

尺度自适应暗通道先验去雾方法

宋颖超^{1,2,3}, 罗海波^{1,3}, 惠斌^{1,3}, 常铮^{1,3}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 在雾、霾等天气条件下, 大气粒子的散射作用使环境的能见度偏低, 视觉系统采集到的图像严重降质。基于暗通道先验的图像复原方法因其去雾效果自然、约束条件少, 且易于实现等优点而受到广泛关注。但是, 该方法的去雾效果受尺度(暗通道的求解半径)影响很大, 对于不同场景的图像, 不存在一个普遍适用的最优尺度。针对该问题, 文中提出一种尺度自适应方法, 根据图像的颜色和边缘特征自适应地调节暗通道的尺度范围, 得到像素级的暗通道求解尺度, 兼顾大尺度求解色彩失真小和小尺度求解"光晕"失真小等优点。此外, 针对暗通道去雾方法会使天空光估计点落到前景区域的问题, 提出了一种改进的天空光估计方法, 可使估计点鲁棒地落到与其物理意义相符的背景区域。对多种雾化场景图像的处理结果表明: 文中方法适应性强、去雾效果自然, 且对比度提升显著。

关键词: 图像去雾; 尺度自适应; 暗通道先验; 天空光; 透射率

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0928002

Haze removal using scale adaptive dark channel prior

Song Yingchao^{1,2,3}, Luo Haibo^{1,3}, Hui Bin^{1,3}, Chang Zheng^{1,3}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Opt-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China)

Abstract: In fog and haze weather conditions, scattering of atmospheric particles greatly reduces the outdoor visibility. Images captured by vision system suffer from serious degradation. Haze removal using the dark channel prior is considered to be a good solution due to its advantage of simple implementation and pleasing result with little constraint. While the selection of scale (radius of patch size) determines quality of the recovered image. For different scenes, there is no generally applicable scale. To solve this problem, in this paper, a scale adaptive method was proposed. It adjusted the range of scale adaptively according to features of color and edge, and get the pixel-level scale of dark channel. Proposed method has both advantage of little color distortion and little "halo" artifacts. In addition, an improved method of atmospheric light estimation was proposed. By this approach, the estimation point robustly fell into the background region, and that was physically sound. Experimental results on a variety of outdoor hazy

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-02-03

基金项目: 总装预研项目(51301030108)

作者简介: 宋颖超(1983-), 女, 博士生, 主要从事图像处理方面的研究。Email: songyingchao@sia.cn

导师简介: 罗海波(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事图像处理、目标识别等方面的研究。Email: luohb@sia.cn

images demonstrate that the proposed method is general applicable. The method also achieves pleasing results of haze removal with good color atmosphere and higher contrast.

Key words: image haze removal; scale adaptive; dark channel prior; atmospheric light; transmission

0 引言

相机、摄像机等图像采集系统已广泛应用于工业、医疗、国防及人们日常生活的各个方面。比如:安全监控、交通引导、环境监测、遥感成像以及电视制导等等。雾、霾等天气使大气的能见度降低,户外拍摄的图像质量变差,目标特征难以识别。图像去雾技术可有效地改善图像的视觉效果,提升对比度,去除恶劣天气对图像质量的影响。因此,图像去雾方法的研究具有重要的现实意义和广阔的应用前景。

近年来,图像去雾方法层出不穷,根据其作用机理可分为两大类:第一类采用图像增强的方法,不考虑图像降质的原因,从提升对比度入手,突出有用细节,典型的代表有:直方图变换、基于 Retinex 理论的方法和同态滤波等。这类方法往往会造成信息损失或过增强现象。第二类采用图像复原的方法,以雾天降质图像的物理模型^[1-2]为基础,由多幅图像构建方程组来求解模型中的参数^[1-4],或基于一定的假设及先验知识来估计雾的属性^[5-8],从而恢复出清晰图像。这类方法去雾效果自然,失真小。图像去雾方法研究的进展综述可参见参考文献[9-11]。

由雾图物理模型可知,景深是去雾的重要线索,由于从单幅图像获得深度信息难以实现,所以 Narasimhan 和 Nayar^[1-2]等利用同一场景在不同时间拍摄的多幅图像(雾的属性不同)来构建场景的三维结构模型,从而估计深度信息和大气散射系数。Schechner^[3]和 Schwartz^[4]等研究光的偏振特性,利用同一场景不同偏振度的两幅图像来估计大气光。上述方法虽然取得了很好的去雾效果,但获取同一场景多幅图像的条件较为苛刻,不适用于实时应用场合,也不适用于动态场景。

近年来,单幅图像去雾方法的研究取得了突出进展,典型的代表见参考文献[5-8]。单幅图像去雾必须基于一定的假设或先验知识。Tan^[9]认为清晰图像与雾化图像相比,具有更高的对比度,他采用最大

化局部对比度的方法实现去雾,该方法没有从图像退化的机理入手,会导致过增强现象。Fattal^[5]假设透射率和表面色度(Surface Shading)是统计独立的,利用独立成分分析法来估计场景的反射率(Albedo),该算法的效果取决于输入图像的统计特性,在浓雾区,各独立成分变化不显著且颜色信息不足将导致统计估计不可靠。Tarel^[6]认为大气耗散函数(Atmosphere Veil)在局部区域变化缓慢,采用中值滤波对大气耗散函数进行估计,该算法处理速度快,但中值滤波不具备保边功能,在景深边缘会产生“光晕”现象。

He^[7]通过对大量户外清晰图像的统计观察提出了暗通道先验理论,由此估计透射率,再利用软件抠图方法^[12]对透射率进行细化以减轻“光晕”现象。但软件抠图方法计算复杂度很高,随后 He^[13]等又提出了引导滤波,禹晶^[10]等提出了用快速双边滤波来代替软件抠图方法,极大地简化了计算。

尽管暗通道先验方法取得了很好的去雾效果,但仍存在一些不足之处,因此涌现出一些改进的方法^[13-17]。由于暗通道去雾会引起噪声放大现象,葛广一^[15]和王森^[16]等分别对去雾前和去雾后的图像进行双边滤波,取得了很好的噪声抑制效果。此外,暗通道先验假设透射率在局部窗口内为常量,当窗口跨越景深边界时,会产生“光晕”现象,Fang^[17]等利用图像分割方法将图像按景深分块,并假设每个块内景深不变来求解透射率,该方法可减轻“光晕”现象。

He 的方法^[7]和其改进的方法^[13,15-17]在暗通道的求解时,都是采用全局统一尺度,而尺度的选择对去雾效果的影响很大,小尺度求解会违反暗通道先验的约束条件,导致复原图像色彩失真严重;大尺度求解使暗通道先验更合理,复原图像色彩自然,但在景深边缘会产生“光晕”现象。对于不同场景的图像,甚至同一幅图像的不同区域,不存在一个普遍适用的最优尺度。此外,He^[7]对天空光的估计方法在尺度较小时,往往会使估计点落到与其物理意义不相符的前景区域,这将导致复原图像偏暗或失真。

针对上述问题,文中提出尺度自适应暗通道去雾方法,根据图像的颜色及边缘特征得到像素级的暗通道求解尺度,更好地满足暗通道先验的约束条件,有效抑制"光晕"现象和色彩失真。此外,文中还提出一种改进的天空光估计方法,从天空光的物理意义出发,给出天空光估计的约束条件,使估计点鲁棒地落到场景的背景区域,消除因天空光的不合理估计而导致的复原图像偏暗或失真现象。

