

## 基于全变分 Retinex 及梯度域的雾天图像增强算法

陈炳权<sup>1,2</sup>, 刘宏立<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 吉首大学 信息科学与工程学院, 湖南 吉首 416000)

**摘 要:** 为提高雾天图像增强的对比度并保持颜色恒常性, 提出了基于全变分 Retinex 及梯度域的雾天图像增强算法。首先, 采用高斯—赛德尔 GS (Gauss-Seidel) 迭代算法对基于 Retinex 的全变分能量泛函数进行求解, 从而有效地保持颜色恒常性; 其次, 采用相对梯度与绝对梯度相结合的方式拉伸雾天图像较亮处的梯度, 在全变分 Retinex 理论下重建增强后的雾天图像, 并将该增强算法应用到彩色图像; 最后, 加权融合基于全变分 Retinex 增强算法与梯度域增强算法的增强结果, 使得增强结果既能提高对比度又能保持色彩恒常性。实验结果表明, 本算法提高了雾天图像增强后的对比度和清晰度, 具有颜色恒常性、颜色保真高等特性。

**关键词:** 雾天图像; 图像增强; Retinex 算法; 梯度域

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)06-0139-09

## Algorithm for foggy image enhancement based on the total variational Retinex and gradient domain

CHEN Bing-quan<sup>1,2</sup>, LIU Hong-li<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Department of Information Science and Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China)

**Abstract:** Considering the preservation of color constancy and the improvement of contrast ratio of foggy image enhancement, the foggy image enhancement algorithm based on the total variational Retinex gradient domain method was proposed. Firstly, the algorithm used the GS (Gauss-Seidel) iterative method to resolve the Retinex variational energy functional so that the color constancy was remained and the operational velocity of the proposed algorithm was improved. Secondly, the algorithm stretched strongly the gradient of the higher light blocks in the foggy image by combining the relative gradient and the absolute gradient, and reconstructed the foggy enhancement images with the context of least squares and extended the enhancement method to process the color images. Lastly, the enhancement images by using the total variational Retinex method and the gradient domain algorithm were fused weightedly to keep the color constancy and improve the contrast ratio. The experimental results show that the proposed algorithm can effectively improve the image's contrast and definition, the algorithm could keep better color constancy and high color fidelity.

**Key words:** foggy image; images enhancement; Retinex algorithm; gradient domain

### 1 引言

图像增强 (image enhancement) 作为图像处理领域的一种基本技术, 其目的是突显图像的整体或局部像素取值特性, 丰富其信息量并改善图像质量, 是目前图像处理中加强图像判读和识别效果的

有效处理方法<sup>[1]</sup>。

在雾天环境下采集图像时, 像素值原本较低的被增大、原本较高的被减弱, 对比度的退化现象由此而产生, 最终导致雾天图像的能见度和对比度降低<sup>[2]</sup>。近些年来, 随着全球空气污染的加剧, 雾天环境下采集到的图像对比度和能见度较

收稿日期: 2014-01-23; 修回日期: 2014-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61172079); 湖南省自然科学基金资助项目 (12GJ6055)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China(61172079); The Natural Science Foundation of Hunan Province(12GJ6055)

差,极大地影响到视觉监控系统采集图像的质量。在此背景下,对于可见光的图像去雾研究具有一定的现实意义。

国内外文献研究表明,雾天图像增强的方法(非物理模型方法)旨在增强图像的对比度和校正图像颜色,主要包括直接对比度增强算法、同态滤波算法、局部对比度增强算法、小波增强算法、Retinex 算法和直方图均衡法等<sup>[3]</sup>。其中,Retinex 算法<sup>[2]</sup>、直方图均衡化(HE)算法和对比度增强算法是目前主要针对雾天图像增强的 3 种经典算法<sup>[3-10]</sup>。对比度增强算法以改善视觉效果为目的,提高图像整体或部分的对比度,然而诸如直方图均衡化(HE)、梯度拉伸等全局对比度增强方法对光照不均及对比度变化较大的图像往往效果不是很好;基于 Retinex 理论和梯度域模型的方法<sup>[11]</sup>等局部对比度增强算法能增大图像中较暗处的对比度,有效地压缩光照不均匀图像的动态范围,较好地提高图像的视觉效果,然而对于增强雾天图像中较亮处的细节很困难。文献[12]研究表明,雾天图像中对对比度越大的地方,其梯度需要越大的增强,其所有局部梯度增强总和的目标函数最大值求解方法和过程是增强的关键,求解最大值往往采用迭代贪婪算法<sup>[12]</sup>,由于该算法最大的特点就是增强雾天图像中的每个点,所以迭代贪婪算法<sup>[12]</sup>只能适用于低动态范围和整体对比度差的对比度增强。文献[11,13,14]对梯度域增强法进行了一系列的改进,但由于仅对雾天图像的对比度进行了增强,所以仍然不适于光照不均匀图像的动态范围压缩。Retinex 算法的基本指导思路是首先把增强图像看成是由反射分量  $R(x,y)$  和入射分量  $l(x,y)$  构成,之后采取一系列方法从待增强图像中估计出入射分量  $l(x,y)$ ,反射分量便可以求解出来,最终的图像增强便是反射分量。现有文献研究结果表明<sup>[3-10]</sup>, Retinex 算法中的 MSR 算法<sup>[15]</sup>的入射分量由高斯滤波估测计算,最终的增强效果采用多个单尺度 Retinex 算法线性加权来实现,然而 MSR 算法没有考虑雾化程度和不同景深的局部信息,图像的色彩和细节不能同时有效地增强。直方图均衡化(HE)算法通过调节图像直方图的分布,调整后的直方图均匀分布在整个动态范围内,且以高度中值为中心,该算法由于模拟亮度恒常性原理,所以细节增强性能好,然而该算法没有考虑色彩恒常性,当 RGB 三色都趋于中值时,色彩保真度得不到提高,表现为全局的彩色特征出现偏差。

