

# 基于多峰高斯函数的直方图规定化算法

赵通 王国胤 肖斌

(重庆邮电大学计算智能重庆市重点实验室 重庆 400065)

(重庆邮电大学计算机科学与技术研究所 重庆 400065)

**摘要** 直方图均衡化作为一种特殊的直方图规定化方法,能有效地增强图像的对比度,但其对直方图活动范围的拉伸通常会造出图像过度增强。一种基于高斯函数的直方图规定化算法可提高控制对比度活动范围的能力,然而该算法处理的图像缺乏层次感。基于此,提出一种基于多峰高斯函数的直方图规定化算法,该算法首先用直方图求导方法估算出原直方图的局部峰值和方差,从而得到原直方图的多峰高斯函数,然后采用扩展后的多峰高斯函数作为目的直方图进行规定化。此算法的主要特点是改变局部峰参数,有选择地对某局部灰度范围进行对比度增强,从而拉伸整个图像对比度的活动范围。对于彩色图像增强,该算法在对彩色图像R,G,B 3个分量直方图规定化处理的基础上,根据人类视觉习惯,引入彩色恢复因子将规定化的R,G,B分量进行有效合并。实验结果和原理分析表明,该算法能有效增强图像的视觉效果,使其细节明晰,层次丰富。

**关键词** 图像增强,直方图均衡化,多峰高斯函数,求导,直方图规定化,色彩恢复因子

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.12.053

## Image Specification Algorithm Based on Multi-peaks Gaussian Function

ZHAO Tong WANG Guo-yin XIAO Bin

(Chongqing Key Laboratory of Computational Intelligence, Chongqing University of

Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(Institute of Computer Science & Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract** Histogram equalization, as a special histogram specification method, is an effective algorithm for image contrast enhancement. But it stretches the dynamic range of the image's histogram which usually makes some of the uniform regions of the output image become saturated with high light. An image specification algorithm based on Gaussian PDF has been proposed recently. However, it is unsatisfactory for image enhancement due to its worse sense of hierarchy. Based on this, an image specification algorithm based on multi-peaks Gaussian function was proposed in this paper. In this form, local-means and local-variances can be estimated respectively with the method of derivative. A key feature of the algorithm is that varying the parameters of local-variances can enhance the image contrast selectively and locally. The resulting process can broaden a range of image contrast. For color image enhancement, the proposed algorithm can be the provisions of the R,G,B three sub image of color image and then effectively combine R,G and B with the color recovery factor on the habit of human vision. Both experimental results and theoretical analysis demonstrate the proposed algorithm is optical effective.

**Keywords** Image enhancement, Histogram equalization, Multi-peaks Gaussian function, Derivation, Histogram specification, Color recovery factor

## 1 引言

图像增强技术普遍应用于图像处理中。基于直方图处理的图像增强方法一直以来是图像增强方法中广泛关注的方法。基于直方图处理的图像增强方法通常可分为直方图均衡

化和直方图规定化。直方图均衡化通过拉伸图像灰度级的动态范围,将目标图像直方图变换为均匀分布形式,达到图像的整体对比度增强的效果。经处理后的图像虽然较原图细节表现能力增强,视觉效果变好,但存在着形式单一、图像动态范围不易控、增强后的图像会出现过暗或过亮、伪轮廓等缺点。

到稿日期:2014-01-22 返修日期:2014-05-17 本文受国家自然科学基金项目:不确定性概念内涵与外延的双向认知计算理论模型与方法(61272060),国家自然科学基金项目:退化图像不变性识别(61201383),重庆市基础与前沿研究计划重点项目:计算认知理论模型与方法研究(cstc2013jjB40003),重庆市基础与前沿项目:退化图像不变特征构造与识别研究(cstc2013jcyjA40048)资助。

赵通(1986-),男,硕士生,主要研究方向为智能信息处理,E-mail:hbjszt07@163.com;王国胤(1970-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算智能、云计算智能软件与系统、智能信息处理及应用智能化软件;肖斌(1982-),男,博士,副教授,主要研究方向为图像增强与复原、图像分析与识别、数字水印、信息隐藏。

