

文章编号 1004-924X(2015)05-1466-08

## 融合变分偏微分方程的单幅彩色图像去雾

周 理\*, 毕笃彦, 何林远

(空军工程大学 航空航天工程学院 通信导航教研室, 陕西 西安 710038)

**摘要:**对单幅雾霾图像的图像处理问题进行了分析。鉴于现有方法不能很好恢复场景深度变化较大的图像,本文融合大气衰减模型与变分偏微分方程,提出了一种单幅彩色图像去雾算法。该算法利用数学形态学中的中值集算子构造局部白平衡处理,精确估计大气光参数。设计了一种全新的平滑性度量范数,尝试从全变分的角度建立目标图像的变分能量模型,继而通过偏微分方程将其转化为欧拉-拉格朗日方程。最后,利用交替半二次型算法求解欧拉-拉格朗日方程,以提升算法流程的整体运行速度,使其可维持在 105 ms 左右。以图像熵和平均梯度为图像质量评价指标进行了仿真实验,结果表明,本文算法使评价指标提升达 60%,而对照组则均保持在 15%至 30%左右。该算法对于场景深度变化较大的图像的局部区域恢复效果明显,可以满足应用要求。

**关键词:**彩色图像;图像去雾;中值集算子;变分偏微分方程;平滑性度量范数;交替半二次型法

**中图分类号:**TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1466

### Single color image dehazing using variational partial differential equation

ZHOU Li\*, BI Du-yan, HE Lin-yuan

(Communication and Navigation Laboratory, School of Aeronautic and Astronautic Engineering,  
Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhouli\_5120801@163.com

**Abstract:** Imaging processing for single color hazing images was researched. Since the current methods could not recover the kind of images with the scene depth changing fiercely, a single color image dehazing algorithm was introduced on the basis of the atmosphere attenuate model and the variational partial differential equation. In this method, the median set operator in morphology was used to construct local white balance operator and to estimate the atmospherical optical parameters precisely. Then, a novel smoothness measure norm was designed to build up a variational energy model of the target image based on the total variation theory. In addition, the model was converted from partial differential equation into the Euler-Lagrange equation. Finally, the alternate semi-quadratic algorithm was used to solve the Euler-Lagrange equation, by which the operation speed of the algorithm was improved to be at 105 ms. The means of image entropy and average gradient were taken as the evaluation indexes, and simulation results show that proposed method triggers an increase by 60% in operation performance while other control groups keep the improvement in 15% to 30%. This method improves the local region obviously and reaches the application requirement.

**Key words:** color image; image dehazing; median set; variational partial differential equation; smoothness measure norm; alternate semi-quadratic algorithm

收稿日期:2014-11-25;修订日期:2014-12-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61372167)

## 1 引言

笼罩全国的雾霾不仅危害人类身体健康,还对国家安全构成威胁。因为摄像头无法穿透厚厚的颗粒层实施监控,覆盖各重点地区的监控系统的效用大打折扣。因此,开展雾霾天气下提高监控系统可视能力的研究对于提升国家安全系数具有重要意义。在图像处理领域中,单幅图像去雾技术引起了国内外计算机视觉领域众多学者的关注,并取得了富有指导意义的研究成果<sup>[1-4]</sup>。目前,单幅雾霾图像去雾问题的技术方案可简单总结为两类。其中一类是基于图像增强技术的去雾方法,代表算法有直方图均衡算法<sup>[5]</sup>与 Retinex 算法<sup>[6]</sup>。此类方法的突出特点是不以物理模型为基础,仅依据人眼视觉感受有选择地增强图像中人眼感兴趣的特征,使图像与视觉响应特性相匹配,从而改善图像质量。另一类是基于图像复原技术的去雾方法,例如 Fattal<sup>[7]</sup>以及 He<sup>[8]</sup>等经典算法。该类方法以大气散射模型为基础,通过研究大气粒子的散射作用对成像的影响,构造关于图像自身信息的约束条件,将其纳入去雾框架中估算大气耗散函数,进而获取去雾图像。

目前去雾相关文献表明<sup>[9-10]</sup>,基于图像增强技术的去雾方法由于没有研究雾对光线的物理特性,仅增强了图像对比度与饱和度,故容易出现伪边缘和色彩失真。考虑基于图像增强技术的方法尚不能满足雾霾消除的鲁棒性要求,目前,寻求建立大气衰减模型约束的图像增强类去雾技术成为研究者解决图像雾霾退化问题的首选方案。其中,Fattal 算法基于图像反照率的反射常量与大气耗散函数之间统计无关的假设,将大气衰减模型方程置于独立主成分分析法与高斯-马尔科夫随机场中求解。该方法虽然改善了图像的视见度,但当独立成分变化不显著或者图像颜色信息不充分时都会使结果存在颜色失真和局部光晕现象。而 He 的算法先使用暗通道图像先验弱化大气衰减方程的未知量,再采用软抠图的方法求解出最终的去雾效果图。该算法思路简单,先验可靠,但采用软抠图算法用于细化大气耗散函数并不合理,景深不连续边缘处的颜色容易产生对冲失真。变分偏微分方程方法在图像去噪、图像复原等应用中取得了不错的效果,它借助能量泛函的概念描述实际问题,然后将其转化为欧拉-拉格朗日方程求解,思路清晰,兼容性强。鉴于以上分析,在考虑雾霾图像物理特性的基础上,依据大气

