

基于半逆法和暗原色先验的单一图像去雾新方法^①

刘 琼^② 谢传良 张奇志

(北京信息科技大学自动化学院 北京 100192)

摘 要 针对现有图像去雾方法的缺陷,依据雾天成像的理论模型,提出了一种基于半逆法和暗原色先验相结合的单一图像去雾新方法。对一幅待去雾图像,首先通过半逆法检测并标记出图像浓雾区域,结合暗原色先验,随机多次选取浓雾区域中具有较大暗原色值的候选像素点集,并通过计算原图中这些候选点集的像素点平均亮度值估算大气光常数。其次通过暗原色先验信息获取图像像素点的透射率分布。最后在得到大气光常数和透射率参数的基础上,根据雾天成像的光学理论模型反解出去雾后图像。通过图像去雾的无参考客观质量评价(NQA)体系对有效细节强度、色调还原程度和结构信息三项指标进行定量评估,评估结果表明,相比目前去雾效果最好的 He 算法,这一新方法平均能提高了 15%。此外,该方法能减少去雾后图像的 halo 效应,更能满足人们的主观观测需求。

关键词 图像去雾,半逆法,暗原色先验,NQA 评价体系

0 引言

在雾、霾天气下户外拍摄的图像的质量严重下降,图像对比度低,内容摸不清,颜色偏灰白,从而失去了应用价值。这样的图像必须通过图像处理的手段来降低或消除雾霾对其造成的质量影响,尽量恢复其在理想天气条件下应该达到的对比度、颜色真实性和整体清晰度。对这类图像的这种处理方法称为图像去雾^[1]。本文在研究和分析雾霾天气条件下成像的物理过程和已有图像去雾算法的基础上,提出了一种基于半逆法^[2]和暗原色先验^[3]的单一图像去雾新方法,该方法仅需对单一图像计算相关参数即可得到去雾图像,对硬件依赖较低,而且去雾性能优于目前已有方法。

1 相关研究

从物理成因上分析,物体反射光在传播过程中受空气媒介影响,主要发生散射和吸收两种现象。吸收主要发生在波长较长的近红外波段,散射则在可见光波段较为常见。雾、霾天气下,由于空气中悬浮浑浊媒介的增加,反射光线在传播过程中发生散

射的几率大幅提高,致使图像饱和度降低,色调偏移。目前,图像去雾的方法可分为两类:物理模型法与非物理模型法^[4]。非物理模型法主要基于图像的视觉感受,以增强图像可视性为目标,属图像增强范畴,其中最具代表性的有 Retinex 算法^[5]、非重叠子块直方图均衡化算法^[6]和基于 HVS 的可变幂次的幂函数变换法^[7]。这类方法以图像对比度增强作为目标,因而计算较为简单,且算法效率高。在图像场景相对简单时优势较为明显,但在处理景深较大的图像时,容易出现不可预测的失真,反而降低了图像质量。

事实上,拍摄户外自然图像时,景深难以控制。由此而来,非物理模型法即相形见绌,基于物理模型的去雾方法开始引起了大家的关注,其中 He 算法^[3]在目前所有去雾方法中效果最为理想。He 通过对大量无雾图像进行统计分析发现,在 RGB 颜色空间中,图像中的每个像素点至少有一个颜色通道的像素值接近于零。利用这种暗原色先验得到相关参数的值,进而通过解决多变量方程得到去雾图像。通过对 He 算法所得到的大量去雾图像进行观察与分析发现,单纯利用暗原色先验所得到的大气光参数值普遍偏高,导致去雾后图像部分区域的颜色出

① 国家自然科学基金(11172047),北京市教委 2014 年度科研面上基金(KM201411232008)和北京信息科技大学 2013 年度大学生科技创新资助项目。

② 女,1984 年生,博士,讲师;研究方向:模式识别,认知计算;联系人,E-mail: liuqionglq@126.com
(收稿日期:2014-01-03)

