

文章编号 1004-924X(2017)08-2212-09

## 利用偏振信息的雾天图像全局最优重构

高 隽, 毕 冉, 赵录建, 范之国\*

(合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**针对雾、霾等强散射环境下相机拍摄图像严重退化的问题,提出了一种降低雾霾环境对图像质量影响的图像去雾重构方法。基于雾天偏振成像模型,分别估计图像每个区域的重构参数,获取全局最优的重构参数。利用偏振滤波的方法估计雾天大气散射光的偏振度分布,利用自适应亮通道方法计算无穷远处大气散射光的强度分布,从而重构出去雾图像。最后,利用偏振度的纹理信息对重构图像进行增强。该方法考虑了图像中不同位置大气杂散光参数的一致性,对图像每一区域的重构参数分别运算,从而获得全局最优的重构参数图像。该方法还不要求图像必须包含天空区域,并且具有对灰度图像的处理效果较好的优点。

**关键词:**强散射环境;偏振信息;图像重构;全局最优

**中图分类号:**TP391.4;O436.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172508.2212

## Global optimized hazed image reconstruction based on polarization information

GAO Jun, BI Ran, ZHAO Lu-jian, FAN Zhi-guo\*

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

\* Corresponding author, E-mail: fzghfut@163.com

**Abstract:** Aimed at the serious degradation problem of camera images under strong scattering environments of fog, haze and so on, a reconstruction method of image defogging was proposed to reduce the influence of fog and haze environment on the image quality. On the basis of the polarization imaging model, the global optimized reconstruction parameters were obtained by estimating every pixel's parameters. Then, polarization filtering method was used to estimate the equivalent degree of polarization image of atmospheric scattering light and the auto adjusted light channel prior method was taken to calculate the distribution of atmospheric scattering light intensity. The global optimal reconstruction parameter image after defogging was obtained by the steps mentioned above. Finally, the texture information of polarization degree was used to enhance the image after defogging. The method pays attention in the inconsistencies of stray light parameters in different positions in images, and calculates every pixel's parameters respectively, so it captures the global optimal reconstruction parameter images. Moreover, the method does not require its images to contain the sky area, and has an advantage for gray image processing.

收稿日期:2017-01-05;修订日期:2017-03-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61571177, No. 61571175)

**Key words:** strong scattering environment; information of polarization; image reconstruction; global optimization

## 1 引 言

在雾、霾环境中,物体表面反射的光线在到达相机等接收器的过程中会受大气中悬浮的尘埃、水滴等微粒的影响,使得获取的图像整体偏向灰白、对比度低且色彩失真,从而严重影响图像的应用效果。现阶段我国各城市雾、霾天气已经成为一种普遍的天气现象,所以研究雾、霾天气时的图像重构算法十分必要。偏振图像目前在处理遥感、医学诊断、航空航天、军事侦察和地图绘制等领域的应用越来越广泛,因此极受关注。偏振是光的一种固有属性,在雾、霾天气中,光传播时受到空气中固体或液体微粒的散射作用,其偏振态会发生改变。不过大气散射光与目标反射光的偏振态不一致,通过对偏振态的检测,可将目标的反射光和大气散射光分离出来,所以偏振方法对于去雾应用有着明显的作用。

关于大气粒子对成像的影响,国内外学者做了大量的研究工作。He<sup>[1-2]</sup>等人提出了一种基于暗通道先验的单幅图像去雾方法,该方法通过对大量无雾自然场景进行特征统计后,发现了一个客观存在的规律,即在非天空区域,大部分的图像块至少在一个颜色通道上存在亮度值很低的像素点(暗像素),这个规律被称为暗通道先验(Dark Channel Prior)。利用这个规律,可以估计出粗糙的传输图,然后使用软抠图算法对粗糙传输图进行细化修补,最后使用细化修补后的传输图来重构出清晰的去雾图像。国内外学者基于暗通道先验规律和软抠图算法在单幅图像去雾应用上做了大量工作<sup>[3-5]</sup>。以色列学者 Schechner 等人<sup>[6-8]</sup>提出利用场景图像中偏振信息进行去雾的重构算法。该方法利用偏振片获取同一场景下垂直和平行入射面的两幅图像,用其估计大气光偏振度和无穷远处大气光强等参数,最后用雾天成像模型来重构去雾图像。尽管暗通道方法简单有效,适应性较广,但是仍然有其不足:如对不存在暗像素的场景或原图像为灰度图像时,暗通道方法会产生很大的估计误差;而软抠图算法计算复杂度高,

