

# 基于亮度反馈的彩色雾霾图像增强算法

何林远<sup>1,2</sup>, 毕笃彦<sup>2</sup>, 熊磊<sup>2</sup>, 南栋<sup>2</sup>, 周理<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西西安 710049; 2. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安 710038)

**摘要:** 针对目前主流去除雾霾算法采用亮度和色度分量分而治之的机制, 割裂了二者固有的相关性, 致使增强后图像质量不能两者兼顾的问题, 本文以人眼视觉特性为依据, 提出了一种亮度反馈的增强方法. 该方法首先对亮度信息进行区域适应性调整, 并对其细节和边缘进行提升, 然后将该结果纳入色度信息处理的约束条件, 较好的保持了两者间的相关性. 实验表明本文算法在去除雾霾后视觉效果优异, 具有较好的实用性和较少的计算资源消耗.

**关键词:** 图像增强; 图像去雾; 亮度反馈; 区域曝光

**中图分类号:** TP391.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2015)10-1978-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.10.015

## Color Image Haze Removal Algorithm Based on Luminance Feedback

HE Lin-yuan<sup>1,2</sup>, BI Du-yan<sup>2</sup>, XIONG Lei<sup>2</sup>, NAN Dong<sup>2</sup>, ZHOU Li<sup>2</sup>

(1. Department of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

2. Institute of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

**Abstract:** Through the analysis of the current main of dehazing algorithms, we found that they adapted the divide and conquer strategy to process the luminance and chrominance components, therefore they separated their correlation. To resolve the problem, we performed a sort of method for enhancing and combining the image based on luminance feedback through the human visual characteristics. First, it adjusted the brightness information and lifted the edges and details of original image. Moreover, it regarded the results as constraint conditions which would be used in processing chromatic component for maintain their relevance. Experiments have demonstrated that the proposed method could obtain an excellent result and provide a good practicability and take less time.

**Key words:** photographic enhancement; image dehazing; luminance feedback; zone system

## 1 引言

当前由于雾霾天气频发, 不仅影响到人们身体健康, 甚至对国家安全也构成了严重的威胁. 随着天网系统在各大城市的普及应用, 监控设备得以对城市各主干道及其角落进行全时空的信息收集监视. 但随着雾霾天气的日益频繁, 这套监控系统的效用已大打折扣. 如何在短期内解决雾霾天气下监控系统视见度能力问题, 便成为破解国家安全难题的重要之匙. 事实上, 近年来图像去雾一直是计算机视觉和图像处理领域研究的热点话题之一<sup>[1-3]</sup>, 目前, 对于此类问题的解决方案主要为两类.

(1) 基于图像复原的去雾方法. 该方法主要依赖于大气散射模型的建立, 通过分析大气粒子的散射作用对成像的影响, 依据不同方法采用不同方式借助图像本身

所包含的信息构造场景反照率和景深的约束条件, 估算大气耗散函数. 例如, Tan<sup>[4]</sup>假设图像局部邻域环境光为常数, 利用 Markov 来估计最优光照, 增强图像的对比度. 此方法虽明显改善图像的视见度, 但算法没有复原真实场景的反照率, 恢复后的颜色存在过饱和现象. Fattal<sup>[5]</sup>假设物体表面色度与介质传播具有局部统计不相关性, 利用独立成分分析来估计常向量反照率. 该算法虽取得一定效果, 但其性能主要依靠输入信号的统计特性, 独立成分变化不显著或颜色信息不足将导致统计估计不可靠. He<sup>[6]</sup>的算法从统计学角度证明自然场景条件下成像目标存在“黑体效应”, 利用黑体的吸光特性提出暗原色理论, 估计大气传输图. 该方法去雾效果自然, 颜色逼真, 但其中借助了图像抠图算法对介质传播函数进行细化, 具备很高的时空复杂度, 计算代价大<sup>[7]</sup>.