现偏蓝的饱和失真,尤其是在亮度较高的物体附近(如天空和白色物体周围),且随着这类物体范围的扩大,失真更为明显。

针对现有去雾方法的缺陷,并依据雾天成像的理论模型,本文立足于这样一个事实:同一场景在相同光照强度条件下,图像浓雾覆盖区域的亮度值会高于其他区域。在此基础上,提出了一种简单有效的方法来解决单一图像的去雾问题。本文方法基于He算法中的暗原色先验,通过引入半逆法有效检测图像浓雾区来准确估计大气光常数,进而,通过求解物理模型获取去雾图像。首先,通过半逆法计算待检测图像的半逆图像,并将其与原图进行比对,分辨图中各个区域是否被浓雾覆盖。然后,在浓雾覆盖区域中选取暗通道值较大的像素点作为大气光常数计算的候选点。最后,通过对多次随机选取的候选点在原图中的像素点值求均值,得到大气光常数。与此同时,通过物理模型计算透射率参数,并利用软抠图(soft matting, SM)算法^[8]对图像优化,得到最终图像。对雾天标准图像进行实验的结果表明,本文方法能快速有效地得到去雾图像,并能增强图像细节,减少景深突变引起的光圈效应,即 halo 效应,有效地满足人眼观测需求。

2 雾天成像的光学物理模型与暗原色先验

基于光的传播性质,本文采用 Narasimhan 和

Nayar 的雾天成像光学物理模型^[9]。对于一幅有雾图像 $I(x)$, 可以将其近似表示为

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

式中, A 为大气光常数, β 为大气粒子散射系数, $\rho(x)$ 和 $d(x)$ 分别为空间 x 处的场景反射率和景深。令 $J(x) = A\rho(x)$, $t(x) = e^{-\beta d(x)}$, (1)式可化简为

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

其中等号右边第一项为直接衰减项, $J(x)$ 可视为景物光强, $t(x)$ 为随传播距离而变化的透射率。等式右边第二项为环境光模型, 表征大气光粒子借助于散射的自然光所表现出的光源特性。

文献[3]通过对大量户外无雾图像观察发现, 在绝大多数除天空和白色物体之外的图像区域中的像素点, 在 RGB 空间中至少存在一个较低的颜色通道 J_{dark} , 且该值几乎趋近于 0, 也即所谓的暗原色, 用算式描述为

$$J_{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))) \quad (3)$$

其中 J^c 表示 RGB 颜色空间中的某一个颜色通道图像, $\Omega(x)$ 则表示像素点 x 的邻域。图 1 所示为原图及其暗原色图像。可看出, 在天空和白色物体之外的图像区域, 其 J_{dark} 值趋近 0, 如图 1 中第一组图像中近处的树叶和第二组图像中近处的花坛。