计算时间长,对于实际应用也有严重的影响。Schechner 等人的偏振处理方法计算复杂度低,但是要求图像中必须包含天空区域,需要通过人工干预的方式手动选取图像中的天空区域来估计大气光强值和大气光的偏振度,而且该方法用天空中一点的大气光强值和大气光的偏振度替代整幅图像的大气光强值和大气光的偏振度信息,存在较大误差。

以上 He 以及 Schechner 的方法在进行大气光偏振度、无穷远处光强和传输图参数估计的时候都以一点的值等效为整幅图像的重构参数,这样估计没有考虑场景中不同距离处大气杂散光与目标偏振度信息的不一致性,其重构结果对整幅图像局部区域有较好效果,但是往往存在图像中其他区域目标重构效果不理想的问题。针对这些不足,本文提出一种强散射条件下对图像每一像素使用不同参数进行重构的全局最优图像重构方法。基于雾天偏振成像模型,利用图像及偏振信息分别估计图像中每一像素的重构参数并重构出去雾图像,最终利用偏振度图像所携带的目标纹理信息对重构图像进行增强。该方法考虑了图像中不同位置大气杂散光参数的不一致性,所以对图像每一像素的重构参数分别运算。同时该方法无需人工干预,不要求图像必须包含天空区域并具有对灰度图像的处理效果较好等优点。

## 2 雾天偏振成像模型

雾天环境下,接收点偏振光状态是由目标表面反射光和大气粒子散射光共同决定的。自然场景中目标反射光与大气散射光通常具有不同的偏振特性。

如图 1 所示,经过散射等作用后,得到的总光强  $I$  包含两部分<sup>[9]</sup>,一部分是景物辐射和反射光强在经过大气衰减之后到达成像系统接收面的光强  $D$ ,另一部分是太阳光经过空气中微粒散射后到达成像系统的杂散光光强  $A$ ,如式(1)所示。

$$I(d) = D(d) + A(d), \quad (1)$$

其中,  $d$  表示景物到成像面的距离。

$$D(d) = J e^{-\beta d}, \quad (2)$$

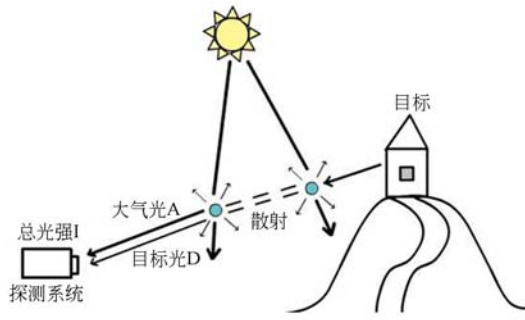


图 1 大气散射原理图

Fig. 1 Block diagram of atmospheric scattering

$$A(d) = A_{\infty}(1 - e^{-\beta d}), \quad (3)$$

其中,  $J$  表示场景本身的光强值,  $\beta$  表示大气对光的衰减系数,  $A_{\infty}$  表示无穷远处大气光强。

雾天成像模型可写为:

$$I(d) = Jt(d) + A_{\infty}((1 - t(d))), \quad (4)$$

$$t(d) = e^{-\beta d}, \quad (5)$$

其中,  $t(d)$  为传输图, 对于均匀大气而言大气衰减系数  $\beta$  是全局量, 传输图主要由深度  $d$  决定, 传输图也称为深度图。

当光与空气中的气溶胶粒子发生散射或在物体表面发生反射时, 会改变其偏振特性。假设在同一时刻任意散射粒子的散射源来自同一个方向, 定义光源、散射粒子和观察者这三点确定的平面为一个入射平面, 则大气光  $A$  可以分为平行于入射平面的部分  $A^{\parallel}$  和垂直于入射平面部分  $A^{\perp}$ 。

大气光偏振度  $P_A$  表示为:

$$P_A = (A^{\perp} - A^{\parallel}) / A, A = A^{\perp} + A^{\parallel}. \quad (6)$$

