

图像去雾算法清晰化效果客观评价方法

郭 璠^{1,2} 蔡自兴¹

摘 要 针对目前去雾效果评价方法少和已有评价方法存在局限性等问题, 提出了两种图像清晰化效果评价方法. 一种借助由环境渲染或光路传播图所模拟的雾环境图像, 采用全参考方式评估算法的去雾效果; 一种从人类视觉感知的角度出发, 采用无参考方式构建综合评价体系以全面衡量算法的去雾性能. 实验证明两种方法均能有效地评价各算法的清晰化效果, 且评估结果与人眼的主观感受相一致. 本文所提评价方法分别从构建模拟雾环境和人类视觉感知两方面考虑, 与已有评价方法相比, 在获得全方面评估结论的同时, 具有较好的实用性和可靠性.

关键词 图像去雾算法, 清晰化效果, 图像评价, 模拟雾环境, 人类视觉感知

引用格式 郭璠, 蔡自兴. 图像去雾算法清晰化效果客观评价方法. 自动化学报, 2012, 38(9): 1410–1419

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.01410

Objective Assessment Method for the Clearness Effect of Image Defogging Algorithm

GUO Fan^{1,2} CAI Zi-Xing¹

Abstract Since there is lack of methodology to assess the performance of defogging algorithm and the existing assessment methods have some limitations, two new methods for assessing the clearness effect of image defogging algorithm are proposed in this paper. One is using synthetic foggy image simulated by environment rendering or transmission map to assess defogging effect in full-reference way. The other is constructing assessment system from the perspective of human visual perception to assess the algorithm performance comprehensively in no-reference way. Experiments show that both methods can assess the effect effectively, and the evaluation results are consistent with our subjective perception. Compared with other existing methods, our proposed methods can assess the effect from the construction of simulated environment and human visual perception, respectively. The new methods can obtain a comprehensive assessment results as well as provide a good practicability and reliability.

Key words Image defogging algorithm, clearness effect, image assessment, simulated fog environment, human visual perception

Citation Guo Fan, Cai Zi-Xing. Objective assessment method for the clearness effect of image defogging algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(9): 1410–1419

在雾天情况下, 由于所拍摄的图像很容易受到大气微粒的散射作用, 致使其场景能见度显著降低, 图像对比度和颜色等特征衰减严重, 从而极大地影响到图像的视觉效果和后期处理. 由于对图像进行去雾处理的重要性, 许多学者对此进行了深入研究^[1–5]. 为了衡量这些去雾算法的有效性, 现有方法主要是以主观的视觉评价为主, 但主观评价很容

易受到观测者个人因素的影响, 这就造成评估结果不具备很好的可靠性. 究其原因, 主要有以下几点: 1) 没有一个理想的图像来作为评价参考. 对去雾效果的评估不同于图像质量评价或图像复原评价, 与有雾图像场景完全相同的晴天参考图像通常很难获得; 2) 去雾效果的评价测度应当与人眼视觉感受相匹配, 然而人类视觉感受本身就不是一个确定性的过程. 因此, 确定影响视觉判断最为重要的因素, 并设计与之对应的测度值是较为困难的; 3) 现有的评价方法还常常借鉴图像质量评价的相关指标, 如采用均方差、信息熵、峰值信噪比等指标, 但若将以上这些评价指标直接用于去雾图像的效果评价, 通常无法得到一致性的结果. 因此, 研究图像去雾算法的客观评价方法具有重要的意义. 现有的客观评价方法按照对参考信息的需求程度可分为全参考^[6]、半参考^[7]和无参考^[8]三大类, 其中前两者需要借助参考图像. 而针对图像去雾效果评价这一具体应用而言, 已有的客观评价方法主要分为两类: 一类是仅从

收稿日期 2011-10-27 录用日期 2012-03-01

Manuscript received October 27, 2011; accepted March 1, 2012
国家自然科学基金 (90820302, 60805027), 国家博士点基金 (200805330005), 湖南省院士基金 (2009FJ4030) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (90820302, 60805027), Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (200805330005), and Academician Foundation of Hunan Province (2009FJ4030)

本文责任编辑 刘一军

Recommended by Associate Editor LIU Yi-Jun

1. 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083 2. 先进控制与智能自动化湖南省工程实验室 长沙 410083

1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083 2. Hunan Engineering Laboratory for Advanced Control and Intelligent Automation, Changsha 410083

图像对比度角度衡量的方法. 该对比度增强评估方法^[9] 由 Hautière 等提出, 通过可见边检测得到对比度图, 在此基础上利用相关评测指标较好地衡量了图像的对比度增强能力, 但此方法无法正确评估存在过增强的图像; 另一类是从图像对比度和颜色两方面综合考虑的方法. 例如文献 [10–11] 利用全局和局部对比度对去雾后图像的对比度增强程度进行衡量. 同时, 采用色调极坐标直方图、RGB 图像主成分分析和直方图相似度三个评测指标, 分别从图像的色调还原能力、颜色还原能力和色彩自然感三方面来评估图像的颜色质量. 文献 [12] 在对比度评测方面采用 Canny 算子和亮通道检测去雾图像的有效边缘强度, 同时在颜色评测方面使用了直方图相似度以度量去雾图像的色彩还原能力. 文献 [13] 提出了细节还原系数和色彩还原系数的评价指标, 其同样是针对图像的对比度和颜色对去雾效果进行客观评价.

本文在分析指出已有对比度增强评估方法^[9] 局限性的基础上, 从全参考和无参考方法的角度出发, 提出了两种去雾效果评价新方法, 即基于合成图像的去雾效果评价方法和基于视觉感知的评价方法. 其中基于合成图像的评价方法为借助参考图像的全参考方法, 提出此方法主要是为了解决去雾过程中同一场景的真实参考图像在实际中往往较难获取的问题. 因此, 在技术实现上, 该方法提出借助虚拟现实技术首先创建各种无雾场景图像作为全参考方法的参考图像, 再利用环境渲染或光路传播图建立与之相对应的人工合成雾天图像, 最后以此为依据利用绝对差值 (Absolute difference, AD) 对各算法的去雾效果进行评估, 从而避免了真实参考图像获取难的问题. 而基于视觉感知的去雾效果评价方法为无需参考图像的无参考方法, 该方法围绕图像的对比度和颜色两方面提出将图像的对比度、色彩的自然度和丰富度作为评价去雾图像质量和视觉效果的重要衡量指标. 同时, 通过对测试图像的统计分析, 总结归纳上述三个指标的变化趋势, 并由此构建去雾效果的综合评价新函数.