衰减模型与变分偏微分方程,本文提出一种基于变分偏微分方程的单幅雾霾彩色图像去雾算法。首先利用中值集算子进行局部白平衡操作,以提高大气光估计的精确度;然后将结果纳入由变分法构建的能量泛函目标函数中;最后采用交替半二次型法求解欧拉-拉格朗日方程,取得了较好的结果。

## 2 大气衰减模型

大气中悬浮的粒子主要有空气分子,水汽和气溶胶三种。这些粒子使得成像设备所形成的图像质量严重退化,其退化程度与大气粒子的大小、形状密切相关。空气悬浮颗粒的成份与天气状况有关:晴天天气下,空气中的粒子主要由空气分子组成,空气分子非常微小,光消特性也非常小,从而可以忽略其影响;而在雾霾天气下,空气中悬浮了大量的水滴、气溶胶,它们的半径和密度比较大,对光的散射作用可导致所获取的图像亮度和对比度大幅度下降,因而不可忽略它的影响。随着粒子半径的增大,这种散射作用也增大,对图像造成的退化也随之加剧。雾霾退化机理如图 1 所示。由图 1 可知,成像设备捕获图像时,到达成像设备的光主要由两部分组成:其一为场景表面的反射光,由于空气中微小粒子的散射作用,这部分光会衰减一部分,未被衰减部分到达成像设备;其二为由于微小粒子的散射作用而进入成像设备参与成像的环境光。

Narasimhan 和 Nayar 基于 McCartney 的衰减模型和环境光模型,提出了单色大气散射模型 (Monochromic Atmospheric Scattering Model, MASM)<sup>[11]</sup>,用以描述雾、霾天气条件下的退化过程。近年来几乎所有的基于图像复原方法的图像去雾技术都是基于 MASM 模型展开的研究,其数学表达为:

$$I = t \cdot J + (1 - t)A, \quad (1)$$

式中:第一项为直接衰减项,第二项为大气衰减项。 $I$  为产生的退化图像, $J$  代表图像的本来面貌, $t$  为大气传输函数, $A$  为大气光强度。各类基于模型的去雾算法的目的就是利用上述公式,以及已知的参数或假设得到  $J(x, y)$ ,但该式求解的未知数个数大于方程数,属于一个病态方程。

式中第一项主要考虑了场景介质直接导致的衰减对场景反照率的影响,未考虑其对比度的下降;第二项主要考虑了大气光对成像的影响,它只考虑了主动光,并未考虑经大气折射、散射和反射而进入成像系统的被动光。

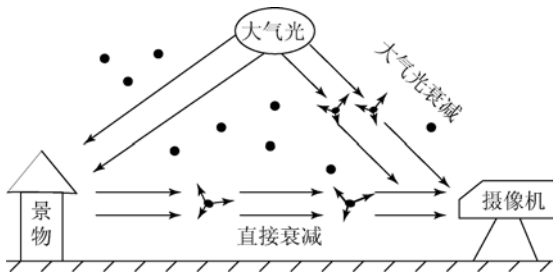


图 1 雾霾退化机理

Fig. 1 Haze degeneration mechanism

### 3 去雾算法

变分偏微分方程试图寻求新的能量泛函形式,用不同空间来刻画图像中的不同内容,争取更理想的处理效果<sup>[12-13]</sup>。通常,由于利用大气信息或场景深度条件复原雾天图像的方法不能局部修正恢复结果,所以对于场景深度变化较大的图像,部分区域的对比度仍然比较低,不能很好地满足应用要求。因此对于该类雾天图像,可借助雾霾退化模型建立户外图像去雾的能量最优化模型,推导相应的包含图像场景反照率和大气耗散函数的偏微分方程,构造去雾平台。

#### 3.1 局部白平衡处理

大气光  $A$  的准确性对于求解大气衰减模型具有重要意义,而目前较多文献将图像中像素值最大的点近似为大气光。这种方法突出的缺点就是容易被背景中泛白的物体块干扰,鉴于此,本文尝试采用数学形态学中的中值集算子进行局部白平衡处理。

中值集算子的定义为<sup>[14]</sup>:

$$m_B(I) = \{(x, y), \text{meas}(B_{xy} \cap I) \geq \frac{1}{2} \text{meas}(B)\}, \quad (2)$$