1 暗通道先验去雾方法

1.1 雾天图像的物理模型

雾天降质图像的物理模型定义为^[1-2]:

$$I(x)=I_{\infty}\rho(x)e^{-\beta d(x)}+I_{\infty}(1-e^{-\beta d(x)}) \quad (1)$$

式中: $I(x)$ 为相机拍摄到的雾图; I_{∞} 为无穷远处的天空辐射; $\rho(x)$ 为场景反射率; $e^{-\beta d(x)}$ 为大气透射率; β 为散射系数; $d(x)$ 为景深。参考文献[5,7]进一步将公式(1)简化为:

$$I(x)=J(x)t(x)+A(1-t(x)) \quad (2)$$

式中: $J(x)$ 为场景辐射(即复原图像); $t(x)$ 为大气透射率; A 为天空光(或全局大气光)。

图像去雾的主要任务就是估计 A 和 $t(x)$,从而恢复出场景辐射 $J(x)$:

$$J(x)=A-\frac{A-I(x)}{t(x)} \quad (3)$$

1.2 透射率估计

暗通道先验^[7]指出:在无雾的自然场景图像中,除天空外的大多数局部区域内,总是存在某个像素,

其 3 个颜色通道中的最小值趋于 0。

暗通道用公式表示为:

$$J_{\text{dark}}(x)=\min_{y \in \Omega_r(x)}(\min_{c \in \{r,g,b\}}J_c(y)) \quad (4)$$

式中: $\Omega_r(x)$ 为以像素 x 为中心、 r 为半径的窗口, r 即为暗通道的尺度。对公式(2)两边作最小值操作,可以得到透射率表达式如下:

$$t(x)=\frac{1-\min_{y \in \Omega_r(x)}\left(\min_{c \in \{r,g,b\}}\frac{I_c(y)}{A_c}\right)}{1-\min_{y \in \Omega_r(x)}\left(\min_{c \in \{r,g,b\}}\frac{J_c(y)}{A_c}\right)} \quad (5)$$

当暗通道先验成立时,即 $J_{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$ 时,公式(5)分母趋于 1,透射率的估计值可表示为^[7]:

$$\tilde{t}(x)=1-\min_{y \in \Omega_r(x)}\left(\min_{c \in \{r,g,b\}}\frac{I_c(y)}{A_c}\right) \quad (6)$$

1.3 暗通道尺度的讨论

暗通道先验假设透射率在 $\Omega_r(x)$ 内为常量, r 的取值会对去雾效果产生影响。

(1) 当 r 较小时,在前景的大部分区域有 $0 < J_{\text{dark}}(x) < A$,公式(5)分母小于 1, $t(x) > \tilde{t}(x)$,暗通道先验对透射率的估计值小于其实际值。

由公式(3)可知, A 为常量,在 $\Omega_r(x)$ 内, $t(x)$ 为常量,且 $0 < t(x) < 1$,有 $\nabla J = \nabla I/t$, $\nabla J > \nabla I$,去雾的实质就是通过放大雾图各颜色通道的幅值变化来提升对比度。对 $t(x)$ 的估值变小,会过度放大 $\Omega_r(x)$ 内像素的颜色变化,使复原图像产生过饱和和失真。同时,公式(3)还表明,当 $I(x) < A$ 时, $t(x)$ 值变小,将导致 $J(x)$ 的幅值变小而偏暗。图 1(b)~(d)展示了不同尺度暗通道^[7]和引导滤波^[13](DG 方法)的去雾效果,图 1(a)为雾图,

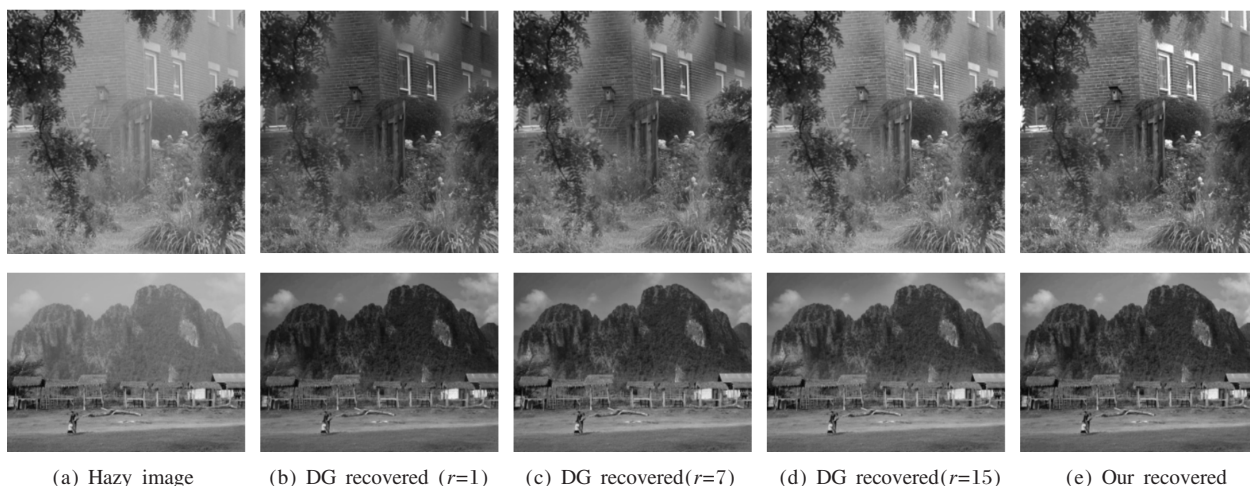


图 1 不同尺度暗通道去雾效果

Fig.1 Haze removal using different scale of dark channel

图 1(b)为 $r=1$ 的复原图像,过饱和现象较为明显,且亮度偏低。

(2) 当 r 较大时,在前景的大部分区域都满足 $J_{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$,公式(5)分母趋于 1, $t(x) \approx \tilde{t}(x)$,暗通道先验对透射率的估计值接近其实际值。但较大的 r 会使暗通道的求解窗口 $\Omega_r(x)$ 跨越景深边缘而使复原图像产生“光晕”失真,尽管引导滤波^[13]可减小“光晕”现象,但并不能完全消除。图 1(d)为 DG 方法在 $r=15$ 时的去雾效果,复原图像“光晕”现象明显。

综上所述,单尺度 DG^[7,13]方法无法兼顾好的色彩复原效果和小的“光晕”失真。因此,文中提出尺度自适应的实质就是在图像的不同区域找到其合适的暗通道求解尺度 $r(x)$,增大 $J_{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$ 的概率,同时尽量避免暗通道的求解窗口 $\Omega_r(x)$ 跨越景深边缘。图 1(e)所示为文中方法的处理结果,复原图像色彩自然,且有效的抑制了“光晕”现象。

2 尺度自适应暗通道

对于图像的不同区域采用不同的尺度求解暗通道:在亮度较低或饱和度较高的区域,采用较小尺度;在亮度较高且饱和度较低的区域,采用较大尺度;在景深突变处,采用较小尺度;在平滑区域,采用较大尺度。

2.1 由颜色特征求解初始尺度

对于图像的不同区域,使 $J_{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$ 所需要的尺度不同,例如:前景中亮度较低或饱和度较高的区域,较小的尺度就可以使 $J_{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$,而对于前景中亮度较高且饱和度较低的区域,则需采用较大的尺

