)]}{[\cos(2\theta_2) - \cos(2\theta_1)][\sin(2\theta_3) - \sin(2\theta_1)] - [\cos(2\theta_3) - \cos(2\theta_1)][\sin(2\theta_2) - \sin(2\theta_1)]} \\ I = 2I'(\theta_1) - \cos(2\theta_1) \cdot Q - \sin(2\theta_1) \cdot U \end{cases}. \quad (10)$$

传统的偏振图像去雾方法一般采用2个正交角度的偏振图像的复原。对于线偏振成像系统总光强 $I(x)$ 为

$$I(x) = I_{//}(x) + I_{\perp}(x), \quad (11)$$

式中 $I_{//}(x)$ 表示水平线偏振光的强度, $I_{\perp}(x)$ 表示垂直线偏振光的强度。

4 偏振图像去雾方法的各参数求取

由雾天图像的去雾模型可知,需要求取3个任意角度偏振图像总光强 $I(x)$, 无穷远处大气光强 A_{∞} , 传输率函数 $t(x)$ 。 $I(x)$ 可以根据(6)式求取,求取 A_{∞} 及 $t(x)$ 的方法如下。

4.1 基于暗原色先验估计传输率函数 $t(x)$ 与大气光强 A_{∞}

根据暗原色先验可知,一般情况下,在无雾图像里都至少存在一个强度值很低的颜色通道,其被雾笼罩后亮度值变大,因此,被雾覆盖的图像区域的暗原色具有较高的强度值。由此可根据这些暗像素来估计大气光的透射信息。其中暗通道的定义为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} [J^c(y)] \right\}, \quad (12)$$

式中 J^c 是图像 J 的某一个颜色通道, $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的一个方形区域。在不考虑天空区域的情况下, J^{dark} 的强度值通常很低且趋近于零。

基于(12)式,通过各种运算,可以简单地估算出传输率函数:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_c \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[\frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\}. \quad (13)$$

事实上,图像中有无天空区域并不需要单独进行区分,(10)式可以较好地处理。为了让去雾后的图像看起来更加真实自然,将(10)式引入一个常数 ω ($0 < \omega \leq 1$),由此来修正传输率函数可得

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

式中 ω 的取值根据具体情况而定。

综上,得到的去雾模型为

$$D(x) = \frac{I(x) - A_{\infty}}{\max[t(x), t']} + A_{\infty}, \quad (15)$$

式中大气光强 A_{∞} 的估计方法:根据暗原色先验原理,首先选取暗通道中亮度最大的0.1%的像素,然后将这些像素与输入图像中相同位置像素对应起来,取最大值为 A_{∞} 的值。当 $t(x)$ 接近于0时, $D(x)t(x)$ 也接近于0,因此把传输率函数 $t(x)$ 设定一个下限 t' , $t' = 0.1$ 。为避免直接选取最亮像素点存在的较大误差,以最亮像素的 3×3 邻域的值作为参考,将 3×3 邻域像素点的平均强度值作为大气光估计值。

4.2 基于导向滤波方法优化传输率函数 $t(x)$

软抠图优化方法可以更精确地获得传输率函数 $t(x)$,但是软抠图算法比较耗时,采用改进的导向滤波的方法优化 $t(x)$,其方法简述如下。

首先定义导向滤波,假设在导向图像 I 和输出图像 q 之间导向滤波是一个局部线性模型。在以 k 为中

心的窗口 ω_k 中,假设 q 为 I 的线性变换:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k, \quad (16)$$

式中 (a_k, b_k) 是在窗口 ω_k 中的线性系数,假定两者是相关的。为了确定线性系数 (a_k, b_k) ,需约束输入的滤波图像 p 。输入图像 p 去掉一些干扰信息 n (噪声等),定义为输出图像 q 为

$$q_i = p_i - n_i. \quad (17)$$

将 q 与 p 之间的差异最小化,且保证(16)式为线性模型。特别地,在窗口 ω_k 中最小化下面的代价函数:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} [(a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2], \quad (18)$$

