

# 基于 RGB 颜色空间椭球模型的去雾算法研究

焦子航, 范之国\*, 钱立进, 庄子杰

合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230601

**摘要** 雾霾环境下拍摄的图像总是存在模糊不清的问题, 为了更好地复原雾天图像, 提出了一种基于 RGB 颜色空间椭球模型的传输函数估计算法。首先, 将雾天图像的某一邻域内的像素灰度值映射至 RGB 颜色空间, 并通过椭球模型拟合像素灰度值的聚集状态; 然后, 将椭球中所有向量向大气光向量上投影, 以此估计每一像素位置的传输函数; 最后, 对传输函数进行优化, 并结合大气光向量估计实现图像去雾。实验结果表明, 所提基于 RGB 颜色空间椭球模型的传输函数估计算法可以有效地复原雾天图像。

**关键词** 成像系统; 图像去雾; RGB 颜色空间; 椭球模型; 传输函数

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0811007

## Dehazing Algorithm Based on RGB Color Space Ellipsoid Model

Jiao Zihang, Fan Zhiguo\*, Qian Lijin, Zhuang Zijie

School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology,  
Hefei, Anhui 230601, China

**Abstract** The images captured in a hazy environment are always prone to blurring. To restore the hazy images, a transmission function estimation algorithm based on the RGB color space ellipsoid model is proposed. First, the gray values of pixels in a neighborhood of a hazy image were mapped to RGB color space, and the aggregation state of pixel gray values were fitted by an ellipsoid model. Furthermore, all vectors in the ellipsoid were projected onto the atmospheric light vector to estimate the transmission function for each pixel. Finally, the transmission function is optimized and combined with atmospheric light vector estimation to restore the hazy images. Experimental results indicate that the proposed transmission function estimation algorithm, which is based on the RGB color space ellipsoid model, can effectively restore the hazy images.

**Key words** imaging systems; image dehazing; RGB color space; ellipsoid model; transmission function

## 1 引言

在雾霾天气环境下, 无论是人眼观察到的, 还是相机拍摄的图像, 总存在视野中景象对比度和清晰度低的问题, 给视频监控、卫星遥感及目标检测和识别等带来不利影响。因此, 关于利用探测系统获取雾天图像, 并借助计算机图像处理技术复原无雾清晰图像的研究具有重要的意义和实用价值。

基于图像处理的去雾方法主要分为两类: 1) 基于图像增强的方法; 2) 基于大气散射模型的复原方法。在基于大气散射模型的复原方法中, Schechner 等<sup>[1]</sup>主要考虑大气背景光的偏振特性, 通过计算偏振图像背景区域的偏振度等参量, 估计大气光和传输函数, 从而复原出无雾图像。Tan 等<sup>[2]</sup>利用无雾图像相比于雾天图像具有更高对比度的特点, 从增强雾天图像对比度的角度进行图像去雾。Fattal<sup>[3]</sup>利用阴

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-20; 录用日期: 2021-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(61571177)、安徽省高等学校自然科学基金项目(KJ2018JD12)

通信作者: \*fzg@hfut.edu.cn

影函数和传输函数之间的局部数据统计无关性,求解传输函数并复原雾天图像。He 等<sup>[4]</sup>提出一种基于暗通道先验的去雾算法,该算法由于简单有效成为图像去雾领域的经典算法之一,但是暗通道先验在处理存在较多天空区域的雾天图像时,遇到了困难。Tarel 等<sup>[5]</sup>通过对雾天图像的最小颜色分量进行中值滤波,以获得大气光并复原雾天图像。Berman 等<sup>[6-7]</sup>认为一幅无雾场景图像可由多个颜色进行近似,且分别聚类,并提出了一种雾霾线模型。当场景存在雾霾时,某一聚类中的像素灰度值对应于 RGB 颜色空间中的向量由于不同传输函数值而形成雾霾线,利用这些雾霾线可估计传输函数并复原无雾图像。传输函数是图像去雾的一个关键参数,对其进行准确估计至关重要。上述传输函数的估计方法或从增强图像对比度入手,或对雾天图像进行滤波以获取传输函数,而没有从统计的角度对雾天图像的像素灰度值的一般分布规律进行分析,导致部分雾天图像复原结果丢失了部分目标细节信息。从 Berman 的雾霾线聚类方法获得启发,本实验组以 RGB 颜色空间的椭球模型拟合雾天图像的像素灰度值的聚集状态,不是从滤波的方法,而是从原雾天图像的像素灰度值中估计传输函数,这样更符合像素灰度值分布的一般统计规律。