在此基础上,研究人员提出了很多改进方法:文献[1]采用直方图排序的方法来增加图像细节的表现能力;考虑到局部直方图的信息,文献[2-4]构造“累积函数”实现灰度级的准确映射以提高图像的细部特征;文献[5]首先对图像进行常规的直方图均衡化处理,然后对处理后所形成的图像灰度在一个较大的灰度范围内进行映射,最后对结果进行适当的亮度修正,以保证图像有较高的对比度;文献[6]把直方图作为单独的聚类,通过设置聚类权值的3个参数来达到保护图像的亮度和增强视觉效果的目的;文献[7]在直方图上引入模糊概念,使图像的亮度提高,对比度增强;考虑到像素空间邻域信息,文献[8]提出了基于二维直方图均衡化的图像增强算法,从而提升了增强后图像的细节表现能力。

直方图规定化是通过将目的直方图约束成某个特定的形状,有选择地增强某个灰度值范围内的对比度或使图像灰度值分布满足规定的要求来增强视觉效果<sup>[9]</sup>。相对于直方图均衡化盲目地使目标图像直方图灰度级均匀分布,直方图规定化方法更为灵活有效,如果将直方图规定化中的目标直方图各灰度级分布均匀,则直方图规定化方法可退化为直方图均衡化方法。因此,直方图规定化方法近几年来得到了很多学者的关注。文献[10]提出以图像的灰度平均值和对比度作为高斯函数的期望和方差,将图像的直方图规定成标准正态分布,该算法不需人工干预、实时性较好,解决了传统的直方图规定化存在的主观性、试凑性问题。但其单峰性和部分灰度级的合并现象使得输出图像的细节丢失,层次感差。Rafael C. Gonzalez 在文献[11]中提出用双峰高斯函数来进行规定化处理,通过试凑性地设置两组高斯函数的期望和方差来拉伸图像的动态范围。该算法在一定程度上减弱了目标图像的细节丢失问题,但对于细节十分丰富的图像,还是存在着图像细节丢失的问题。在总结现有算法的基础上,本文提出一种多峰高斯函数的直方图规定化算法,该算法首先对原直方图求导拟合出直方图的多峰高斯函数,通过改变局部峰的均值和方差来构造目的直方图,从而进行直方图规定化。实验结果表明,经基于多峰高斯函数的直方图规定化算法处理后的图像对比度增强,层次分明,具有较好的视觉效果和实时性。

## 2 多峰高斯函数的直方图规定化算法

### 2.1 多峰高斯函数的直方图规定化灰度图像增强

对于一幅灰度级数为  $L$  的输入图像,其直方图可以用函数  $y_i = f(x_i)$  表示,根据求导的物理性质,分别对该函数进行一阶导数和二阶导数运算,如果满足式(1)、式(2):

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = 0 (1 < i < L) \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} < 0 (1 < i < L-1) \quad (2)$$

则可确定  $x_i$  为某一局部峰的峰值点。其中,  $x_i$  表示直方图的灰度级,  $y_i$  表示第  $i$  级的直方图。在求出局部峰值点的基础上,可以通过 3dB 法求出原始直方图该局部峰的方差  $\sigma$ 。在实际中,由于图像直方图变化比较剧烈,因此一般在求均值和方差前,需要对原始直方图进行一定窗口大小的平滑预处理。在得到原始图像直方图的局部峰值信息的基础上,我们定义如下多峰高斯函数:

定义:随机变量  $X$  的多峰高斯概率密度分布函数为:

$$f(x, n) = D_0 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (-\infty < x < +\infty) \quad (3)$$

其中,  $D_0$  为消除图像边缘效应而增设的常数,本文取经验值 0.002,  $\mu_i (i=1, \dots, n)$  和  $\sigma_i (i=1, \dots, n)$  为常数,  $-\infty < \mu_i < +\infty, \sigma_i > 0 (i=1, \dots, n)$ , 则称  $X$  服从参数为  $\mu_i (i=1, \dots, n)$  和  $\sigma_i (i=1, \dots, n)$  的多峰高斯函数分布,记为  $X \sim N(\mu_i, \sigma_i, i=1, \dots, n)$ 。

为方便调控该多高斯函数中各子高斯函数的均值和方差,本文利用数组  $\alpha$  和  $\beta$  分别存储局部均值和方差,数组  $X$  存储均值相对应的峰值增益。其多峰高斯函数概率密度函数为:

$$f(x, n) = D_0 + \sum_{i=0}^n X_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta(i)\sigma_i} e^{-\frac{(x-\alpha(i))^2}{2[\beta(i)\sigma_i]^2}} \quad (-\infty < x < +\infty) \quad (4)$$

利用式(4)循环迭代,拟合出原始图像的多峰高斯函数,通过改变  $\beta(i)$  的值来改变局部峰的方差。然后利用式(4)特定形状构造直方图规定化概率密度函数  $p_z(z_i)$ 。

