

文章编号 1004-924X(2016)08-2018-09

大气光雾图像清晰度的复原

吴 斌, 付 辉*, 张红英

(西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621000)

摘要:针对现有图像去雾方法处理效率低,天空部分处理效果欠佳以及去雾图像视觉效果不理想等问题,提出了一种快速大气光雾去雾算法。提出的算法是对全球环境光值和大气光雾值求取方法的改进。首先,采用高斯低通滤波求取雾气图像低频区,应用循环四分图算法在低频区得到全球环境光值 A ;其次,采用暗原色优先算法获取初始大气光雾值,结合自适应各向异性高斯滤波处理大气光雾;最后,采用色调调整增强图像细节,使图像逼近于无雾场景。实验结果表明,本文算法能消减图像景深突变处的晕轮效应,亮度、对比度和细节信息处理效果较好,不仅较完整地保留了边缘细节,而且显著提升了处理效率,同时具有较高的鲁棒性和实时性。

关键词:大气光雾图像;图像复原;低通滤波;循环四分图;色调调整;晕轮效应

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162408.2018

De-hazing of atmosphere veil haze images

WU Bin, FU Hui*, ZHANG Hong-ying

(College of Information Engineering, Southwest University of Technology, Mianyang 621000, China)

* Corresponding author, E-mail:1285110730@qq.com

Abstract: A fast atmosphere veil de-hazing method was proposed to overcome the shortcomings of existing de-hazing methods in lower process efficiency, poorer treatment result of sky part and a bad visual effect for images. The method focuses on the improvements for global atmospheric light values and the acquiring method of atmospheric veil values. Firstly, the Gaussian low-pass filter method was used to gain a low frequency area of an image, and the circle quarter figure algorithm was used to obtain the global atmospheric light value of the low frequency area. Then, the dark channel prior algorithm was employed to achieve the initial atmospheric veil value and the atmospheric veil was processed by the adaptive anisotropic Gaussian filter. Finally, image details were enhanced by utilizing tone mapping, by which the image could approximate to the no fog scene image. The experimental results show that the proposed method restricts the halo effect of depth mutation area in the image and well processes lightness, contrast and detail information for the image. It keeps edge details of the image perfectly, improves the image processing efficiency and has good robustness and real-time ability.

Key words: atmosphere veil haze image; image de-hazing; low-pass filter; circle quarter figure algorithm; tone mapping; halo effect

收稿日期:2016-03-22;修订日期:2016-05-23.

基金项目:四川省教育厅重点项目(No. 15ZA0118);特殊环境机器人技术四川省重点实验室开放基金资助项目(No. 13zxtk0505);西南科技大学博士基金资助项目(No. 13zx7112)

1 引言

当光路在大气传输过程中与空气中的胶体状悬浮颗粒相遇时,会产生散射和衰减等现象,导致图像降质。Narasimhan^[1]以雨、雪、薄雾和浓雾中悬浮粒子所占的比例和大小为依据,分析了几种情况下的不同散射效应,从而得到各个程度的户外降质图像。这些视觉保真度和对比度失真的图像,对依赖于户外图像进行运转的系统产生一定程度的负面效应,譬如监控系统、检测系统及与大众交通安全息息相关的行车监控系统等。因此,需要先采用去雾清晰化算法进行预处理,以加强图像的色度和纹理信息,提高其鲁棒性,以便进一步进行图像分割、图像识别、图像跟踪等处理。

从增强和复原两种角度参考,去雾算法可以划分为两类。具有显著性优势的去雾增强类算法是 Retinex^[2]类算法。具有迭代思路的 Retinex 算法是国外科研者 Meccan^[3]于 1983 年提出的,该算法的处理效率较高。Jobson^[4]于 1997 年提出了单尺度和多尺度类型的环绕中心的 Retinex 方法,该方法更适宜处理雾气分布较为平均的降质图像。赵宏宇^[5]提出了基于马尔科夫随机场模型的 Retinex 增强算法,其采用线性代数的表述方式优化各个像素点,从而提升了算法的处理效率而且节约了处理时间。周妍^[6]采用直方图匹配方法对降质图像加以增强,该算法简单,但景深突变处易出现细节信息的丢失。应用较广泛的复原类去雾算法为 He^[7]方法,该方法通过对大量雾天图像 RGB 三通道进行统计,得到了暗原色先验理论,结合大气光线物理模型还原清晰化图像。该方法虽能将一幅彩图中的大量雾气去除,并还原出较为清晰的人眼视觉效果,但存在一定的局限性,体现在对景物色彩变化不明显、阴影部分面积小的图像处理效果不佳,而且算法效率低。刘言^[8]在 He^[7]方法的基础上对色度空间实现半逆转换,以提高算法的处理速度和鲁棒性。Tarel^[9]提出了一种需设定参数的获取大气光雾还原灰度或彩色图像的方法,但该方法采用的是中值滤波,易在深度突变处引起晕轮效应,不能保留完整的边缘细节。