由上述分析知,对比度增强算法虽然增大了图像中较暗处的对比度,压缩了光照不均的图像动态范围,提高了图像的视觉效果,然而,该方法在增强较暗处细节和提高图像整体效果时,图像中较亮的细节部分不能得到有效的增强,有的细节部分甚至还被减弱。所以在对比度增强过程中,若对较亮和较暗处的梯度进行统一处理,势必会压制雾天图像较明处对比度。Retinex 算法以基于色彩保真度高、对比度大、颜色恒常性和较好地显示淹没在阴影区域中的细节等理论方法,提高了图像增强效果,但致命的弱点就是未充分考虑亮度恒常性,且增强过程耗时并难以控制,缺乏一定的柔性<sup>[16]</sup>。

本文考虑全变分 TV(total variation)模型<sup>[17]</sup>较传统二阶范数约束有一定的优越性,从人眼对物体颜色的感知特性出发,将全变分模型 Retinex 算法和梯度域图像增强算法<sup>[11,18]</sup>进行有效地加权融合,有效地提高了雾天图像的增强效果,具有颜色恒常性、颜色保真和对比度高、细节增强和柔韧性好等优点。

## 2 本文算法

### 2.1 基于全变分的 Retinex 模型

根据 Retinex 理论,设一幅图像是由入射光分量和反射光分量组成,即

$$u(x,y) = R(x,y)l(x,y) \quad (1)$$

其中,  $u(x,y)$  表示待增强图像;  $R(x,y)$  表示反射分量;  $l(x,y)$  表示入射分量。对式(1)取常用对数运算操作,即

$$\log u(x,y) = \log R(x,y) + \log l(x,y) \quad (2)$$

将式(2)化为简单的线性关系

$$\hat{u}(x,y) = \hat{R}(x,y) + \hat{l}(x,y) \quad (3)$$

由 Retinex 理论模型可知,反射分量  $\hat{R}(x,y)$  求解的变分能量模型<sup>[12]</sup>为

$$E(\hat{l}) = \|\nabla \hat{l}\|_2^2 + \frac{\alpha}{2} \|\hat{l} - \hat{u}\|_2^2 + \frac{\beta}{2} \|\nabla(\hat{l} - \hat{u})\|_2^2, \quad \text{s.t. } \langle \nabla \hat{l}, n \rangle = 0 \text{ on } \partial\Omega \quad (4)$$

其中,参数  $\alpha$  和  $\beta$  均大于等于 0,用来调节各项权重;  $\partial\Omega$  为图像边界,  $n$  为边界的法向量;  $\|\hat{l} - \hat{u}\|_2^2$  为光照图像  $\hat{l}$  与原始图像  $\hat{u}$  间的相似性;  $\hat{l} - \hat{u}$  表示反

射图像  $\hat{r}$ ;  $\|\nabla(\hat{l}-\hat{u})\|_2^2$  表示反射图像光滑的假设。

相关研究<sup>[19-22]</sup>表明,一阶范数比二阶范数具有更强的边缘保持能力。本文使用了二阶范数对  $\hat{l}$  的梯度图像进行约束修正,令能量泛函为

$$E(\hat{l}) = TV(\hat{l}) + \frac{\alpha}{2} \|\hat{l} - \hat{u}\|_2^2 + \frac{\beta}{2} \|\nabla(\hat{l} - \hat{u})\|_2^2, \quad \text{s.t. } \langle \nabla \hat{l}, n \rangle = 0 \text{ on } \partial \Omega \quad (5)$$

其中,函数全微分  $TV(\hat{l})$  表示了光照图像  $\hat{l}$  光滑的假设。

全变分 TV 极小化方法在图像增强中能很好地保持边缘<sup>[14]</sup>,通过求解极小化能量泛函  $E(\hat{l})$  就可以得到光照图像  $\hat{l}$ ,其光滑的假设模型为

$$TV(\hat{l}) = E(\hat{l}) - \left( \frac{\alpha}{2} \|\hat{l} - \hat{u}\|_2^2 + \frac{\beta}{2} \|\nabla(\hat{l} - \hat{u})\|_2^2 \right)$$

采用  $L_1$  范数,将  $TV(\hat{l})$  表示为

$$\|\nabla \hat{l}\|_1 = \sum_{(x,y) \in \Omega} \left\| (\nabla \hat{l})_{x,y} \right\|_2 \quad (6)$$

其中,  $(\nabla \hat{l})_{x,y} = (\hat{l}_{x+1,y} - \hat{l}_{x,y}, \hat{l}_{x,y+1} - \hat{l}_{x,y})$ 。由  $L_1$  范数表示形式可知,因为  $TV(\hat{l})$  的凸性,所以式(6)和式(4)具有全局最优解。

式(5)泛函的极小化范数形式为

$$\hat{l}^* = \arg \min_{\hat{l}} \left\| \nabla \hat{l} \right\|_1 + \frac{\alpha}{2} \|\hat{l} - \hat{u}\|_2^2 + \frac{\beta}{2} \|\nabla(\hat{l} - \hat{u})\|_2^2$$