图1给出了经本文算法估计的原始图像直方图多峰高斯函数的结果,图1(a)为原始直方图,图1(b)为其求一阶导数后的曲线,图1(c)为对其求二阶导数后的曲线,图1(d)为经本文提出的算法拟合后的曲线,图1(e)为对拟合后的曲线进行方差扩大2倍后的曲线。从图1可以看出,本文算法模拟出的多高斯函数很好地体现了原始直方图信息,在此多高斯函数的基础上进行直方图规定化后的结果能最多地保持图像原始细节信息<sup>[12]</sup>。另外,本文提出的算法具有可调控的能力,即通过选择不同的扩展因子  $\beta(i)$  就可以获得对不同峰进行增强后的输出图像,在工程应用中为用户提供了选择与调控的手段。

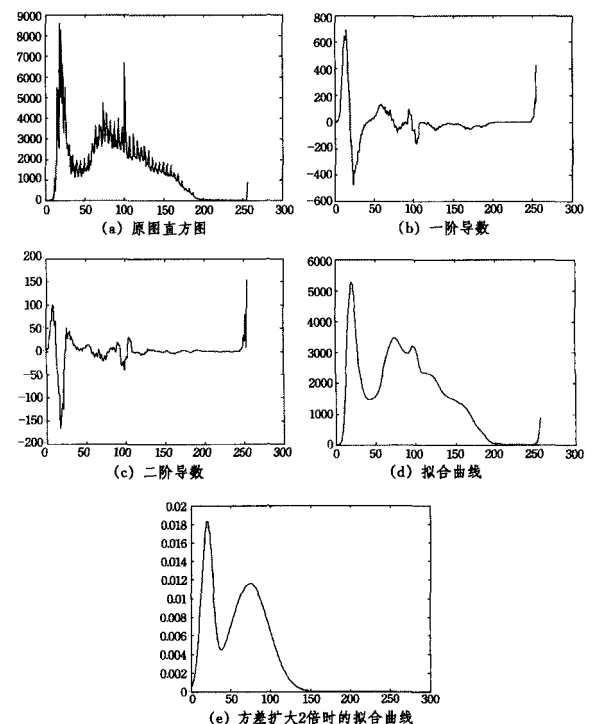


图1 对原始直方图拟合处理

因图像的灰度值是离散的数据,存在取整误差,直方图规定化采取什么样的对应法则显得尤其重要。GML 映射相比

其他映射规则会得到更接近规定化直方图的结果<sup>[11]</sup>。首先原始直方图均衡化的映射公式为：

$$s_k = T(r_k) = \sum_{r=0}^k p_r(r) = \sum_{r=0}^k \frac{n_r}{n} \quad (r, k=0, \dots, L-1) \quad (5)$$

$$r_k = T^{-1}(s_k) \quad (6)$$

根据式(5)、式(6)得到映射关系  $r_k \rightarrow s_k$ 。规定化后直方图均衡化映射公式为：

$$v_l = G(z_l) = \sum_{z=0}^l p_z(z) = \sum_{z=0}^l \frac{n_z}{n} \quad (z, l=0 \sim L-1) \quad (7)$$

$$z_l = G^{-1}(v_l) \quad (8)$$

根据式(7)、式(8)得到映射关系  $z_l \rightarrow v_l$ 。然后找到  $v_l - s_k \geq 0$  时的最小  $v_l$ ，记录  $l$  和  $k$  的值，根据式(6)和式(8)计算出  $z_l$  和  $r_k$ ，最终得到直方图规定化的映射关系： $r_k \rightarrow z_l$ 。

综上所述，基于多峰高斯函数的直方图规定化算法流程如图2所示。

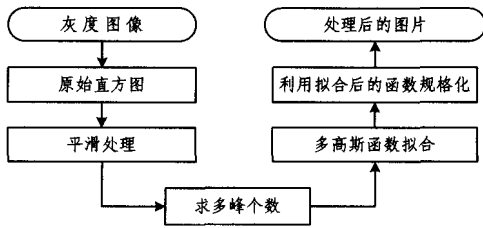


图2 灰度图像增强流程

## 2.2 基于多峰高斯函数的直方图规定化的彩色图像增强

在传统的采用直方图均衡化方法对彩色图像进行增强的过程中，主要是将彩色图像分成  $R, G, B$  3 幅子图像<sup>[13]</sup>，再分别对每个子图进行直方图均衡化，然后对 3 幅增强后的子图像进行合并。该方法因  $R, G, B$  分量子图的灰度级数的比例发生变化，所以不可避免地会导致处理后的图像色彩失真。为尽可能地保留增强前原图像的色彩信息，本文引入色彩恢复因子  $C$ ，其表达式为：