本文首先采用各向异性滤波处理大气光雾,然后用色调调整。对全球环境光 A 先采用高通滤波滤取,进而采用循环四分图算法精细化处理。

2 大气光学模型

结合机器视觉、图像处理技术与雾气光路成像的物理模型,可将大气光学模型^[1]表示为式(1):

$$D(x, y) = F(x, y)t(x, y) + A(1 - t(x, y)), \quad (1)$$

式中, $D(x, y)$ 表示雾气图像, $F(x, y)$ 表示原始清晰图像, $t(x, y)$ 代表透射比率, A 为图像的全球环境光值。

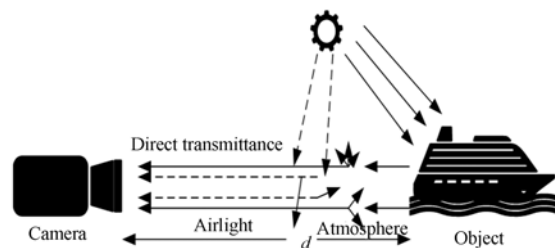


图1 大气散射光学模型

Fig. 1 Atmospheric scattering optical model

假定大气的气体介质是固定的,则透射比率 $t(x, y)$ 可进一步表示为式(2),其中, $d(x, y)$ 表示取景点与成像设备之间的距离,即景深值。

$$t(x, y) = e^{-\beta d(x, y)}, \quad (2)$$

式(1)实质上是将图像降质的因素分为两部分,其一为:衰减部分 $F(x, y)t(x, y)$,该部分的衰减源于景深的变化,其二为:散射部分 $H(x, y) = A(1 - t(x, y))$,该部分影响图像的对比度,并会造成图像模糊。

Tarel^[9]给出了散射部分需满足的两个条件:其一、图像中所有像素点的散射部分的取值均要大于零;其二、散射部分的取值均不能大于雾气图像 RGB 三通道的最小值。综合式(1)和式(2)可得,大气散射部分与全球环境光值和景深部分相关。此外 Tarel^[9]还发现大气散射部分有大量边缘,若对整幅图像统一进行平滑操作,会使处理后的图像出现“晕轮效应”,综上,大气散射部分具有以下 3 个特点:

(1) 大气散射部分整体呈光滑状,但景深突变处边缘明显。

(2) 散射部分的像素点值应大于零并小于 RGB 三通道的最小值;

(3) 散射部分仅依赖于大气中的介质和景深。

3 全球环境光值 A 的估计

绝大多数的去雾算法选取整幅图像最大像素点值的 0.1%, 作为图像的全球大气光值 A , 但会使一些白色物体或镜面反光物体被误估在其中, 因此获取的 A 值误差较大。He^[7] 对此加以改进, 选取与雾气浓度的暗通道最亮值的 0.1% 接近的值作为全球大气光值 A 。但该方法也存在局限性: 即光照变化是非线性的, 但 He^[7] 将其作为线性处理, 处理后呈现“晕轮效应”。另外, 选取块的大小对全球环境光值的影响显著, 选取块较大, 图像细节弱化; 块较小, 则图像的平滑效果差。因此 He 方法求得的全球大气光值 A 也会产生较大的偏差。通过分析 He 方法的缺点, 本文首先采用高斯低频滤波^[10] 对雾气图像 $D(x, y)$ 进行处理, 由于全球环境光值 A 接近于图像中雾气最浓处的值, 而图像受雾气影响的部分属于低频区, 故本文通过滤波操作得到全球环境光值 A 的区间, 进而对滤波之后的图像采用循环四分图^[11] 算法来确定全球大气光值 A 。