针对大气散射模型中的传输函数,本文提出了基于 RGB 颜色空间椭球模型的传输函数估计算法。首先,依据暗通道先验算法估计得到雾天图像的大气光向量;然后,将雾天图像中的某一矩形窗口中的所有像素灰度值映射至 RGB 颜色空间中,并通过椭球模型拟合像素灰度值的聚集状态;最后,将椭球中的向量往大气光向量上投影,由此估计每一像素处的传输函数值。根据估计得到的大气光向量和传输函数,即可复原出清晰的无雾目标图像。

## 2 雾天图像复原原理

### 2.1 大气散射模型

描述雾天图像成像过程的大气散射模型如图 1 所示,该成像模型描述探测系统获得的总光强为目标辐射光的衰减光和大气散射光的线性叠加,且两者在总光强中的比例由传输函数确定。对于雾天环境中探测系统获得的图像,其成像模型(大气散射模型)通常可表示为

$$I(x) = J(x)t(x) + A[1 - t(x)], \quad (1)$$

式中: $I(x)$ 为探测系统获取图像的总光强; $J(x)$ 为

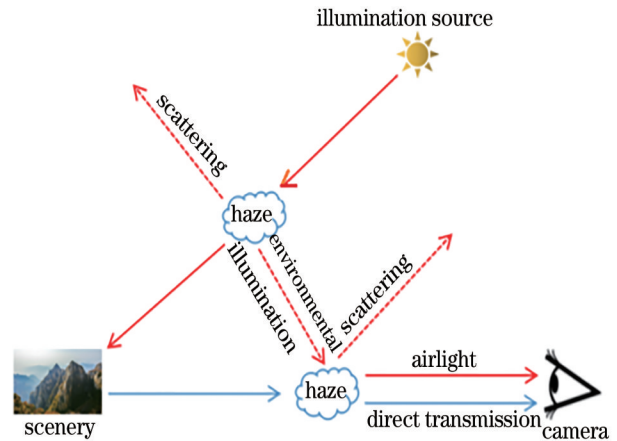


图 1 大气散射模型

Fig. 1 Atmospheric scattering model

复原得到的未经衰减和散射的无雾目标图像; $A$ 为无穷远处的大气光向量; $t(x)$ 为传输函数, $x$ 为图像中像素的坐标。

### 2.2 大气光向量的求解

雾天图像中无穷远处大气光值的估计对于去雾结果至关重要。对于(1)式中的大气光向量 $A$ ,最直观的计算方法是手动选取雾天图像天空区域的某一矩形窗口,并计算该矩形窗口中所有像素在每一个颜色通道灰度值的平均值以组成大气光向量 $A$ 。但是手动选取图像的某一矩形区域的过程比较繁琐,难以实际应用。因此,为了简单快速地估计雾天图像的大气光向量 $A$ ,一般选择如二叉树分割<sup>[8]</sup>和雾霾线<sup>[7]</sup>等自动估计方法。本实验组选择 He<sup>[4]</sup>的估计方法:首先,通过计算得到雾天图像的暗通道图像;为了避免直接选取雾天图像中最大灰度值作为大气光向量带来的误差,选取雾天图像中对应于暗通道图像中灰度值从大到小前 0.1% 的像素,并计算所选取像素位置在每个颜色通道的灰度值的平均值,则 3 个颜色通道的灰度值平均值共同构成大气光向量 $A$ 。

### 2.3 雾天图像的复原

图 2 为所提算法流程。首先,依据第 2.2 节中算法估计大气光向量 $A$ ;其次,将雾天图像每一像素的邻域矩形窗口像素灰度值映射至 RGB 颜色空间中,并使用椭球模型拟合其聚集状态;然后,将椭球中所有向量往大气光向量上投影,取投影最小值以估计该像素处的传输函数值,并使用导向滤波对初估计的传输函数进行优化;最后,在得到大气光向量 $A$ 和传输函数 $t$ 后,即可依据大气散射模型复原清晰无雾目标图像。复原公式为