上述两种方法尽管在解决问题的思路存在根本的区别, 但是由于各具优缺点, 因此在具体应用中需要根据实际情况选取相关的方法进行评价. 即根据评价的目的和对象来处理, 如果要从整体上衡量算法的去雾性能, 就可采用人工合成图像方法; 若要对各去雾算法对某一给定的真实有雾图像的去雾效果优劣, 就可依据综合评价函数进行评估. 相对于前人的工作, 本文方法具有以下创新点及优势: 1) 通过建立合成图像为算法评价提供各种雾天环境下的虚拟仿真图像及理想的无雾参考图像, 从而拓展了去雾效果评价问题的解决途径; 2) 从人类视觉感知的角度考虑决定主观评价结果的最为敏感的因素,

通过统计分析总结出反映这些因素的评价指标的变化规律, 进而依据此规律构建综合评价函数, 从而保证了评估结果与人眼视觉感知特性相一致.

1 基于可见边的对比度增强评估方法

目前, 国内外研究者在图像去雾算法方面开展了大量的研究工作, 但对于去雾效果的客观评价则关注较少. 在为数不多的去雾效果评价方法中, 应用最广的是由法国学者 Hautière 等所提出的基于可见边的对比度增强评估方法^[2, 9].

1.1 理论基础与评价指标

1.1.1 理论基础

Blackwell 于 1987 年提出了能见度水平 (Visibility level, VL) 的概念. VL 为目标物的实际亮度差异与在其阈值处的亮度差异的比率, 其表达式如下:

$$VL = \frac{\Delta L_{\text{actual}}}{\Delta L_{\text{threshold}}} \quad (1)$$

其中, ΔL_{actual} 可通过目标物与其背景的亮度来衡量, 亮度差异阈值 $\Delta L_{\text{threshold}}$ 则采用 Adrian 的经验目标模型计算得到. 但对于在非一致背景下包含若干目标物的复杂图像, 利用 Adrian 模型计算 $\Delta L_{\text{threshold}}$ 仍较为困难. 因此, 文献 [9] 所提方法利用 VL 将图像对比度复原方法的性能评估问题转化为对相关系数 r 的求取问题, r 的计算公式如下:

$$r = \frac{VL_r}{VL_0} = \frac{\Delta I_r}{\Delta I_0} \quad (2)$$

其中, VL_r 和 VL_0 分别表示复原图像和原图像中目标物的能见度水平. ΔI_r 和 ΔI_0 分别为复原图像和原图像中属于可见边的像素点的梯度. 由此可见, r 通过复原图像和原图像的相关梯度来衡量由各复原方法所导致的能见度水平的提升程度.

1.1.2 评价指标

基于可见边的对比度增强评估方法^[9] 主要根据国际照明委员会提出的大气能见度定义, 结合对数图像处理模型 (Logarithmic image processing, LIP) 求取对比度图. 图 1 即为几种典型算法的去雾结果及其对比度图示例. 然后再采用复原后的新增可见边之比 (e)、可见边的规范化梯度均值 ($\bar{r}$) 以及饱和和黑色或白色像素点的百分比 (σ) 三个指标, 从不同角度客观评价各算法的去雾效果.

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0} \quad (3)$$

$$\bar{r} = \exp \left[\frac{1}{n_r} \sum_{P_i \in \wp_r} \log r_i \right] \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{n_s}{\dim_x \times \dim_y} \quad (5)$$

其中, n_0 和 n_r 分别表示原图像 I_0 和去雾图像 I_r 中可见边的数目. $\wp_r$ 为 I_r 中的可见边集合, P_i 为属于去雾图像 I_r 中可见边的像素点, r_i 为去雾图像在 P_i 处的 Sobel 梯度与原图像在 P_i 处的 Sobel 梯度的比值. n_s 为饱和黑色或白色像素点的数目, 在实际运算中通过计算灰度化后的去雾图像中像素亮度值为 255 或 0 的像素点数目之和来确定. 而灰度图像中全白或全黑的像素点越多, 会造成其对比度越低. $\dim_x$ 和 $\dim_y$ 分别表示图像的宽和高.

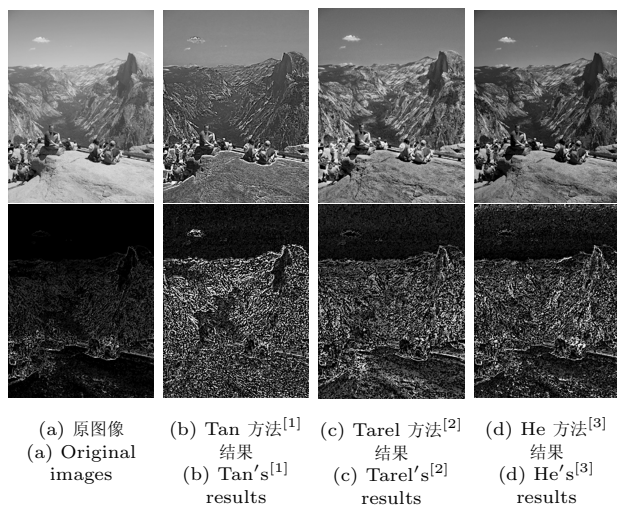


图 1 各算法的去雾结果及其对比度图

Fig.1 The defogging results and their contrast maps

对于每种算法, 其理想的去雾效果必然应在不丢失视觉信息的同时, 具有恰当的图像对比度. 在基于可见边的对比度增强评估方法中, e 和 $\bar{r}$ 值越大, σ 值越小, 表明去雾效果越好^[9]. 表 1 为采用上述三个指标对图 1 中各去雾图像的计算结果. 注意到 e 值有可能为负值, 这主要是因为对于某些去雾图像, 尽管其复原后可见像素点相对于原图像明显增多了, 但是由于这些像素点连成了一片区域, 因而在统计由这些可见像素点构成的去雾图像可见边数目时, 反而比原图像的可见边数目减少, 从而导致 e 值为负数.

表 1 图 1 中各去雾图像的评价指标计算结果

Table 1 Three descriptors computed for the three compared methods in Fig. 1

指标	Tan 方法 ^[1]	Tarel 方法 ^[2]	He 方法 ^[3]
e	-0.08	-0.008	0.06
$\bar{r}$	2.08	2.01	1.42
σ	0.005	0.0	0.002

1.2 方法局限性

在大量实验分析的基础上, 我们发现上述对比度增强方法主要存在以下问题:

1) 高质量去雾效果的衡量

对比度增强评估方法所存在的最大问题在于对高质量去雾效果的衡量. 通过实验我们发现主观感受上效果较好的图像并非总是对应较高的 e 、 $\bar{r}$ 值和较小的 σ 值. 过增强现象即是对这一问题的很好说明. 例如, 若依据梯度均值比率 $\bar{r}$, 可从表 1 中推导出 Tan 是最好的算法, 但从视觉效果上来看, Tan 结果很明显由于过增强导致去雾图像的颜色失真较大, 且存在光晕伪影现象.