度才能使 $J_{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$ 。

对于天空背景区域,尽管任何尺度都不能使 $J_{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$,但在天空区域有 $I(x) \rightarrow A$,由公式(6)求得 $\tilde{t}(x) \rightarrow 0$,这恰好与实际情况相符(无穷远处透射率趋于 0)。因此,对于天空区域无需特殊处理,可将其视作亮度较高且饱和度较低的区域,采用较大的尺度求解暗通道。

根据像素 x 的颜色特征得到像素级的初始尺度 $r_0(x)$ 。首先,给出与像素颜色特征相关的几个量的定义:

$$\text{Dark}_c(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} I_c(x) \quad (7)$$

$$I_{\text{intensity}}(x) = \frac{I_r(x) + I_g(x) + I_b(x)}{3} \quad (8)$$

$$I_{\text{sat}}(x) = 1 - \frac{\text{Dark}_c(x)}{I_{\text{intensity}}(x)} \quad (9)$$

式中: $\text{Dark}_c(x)$ 为像素 x 的通道最小值; $I_{\text{intensity}}(x)$ 和 $I_{\text{sat}}(x)$ 分别为雾图在 HSI 空间的亮度及饱和度分量。

由公式(7)~(9)可以看出 $\text{Dark}_c(x)$ 与 $I_{\text{intensity}}(x)$ 和 $I_{\text{sat}}(x)$ 的关系:当 $I_{\text{intensity}}(x)$ 较小或 $I_{\text{sat}}(x)$ 较大时, $\text{Dark}_c(x)$ 必然较小,此时采用较小的尺度;当 $I_{\text{intensity}}(x)$ 较大且 $I_{\text{sat}}(x)$ 较小时, $\text{Dark}_c(x)$ 必然较大,此时采用较大的尺度。

因此,可以认为尺度与 $\text{Dark}_c(x)$ 正相关。用 $r_0(x) = k\text{Dark}_c(x)$ 表示像素 x 的初始尺度。为使尺度值为整数,定义 $r_0(x)$ 为:

$$r_0(x) = \max\{1, \text{round}(k\text{Dark}_c(x))\} \quad (10)$$

式中: $\text{round}(\cdot)$ 为四舍五入函数; $\max(\cdot)$ 运算为了防止尺度值为 0, $\text{Dark}_c(x)$ 采用归一化幅值,取 $k=10$,将 $r_0(x)$ 限定在 1~10 之间。图 1(a)中雾图的初始尺度如图 2(a)所示。

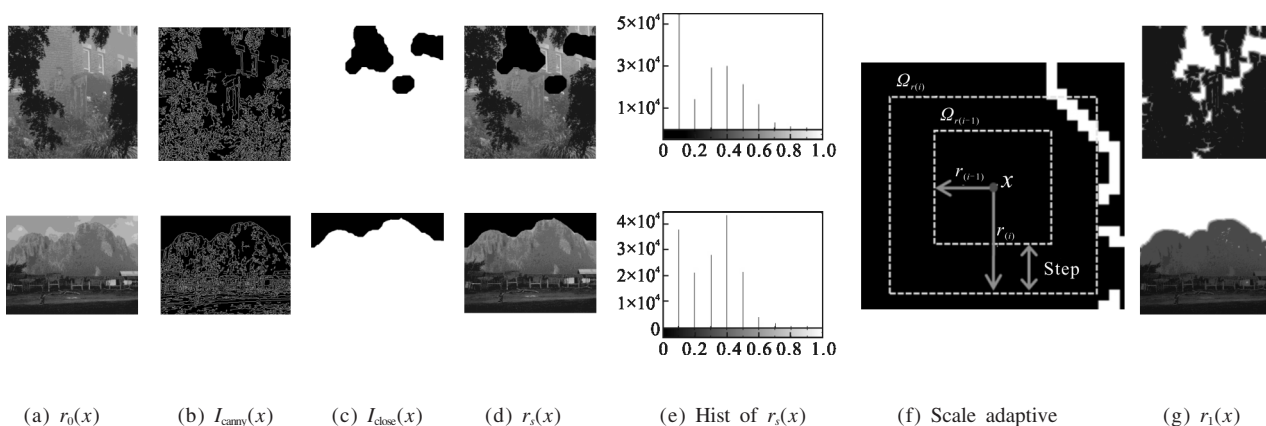


图 2 自适应尺度的求解过程

Fig.2 Solving process of self-adaptive scale

2.2 由边缘特征对尺度进行修正

由于“光晕”现象发生在景深突变处,如果在边缘附近采用较小的尺度,可使透射率的求解窗口 $\Omega_r(x)$ 尽量不跨越景深边界,从而减小“光晕”现象;在非边缘处采用较大的尺度,可以增大 $J_{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$ 的概率,使复原图像的背景更平滑,噪声和失真更小。由边缘特征对初始尺度 $r_0(x)$ 进行修正,步骤如下:

(1) 边缘检测。

采用 Canny 算子对雾图的亮度分量 $I_{\text{intensity}}$ 作边缘检测,得到二值化边缘图 I_{canny} ,如图 2(b)所示。

(2) 前景分离。

对 I_{canny} 作形态学闭运算操作,粗略地将图像的前景和背景区分开,结果用 I_{close} 表示,如图 2(c)所示, $I_{\text{close}}=1$ 的像素覆盖了图像的前景区域。

(3) 设置边缘像素尺度域值 r_{th} 。

用 I_{close} 滤除背景,得到前景像素初始尺度 $r_s(x)$:

$$r_s(x) = I_{\text{close}}(x)r_0(x) \quad (11)$$

式中: $r_s(x)$ 取值为 0~10 之间的整数; $r_s(x)$ 为零的像素对应背景区域,如图 2(d)所示。

r_{th} 的取值采用 $r_s(x)$ 中出现概率最大的非零值,这样可以增大前景区域 $J_{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$ 的概率。图 2(e)所示为 $r_s(x)$ 的归一化直方图,第一组图像,取 $r_{\text{th}}=1$; 第二组图像,取 $r_{\text{th}}=4$ 。

(4) 由边缘特征对尺度进行修正。

对于任一像素 x ,若满足 $0 < r_s(x) \leq r_{\text{th}}$,则不修正其尺度,即: $r_1(x) = r_s(x)$; 否则,如果 $r_s(x) = 0$ (x 位于背景区域),或者 $r_s(x) > r_{\text{th}}$ (x 位于亮度较高的区域),则对 x 的尺度进行修正,从 $r = r_{\text{th}} + \text{step}$ 开始,逐渐增大尺度,取 $r = [r_{\text{th}} + \text{step}, r_{\text{th}} + 2\text{step}, \dots, r_{\text{th}} + n\text{step}]$,直到 I_{canny} 图中,以 x 为中心, $r(i)$ 为半径的窗口内包含边缘点为止,此时的 $r(i-1)$ 即为 x 点修正后的尺度。

尺度修正过程如图 2(f)所示,白色像素为 Canny 边缘, x 位于窗口中心, step 为尺度增大的步长,当 $r = r(i-1)$ 时,窗口 $\Omega_{r(i-1)}(x)$ 内不含边缘点,继续增大尺度;当 $r = r(i)$ 时,窗口 $\Omega_{r(i)}(x)$ 跨越景深边界,此时若在 $\Omega_{r(i)}(x)$ 内求解暗通道,将产生“光晕”现象。因此,取 $r_1(x) = r(i-1) = r(i) - \text{step}$ 。

