

中图分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)09-1753-05

论文索引信息: 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]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1753-1757

# 图像去雾的无参考客观质量评测方法

李大鹏<sup>1)</sup>, 禹晶<sup>2)</sup>, 肖创柏<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(北京工业大学计算机学院, 北京 100124) <sup>2)</sup>(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要:** 针对图像去雾过程中经常出现的 Halo 效应, 色调偏移等问题, 提出一种去雾增强图像质量客观评价方法。采用 Canny 算子和亮通道检测去雾图像的有效边缘强度, 使用直方图相似性度量去雾图像的色彩还原能力; 使用反射图像的结构信息评价去雾图像的结构保持能力。最后综合有效边缘强度, 色彩还原能力和结构信息 3 个方面对去雾图像的质量进行客观评测。实验结果表明, 这种针对去雾前后图像视觉差异的评价模型, 能够有效地对各类去雾算法进行比较与评价, 与主观评价结果基本一致。

**关键词:** 去雾; 图像质量评测; 有效边缘强度; 色彩还原

## No-reference quality assessment method for defogged images

Li Dapeng<sup>1)</sup>, Yu Jing<sup>2)</sup>, Xiao Chuangbai<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(College of Computer Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124 China)

<sup>2)</sup>(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 China)

**Abstract:** In this paper we proposes a new method for comparing the quality of defogged images based on the halo artifacts, the color shift, and other issues which often appear during the defogging process. the canny edge detector is used to denote the detail performance of defogged images, is utilized to denote the color performance of defogged images, the is used. We use the structural information of the reflection image to indicate the structural performance of the defogged images. Using all these three factors, the effect of defogging methods can be evaluated objectively. Experimental results show that the proposed method, which is based on the visual differences of images before and after defogging, can compare the effect of different defogging methods and is consistent with the subjective perception.

**Keywords:** defogging; image quality assessment; valid edge intensity; color recovery

## 0 引言

在成像过程中, 大气中的微小粒子, 如霾、雾等对光线的散射作用导致场景的能见度显著降低, 影响所拍摄图像的视觉效果和后期处理。很多学者对去雾增强方法进行了深入研究<sup>[1-4]</sup>, 但对于去雾增强图像质量的客观评测方法却寥寥无几<sup>[5]</sup>, 在评价去雾增强方法的有效性时, 大多采用主观方法。但

是, 主观评价无论是在准备还是实施阶段都既复杂又费时, 且易受观测者个人因素的影响, 很难应用于实际。更重要的是, 主观方法无法嵌入到应用系统中, 优化系统的算法或参数设置。因此, 很需要能自动、高效地分析图像质量的客观算法, 并且算法的评价结果应足够符合人的主观感受。现有的客观评价方法按照对参考信息的需求程度分为无参考<sup>[6]</sup>、全参考<sup>[7]</sup>和半参考<sup>[8]</sup>三大类。全参考和半参考方法均需要参考图像的参与, 然而在去雾过程中并无真

收稿日期: 2011-01-13; 修回日期: 2011-04-19

基金项目: 北京市自然科学基金项目(4092006)。

第一作者简介: 李大鹏(1985—), 男, 北京工业大学计算机学院计算机科学与技术专业硕士研究生, 研究方向为图像处理。E-mail: lidapeng@emails.bjtu.edu.cn

实图像可做参考,因此只能使用无参考方法,通过对待测图像处理分析得到待测图像质量。在评价去雾图像质量和视觉效果时,图像的细节清晰度和色彩还原程度是两个重要的衡量指标,本文将从去雾增强图像的细节清晰度、色彩还原度和场景结构信息方面对去雾图像的质量进行客观评价。

## 1 问题的提出

若输入数据仅仅是单幅有雾图像,则该去雾问题是病态的。因为雾的浓度取决于未知的景深信息。近几年来,对单幅图像进行去雾的研究有了显著进展,但所提出的方法均利用很强的先验知识或假设。由于假设的局限性等问题,经常使得去雾结果出现 Halo 效应,色调偏移等问题。