式中 ε 是一个正则化参数。(18)式是线性边缘回归模型,其 a_k 、 b_k 为

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon}, \quad (19)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k, \quad (20)$$

式中 μ_k 与 σ_k^2 是导向图像 I 的窗口 ω_k 的平均值与方差, $|\omega|$ 是 ω_k 中的像素个数, $\bar{p}_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} p_i$ 是 p 在 ω_k 中的平均值。

根据(16)式,结合线性系数 (a_k, b_k) ,可得到滤波输出图像 q_i 。但是,像素点 i 涉及到包含 i 的所有窗口 ω_k ,所以当用不同的窗口计算时,(16)式中 q_i 的值是不同的,需要平均所有 q_i 的可能值。所以,通过计算图像中所有窗口 ω_k 的 (a_k, b_k) 值,计算滤波输出为

$$q_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k|i \in \omega_k} (a_k I_i + b_k). \quad (21)$$

由于窗口是对称的,即 $\sum_{k|i \in \omega_k} a_k = \sum_{k \in \omega_i} a_k$,所以

$$q_i = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i, \quad (22)$$

式中 $\bar{a}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} a_k$ 与 $\bar{b}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} b_k$ 是含有 i 的所有窗口的平均系数。

综上,把粗略估计得到的传输率函数 $t(x)$,应用导向滤波的方法进行优化。输入粗略估计得到的传输率函数,输出即为优化后的传输率函数。

5 实验与结果分析

为了验证本文算法的有效性 with 实用性,在不同天气条件(如阴天、薄雾、大雾)和相同测试条件下(如场景、相机、焦距,光圈),在室外分别采集近距离和远距离下的多组实验场景。采集3个任意角度与2个正交角度偏振图像^[13],图像分辨率为500 pixel×398 pixel。3个任意角度选择为0°、60°、120°,但在此需要指出的是3个角度并未精确配准。

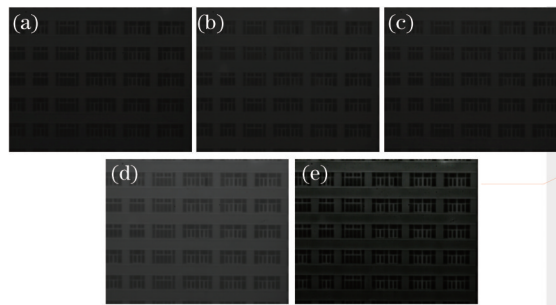


图1 三个任意角度的图像。(a) 角度为0°的偏振图像;(b) 角度为60°的偏振图像;(c) 角度为120°的偏振图像;

(d) 三个角度合成的强度图像 I_i ; (e) 三个角度的复原图像 J_i

Fig.1 Images of three random angles. (a) Polarization image at 0° angle; (b) polarization image at 60° angle; (c) polarization image at 120° angle; (d) composited intensity image I_i of three angles; (e) restoration image J_i of three angles

为定量描述复原前后的图像质量,采用图像熵、平均梯度、灰度方差3个评价指标进行定量分析^[14]。其中,图像熵是衡量图像信息丰富程度的重要指标;平均梯度反映了图像中的微小细节特征,同时也反映了图像的清晰度;灰度方差反映了图像中各像素灰度值偏离图像平均值的程度。各指标参数值越大说明图像越清晰,复原效果越好。

5.1 实验一:近距离场景

近场景3个任意角度的偏振图像、合成的强度图像 I_1 及复原后的图像 J_1 如图1所示。近处场景2个正交角度的偏振图像、合成的强度图像 I_2 及复原后的图像 J_2 如图2所示。比较结果如表1所示。