$$c_r(i, j) = f[A * I_r(i, j)] \quad (9)$$

$$I_r(i, j) = I_r / \sum_{n=1}^N I_n(i, j) \quad (r=R, G, B) \quad (10)$$

其中， $c_r$  表示彩色通道的色彩恢复因子， $I_r = (i, j)$  表示第  $r$  个分量子图的灰度因数总数， $N=3$ ，即  $R, G, B$  3 个分量， $\sum_{n=1}^N I_n(i, j)$  表示原彩色图像中  $R, G, B$  各个分量的灰度级之和。本文提出在对数域  $f = \log(\cdot)$  中进行处理，其表达式为：

$$c_r(i, j) = \log[1 + A * I_r(i, j) / \sum_{n=1}^N I_n(i, j)] \quad (11)$$

其中，参数  $A$  的选择可根据实验进行调节，本文实验选择经验值  $A=6$ ，此时效果最好。

设  $R(i, j), G(i, j), B(i, j)$  分别表示输入图像的  $R, G, B$  3 个分量子图的灰度级数， $R_1(i, j), G_1(i, j), B_1(i, j)$  分别表示经过直方图增强后的图像中的  $R, G, B$  3 个分量子图的灰度级数，利用色彩恢复因子可保证： $R(i, j):G(i, j):B(i, j) = R_1(i, j):G_1(i, j):B_1(i, j)$  成立。在对增强后的子图合并时，该系数对各分量进行有机调节，使得合并后的图像更加符合人类的视觉习惯。

本文分别用基于多峰高斯函数的直方图规定化算法来处理彩色图像的  $R, G, B$  3 个分量子图，根据算出的各自比例因子  $C$ ，合并 3 个分量，即完成彩色图像的增强处理。其流程如图3所示。

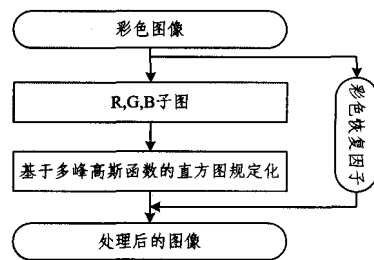


图3 彩色图像增强流程

## 3 实验结果与分析

### 3.1 灰度图像的增强效果

为了说明算法的实验效果，本实验采用诸多论文中常采用的花蕊(500 \* 500)和 breast(482 \* 570)两张图片进行了算法验证(环境:酷睿四核 CPU, 内存 2GB, MATLAB 编程)，并与直方图均衡化方法、基于单高斯函数的直方图规定化算法、基于双峰高斯函数的直方图规定化算法进行了对比，实验结果如图4和图5所示。

图4(a)为原始图像，图4(g)为图4(a)的直方图，从中可以看出分布在低灰度范围的像素值较多。图4(h)是对图4(a)直方图均衡化处理后的直方图，其灰度级均匀分布在两端，对比度的活动范围被简单拉伸，图像整体亮度得到增强。但由图4(h)可看出原图低灰度层的像素移到了高灰度层上，导致图像部分细节信息增强过度，图4(a)的层次感缺失，视觉效果差。

图4(c)为文献[5]提出的基于单峰高斯函数的直方图规定化算法的效果。其中，方差扩展因子扩大4倍。比较图4(b)可看出，图4(c)整体亮度适中，避免了图4(b)亮度过强的缺点，但图4(c)的对比度不高，分布在高灰度层的像素较少，这一点在图4(i)中得到验证。对图4(a)使用基于双峰高斯函数的直方图规定化算法后的结果如图4(d)所示。图4(h)、图4(i)和图4(j)可以验证以下3点：(1)图4(i)和图4(j)都可以控制对比度的活动范围，克服了图4(h)盲目拉伸对比度活动范围的缺点；(2)图4(c)和图4(d)克服了图4(b)亮度趋于饱和的缺点，又继承了图4(b)的优点，显示出花蕊的细节信息特征；(3)比较两者的直方图分布特征可看出，图4(d)较图4(c)对比度增强、层次感丰富。但基于双峰高斯函数的直方图规定化算法需要人工干预，试凑性地设置局部峰参数，实时性较差。