(2) 基于图像增强的去雾方法. 此类方法不以物理

模型为依据,根据视觉感受,改善图像质量,有选择地突出图像中感兴趣的特征或者抑制图像中某些不需要的特征,使图像与视觉响应特性相匹配.典型的方法有 Retinex,小波变换等方法<sup>[8]</sup>.其中,Retinex 算法作为经典的人眼视觉模型,阐述了色彩恒常性的基本原理,其多种变异算法得到了广泛应用,目前广泛采用的研究成果为 MSRRC<sup>[9]</sup>带色彩恢复的多尺度模型,虽然该方法取得了良好的动态压缩范围,但仍存在光晕和颜色失真问题,且计算量较大.小波变换种类繁多,作为分析信号频谱的利器,在图像去雾方面应用十分广泛<sup>[10]</sup>.此方法充分借鉴了小波良好的多尺度和时频局部特性,针对雾天频谱集中的特性进行处理,从而达到提高视觉的目的.虽然小波理论基础雄厚,但现有算法仍存在全局或局部对比度低、偏色等问题.

通过对掌握的现有资料研究发现,影响监控设备成像的雾霾颗粒其光学特性迥异于雾中微小水滴,不同雾霾其散射特性亦不尽相同.构建新模型时不仅要修正或彻底重写大气传递图,还需大量模拟和试验验证.显然,基于物理模型的方法不适合快速消除雾霾对国家安全的影响.与此同时,现有增强方法多基于亮度或对比度以增强图像质量,对亮度引发色度的主观视觉感知没有充分考虑,割裂了二者之间的固有属性.为此,本文提出了一种基于亮度反馈的彩色图像增强方法,在结合人眼视觉特性的基础上,以对亮度信息处理为先导,进行区域适应性调整和细节提升,并将该结果纳入到色度信息处理的约束条件,较好的保持了两者间的相关性.实现了对图像适应性的细致划分、动态拉伸的目的,取得了较好的实验效果.

## 2 人眼视觉特性基本原理

人眼近似于光学系统,但并不是普通意义上的光学系统,还受到神经系统的调节.人眼观察图像时有以下几个方面的反应特性:

(1)人眼对亮度响应具有对数非线性性质,以达到其亮度的动态范围.依靠瞳孔收缩扩张机制来控制进入人眼光通量大小,以视网膜处于激励状态下的杆状和锥状细胞的多寡来响应亮度适应性.依靠细胞在不同状态下的感知作用去分辨亮度及颜色.

(2)人眼视觉特性类似于一个多信道模型,具有多频信道分解特性.其视网膜及神经元类似于许多独立的线性带通滤波器.使图像分解成不同频段,且频段之间带宽很窄.频段越窄,分辨能力越好.

(3)光波具有三种可以量化的物理学向度,即波长、波幅和纯度.当人眼视网膜受到光的刺激时,所引起的色觉经验具有相对应的三种心理性向度,即色调、色彩亮度和饱和度.色

彩之不同,取决于光的波长,而亮度的高低则与光的波幅成正比,但也与光的波长有关.在白天,波长 550nm 左右的光最亮,而在夜晚,波长 510nm 左右的光最亮饱和度是指颜色的纯度.其饱和度越大,其色彩越鲜艳,反之,越灰暗.

## 3 本文算法

在充分对比分析大量文献后,针对既有算法割裂亮度及色度相关性的不利因素,本文在人眼视觉特性的基础上,结合雾霾图像频谱分布规律,在亮度调整及色度纠正等方面进行了深入探讨研究,提出了一种质量优异的雾霾图像增强算法.具体算法流程见图 1 所示.

### 3.1 图像色彩空间转换

RGB 表色系统为最常用的颜色模型,但 RGB 色彩空间中三分量存在一定相关性,使得解析退化图像过程中无法统计亮度与色彩各自的缺失特征.据此,根据人眼视觉特性及解决问题需要,从雾霾图像退化的几个基本点出发,本算法采用 HSI 空间表征色彩特性,大大简化图像分析和处理的工作量,细分了雾霾对图像影响的几个因素.

### 3.2 亮度图像处理方案

辐射波穿过大气时,由于雾霾对电磁波谱的过滤作用,使得某些波段太阳辐射穿透力和强度衰减严重,引起大气透射比降低,形成近似全反射现象,造成了视线模糊.通过对比研究大量图像发现,同一景物由于上述作用影响,目标固有亮度削弱,背景亮度逐渐增强,整体灰度级提升较快,继而导致图像发白,掩盖了真实场景信息.基于此,根据人眼视觉特性,本算法对亮度图像通过模拟瞳孔对光通量自适应调节机制,进行调整拉伸,找出最优灰度调整方案,提升景物真实亮度特征.具体做法为:

(1)统计亮度图像中各像素点光强大小.根据液晶显示器光强分配原理,利用式(2)将光强分为  $r$  等级.假定最高亮度等级为  $I_n$ ,最低等级为  $I_0$ ,任意等级  $I_j$  如式(3)所示,令最高强度为 1,则比值  $r$  可用式(4)表示.显示器  $I_0$  取值范围一般在 0.005 ~ 0.025 之间,对灰度级为 8 位 ( $n = 256$ ),  $I_0 = 0.01$  的显示器,  $r = 1.0182$ ,从而求得 256 灰度级的光强为 0.0100, 0.0102, 0.0104, ..., 0.9821, 1.0000.