特别地,如果 x 刚好是边缘像素,并且满足 $0 < r_s(x) < r_{\text{th}}$,则 $r_1(x) = r_s(x)$; 否则, $r_1(x) = r_{\text{th}}$ 。因此,称 r_{th} 为边缘像素的最大尺度。显然, r_{th} 值越小,复原图像的“光晕”失真越小,但对于原图饱和度较低、色彩

偏灰的情况, r_{th} 过小将导致图像大部分区域不满足 $J_{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$,而使复原图像失真严重,如图 3 所示,图 3(b)为 $r_{\text{th}}=1$ 的去雾效果,图 3(c)为采用步骤 3 的方法求得 $r_{\text{th}}=5$ 的去雾效果,可见,图 3(b)过饱和和失真严重,而图 3(c)色彩自然,失真小。



图 3 r_{th} 取值对去雾效果的影响

Fig.3 Haze removal using different values of r_{th}

图 2(g)为最终得到的自适应尺度图,图中灰度级越高代表尺度值越大。原图中饱和度较高的区域对应的尺度值较小;背景区域对应的尺度值较大;在边缘附近尺度由小到大逐渐增加。

得到了像素 x 的自适应尺度,再利用如下公式求解暗通道^[7]:

$$\text{Dark}_p(x) = \min_{y \in \Omega_{r_1(x)}} (\min_{c \in \{r, g, b\}} I_c(y)) \quad (12)$$

3 天空光估计

3.1 暗通道估计天空光存在的问题

He^[7]以暗通道图中最亮的前 0.1% 个像素对应的原图中最亮的点作为天空光的估计点,这种方法有时会使估计点落到前景区域,图 4(b)~(d)展示了 DG 方法在不同尺度下天空光估计点的位置(图中方框内的标记点)及其相应的复原图像。当 $r \leq 7$ 时,两组图像天空光估计点都落到了前景中亮度较高的区域,由公式(2)可知:当 $I(x)$ 和 $t(x)$ 已知的情况下,对 A 估值变高,会导致复原图像 $J(x)$ 的幅值变小而偏暗。当 $r=10$ 时,第一组图像的估计点落到了合适的位置,而第二组图像的估计点仍然落在前景区域。

文中从天空光的物理意义出发,给出天空光估计点应具备的约束条件,由此得到的估计点能够鲁棒地落到场景的背景区域。

3.2 改进的天空光估计方法

Narasimhan 和 Nayer^[1,2]对大气散射模型进行了推导和描述,指出了天空光的物理意义是景深为无

穷远处的背景辐射。根据这一描述,推断天空光的估计应具备以下条件:

- (1) 天空光作为环境光源,应该具有较高的亮度。
- (2) 天空光估计点应落入背景区域。

针对条件 1,设置亮度域值 L_{th} 。采用 Retinex 理论对照度图像的估计方法^[18]得到原图像亮度分量 $I_{intensity}$ 的照度图像,然后取照度图像的最大值作为亮度域值 L_{th} 。

$$L_{th} = \max \{ \text{Gaussian}(x) * I_{intensity}(x) \} \quad (13)$$

$$\text{Gaussian}(x) = e^{-\frac{\|x\|_2^2}{c^2}} \quad (14)$$

式中:“*”为卷积运算;Gaussian(x)为高斯核函数;c为高斯核的尺度。

条件 2 可由 2.2 节闭运算的结果 $I_{close}(x)$ 来表示, $I_{close}(x)=0$ 的点对应背景区域。

条件(1)和(2)用公式表示为:

$$\begin{cases} \text{Mask}_1 = (I_{intensity} \geq L_{th}) \\ \text{Mask}_2 = (I_{close} = 0) \end{cases} \quad (15)$$

用这两个条件对暗通道图 $\text{Dark}_p(x)$ 进行过滤,得到的非零点即是最有可能成为天空光的点。

$$\text{Dark}_{pm}(x) = \text{Mask}_1(x) \text{Mask}_2(x) \text{Dark}_p(x) \quad (16)$$

极端情况,如果 $\text{Mask}_1(x) \cap \text{Mask}_2(x) = \emptyset$,即原图中不存在亮度较高的背景区域,则令 $\text{Dark}_{pm}(x) = \text{Dark}_p(x)$,算法退化为采用暗通道图估计天空光。图 4(f)为第二组雾图的暗通道图 $\text{Dark}_p(x)$,图 4(g)和图 4(h)分别为 Mask_1 和 Mask_2 ,图 4(i)为 $\text{Dark}_{pm}(x)$, $\text{Dark}_{pm}(x)$ 中的非零点表示最有可能成为天空光的点。

接着,再从 $\text{Dark}_{pm}(x)$ 中找到平均亮度最高的窗口(窗口半径 $r_A = r_{th} + nstep$),以这个窗口对应的原图中像素的平均颜色作为天空光的估计值,如图 4(i)所示,方框内的标记点即平均亮度最高窗口的中心。此处以局部最亮窗口而非最亮的单个像素来估计天空光是为了进一步滤除不能被 Mask_1 和 Mask_2 过滤掉的前景点,如图 4(i)中左下角区域。