2) 评价结果的不一致

当利用对比度增强评估方法对去雾效果进行定量评价时, 应确保采用此方法中的任一指标均能得到相同的评价结果, 即较好的去雾算法应同时满足较大的 e 、 $\bar{r}$ 值和较小的 σ 值, 但从表 1 可以看出评估结果并非如此. 事实上, 实验表明较好的算法其实对应以上评价指标之间的权衡结果. 因此, 仍需进一步探索更好的去雾效果评价方法.

2 基于合成图像的去雾效果评价方法

在客观评价方法中, 借助无雾参考图像的全参考方法最为可靠. 然而在实际应用中, 由于该方法要求无雾参考图像与各种雾天图像为同一场景且光照条件相同, 因而极难获取其真实参考图像. 由此, 本文提出采用环境渲染或光路传播图等方式建立无雾和各种雾天条件下的人工合成图库. 此图库中的原无雾图像均依据城市道路环境创建, 力图尽可能多地涵盖相关场景. 图库共有 18 类图像, 每一类包括原无雾图像、采用 3ds max 渲染的雾效和利用光路传播图创建的雾环境这三幅图像, 每幅图像的大小为 640 像素 $\times$ 480 像素.

2.1 合成图像的创建

2.1.1 环境渲染方法

利用 3ds max、OpenGL 等虚拟现实技术的动画渲染和建模工具软件所提供的环境特效功能可以创建雾、霾等大气特效, 在雾效的影响下, 场景物体消隐在雾中, 如同在原图像上覆盖了一层均匀的雾气遮罩. 通过设置雾效渲染功能中的密度参数还可

以调整雾气的浓度. 图 2 为采用 3ds max 创建的不同密度参数下的雾效渲染结果. 从图中可以看出, 随着密度参数值的增大, 均匀雾气遮罩变厚, 即雾气变浓, 直至场景物体完全消失于白色的雾中.

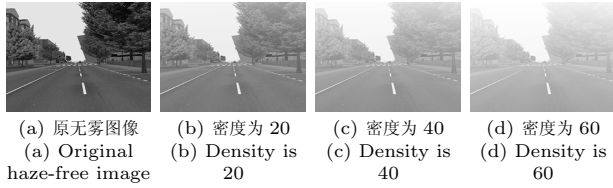


图 2 采用 3ds max 创建的不同密度参数下的雾效渲染结果
Fig. 2 The synthetic foggy images with different density by using 3ds max

2.1.2 光路传播图方法

相比于采用 3ds max 等软件合成的均匀雾效, 利用光路传播图创建雾环境的方法由于充分利用了图像的深度信息, 使场景中远处的物体会逐步消隐在雾中, 因而从视觉效果上看更为真实自然. 描述雾天图像降质过程及退化机理的大气散射模型^[14]是光路传播图方法的主要理论依据, 该模型的表达式为

$$I(x) = J(x)e^{-\beta d(x)} + A(1 - e^{-\beta d(x)}) \quad (6)$$

其中, x 为空间坐标, A 表示大气光, 在实际计算中, 利用 He 方法^[3]、禹晶方法^[15]等去雾算法可准确求取模型中的 A 值. $d(x)$ 为场景的景深, β 为大气散射系数, 表示单位体积的大气对光的散射能力. 根据 Rossum 提出的辐射输运方程, 令 $t(x) = e^{-\beta d(x)}$, 则 $t(x)$ 又被称为光路传播图, 表征光从场景点传播到观测点过程中所发生的衰减现象. 实验中, 首先利用建模工具软件 3ds max 创建虚拟场景模型, 如图 3(a) 所示即为在 3ds max 的透视区中创建的古桥模型, 其对应的整体场景渲染效果如图 3(b) 所示. 然后利用该软件渲染器中的 Z-Depth 组件, 设置该组件的 $Z_{\min}$ 和 $Z_{\max}$ 值来获取其反映景深信息的传播图 $t(x)$. 本例的 $Z_{\min}$ 设置为 50, $Z_{\max}$ 设为 600, 由此所得到的光路传播图如图 3(c) 所示. 实验结果表明, 模拟雾环境的生成及最终去雾效果的评价受 $Z_{\min}$ 和 $Z_{\max}$ 两个参数的影响较小.

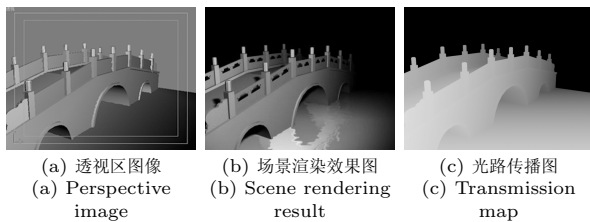


图 3 虚拟场景传播图的求取

Fig. 3 Transmission map for virtual scene

此外, 考虑到真实场景的雾气分布大多应随景深而变化, 因而引入参数 λ 以模拟此类雾环境, 具体

做法为将参数 λ 作为 β 的权重引入, 则光路传播图的表达式变换为

$$t'(x) = e^{-\lambda \beta d(x)} = (e^{-\beta d(x)})^\lambda = t(x)^\lambda \quad (7)$$

由上式可知, 对于此种情况, 将变换后的传播图 $t'(x)$ 代入式 (6), 所获得的最终雾效主要取决于 λ 的取值, 图 4 给出了不同 λ 取值所创建的雾环境效果.