3.1 高斯低频滤波定位 A 值区间

Retinex^[5] 建立的图像的数学模型如式(3)。该式的第一部分为入射光 $r(x, y)$, 其代表全球大气光的照度分量, 该部分主要反应受到雾气影响的部分, 其包含大量低频成分; 另一部分为反射光 $i(x, y)$, 代表图像中物体表面所反射的光照强度, 该部分主要体现图像的细节部分, 并且属于图像的高频区。

$$D(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y). \quad (3)$$

图像在雾气条件下的降质原因有两个, 其一为扩大了照度的分量, 使得图像的整体效果呈现出灰白色, 其二为削弱了反射的分量, 使得图像的细节边缘区域被弱化, 这两种效果的相互作用导致图像在雾气条件下整体降质。本文采用的高斯低通滤波器^[10] 如式(4)所示,

$$H(u, v) = e^{-E^2(u, v)/2\delta^2}, \quad (4)$$

式(4)中, $E(u, v)$ 指 (u, v) 与频率矩阵原点之间的距离, δ 表述高斯函数扩散的程度, 令 $\delta = E_0$, E_0

为选取的介质频率参数, 可得式(5)为:

$$H(u, v) = e^{-E^2(u, v)/2E_0^2}. \quad (5)$$

当截止频率设定为 E_0 时, 则滤波器的最值由 1 变化为 0.607。雾气图像为 $D(x, y)$, 其傅里叶变换为 $D(u, v)$, 频域处理过程如式(6)所示:

$$D_1(u, v) = H(u, v) D(u, v). \quad (6)$$

对式(6)进行傅里叶反变换得到高斯低通滤波处理后的图像 $D_1(x, y)$ 。

$$D_1(x, y) = F^{-1}[H(u, v) D(u, v)]. \quad (7)$$

该过程能用图 2 表示。

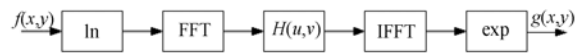


图 2 高斯低频滤波流程图

Fig. 2 Flowchart of Gauss low-pass filter

3.2 循环四分图算法确定全球环境光值 A

图像 $D_1(x, y)$ 为经高斯低频滤波后所得的雾气图像的低频部分, 该部分为受到雾气影响的部分。对于 $D_1(x, y)$ 进一步采用循环四分图法^[11] 处理, 可得到较为准确的 A 值。

循环四分图法的具体实现过程为, 首先把低频部分图像 $D_1(x, y)$ 平均划分为 4 个部分, 计算每一部分的像素平均值, 对像素平均值最大的部分继续划分, 重复上述步骤, 直至最大部分所包含的像素点的个数小于给定的阈值, 如图 3 所示。将所得的像素平均值 $D_2(x, y)$ 作为全球环境光值 A 。



(a) 初始图像 (b) 图像低频部分 (c) 循环四分图分割
(a) Original image (b) Low frequency image (c) Segmentation area

图 3 高斯低频滤波处理过程

Fig. 3 Processing of Gauss low-pass filter

4 各向异性高斯滤波处理大气光雾

本文大气光雾的优化策略为: 针对初始雾气图像求取其 RGB 三通道的最小值, 获取雾气图像的暗通道图像 $D^{\text{dark}}(x, y)$, 进而采用各向异性高斯滤波处理大气光雾 $H(x, y)$ 。

4.1 粗预测大气光雾

本文根据 He^[7]方法中的暗通道理论,给出了散射部分的粗略估计方式。

$$\min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} D^c(x, y)) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} F^c(x, y)) t(x, y) + A(1 - t(x, y)), \quad (8)$$

式中给出了 x 周围的小邻域范围对其 RGB 三通道求解最小值的操作。

暗通道理论可表述为:在清晰无雾的图像中,整幅图像像素点的 RGB 三通道最小值均趋于零,具体可用下式表述:

$$\min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} F^c(x, y)) \rightarrow 0. \quad (9)$$

将式(9)代入式(8),且 $H(x, y) = A(1 - t(x, y))$, 则可得式(10)。

$$H(x, y) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} D^c(x, y)) = D^{\text{dark}}(x, y). \quad (10)$$

采用雾气图像的最小值实现大气光雾的近似,从而实现了 $H(x, y)$ 的粗估测。但该过程是对雾气图像在小范围内寻求最小值,造成预测结果有明显的块状效应。粗预测大气光雾结果如图 4 所示。



(a)初始图像 1 (b)(a)的初始大气光雾
(a)Original image 1 (b)Initial atmosphere veil of (a)



(c)初始图像 1 (d)(c)的初始大气光雾
(c)Original image 1 (d)Initial atmosphere veil of (c)