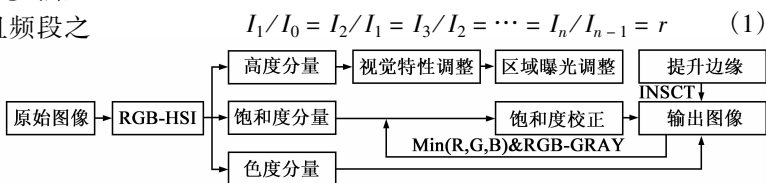


图1 本文增强算法框架

$$I_j = r^j I_0 \quad (2)$$

$$r = (1/I_0)^{1/n} \quad (3)$$

(2)由步骤 1 可知各像素点光强大小,根据式(5)和(6)得知,光强是光通量在空间的密度分布,对于单个像素点而言,光通量近似于光强在该点的值,即进入瞳孔的光通量为各像素点的光强值.

$$\Phi = K_m \int \Phi_{E,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$I = d\Phi/d\omega \quad (5)$$

(3)根据人眼视觉注意机制原理,当场景中某一空域具备视觉显著性时,人眼视觉系统随之发生眼动跟随,继而开启瞳孔自适应调节功能,产生相应光通量以聚焦锁定物体.针对雾霾图像模糊不清,灰度级较高的特点,本算法以亮度显著性为突破点,寻找光通量基准值,动态调整雾霾条件下进入瞳孔光通量的大小.根据韦伯-费希纳定律<sup>[11]</sup>,人眼亮度感觉与实际亮度成对数关系,如式(7)所示. $B$ 表示实际亮度, $S$ 表示感觉亮度, $k$ 及 $k_0$ 为常数.根据式(1)将实际亮度转化为感觉亮度.此外,由于人眼中存在同时对比效应,使得人眼对某个区域的亮度感觉不仅与本身有关,还与周边背景亮度有关<sup>[12]</sup>.求解时,选取中心-周边二者差值最大的亮度为显著度基准,动态调整亮度范围.本文中,选取 $3 \times 3$ 邻域 $I_{ij}$ 为自身感觉亮度,扩展的 $5 \times 5$ 与 $3 \times 3$ 邻域之差 $I_{xy}$ 为周边亮度,由于亮度模型具有线性伸缩性,自身与周边亮度感知差与亮度欧式距离成正比,利用式(8)求解人眼视觉感知系统分辨两像素点间的差异, $Ed$ 代表两像素间的欧式距离.由于人眼视觉符合对数特性,利用式(9)求解差异复杂度,其中 14 为常数.通过式(10)及(11)对复杂度进行高斯归一化.差值最大者即为区域亮度显著性最大的灰度值.其中,复杂度表示人眼视觉系统对像素点的敏感程度, $G_a$ 为高斯权值,复杂度越大,说明邻近区域有着更大的亮度变化;反之,复杂度越小,邻近区域-内变化更小,该邻近区域内的像素点相似度很大.

$$S = k \cdot \ln B + K_0 \quad (6)$$

$$Ed(I(i,j), I(x,y)) = [(I_{ij} - I_{xy})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$D(I(i,j), I(x,y)) = 1 - \exp[-Ed(I(i,j), I(x,y))/14] \quad (8)$$

$$\phi(x,y) = \sum_{x,y \in \Omega} G_a [1 - \exp[-Ed(I(i,j), I(x,y))/14]] \quad (9)$$

$$\gamma(x,y) = k \cdot \exp\left(-\frac{1}{\sigma^2} \left[ \frac{\phi(x,y) - u(\phi(x,y))}{\sum_{x,y \in \Omega} \phi(x,y)} \right]^2\right) \quad (10)$$

$$x'_{ij} = \begin{cases} 2.5 \cdot 24 - |x_{ij} - \bar{x}_{3,3}|, & x_{ij} < \bar{x}_{3,3} \\ 2.5 \cdot 24, & x_{ij} = \bar{x}_{3,3} \\ 2.5 \cdot 24 + |x_{ij} - \bar{x}_{3,3}|, & x_{ij} > \bar{x}_{3,3} \end{cases} \quad (11)$$