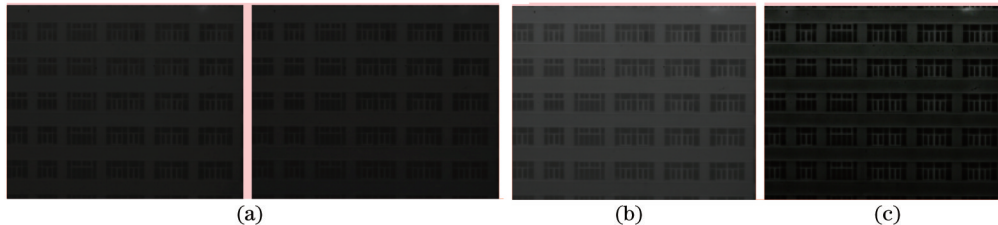


图2 两个正交角度图像。(a) 偏振图像; (b) 合成的强度图像 I_2 ; (c) 复原图像 J_2

Fig.2 Image of two orthogonal angles. (a) Polarization image; (b) composited intensity image I_2 ; (c) restored image J_2

表1 近处场景两种情况复原图像质量的定量比较结果

Table 1 Quantitative comparison results of two cases restored images quality at near scene

| Image parameter | I_1 | I_2 | J_1 | J_2 |
|------------------|--------|--------|---------|---------|
| Entropy | 5.1410 | 5.1908 | 5.6880 | 5.4438 |
| Average gradient | 1.5300 | 1.6320 | 3.5700 | 3.3405 |
| Gray variance | 9.4350 | 9.3075 | 13.4385 | 11.1945 |

5.2 实验二:远距离场景

远距离场景3个任意角度的偏振图像、合成的强度图像 I_1 及复原后的图像 J_1 如图3所示。2个正交角度的偏振图像、合成的强度图像 I_2 及复原后的图像 J_2 如图4所示。图像质量定量比较结果如表2所示。

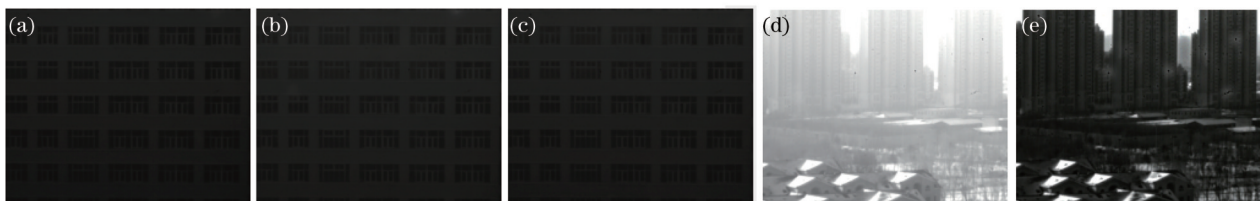


图3 三个任意角度的图像。(a) 角度为 0° 的偏振图像; (b) 角度为 60° 的偏振图像; (c) 角度为 120° 的偏振图像;

(d) 三个角度合成的强度图像 I_1 ; (e) 三个角度的复原图像 J_1

Fig.3 Image of three random angles. (a) Polarization image at 0° angle; (b) polarization image at 60° angle; (c) polarization image at 120° angle; (d) composited intensity image I_1 of three angles; (e) restored image J_1 of three angles

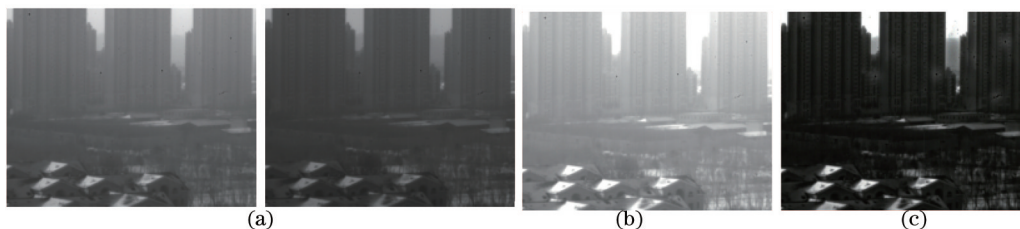


图4 两个正交角度图像。(a) 偏振图像; (b) 合成的强度图像 I_2 ; (c) 复原图像 J_2

Fig.4 Image of two orthogonal angles. (a) Polarization image; (b) composited intensity image I_2 ; (c) restored image J_2