图4(e)和图4(f)为本文算法最后一个峰的方差扩展因子分别增大4倍和10倍时的效果，相对于文献[5]算法，该算法有选择地增强局部灰度范围内的对比度。比较图4(j)的直方图可看出，图4(k)有较合理的直方图分布，局部峰附近的像素点的个数增加，并且保留了图4(g)直方图分布的特征，图像表现出丰富的层次感，避免了因图像局部区域增强过亮或过暗造成的图像层次感不强的缺点。相较于图4(b)、图4(c)和图4(d)，图4(e)花蕊的细部信息明显，层次丰富。当扩展因子的倍数不同时，处理后的效果迥异，图4(f)较图4(e)对比度增强、层次感丰富，因为4(f)的局部峰的扩展因子倍数较图4(e)大，对比度的活动范围较宽，从图4(k)和图4(l)两直方图分布特征可看出，图4(l)分布在高灰度层的像素点个数增多。

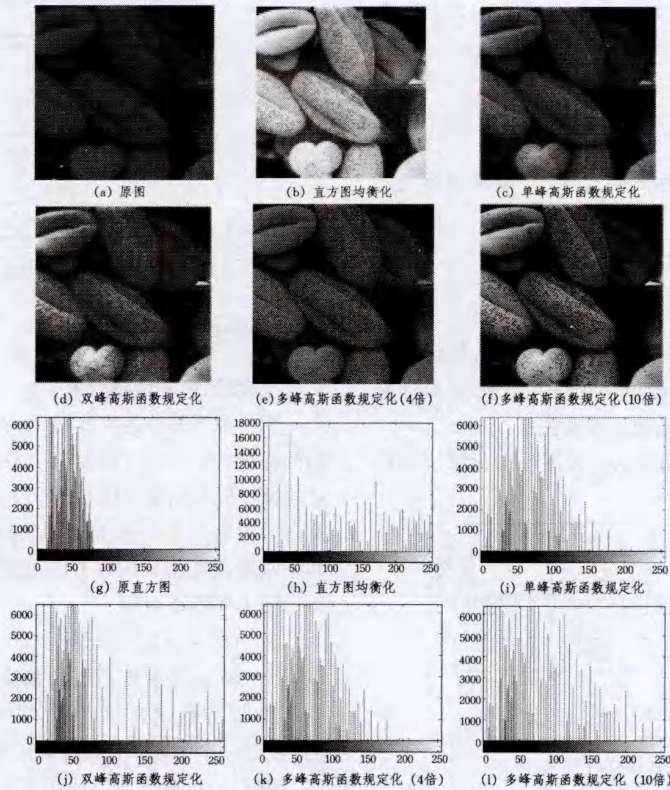


图 4 4种算法处理后的图片和相应的直方图

图 5 是 4 种算法对 breast 图像处理的结果,图 5(b)对图 5(a)是直方图均衡化处理的结果,处理后的图片亮度和对比度增强过度,因图片中的细节增强过度导致视觉效果较差。图 5(c)显示单峰高斯函数直方图规定化算法可控制对比度的活动范围,提高图片的可视化。图 5(c)相应的直方图比图 5(a)的直方图居中,图片的亮度和对比度较直方图均衡化得到控制。图 5(d)是双峰高斯函数直方图规定化算法处理的

结果,图片中的细节虽较图 5(c)丰富,但试探性地设置局部峰的参数导致图片的实时性较差。图 5(e)是本文算法处理的结果,从图 5(e)的直方图可观察到:多峰高斯函数直方图规定化算法可有效保持原图直方图的轮廓,并且控制直方图由低到高均匀分布,使得图片对比度的活动范围得到展览,图片的视觉效果增强。除此之外,图 5(e)的纹理更加清晰,亮点更加显明可见。