$I$  也可以分为垂直于入射平面和平行于入射平面两部分:  $I^{\perp}$  和  $I^{\parallel}$ 。则总光强偏振度  $P$  表示为:

$$P = (I^{\perp} - I^{\parallel}) / I, I = I^{\perp} + I^{\parallel}, \quad (7)$$

$$I^{\parallel} = D/2 + A^{\parallel}, \quad (8)$$

$$I^{\perp} = D/2 + A^{\perp}. \quad (9)$$

由式(6)、(7)、(8)、(9)得:

$$A = IP / P_A. \quad (10)$$

由式(3)、(4)、(5)得:

$$J = \frac{I - A}{1 - A/A_{\infty}}. \quad (11)$$

由式(10)和(11)得, 场景辐射强度公式为:

$$J = I \left[ 1 - \frac{P}{P_A} \right] / \left[ 1 - \frac{IP}{A_{\infty} P_A} \right]. \quad (12)$$

$J$  即为重构图像, 由于  $I$  和  $P$  都可由相机所获取的偏振图像直接计算得出, 所以重构算法的

核心就是估计  $P_A$  和  $A_{\infty}$ 。Schechner 等人提出手动选取天空区域一点, 认为该点的光强值为  $A_{\infty}$ , 计算得该点的偏振度为  $P_A$ 。这种方法计算简单但是存在以下不足: (1) 整幅图像的  $A_{\infty}$  从理论上是不一致的, 用一点的  $A_{\infty}$  作为整幅图像的  $A_{\infty}$  不合理; (2) 图像可能不存在天空区域, 这种情况下该方法无法使用; (3) 需要人工干预进行天空点的选取操作, 不利于监控等要求全自动化处理的领域进行该算法的部署。

### 3 参数估计及重构图像增强方法

#### 3.1 基于偏振滤波方法估算大气光偏振度 $P_A$ 图像

在雾、霾天气下  $P_A$  的值主要受到空气中的液体或固体颗粒对大气光的散射作用影响。两幅互相正交的偏振图像可以计算出场景整体的偏振度, 其中包含景物的偏振度和大气杂散光的偏振度。由于从整体的偏振度图中无法直接提取大气杂散光偏振度图像  $P_A$ , 因此需要使用合理的方式对其进行估算。

一般的对大气光  $A$  的估算方法<sup>[10]</sup> 多是对非偏振图像进行滤波处理, 得到的是大气光强图像。这类方法未考虑场景深度对偏振度的影响, 而是近似认为偏振度是全局不变量, 导致离视点较远区域的重构效果明显下降。本文基于偏振滤波的方法, 针对偏振图像进行滤波处理, 以此估算大气杂散光的偏振度  $P_A$ 。通过对相机获取的不同偏振片角度(通常分别为  $0^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 、 $120^{\circ}$ )下的偏振图像进行滤波处理, 得到不同偏振片角度下的大气光的估计图像 ( $A_0$ 、 $A_{60}$ 、 $A_{120}$ ), 使用 Stokes 矢量方法最终计算得到大气杂散光偏振度的估计。

滤波算法如下:

$$I'(x, y) = \text{median}_{S_V}(I(x, y)), \quad (13)$$

$$I''(x, y) = I'(x, y) - \text{median}_{S_V}(|I(x, y) - I'(x, y)|), \quad (14)$$

$$A(x, y) = \max(\min(\alpha I''(x, y), I'(x, y)), 0), \quad (15)$$

其中  $I(x, y)$  是相机接收的光强图,  $S_V$  是中值滤波的邻域尺寸。  $\alpha$  是比例参数, 依据经验, 其值取 0.95 时偏振滤波算法结果较好。

使用式(13)、(14)、(15)分别对相机采集到的

三个偏振化方向( $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ )的强度图进行处理,获得不同偏振度方向的大气杂散光图像  $A_0$ 、 $A_{60}$ 、 $A_{120}$ ,使用式(16)计算出斯托克斯矢量  $S = [I_A, Q_A, U_A]^T$ 。

$$\begin{cases} I_A = \frac{2}{3}(A_0 + A_{60} + A_{120}) \\ Q_A = \frac{2}{3}(2A_0 - A_{60} - A_{120}), \\ U_A = \frac{2\sqrt{3}}{3}(A_{60} - A_{120}) \end{cases} \quad (16)$$