为消除  $L_1$  与  $L_2$  项中  $\hat{l}$  的耦合,令  $d = \nabla \hat{l}$ ,于是产生了一个带约束的优化问题,即

$$\begin{aligned} (\hat{l}^*, d^*) = \arg \min_{(\hat{l}, d)} & \|d\|_1 + \frac{\alpha}{2} \|\hat{l} - \hat{u}\|_2^2 + \\ & \frac{\beta}{2} \|\nabla(\hat{l} - \hat{u})\|_2^2 + \frac{1}{2} \|d - \nabla \hat{l}\|_2^2 \end{aligned} \quad (7)$$

采用迭代法将式(7)变换为

$$\begin{aligned} (\hat{l}^{k+1}, d^{k+1}) = \arg \min_{(\hat{l}, d)} & \|d\|_1 + \frac{\alpha}{2} \|\hat{l} - \hat{u}\|_2^2 + \\ & \frac{\beta}{2} \|\nabla(\hat{l} - \hat{u})\|_2^2 + \frac{1}{2} \|d - \nabla \hat{l} - b^k\|_2^2 \end{aligned} \quad (8)$$

于是式(8)变成了优化  $\hat{l}$  和  $d$  的子问题,本文固定  $d$  来处理,于是式(8)变成了求解  $l$  的优化问题,通过变分可得到如下线性系统

$$(\alpha I - (\beta + \lambda)\Delta)\hat{l}^{k+1} = (\alpha\hat{l} - \beta\Delta\hat{u} + \lambda\nabla(b^k - d^k)) \quad (9)$$

该系统对角占优,本文采用收敛速度较快的高

斯-赛德尔 GS (Gauss-Seidel) 迭代算法进行计算,其中  $d^k$  采用收缩算法<sup>[17]</sup>计算可得

$$d^{k+1} = \text{shrink}(\nabla \hat{l}^{k+1} + b^k, 1/\lambda) \quad (10)$$

其中,

$$\text{shrink}(x, \gamma) = \frac{x}{|x|} \nabla \max(|x| - \gamma, 0)$$

整个计算流程如下。

1) 令  $\hat{l}^0 = \hat{u}, d^0 = b^0 = 0$ ;

2) 当  $\|\hat{l}^{k+1} - \hat{l}^k\| > \varepsilon$  时,则

$$\hat{l}^{k+1} = \text{GS}_{\text{Retinex}}(\hat{u}, d^k, b^k),$$

$$d^{k+1} = \text{shrink}(\nabla \hat{l}^{k+1} + b^k, 1/\lambda),$$

$$b^{k+1} = b^k + \nabla \hat{l}^{k+1} - d^{k+1}.$$

## 2.2 基于梯度域图像增强模型

本文引入绝对梯度(压制雾天图像较暗处的梯度,增强该处的对比度)与相对梯度(补偿雾天图像较亮处的梯度即减少压制)<sup>[23]</sup>相融合的策略,提出了基于绝对梯度与相对梯度的雾天图像梯度域增强算法,对雾天图像中较亮处的对比度和图像细节进行更大的增强。其基本思路:1)对图像的梯度场函数进行求解;2)针对人眼视觉的特性对梯度场进行修正;3)从修正的梯度场中构建出增强后的图像。

### 2.2.1 相对梯度场与绝对梯度场的增强

在传统的图像梯度场的求解过程中,由于梯度大的被压制,所以压缩了图像的动态范围,最终减弱了光照不均的影响。同样,梯度较小的被拉伸,从而增强了图像的细节。该过程可以用下列表达描述。

$$G(x, y) = \Delta H(x, y) \varphi(x, y) \quad (11)$$

其中,雾天图像的绝对梯度为  $\Delta H(x, y)$ ;  $\varphi(x, y)$  为增强函数,由雾天图像局部梯度的大小确定;增强后的图像梯度场为  $G(x, y)$ 。

人眼对亮度的感知通常是平均亮度越大的地方,感知的亮度差别就越大<sup>[11]</sup>。由此可知,感知相同的绝对梯度,在全局亮度较大的地方,人眼的感知效果较差。相对梯度表示为<sup>[23]</sup>

$$\|\Delta H'(x, y)\| = \frac{\|\Delta H(x, y)\|}{f(u(x, y)) * g(x, y)}$$

其中,  $f(u)$  为原灰度图像  $u$  的单调递增函数,本文选取  $f(u) = u^\alpha (\alpha \geq 1)$ ;  $g(x, y)$  和 “\*” 分别为高斯核和卷积运算。为了使强边缘两边相对梯度  $\Delta H'(x, y)$  的突变得以减弱,克服过增强等不自然现

象, 本文将原图像与高斯核做卷积运算。对于绝对梯度相同的图像, 采用相对梯度运算后, 待增强图像中亮度较亮的地方, 其相对梯度就较小。本文构造如下形式的增强函数

$$\varphi(x, y) = \left( \frac{\alpha(\|\overline{\Delta H'(x, y)}\| + \Delta H(x, y))}{\|\Delta H'(x, y)\| + \Delta H(x, y)} \right)^{1-\Gamma} \quad (12)$$

其中,  $\|\overline{\Delta H'(x, y)}\|$  为相对梯度  $\|\Delta H'(x, y)\|$  的平均值。由式(12)可知, 原图像中梯度越大的地方, 增强函数  $\varphi(x, y)$  值越小。当  $\Delta H(x, y) = \alpha\|\overline{\Delta H'(x, y)}\|$  时  $\varphi(x, y) = 1$ , 即处理后梯度保持不变; 当  $\Delta H(x, y) > \alpha\|\overline{\Delta H'(x, y)}\|$  时, 压制了梯度; 当  $\Delta H(x, y) < \alpha\|\overline{\Delta H'(x, y)}\|$  时, 拉伸了梯度。梯度场的拉伸和压制幅度大小由式(12)中的参数  $\Gamma$  控制。