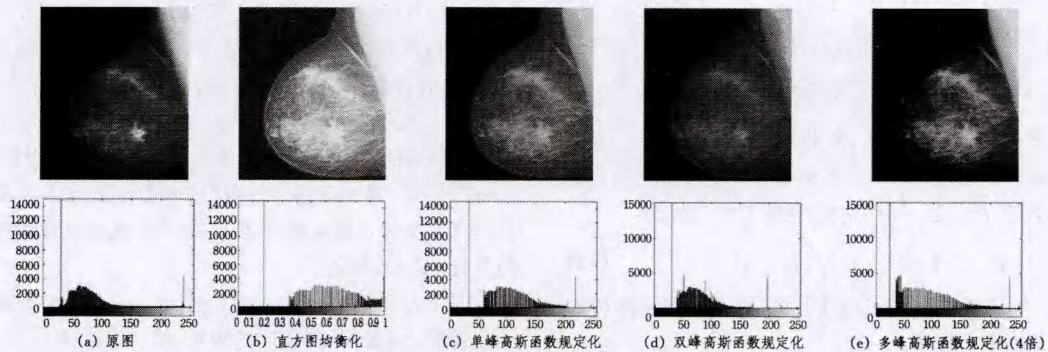


图 5 4种算法处理后的图片和相应的直方图

表 1 图像增强处理的指标对比表

类型	原始图像	均衡化	单峰高斯	双峰高斯	多峰高斯	
			函数规定化	函数规定化	函数规定化	
花蕊	平均灰度	38.74	128.601	42.460	62.570	67.579
	对比度	91.78	1634.00	146.212	734.141	902.881
Breast	平均灰度	66.71	128.317	65.053	64.249	72.292
	对比度	696.3	1555.1	764.15	440.318	1050.8

需要说明的是,从理论上,基于多峰高斯函数的直方图规定化算法可以利用扩展因子  $\beta(i)$  来改变任意峰的方差,有选

择地改变  $\mu_i$  附近的像素个数。当同时增加  $\sigma_i$  的扩展因子  $\beta(i)$  时,多峰高斯函数可变为单峰高斯函数,当无限增大时,其处理效果将和直方图均衡化的效果近似相同。为使实验效果更加直观,本文利用平均灰度值和对比度作为对比指标说明,如表 1 所列。

通过分析 4 种增强算法处理后图像的平均灰度值和对比度可知,基于多峰高斯函数的直方图规定化算法处理后的图片细部特征明显,视觉效果较好。直方图均衡化处理后的图像虽亮度明显增强,但因明和暗的区域均被盲目增强,图像细部特征的表现能力下降。单峰和双峰高斯函数的直方图规定

化算法处理后的图像虽不同程度地体现了图像的细节信息,提高了原图的平均灰度值,但前者对比度较低,图像饱和度不够;后者因双峰性的特征,可有选择地控制对比度活动范围,但因需人工工凑地设置其局部峰的参数,实时性较差,难以工程应用中被用户利用。基于多峰高斯函数的直方图规定化算法根据原始直方图拟合出多峰高斯函数,其多峰性的特点表明灰度级的活动范围可被有效控制,并可有选择地增加局部灰度范围内的像素值。经该算法处理后的图像平均灰度值不但得到提高,而且对比度也明显改善,花蕊的细节表现能力增强,视觉效果较好,利于观察。

为测试本文算法中扩展因子对图像增强效果的影响和扩展因子的选取原则,我们绘制出图像对比度和灰度平均值的曲线图。图6是拉伸多峰高斯函数中任意一个峰的方差所得到的对比度和灰度平均值的变化曲线。此曲线表明:局部峰的方差扩展因子增加到20倍之前,对比度和灰度平均值的大小随着局部峰的扩展因子增大而增大;若倍数继续增大,对比度和灰度平均值的大小保持稳定不变,此时的图像和经直方图均衡化处理的效果相似。

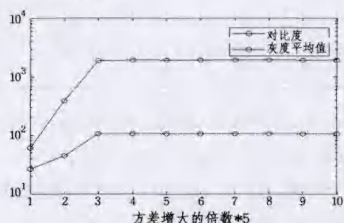


图6 对比度和灰度平均值曲线图

### 3.2 彩色图像增强的效果

基于多峰高斯函数的直方图规定化算法主要通过调节局部峰的方差扩展因子有选择地扩展对比度的活动范围,来表现图像的细部特征。为验证该算法的有效性,本文测试4张标准的彩色图片(大小分别为720\*480、768\*512、768\*512、768\*512)。为测试算法的实时性,表2列出4种算法的时间消耗。从4种算法的时间消耗来看,本文提出的算法有较高的运行效率,能满足实时场合图像增强需要。

表2 不同算法的时间开销(单位:s)

图片	直方图均衡化	单峰高斯函数规定化	双峰高斯函数规定化	多峰高斯函数规定化
Ivy	1.3434	1.8147	2.8766	1.6146
kodim1	1.8323	2.0266	3.4104	1.8321
kodim2	1.6372	1.7959	3.2622	1.5740
kodim3	1.7995	1.9254	3.108	1.7835
平均值	1.6531	1.8906	3.1643	1.7010