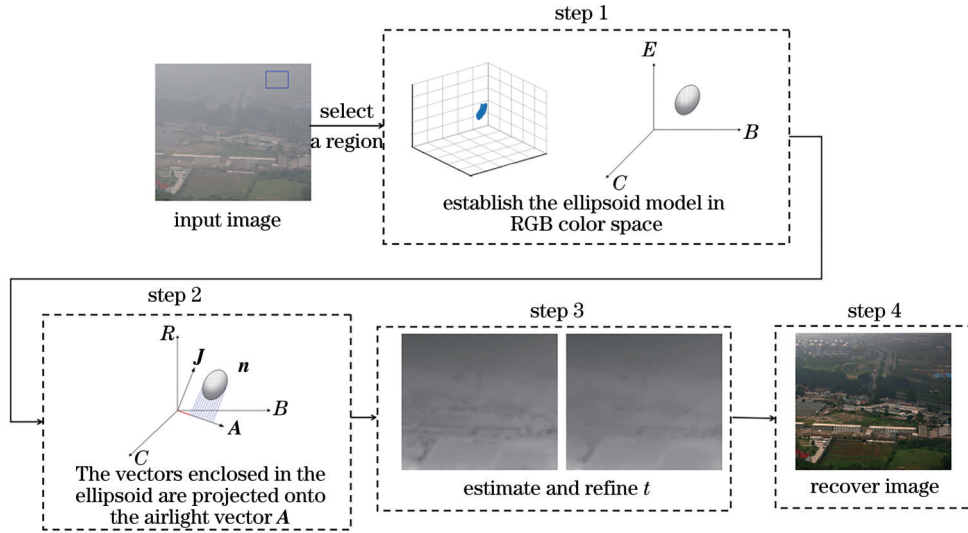


图 2 所提算法流程

Fig. 2 Flow chart of proposed algorithm

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\min\{\max[\hat{I}^\delta(x), 0.1], 0.9\}} + A, \quad (2)$$

式中:为了避免复原结果中出现噪声等干扰,将传输函数的值限定在 0.1 与 0.9 之间; $\delta$  为伽马变换的系数,用以修正传输函数,取 0.85。

### 3 利用椭球模型求解传输函数

#### 3.1 传输函数的求解

将雾天图像的某一矩形窗口中所有像素的 RGB 三通道灰度值投影到 RGB 颜色空间中,则其对应 RGB 颜色空间中坐标的聚集状态大致可用椭球模型描述。设 RGB 颜色空间中的某一向量为  $I = [I_r, I_g, I_b]^T$ , 雾天图像中的某一矩形窗口为  $w_i$ , 该矩形窗口中所有像素的 RGB 三通道灰度值对应 RGB 颜色空间中的聚集向量区域为  $\Omega_i$ , 有

$$\Omega_i = \{I \mid (I - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (I - \mu_i) \leq 1\}, \quad (3)$$

式中:  $\mu_i$  为描述椭球在 RGB 颜色空间中位置的椭球中心向量;  $\Sigma_i$  为描述椭球形状和方向的椭球协方差矩阵。

$$\Sigma_i = \begin{bmatrix} \sigma_{r,i}^2 & \sigma_{rg,i} & \sigma_{rb,i} \\ \sigma_{gr,i} & \sigma_{g,i}^2 & \sigma_{gb,i} \\ \sigma_{br,i} & \sigma_{bg,i} & \sigma_{b,i}^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{c,i}^2, c \in \{r, g, b\}$  为以像素  $i$  为中心的矩形窗口的所有像素在通道  $c$  的灰度值的方差;  $\sigma_{c_1 c_2, i}, c_1, c_2 \in \{r, g, b\}$  为以像素  $i$  为中心的矩形窗口的所有像素在通道  $c_1$  与通道  $c_2$  之间的协方差。

(3) 式表示雾天图像某一矩形窗口像素灰度值

的椭球聚集状态。原雾天图像中的矩形窗口  $w_i$  在 RGB 颜色空间中的映射  $\Omega_i$  如图 3 所示, 包围在椭球中的点的三维坐标值为矩形窗口  $w_i$  中所有像素的三通道灰度值。根据 (1) 式中的雾天图像成像模型可知, 向量  $I$  是目标光向量  $J$  和大气光向量  $A$  的线性叠加, 向量  $A$  对应的比例为  $1 - t(x)$ , 该比例决定了雾天图像中总光强中需要去除的大气光的比例<sup>[9]</sup>。