图 4 初始大气光雾

Fig. 4 Initial atmosphere veil

4.2 初始大气光雾的优化思路

针对粗估计结果中大气光雾角点处和边缘处产生的不连续方块效应,采用各向异性高斯滤波优化初始大气光雾。散射部分 $H(x, y)$ 的最优解能通过式(11)表述:

$$\arg \max_H \int_x (H(x, y) - \lambda \phi(\|\nabla H(x, y)\|)), \quad (11)$$

式(11)中, λ 能够表述解的平滑性质, ϕ 是增函数, 并且是存在跳变的凹函数。求解式(11)是为获取 $H(x, y)$ 的最优解, 但该过程占用大量的处理资源。 $H(x, y)$ 的最优解即为求取尽可能大的 $H(x, y)$ 值, 并且使 $H(x, y)$ 尽量平滑。因而本文采用滤波法优化初始大气光雾。

4.3 各向异性高斯滤波器

在雾气图像中,景深大的物体受雾霾的影响程度大,并且其 RGB 三通道的值近似等于全球环境光值 A , $H(x, y)$ 值也较大;近景处物体受雾霾的影响程度小,物体颜色艳丽或者冷色系, $H(x, y)$ 值较小。因而远近景之间会出现跃变,利用选取的滤波器进行处理能保证图像平滑,而且可以在减小图像梯度的同时避免产生块状效应。然而大多数滤波器对景深突变处的处理效果不好,本文选取的滤波器不仅要具有一般滤波器的平滑功能还要保留图像的角点和边缘。

可以保持图像的边缘和角点信息的滤波器主要有双边滤波和基于各向异性的扩散滤波器。双边滤波器需要进行加权和平均运算,算法占用处理资源多,处理效率不高。各向异性滤波具有较好的适应性和鲁棒性,并能够保存大量角点和边缘。故本文最终选用各向异性高斯滤波器进行滤波。

常用的高斯滤波模板是以原点为中心,对 x 和 y 平面进行投影,下式中 σ 代表尺度, θ 表示方向。其数学公式可以表示为:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right)\right), \quad (12)$$

对 x, y 取不同的比率,则能获得各向异性高斯滤波器,其在坐标平面上的投影为一个椭圆,采用式(13)进行表达:

$$G(x, y, \sigma_x, \sigma_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right). \quad (13)$$

将椭圆部分沿着坐标轴变换 θ 角度,能够将图像从 xy 平面变换到 uv 面上,坐标转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (14)$$

将式(14)代入式(13)实现 θ 角度变换,能得到滤波算子为:

$$G(x, y, \sigma_x, \sigma_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x\cos\theta + y\sin\theta)^2}{\sigma_u^2} + \frac{(-x\sin\theta + y\cos\theta)^2}{\sigma_v^2} \right] \right\}. \quad (15)$$

图 5 为自适应各向高斯滤波过程。

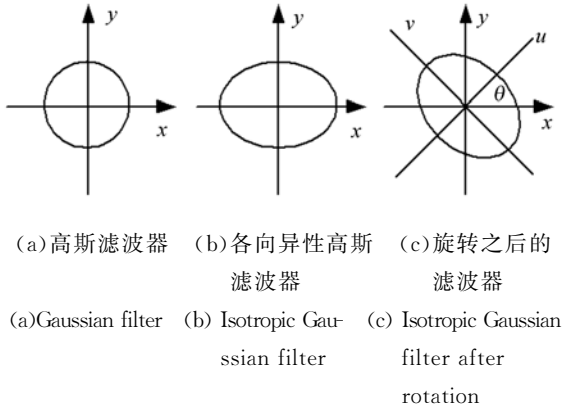


图 5 高斯滤波模型
Fig. 5 Gaussian model

对于图像的不同部分,若统一采用确定比例的(尺度 σ 和方向 θ)滤波器进行滤波,则当边缘与短轴一致时,图像模糊程度趋于极大值。基于此,本文采用自适应各向异性高斯滤波进行滤波^[12],其尺度和方向可根据图像特征的变化而变化。