### 1.1 Halo 效应

单幅图像去雾时,由于无法知道确切的景深信息,在物体边缘处景深突变的地方,去雾后易产生 Halo 效应。由于人眼对图像边缘、轮廓的失真更为敏感,因此有 Halo 的图像视觉效果会明显变差,如图 1 所示。有 Halo 效应的图像的边缘细节反而比没有 Halo 效应的图像的边缘细节多。图 1 首行 3 幅图像用 Canny 算子检测出的边缘强度从左到右依次为 28 549,39 965,28 422(Canny 算子的高阈值为自适应阈值,取值为图像边缘强度的累计直方图的从低到高的 70% 处;低阈值的取值为高阈值的 40% ;

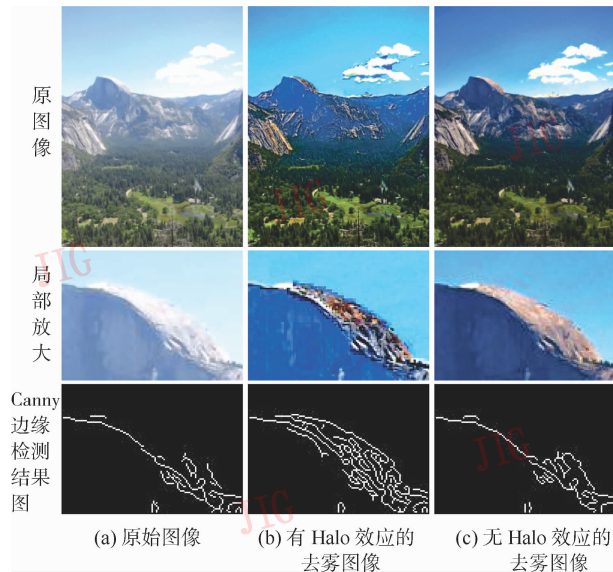


图 1 Halo 效应示意图

Fig. 1 Halo artifacts

此处阈值为[0.074 5,0.186 3])。因此,单一的边缘检测并不能真实反映出图像的细节质量,图像细节并非越多越好,滤除噪声和 Halo 效应影响后的边缘信息才是真正有效的细节。2.1 节将给出有效细节强度的计算方法。

### 1.2 色调偏移

由于雾的影响,拍摄到的图像饱和度低,色调偏移,仿佛蒙上一层白纱。去雾的过程会增强图像的色彩强度,然而图像的色彩强度也并非越大越好,当原图像色彩暗淡时,去雾增强后较高的色彩强度通常意味着颜色失真。例如文献[1]利用无雾图像的对比度比有雾图像的对比度大这个先验知识,通过最大化局部对比度来达到去雾的目的。该方法旨在提高图像的视见度,并未恢复场景的真实色彩,去雾后图像的颜色显得过饱和,如图 1(b) 所示。因此,一个好的去雾增强算法应该能够较好地恢复场景的真实色彩。2.2 节从直方图相似性的角度给出去雾图像色彩还原度的计算方法。

## 2 评价方法

本文提出的针对去雾图像客观质量评测方法系统框架如图 2 所示。首先用高斯低通滤波将原图像和待测图像分解为照度图像和反射图像。然后分别进行有效细节强度检测,色彩还原检测,场景结构检测,最后综合得到去雾图像的还原系数。