以上步骤可以使天空光估计点鲁棒地落到背景区域。当背景为蓝天时,如果直接由公式(3)求解复

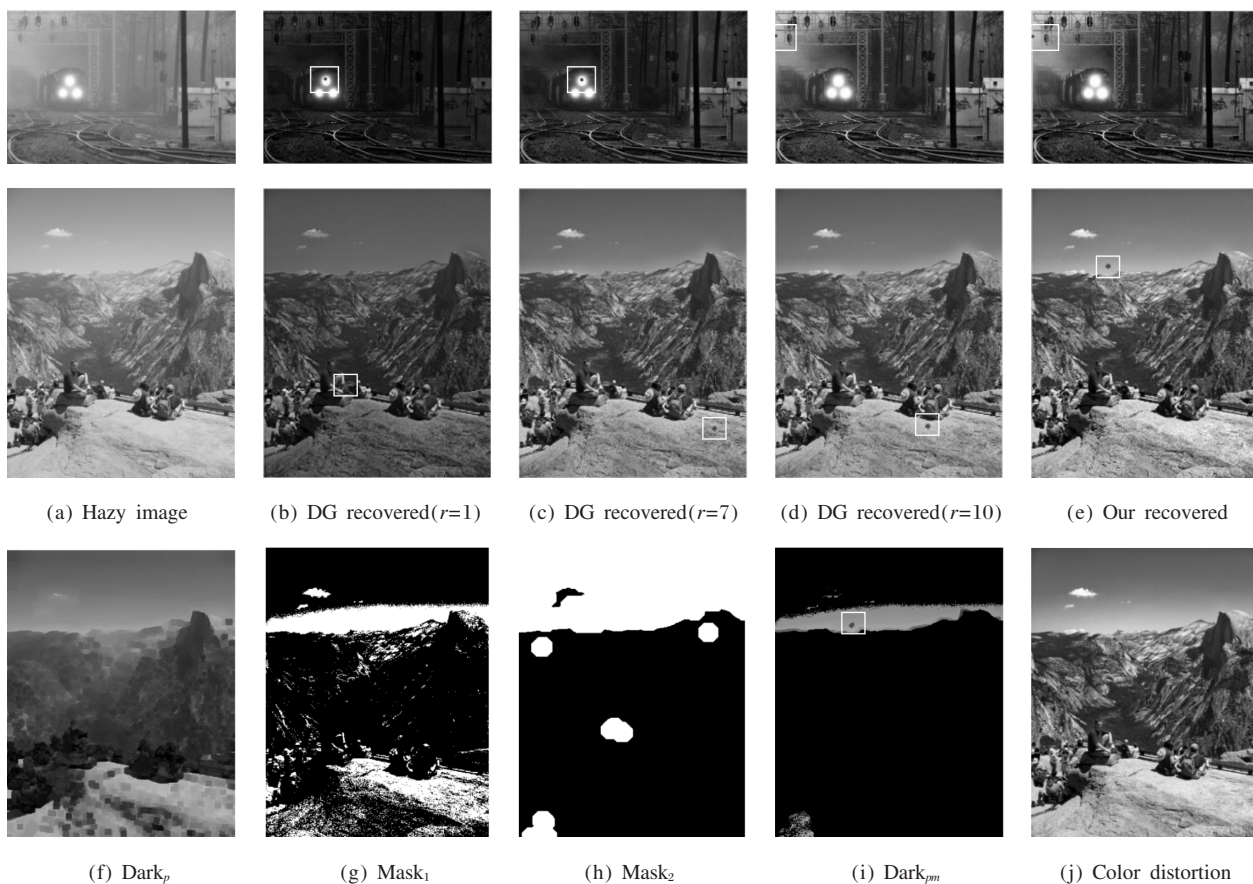


图 4 天空光估计

Fig.4 Estimation of the atmospheric light

原图像,将会产生如图 4(j)所示的色彩失真。下面将具体分析产生色彩失真的原因和解决办法。

3.3 天空光的颜色校正

由瑞利定律可知,蓝天是由于大气散射对波长的选择性而形成,散射系数与入射光的波长存在如下关系^[1]:

$$\beta(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^\gamma} \quad (17)$$

式中: γ 的取值与大气悬浮颗粒的尺寸有关,通常情况下, $0 < \gamma < 4$,在晴朗的天气, $\gamma \rightarrow 4$,短波长的蓝光散射系数最大,天空呈现蓝色;在浓雾天气, $\gamma \rightarrow 0$,散射系数近似认为与波长无关,所有波长的光散射系数相等,天空呈现灰白色。

也就是说,蓝天是天空光经大气散射后呈现的颜色,并非天空光本来的颜色。因此,当估计点落入蓝天区域时,为了得到天空光本来的颜色,应对天空光的估计值进行修正。笔者采用减小饱和度的办法来修正天空光的颜色:

首先,求得 \tilde{A} 在 HSI 空间的 3 个分量:色调 A_H 、饱和度 A_S 和亮度 A_I 。

然后,设置饱和度阈值 S_{th} 。它的取值应尽量小,同时保持原图像的色彩氛围(即不能直接取 $S_{th}=0$),与亮度域值的求解过程类似,取雾图饱和度分量经高斯平滑后的最小值作为 S_{th} 。

$$S_{th} = \min \{ \text{Gaussian}(x) * I_{sat}(x) \} \quad (18)$$

$$A_S' = \min \{ S_{th}, A_S \} \quad (19)$$

最后,保持 A_H 和 A_I 不变,用 A_S' 更新 A_S ,并将 3 个分量由 HSI 空间转换回 RGB 空间,得到修正后的天空光 \tilde{A}' 。

图 4(e)所示为采用上述天空光估计方法得到的复原图像。可以看出,估计点均落到了天空背景区域,复原图像亮度氛围好,色彩自然。

4 算法流程图

算法的流程图如图 5 所示。文中的图像均采用归一化幅值。

参数 $step$ 和 n 决定尺度的自适应范围,文中对选自参考文献[5-8]以及互联网的 50 余幅雾图(分辨率均不超过 1 024 pixel×768 pixel)的处理结果表明:单尺度 DG 方法处理的最优结果大多集中在尺度为

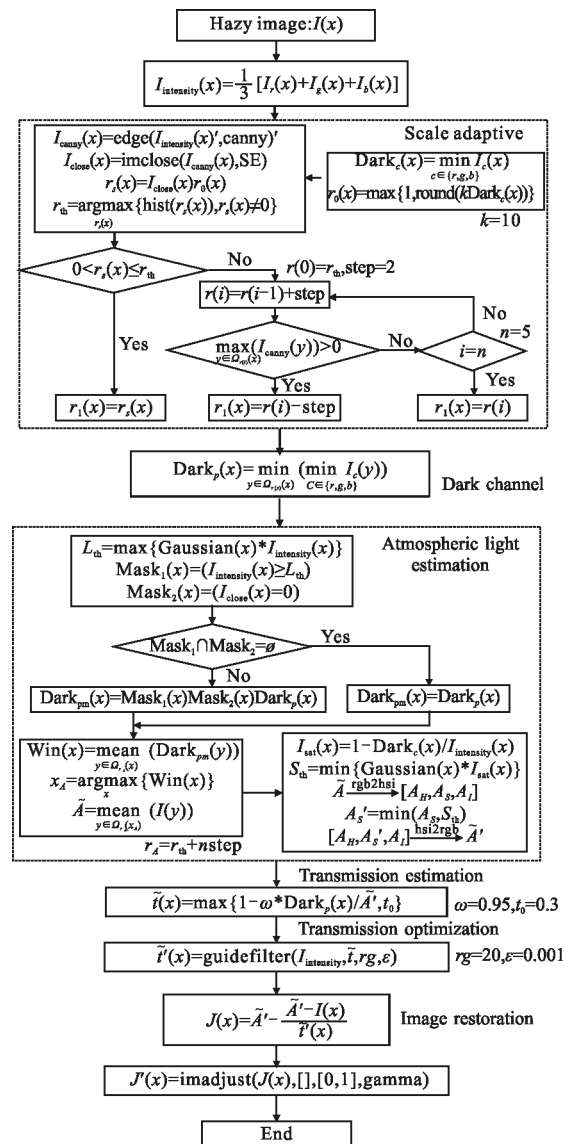


图 5 算法流程图

Fig.5 Flow chart

5~15 之间。文中方法在尺度范围大于 20 以后,指标几乎不再提升,且算法的运行时间加长。因此,文中选取 $step=2, n=5$ 将尺度的自适应范围限定在 $1 \sim r_{th} + nstep$ 之间 ($1 \leq r_{th} < 10, r_{th} + nstep < 20$), 这个范围对于大多数自然场景的图像都能取得很好的去雾效果。

Canny 算子的阈值采用 Matlab 自适应阈值。闭运算的结构元 SE 采用半径为 25 的平坦圆盘。高斯核的尺度取 $c=0.1 \min(w, h)$, (w, h) 为图像的宽和高。

ω 和 t_0 是为了防止透射率估值过小而设定的修正参数^[7], t_0 是最小透射率,对应景深为无穷远处的透射率,由前文分析可知,透射率过小会过渡放大复原图像的色彩变化而产生过饱和和失真,而天空区域

对过饱和和失真极为敏感, 因此, 为防止天空背景失真, 取 $t_0=0.3$ 。引导滤波的参数采用参考文献[13]中推荐的参数配置, 取 $rg=20, \varepsilon=0.001$, 亮度图作为引导图像。

最后, 为了防止 $J(x)$ 取值超出 0~1 的范围, 用 $\text{imadjust}(\cdot)$ 函数分别对三通道的幅值进行调整。参数 gamma 用于调整曝光度^[7]。

5 实验与分析

为了评价算法的性能, 与典型去雾方法[5-8]进行比较, 采用主观评价与客观评价相结合的方法。目前, 对于图像去雾算法的评价还没有统一的标准, 通常把用于图像增强算法的评价方法用于去雾领域。