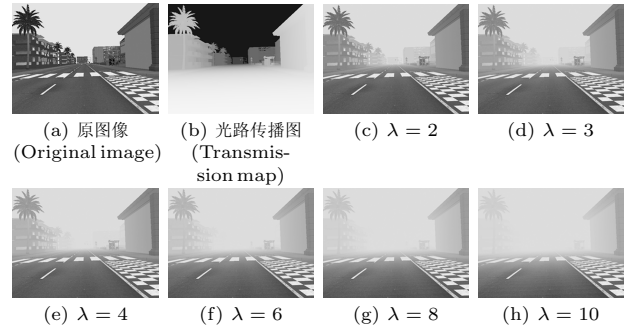


图 4 采用光路传播图方法在不同 λ 取值下创建的雾环境效果

Fig. 4 The synthetic foggy images with different λ by using transmission map

2.2 应用举例

为了验证基于合成图像的去雾效果评价方法的有效性, 采用目前最新提出的 He 方法^[3]和 Tarel 方法^[2]对利用环境渲染或传播图等方式建立的合成图像进行对比性实验. 图 5 针对利用传播图创建的雾环境, 给出了 3 组图像去雾实验的对比效果示例. 可以看出, 在模拟雾环境中无法看清的远处场景目标, 在经过两种去雾算法的清晰化处理后都得到了明显增强. 同时, 从视觉效果上看, He 方法的处理结果细节分明、轮廓清晰. 相比之下, 采用 Tarel 方法去雾后的场景目标则存在光晕伪影现象. 因此, 对图 5 中的合成图像而言, He 方法对场景的恢复效果优于 Tarel 方法.

为了客观、定量地评估两种去雾算法的性能, 采用计算绝对差平均值的方式对合成图库中的 18 类无雾原图像及利用 3ds max 和传播图创建的虚拟雾天图像进行了统计, 统计结果如表 2 所示. 可知, 两种算法的 AD 平均值均小于不做任何处理的情况, 说明这些算法均能有效地提高虚拟雾天图像的清晰度. 相比之下, He 方法的统计数值更小, 说明其处理结果更接近于标准的无雾原图像, 因而效果更好. 这一结论在图 5 的视觉效果中也得到了证实.

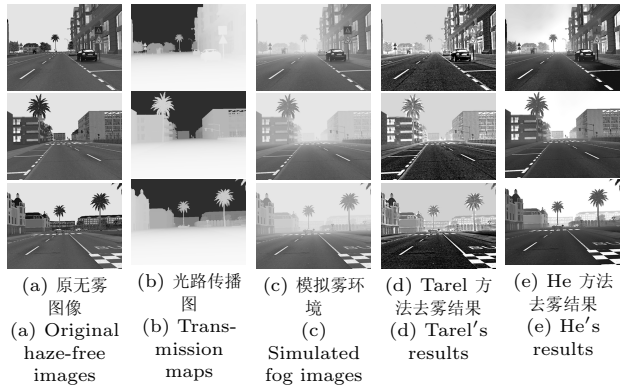


图 5 基于合成图像的去雾效果对比
Fig. 5 Defogging effect comparison for synthetic foggy images

表 2 18 类合成图像的绝对差平均值统计结果
Table 2 Average absolute difference on 18 synthetic images

去雾算法	环境渲染方法	光路传播图方法
无	63.93	47.21
Tarel 方法	51.92	35.07
He 方法	36.53	31.94

而利用已有的基于可见边的对比度增强评估方法^[9]则主要存在评估结果不一致的问题. 例如对于图 5 中 Tarel 方法和 He 方法的去雾结果而言, 由表 3 中的统计数据可知, 前者的 σ 值整体小于后者, 说明 He 方法优于 Tarel 方法, 但若从 e 、 $\bar{r}$ 值来衡量则会得出相反的结论, 本文所提出的基于合成图像的方法则不存在这一问题.

表 3 图 5 中各去雾图像的对比度增强评估方法结果
Table 3 Results of contrast enhancement assessment method on Fig. 5

指标	图 4(d) Tarel 方法			图 4(e) He 方法		
	第 1 幅	第 2 幅	第 3 幅	第 1 幅	第 2 幅	第 3 幅
e	1.0912	1.1386	1.1965	0.9875	1.0903	1.1790
$\bar{r}$	5.0700	5.0743	4.8396	2.0302	1.6637	1.6236
σ (%)	0.7301	0.1729	0.8551	0	0	0

3 基于视觉感知的去雾效果评价方法

基于合成图像的评价方法通过模拟无雾和有雾状态的图像场景, 采用全参考的方式有效评估各算法去雾效果的优劣. 而针对实际应用中无法轻易获取参考图像的场景, 本文试图从人类视觉感知的角度出发, 构建一套无需参考图像的去雾效果综合评价体系. 由于已有对比度增强评估方法所提出的

三个评价指标均是建立在对比度图的基础上, 因而能很好地衡量算法的对比度复原能力, 然而人类视觉系统在判断算法的去雾效果时, 除了对比度这一因素, 去雾图像的颜色质量也是重要的评价依据. 因此, 有必要构建一个建立在人类视觉感知基础上的图像去雾效果综合评价体系. 在衡量图像颜色质量方面, 最佳彩色图像再现模型认为, 图像色彩质量主要由人类视觉所感知的色彩自然度和丰富度决定. 因此, 本文提出的基于视觉感知的评价方法将通过图像的对比度、色彩的自然度和丰富度等指标从不同角度评价算法的去雾效果, 即建立 CNC (Contrast-naturalness-colorfulness) 综合评价体系.

3.1 CNC 的总体框架及评价指标

CNC 评价体系的总体框架如图 6 所示, 其中 x 表示原有雾图像, y 为算法的处理结果. 此评价体系依据人眼视觉感知特性, 从图像的对比度和颜色质量入手, 首先结合图像 x 和 y 的可见边计算图像的对比度增强指标 e' , 其次计算去雾结果 y 的图像色彩自然度指标 (Color natural index, CNI) 和图像色彩丰富度评价指标 (Color colorfulness index, CCI), 最后利用评价指标 e' , CNI 和 CCI 构建综合评价函数, 并据此对各去雾算法的复原效果进行客观、定量评估.

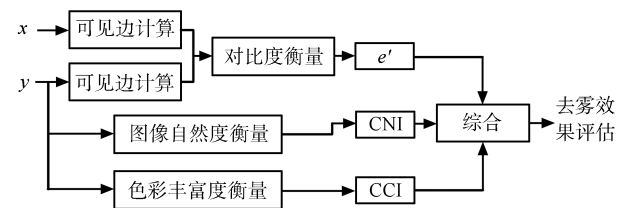


图 6 CNC 评价体系总体框架示意图
Fig. 6 Diagram of the CNC measurement system

如前所述, 图像去雾算法的评价指标主要涉及图像的对比度和色彩质量两个方面, 涵盖图像对比度、色彩自然度和丰富度三个衡量指标, 图 6 给出了 CNC 评价体系中各指标值的总体变化趋势, 这些衡量指标具体如下:

1) 图像对比度衡量指标

依据大气能见度的定义, 可见边是局部对比度的反映, 因此图像的对比度可通过其可见边的数目来度量. 对于基于可见边的对比度增强评估方法, 由式 (3) 可知, 当 $n_r < n_0$ 时, 新增可见边之比 $e < 0$. 为了保证图像对比度的衡量指标 e' 为非负值, 将其定义为

$$e'(x,y)=\frac{n(y)}{n(x)}\tag{8}$$

其中, $n(x)$ 和 $n(y)$ 分别表示原有雾图像 x 和去雾图像 y 中的可见边数目.