(4)按照亚当斯区域曝光理论<sup>[9]</sup>(The Zone System),黑白照片的灰调可用分区标尺表示,如图 2 所示.由 0-10 区域组成.由于光强与灰度存在相互对应关系,按照平均法对所有像素点亮度所对应的灰度值划分为 11 个区,每区为 $256/11 = 24$ 个像素点.其中,5 区为中性灰(18%灰);3 区代表有细节明影部分,7 区则是有细节强光部分.按照曝光调整核心理论,本算法以区域亮度显著性最大的灰度值为中性灰(参考点),进行灰度整合拉伸(白加黑减).具体如式(12)所示.其主要意义为当像素点灰度值小于显著性最大的灰度值时,更新后的像素灰度值 $x'_{ij}$ 为参考点减少 2.5 区后灰度值减去二者差值(黑减);当像素点灰度值大于显著性最大的灰度值时,更新后像素灰度值为参考点减少 2.5 区后的灰度值加上二者的差值(白加).通过灰度的增减实现曝光的调整,继而控制全域内光通量的大小,还原真实景物的亮度信息.



图2 分区标尺图

$$S = \frac{1 - \min(R, G, B)}{I'} \quad (12)$$

(5)针对雾霾图像细节及边缘图像质量不高的特点,通过对人眼视觉多频信道分解特性的分析,本算法采用 NSCT<sup>[13]</sup>变换提取图像高频特征以提升亮度图像质量.采用 NSCT 主要有以下两点好处:①由于采用了非下采样方式,保留了更大的冗余度使图像经 NSCT 变换后得到的各个子带中视觉特征和信息更加完整<sup>[14]</sup>,增强后的图像细节更加突出;②根据多抽样理论,NSCT 低频子带不产生频谱混叠现象,有更强的方向选择性,边缘特征更为明显;具体结构如图 3 所示<sup>[15]</sup>.

(6)将通过变换后的多特征加权系数施以反变换,得到具备更多细节的亮度图像,为下一步对色度分量处理做准备.

### 3.3 视觉特性的色度调整方案

根据颜色恒常性理论,物体本征颜色由自身反射属性决定,与外界条件无关.因此对图像色度调整时色调分量不做处理,主要对饱和度增强以减少灰度效应.然而在图 4 所示模型中,发现同一锥面内,相同色调下,饱和度不同的两点 $S_1$ 和 $S_2$ 具有相同亮度( $I$ 值相等),与式(1)根据饱和度和 $S$ 和亮度 $I$ 推导后的结果 $S = 1 - \min(R, G, B)/I$ 相悖.究其根本原因,是由于式(1)中亮度 $I$ 实为彩色图像的明度 $I'$ ,最终公式应为式(13)所示.

$$S(I(i,j)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(I(i,j)-u)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (13)$$

分析 HSI 模型,发现主要原因如下:

(1)模型由上下两个圆锥组成,锥顶为白色,锥底为黑色,锥轴为亮度  $I$ ,两圆锥交界处为中性灰.圆锥截面圆为色调轮盘  $H$ ,色轮半径为饱和度  $S$ ,根据载色原理,当亮度  $I$  适中时,载色能力最强,当亮度变为黑或是白时,饱和度最小.即中性灰色轮半径最大,饱和度  $S$  受亮度  $I$  的影响向两端逐次递减.

(2)上锥体中,可看成由多个空心锥体层层相套而成,每个锥体外表面各点明度值  $I'$  相等(实际上,受人

眼视觉视敏度影响,色度为黄色明度值最大,本算法中,不考虑此类影响).当颜色点沿同一锥面向上移动时明度值  $I'$  保持不变,而亮度  $I$  增加致使  $\min(R, G, B)$  增加,从而饱和度  $S$  减小,符合式(1)中推导的结论.

(3)下锥体中,任意圆形剖面同心圆各圆周上明度值  $I'$  保持不变.不同剖面中,明度值向下递减.当颜色点沿同一锥面向下移动时,亮度  $I$  减小致使  $\min(R, G, B)$  减小,明度  $I'$  减小,从而饱和度  $S$  减小,符合式(1)推导的结论.