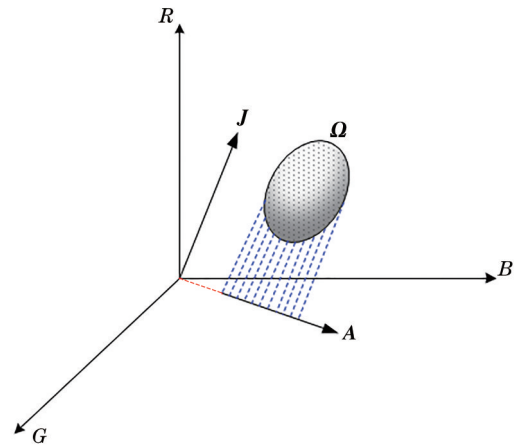


图 3 椭球中向量往向量 A 上投影图

Fig. 3 Vectors enclosed in ellipsoid projected onto vector A

椭球中的向量  $I(x)$  往大气光向量  $A$  上投影后, 则可估计在像素  $x$  处总光强中混合的大气光光强。向量  $I(x)$  的长度与向量  $A$  的长度之间存在一个比值, 设该比值为  $\theta(x)$ , 有

$$\theta(x) = \frac{\|I(x)\| \cos \alpha}{\|A\|} = \frac{I(x) \cdot A}{\|A\|^2}, \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  表示向量  $I(x)$  与向量  $A$  之间的夹角。

设矩形窗口(矩形窗口通常为正方形,且像素个数通常为奇数)以像素 $z$ 为中心,则像素 $z$ 处对应应在 RGB 颜色空间中的向量为椭球的中心向量 $\mu_i$ 。如果椭球中的所有向量均往大气光向量 $\mathbf{A}$ 上投影,则可获得一系列的投影值。这些投影值中的最小值则可看作是在像素 $z$ 处的总光强中大气光光强的比例,该比例对应于图 3 中的虚线部分,可记为 $\theta_{\text{est}}(z)=1-t(z)$ 。

设对应于最小投影值的在图像中的像素为 $z^*$ ,对应应在椭球中的向量为 $\mathbf{I}(z^*)$ ,对应大气光的传输函数的值为 $\theta_{\text{est}}(z)$ ,有

$$\theta_{\text{est}}(z)=1-t(z)=\frac{\|\mathbf{I}(z^*)\|\cos\alpha}{\|\mathbf{A}\|}=\frac{\mathbf{I}(z^*)\cdot\mathbf{A}}{\|\mathbf{A}\|^2}。 (6)$$

若直接选取投影值最小值,这样依然是通过对雾天图像进行滤波获得传输函数值的,而基于椭球模型估计投影值最小值,则传输函数的值以“重构”的方式获得,可避免滤波带来的复原结果上的缺点,如图 4 所示。为了简便,将 $\mathbf{I}(z^*)$ 记为 $\mathbf{I}^*$ 。根据图 4, $\mathbf{I}^*$ 在椭球面上,有

$$S(\mathbf{I}^*)=(\mathbf{I}^*-\mu_i)^T\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}(\mathbf{I}^*-\mu_i)=1, (7)$$

式中: $S$ 是椭球面上点的集合。则在椭球面上 $\mathbf{I}^*$ 处的切向量为

$$\nabla S(\mathbf{I})\Big|_{\mathbf{I}=\mathbf{I}^*}=\nabla_{\mathbf{I}}S(\mathbf{I}^*)=2\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}(\mathbf{I}^*-\mu_i)。 (8)$$

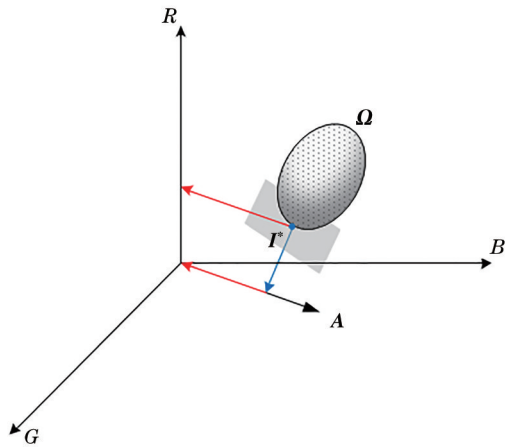


图 4 椭球模型求解投影最小值

Fig. 4 Solving projection minimum by ellipsoid model

上述计算过程中,RGB 颜色空间中的像素灰度值的聚集状态设置为椭球形状。若要依据椭球模型估计传输函数,则计算过程太过复杂且运行时间冗长,故需要对椭球模型进行简化。也就是说,将椭球模型简化为球形模型。因为球形模型在各个