式中:  $\text{meas}()$  表示测度,对于二维图像  $I$  而言,可视为 8 邻域像素值的平均值。 $B$  表示选择的结构元素,  $B_{xy}$  表示以像素  $(x, y)$  为中心的结构元素。首先,采用中值集算子筛选出图像  $I$  中颜色偏亮的像素;然后,将该集合归一化,设置参数  $\alpha$  以控制平衡化的程度;最后,将  $I_2$  的平均值作为参考,对集合中的像素进行局部的白平衡操作,并将它们与集合外的像素融合以得到平衡后的结果。具体处理过程如下:

$$\begin{cases} I_1 = m_B(I) \\ I_2 = (I_1 / \text{mean}(I_1))^\alpha \\ I_3 = I_2 / \text{mean}(I_2) + I - I_1 \end{cases} \quad (3)$$

这里,  $\alpha$  是介于 0 与 1 之间的数值,当  $\alpha$  为 0 时,整个过程就是全局白平衡;当  $\alpha$  为 1 时,图像的颜色几乎全部被去除。本文通过实验分析,设定  $\alpha$  为 0.65。

#### 3.2 变分能量模型

鉴于大气光  $A$  采用相关文献的方法获取,且为全局常量,本文对大气衰减模型进行了适当变形,即:

$$I - A = t(J - A). \quad (4)$$

考虑到在自然环境下采集的图像含有背景噪声,对上述模型附加了噪声项,这里假定该噪声服从高斯分布,即:

$$I_A = tJ_A + n, \quad (5)$$

式中:  $I_A = I - A$ ,  $J_A = J - A$ 。利用全变分方法,建立图像变分能量模型如下:

$$E(t, J_A) = \int_{\Omega} \rho(|\nabla J_A|) dx + \frac{\lambda}{2} \int_{\Omega} (I_A - tJ_A)^2 dx + \int_{\Omega} \rho(|\nabla t|) dx + \frac{\gamma}{2} \int_{\Omega} (t - \tilde{t})^2 dx. \quad (6)$$

其中:  $\tilde{t}$  是参数  $t$  的初始值,可以借助暗通道先验获取;  $\lambda$  与  $\gamma$  是调节参数;  $\int_{\Omega} \rho(|\nabla J_A|) dx$  与  $\int_{\Omega} \rho(|\nabla t|) dx$  是正则项,主要用于保证  $I_A(x)$  与  $J_A(x)$  的平滑部分;  $\rho(\cdot)$  是平滑性度量范数,后面将讨论如何选取;而  $\int_{\Omega} (I_A - tJ_A)^2 dx$  与  $\int_{\Omega} (t - \tilde{t})^2 dx$  是保真项,用于保证  $t(x)$  趋近于  $\tilde{t}(x)$ ,且噪声  $n$  的二次范数尽可能小。

#### 3.3 关于平滑性度量范数的设计

从现有的文献可知<sup>[15-16]</sup>,采用二次范数  $L^2$  不会产生分片常数现象,但会导致图像边缘的模糊化,而一次范数  $L^1$  相对于  $L^2$  的优势主要体现在它具有更强的保护边缘的能力,但会产生分片常数现象,这种分片常数现象对于图像特征提取、目标检测等应用而言,并不构成严重威胁,但是在视觉上仍是不能满足需求。因此,平滑性度量范数  $\rho(\cdot)$  的选择至关重要。于是,本文尝试将这两种平滑性度量结合起来,形成一种混合测度,采用的范数在强边缘外接近于一次,而在平坦区,则接近于二次。可用数学语言将其描述为以下两组条件:

(a) 若在平坦区,希望扩散过程在图像边缘的法向  $\xi$  与平行方向  $\eta$  以相同速率进行,近似于线性扩散行为,那么有:

$$g(x) = \frac{\rho'(x)}{x} \xrightarrow{x \rightarrow 0} \alpha, \quad (7)$$

$$g'(x) = \frac{\rho''(x)x - \rho'(x)}{x^2} \xrightarrow{x \rightarrow 0} 0. \quad (8)$$

由式(7)与式(8)可以推出:

当  $x \rightarrow 0$ ,

$$\rho(x) \rightarrow \alpha x^2. \quad (9)$$

(b)若在边缘附近,扩散仅在  $\eta$  方向进行,那么有:

$$g(x) = \frac{\rho'(x)}{x} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} 0, \quad (10)$$

$$\rho''(x) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} 0. \quad (11)$$

由式(10)与式(11)可以推出:

当  $x \rightarrow \infty$ ,

$$\frac{\rho''(x)}{\rho'(x)/x} \rightarrow \beta \leq 0. \quad (12)$$

根据上述两组条件,设计如下函数形式:

$$\rho(x) = \frac{\sqrt{1+x^2}-1}{1+x^2}. \quad (13)$$

对设计好的平滑性度量范数进行验证,具体过程如下:

在  $x=0$  点对上式作泰勒展开式,可得:

$$\rho(x) \approx -\frac{1}{2}x^2. \quad (14)$$

可见该范数符合式(9)的要求。再由:

$$\frac{\rho''(x)}{\rho'(x)/x} = 1 + \frac{\frac{1}{x^2} - \frac{\sqrt{1+x^2}}{2x^2} - 7 + 4\sqrt{\frac{1}{x^2} + 1}}{\left[2 - \sqrt{\frac{1}{x^2} + 1}\right] \left[\frac{1}{x^2} + 1\right]} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} -2. \quad (15)$$

可见本文设计的平滑性度量范数还符合式(12)的要求。将设计好的  $\rho(x)$  带入原变分能量模型中,可得:

$$E(t, J_A) = \int_{\Omega} \frac{\sqrt{1+|\nabla J_A|^2}-1}{1+|\nabla J_A|^2} dx + \frac{\lambda}{2} \int_{\Omega} (I_A - tJ_A)^2 dx + \int_{\Omega} \frac{\sqrt{1+|\nabla t|^2}-1}{1+|\nabla t|^2} dx + \frac{\gamma}{2} \int_{\Omega} (t - \tilde{t})^2 dx. \quad (16)$$

### 3.4 能量最小化

为了将  $E(t, J_1)$  能量最小化,计算其相应的欧拉-拉格朗日方程,可得:

$$-\operatorname{div} \left[ \frac{\sqrt{1+|\nabla J_A|^2}-1}{(1+|\nabla J_A|^2)|\nabla J_A|} \nabla J_A \right] + \lambda(I_A - tJ_A)(-t) = 0, \quad (17)$$

$$-\operatorname{div} \left[ \frac{\sqrt{1+|\nabla t|^2}-1}{(1+|\nabla t|^2)|\nabla t|} \nabla t \right] + \gamma(t - \tilde{t}) + \lambda(I_A - tJ_A)(-J_A) = 0. \quad (18)$$

采用交替半二次型算法计算式(17)与式(18),进而得到近似数值解:

(1)初始化:  $n=0, J_A^0=0, t^0=\tilde{t}$ ;

(2)迭代:

①求解如下两方程组得到  $J_A^{n+1}$  与  $t^{n+1}$ :

$$\begin{cases} a^n = \frac{\sqrt{1+|\nabla J_A^n|^2}-1}{(1+|\nabla J_A^n|^2)|\nabla J_A^n|}, \\ b^n = \frac{\sqrt{1+|\nabla t^n|^2}-1}{(1+|\nabla t^n|^2)|\nabla t^n|}, \\ \begin{cases} -\operatorname{div}(a^n \nabla J_A^{n+1}) + \lambda(I_A - tJ_A^{n+1})(-t) = 0 \\ a^n \cdot \frac{\partial J_A}{\partial \mathbf{n}} = 0 \end{cases} \end{cases}, \quad (19)$$

$$\begin{cases} -\operatorname{div}(b^n \nabla t^{n+1}) + \gamma(t^{n+1} - \tilde{t}) + \lambda(I_A - t^{n+1}J_A)(-J_A) = 0 \\ b^n \cdot \frac{\partial t}{\partial \mathbf{n}} = 0 \end{cases}. \quad (20)$$

②按下式更新系数  $a^n$  与  $b^n$ :