为了补偿雾天图像中较亮处的梯度, 克服过多压制, 本文由此引入了相对梯度和绝对梯度相融合的方法, 有效克服了雾天图像较亮处与较暗处梯度统一处理的弊病。

### 2.2.2 基于梯度场的雾天图像增强重建

增强的梯度场求解完成后, 设其目标函数为

$$\begin{aligned} \iint F(\Delta u, G) dx dy &= \iint \|\Delta u - G\|^2 dx dy \\ &= \iint \left( \frac{\partial u}{\partial x} - G_x \right)^2 dx dy + \iint \left( \frac{\partial u}{\partial y} - G_y \right)^2 dx dy \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)的 Euler-Lagrange 方程为

$$2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial G_x}{\partial x} \right) + 2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial G_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (14)$$

式(14)经整理后, 其 Poisson 方程为

$$\Delta^2 u = \text{div} G = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (15)$$

其中,  $\Delta^2$  为 Laplacian 算子, Laplacian 算子矩阵易于对角化, 本文使用文献[13]提出的算法求解 Poisson 方程,  $m \times n$  为图像中像素, 矩阵乘法和求逆运算采用离散正弦变换。

上述算法只适合于灰度图像增强处理, 当处理对象不是灰度图像时, 就必须先将彩色图像进行空间变换: 从 RGB 转换到 HSV, 将色度、亮度和饱和度进行有效分离, 将亮度通道进行增强, 其他通道不作处理; 最后, 将图像逆转换到 RGB 空间,

完成整个雾天图像的增强。

### 2.3 加权融合策略

考虑提高雾天图像对比度的同时保持色彩恒常性, 本文采用 K-L 距离值计算基于全变分 Retinex 算法和梯度域算法的权值, 由该权值对两者增强结果进行自适应加权融合, 使计算的权值既能提高对比度又能保证颜色自然, 从而有效地提高雾天图像的清晰度。

加权算法融合具体过程如下。

1) 将待增强图像分成许多子块, 归一化所选定的通道像素值到 [0,1] 区间内。

2) 计算亮度和色度通道像素值的 Beta 分布 K-L 距离<sup>[19]</sup>  $\Delta Y_1$ 、 $\Delta Y_2$ 、 $\Delta C b_1$ 、 $\Delta C r_1$ 、 $\Delta C b_2$ 、 $\Delta C r_2$ 。

3) 求得基于全变分 Retinex 和梯度域算法的融合权值分别为

$$\xi_1 = \frac{1}{\Delta Y_1 \times \Delta C b_1 \times \Delta C r_1 + 1} \quad (16)$$

$$\xi_2 = \frac{1}{\Delta Y_2 \times \Delta C b_2 \times \Delta C r_2 + 1} \quad (17)$$

K-L 距离定义了 2 种算法分布的接近程度, 设 2 种不同算法的分布分别为  $p(k)$ 、 $q(k)$ , 则其 K-L 距离为

$$\Delta(p, q) = \sum_k p(k) \log \frac{p(k)}{q(k)} \quad (18)$$

经过处理后图像的亮度通道像素值的分布趋近 Beta 分布, 保证了大多数像素值在约等于 1 的区域内, 从而有效地提高了图像的对比度和亮度。经过加权融合策略后, Cb和Cr 通道像素值的均匀分布, 且颜色均匀地分布在 [0,1] 区间上, 从而保证了增强后的图像色彩内容更加丰富。

### 2.4 本文算法的描述

图 1 为本文提出的算法流程, 增强前先把雾天图像转至 YCbCr 空间。首先将雾天图像划分许多的子块, 高斯滤波函数的尺度参数由各区域累积分布函数和子块直方图的取值计算; 然后采用全变分 Retinex 算法和梯度域增强算法分别对各子块进行处理, 梯度域算法和全变分 Retinex 增强算法融合权值大小由 K-L 距离值求解; 最后采用加权算法融合每个子块的增强结果, 完成雾天图像的增强。

算法基本步骤如下。

1) 令雾天图像为  $u(x, y)$ ,  $M \times N$  为图像的大小, 把雾天图像转至 YCbCr 空间进行处理, 并在原图的左上角起始位置上提取一个大小为  $m \times n$  的子块。

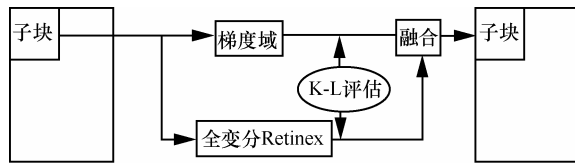


图 1 本文算法流程

2) 定义大小分别为  $M \times N$ 、 $(m \times n)$  的矩阵  $M_1$ 、 $M_2$  分别存放梯度域算法处理后的各子块的融合权值和 Retinex 增强算法处理后的各子块的融合权值，大小为  $m \times n$  的矩阵  $M_3$ 、 $M_4$ 、 $M_5$  分别存放 Retinex 算法、梯度域算法和最终输出的图像。

3) 存放矩阵  $M_1$ 、 $M_2$  相应位置的处理后子块的融合权值大小由式(16)和式(17)计算。

4) 在原雾天图像上向右水平移动子块，步长为  $m$ ，直至右边界。

5) 子块沿水平向左方向移动至图像最左端，且垂直向下移动，移动的步长为  $n$ ，直到原图像下边界为止。

6) 最终的雾天清晰图像就是矩阵  $M_5$ 。

### 3 实验结果分析

本文所有的实验均在 Windows XP 操作系统下 (2.0 GHz CPU, 1 GB RAM)，运用 Matlab7.0 软件完成。本文算法中 K-L 距离为 0.503， $\alpha=0.3$ ， $\beta=0.0003$ ， $\Gamma=0.8$ 。采用 HE 算法、全变分 Retinex 算法、梯度域算法和本文提出的方法分别对 3 幅雾天退化图像 (图像大小为  $640 \times 480$ ，图像划分为  $8 \times 8$  个子块，子块的大小为  $80 \times 60$ ) 进行处理，雾天退化图像处理效果比较如图 2~图 4 所示。