(4)同剖面中,明度值  $I'$  由圆周到圆心递减,亮度  $I$  不变使  $\min(R, G, B)$  不变,从而饱和度  $S$  减小,符合式(1)中推导的结论.

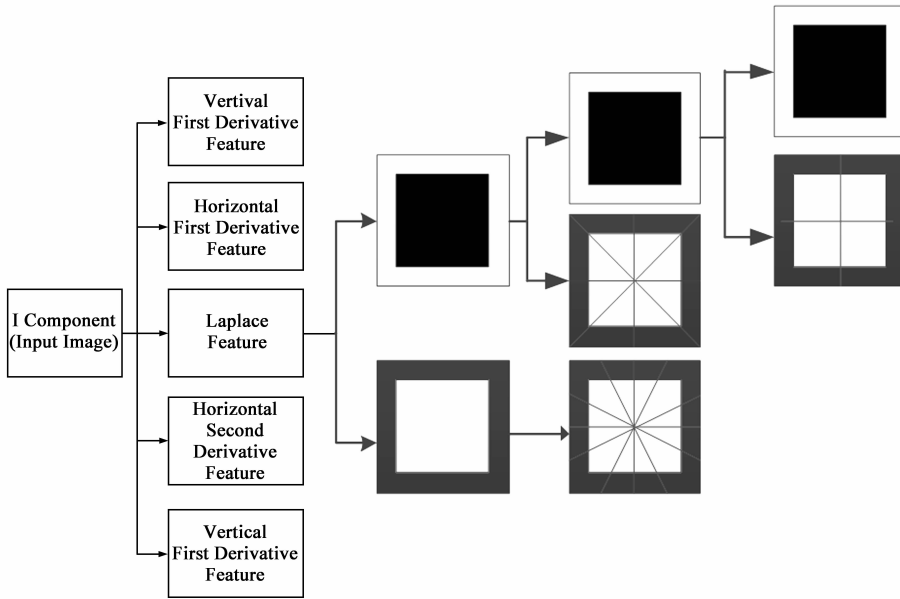


图3 改进后NSCT结构图

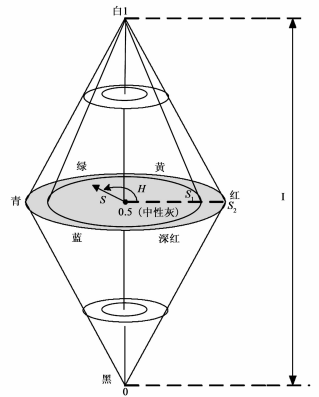


图4 HSI结构图

由以上分析及式(14)可知,明度  $I'$  与饱和度  $S$  和亮度有关,是一个综合反映亮度和饱和度的指标.故不同亮度情况下,饱和度增强必须采用不同阈值拟合达到最佳视觉识别效果,提高颜色的明度,确保图像颜色鲜艳,不会出现偏色失真现象.

$$S = \begin{cases} S_{il}, & s \in [0, 0.25) \\ S_l, & s \in [0.25, 0.5) \\ S_h, & s \in [0.5, 0.75) \\ S_{ih}, & s \in [0.75, 1] \end{cases} \quad (14)$$

故在调整饱和度时,应求解某点亮度值对应的最大明度值.即为色彩最好,饱和度最适中的值.按照以下方式进行处理.

(1)将灰度矩阵及  $\min(R, G, B)$  矩阵保存,根据式(13)得  $I' = \min(R, G, B)/(1 - S)$ ,因为某点亮度值所对应该点  $\min(R, G, B)$  已知,此时某亮度下最大明度值为饱和度  $S$  最大时的值.

(2)根据对图4解析,发现 HSI 模型为两相同圆锥复合而成.当亮度取 0 或 1 时,饱和度可取最小值,当亮度取中间值 0.5 时,饱和度可取最大值.故可认为饱和度最大值与亮度呈正态分布关系.考虑到色彩饱和度的局部相关性,选取  $3 \times 3$  邻域内像素亮度值的关系作为基准,根据式(14)计算该点的饱和度值.通过对饱和度值划分四个区域<sup>[16]</sup>,如式(15)所示,利用式(16)统计该邻域内饱和度的差异性.计算各个区域内像素所占的比例系数.