$$a^{n+1} = \frac{\rho'(|\nabla J_A^{n+1}|)}{2|\nabla J_A^{n+1}|}, \quad (21)$$

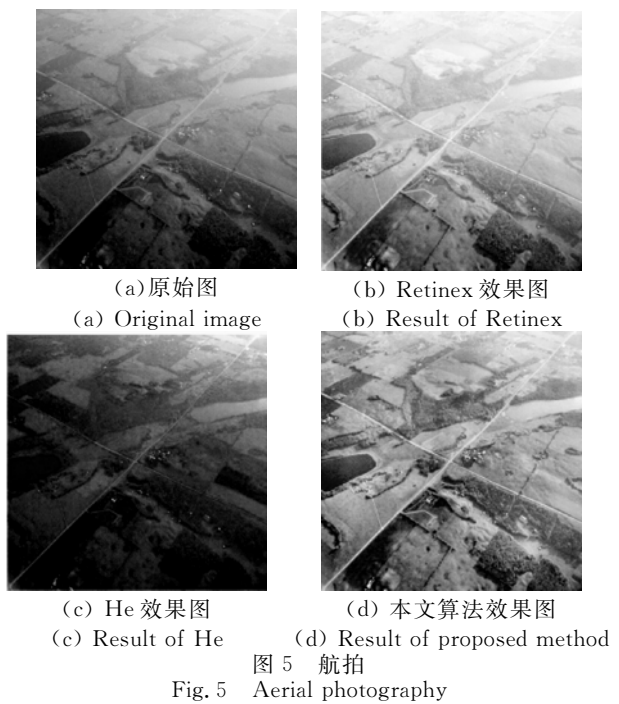
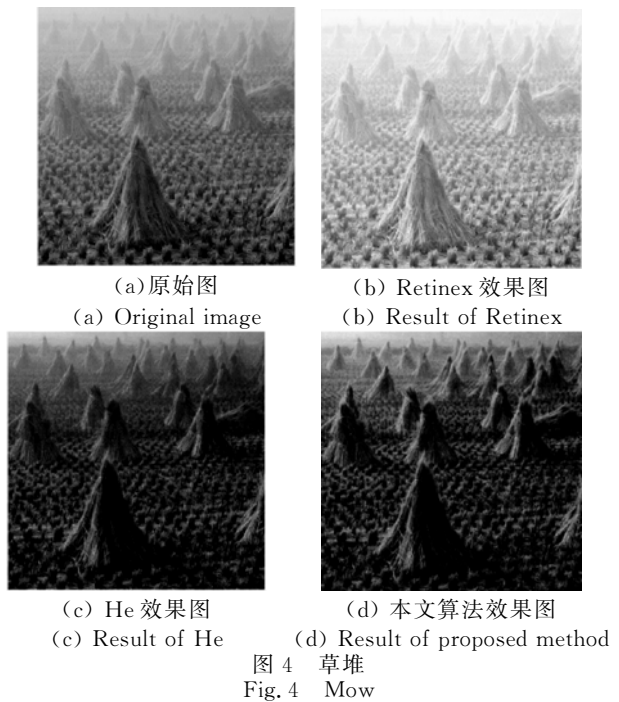
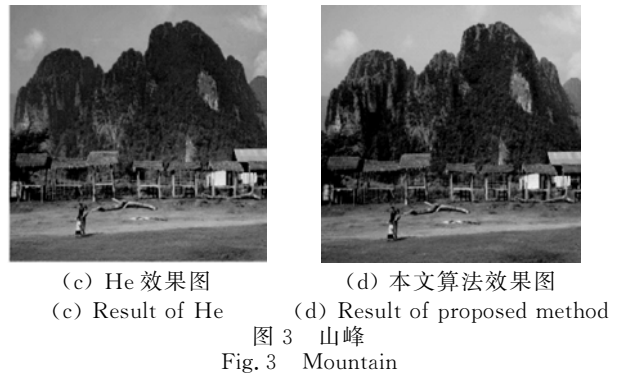
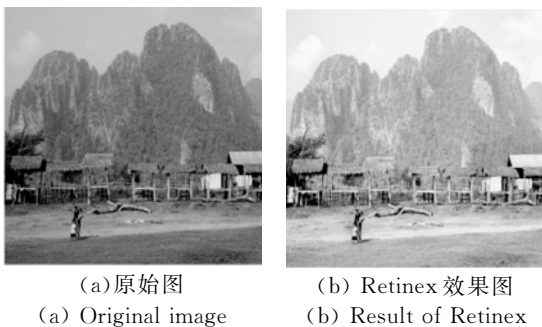
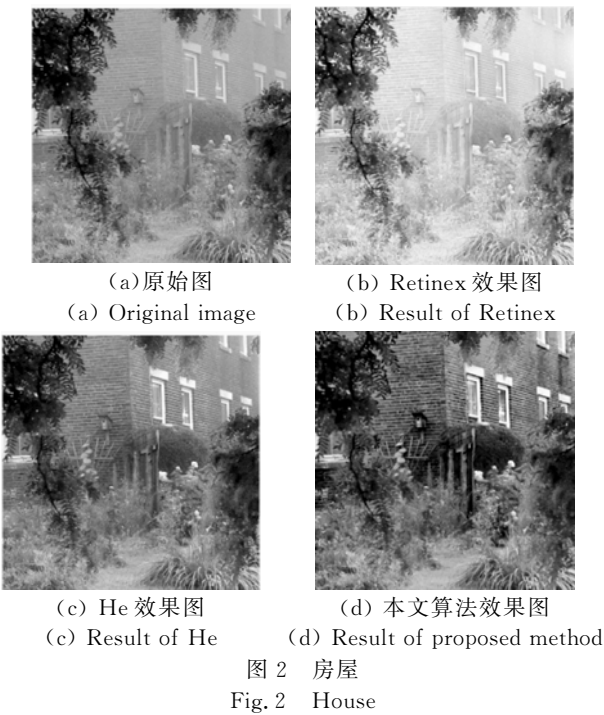
$$b^{n+1} = \frac{\rho'(|\nabla t^{n+1}|)}{2|\nabla t^{n+1}|}. \quad (22)$$