图 2 不同方法对图 2(a)图像的处理结果比较

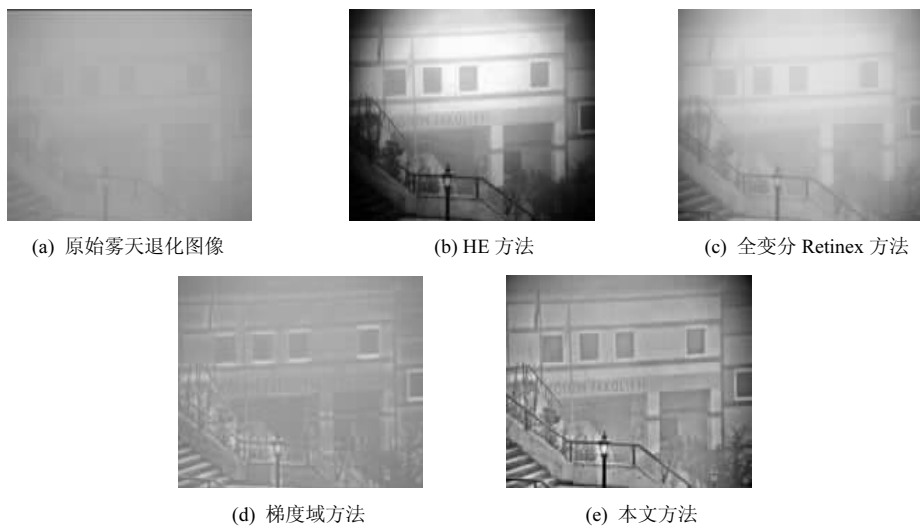


图 3 不同方法对图 3(a)图像的处理结果比较



图 4 不同方法对图 4(a)图像的处理结果比较

雾天环境下拍摄到的原始退化图像如图 2~图 4 所示, 不难发现, 该图像能见度低, 整体模糊不清。经直方图均衡法 HE 方法处理图像虽然提高了整体对比度和清晰度, 但不难发现, 图像颜色失真明显, 色彩恒常性差, 整体视觉效果不太自然。经全变分 Retinex 方法处理结果提高了场景的能见度, 有效地恢复了场景的颜色, 然而其背景信号较强, 影响了细节信号的能见度, 增强图像细节的对比度和清晰

度还是不高。梯度域方法处理图像有效地增强了图像的细节, 但是放大了平滑区域的随机噪声, 图像全局效果不够自然。经本文方法处理的图像, 其局部细节增强明显, 雾天图像的清晰度和对比度得到提高, 退化现象得到有效克服, 增强效果优于上述 3 种算法。