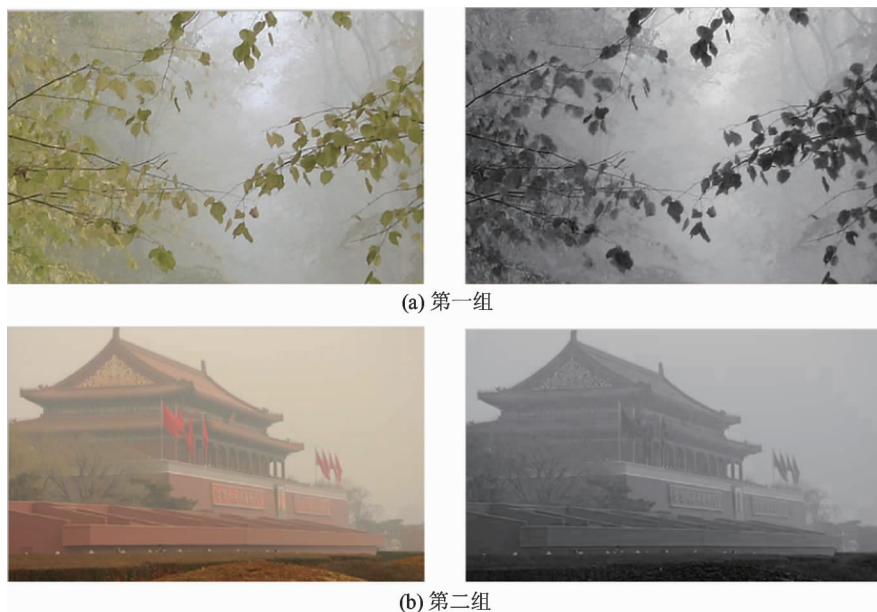


图 1 原图及其暗原色图像

3 去雾算法

对于一幅有雾图像的去雾过程,根据式(2)所示的物理模型可视为求解 $J(x)$ 、 $t(x)$ 和 A 的数学过程。然而,从一个方程中求解 3 个未知数,其结果存在多种可能性。因此,需要将某些变量常量化,并从原图像中获取足够多的信息帮助求解。

3.1 基于半逆法的有雾区域检测和大气光常数 A 的计算

根据暗原色先验,自然无雾图像的像素点在 RGB 颜色空间至少存在一个像素值很低的通道,而有雾图像会使得像素点所有通道的像素值都大幅增加。因此,利用这种性质,我们对有雾图像的所有像素点进行“半逆”操作,并将半逆图像与原图进行比

对,检测浓雾区域。半逆图像 $I_s(x)$ 的计算如下:

$$I_s(x) = \max_{c \in \{r,g,b\}} [I^c(x), 1 - I^c(x)] \tag{4}$$

其中 I^c 表示原图在 RGB 颜色空间中的某一个颜色通道图像。很显然, $I_s(x)$ 中的像素点在 $[0.5,1]$ 之间取值。通过设定阈值 $\tau = 0.1$ 作为误差容忍限,当半逆图像与原图像素点值差异小于阈值 τ 时,半逆运算未改变像素点值,说明原图中该像素点已被雾覆盖。反之,当半逆图像与原图像素点值差异大于阈值 τ 时,半逆运算提升了像素点值,说明该点在原图中并未被雾覆盖。据此,将原图与半逆图像比对即可对有雾覆盖区域进行检测,如图 2 所示。其中半逆图像中蓝色标记区域为未被浓雾覆盖区域。直观上可以看出,基于半逆法对图像雾区进行检测,准确且能够为后续计算大气光常数排除干扰。