$$S_{il} = N_{il}/N_{3,3}, S_l = N_l/N_{3,3}, S_h = N_h/N_{3,3}, S_{ih} = N_{ih}/N_{3,3} \quad (15)$$

$$\alpha = -0.40S_{ih} - 0.12S_h + 0.19S_l + 0.83S_{il} \quad (16)$$

(3)按照饱和度比例系数,通过下面经验式(17)得到

$$\Delta S = -4.427 \cdot \alpha + 3.354 \quad (17)$$

(4)根据步骤 1,若调整的饱和度大于该灰度值的

最大饱和度,则以该灰度值最大饱和度的 0.75 倍为该点饱和度.

$$S' = \begin{cases} S + \Delta S, & S' \leq S(I(i, j)) \\ 0.75 \max S(i, j), & S' > S(I(i, j)) \end{cases} \quad (18)$$

经本算法得到的纠正饱和度对图像颜色分布描述更准确,速度更快,一定程度上解决了色彩失真的问题,使得校正后的饱和度分布更接近人主观视觉感知.

## 4 实验结果及分析

为验证算法效能,在 Windows7、i5-3210M 双核 2.5GHz、4GB 内存的 PC 机上用 VC2010 对比分析本算法与两类经典解法在响应速度及视觉质量方面的优劣.从图 5 可明显看到,本文方法比 He 及 MSRCR 算法恢复的结果更自然真实,色彩更加艳丽,符合人眼视觉需要.其主要原因是由于 He 算法采用大气光模型建立求解方程,从图 5(c)中明显看出不同雾霾条件下,求解大

气光方法鲁棒性较差,跟随性能不好. MSRCR 算法则由于采用太多参数控制,致使计算时间冗长,且图像细节存在扭曲,并伴有伪影效应.而本文算法通过亮度反馈融合处理机制,在计算简便的同时,较好地解决了上述难题,不仅能够提升不同雾霾背景下图像的辨识度,更使亮度及色度达到均衡统一,获得了较理想的结果.此外,本文采用均值、方差、香农熵、平均梯度及边缘强度作为客观评价指标,从表 1、2 中可明显看出,利用本文方法得到的复原结果明显优于这两类算法的复原结果,与主观评价一致.

表 1 对图 5 各种算法处理时间统计

	HE 算法	MSRCR 算法	本文算法
图 5(a)	321ms	10296ms	202ms
图 5(b)	1001ms	29437ms	479ms
图 5(c)	138ms	2834ms	58ms
图 5(d)	105ms	2652ms	53ms

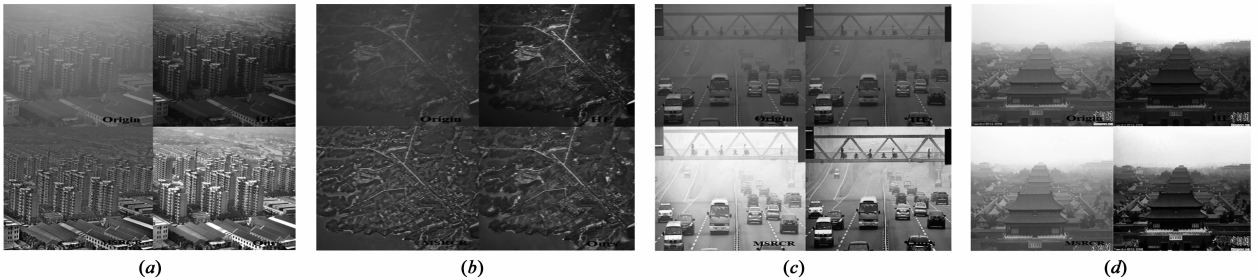


图 5 实验效果对比图

表 2 对图 5(a)、(c)客观评价结果

	均值	方差	熵	梯度	边缘强度		均值	方差	熵	梯度	边缘强度
5(a)	136.753	22.8200	11.8596	2.0869	19.643	5(c)	102.429	53.5287	11.8117	2.1908	22.6588
HE	82.8136	41.1488	14.7591	5.4845	51.337	HE	99.985	55.3603	12.5822	2.5570	26.4119
MSRCR	107.581	34.6524	14.4765	13.344	117.22	MSRCR	190.36	51.3483	14.6977	4.5324	47.1107
本文	138.523	50.9976	16.8896	11.6443	109.28	本文	143.65	55.1826	16.1567	7.0422	72.4603

## 5 总结与展望

本文提出了一种基于亮度反馈的彩色图像增强算法,该算法在充分分析人眼视觉机制的基础上,将亮度纳入到对色度处理的约束条件上,取得了较好的结果;具备一定的实用参考价值.但本算法没有对原始数据的先验知识进行训练学习,对物理成因没有进行详细的分析,使得图像在局部会有失真现象产生,此类问题将是下一步工作的重点方向.