重复①与②,直到收敛。

## 4 实验仿真与分析

在 VC2008 中依据本文算法流程对 5 幅不同类型的雾霾彩色测试图进行了实验,对比分析了本算法与 Retinex 及 He 等 2 类经典方法在视觉质量及处理速度方面的差异。从图 2~图 8 可明显看到,本文方法比 Retinex 与 He 算法的恢复结果更自然真实,整体色彩效果很好地满足人眼视觉愉悦性。其主要原因如下:Retinex 算法是基于图像滤波的思想得到的场景反射分量,计算简单但常伴有图像细节扭曲与伪影效应现象,并且无法很好地恢复场景深度变化较大区域,如图 2(b),图 4(b),图 5(b)以及图 7(b)所示。He 算法利用黑体的吸光特性提出了图像暗原色先验,但是随着雾霾浓度的改变,需重新估计大气传输图,从而造成去雾算法自适应性较差,画面色彩整体偏暗,如图 3(c),图 4(c),图 6(c)以及图 8(c)所示。而本文算法利用数学形态学的中值集算子构造局部白平衡处理,在 He 的暗通道先验基础

上精确估计大气光参数;接着,设计并验证了新的平滑性度量范数,不但避免了分片常数现象,而且降低了图像边缘的模糊化,从而较好地恢复了图像的细节特征;最后,构建由场景反照率与大气传输函数组成的能量约束方程,通过正则化处理,使结果的色彩更显自然。因此,这种基于变分偏微分方程的去雾算法获得了较理想的结果。表 1 统计各算法处理单幅雾霾图像的耗时量,通过对比发现 He 算法耗时高达 370 ms 左右,而 Retinex 算法用时最少,仅处于 65 ms,本文算法紧随其后,维持在 105 ms 左右。分析其原因是 Retinex 算法避免了 He 算法中时空复杂度较高的抠图算子,而本文算法虽然需要求解耗时的变分偏微分方程,但是由于引入了交替半二次型算法,使得经过少量循环迭代便可求出较高精度的近似解,因而大幅缩减计算资源。



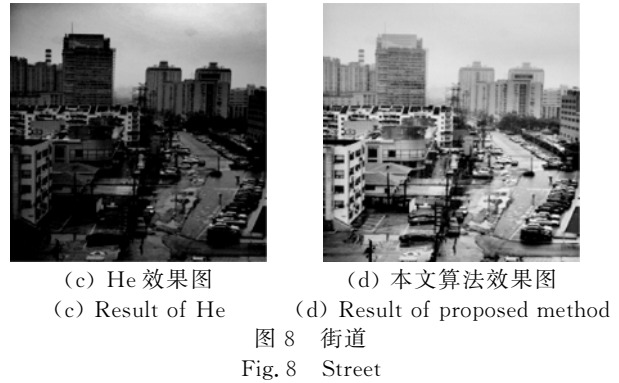
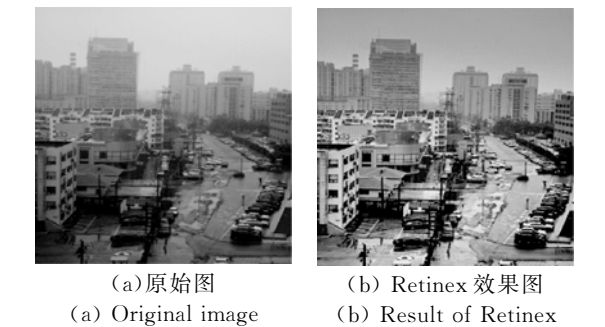
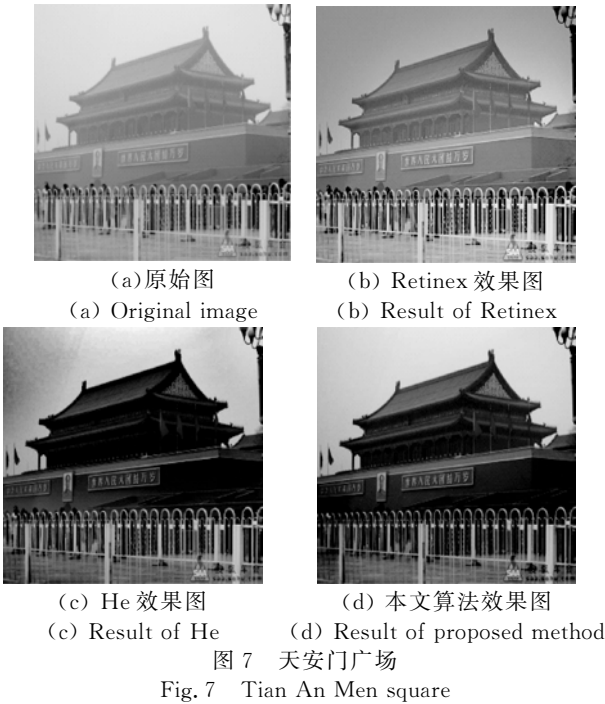
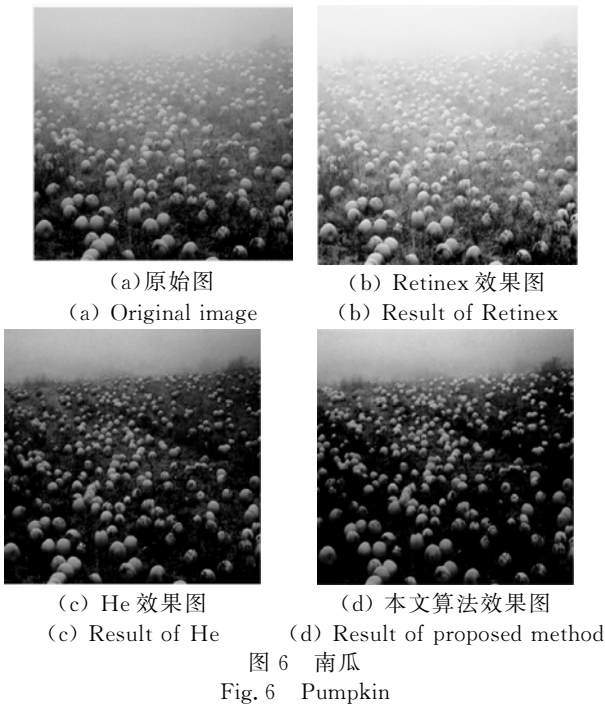