图 2~图 4 对应的灰度直方图如图 5~图 7 所示。

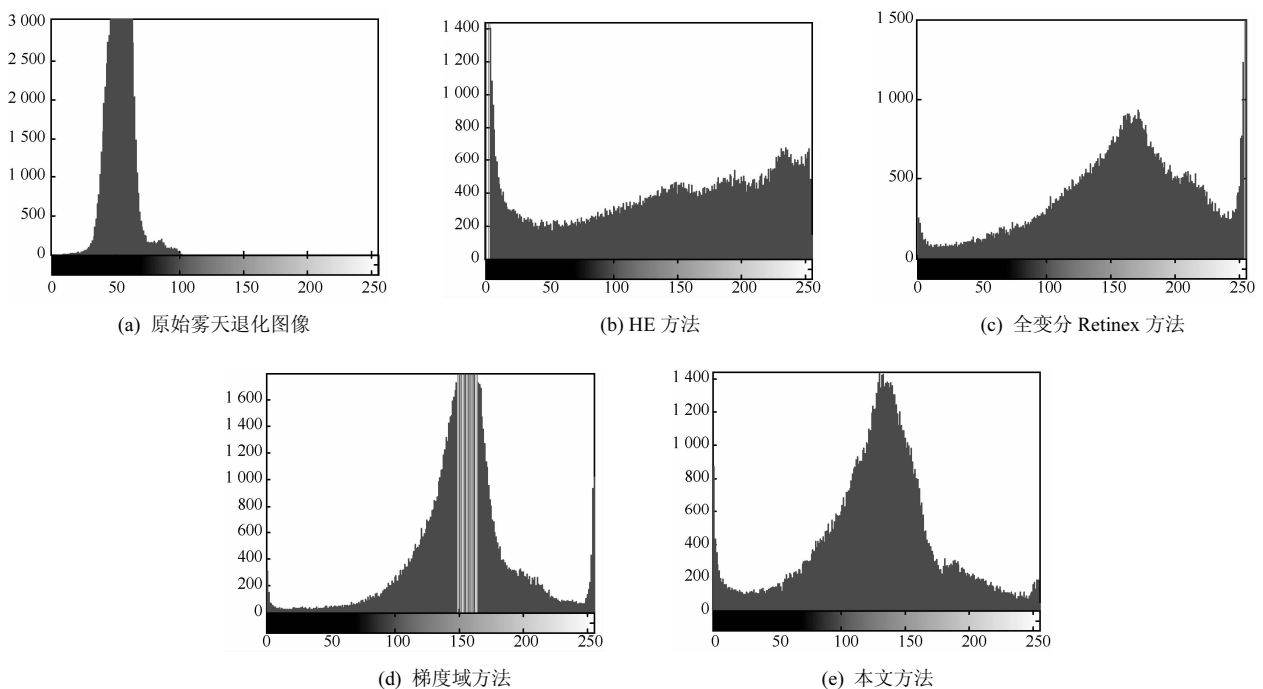


图 5 图 2(a)图像不同增强方法的灰度直方图比较

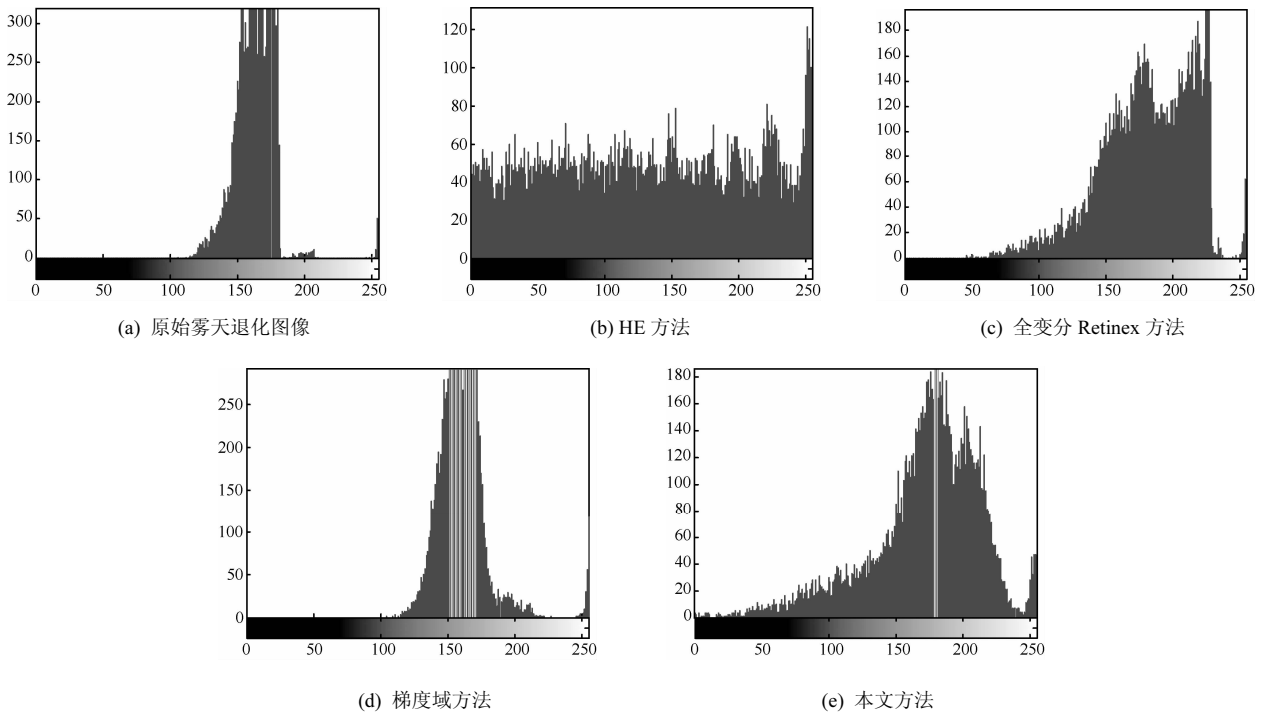


图 6 图 3(a)图像不同增强方法的灰度直方图比较

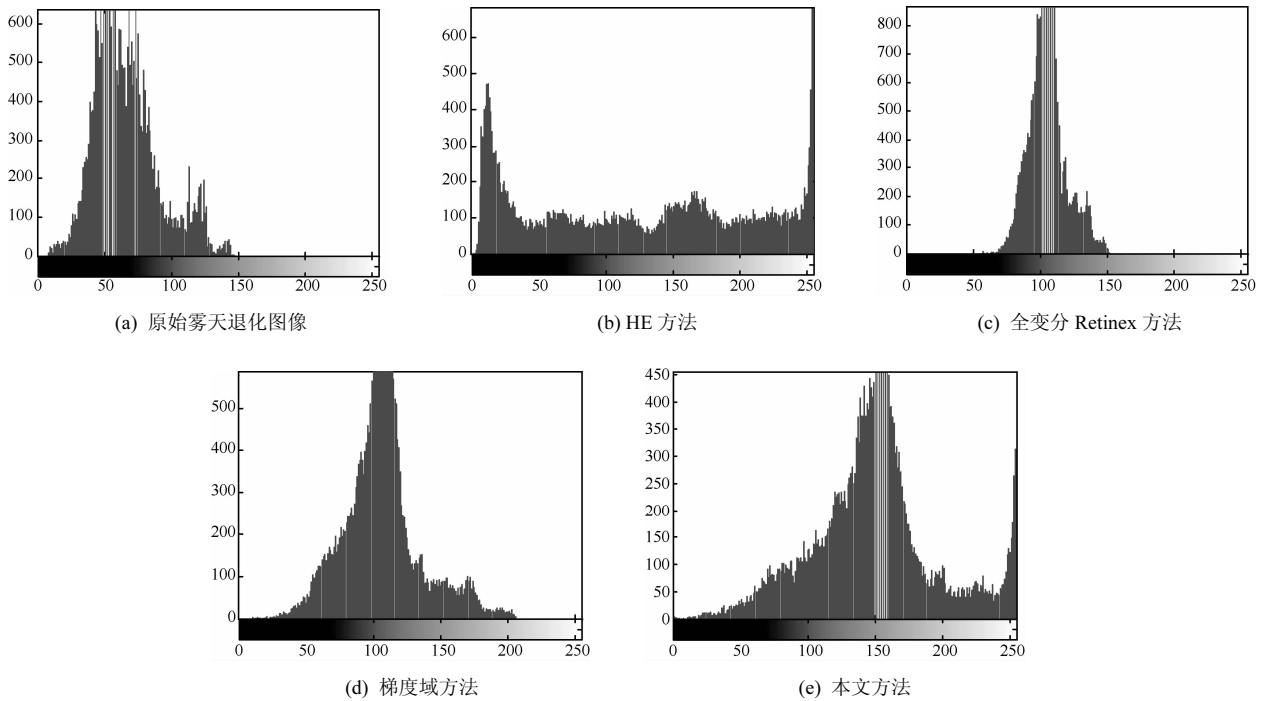


图 7 图 4(a)图像不同增强方法的灰度直方图比较

一个好的图像增强算法，原图像和结果图像的直方图形状的相关系数越大，巴氏距离越小，其匹配度越高<sup>[25]</sup>。本文根据灰度直方图分布的相关系数和巴氏距离定义，计算图 2(a)、图 3(a)、图 4(a)雾天退化图像采用不同增强算法的图像与原图像直

方图的相关系数和巴氏距离如表 1 所示。

由表 1 可知，本文算法较其他 3 种算法，相关系数较大，巴氏距离较小，并得到了较好的灰度分布，更多图像细节被保持，图像清晰度得到较大提高。

表 1 不同算法的增强图像的相关系数和巴氏距离比较

图序	HE 算法		全变分 Retinex 方法		梯度域方法		本文算法	
	相关系数	巴氏距离	相关系数	巴氏距离	相关系数	巴氏距离	相关系数	巴氏距离
图 1	0.009 1	0.461 5	0.252 0	0.301 0	0.457 8	0.281 0	0.851 2	0.121 3
图 2	0.007 8	0.402 5	0.235 1	0.321 1	0.522 0	0.247 3	0.896 5	0.102 9
图 3	0.005 3	0.312 5	0.135 2	0.215 2	0.231 0	0.201 1	0.452 6	0.113 6

对于  $M \times N$  大小图像,亮度均值(反映图像整体的明暗效果)、对比度(反映图像灰度层次丰富程度)、信息熵(反映图像信息量的大小)、清晰度(图像局部细节的清晰程度)分别定义如下<sup>[18]</sup>

$$brightness = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M g(i, j)}{M \times N} \quad (19)$$

$$contrast = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M (g(i, j) - brightness)^2}{M \times N}} \quad (20)$$

其中,  $g(i, j)$  是坐标  $(i, j)$  的像素值

$$H(p) = -\sum_{i=0}^{255} p_i \log p_i \quad (21)$$

其中,  $p_i$  为第  $i$  个灰度级出现的频率