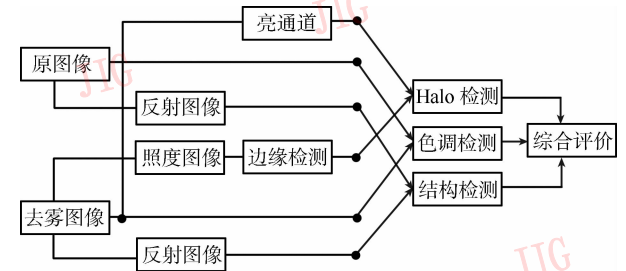


图 2 系统框架

Fig. 2 System framework

考虑到一幅图像  $I(x)$  可以表示为反射图像  $R(x)$  和照度图像  $L(x)$  的乘积形式,即

$$I(x) = L(x) \cdot R(x) \tag{1}$$

式中  $L$  包含图像的低频信息, $R$  包含图像的高频信息。本文使用高斯低通滤波来分离图像

$$R(x) = G_c(x) * I(x) \tag{2}$$

式中,高斯核函数定义为

$$G_c(\mathbf{x}) = ke^{-\frac{\|\mathbf{x}\|_2^2}{c^2}} \quad (3)$$

式中,  $k$  为归一化常数, 用来使高斯核函数的积分和为 1,  $c$  为高斯核的尺度, 本文中取值为 5。

### 2.1 有效细节强度

去雾增强后的图像应该有更高的清晰度, 具体表现为图像具有更高的边缘对比度。然而图像的对比度并非越高越好, 滤除噪声和 Halo 效应影响后的边缘信息才是真正有效的细节信息。Halo 效应发生在物体边缘处, 在景深突变处尤为明显, 其表现为物体边缘处变宽、变亮。Halo 效应的存在极大地影响了去雾图像的视觉效果。根据 Halo 的特点, 定义图像  $I(\mathbf{x})$  的亮通道为

$$I_{\text{bright}}(\mathbf{x}) = \max_{y \in \Omega(\mathbf{x})} (\max_{c \in \{R, G, B\}} I_c(y)) \quad (4)$$

式中,  $I_c(\mathbf{x})$  代表图像  $I(\mathbf{x})$  的 3 个色彩通道,  $\Omega(\mathbf{x})$  是以像素点  $\mathbf{x}$  为中心的  $7 \times 7$  小邻域。

使用 Canny 算子对去雾后的照度图像  $L(\mathbf{x})$  进行边缘检测, 对检测出的边缘图像  $L_{\text{canny}}(\mathbf{x})$  求和, 得到照度图像的总细节强度  $L_s$ , 代表滤除噪声后的去雾图像细节强度。

$$L_s = \sum L_{\text{canny}}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

由于去雾后的图像可能会有 Halo 效应, 所以, 对于  $L_{\text{canny}}(\mathbf{x})$  中检测出的所有边缘像素点的集合  $\Phi$  中的每一个像素点  $\mathbf{x}$ , 对去雾后图像的亮通道

$I_{\text{bright}}(\mathbf{x})$  中对应点的小邻域的值求和, 得到去雾图像中 Halo 强度  $I_{\text{halo}}$  的近似估计值, 可表示为

$$I_{\text{halo}} = \sum_{\mathbf{x} \in \Phi} \left( \sum_{y \in \Omega(\mathbf{x})} I_{\text{bright}}(y) \right) \quad (6)$$

式中,  $\Omega(\mathbf{x})$  是以像素点  $\mathbf{x}$  为中心的  $7 \times 7$  小邻域。

从总细节强度  $L_s$  中减去 Halo 强度  $I_{\text{halo}}$ , 得到的就是去雾图像的有效细节强度  $I_{\text{valid}}$ , 使用有效细节强度在总细节强度中所占的比重来评价图像的细节表现能力, 可表示为

$$I_{\text{valid}} = \frac{\left( L_s - \frac{I_{\text{halo}}}{n} \right)}{L_s} \quad (7)$$

式中,  $n$  为邻域  $\Omega$  内的像素数, 本文取 49。

### 2.2 色调还原程度

雾对图像造成的影响使得图像直方图整体向右偏移。一种好的图像复原算法应使复原后的图像看起来真实、自然。也就是说, 原图像和复原图像直方图的形状大体上应保持一致<sup>[9]</sup>。图 3 给出了原始有雾图像、文献 [1] 和文献 [3] 的去雾图像以及它们 R、G、B 颜色分量的直方图。可以看出, 与图 3(b) 的直方图图 3(e) 相比, 图 3(c) 的直方图图 3(f) 更好地保持了原始图像直方图的形状, 且色调和整体效果看起来也更清晰、自然。因此使用直方图相似性来度量去雾图像的色调偏移程度是合理的。