4.4 自适应各向异性高斯滤波优化大气光雾

本文选用自适应各向异性高斯滤波处理图像,其能够在平滑图像的同时,有效地保存边缘细节。长轴的尺度 σ_u 采用式(16)确定:

$$\sigma_u^2(x, y) = 1/D(x, y), \quad (16)$$

式(11)中, x 和 y 为图像中某点像素值, $D(x, y)$ 为雾气图像的灰度值 $I(x, y)$ 按比例在0和1之

间),由前文可知,为大气光雾。

本文采用以下规则确定短轴尺度 σ_v :平滑区的短、长轴比接近1;边缘区的短、长轴比接近于0。因而图像的平滑程度是选取比率的关键,式(12)为灰度方差代表雾气图像的平滑程度。

$$DS = 1/MN \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (D(i, j) - \bar{D}(i, j))^2, \quad (17)$$

式(17)中, $M \times N$ 为选取的小区域范围, $\bar{D}(i_0, j_0)$ 为该区域内的灰度平均值,此式 $\bar{D}(i_0, j_0)$ 和 $D(i_0, j_0)$ 在0~255之间取值。 DS 表示小区域的方差。则可得短、长轴的比例为:

$$R = K/(K + DS), \quad (18)$$

式(18)中, K 为比例因子,则短轴尺度 σ_v 能表示为式(19):

$$\sigma_v = R \cdot \sigma_u. \quad (19)$$

综上所述,自适应高斯滤波需确定方向 θ 和比率 K 值的大小,文献[11]将这一过程转换为求取方向 θ 的垂直角 θ^\perp 。即采用 Gaussian 函数转换为水平和垂直两个方向上的导数,并与雾气图像进行卷积,获取雾气图像在 (x, y) 处的垂直梯度角 θ^\perp 。

$$E_x = \frac{\partial G(x, y, \sigma)}{\partial x} * D(x, y), \quad (20)$$

$$E_y = \frac{\partial G(x, y, \sigma)}{\partial y} * D(x, y), \quad (21)$$

$$\theta_\perp(x, y) = \arctan[E_y(x, y)/E_x(x, y)], \quad (22)$$

并且方向角 θ 与垂直角 θ^\perp 之间满足式(23)的关系:

$$\theta = \theta_\perp + 90, \quad (23)$$

将式(23)代入式(13)可得式(24)为:

$$G(x, y, \sigma_u, \sigma_v, \theta_\perp) = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_v} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{(x\cos\theta_\perp + y\sin\theta_\perp)^2}{\sigma_u^2} + \frac{(-x\sin\theta_\perp - y\cos\theta_\perp)^2}{\sigma_v^2} \right] \right\}, \quad (24)$$

σ_u 、 σ_v 以及垂直梯度角 θ^\perp 可由式(16-22)求得。经过反复实验得出 K 取20时,自适应各向异性高斯滤波对雾气图像的处理效果最优,并且此滤波器的处理效果优于高斯滤波器和线性滤波器。

4.5 还原清晰化图像

依据 Tarel^[10]对雾气清晰化算法的研究可知,由大气光雾 $H(x, y)$ 、全球环境光值 A ,采用式(1)可得到清晰图像 $F(x, y)$ 的还原,则大气光

学模型可改写为:

$$D(x, y) = F(x, y) \left(1 - \frac{H(x, y)}{A} \right) + H(x, y), \quad (25)$$

进一步将式(25)变换为:

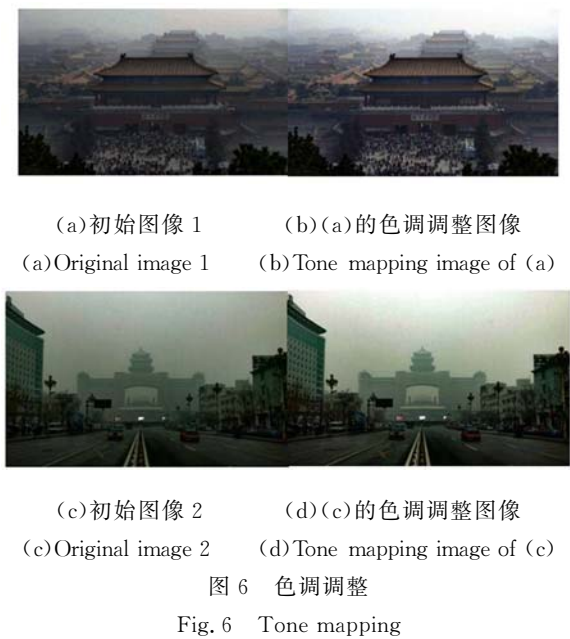
$$F(x, y) = \frac{D(x, y) - H(x, y)}{1 - H(x, y)/A}, \quad (26)$$