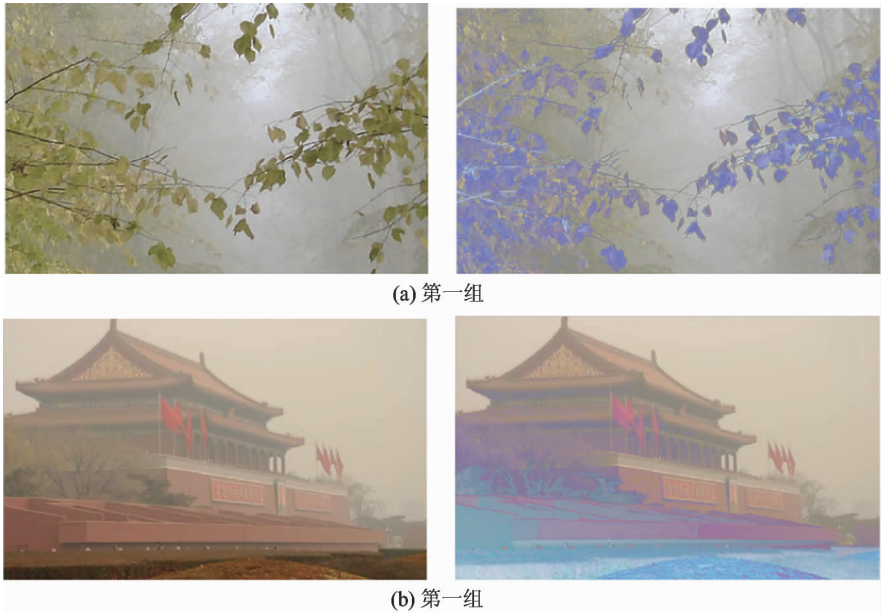


图 2 原图及其半逆图像,其中每一组的左图为原图,右图为半逆图像

目前,很多方法对大气光常数 A 的计算,都具有一定的局限性。 $\text{Tan}^{[10]}$ 在估算 A 值时直接忽略大气光成分中的太阳光强度,通过选取整幅图像的最高像素值作为大气光常数 A 的值。但事实上,只有当雾浓度足够大时,才可忽略太阳光强度,并且当图像中存在白色物体时,得到的大气光值偏高,导致去雾后图像因颜色偏暗而严重失真。因而,采用选取整幅图像的最高像素点值作为 A 值的方法不具有普适性。

He 对大气光常数 A 的计算进行了改进,通过对暗原色图像的像素值从高到低排序,选取前 0.1% 的像素点作为候选点集,再找到该点集与原图所对

应的所有像素点的最大值作为 A 的值。He 的改进能减少图中出现较小白色物体时对大气光常数的干扰,但对于存在较大白色物体的情况仍然会出现颜色失真现象。

为此,本文对前述方法进行了改进,在暗原色图像中,匹配“半逆法”所检测得到的浓雾区域,以该浓雾区域中暗原色值较高的前 0.1% 的像素点作为获取大气光常数 A 的候选点集,尽量避免图中出现白色物体时,对参数计算的干扰。进而,通过多次随机选取候选点集中 1% 的像素点,匹配得到每次选取所对应的原始有雾图像相应的像素点的最大值,并计算多次得到的最大像素点值求取均值作为大气

光常数 A 的值。计算表达式如下:

$$A = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{c \in \{r, g, b\}} (\max_{y_i \in J'_{\text{dark}}(x)} (I^c(y_i))) \quad (5)$$

其中 $J'_{\text{dark}}(x)$ 为暗原色图像中像素点值较高的前 0.1% 的像素点总数的 1% 所对应的像素点位置, k 代表随机选取的次数。

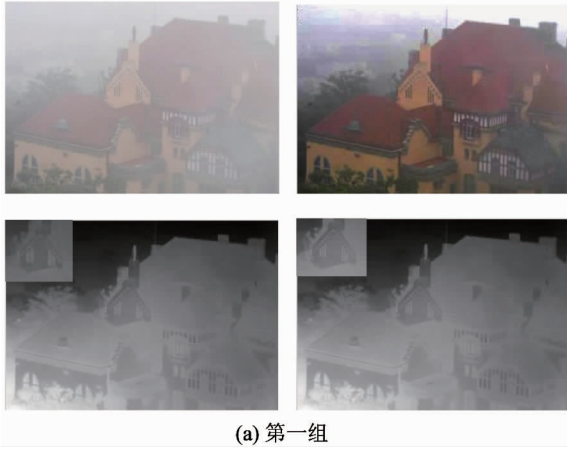
很显然,通过半逆法检测浓雾区域,并与暗原色图相结合,能通过多次取平均操作减少图像亮度峰值的影响,从而为大气光常数的计算找到更准确的候选点集。与此同时,多次随机操作能尽可能减少当图像中出现较大面积白色物体时得到大气光常数偏高的情况。