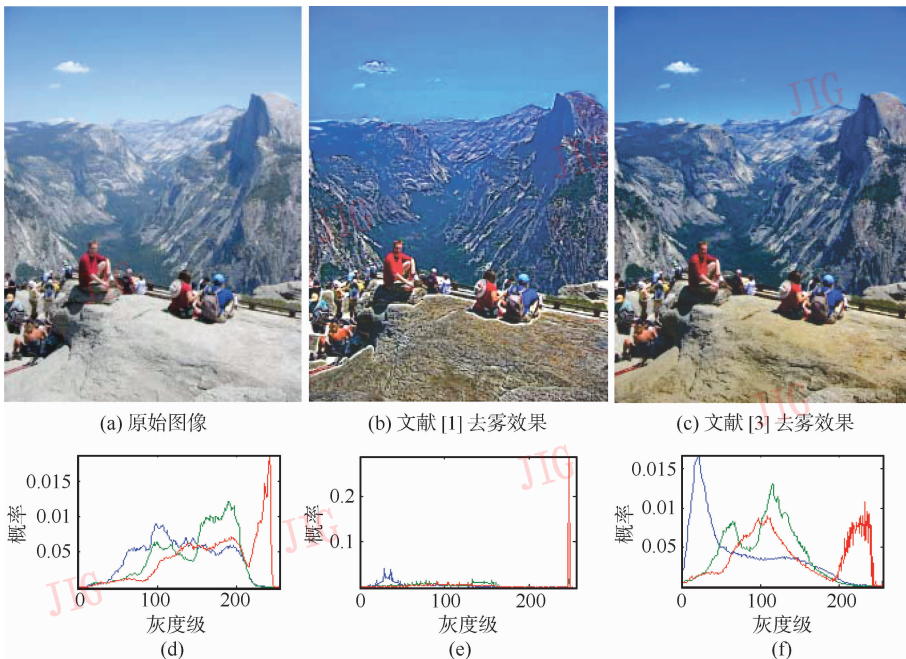


图 3 去雾前后的图像及其直方图

Fig. 3 Images before/after defog and their histograms

直方图相似度用于测量两个直方图分布之间的相似程度。本文使用相关系数来定量评价去雾前后图像直方图的相似性:

$$d_{\text{correl}}(\mathbf{h}', \mathbf{h}) = \frac{\sum_k (h'_k - \bar{h}') (h_k - \bar{h})}{\sqrt{\sum_k (h'_k - \bar{h}')^2 \sum_k (h_k - \bar{h})^2}} \quad (8)$$

式中,  $\bar{h}$ ,  $\bar{h}'$  分别为  $h_k$ ,  $h'_k$  的均值, 计算结果归一化。 $d_{\text{correl}}$  越大, 匹配度越高, 完全匹配时,  $d_{\text{correl}}$  为 1, 而完全不匹配时,  $d_{\text{correl}}$  为 0。

### 2.3 结构信息

人眼的主要功能是从视野中提取结构信息, 因此对场景结构改变程度的度量是对图像感知失真的一个很好近似<sup>[7]</sup>。较好的去雾效果应该大致保持原图像的结构信息, 去雾图像结构信息的大量增加往往意味着过增强和引入噪声, 而明显的减少则意味着丢失细节, 两种情况都会显著影响图像的视觉效果和后期处理的准确度。

人眼观察到物体表面的亮度是照度和反射的乘积, 但是场景中物体的结构是独立于照度的。因此, 为了得到图像中的结构信息, 通常希望去除照度的影响。因此从去雾前后的两幅图像中滤除照度图像, 仅对反射图像  $R_1$  和  $R_2$  进行结构信息的比较。定义结构相似函数为

$$S(R_1, R_2) = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (9)$$

式中,

$$\sigma_{12} = \frac{1}{M+1} \sum_{i=1}^M (R_{1,i} - \mu_1)(R_{2,i} - \mu_2) \quad (10)$$

$M$  为像素数,  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  为  $R_1$ 、 $R_2$  的均值,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  为  $R_1$ 、 $R_2$  的标准差。

