

可调直方图均衡化的正则解释及其改进

吴成茂

(西安邮电学院电子工程学院,陕西西安 710121)

摘 要: 将直方图均衡化看作典型的不适定问题,提出了可调直方图均衡化的正则化解释,以及为了获得较好的图像增强效果并给出其改进措施.首先,对可调直方图均衡化方法所对应的目标函数进行简化,得到了基于信息能量作为正则项的可调直方图均衡化崭新解释;其次,考虑到信息熵与信息能量之间呈对偶关系,于是获得了一种基于信息熵作为正则项的可调直方图均衡化新模型;再次,利用图像灰度级概率分布信息提出了可调直方图均衡化中正则项系数选取的方法;最后,为了改善可调直方图均衡化方法实现图像增强的效果,给出了基于灰度级累计概率修改的可调直方图均衡化改进方法.实验结果表明,可调直方图均衡化方法的修改是有效的.

关键词: 图像增强;直方图均衡化;不适定问题;信息能量

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 06-1278-07

Regularization Explanation of Adjustable Histogram Equalization and Its Improvement

WU Cheng-mao

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China)

Abstract: In view of histogram equalization regarded as typical ill-posed problem, the adjustable histogram equalization method is explained by regularization theory, and its improvement is proposed in order to obtain the better effect of image enhancement. Firstly, the objective function of adjustable histogram equalization method is simplified and explained by means of information energy as a regular item. Secondly, in consideration of the dual relationship between information entropy and information energy, the new adjustable histogram equalization model based on information entropy as regularization is obtained. Thirdly, the regular item coefficient choosing method of adjustable histogram equalization is presented by means of information entropy or energy of gray levels probability distribution. Finally, the adjustable histogram equalization improvement method based on modifying cumulative probability of gray levels is proposed in order to improve the image enhancement effect of traditional histogram equalization method. Experimental results show that the improvement method of adjustable histogram equalization is effective.

Key words: image enhancement; histogram equalization; ill-posed problem; information energy

1 引言

图像增强是图像预处理中的基本方法之一,它对于提高图像质量起着极其重要的作用.目前,图像增强大致可分为空域方法和频域方法,其中空域法是以对图像像素直接处理为基础;频域法是以修改图像变换域(如小波域、DCT域、曲线波域等)系数为基础,其人为因素较多地干预变换的参数选取,并且计算量偏大而不适合实时场合应用.当前,常用的空域图像增强法有灰度变换法、直方图修正法、模糊增强法、Retinex法、仿生增强法等,其中直方图均衡化修正法在图像增强中得到了广

泛研究和应用,此方法大体可分为两类:其一是全局直方图均衡化增强法^[1,2],能实现图像整体概貌增强;其二是局部直方图均衡化增强法^[3~6],能更好地增强图像的局部细节.但是,这两类增强方法各有优缺点,如何将二者结合起来探讨图像增强是目前需要研究的重要课题.另外,从图像结构本身来看,可将图像增强看成是典型的不适定问题,已提出了基于信息熵约束的图像增强方法^[7,8],以及考虑像素局部邻域空间信息的图像增强方法^[9,10]等,这些方法本质均是将不适定图像增强问题转化为适定问题来研究.最近,文献[11,12]提出了图像

直方图所对应的灰度级概率与灰度级均匀分布概率相结合的可调直方图均衡化增强法,它能改善传统直方图均衡化图像增强的效果,使其增强后图像与原始图像在亮度方面有更大的相似性;但未揭示该类增强方法的本质而不利于其广泛应用.从图像增强属于典型的不适定问题角度出发,本文首先揭示了这类可调节直方图均衡化方法的本质是利用信息能量作为约束条件并将直方图均衡化增强这一不适定问题转化适定问题的正则化处理方法;其次给出了信息能量或信息熵作为可调直方图均衡化正则项的正则项系数选取方法;最后提出了改善可调直方图均衡化增强效果的灰度级累积概率变换方法.