方向上的半径均相同,若将椭球模型简化成球形模型,则椭球的协方差矩阵的协方差分量为 0,且每个颜色通道的方差值均相等。使用球形模型表示 RGB 颜色空间的像素灰度值的聚集状态时,(4)式中的协方差矩阵可重写为

$$\boldsymbol{\Sigma}_i=\begin{bmatrix} \sigma_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_i^2 \end{bmatrix}, (9)$$

式中: $\sigma_i^2=\sigma_{r,i}^2=\sigma_{g,i}^2=\sigma_{b,i}^2$ 。对(7)式变形,有

$$(\mathbf{I}^*-\mu_i)^T(\mathbf{I}^*-\mu_i)=|\boldsymbol{\Sigma}_i|^{1/3}=\sigma_i^2。 (10)$$

即 $\|\mathbf{I}^*-\mu_i\|=\sigma_i$ 。由椭球面上 $\mathbf{I}^*$ 处的切向量与大气光向量 $\mathbf{A}$ 平行且方向相反,有

$$\frac{\nabla_{\mathbf{I}}S(\mathbf{I}^*)}{\|\nabla_{\mathbf{I}}S(\mathbf{I}^*)\|}=\frac{2\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}(\mathbf{I}^*-\mu_i)}{\|2\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}(\mathbf{I}^*-\mu_i)\|}=\frac{\mathbf{I}^*-\mu_i}{\|\mathbf{I}^*-\mu_i\|}=-\frac{\mathbf{A}}{\|\mathbf{A}\|}。 (11)$$

结合(10)式和(11)式可得,切点 $\mathbf{I}^*$ 表达式为

$$\mathbf{I}^*=\mu_i-\frac{\mathbf{A}}{\|\mathbf{A}\|}\sigma_i。 (12)$$

当椭球模型转化为球形模型后,记球中的向量点的集合 $\Omega_i=\{\mathbf{I}_1,\mathbf{I}_2,\dots,\mathbf{I}_N\}$ ( $N$ 为球中向量点的个数),则球形模型的协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}_i$ 和球心向量 $\mu_i$ 应满足的条件为:包含球 $\Omega_i$ 中的所有向量,且使得球的体积最小。则求解协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}_i$ 和球心向量 $\mu_i$ 的问题即为求解最小球形体积的问题<sup>[10]</sup>。

$$\text{minimize} [\log \det(\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1})] \text{ subject to } \sup_{\mathbf{I}_j \in \Omega_i}$$

$$\|\boldsymbol{\Sigma}_i\mathbf{I}_j+\mu_i\|\leq 1, \quad j=1,2,\dots,N。 (13)$$

通过 Khachiyan 算法<sup>[11]</sup>对该最小化问题进行求解,则可得到球形模型的协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}_i$ 中 $\sigma_i$ 的值和球心向量 $\mu_i$ ,代入(12)式即可得到切点 $\mathbf{I}^*$ 的坐标。将计算得到的切点坐标 $\mathbf{I}^*$ 代入至传输函数的表达式中,则在像素 $z$ 处的传输函数值为

$$t(z)=1-\theta_{\text{est}}(z)=1-\frac{\mathbf{I}^*\cdot\mathbf{A}}{\|\mathbf{A}\|^2}。 (14)$$

### 3.2 传输函数的优化

若直接将估计得到的传输函数代入至成像模型中进行图像复原,复原结果中的边缘地带会出现去雾不彻底等现象,因此需要对传输函数进行优化。现有多种针对传输函数的滤波平滑方法,例如双边滤波<sup>[12]</sup>和 L0-梯度平滑<sup>[13]</sup>均可以达到对传输函数进行优化的目的。但是,使用上述滤波方法对传输函数进行优化时,在像素灰度值变化较大的区

域,某些必要的边缘信息会丢失。本实验组选取了一种快速简单的滤波方法,即使用导向滤波<sup>[14]</sup>优化传输函数。导向滤波是一种能够很好地保留边缘和细节的平滑滤波器,可以弥补复原结果中的边缘效应,经导向滤波优化的传输函数对应的复原结果图像更加清晰且更加自然。