### 2.4 综合评价

综合以上 3 个小节, 去雾图像质量综合评测准则为

$$Q = (L_{\text{valid}})^\alpha \cdot (d_{\text{correl}})^\beta \cdot (S)^\gamma \quad (11)$$

式中,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  被用来调节有效细节强度、色彩还原程度和结构信息在综合评价中所占的比重。为了简单起见, 这里取  $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 。

## 3 实验

为了验证本文算法性能, 对文献[1-4]的去雾效果<sup>[10]</sup>进行比较。去雾效果如图 4 所示, 实验结果由表 1 给出。从图 4 可以看出, Tan<sup>[1]</sup>的去雾图像虽然细节明显, 但存在明显的 Halo 效应和色调偏移, 因此整体视觉效果不如其他 3 列去雾图像。从表 1 可以看出, 后 3 列去雾图像的得分都明显优于 Tan<sup>[1]</sup>的得分, 这和图 4 的主观视觉效果相符。



图 4 不同算法的去雾效果图  
Fig. 4 Effect of different defogging methods

表1 去雾图像质量客观评价

Tab.1 Objective assessment of defogged image quality

	风景				城市			
	文献[1]	文献[2]	文献[3]	文献[4]	文献[1]	文献[2]	文献[3]	文献[4]
细节强度	0.186 3	0.294 9	0.285 3	0.225 6	0.151 9	0.205 1	0.191 8	0.220 7
色调还原	0.460 4	0.729 7	0.736 5	0.875 9	0.559 5	0.753 5	0.668 2	0.654 2
结构信息	0.858 6	0.902 4	0.934 7	0.890 2	0.911 9	0.680 8	0.937 4	0.943 3
综合评测	0.073 6	0.194 2	0.196 4	0.175 9	0.077 5	0.105 2	0.120 1	0.136 2

## 4 结 论

针对去雾图像经常出现的 Halo 效应,色调偏移等问题,从有效细节强度、色调还原程度、结构信息 3 个方面对去雾算法进行客观评价:使用 Canny 算子和亮通道检测图像的有效细节强度;使用直方图相似性检测图像的色调还原程度;使用结构相似性检测图像的结构失真程度。实验结果表明,本文提出的去雾图像客观质量评测方法可以有效地应用于多种去雾算法的评价与比较。

## 参考文献 (References)

- [1] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York, USA: IEEE, 2008; 1-8.
- [2] Fattal R. Single image dehazing [C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH 2008. New York, USA: ACM, 2008; 1-9.
- [3] Kaiming H, Jian S, Xiaoou T. Single image haze removal using dark channel prior [C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York, USA: IEEE, 2009; 1956-1963.
- [4] Jean-Philippe T, Nicolas H. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]// Proceeding of IEEE 12th International Conference on Computer Vision. New York, USA: IEEE, 2009; 2201-2208.
- [5] Yao Bo, Huang Lei, Liu Changping. Research on an objective method to compare the quality of defogged images [C]// Proceeding of the 2009 Chinese Conference on Pattern Recognition. New York, USA: IEEE, 2009; 1-5. [姚波, 黄磊, 刘昌平. 去雾增强图像质量客观比较方法的研究 [C]// 全国模式识别学术会议. 纽约: IEEE, 2009; 1-5.]
- [6] Sheikh H R, Bovik A C, Cormack L. No- reference quality assessment using natural scene statistics; JPEG2000 [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(11): 1918-1927.
- [7] Zhou W, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [8] Carnec M, Le Callet P, Barba D. Objective quality assessment of color images based on a generic perceptual reduced reference [J]. Image Communication, 2008, 23(4): 239-256.
- [9] Chambah M, Rizzi A, Gatta C, et al. Perceptual approach for unsupervised digital color restoration of cinematographic archives [C]// Proceedings of SPIE Conference on Color Imaging VIII: Processing, Hardcopy, and Applications. Washington, USA: SPIE, 2003, 5008: 138-149.
- [10] Jean-Philippe T. Single Image Visibility Restoration Comparison [EB/OL]. [2010-08-07]. <http://perso.lcpc.fr/tarel.jean-philippe/visibility/>.