使用式(17)计算得到偏振度  $P_A$ :

$$P_A = \frac{\sqrt{Q_A^2 + U_A^2}}{I_A}. \quad (17)$$

### 3.2 利用自适应亮通道方法估算大气光强 $A_\infty$ 图像

本文采用基于亮原色的先验规律<sup>[11-12]</sup>进行  $A_\infty$  的估算,  $A_\infty$  为无穷远处的大气光强值。一般认为图片中天空区域的光强值可以等效为无穷远处的大气光强值。实际的处理过程中,若取天空某一点的亮度值作为  $A_\infty$  的估计值,往往会导致重构图像中不同位置的景物有明显的明暗差异。这是由于实际相机拍摄到的图像中不同位置、远近的目标所对应的大气散射光的特性并不相同,使用一点的值进行等效替代往往误差较大。本文使用亮通道方法估计每一点的  $A_\infty$  值,获取  $A_\infty$  图像,从而解决了这个问题。

根据亮原色先验理论,通过对户外无雾环境下图像的统计可得到:在图像的绝大部分区域,总会存在一些我们称之为“bright pixels”的像素,即至少有一个颜色通道具备很高的强度值。造成亮原色中通道值高的主要因素:(1)天空区域的高亮度;(2)色彩鲜艳的物体或表面,在RGB三个通道中有些通道的值很高;(3)颜色较亮的物体或表面。该亮原色图像适用于对图像中不同区域的大气光成分进行估计。

亮原色的表达式为:

$$L^{\text{bright}}(x) = \max_{c \in \{r, g, b\}} (\max_{y \in \Omega(x)} (L^c(y))), \quad (18)$$

其中,  $L^c$  表示输入图像  $L$  的一个颜色通道,  $\Omega(x)$  表示以  $x$  为中心的图像块。亮通道图像是输入图像经过两个最大值算子得到的。

上述亮原色表达式使用RGB三个通道计算得到亮原色图像,但是本文实验采用的原始输入图像是灰度偏振图像,所以对式(18)作了一些改

变,以使其适用灰度图像,且将  $A_\infty$  取为  $L^{\text{bright}}$ :

$$A_\infty = L^{\text{bright}}(x) = \max_{y \in \Omega(x)} (L^{\text{gray}}(y)). \quad (19)$$

实验发现,在亮通道邻域尺寸选择时存在对近处物体取大邻域远处物体取小邻域时,重构效果更好的特点,针对该特点提出自适应亮通道的方法。公式(3)和(5)中  $\beta d$  能体现出目标与探测器之间的距离关系,计算亮通道图像时每一点在邻域尺寸选择上使用以下公式进行计算,得邻域尺寸矩阵  $\Omega(x)$ 。

$$A'_\infty = \max(L^{\text{gray}}), \quad (20)$$

$$\Omega'(x) = 1/\beta d(x) = -1/\ln(1 - A'(x)/A'_\infty), \quad (21)$$

$$\Omega(x) = \alpha' \times \text{normalize}(\Omega'(x)) + C, \quad (22)$$

其中  $A'_\infty$  为粗略估计的无穷远处大气光强值;  $A'(x)$  为大气光强值,等于公式(16)所得  $I_A$  图像;  $\Omega'(x)$  为未归一化的距离反比矩阵;  $\alpha'$  为比例参数取15;  $C$  为最小窗口大小取5;  $\Omega(x)$  为邻域尺寸矩阵,  $\text{normalize}$  为归一化函数。

使用自适应亮通道的方法估计  $A_\infty$  存在以下问题:因为自适应亮通道方法的邻域操作会使亮通道的结果图像产生块状效应,影响最终重构结果。本文使用高斯模糊方法对亮通道结果图像进行滤波处理,以降低块状效应对重构结果的影响。由于亮通道的原理认为图像每点的邻域中存在的高亮度像素主要是大气散射光的作用产生的,使用自适应亮通道的方法估计  $A_\infty$  时,对于本身亮度很高的物体也会被识别为雾较浓的区域,所以重构之后,高亮度物体存在过度抠像的问题。下文利用偏振度中所含有的目标纹理信息,使用偏振图像增强算法对过度抠像问题进行有效改善。