2) 图像色彩自然度衡量指标

图像色彩自然度是人类视觉评判图像场景是否真实自然的度量, CNI 为此评价标准的衡量指标^[16]. 该指标主要用于对去雾图像 y 的评判, 其取值范围为 $0 \sim 1$, CNI 越接近于 1, 表明此图像越自然. 同时, 由于 CNI 是建立在图像分割和分类的基础上, 为了保证评价的公平客观性, 对所有去雾图像的处理均采用文献 [16] 所提出的图像分割、分类标准.

3) 图像色彩丰富度衡量指标

图像色彩丰富度反映的是色彩的鲜艳生动程度, CCI 为其衡量指标^[16]. 该指标同样用于评判去雾图像 y , 当 CCI 位于某一特定取值范围内时, 人类视觉对图像色彩的感知最为适度. CCI 与图像内容相关, 主要用于衡量同一场景、相同景物在不同去雾效果下的色彩丰富程度.

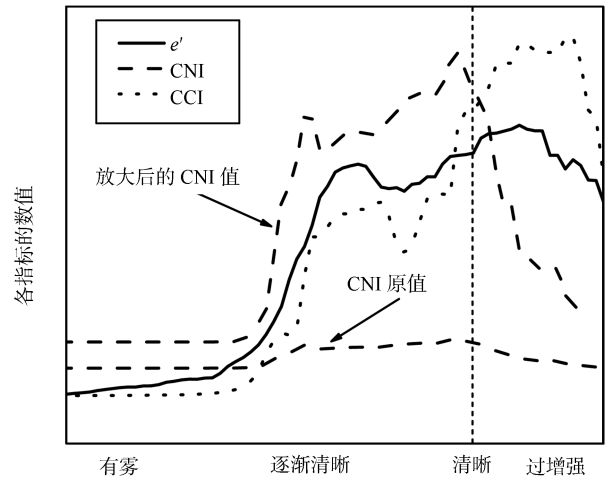
为了分析上述三个指标的变化趋势, 针对 50 幅无雾测试图像采用光路传播图方法, 通过逐步调节相关参数创建了对应的从浓雾、大雾直至薄雾逐步清晰化的模拟雾天图像, 同时通过调节 Xu 等提出的图像增强方法^[17] 中的相关参数, 得到各测试图像从无雾、适度增强到过增强逐步变化的仿真图像. 再对各测试图像从浓雾到过增强这一系列图像统计上述指标的计算值, 即可得到如图 7 所示的相关指标的总变化趋势曲线图. 图中, 实线表示对比度衡量指标 e' 的变化趋势曲线, 点线为色彩丰富度衡量指标 CCI 的变化趋势曲线, 虚线表示色彩自然度 CNI 的变化趋势曲线, 图中垂直虚线位置表示最佳去雾效果处. 由于相对于 e' 和 CCI 的数值变化, CNI 的原数值变化过小, 因此其值被人为扩大, 以便更为直观地在同一坐标系中对比分析各指标间的关系. 从图 7 中可以看出, 当图像从有雾、逐渐清晰到清晰的过程中, e' 和 CCI 的值在波动中稳步上升. 当图像过增强以后, 这两个值依然增大, 当过增强到一定程度后就开始急剧下降. 即 e' 和 CCI 是在曲线达到峰值前图像达到最佳去雾效果. 其中 e' 的波动是因为在去雾过程中构成可见边的可见像素点有可能连成区域, 导致去雾图像的可见边数目发生变化, 从而造成 e' 值的波动; CCI 的波动是由于图像在逐步增强的过程中有时会出现颜色失真. 而指标 CNI 随着去雾效果的增强其值波动上升, 当图像达到最佳去雾效果后, 其值开始急剧下降. 由于当存在少量雾气时, 图像的色彩可能较为自然. 因此, 在图像达到最佳清晰化效果前, 该曲线存在几个峰值. 由此可见, 最为自然的图像不一定清晰化效果最好, 但最为清晰的图像必定具有较高的 CNI 值.

3.2 CNC 综合评价函数的构建

利用上述衡量指标即可构建综合评价函数

$CNC(x, y)$ 以定量评估各算法的复原效果, 即

$$CNC(x, y) = f(e'(x, y), CNI(y), CCI(y)) \quad (9)$$



CNC 评价体系中各指标的总变化趋势曲线

Fig. 7 The overall variation trend of indexes in CNC measurement system

由图 7 所示的各指标的变化趋势可知, 式 (9) 中 CNI 在其曲线峰值时, 图像色彩达到最为自然的效果, 但图像去雾效果不一定最佳, 不过最佳的去雾效果必然具有较高的色彩自然度即 CNI 值, 而过增强后, 图像色彩失真, CNI 值急剧下降. e' 和 CCI 则是在其曲线峰值前, 图像达到最佳去雾效果, 而过增强后, 其值持续上升越过峰值才开始下降. 因此, 若能使 e' 和 CCI 曲线的上升趋势 (即从最佳去雾效果点到其峰值) 尽可能地被 CNI 曲线的下降趋势所抵消, 就能使 CNC 综合评价函数的曲线峰值尽可能地与图像实际最佳去雾效果相接近. 同时, CNI 的实际数值变化幅度较小, 而 e' 和 CCI 的变化幅度则较为显著, 因而需对 e' 和 CCI 进行相关运算以减弱其对 CNC 综合评价函数的影响, 从而实现上述抵消. 本文对 e' 和 CCI 采用开方运算, 由此, CNC 综合评价函数可表示为

$$CNC(x, y) = e'(x, y)^{\frac{1}{n_1}} \cdot CNI(y) + CCI(y)^{\frac{1}{n_2}} \cdot CNI(y) \quad (10)$$