### 参考文献

- [1] Jiao Long, et al. Single remote sensing image dehazing[J]. IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters, 2014, 11(1): 59-63.
- [2] Codruta Orniana Ancuti, et al. Single image dehazing by multi-

scale fusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(8): 3271-3282.

- [3] John Y Chiang, et al. Underwater image enhancement by wavelength compensation and dehazing[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1756-1769.
- [4] R Tan. Visibility in bad weather from a single image[A]. Proceedings of IECVPR[C]. Anchorage, Alaska: IEEE Computer Society, 2008. 1-8.
- [5] R Fattal. Single image dehazing[J]. Proceedings of SIGGRAPH, 2008, 27(3): 1-9.
- [6] K He, J Sun, X Tang. Single image haze removal using dark channel prior[A]. Proceedings of 27th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. CVPR: IEEE, 2009. 1956-1963.
- [7] 褚宏莉,等.基于黑色通道的图像快速去雾优化算法[J].电子学报, 2013, 41(4): 791-797.

- Chu Hong-li, et al. Optimized fast dehazing method based on dark channel prior[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 791 – 797. (in Chinese)
- [8] 汪荣贵, 等. 基于暗原色先验模型的 Retinex 算法[J]. 电子学报, 2013, 41(6): 1188 – 1192.
- Wang Ronggui, et al. A novel retinex algorithm based on dark channel prior model[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 1188 – 1192. (in Chinese)
- [9] 周树道, 等. 基于亮度小波变换和颜色改善的彩色图像去雾研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(4): 59 – 62.
- Zhou Shudao, et al. Color image defogging based on intensity wavelet transform and color improvement [J]. Journal of Haerbin University of Science and Technology, 2011, 16(4): 59 – 62. (in Chinese)
- [10] 杨杨, 等. 基于彩色空间视觉相似分解的图像质量评价方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(7): 547 – 553.
- Yang Yang, et al. Image quality assessment based on color space visual similarity decomposition[J]. Journal of University of Science and Technology China, 2013, 43(7): 547 – 553. (in Chinese)
- [11] 钱小亮, 等. 视觉显著性检测: 一种融合长期和短期特征的信息论算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(7): 1637 – 1643.
- Qian Xiaoliang, et al. Visual saliency detection: An information theoretic algorithm combined long term with short term features[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2013, 35(7): 1637 – 1643. (in Chinese)
- [12] Glenn Rand. Film & Digital Techniques for Zone System Photography[M]. Glenn Rand: Amherst Media, 2008.
- [13] 程倩倩, 等. 基于自类推的 NSCT 域单幅图像超分辨率重建[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2281 – 2287.
- Cheng Qianqian, et al. NSCT domain single image super resolution[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(12): 2281 – 2287. (in Chinese)
- [14] 刘斌, 等. 基于采样二通道不可分小波的多光谱图像融合[J]. 电子学报, 2013, 41(4): 710 – 716.
- Liu Bin, et al. Multi-spectral image fusion method based on sampled two channel non-separable wavelets[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 710 – 716. (in Chinese)
- [15] 吴炜, 等. 基于学习的图像增强技术[M]. 陕西西安: 西安电子科技大学出版社, 2013. 104 – 113.
- Wu Wei, et al. Learning Based Image Enhancement[M]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an Electronic and Science University Press, 2013. 104 – 113. (in Chinese)
- [16] 杨传慧, 等. 基于分块加权颜色直方图的图像聚类算法研究[J]. 南京师范大学学报, 2013, 13(1): 40 – 44.
- Yang Chuan-hui, et al. Research on image clustering algorithm based on block weighted color histogram[J]. Journal of Nanjing Normal University, 2013, 13(1): 40 – 44. (in Chinese)

#### 作者简介



何林远 男, 1983 年生, 河南洛阳人, 博士生、讲师, 研究方向为图像处理与计算机视觉。  
E-mail: hal1983@163.com



毕笃彦 男, 1962 年生, 陕西扶风人, 教授、博士生导师, 研究方向为图像处理与模式识别。  
E-mail: biduyan@163.com