3.2 透射率 $t(x)$ 及复原图像 $J(x)$ 的计算

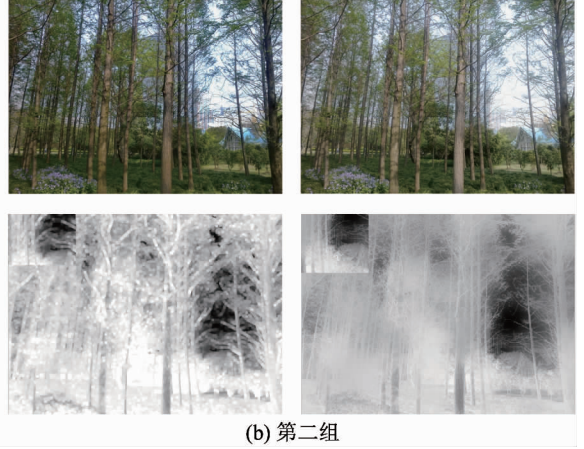
得到大气光常数 A , 式(2)即可写成

$$t(x) = \frac{J(x)t(x)}{A} - \frac{I(x)}{A} + 1 \quad (6)$$

由于透射率 $t(x)$ 是图像空间位置 x 的函数,且



(a) 第一组



(b) 第二组

其中每组图片的左上为原图,右上为去雾后图像,左下为 t 修复前图像,右下为采用 SM 算法对 t 修复后图像

图3 原图、 t 值修复前后及去雾图像

得到大气光常数 A 和透射率分布 $t(x)$, 根据式(2),去雾后图像 $J(x)$ 的计算方程为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (9)$$

为避免 $t(x) = 0$ 的情况出现,本文设定 $t(x)$ 下限 $t_0 = 0.1$ 。本文去雾算法具体步骤如表1所示。

表1 基于半逆法和暗原色先验的单一图像去雾算法

输入	原始有雾图像 $I(x)$
输出	去雾后图像 $J(x)$
步骤1	计算大气光常数 A
步骤1.1	检测浓雾区域。对原图每个像素点每个通道的像素值进行判断,采用式(4),检测原图中被雾覆盖区域

与物体本身无关,所以将图像分割成小块 $\Omega(x)$, 并对每个像素点的每一个通道取最小值,得到

$$t(x) = \frac{\min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))) \frac{t(x)}{A} - \frac{\min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (I^c(y)))}{A}}{A} + 1 \quad (7)$$

在暗原色先验假设下,可认为 $\min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))) = 0$, 于是,式(7)经过修正可化简为

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

其中, ω 为修正常数,本文将其取值为0.95。

考虑到 t 值计算过程中,引入局部区域 t 值相等的假设,容易使得图像细节信息损失。本文采用 SM 算法^[8]对 t 进行了优化。从图3可以看出,对 t 值进行优化后的图像细节丰富且边缘过渡平缓。

- 步骤1.2 采用式(3)获得浓雾区域的暗原色图像,在暗原色图像中选取最亮的 0.1% 的像素点作为计算大气光常数 A 的候选点,记候选点集为集合 C
- 步骤1.3 在集合 C 中随机选取 1% 的像素点并找到像素值最高的像素点,对应寻找原图中该像素点 r, g, b 通道中最大像素值,记为 A_i
- 步骤1.4 对步骤1.3重复 k 次,计算均值 $\bar{A}$, 将其作为最终的大气光常数 A
- 步骤2 计算透射率 $t(x)$
- 步骤2.1 设定窗口大小(本文为 $15 * 15$),采用式(8)和已知步骤1得到的 A 值计算 $t(x)$
- 步骤2.2 利用 SM 算法对 $t(x)$ 进行优化
- 步骤3 依据步骤1得到的 A , 步骤2得到的 $t(x)$, 以及原始有雾图像 $I(x)$, 根据式(9)计算去雾后的图像 $J(x)$

4 实验结果与分析

本文采用相对客观的图像去雾无参考客观质量评价 (no-reference quality assessment, NQA) 体系对图像去雾效果进行评价^[11]。该评价体系从去雾图像的细节清晰度、色调还原度和场景结构信息三个方面对图像进行评估,并综合三方面信息,计算总评价价值 Q 。 Q 值越高,表示该算法的去雾效果越好。