图7(b)为经过直方图均衡化处理的结果,图片整体偏亮,对比度相对较高,其中部分亮度过度增强,细节信息损失严重,视觉感较差(Ivy中墙壁过亮,kodim1中脸部暗淡)。图7(c)较原图亮度适中,避免了图7(b)对比度过度拉伸的现象,但对比度略低使得处理后的图片kodim2和kodim3的层次感不丰富。图7(d)中对对比度的范围得到有效控制,图片的整体效果和饱和度较好,其中Ivy叶子的颜色较其他算法处理的鲜艳;kodim1中衣服和岸边树木的色彩较单峰高斯函数规定化处理的丰富,增加了图片的可视化程度;kodim3中蓝天和白云的颜色逼真,树木的细节信息明晰,海岛的整体饱和

度和视觉效果较好;kodim2经过直方图均衡化处理的结果,屋顶和河边部分青草颜色较白,信息丢失严重;图7(c)较图7(b)较好地保留了房屋的细部特征,但房屋的整体对比度不够,层次不够清晰。观察图7(d)可看出:图7(d)像整体对比度的活动范围得到展宽,房屋的细部特征表现能力提高,图像层次感丰富。饱和度增强使得图片具有美的视觉效果。



(a) 原图像 (b) 直方图均衡化 (c) 单峰高斯函数规定化 (d) 多峰高斯函数规定化

从上到下图像名称是:Ivy, kodim1, kodim2, kodim3

图7 3种算法处理彩色图像的结果

信息熵可有效评估处理后图片的对比度,其值越高,相应的图片对比度越高。

$$p = -\sum_{k=0}^{L-1} p(k) \log_2 p(k) \quad (12)$$

上述算法处理后的图片,经式(12)计算出的熵值如表3所列。由于熵值越高,图像的对比度越高,表3列出的熵值说明:经直方图均衡化处理后的图片的熵值最大,相应的图片对比度最高。正是因为直方图均衡化盲目地拉伸图片灰度级的活动范围,图片的对比度虽然得到展宽,但图片失真现象严重(图7(b)中墙壁、岸边草、云彩部分显示不自然的白色)。比较表3最后两列的熵值可得出:经本文处理后的图片较单峰高斯函数规定化处理后的图片熵值高,相应的图片对比度伸展适中,图片饱和度和视觉效果较好(比较图7(c)和图7(d)可得出)。表3最后一行(熵的平均值)表明:经多峰高斯函数直方图规定化处理的图片较直方图均衡化处理后的熵值低,但高于单峰高斯函数直方图规定化处理后的熵值。该值表明多峰高斯函数直方图规定化处理的图片避免了对比度过度增强的现象,同时较单峰高斯函数规定化保留了原图的细部特征,整体视觉效果较好。通过分析表3的熵值,总结出:本文算法在提高图片对比度的同时还美化了图片的视觉效果。

表3 3种算法处理后的熵值

图片	原始图像	直方图均衡化	单峰高斯函数规定化	多峰高斯函数规定化
Ivy	7.1857	7.9407	7.1438	7.3901
kodim1	6.9782	7.4655	7.4338	7.8283
kodim2	7.1884	7.8439	7.6404	7.4057
kodim3	7.1857	7.9012	7.6404	7.7120
平均值	7.1345	7.7878	7.4646	7.5840

**结束语** 本文提出的基于多峰高斯函数的直方图规定化算法,利用对直方图求导的方法估算出图像局部峰的均值和方差并拟合出一个多峰高斯函数。通过扩展因子调节局部峰的方差得到新的图像转换模型,并以此模型对原直方图进行

规定化,最后实现图像的增强。该算法解决了传统直方图均衡化方法对比度活动范围不易控制的问题。其最大优点是可任意改变局部峰的方差,有选择地控制图像对比度的活动范围,这不仅可以增加图像的平均灰度值和对对比度,还可以有效提高图像细部特征的表现能力。实验证明,经本文算法处理后的图像饱和度较好、层次丰富、利于观察。算法因没有复杂的数学计算,对图像增强简单、有效,所以可应用在实时性较高的工程中。

### 参 考 文 献

[1] Wang Qian, Chen Li-ya, Shen Ding-gang. Fast Histogram Equalization for Medical Image Enhancement [C]//British Columbia, Canada; 30th Annual International IEEE EMBS Conference Vancouver, 2008; 2217-2220

[2] Wang Zhi-ming, Tao Jian-hua. A Fast Implementation of Adaptive Histogram Equalization[C]//IEEE ICSP2006 Proceedings, China, 2006; 16-20

[3] Stark J A. Adaptive Image Contrast Enhancement Using Generalizations of Histogram Equalization [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2000, 9; 889-896