式中, $F(x, y)$ 为修复后的清晰图像, $D(x, y)$ 为原始降质图像,采用高斯低通滤波估测所得 A 值,采用自适应各向异性高斯滤波优化大气光雾 H

(x, y) , 最终依据式(26)还原清晰无雾图像 $F(u, v)$ 。

4.6 图像的色调调整^[13]

由于环境光的作用,使得雾气图像整体趋向于灰白色,并且其像素值比实际的像素值高,去雾清晰化处理后,导致图像的整体亮度值较低,因此,对清晰化算法处理后的图像实现色调调整操作是必要的,其能使处理后图像的色度和对比度更接近真实值。色调调整如图 6 所示。



色调调整是高动态^[14]技术处理高动态图像常选用的策略,该方法是依据特定方式将高动态图像进行压缩,使之能够在低动态的显示器上显示。本文采用 Drago 对数算子实现色调调整^[15],其对整体图像的明度、细节保存程度和对比度进行调节,该方法中显示器的亮度和场景的亮度选用映射关系:

$$L_d = \frac{L_d^{\max} \times 0.01}{\lg(L_{w\max} + 1)} \cdot \frac{\ln(L_w + 1)}{\ln\{2 + [(\frac{L_w}{L_w^{\max}})^{\frac{\ln b}{\ln 0.5}}] \times 8\}} \quad (26)$$

式中, L_d 代表显示器的亮度, L_d^{\max} 代表最大值的显示器亮度, $L_d^{\max} = 100$ 。参数 b 表示像素值高亮度值的压缩度和按区域的可见细节程度。若 b 值越高,则其亮度值被压缩的程度越严重。清晰化后的图像偏暗,且很多细节信息丢失,故需提升图像暗区域的亮度值和对比度,经反复实验知, b 取

1.3~1.6 时,处理后的效果最佳。从图(b)可知,处理后的清晰化图像整体较暗,进行色调调整后的图(c),其亮度值变亮,细节区域更加明显,接近于无雾的清晰图像。

5 实验结果与分析

在 Windows 7 操作系统下,采用 Matlab 2012 实现算法验证。计算机选用 4 GB 内存, Pentium(R) Dual-Core CPU T4200 @ 2.00GHz 的配置。

本文分别选用文献[2]算法、文献[6]算法、文献[7]算法和文献[9]算法作为对比方法进行实验。并运用视觉评价指标和测值作为评价指标。

5.1 视觉评价指标

视觉评价指标由人眼视觉信息进行判断,该评价指标具有便捷、准确、效率高和操作简单等特点。视觉评价步骤为:选择一定数目的观测人群,在给定的同一个实验条件下,令观测者依据一定的规则根据自我感知对图像评分,对所有观测者的评分取平均值,所得为 MOS (Mean Opinion Score)。视觉评价指标应考虑以下因素:对比度、亮度、色度、图像清晰度、背景平滑性、图像有无伪影效应、晕轮效应、尾部拖拉效应等。本文采用几种方法对 3 幅雾气图像分别进行处理,结果如图 7-9 所示。本文选取不同年龄、不同领域的 60 个人,其中:13~18 岁中学生男女各 10 人,18~28 岁高校美术专业学生男女各 15 人,30~45 岁文艺学院老师男女各 5 人,对几种方法的处理结果进行评分。采用五分制,5 分为优,表示无干扰;4~5 分为良好,表示干扰难以察觉;3~4 分为可以,表示能察觉干扰,但可以接受;2~3 分为差,表示干扰明显,并且干扰严重;1~2 分为很差,表示干扰很明显,并且无法接受。结果如表 1,2 所示。

表 1 男性视觉评分
Fig. 1 Men visual scores

男	图片				
	图(b)	图(c)	图(d)	图(e)	图(f)
10~12 岁学生	2.1	4.2	3.9	3.8	4.1
20~30 岁学生	1.9	3.5	3.6	3.3	4.2
30~40 岁老师	2.5	3.5	3.2	3.3	3.9

表 2 女性视觉评分

Fig. 2 Women visual scores

图片 女	图(b)	图(c)	图(d)	图(e)	图(f)
10~12 岁学生	1.5	3.6	3.6	3.5	3.9
20~30 岁学生	1.9	3.3	3.1	3.1	3.8
30~40 岁老师	2.3	3.1	2.8	3.3	3.6