NQA 评价体系认为一幅图像 $I(x)$ 可表示成反射图像 $R(x)$ 和照度图像 $L(x)$ 的乘积:

$$I(x) = R(x)L(x) \tag{10}$$

其中 $R(x)$ 、 $L(x)$ 分别表示图像的高频和低频信息,两者通过高斯低通滤波进行分离:

$$R(x) = G_c(x)I(x) \tag{11}$$

NQA 评价体系对去雾图像的细节清晰度评价计算公式为

$$I_{\text{valid}} = (L_s - L_{\text{halo}})/L_s \tag{12}$$

其中 I_{valid} 为有效细节比重, L_s 为总细节强度, L_{halo} 为 halo 效应的细节强度。

色调还原程度的评价采用去雾前后图像颜色直方图的相似程度来衡量,计算公式为

$$d_{\text{correl}}(h',h) = \frac{\sum (h'_k - \bar{h}') (h_k - \bar{h})}{\sqrt{\sum (h'_k - \bar{h}')^2 \sum (h_k - \bar{h})^2}} \tag{13}$$

$\bar{h}$ 、 $\bar{h}'$ 分别为去雾前后图像在 HSI 颜色空间的色度分量直方图 h_k 、 h'_k 的均值。 d_{correl} 越大,代表匹配程度越高,色调还原得越好。

NQA 对场景结构相似性定义为去雾前后图像之反射图像 R_1 、 R_2 的方差比值:

$$S(R_1,R_2) = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1\sigma_2} \tag{14}$$

其中

$$\sigma_{12} = \frac{1}{M+1} \sum_{i=1}^M (R_{1,i} - \mu_1)(R_{2,i} - \mu_2) \tag{15}$$

M 为图像中的像素数, μ_1 、 μ_2 为 R_1 、 R_2 的像素灰度均值, σ_1 、 σ_2 为 R_1 、 R_2 图像的像素灰度方差。

综合三个评价指标,最终去雾质量综合评价指标 Q 定义为

$$Q = L_{\text{valid}}^\alpha \cdot d_{\text{correl}}^\beta \cdot S^\gamma \tag{16}$$

其中 α 、 β 、 γ 均取值 $(0,1]$,体现 3 个指标的重要性。本文将其全部取值为 1。

为了检验本文算法的效果,根据 NQA 标准,分别计算出本文去雾算法效果图和 He 算法的去雾效

果图的 Q 值,并对去雾算法中 20 幅标准图片进行了测试,比较结果如图 4 所示。

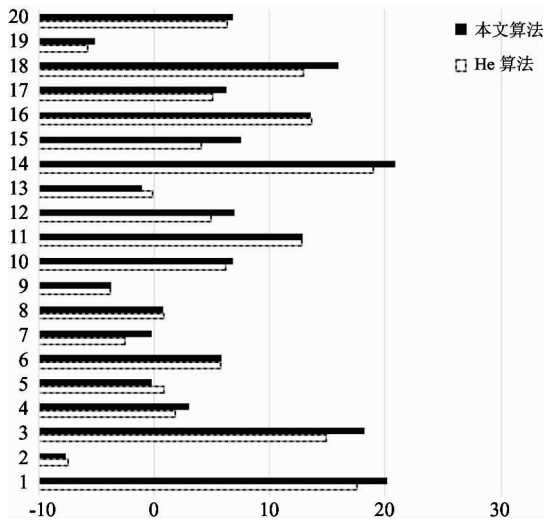


图 4 针对 20 幅图像的 Q 值对比结果

从图 4 可知,除个别图像外,本文算法的 Q 值均大于 He 算法去雾图像的 Q 值,说明本文算法在大部分图像上的处理效果普遍优于 He 算法。

为了进行更直观的比对,我们选取了 6 组景深和颜色复杂度不同的公用图片示于图 5。其中前 3 组图像具有不同景深,后 3 组图像具有不同的颜色复杂度。很显然,从去雾后的直观效果来看,He 算法的去雾效果使得图片颜色变暗偏蓝,且景深突变处的 halo 效应明显;而本文算法得到的去雾图像颜色能更加自然,细节保留更准确,无明显的 halo 效应。