表 1 算法处理耗时量统计  
Tab. 1 Statistics of time consumption (ms)

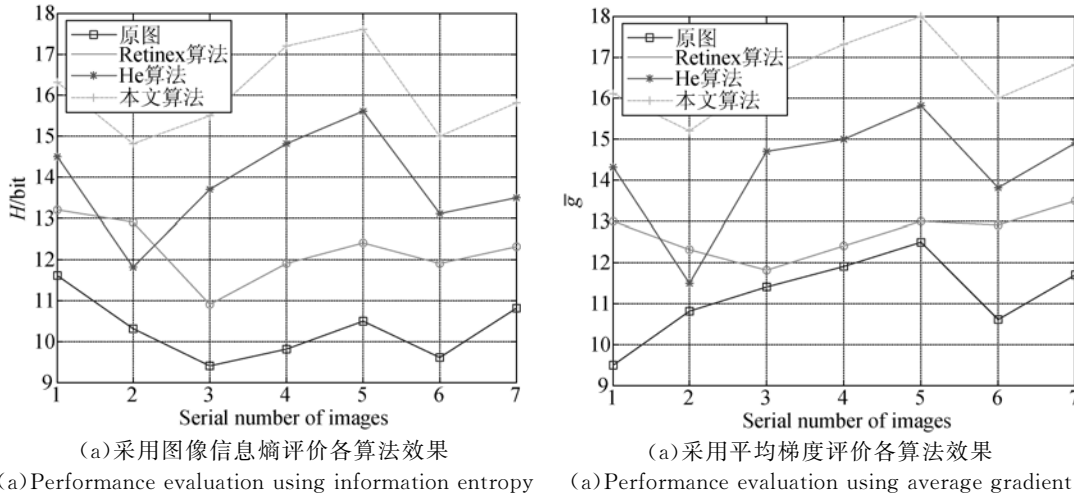
图序	He 算法	Retinex 算法	本文算法
图 2(a)	425	81	122
图 3(a)	310	58	96
图 4(a)	374	67	102
图 5(a)	383	74	110
图 6(a)	361	60	99
图 7(a)	355	56	89
图 8(a)	348	52	78

此外,为了进一步客观说明本文算法的处理性能,分别采用图像熵与平均梯度作为图像质量评价指标。其中:图像熵  $H$  表征了图像中灰度分布的聚集特征所包含的信息量,它反映了图像中平均信息量的多少,计算公式如式(23)所示。其中,  $p_i$  表示图像中像素值为  $i$  的像素点在图像中所占的比例。平均梯度  $\bar{g}$  是指图像边界两侧附近像素值的变化率,它反映了图像微小细节反差变化的速率,计算公式如式(24)所示。统计各算法的质量评价,并将其绘制成图 7,横坐标表示 4 幅测试图的序号,纵坐标则分别代表图像熵和平均梯度等评价指标,单位分别为“比特”和“1”,如图 9 所示。从图中不难发现,2 组对比算法对于图像质量的改善程度有限,均保持在 15% 至 30% 左右,而本文算法的提升效果最高达到 60%,处理性能远远领先于对照组。此外,从 2 类曲线的走势可明显看出,本文算法的处理效果明显优于 Retinex 与 He 算法,有力地佐证了主观评价结论。

$$H = \sum_{i=0}^{255} p_i \log p_i, \quad (23)$$

$$\bar{g} = \frac{1}{(m-1)(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} \sqrt{\frac{[I(i,j) - I(i+1,j)]^2 + [I(i,j) - I(i,j+1)]^2}{2}}. \quad (24)$$

其中:  $I(i, j)$  表示图像的  $(i, j)$  像素值。



(a)Performance evaluation using information entropy (a)Performance evaluation using average gradient