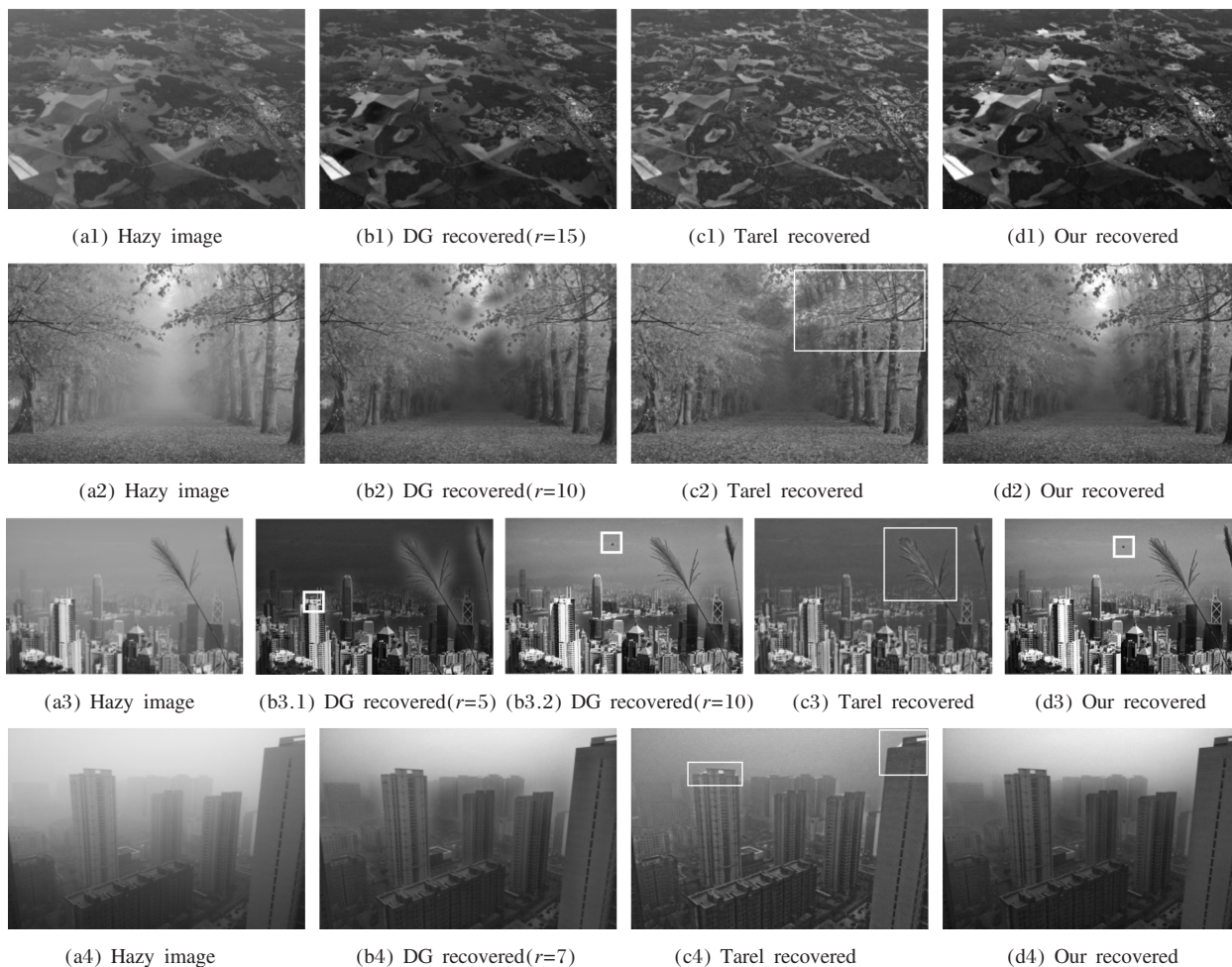
文中采用几种客观评价指标分别从不同角度评价算法的性能, 包括: 信息熵 Entropy、平均梯度 Grade、结构相似度 SSIM^[20]、亮度顺序错误 LOE^[21]、CNC 评价体系^[22]以及运行时间。其中, SSIM 度量复原图像与原图像的相似程度, SSIM 值越大表示全局

失真越小; LOE 度量复原图像相对于原图像在局部区域亮度顺序错误的程度, LOE 值越小表示局部失真越小。CNC 评价体系^[22]综合考虑了复原图像的可见边提升程度^[23]、色彩自然度和色彩丰富度^[24-25]3 方面的效果, CNC 值越大表示图像质量越好。

5.1 不同尺度去雾效果比较

图 6 为文中方法、单尺度 DG 方法以及 Tarel^[6]方法去雾效果的对比, (a) 为雾化图像, (b) 为 DG 方法不同尺度复原图像中综合评价最好的结果, (c) 为 Tarel^[6]方法的处理结果 (源代码来自 Tarel 的个人主页^[26]), (d) 为文中方法的处理结果, (e) 为复原图像的客观评价指标, 横坐标为尺度, 纵坐标为指标值, 星号表示 DG 方法不同尺度的指标, 三角表示文中方法的指标, 空心圆表示 Tarel 方法的指标。文中方法和 DG 方法的参数配置除尺度外均相同。