5 结 论

本文提出了一种基于半逆法和暗原色先验的单一图像去雾新算法。通过在暗原色先验的基础上,利用半逆法检测出图像的有雾区域,规避图像存在白色物体时对计算大气光常数的干扰,得到了较为准确的大气光值。并利用 SM 算法对透射率计算进行优化。同时,针对算法去雾效果的评价,引入了无参考客观质量评价 (NQA) 体系对去雾后图像的细节清晰度、色调还原度和场景结构信息进行定量评价。本文方法具有较强的理论依据,且仅需对单一图像计算相关参数即可得到去雾图像,对硬件依赖较低。同时,通过定量测量和定性评价进行比较表明,该方法的性能优于目前最好的去雾算法。下一步工作中,我们将对算法及代码进行优化,提高实时性能,以满足人们更高的观测需求和工程实际需求。

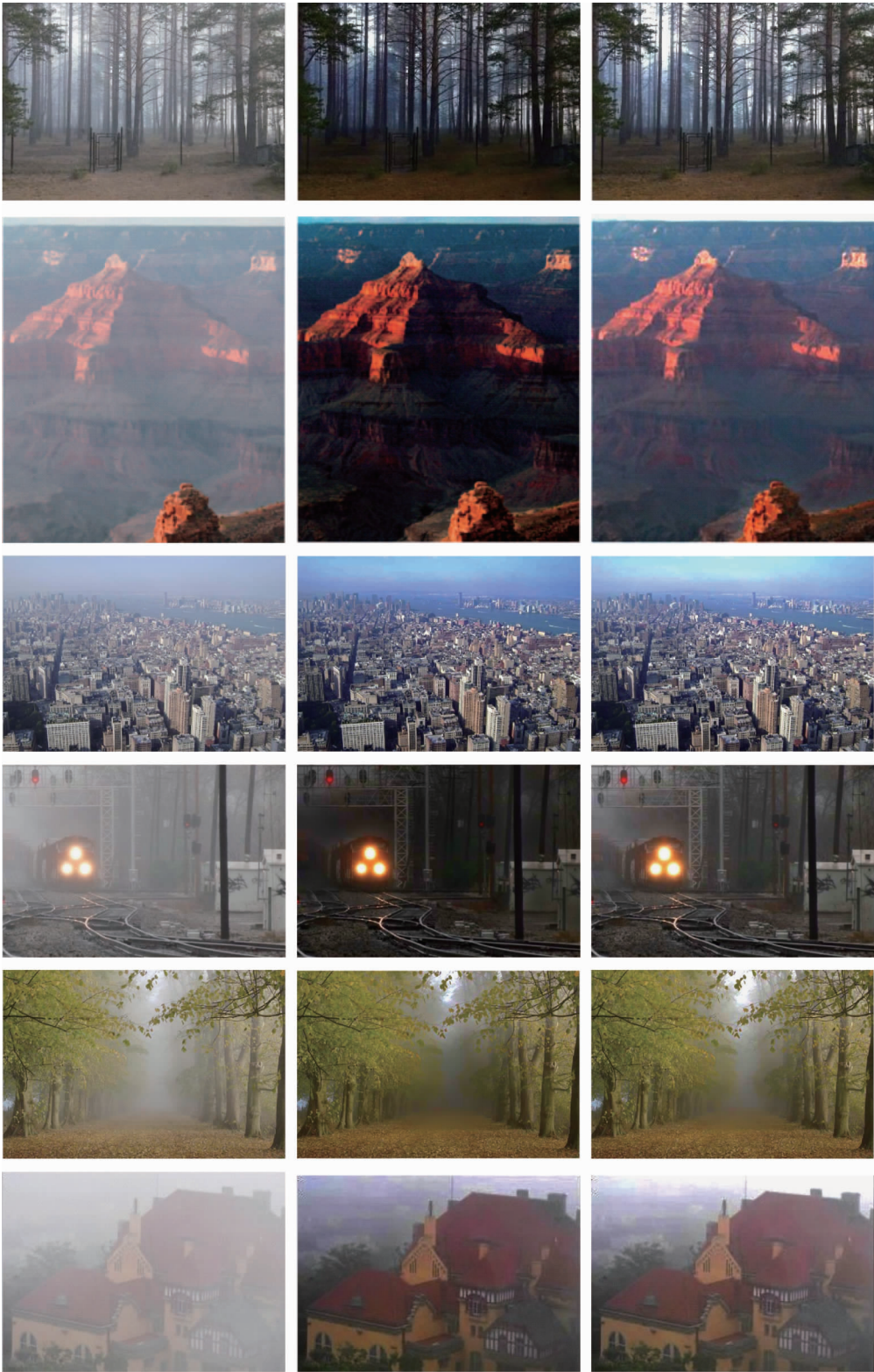


图 5 本文算法和 He 算法的去雾效果比较

参考文献

[1] 嵇晓强. 图像快速去雾与清晰度恢复技术研究: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院研究生院, 2012. 35-81

[2] Codruta O A, Cosmin A, Chris H, et al. A fast semi-inverse approach to detect and remove the haze from a single image. In: Proceedings of the 10th Asian Conference of Computer Vision (ACCV), Queenstown, New Zeal-

- and, 2010, 2: 501-514
- [3] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior. In: Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Miami, Florida, USA, 2009, 1: 1956-1963
- [4] 禹晶, 徐东彬, 廖庆敏. 图像去雾技术研究进展. 中国图像图形学报, 2011, 16(9): 1561-1576
- [5] 李建奇, 杨春华, 朱红求等. 基于多尺度 Retinex 和 NSCT 的泡沫图像增强方法. 高技术通讯, 2013, 23(2): 160-166
- [6] Kim J Y, Kim L S, Hwang S H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization. *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, 11(4): 475-484
- [7] 王守觉, 丁兴号, 廖英豪等. 一种新的仿生彩色图像增强方法. 电子学报, 2008, 36(10): 1970-1973
- [8] Levin A, Lischinski D, Weiss Y. A closed form solution to natural image matting. In: Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), New York, USA, 2006, 1: 61-68
- [9] Narasimhan S G, Nayar S K. Contrast restoration of weather degraded images. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(6): 713-724
- [10] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image. In: Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Anchorage Alaska, USA, 2008, 1: 1-8