图 9 图像去雾算法质量评价曲线

Fig. 9 Quality-evaluation curves of image dehazing algorithms

## 5 结 论

依据雾霾图像的物理特性,本文结合数学形态学的中值集算子与变分偏微分方程提出了一种针对场景深度变化较大的雾霾降质彩色图像去雾算法,其实质是求解由图像能量泛函搭建的变分偏微分方程。实验结果表明:(1)利用数学形态学的中值集算子构造局部白平衡处理,精确估计大气光参数,可以克服图像背景中白色物体的干扰;(2)所设计新的平滑性度量范数充分利用了一次范数  $L^1$  与二次范数  $L^2$  的优势,避免出现分片常

数现象,以及图像边缘的模糊化,从而很好地凸显雾霾图像的细节信息;(3)采用全变分方法建立场景反照率与大气传输函数相关的能量泛函方程,通过正则项与保真项的约束,使处理结果色彩更显自然,无色偏或者伪影效应,本文算法获得的效果提升程度最高达到 60%,处理性能远远领先对照组;(4)利用交替半二次型算法求解欧拉-拉格朗日方程,提升了算法流程的整体运行速度,使其维持在 105 ms 左右。然而,如果雾霾浓度较厚,那么图像的各个分量变化不大,本文算法对于该类图像的提升效果不佳,这是下一步研究的主要方向。

## 参考文献:

- [1] 郭璠,唐璠,蔡自兴. 基于融合策略的单幅图像去雾算法[J]. 通信学报, 2014, 35(7):199-207.  
GUO F, TANG J, CAI Z X. Single image defogging based on fusion strategy [J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(7):199-207. (in Chinese)
- [2] 薛模根,周浦城,张洪坤. 利用方向延伸专家场的单幅雾天图像复原[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(5):782-787.  
XUE M G, ZHOU P CH, ZHANG H K. Single foggy image restoration using orientation extended
- [3] 陈洪财. 适于 LCM 应用的彩色图像全局不失真增强算法[J]. 液晶与显示, 2013, 28(3): 446-449.  
CHEN H CH. Color image globally without distortion enhancement algorithms suitable for LCM applications [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3): 446-449. (in Chinese)
- [4] 赵凡,张葆. 基于 FPGA 的航拍图像实时增强[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 793-799.  
ZHAO F, ZHANG B. Aerial image enhancement

fields of experts [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, 26(5):782-787. (in Chinese)

- processing based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 793-799. (in Chinese)
- [5] 周妍, 李庆武, 霍冠英. 基于非下采样 Contourlet 变换系数直方图匹配的自适应图像增强[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2214-2222.  
ZHOU Y, LI Q W, HUO G Y. Adaptive image enhancement based on NSCT coefficient histogram matching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2214-2222. (in Chinese)
- [6] 赵宏宇, 肖创柏, 禹晶. 马尔科夫随机场模型下的 Retinex 夜间彩色图像增强[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 1048-1055.  
ZHAO H Y, XIAO C B, YU J. A Retinex algorithm for night color image enhancement by MRF [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 1048-1055. (in Chinese)
- [7] FATTAL R. Single image dehazing[J]. *Proceedings of SIGGRAPH*, 2008, 27(3):1-9.
- [8] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior [C]. *Proc. of 27th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR*, 2009: 1956-1963.
- [9] HAUTIERE N, TAREL J P, HALMAOUI H. Enhanced fog detection and free-space segmentation for car navigation [J]. *Machine Vision and Applications*, 2014, 25: 667-679.
- [10] GUO F, TANG J, CAI Z X. Image dehazing based on haziness analysis [J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2014, 11(1): 78-86.
- [11] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. *PAMI*, 2003, 25(6): 713-724.
- [12] WANG J W, WU H N, LI H X. Distributed proportional-spatial derivative control of nonlinear parabolic systems via fuzzy PDE modeling approach [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2012, 42(3):927-938.
- [13] BENK J, PFLUGER D. Hybrid parallel solutions of the Black-Scholes PDE with the truncated combination technique[C]. *International Conference on High Performance Computing and Simulation (HPCS)*, 2012: 678-683.
- [14] 高山, 王星, 程嗣怡. 交叉视觉皮质模型中向心自动波的实现[J]. *西安电子科技大学学报:自然科学版*, 2013, 40(1):170-176.  
GAO SH, WANG X, CHENG S Y. Implementation of the centripetal auto-wave in an intersecting cortical model [J]. *Journal of xi dian University: Natural Science*, 2013, 40(1):170-176.
- [15] RUDIN L, OSHER S, FATIME E. Nonlinear total variation bases noise removal algorithm [J]. *Physica D*, 1992, 60(1):259-268.
- [16] AUBERT G, VESE A. A variational method in image recovery [J]. *SIAM Journal of Numerical Analysis*, 1997, 35(5):1948-1978.

#### 作者简介:



周理(1988—),男,湖南邵阳人,博士研究生,2010年于空军工程大学获得硕士学位,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: zhouli\_5120801@163.com



毕笃彦(1962—),男,陕西扶风人,1995于法国图尔大学获得博士学位,现为空军工程大学教授,主要从事智能信息处理研究。E-mail: biduyan@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)