第一组图像, 客观评价表明, DG 方法在 $r=15$ 时各项指标都接近最优值, 而文中方法复原图像的各项指标均接近或优于 DG 方法 $r=15$ 的结果。



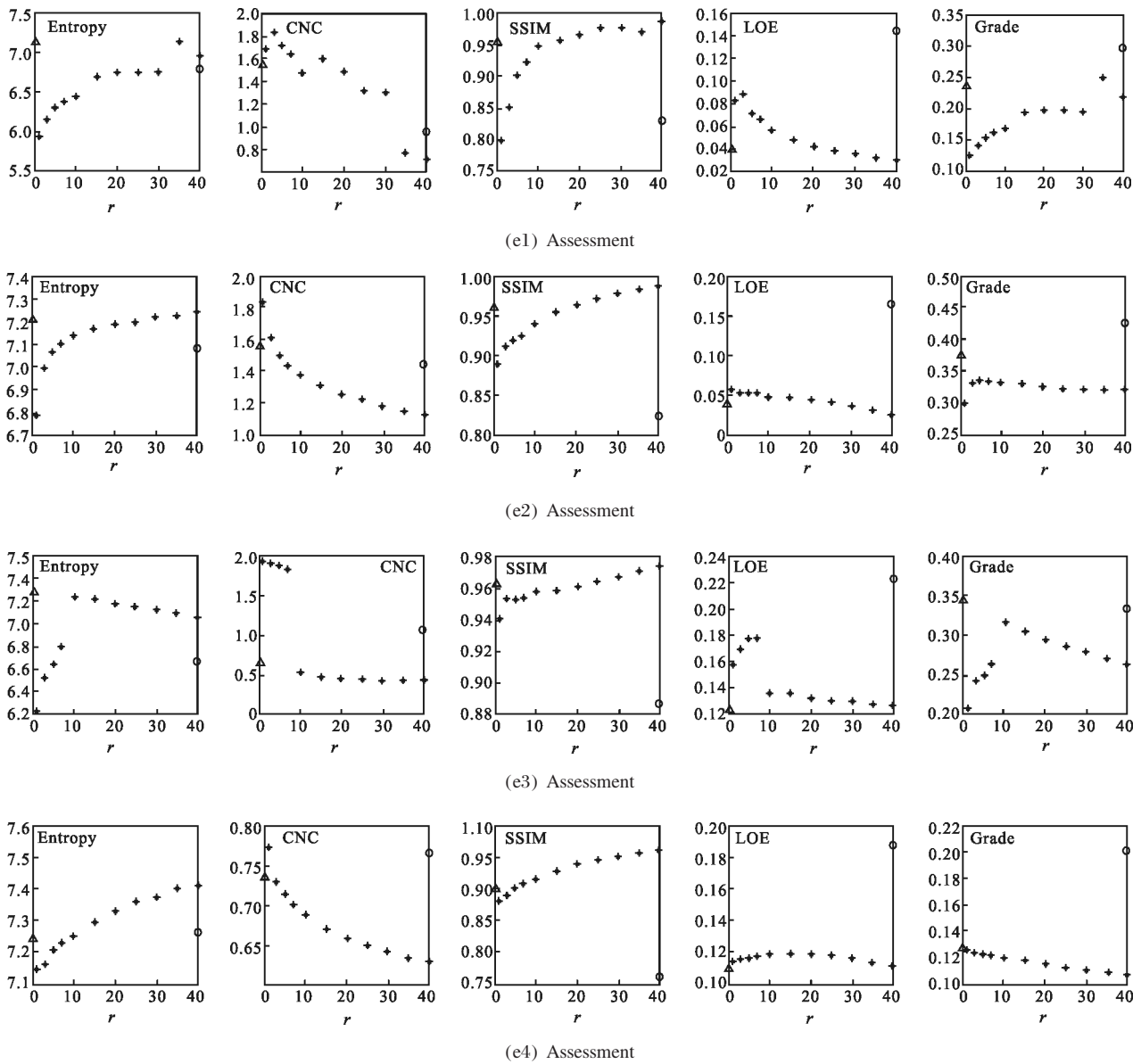


图 6 去雾效果比较

Fig.6 Comparison of haze removal results

第二组图像,原图景深变化密集,DG方法各尺度的复原图像都存在不同程度的“光晕”现象,文中方法处理结果“光晕”失真小,且客观评价指标好于任何单尺度 DG 方法的处理结果。

第三组图像,DG方法在 $r \leq 7$ 时会使天空光估计点落到前景区域,复原图像的失真严重,LOE 值较大、Entropy 和 Grade 值较小,如图 6(b3.1)所示,方框内的标记点为天空光估计点;当 $r=10$ 时,天空光估计点落到了背景区域,如图 6(b3.2)所示,复原图像指标变好。文中方法的天空光估计点落到了背景区域,复原图像的各项指标均好于 DG 方法在 $r=10$ 的结果。

第四组雾图拍摄于 11 月 8 日沈阳重度雾霾天气,当天全市 $PM_{2.5}$ 均值达 1155 mg/m^3 ,最高值达 1400 mg/m^3 。文中方法复原图像与 DG 方法 $r=7$ 时的结果接近,但 DG 方法的“光晕”现象相对明显。

以上实验表明,对于不同场景的雾图,采用 DG 方法去雾时不存在一个普遍适用的最优尺度,文中方法可根据场景的颜色和边缘特征自适应地调整尺度范围,并使天空光估计点稳定地落入背景区域,复原图像各项指标均能达到 DG 方法处理的最优结果,甚至更好。

Tarel 的方法对比度提升效果比较明显(Grade

值较大),但由于其采用中值滤波对大气耗散函数进行估计,复原图像“光晕”现象明显(如图 6(c2)~(c4)中方框内的部分),且失真较严重(SSIM 值小,LOE 值大),文中方法复原图像的色彩更自然,且有效抑制了“光晕”现象。

5.2 运行时间比较

目前,在典型去雾算法中^[5-8],DG 方法和 Tarel^[6]方法是公认的处理速度最快的方法。在此,对这两种方法和文中方法在 Matlab 上的时间进行对比。系统配置为: Intel(R)Core(TM)2@2.93 GHz 处理器; 4 GB 内存; 64 位操作系统。

表 1 为图 6 中复原图像对应的整个去雾过程的

表 1 运行时间比较

Tab.1 Comparison of running time

Method	Haze1/s	Haze2/s	Haze3/s	Haze4/s
Tarel ^[6]	21.61	77.69	24.02	29.47
DG ^[7,13]	7.33	11.68	6.67	6.47
Our	12.24	25.36	17.07	15.54

处理时间。可见, DG 方法的处理时间最短, Tarel 方法的处理时间最长, 文中方法在 DG 方法的基础上增加了尺度自适应过程, 因此处理时间稍长, 代码在

未经优化的情况下, 运行时间大约相当于 DG 方法的 2 倍。

5.3 与参考文献[5-8]的方法比较

图 7 展示了文中方法与典型去雾方法^[5-8]去雾效果的对比。图中(a)~(e)所示的雾图和复原图像均来自 Tarel 的主页^[20]; (f)为文中方法的处理结果, 表 2 为图 7(b)~(e)对应的客观评价指标, 符号 ↑ 表示指标值越大越好, ↓ 表示指标值越小越好, 加下划线的数值是该项指标的最好结果, 加方框的数值是该项指标的最差结果。可见, 文中方法的各项指标均达到或接近最优结果, 且没有最差的情况。

文中方法与 He 的方法相比, 指标有一定的提升。第一组图像, He 的方法会使天空光估计点落到前景区域, 因此复原图像偏暗, 文中方法复原图像的视觉效果更好。第二组图像, 由于文中方法在求解暗通道时以边缘特征为约束, 在边缘处采用小尺度, 因此更能突出微小细节(如图中方框内的部分)。