$$DEF = \frac{\sum_{i=1}^{M \times N} \sum_{j=1}^8 |df| |dx|}{M \times N} \quad (22)$$

其中,  $df$  为 2 个像素点灰度值的差,  $dx$  为 2 个像素点的距离。

本文 3 幅雾天图像采用不同算法的增强效果定量比较及相关参数如表 2 所示。

从表 2 的比较结果可知,雾天图像清晰度和对比度明显偏低;经过直方图均衡 HE 方法增强后,虽然提高了雾天图像清晰度和对比度,但降低了信息量;经过全变分 Retinex 方法增强后雾天图像,其信息量与直方图均衡 HE 比较明显地提高了,与原始图像相比较当然提高了不少,但较直方图均衡 HE 方法反而下降;经过梯度域方法的增强算法处理的雾天图像的清晰度和对比度都比全变分 Retinex 方法提高明显,但信息熵却比全变分 Retinex 方法有所下降;本文的方法与梯度域、全变分 Retinex 方法处理结果相比,较大提高了图像的

清晰度、对比度和信息量,退化图像的视觉效果得到明显改善。

表 2 3 幅雾天退化图像处理结果各项指标比较

图序	亮度均值	对比度均值	信息熵	清晰度
图 2(a)	176.15	12.03	1.809 8	17.17
图 2(b)	131.26	38.17	1.718 2	73.83
图 2(c)	127.98	12.29	2.100 8	35.10
图 2(d)	128.12	15.17	1.754 7	32.71
图 2(e)	126.96	26.53	2.161 5	36.56
图 3(a)	165.26	11.29	1.500 3	15.22
图 3(b)	133.30	33.10	1.625 8	62.25
图 3(c)	137.23	12.11	1.743 0	34.37
图 3(d)	135.15	13.20	2.002 5	32.69
图 3(e)	123.39	27.18	2.268 8	39.84
图 4(a)	133.15	10.36	1.611 8	13.17
图 4(b)	125.18	35.16	1.720 1	58.16
图 4(c)	129.79	13.55	1.613 5	35.16
图 4(d)	130.23	12.78	1.918 9	33.59
图 4(e)	126.11	19.29	2.179 1	38.10

#### 4 结束语

本文提出一种基于全变分 Retinex 模型及梯度域雾天图像增强算法,该算法首先采用基于全变分的 Retinex 算法的图像增强模型,使增强后的图像能很好地保持原有图像的细节信息,颜色鲜艳;然后使用绝对梯度和相对梯度对雾天图像较亮处进行更大的梯度拉伸,从而有效地提高雾天图像增强后的对比度,解决了过度压制雾天图像增强中亮度区域的梯度问题;最后,针对同时保持雾天图像对比度和保持色彩恒常性的考虑,对上述 2 种增强算法模型进行了加权融合,由 K-L 距离计算其权值。通过增强雾天图像的主观和定量的客观比较(从亮