### 3.3 偏振图像增强算法

使用自适应亮通道的方法估算,重构图像存在亮度较高物体会被过度抠像的问题。针对过度抠像的问题,本文利用偏振度所含有的纹理信息,通过图像增强的方法重建被过度抠像变白的部分。由人眼视觉特性可知,相较于整幅图像的对比度,人眼对于局部对比度更为敏感,相较于光强图像,偏振度图像的纹理更清晰。因此,在获得重构图像之后,使用偏振度局部指数增强方法,按照偏振度图像的纹理分布,使用公式(23)对每个像素点基于其邻域计算增强参数,带入公式(24),最终获得局部对比度增强之后的图像。该方法解决了重构算法中亮度较高物体过度抠像的问题,同时起到凸显

隐设在背景中具有不同偏振特性的目标的作用。

增强算法如下：

$$\overline{DOP}(x) = \text{average}_{y \in \Omega(x)}(DOP(y)), \quad (23)$$

$$J_{DOP}(x) = J(x) \left( \frac{\overline{DOP}(x)}{DOP(x)} \right)^n, \quad (24)$$

对于偏振度图像  $DOP(x)$ ，取其每点在邻域  $\Omega(x)$  内的均值作为  $\overline{DOP}(x)$  图像对应点的值， $n$  为增强系数取值为 2。使用该算法获得的  $J_{DOP}(x)$  图像在重构图像  $J(x)$  的基础上融合了偏振度的纹理信息，增强了图像细节、提高了图像中具有不同偏振特性目标的对比度。

### 4 实验与结果分析

本文使用经过标定的三通道偏振成像系统<sup>[14-16]</sup>。进行原始图像的采集，成像系统使用三棱分光的方法获得同一视场不同偏振化方向的偏振图像，成像系统的波段为 380~800 nm，采用 3 路面

阵 CCD 同时成像，每一路 CCD 前都装有线偏振器，其方向与参考方向夹角分别为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $120^\circ$ 。通过该成像系统可以获得同一时刻同一视场三个不同偏振化方向的灰度图像。实验拍摄的是浓雾环境下巢湖中的岛屿，岛上的塔距离拍摄点约 4 km。图 2(a)(b)(c) 分别为成像系统获取的  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  图像经过图像配准等预处理的<sup>[14]</sup>。预处理之后的图像，由不同偏振片角度的三幅图像亮度不同可知，雾、霾天气大气散射光是具有明显偏振特性的，所以使用偏振方法重构去雾有其合理性。

重构算法计算过程中得到的  $P_A$  及  $A_\infty$  参数如图 2(d)(f) 所示。本算法使用偏振滤波的方式计算  $P_A$ ，使用自适应亮通道的方法计算  $A_\infty$  图像，而不是以一点的值替代整幅图像。该方法充分考虑了不同距离、大小目标重构参数不同的特点。图 2(e) 为  $\beta d$  图像，体现相对距离信息，以该图像矩阵为基准自动调整亮通道的邻域尺寸计算