其中, n_1 和 n_2 为调节参数 ($n_1 \geq 1, n_2 \geq 1$), 目的是通过减弱 e' 和 CCI 的变化幅度来满足上述抵消要求. 图 8 给出 n_1 和 n_2 的调整对综合 CNC 曲线变化的影响. 其中图 8(a) 为式 (10) 等号右边第 1 项 $e'(x, y)^{\frac{1}{n_1}} \cdot CNI(y)$ 在取不同 n_1 值下的变化趋势曲线, 图 8(b) 为第 2 项 $CCI(y)^{\frac{1}{n_2}} \cdot CNI(y)$ 在取不同 n_2 值下的变化曲线, 图 8(c) 为不同 n_1 和 n_2 取值下的 CNC 变化曲线. 由图 8(a) 和图 8(b)

可知, 当 n_1 或 n_2 值较小时, 两项的变化曲线均是在图像过增强时达到最大值. 随着 n_1 或 n_2 值的增大, 两项的变化曲线峰值左移, 且逐步趋于稳定, 如图中垂直虚线. 由于 CNC 为上述两项之和, 因而具有相同的变化规律. 选取适当的 n_1 和 n_2 值即可在使 CNC 值趋于稳定的同时, 确保曲线的峰值尽可能与图像的最佳去雾效果相接近. 同时, n_1 和 n_2 的取值是基于应用场景的, 在本文的实验中均是设置 $n_1 = n_2 = 5$, 该取值能够使 $e'(x, y)^{\frac{1}{n_1}} \cdot CNI(y)$ 和 $CCI(y)^{\frac{1}{n_2}} \cdot CNI(y)$ 的值分别趋于稳定.

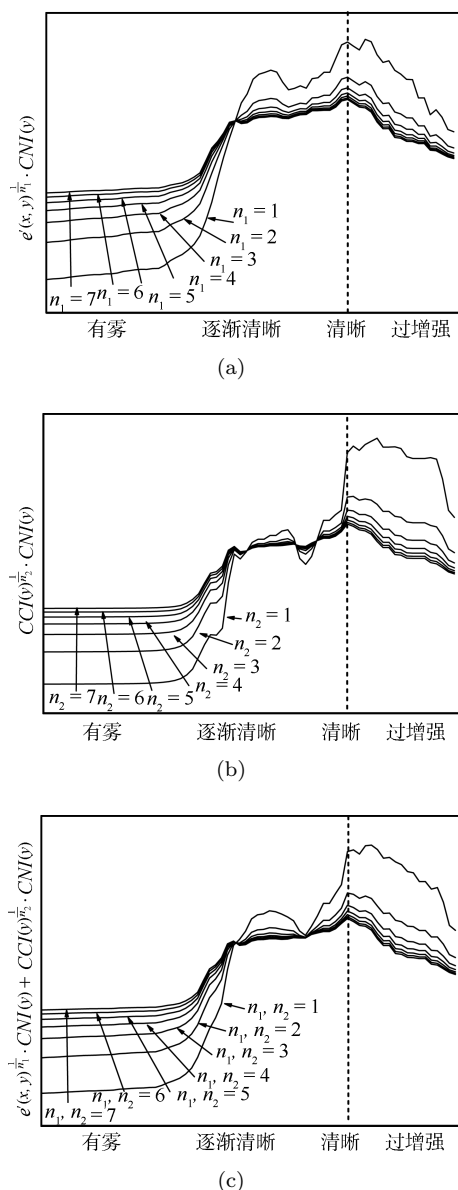


图 8 n_1 和 n_2 的调整对综合 CNC 曲线变化的影响

Fig. 8 The variation of CNC by adjusting n_1 and n_2

3.3 应用举例

为了验证基于视觉感知的去雾效果评价方法的有效性, 采用具有典型代表性的去雾算法对实际拍

摄图像进行对比性实验. 这里的代表算法包括 Tan 方法^[1]、Tarel 方法^[2] 和 He 方法^[3]. 选择 Tan 方法是因为尽管该方法可以极大地提高图像的对比度, 但其去雾图像常常颜色过于饱和且伴有光晕伪影出现, 我们希望这些因素能够反映在 CNC 综合评价指标中. 选择 Tarel 方法和 He 方法的原因: 前者是目前处理速度最快的算法之一, 而后者则被公认为当前去雾效果最好的算法之一.

图 9 (a)~(l) 分别为 3 组采用上述去雾算法处理后的复原效果示例. 可以看出, Tan 方法由于其处理结果颜色失真严重, 因而视觉效果不如其他两种方法. 对于 Tarel 方法和 He 方法而言, 依据图像的不同, 两者中的任一算法均有可能是最佳的去雾效果. 例如在图 9 (a)~(d) 和图 9 (e)~(h) 中, Tarel 方法的视觉效果好于 He 方法, 而在图 9 (i)~(l) 中可以看到 He 方法复原图像的颜色更为自然, 因而其去雾效果优于 Tarel 方法. 因此, 从人类视觉感知的角度来说, 三幅图像的最佳去雾效果分别为图 9 (c), 图 9 (g) 和图 9 (l). 这一结论在表 4 所给出的 CNC 指标数据中得到了证实, 其中越大的 CNC 值对应越好的去雾效果. 从表 4 中可以看出, 三幅图像的最佳去雾效果分别为 1.16 (Tarel 方法), 1.39 (Tarel 方法) 和 1.95 (He 方法), 以上定量评价结果与人眼视觉感知的结论相符. 而已有对比度增强评估方法^[9] 的评估结果与上述结论并不一致. 从表 5 中可以推断出, Tarel 方法和 Tan 方法的 e 和 $\bar{r}$ 值整体上大于 He 方法. 由于相比于 He 方法, Tan 方法的去雾结果明显存在过增强和颜色失真等问题, 因而该方法未能与人眼视觉感受较好匹配.

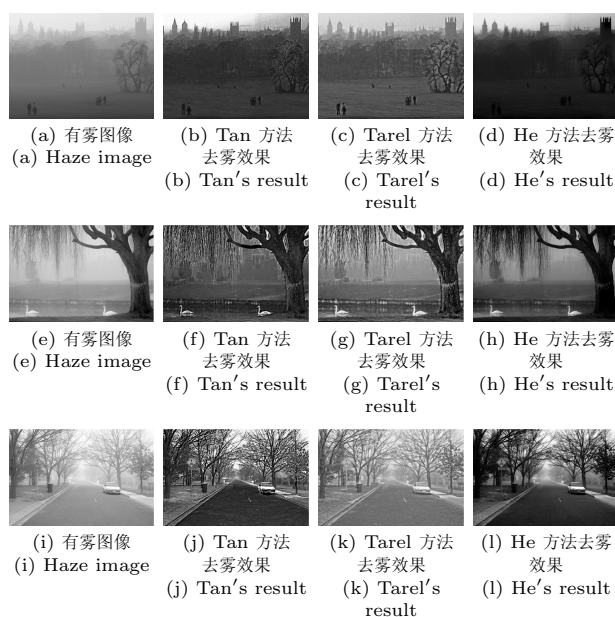


图 9 实际图像去雾效果对比

Fig. 9 Defogging effect comparison for real scene images

表 4 各去雾算法的 CNC 综合评价指标值
Table 4 CNC index computed for the three compared methods

CNC	Tan 方法	Tarel 方法	He 方法
图 9 (a)~(d)	1.13	1.16	1.06
图 9 (e)~(h)	0.94	1.39	1.26
图 9 (i)~(l)	1.49	1.21	1.95