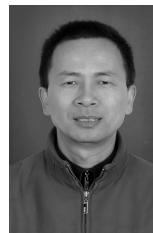
度、对比度、清晰度和信息熵等方面), 本文算法提高了图像增强后的对比度和清晰度, 具有颜色恒常性、颜色保真高等特性。

本文算法的增强效果与块的大小及块移动步长有关, 若选择不当会容易产生块状效应, 这是下一步研究的方向。

### 参考文献:

- [1] WILLIAM K P. Digital Image Processing[M]. Beijing:China Machine Press,2005.158-196.
- [2] LAND E H. Recent advances in retinex theory and some implications for cortical computations: color vision and the natural image[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1983,80(16):5163-5169.
- [3] 禹晶,徐东彬,廖庆敏. 图像去雾技术研究进展[J]. 中国图象图形学报,2011,16(9):1561-1576.  
YU J, XU D B, LIAO Q M. Image defogging:a survey[J]. Journal of Image and Graphics, 2011,16(9):1561-1576.
- [4] WANG H, HE X H, YANG X M. An adaptive foggy image enhancement algorithm based on fuzzy theory and clahe[J]. Microelectronics and Computer, 2012,29(1):32-34.
- [5] WANG R G, FU J F, YANG Z X. A novel retinex algorithm based on dark channel prior mode[J]. Acta Electronica Sinica,2013,41(6):1188-1192.
- [6] KO N, LOUIS K, STEPHEN L. Bayesian defogging[J]. Int J Comput Vis, 2012,98:263-278.
- [7] YOON I, KIM S Y, KIM D Y. Adaptive defogging with color correction in the HSV color space for consumer video surveillance systems[A]. IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)[C]. 2012.606-607.
- [8] WANG R, YANG X G. A fast method of foggy image enhancement[A]. International Conference on Measurement, Information and Control (MIC)[C].2012.883- 887.
- [9] JANG J H. Contrast-enhanced fusion of multisensor images using subband-decomposed multiscale retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21 (8):3479-3490.
- [10] JIN X B, BAO J, DU J J. Image enhancement based on selective-retinex fusion algorithm[J]. Journal of Software,2012,7(6):1187-1194.
- [11] FATTAL R, LISCHINSKI D, WERMAN M . Gradient domain high dynamic range compression[A]. Computer Graphics Proceedings,Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, SanAntonio[C]. Texas, 2002. 249-256.
- [12] KIMMEL R, ELAD M, SHAKED D, *et al.* A variational framework for retinex[J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1):7-23.
- [13] 朱立新,王平安,夏德深. 基于梯度场均衡化的图像对比度增强[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2007, 19(12):1546-1552.  
ZHU L X, WANG P A, XIA D S. Image contrast enhancement by gradient field equalization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007,19(12):1546-1552.
- [14] 李明,杨艳屏. TV-Retinex:一种快速图像增强算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2010,22(10):1777-1782.  
LI M, YANG Y P. TV-Retinex: a fast algorithm for image enhancement[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics,2010,22(10):1777-1782.
- [15] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. Properties and performance of a center/Surround retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing,1997,6(3):451-462.
- [16] RAHMAN Z, WOODDELL G A, JOBSON P J. A comparison of the multiscale retinex with other image enhancement techniques[A]. IS&T 50th Annual Conference,Final Program and Proceedings[C]. 1997. 426-431.
- [17] RUDIN L, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Phy D, 1992,60: 259-268.
- [18] MAJUMDER A, IRANI S. Perception based contrast enhancement of images[J]. ACM Transactions on Applied Perception,2007,4(3):17.
- [19] LI M. A fast algorithm for color image enhancement with total variation regularization[J]. Science China (Information Sciences),2010,(9): 1913-1916.
- [20] 张新龙, 汪荣贵, 张璇等. 雾天图像增强计算模型及算法[J]. 中国图象图形学报, 2011,16(8):1359-1368.  
ZHANG X L, WANG R G, ZHANG X, *et al.* Calculation model and algorithm in foggy image enhancement[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(8):1359-1368.
- [21] 汪荣贵, 张新龙, 张璇等. 基于 Retinex 理论的压缩域图像增强方法研究[J]. 计算机研究与发展, 2011,48(2):259-270.  
WANG R G, ZHANG X L, ZHANG X, *et al.* Image enhancement in the compressed domain based on Retinex theory[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011,48(2):259-270.
- [22] LU S L, ZOU L J, SHEN X H, *et al.* Multi-spectral remote sensing image enhancement method based on PCA and IHS transformations[J]. Journal of Zhejiang University-Science A(Applied Physics & Engineering), 2011(6):453-460.
- [23] 许欣,陈强,孙怀江等. 结合视觉感知特性的梯度域图像增强方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2009, 21(1):130-135.  
XU X, CHEN Q, SUN H J, *et al.* Perception based Gradient domain enhancement of images[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2009,21(1): 130- 135.
- [24] JAE H J, BOORYM C, SUNG D K. Sub-band de-composed multiscale retinex with space varying gain[A]. IEEE International Conference on Image Processing[C].2008. 3168-3171.
- [25] CHAMBAH M, RIZZI A, GATTA C, *et al.* Perceptual approach for unsupervised digital color restoration of cinematographic archives[A]. Color Image VIII: Processing, Hardcopy, and Applications[C]. CA, USA, 2003.138-149.

### 作者简介:



陈炳权 (1972-), 男, 湖南桃源人, 湖南大学博士生, 主要研究方向为模式识别、信号处理和智能控制。



刘宏立 (1963-), 男, 湖南常德人, 湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为高速移动通信网、模式识别。