5.2 测值评价指标

本文选取运行时间、亮度、对比度和峰值信噪比这几项测值对文献[2]、文献[6]、文献[7]、文献[9]和改进算法进行定量比较。文献[7]对透射率的处理选用软取图算法,此算法需处理拉普拉斯矩阵,占用大量的时间;文献[2]应用高斯函数对图像卷积后增强,处理速度较快;文献[9]采用独立成份分析法(ICA)实现全球环境光值 A 的估计,消耗很多处理资源;文献[6]选用直方图匹配处理效率高;改进算法处理时间快,占用时间资源少。

亮度表现图像的明暗程度(初始图像中雾气的干扰会使图像的亮度值增大);对比度代表整幅图像的灰度范围分布和亮度强弱差值,对比度值越大,图像亮度的强弱差值越显著;峰值信噪比表示图像的失真程度,信噪比值大的失真程度小。



(a)初始图像 1 (b)文献[7]算法结果 (c)文献[2]算法结果
(a)Original image 1 (b)Results of Ref. [7] (c) Results of Ref. [2]



(d)文献[9]算法结果 (e)文献[6]算法结果 (f)本文算法结果
(d)Results of Ref. [9] (e)Results of Ref. [6] (f) Proposed algorithm

图 7 各算法处理效果对比

Fig. 7 Comparison of dehazing performance for image 1 by different algorithms

根据去雾后的效果可知,受雾影响原始雾气图像亮度偏高但其对比度低,整体图像模糊,细节不清晰;文献[7]处理后的图像细节清晰但亮度不足,抗偏白物体的干扰能力差;文献[2]处理后的



(a)初始图像 2 (b)文献[7]算法结果 (c)文献[2]算法结果
(a)Original image 2 (b)Results of ref. [7] (c) Results of ref. [2]



(d)文献[9]算法结果 (e)文献[6]算法结果 (f)本文算法结果
(d)Results of ref. [9] (e)Results of ref. [6] (f) Results of proposed algorithm

图 8 各算法对图像 2 处理效果对比

Fig. 8 Comparison of dehazing performance for image 2 by different algorithms



(a)初始图像 3 (b)文献[7]算法结果 (c)文献[2]算法结果
(a)Original image 3 (b)Results of ref. [7] (c) Results of ref. [2]



(d)文献[9]算法 (e)文献[6]算法 (f)本文算法
(d)Results of Ref. [9] (e)Results of Ref. [6] (f)Results of proposed algorithm

图 9 各算法对图像 3 的处理效果对比

Fig. 9 Comparison of dehazing performance for image 3 by different algorithms

图像色彩鲜亮且对比度高,但图像易出现色偏;文献[9]处理后的图像景物亮度高,颜色逼近真实值,但细节处存在“晕轮效应”;文献[6]处理后的图像对比度加强,算法简单效果明显,但景深突变处易丢失信息并且出现过度增强现象。本文算法处理所得图像,亮度和对比度适中,图像细节丰富,边缘处较为完整,噪声干扰小,图像整体质量高。

表3 客观评价指标
Fig. 3 Objective evaluation

指标	算法					
	文献[7]	文献[2]	文献[9]	文献[6]	本文算法	
运行时间	200 * 300	8.562 3	0.155 7	6.842 7	0.132 8	0.587 3
/s	380 * 420	10.286 5	0.187 1	8.983 0	0.158 7	0.705 5
亮度	400 * 500	12.892 6	0.234 5	10.314 1	0.213 2	0.904 7
度	图7	86.25	92.56	162.53	141.86	178.63
对比度	图8	75.32	158.69	154.38	138.54	149.28
	图9	96.28	187.25	156.87	158.49	153.98
对比度	图7	1.85	2.35	16.83	14.69	16.95
	图8	0.92	15.48	13.95	11.76	16.03
	图9	3.17	18.87	12.45	12.89	16.77

6 结论

本文先采用高低通滤波求取雾气图像低频

参考文献:

- [1] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Chromatic framework for vision in bad weather[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR, Hilton Head, SC, USA, 2000*: 598-695.
- [2] 陈志斌,张超,宋岩,等. 灰度拉伸 Retinex 在大动态范围烟雾图像增强中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2014,43(9):3146-3150.
- CHEN ZH B, ZHANG CH, SONG Y, *et al.*. Application of Retinex with grayscale stretching in large dynamic range smoke image enhancement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3146-3150. (in Chinese)
- [3] LAND E H, MECCANN J. Lightness and Retinex theory [J]. *J Opt Soc Amer*, 1971, 61(1): 1-11.
- [4] JOBSON D J, RAHMAN Z U, WOODSELL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [5] 赵宏宇,肖创柏,禹晶,等. 马尔科夫随机场模型下的 Retinex 夜间彩色图像增强[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 1048-1055.
- ZHAO H Y, XIAO CH B, YU J, *et al.*. A Retinex algorithm for night color image enhancement by MFR[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 1048-1055. (in Chinese)
- [6] 刘雪超,吴志勇,王弟男,等. 结合自适应窗口的二维直方图图像增强[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 2027-2035.
- LIU X CH, WU ZH Y, WANG D N, *et al.*. Image enhancement by two-dimensional histogram with self-adaptive window[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 2027-2035. (in Chinese)
- [7] HE K M, SUN J A, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[C]. *CVPR; 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, Florida, USA, 2009*: 1956-1963.
- [8] 刘言,张红英,吴亚东. 基于半逆法的一种快速单幅图像去雾算法[J]. *图学学报*, 2015, 36(1): 68-76.
- LIU Y, ZHANG H Y, WU Y D. A fast single image de-hazing using the improved semi-inverse approach[J]. *Journal of Graphics*, 2015, 36(1): 68-76. (in Chinese)
- [9] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision (ICCV), Xi'an, China, 2009*: 2201-2208.
- [10] 尤政,杨冉,张高飞,等. 激光测距系统整形模块和

区,再对低频区采用循环四分图算法得到较精准的全球大气光值 A;用雾气图像最小值近似大气光雾,进而通过自适应各向异性高斯滤波,平滑大气光雾的边缘和角点;应用大气光学模型还原清晰化图像后,采用色调调整实现图像的整体调节。本文算法是文献[7]的改进,文献[7]采用软抠图算法修复景深突变处的白色块,消耗了大量的处理时间,而本文算法处理效率得到显著提升,并得到亮度、对比度效果好的处理图像,较完整地保留边缘细节。但是本文算法具有一定的局限性,若场景雾气浓度过高,处理后图像会出现一定程度的色偏。另外,户外场景是随机多变的,而且拍摄条件和状况也很复杂,进一步的研究将集中在对上述情况的改进,并将本文算法应用在视频处理中。

- 低通滤波模块优化设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(10):2527-2535.
- YOU ZH, YANG R, ZHANG G F, *et al.*. Optimization of shaping circuit and low-pass filter in laser ranging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10):2527-2535. (in Chinese)
- [11] 王广君, 田金文, 刘健. 基于四叉树结构的图像分割技术[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(1):12-14. WANG G J, TIAN J W, LIU J. Image segmentation based on the structure of quadtree [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(1):12-14. (in Chinese)
- [12] KIN J H, TANG W D, SIM J Y, *et al.*. Optimized contrast enhancement for real-time image and video de-hazing [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2013, 24(3):410-425.
- [13] 何舒文, 王延杰, 孙宏海, 等. 基于 DMD 的高动态范围场景成像技术[J]. 光子学报, 2015, 44(8):01-1-6. HE SH W, WANG Y J, SUN H H, *et al.*. High dynamic range imaging based on DMD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(8):01-1-6. (in Chinese)
- nese)
- [14] 刘海波, 杨杰, 吴正平, 等. 基于区间估计的单幅图像快速去雾[J]. 电子与信息学报, 2016, 33(2):381-385. LIU H B, YANG J, WU ZH P, *et al.*. Fast single image dehazing based on interval estimation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 33(2):381-385. (in Chinese)
- [15] 王卫星, 肖翔, 陈良琴, 等. 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, *et al.*. Image dark channel prior haze removal based on minimum filtering and guided filtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7):2100-2108. (in Chinese)
- [16] 高绍姝, 金伟其, 王延江, 等. 灰度融合图像目标与背景感知对比度客观评价模型[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5):1660-1665. GAO SH SH, JIN W Q, WANG Y J, *et al.*. Target-background perceptual contrast metric for gray fusion images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5):1660-1665. (in Chinese)

作者简介:



吴 斌(1965—),男,四川大竹人,教授,博士生导师,1985 年于中南大学获得学士学位,1993 年、1999 年于北京科技大学分别获得硕士、博士学位,主要从事经济智能控制、图像处理等方面的研究。E-mail: wubin@swust.edu.cn



付 辉(1991—),女,山西阳泉人,硕士研究生,主要从事图像处理、DSP 的研究。E-mail: 1285110730@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)