设对应于雾天图像的单通道图像为  $I$ ,待滤波优化的传输函数为  $t$ ,滤波优化后的传输函数为  $\hat{t}$ 。记在雾天图像中的某个像素的标记为  $i$ ,则在像素  $i$  处的滤波后的传输函数值为

$$\hat{t}_i = \sum_j W_{ij}(I)t_j, \quad (15)$$

$$W_{ij}(I) = \frac{1}{|\omega_k|^2} \sum_{i,j \in \omega_k} \left[ 1 + \frac{(I_i - \mu_k)(I_j - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \epsilon} \right], \quad (16)$$

式中: $\mu_k$ 与 $\sigma_k$ 分别为以像素 $i$ 为中心的矩形窗口 $\omega_k$ 中所有像素灰度值的均值和标准差; $I_i$ 与 $I_j$ ( $i, j \in \omega_k, i \neq j$ )分别为导向图像 $I$ 在像素 $i$ 和 $j$ 处的灰度值; $\epsilon$ 为修正系数,防止除数为零; $|\omega_k|$ 为矩形窗口 $\omega_k$ 中像素的个数。

## 4 实验结果和分析

为了验证所提算法的有效性,对同样的雾天图像数据从主观和客观两方面进行评价。所使用的编程语言为C++,所有对比实验都在Windows 7 64位操作系统下进行,硬件配置为Intel(R) Core i5-7500 CPU@3.40 GHz,8.0 GB RAM。

### 4.1 主观评价分析

将所提算法的复原结果分别与Berman<sup>[6-7]</sup>、He<sup>[4]</sup>、Tarel<sup>[5]</sup>、Fattal<sup>[15]</sup>、Kim<sup>[9]</sup>的复原结果进行了对比,结果如图5所示。在进行主观对比评价时,主要从去雾程度、复原结果亮度、目标区域对比度及天空区域处理情况等几个方面进行分析。[图5(a)]为原始雾天图像,从上到下依次为Tian'anmen、Cones、Swan、Forest、House、Road、Dolls、Cityscape。从[图5(b)]可以看出,Berman的算法存在去雾不彻底、复原结果亮度不够等问题,例如[图5(b)]第3幅图中绿色草坪区域亮度较暗,第4幅图中景深较深的远处区域去雾不彻底。从[图5(c)]可以看出,He的基于暗通道先验理论的去雾算法具有较好的去雾效果,但也存在部分复原结果颜色失真的问题。从[图5(d)]可以看出,Tarel的去雾算法存在明显的颜色失真问题,例如[图5(d)]第1幅图中矩形框中的天空区域、

第3幅图中矩形框中的远景区域、第8幅图中矩形框中的远景及天空区域。从[图5(e)]和[图5(f)]可以看出,Fattal和Kim的去雾算法均可取得较好的复原效果,但[图5(e)]第1幅图中的天空区域出现明显的过处理现象,[图5(f)]中第1幅图中的天空区域出现明显的光圈现象。从[图5(g)]可以看出,所提算法在整体上取得了较好的复原效果,例如[图5(g)]第1幅图矩形框中的天空区域,避免了Tarel复原结果中天空区域颜色失真、Berman复原结果中天空区域亮度较亮、Fattal复原结果中天空区域过处理的问题,且能够有效抑制He与Kim复原结果中天空区域的光圈等现象,能够较好地克服天空区域复原结果的缺点;[图5(g)]第4幅图矩形框所选景深较深区域取得了较好的处理效果,避免了Tarel复原结果在该处亮度较暗及Berman去雾算法在该区域去雾不彻底的缺点,达到与He、Fattal和Kim相当的复原效果。在复原结果上来看,所提去雾算法虽不能在各个方面均优于其余去雾算法,但整体上具有较好的优势。