- [11] 李大鹏, 禹晶, 肖创柏. 图像去雾的无参考客观质量评测方法. 中国图像图形学报, 2011, 9: 1753-1757

Single image dehaze based on semi-inverse approach and dark channel prior

Liu Qiong, Xie Chuanliang, Zhang Qizhi

(Department of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192)

Abstract

Aiming at existing image dehaze methods' problems in dehaze, a novel method for single image dehaze based on the semi-inverse approach and the dark channel prior was studied according to the theoretical model for image formation in hazy weather. For an image to be processed, firstly, the semi-inverse approach was used to detect and label its foggy region, and randomly select the candidate pixel set with larger values of dark channel prior in the detected foggy region for several times, thus, the Airlight value can be estimated by averaging the brightness values of candidate pixels in origin image. Then, the prior information was used to obtain the transmission distribution of image pixels. Finally, with the Airlight constant and the transmission distribution, the image to be processed can be restored according to the given optical model. The experimental results demonstrated that compared to the best algorithm so far proposed by He, the new method's performance averaging over effective strength, tone reproduction extent and structure information, which are the three indicators of the no-reference quality assessment (NQA) system for image quantitative evaluation, was increased by more than 15%. Moreover, since it can effectively reduce the halo effect, the restored images are natural to human needs.

Key words: image dehaze, semi-inverse approach, dark channel prior, no-reference quality assessment (NQA) evaluation system