4 实验比较与分析

为了能客观地考察本文所提两种去雾效果评价方法及模拟雾环境创建方法的有效性,考虑利用实际拍摄图像分别采用这两种方法进行统计分析,图 10 为其去雾效果对比示例. 其中,图 10 (a) 为实际拍摄的无雾图像,图 10 (d) 为同一场景的实际雾天图像. 在无雾和有雾图像同时具备的条件下,可采用求取传播图的另一种方式,即利用已有去雾算法获取其中有雾图像的传播图. 图 10 (b) 为采用禹晶等提出的去雾算法^[15] 对雾天图像(图 10 (d)) 计算得到的传播图,由此可利用式 (7) 得到变换后的传播图,并同无雾图像、求取的大气光值一起代入大气散射模型表达式,从而得到模拟雾环境图像,如图 10 (c) 所示. 图 10 (e) 和图 10 (f) 分别为采用 Tarel 方法和 He 方法对模拟雾天图像(图 10 (c)) 的去雾结果. 图 10 (g) 和图 10 (h) 则分别为两种去雾方法对实际雾天图像(图 10 (d)) 的去雾结果. 从图中可以看出,相比于 Tarel 方法,He 方法对此幅图像的处理结果整体上感觉更为自然,表 6 中评价指标 AD 和 CNC 的统计数据也都证实了这一结论. 但若采

用已有对比度增强评估方法^[9] 则得到相互矛盾的结论. 由表 7 数据可以推断,对于模拟雾环境,He 方法的去雾效果优于 Tarel 方法,而对于实际雾天图像则 Tarel 方法更优. 究其原因,主要是已有方法仅从对比度的角度衡量,而忽略了图像颜色质量等其他重要的评测因素.

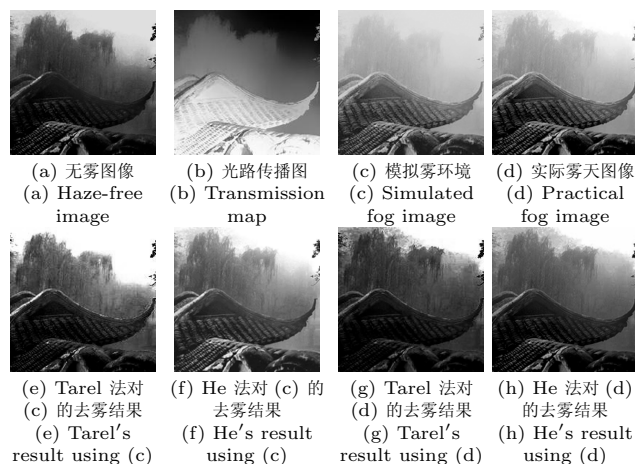


图 10 对模拟雾环境和实际雾天图像的去雾效果对比

Fig. 10 Defogging effect comparison for synthetic foggy images and real scene images

此外,本文还采用上述两种去雾算法对 300 张来自合成图库、网络数据库以及用 Canon S80 实际拍摄的不同场景、不同天气状况和不同雾化程度的测试样本进行了复原效果评价测试. 图 11 (a) 给出了对其中 150 幅图像的 AD 统计结果,图 11 (b) 为对其余 150 幅图像的 CNC 统计结果. 图 11 (a) 中“o”代表模拟雾环境,而图 11 (b) 中“o”则代表实

表 5 图 9 中各去雾图像的对比度增强评估方法结果

Table 5 Results of contrast enhancement assessment method on Fig. 9

图像编号	Tan 方法			Tarel 方法			He 方法		
	e	$\bar{r}$	σ (%)	e	$\bar{r}$	σ (%)	e	$\bar{r}$	σ (%)
图 9 (a)~(d)	10.239	2.7029	0	10.2197	3.8801	0	6.5036	1.2876	0.0139
图 9 (e)~(h)	0.6862	2.8696	0.4954	0.7392	3.0083	0.0013	0.3442	1.2023	1.5952
图 9 (i)~(l)	0.5322	3.1269	0.8492	0.785	2.0673	0	0.6589	1.6112	0.2071

表 6 采用本文所提的两种方法对 Tarel 和 He 算法的评价指标值

Table 6 Index for Tarel's and He's algorithms computed by using the proposed assessment methods

评价指标	无去雾方法 (模拟雾环境)	Tarel 方法 (模拟雾环境)	He 方法 (模拟雾环境)	Tarel 方法 (实际雾天图像)	He 方法 (实际雾天图像)
AD	73.01	45.75	22.94	20.08	15.92
CNC	—	2.52	2.74	2.59	2.78

际雾天图像. 两图的“★”均代表 He 方法的相关指标评价结果,“△”则代表 Tarel 方法的评价结果,且横轴表示评价指标值,纵轴为图像编号. 从图 11(a) 中可以看出,总体而言,He 方法的 AD 值要小于 Tarel 方法. 由于 AD 值越小对应的去雾效果越好,因此可推断 He 方法的图像清晰化效果更好. 由图 11(b) 可知,原有雾图像的 CNC 值变化范围为 0~2 之间,而 Tarel 和 He 方法的 CNC 变化范围则分别为 0.5~5.5 以及 0.5~6. 较高的 CNC 值对应较好的去雾效果,可以推断两种去雾算法均能有效地增强图像的视觉效果,且 He 方法的 CNC 值稍大于 Tarel 方法,说明相比于 Tarel 方法,He 方法的整体去雾效果稍好,这与前述 AD 评估实验的结果以及人眼视觉感知结论是相符的.