为了进一步说明所提基于RGB颜色空间椭球模型估计传输函数的算法在突出目标及抑制天空区域光圈等方面的优势,将Kim的算法与所提算法进行对比。[图6(a)]为Kim的算法的复原结果,[图6(b)]为所提算法的复原结果,[图6(c)]为由Kim算法估计得到的传输函数,[图6(d)]为由所提算法估计得到的传输函数。为了避免导向滤波等优化方法对传输函数的影响,将未经优化的初始估计的传输函数进行了对比。从整体上看,所提算法的传输函数更加平滑,且避免Kim算法传输函数中因矩形窗口出现的块状效应。[图6(c)]和[图6(d)]中虚线矩形窗口为所选同一目标区域,实线矩形窗口为所选同一天空区域,虚线矩形窗口像素灰度值的平均梯度值分别为0.0085和0.0062,实线矩形窗口像素灰度值的平均梯度值分别为0.0018和0.0013,说明所提算法估计得到的传输函数相比于Kim的算法得到的传输函数,无论是在目标区域,还是在背景区域,其像素灰度值的变化程度均更加缓和平滑。所提基于RGB颜色空间椭球模型估计传输函数的算法避免从基于图像矩形块状操作的滤波入手,其复原结果中的天空区域能够更加有效地抑制天空区域的光圈等不自然现象,这与图5中的天空区域比较结果是一致的。



图 5 复原结果对比。(a)雾天图像;(b)文献[6-7]的算法;(c)文献[4]的算法;(d)文献[5]的算法;(e)文献[15]的算法;(f)文献[9]的算法;(g)所提算法

Fig. 5 Comparison of recovery results. (a) Hazy images; (b) algorithm in reference [6-7]; (c) algorithm in reference [4]; (d) algorithm in reference [5]; (e) algorithm in reference [15]; (f) algorithm in reference [9]; (g) proposed algorithm

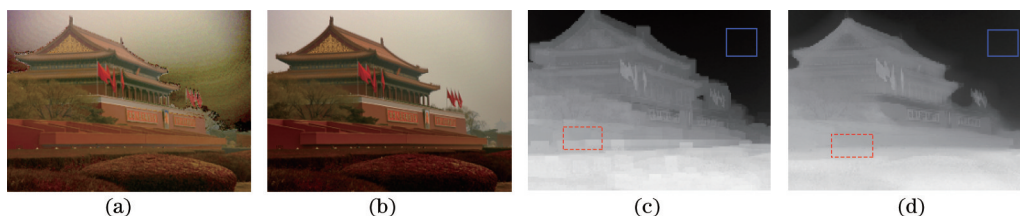


图 6 传输函数对比。(a)文献[9]算法复原结果;(b)所提算法复原结果;(c)文献[9]算法传输函数;(d)所提算法传输函数

#### 4.2 客观评价分析

采用均方误差(MSE)、结构相似性(SSIM)和平均梯度(AVG-GRAD)对 Berman<sup>[6-7]</sup>、He<sup>[4]</sup>、Tarel<sup>[5]</sup>、Fattal<sup>[15]</sup>、Kim<sup>[9]</sup>的算法及所提算法的复原结果进行客观评价,这3个客观评价标准主要评价复原结果图像的对比度及其与原雾天图像之间的差别,结果如表1所示。

MSE计算复原图像与原雾天图像之间的灰度值差值的平方均值,主要衡量复原结果与雾天图像

之间的误差大小。在一定范围内,MSE的值越大,说明复原结果与雾天图像之间的差别越大,复原效果就越好;SSIM来源于结构相似理论,计算复原结果与原雾天图像之间的相似程度,主要反映复原结果与雾天图像之间在轮廓,细节等反面的相似程度。在一定范围内,SSIM的值越小,说明复原结果与雾天图像之间的差别越大,复原效果就越好;AVG-GRAD计算图像多维方向上灰度变化的曲率,即灰度变化率大小,表征复原结果中的微小细节对比度