5.3 实验分析

1) 3个任意角度偏振图像复原后的图像 J_1 与合成强度图像 I_1 相比较,复原后图像中近处的植物以及建筑物墙面等景物细节均有显著增强,楼房边缘及窗户边缘等细节信息得到了有效改善。场景目标层次更好,灰度分布较广泛,熵、平均梯度和灰度方差3个参数均有所提高,图像的清晰度和对比度得到提升;

表2 远处场景两种情况复原图像质量的定量比较结果

Table 2 Quantitative comparison result of two cases restored images quality at distant scene

| Image parameter | I_1 | I_2 | J_1 | J_2 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|
| Entropy | 5.7765 | 5.8992 | 6.1010 | 5.9469 |
| Average gradient | 3.5445 | 3.1875 | 5.1765 | 4.4370 |
| Gray variance | 52.4790 | 48.0165 | 57.4260 | 46.8435 |

2) 2个正交角度偏振图像复原的图像 J_2 与合成强度图像 I_2 相比较,与结论1)相似,3个指标也均有提高;

3) 3个任意角度偏振图像复原后的图像 J_1 与2个正交角度偏振图像复原的图像 J_2 相比较,熵、平均梯度和灰度方差3个参数均有所提高,复原效果略好一些。

6 结 论

验证了利用图像的偏振信息实现图像去雾的可行性与有效性。实验表明,在雾天条件下,利用3个任意角度和2个正交角度偏振图像,无论有无天空区域均可达到去雾效果,且3个任意角度比2个正交角度偏振图像去雾复原效果略好。同时3个任意角度偏振图像的获得,不需对偏振角度进行精确配准,有利于工程实现。

参 考 文 献

- 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.
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.
- Peng Wenzhu. Polarization dehazing algorithm based on atmosphere scattering model[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(7): 43-45.
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.
- 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.
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.
- Wang Yong, Xue Mogen, Huang Qinchao. Polarization dehazing algorithm based on atmosphere background suppression[J]. Computer Engineering, 2009, 35(4): 271-275.
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.
- Nayar S K, Narasimhan S G. Vision in bad weather[C]. Proceedings of the Seventh International Conference on. IEEE, 1999, 2: 820-827.
- Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather[C]. Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Conference on., 2000, 1: 598-605.
- Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.
- Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization[C]. Proc Computer Vision & Pattern Recognition, 2001, 1: 325-332.
- Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze[J]. Appl Opt, 2003, 42(3): 511-525.
- Yin Wen, Li Yuanxiang, Zhou Zeming, *et al.*. Remote sensing image fusion based on sparse representation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0428003.
尹 雯,李元祥,周泽明,等. 基于稀疏表示的遥感图像融合方法[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0428003.
- Zhang Su, Fu Qiang, Duan Jin, *et al.*. Low contrast target polarization recognition technology based on lifting wavelet [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211002.
张 肃,付 强,段 锦,等. 基于提升小波的低对比度目标偏振识别技术[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211002.
- Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Method of improving measurement accuracy of Stokes parameters[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0408006.
汤飞龙,李中梁,步 扬,等. 一种提高偏振光斯托克斯参量测量精度的方法[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408006.
- Fu Xingling, Lan Weihua, Wang Jianghua, *et al.*. Design of experiment and result evaluation for detection range of visible imaging system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 031002.
付兴领,兰卫华,汪江华,等. 可见光成像系统作用距离试验方案设计及其评估[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 031002.
- Chen Lei, Yang Fengbao, Wang Zhishe, *et al.*. Research on fusion algorithm of infrared and visible imagery based on variational enhanced model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 041003.
陈 磊,杨风暴,王志社,等. 红外与可见光图像的变分增强融合算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 041003.

栏目编辑: 苏 岑