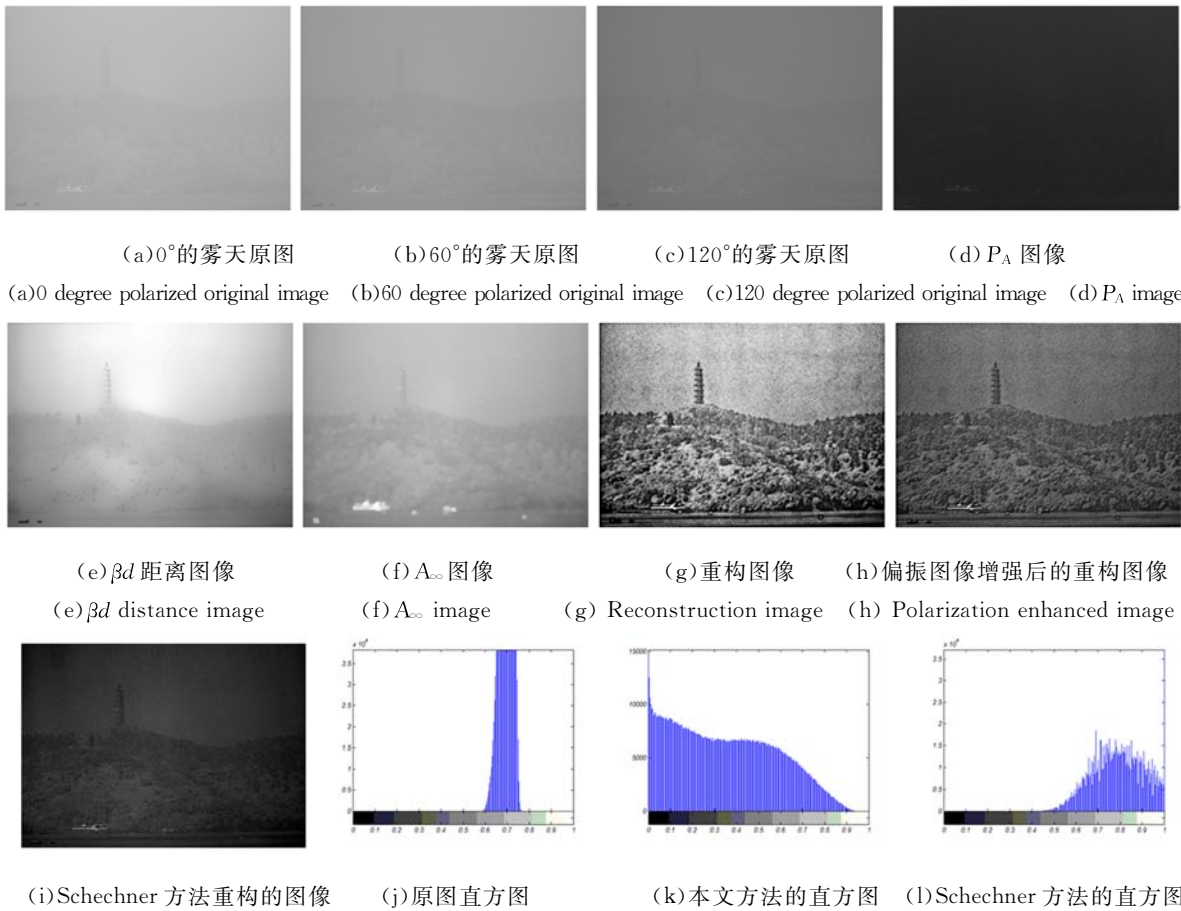


图 2 算法各步骤结果及与 Schechner 方法的对比

Fig. 2 Each step results and comparison with Schechner's result

$A_{\infty}$  图像。重构算法处理后获得图像为图 2(g)(h),由图 2(g)可见该算法清晰的凸显出隐于雾中的塔及山上植被,图 2(h)为对重构结果使用偏振图像增强算法之后的图像,偏振图像增强算法对重构过程中过度抠像的植被及塔的细节进行补偿并凸显植被、塔的表面纹理。

图 2(i)是使用 Schechner 的偏振去雾方法得到的重构图像,其计算结果好坏与找到的最佳偏振化方向与最差偏振化方向关系较大。同时由于对参数  $A_{\infty}$  和  $P_A$  的估计只是以天空一点的值替代,未考虑照片中不同位置、远近的大气散射光不均匀的特点,故重构图像存在大量像素较黑的特点。在取点时,人工取天空不同位置的  $A_{\infty}$  和  $P_A$  值,重构出图像的质量差距较大,重构结果的好坏依赖于所选择点的好坏。实验中处理每一幅图片时都需要实验人员手动选取天空一点,需要手动或自动的方式找到最佳偏振化方向(使图像达到最亮时候的偏振片方向)与最差偏振化方向(使图像达到最暗时候的偏振片方向)的图像,这在工程应用中存在较多不便。同时其最佳偏振化方向与最差偏振化方向是对整幅图像而言,不同目标因其反射光的偏振特性不同,重构后的清晰程度也不同,即取不同角度的两幅互相垂直的偏振图像,其对不同目标的重构程度也不同。图 2(i)为  $I''$

的偏振片取  $58^{\circ}$  的重构结果, $58^{\circ}$  为该场景的最佳偏振化方向。

针对使用天空一点进行  $A_{\infty}$  估算所存在的不足,本文使用自适应亮通道的方法对其进行改善,算法无需图像包含天空区域,可以自动处理整幅图像无需人工干预,且重构效果更好。但是使用自适应亮通道方法计算  $A_{\infty}$  图像后,会存在图像中亮度较高其物体过度抠像的问题,如图 2(g)。针对亮度较高物体过度抠像的问题,本文提出偏振图像增强方法对重构后的图像进行增强,可在有效改善该问题的同时提升图像细节纹理,如图 2(h)。雾天原图信息熵为 5.060 5,本文结果信息熵为 7.684 9,Schechner 方法结果信息熵为 6.567 8。图 2(j)、(k)、(l)分别为雾天原图、本文结果、Schechner 方法结果的亮度直方图,表明本文方法具有较好的结果。