表1 客观评价结果  
Table 1 The objective evaluation results

Image	Parameter	Berman	He	Tarel	Fattal	Kim	Proposed algorithm
Tian'anmen	MSE	0.0554	0.0555	0.0586	0.0080	0.0632	0.0430
	SSIM	0.7269	0.7825	0.6081	0.6522	0.7275	0.7373
	AVG-GRAD	7.0125	6.0360	6.5873	5.3909	7.0677	7.2282
Cones	MSE	0.0174	0.0168	0.0128	0.0108	0.0130	0.0140
	SSIM	0.6752	0.6766	0.7041	0.7320	0.6179	0.5867
	AVG-GRAD	12.6162	9.2122	11.3418	9.6571	7.6276	7.0542
Forest	MSE	0.0039	0.0030	0.0026	0.0033	0.0032	0.0046
	SSIM	0.6750	0.8047	0.7542	0.7299	0.6923	0.7066
	AVG-GRAD	13.5506	9.7475	12.1287	12.0351	8.6889	14.5010
Dolls	MSE	0.0164	0.0339	0.0094	0.0222	0.0206	0.0380
	SSIM	0.6205	0.4974	0.7059	0.5886	0.5734	0.5836
	AVG-GRAD	6.6788	7.1807	5.8016	6.4123	7.6107	6.7187
Swan	MSE	0.0200	0.0132	0.0058	0.0424	0.0190	0.0543
	SSIM	0.4237	0.6114	0.5100	0.3622	0.6211	0.6733
	AVG-GRAD	9.7122	7.3740	10.1733	8.8836	9.0004	7.2007
Road	MSE	0.0204	0.0316	0.0068	0.0359	0.0205	0.0187
	SSIM	0.7008	0.5937	0.6662	0.5476	0.6002	0.6352
	AVG-GRAD	12.0398	10.4792	11.1661	12.4379	11.0374	12.4861

和纹理变化特征。总的来说,AVG-GRAD的值越大,复原结果就相对越清晰。

通过对表1中的数据进行分析可知,所提算法对不同的雾天图像均取得了良好的图像复原效果,且在某些数据的复原结果的客观评价价值更具优势。例如,对于Tian'anmen图像,所提算法复原结果的AVG-GRAD取得了最大值;对于Cones图像,所提算法复原结果的SSIM取得了最小值;对于Forest图像,所提算法复原结果的MSE和AVG-GRAD均取得了最大值;对于Dolls图像和Swan图像,所提算法复原结果的MSE均取得了最大值;对于Road图像,所提算法复原结果的AVG-GRAD取得了最大值。这说明所提算法复原结果在MSE、SSIM、AVG-GRAD这三种评价方式中均占有优势,且所提算法的客观评价结果中共有7组数据取得极值,在整体上也更具优势。

## 5 结 论

提出了一种基于RGB颜色空间椭球模型的图像去雾算法。首先,估计雾天图像的大气光向量,将椭球中的所有向量均往大气光向量上投影,且选择投影值中的最小值以最大化目标光在总光强中的比例,并抑制和去除总光强中的大气光。如果直

接求解椭球模型,则计算过程太过复杂且运行时间较长,所以椭球模型有必要简化为球形模型。计算得到球形模型的中心向量和半径后,则可估计得到传输函数,通过导向滤波等优化方法对传输函数进行优化,进而复原出清晰的无雾图像。实验结果表明,所提去雾算法能够取得较好的复原效果。至于使用伽马变换对传输函数进行修正的过程,只是通过实验得到的经验操作,还没有在理论上严格证明。后续的研究应从理论上分析传输函数估计时的误差出发,给出更好的优化传输函数的方法。

## 参考文献

- [1] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization[C]// Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, December 8-14, 2001, Kauai, HI, USA. New York: IEEE Press, 2001: 7176882.
- [2] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]//2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2008: 10139948.
- [3] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions

- on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [4] 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.
- [5] Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, September 29-October 2, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2009: 2201-2208.
- [6] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Non-local image dehazing[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 27-30, 2016, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 1674-1682.
- [7] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Single image dehazing using haze-lines[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(3): 720-734.
- [8] Kim J H, Jang W D, Sim J Y, et al. Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(3): 410-425.
- [9] Kim I, Kim M H. Dehazing using non-local regularization with iso-depth neighbor-fields[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, February 27-March 1, 2017, Porto, Portugal. New York: SCITEPRESS-Science and Technology Publications, 2017: 77-88.
- [10] Gibson K B, Nguyen T Q. On the effectiveness of the dark channel prior for single image dehazing by approximating with minimum volume ellipsoids[C]//2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), May 22-27, 2011, Prague, Czech Republic. New York: IEEE Press, 2011: 1253-1256.
- [11] Kumar P, Yildirim E A. Minimum-volume enclosing ellipsoids and core sets[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2005, 126(1): 1-21.
- [12] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Sixth International Conference on Computer Vision, January 7, 1998, Bombay, India. New York: IEEE Press, 1998: 839-846.
- [13] Xu L, Lu C W, Xu Y, et al. Image smoothing via  $L_0$  gradient minimization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6): 1-12.
- [14] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [15] Fattal R. Dehazing using color-lines[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 34(1): 1-14.