[4] Coltuc D, Bolon P, Chassery J M. Exact Histogram Specification

[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2006, 15(5); 1143-1152

[5] 张懿,刘旭,李海峰.自适应图像直方图均衡算法 [J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(4): 630-633

[6] Sengge N, Choi H. Brightness Preserving Weight Clustering Histogram Equalization [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(3): 1329-1337

[7] Sheet D, Garud H, Suveer A, et al. Brightness preserving dynamic fuzzy histogram equalization [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2009, 18(9): 1921-1935

[8] Celik T. Two-dimensional histogram equalization and contrast enhancement [J]. Pattern Recognition, 2012, 45(10): 3810-3824

[9] 孔军,蒋敏,汤心溢.多均值正态分布图像规定化处理 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(21): 10-12

[10] 肖斌,王暄,毕秀丽,等.一种基于高斯函数的直方图规定化算法 [J]. 铁道学报, 2006, 28(4): 119-122

[11] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. Digital Image Processing using Matlab [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003

[12] Celik T, Tjahjadi T. Automatic Image Equalization and Contrast Enhancement Using Gaussian Mixture Modeling [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2012, 21(1): 145-156

(上接第 233 页)

显然,在模糊量化算子参数设置以“一半以上”和“多数”为原则时,开发水能的方案评估值大于沼气的方案评估值;依然在这两个原则下,在缩小了  $\omega$  参数设置差,扩大了  $\omega'$  的区间范围后,水能的方案评估值接近于沼气的方案评估值;当把模糊量化原则设置为采用全部专家评估值、侧重中等评估值、同时各属性参数值平均化时,这也正是本节云归一化运算的原则,最终得到沼气方案评估值大于水能方案评估值,与集对云决策方法的运算结果相同。之所以随着模糊量化算子参数设置的变化而出现如此方案评估值的变化,主要是因为沼气的开发方案受不确定性因素的影响是最小的,其次是水能的开发方案,而受不确定性因素影响最大的是太阳能的开发方案。这一点在集对评估运算方案方程中显而易见,表 1 中方案值的变化也说明了这一点。

**结束语** 文章以国家科技支撑计划课题“农村新能源开发利用规划”为研究任务,借鉴云模型和集对分析的研究思想,研究了一种新的多属性群决策方法——集对云决策法,并用其构建了可再生能源开发决策模型。由仿真实验及其实验分析可知,集对云决策法在不确定性的信息处理方面,尤其是模糊性与随机性并存问题的处理方面,具有明显优势,优于普遍应用的模糊二元语义决策法。而且,在决策中,属性个数往往是专家根据研究任务由经验确定的,显然,集对云决策法的不确定性信息处理能力决定它将不受属性个数的影响。集对云决策法是一种有效的多属性群决策方法,能够较好地完成能源开发利用规划任务。

### 参 考 文 献

[1] Liang Xue-chun, Chen Sen-fa. Multiple attribute decision making

method based on trapezoid fuzzy linguistic variables[J]. Journal of Southeast University, 2008, 24(4): 478-481

[2] 吴爱燕,于重重,曾广平,等.基于自然语言的模糊多属性云决策方法研究[J]. 计算机科学, 2010, 37(11): 199-202

[3] Martinez, Luis. Linguistic decision making: Tools and applications[J]. Information Sciences, 2009, 179(14): 2297-2298

[4] Sandra B-A. Linguistic markers of decision processes in a problem solving task[J]. Cognitive Systems Research, 2009, 10(2): 102-123

[5] Alonso S. Group decision making with incomplete fuzzy linguistic preference relations[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2009, 24(2): 201-222

[6] 万树平.基于多维偏好分析的三角模糊数型多属性决策方法 [J]. 统计与决策, 2009(1): 42-43

[7] Wei Gui-wu. Grey relational analysis method for triangular fuzzy number-based multiple attribute decision making with preference information on alternatives[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(8): 1489-1492

[8] Alonso S. Group decision making with incomplete fuzzy linguistic preference relations[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2009, 24(2): 201-222

[9] 谭远玲,褚学宁,张在房.基于粗糙集的改进重要度绩效分析法 [J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(7): 1374-1378

[10] 姜艳萍,樊治平.基于二元语义符号运算的群决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(11): 1373-1375

[11] 李德毅,杜鹁.不确定性人工智能[M]. 北京:国防工业出版社, 2005

[12] 吴爱燕,曾广平,涂序彦.多层云建模方法的研究及其应用[J]. 计算机科学, 2012, 39(1): 162-166