表 7 图 10 中各去雾图像的对比度增强评估方法结果
Table 7 Results of contrast enhancement assessment method on Fig. 10

评价指标	Tarel 方法		He 方法	
	模拟去雾图像	实际去雾图像	模拟去雾图像	实际去雾图像
e	0.9256	1.1460	0.4398	0.5656
$\bar{r}$	1.5789	1.0320	1.8873	0.7885
σ (%)	0.9470	1.3990	0	1.6944

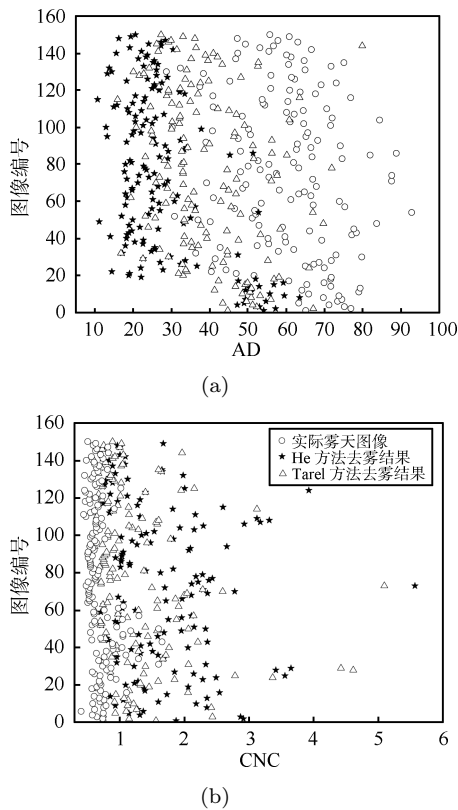


图 11 对测试图像的指标统计结果
Fig. 11 Index statistical results for test images

5 结论

图像去雾是图像处理领域的一个重要问题,尽管目前对去雾算法清晰化效果评价方法的研究还不多,但该研究对提高去雾图像的质量具有重要意义. 本文提出了两种去雾效果评价方法,即基于合成图像和基于人类视觉感知的评价方法. 这些方法针对已有评价方法的不足,分别从构建模拟雾环境和人类视觉感知的角度研究去雾效果的评价问题,从而拓展了此问题的解决途径. 在大量测试图像上的实验结果证明了本文方法的有效性和可靠性. 我们计划未来利用本评价方法实现对去雾算法相关参数的动态自适应调控,以便将静态开环的参数估计问题转化为闭环的动态参数调节问题.

致谢

感谢 Erik Matlin 和 Kaelan Yee 提供了 He 算法的源代码,感谢 Tarel 提供了其算法的 Matlab 源代码. 同时感谢 Tan 提供了相关去雾图像示例.

References

- 1 Tan R T. Visibility in bad weather from a single image. In: Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, USA: IEEE, 2008. 1–8
- 2 Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image. In: Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision. Kyoto, Japan: IEEE, 2009. 2201–2208
- 3 He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior. In: Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, USA: IEEE, 2009. 1956–1963
- 4 Chi Jian-Nan, Zhang Chuang, Zhang Zhao-Hui, Wang Zhi-Liang. Image enhancement based on anti-symmetrical biorthogonal wavelet reconstruction. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(4): 475–487
(迟健男, 张闯, 张朝晖, 王志良. 基于反对称双正交小波重构的图像增强方法. *自动化学报*, 2010, **36**(4): 475–487)
- 5 Gao Chao-Bang, Zhou Ji-Liu. Image enhancement based on quaternion fractional directional differentiation. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(2): 150–159
(高朝邦, 周激流. 基于四元数分数阶方向微分的图像增强. *自动化学报*, 2011, **37**(2): 150–159)
- 6 Zhou W, Bovik A C, Sheikh H R, Simoncelli E P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(4): 600–612

- 7 Carnec M, Le Callet P, Barba D. Objective quality assessment of color images based on a generic perceptual reduced reference. *Image Communication*, 2008, **23**(4): 239–256
- 8 Sheikh H R, Bovik A C, Cormack L. No-reference quality assessment using natural scene statistics: JPEG 2000. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(11): 1918–1927
- 9 Hautière N, Tarel J P, Aubert D, Dumont E. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges. *Image Analysis and Stereology Journal*, 2008, **27**(2): 87–95
- 10 Yu Jing, Li Da-Peng, Liao Qing-Min. Color constancy-based visibility enhancement of color images in low-light conditions. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(8): 923–931
(禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于颜色恒常性的低照度图像视觉度增强. 自动化学报, 2011, **37**(8): 923–931)
- 11 Yu Jing, Xu Dong-Bin, Liao Qing-Min. Image defogging: a survey. *Journal of Image and Graphics*, 2011, **16**(9): 1561–1576
(禹晶, 徐东彬, 廖庆敏. 图像去雾技术研究进展. 中国图象图形学报, 2011, **16**(9): 1561–1576)
- 12 Li Da-Peng, Yu Jing, Xiao Chuang-Bai. No-reference quality assessment method for defogged images. *Journal of Image and Graphics*, 2011, **16**(9): 1753–1757
(李大鹏, 禹晶, 肖创柏. 图像去雾的无参考客观质量评测方法. 中国图象图形学报, 2011, **16**(9): 1753–1757)
- 13 Yao Bo, Huang Lei, Liu Chang-Ping. Research on an objective method to compare the quality of defogged images. In: *Proceedings of Chinese Conference on Pattern Recognition*. Nanjing, China: 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. 中国模式识别会议论文集, 南京, 中国: IEEE, 2009. 1–5)
- 14 Nayar S K, Narasimhan S G. Vision in bad weather. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Computer Vision*. Kerkira, Greece: IEEE, 2002. 820–827
- 15 Yu Jing, Li Da-Peng, Liao Qing-Min. Physics-based fast single image fog removal. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(2): 143–149
(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. 自动化学报, 2011, **37**(2): 143–149)
- 16 Huang K Q, Wang Q, Wu Z Y. Natural color image enhancement and evaluation algorithm based on human visual system. *Computer Vision and Image Understanding*, 2006, **103**(1): 52–63
- 17 Xu D B, Xiao C B, Yu J. Color-preserving defog method for foggy or hazy scenes. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Computer Vision Theory and Application*. Algarve, Portugal: IEEE, 2009. 69–73



郭璠 中南大学信息科学与工程学院博士后. 主要研究方向为图像处理与虚拟现实. E-mail: guofancsu@163.com
(GUO Fan Postdoctor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. Her research interest covers image processing and virtual reality.)



蔡自兴 中南大学教授. 主要研究方向为人工智能, 智能机器人系统, 智能控制. 本文通信作者.
E-mail: zxcai@csu.edu.cn
(CAI Zi-Xing Professor at Central South University. His research interest covers artificial intelligence, intelligent robotic systems, and intelligent control. Corresponding author of this paper.)