Fattal 的方法失真度小(SSIM 值大, LOE 值小), 但对对比度提升不够(Grade 值小), 处理后图像仍然模糊。

Tan 的方法对比度提升显著(Grade 值大), 但失真严重(SSIM 值小、LOE 值大)。

Tarel 的方法各项指标居中, 但失真也比较严重(SSIM 值小、LOE 值大)。

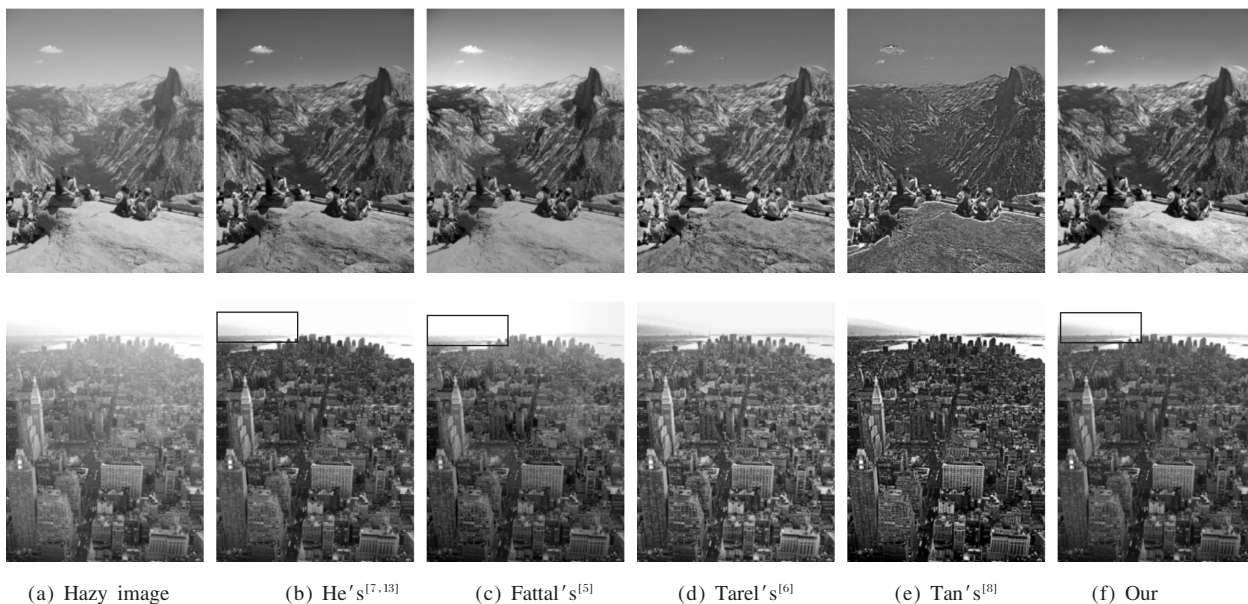


图 7 去雾效果比较

Fig.7 Comparison of dehazing results

表 2 客观评价指标比较
Tab.2 Comparison of objective assessment

Method	Haze1					Haze2				
	Entropy ↑	Grade ↑	SSIM ↑	LOE ↓	CNC ↑	Entropy ↑	Grade ↑	SSIM ↑	LOE ↓	CNC ↑
He	7.347 7	0.345 2	0.961 8	0.057 3	1.654 9	6.993 6	0.426 9	0.951 1	0.034 5	0.859 9
Fattal	7.615 9	0.297 7	0.954 6	0.039 0	0.730 9	7.297 6	0.379 3	0.955 9	0.058 3	0.956 1
Tarel	7.418 6	0.457 3	0.893 6	0.097 5	1.673 8	7.346 5	0.517 9	0.941 0	0.078 8	0.710 7
Tan	7.252 8	0.524 4	0.778 8	0.168 5	1.745 5	7.162 4	0.686 7	0.864 7	0.075 6	1.058 8
Our	7.755 2	0.391 8	0.974 0	0.061 4	1.490 1	7.029 0	0.403 3	0.961 3	0.019 9	1.350 9

6 结束语

文中针对暗通道先验去雾方法的尺度选择问题提出了一种尺度自适应方法, 根据图像的颜色和边缘特征将暗通道求解的尺度自适应地调整到一个合适的范围, 整个去雾过程参数自动配置, 无需人工干预, 兼顾不同尺度复原图像的优点, 复原图像色彩自然, 对比度提升显著, 并有效抑制了“光晕”现象。对多种雾化场景图像的处理结果表明: 文中方法对场景的适应性强, 在任何情况下的处理结果均能达到 DG 方法的最优结果, 甚至更好。

此外, 文中还提出了一种改进的天空光估计方法, 可使估计点鲁棒地落到场景的背景区域, 消除因天空光的不合理估计而导致复原图像偏暗或失真的现象。

然而, 文中的方法也有一定的局限性:

首先, 自适应尺度的求解依赖于 Canny 算子边缘检测的准确度。如果目标边缘无法被 Canny 算子识别, 文中方法将视其为背景而采用较大尺度, 因而无法有效地提升其对比度。

此外, 算法的性能及参数配置的合理性还有待于在更大的测试集上, 采用更权威的图像质量评价准则来评估。去雾图像质量综合评价体系的研究将是下一步的工作重点。

参考文献:

[1] Narasimhan S G, Nayar S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(6): 713-724.

[2] Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2000: 598-605.

[3] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001: 325-332.

[4] Shwartz S, Namer E, Schechner Y Y. Blind haze separation [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006: 1984-1991.

[5] Fattal R. Single image dehazing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27 (3): 72-80.

[6] Tarel J P, Hauti'ere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision, 2009: 2201-2208.

[7] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiao'ou. Single image haze removal using dark channel prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33 (12): 2341-2353.

[8] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1-8.

[9] Wu Di, Zhu Qingsong. The latest research progress of image dehazing [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41 (2): 221-239. (in Chinese)
吴迪, 朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. *自动化学报*, 2015, 41(2): 221-239.

[10] Yu Jing, Xu Dongbin, Liao Qingmin. Image defogging: a survey [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(9), 1561-1576. (in Chinese)
禹晶, 徐东彬, 廖庆敏. 图像去雾技术研究进展[J]. *中国图*

- 像图形学报, 2011, 16(9): 1561–1576.
- [11] Guo Fan, Cai Zixing, Xie Bin, et al. Review and prospect of image dehazing techniques [J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(9): 2417–2421. (in Chinese)
郭璠, 蔡自兴, 谢斌, 等. 图像去雾技术研究综述与展望 [J]. 计算机应用, 2010, 30(9): 2417–2421.
- [12] Levin A, Lischinski D, Weiss Y. A closed-form solution to natural image matting [C]//*IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(2): 228–242.
- [13] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiao'ou. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397–1409.
- [14] Tang Ketan, Yang Jianchao, Wang Jue. Investigating haze-relevant features in a learning framework for image dehazing [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014: 2995–3002.
- [15] Ge Guangyi, Wei Zhenzhong. Noise inhibition method during image dehazing process [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2765–2771. (in Chinese)
葛广一, 魏振忠. 图像去雾过程中的噪声抑制方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2765–2771.
- [16] Wang Sen, Pan Yuzhai, Liu Yi, et al. Image quality improvement of laser active imaging in fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2392–2396. (in Chinese)
王森, 潘玉寨, 刘一, 等. 提高雾天激光主动成像图像质量的研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2392–2396.
- [17] Fang Shuai, Zhan Jiqing, Cao Yang, et al. Improved single image dehazing using segmentation [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, 2010: 3589–3592.
- [18] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Process*, 1997, 6(3): 451–462.
- [19] Yu Jing, Li Dapeng, Liao Qingmin. Physics-based fast single image fog removal [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(2): 143–149. (in Chinese)
禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于物理模型的快速单幅图像去雾方法 [J]. 自动化学报, 2011, 37(2): 143–149.
- [20] Wang Shuhang, Zheng Jin, Hu Haimiao, et al. Naturalness preserved enhancement algorithm for non-uniform illumination images [J]. *IEEE Transactions on Image Process*, 2013, 22(9): 3538–3548.
- [21] Li Dapeng, Yu Jing, Xiao Chuangbai. No-reference quality assessment method for defogged images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(9): 1753–1757. (in Chinese)
李大鹏, 禹晶, 肖创柏. 图像去雾的无参考客观质量评测方法 [J]. 中国图像图形学报, 2011, 16(9): 1753–1757.
- [22] Guo Fan, Cai Zixing. Objective assessment method for the clearness effect of image defogging algorithm [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(9): 1410–1419. (in Chinese)
郭璠, 蔡自兴. 图像去雾算法清晰化效果客观评价方法 [J]. 自动化学报, 2012, 38(9): 1410–1419.
- [23] Hauti'ere N, Tarel J P, Aubert D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. *Image Analysis and Stereology Journal*, 2008, 27(2): 87–95.
- [24] Huang K Q, Wang Q, Wu Z Y. Natural color image enhancement and evaluation algorithm based on human visual system [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2006, 103(1): 52–63.
- [25] Yendrikhovskij S, Blommaert F, de Ridder H. Perceptually optimal color reproduction [C]//*SPIE: Hum Vision Electron Imag III*, 1998, 3299: 274–281.
- [26] Tarel. Single Image Visibility Restoration Comparison [EB/OL]. [2015-09-15] <http://perso.lcpc.fr/tarel.jean-philippe/visibility/>.