图 3(a)、(b)、(c)为在雾天环境下针对远处高楼的重构实验,地点为合肥工业大学北门,时间为早晨 8 点,浓雾,轻度霾。成像系统直接获取的图像只能看到近处的楼,通过重构算法处理后,远处高楼、住宅楼房的细节清晰呈现,建筑与植被的纹理凸显。

图 3(d)、(e)、(f)为在重霾环境下针对街道及建筑的重构实验,地点为合肥大蜀山顶,时间为下



(a) 雾天图 I

(a) Fog weather image



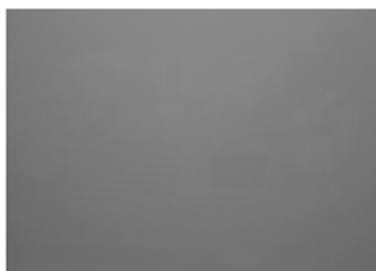
(b) 重构图像

(b) Reconstruction image



(c) 偏振图像增强后的重构图像

(c) Polarization enhanced image



(d) 雾天图 I

(d) Fog weather image



(e) 重构图像

(e) Reconstruction image



(f) 偏振图像增强后的重构图像

(f) Polarization enhanced image



图 3 不同场景下的雾天重构实验结果

Fig. 3 Reconstruction experiments of different environments

午 4 点, PM<sub>2.5</sub> 值大于 350(根据气象站给出的即时数值)。从 284 m 的山顶拍摄远处的建筑及街道, 在霾较浓的环境下, 无法辨认街道、车辆和建筑细节, 但是通过该重构算法能够较好地重构出了路灯、车辆、树木和建筑的细节, 显示该方法对霾环境下的图像同样有较好效果。

表 1 各组重构结果定量比较

Tab. 1 Quantitative comparison of reconstruction results

设备及天气	图像	信息熵	平均梯度	边缘强度	
第一组	偏振成像系	原图	4.583 7	0.003 0	0.023 9
	雾天实验	重构图	7.168 4	0.066 8	0.532 4
	数据	增强重构图	7.895 1	0.170 1	1.314 6
第二组	偏振成像系	原图	5.004 1	0.003 3	0.026 5
	重霾天气	重构图	6.743 6	0.040 2	0.315 7
	实验数据	增强重构图	7.443 9	0.139 4	1.069 2
第三组	普通相机雾	原图	4.533 9	0.003 0	0.022 5
	天实验数据	重构图	7.582 7	0.058 0	0.418 5
		增强重构图	7.795 8	0.129 1	0.897 3

图 3(g)、(h)、(i) 为使用普通工业相机在雾天环境下的重构实验, 该实验使用手动旋转偏振片方法获取偏振图像, 并使用重构方法获得处理结果。由重构结果可知本文重构方法同样适用于处理普通相机获取的偏振数据。

图 3 各组实验图像的定量比较结果如表 1 所示, 重构图像在信息熵、平均梯度、边缘强度等性

能指标上相较于原始雾、霾天气下图像有较大提升, 偏振增强图像在平均梯度、边缘强度上相较于重构图像有明显提升。数据表明本文偏振重构方法对于雾、霾天气下的图像清晰重构具有很好的效果。

## 5 结 论

提出了一种获取全局最优的去雾重构图像方法。该方法使用偏振滤波方法分离每一点大气光的偏振度, 使用自适应亮通道方法估算每一点的等效无穷远处大气散射光, 利用距离信息对亮通道的邻域尺寸进行自动选择, 最终获得全局最优的去雾重构图像。同时提出了一种针对重构图像进行基于偏振度信息的图像增强算法, 用于消除自适应亮通道方法估算参数时针对高亮度物体产生的过度抠像问题, 并起到凸显目标的作用。本文所用方法获取的不是天空一点等效的大气散射光偏振度和光强, 而是对不同位置和距离的大气光参数分别进行估计从而获得全局最优的重构参数图像。实验结果表明, 本文提出的重构算法针对雾、霾天气下的图像能够获得较好的重构复原结果。但是, 目前本文方法在计算上难以做到实时, 后续要在算法运算速度的提升上进一步开展工作。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王凯, 王延杰, 樊博. 基于暗通道先验的图像去雾算法改进[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(8): 840-845. WANG K, WANG Y J, FAN B. Improved method for single image dehazing using dark channel prior [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2016, 31(8): 840-845. (in Chinese)
- [3] 吴斌, 付辉, 张红英. 大气光雾图像的清晰度复原[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8): 2018-2026. WU B, FU H, ZHANG H Y. De-hazing of atmosphere veil haze images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 2018-2026. (in Chinese)
- [4] 孙伟, 李大健, 刘宏娟, 等. 基于大气散射模型的单幅图像快速去雾[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 1040-1046. SUN W, LI D J, LIU H J, *et al.*. Fast single image fog removal based on atmospheric scattering model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 1040-1046. (in Chinese)
- [5] 王卫星, 肖翔, 陈良琴. 结合最小滤波和引导滤波的暗原色去雾[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 2100-2108. WANG W X, XIAO X, CHEN L Q. Image dark channel prior haze removal based on minimum filtering and guided filtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 2100-2108. (in Chinese)
- [6] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Instant dehazing of images using polarization [C]. *Proceedings of 2001 IEEE Computer Society Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2001, 1: I-325-I-332.
- [7] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Polarization-based vision through haze [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.
- [8] NAMER E, SCHECHNER Y Y. Advanced visibility improvement based on polarization filtered images [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5888: 588805.
- [9] 方帅, 周明, 曹洋, 等. 基于偏振测量的雾天图像场景分割 [J]. *光子学报*, 2011, 40(12): 1820-1826. FANG S, ZHOU M, CAO Y, *et al.*. Scene segmentation of hazy image using polarization measurements [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(12): 1820-1826. (in Chinese)
- [10] TAREL J P, HAUTIER R N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]. *Proceedings of the 12th International Conference on Computer Vision*, IEEE, 2009: 2201-2208.
- [11] FU X Y, LIN Q, GUO W, *et al.*. Single image de-haze under non-uniform illumination using bright channel prior [J]. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 2013, 48(3): 1843-1848.
- [12] 李大健, 孙伟, 潘蓉. 光照分量去除的单幅图像快速去雾方法 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10s): 622-631. LI D J, SUN W, PAN R. Fast single image dehazing method based on illumination veil elimination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10s): 622-631. (in Chinese)
- [13] YEMELYANOV K M, LIN S S, PUGH JR E N, *et al.*. Adaptive algorithms for two-channel polarization sensing under various polarization statistics with nonuniform distributions [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5504-5520.
- [14] 怀宇, 范之国, 孙洁, 等. 三通棱镜同时偏振测量系统的标定 [J]. *光电工程*, 2015, 42(11): 18-24. HUAI Y, FAN ZH G, SUN J, *et al.*. Calibration of the three links prism simultaneous polarization measurement system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(11): 18-24. (in Chinese)
- [15] 孙洁, 高隽, 怀宇, 等. 全天域大气偏振模式的实

时测量系统[J]. 光电工程, 2016, 43(9): 45-50, 55.

SUN J, GAO J, HUAI Y, *et al.*. Real-time measurement system for the pattern of all skylight polarization [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(9): 45-50, 55. (in Chinese)

[16] 甘世奇, 陈向宁, 薛俊诗, 等. 液晶光谱偏振系统

选偏器方位误差研究[J]. 液晶与显示, 2016, 31(8): 748-754.

GAN S Q, CHEN X N, XUE J SH, *et al.*. Misalignment errors of polarizer in the liquid crystal spectropolarimetric system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2016, 31(8): 748-754. (in Chinese)

#### 作者简介:



高 隼(1963—),男,安徽淮南人,博士,教授,博士生导师,主要从事偏振光学探测、图像处理、智能信息处理等方面的研究。E-mail: gaojun@hfut.edu.cn



范之国(1979—),男,安徽霍山人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事偏振光学探测及偏振光导航方面的研究。E-mail: fzghfut@163.com