2 信息能量

针对有限论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 上某事件 A 所对应的概率分布记为 $P = (p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n)$ 且满足 $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ 和 $0 \leq p_i \leq 1 (i = 1, 2, \dots, n)$. 1948 年, 香农提出了描述概率分布不确定性程度的信息熵表达式为

$H(P) = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$, 该信息熵具有如下典型性质:

(1) 若 $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, p_i = \frac{1}{n}$, 则信息熵 $H(P)$ 获得最大值为 $\ln n$;

(2) 若 $\exists l \in \{1, 2, \dots, n\}$ 使得 $p_l = 1$, 则信息熵 $H(P)$ 获得最小值为 0.

Onicescu^[13] 于 1966 年提出了描述概率分布确定性程度的信息能量表达式为 $E(P) = \sum_{i=1}^n p_i^2$, 该信息能量具有如下典型性质:

(1) 若 $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, p_i = \frac{1}{n}$, 则信息能量 $E(P)$ 获得最小值为 $1/n$;

(2) 若 $\exists l \in \{1, 2, \dots, n\}$ 使得 $p_l = 1$, 则信息能量 $E(P)$ 获得最大值为 1.

从上述信息熵和能量所对应表达式的定义来看, 二者呈对偶关系, 一个是度量概率分布的随机不确定性程度, 而另一个是度量概率分布的确定性程度, 它们已成为信息论中最基本的概念.

3 直方图均衡化原理

针对大小为 $m \times n$ 的灰度图像 G , 其任意位置 $(x, y) (1 \leq x \leq M, 1 \leq y \leq N)$ 像素灰度值大小为 $g(x, y) (0 \leq g(x, y) \leq L-1)$, 各级灰度出现概率为 $h(i) (i = 0, 1, \dots, L-1)$ 表示为

$$h(i) = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \delta(i - g(x, y)), i = 0, 1, \dots, L-1$$

$$\text{这里 } \delta(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases}$$

灰度图像 G 实现直方图均衡化增强的原理可采用如下数学模型描述为

$$\min \sum_{i=0}^{L-1} (h^*(i) - h(i))^2 \quad (1)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq h^*(i) \leq 1 \text{ 且 } \sum_{i=0}^{L-1} h^*(i) = 1$$

求解 $h^*(i) (i = 0, 1, \dots, L-1)$ 并使图像灰度级 $i = 0, 1, \dots, L-1$ 满足下列不等式

$$\sum_{l=0}^i h^*(l) - \frac{g(i)}{L} \geq 0$$

这里函数 $g(i) (i = 0, 1, \dots, L-1)$ 表示增强前灰度级 i 与增强后灰度级 $i^* = g(i)$ 之间的映射关系; 但函数 $g(i)$ 可能不是从集合 $\{0, 1, \dots, L-1\}$ 到集合 $\{0, 1, \dots, L-1\}$ 的满映射和单值映射, 如可能出现 $g(i) = g(j) (i \neq j)$ 情况. 传统直方图均衡化图像增强中灰度级修改表达式为

$$i^* = g(i) = \lfloor \sum_{l=0}^i h^*(l) \cdot L \rfloor \quad (2)$$

另外, 满足数学模型(1)的灰度级概率 $h^*(i) (i = 0, 1, \dots, L-1)$ 并不是唯一的, 这就导致传统直方图均衡化增强结果的多样性, 只不过常选取 $h^*(i) = h(i) (i = 0, 1, \dots, L-1)$; 但是, 它所对应的直方图均衡化增强结果并不一定令人满意, 有时反比增强前图像效果更差, 甚至增强前后图像视觉感知相差甚远. 因此, 将直方图均衡化增强看成是典型的不适定问题是合理的^[14].

4 可调直方图及其正则解释

可调直方图最初是由朝鲜学者 Byoung-woo Yoon 提出的^[11], 其具体描述为

针对任意位置 (x, y) 的局部邻域 A_{xy} , 其局部直方图定义为

$$h_{xy}(k) = \sum_{(u,v) \in A_{xy}} (r_{uv} \cdot \delta(g(u, v), k) + (1 - r_{uv}) \cdot \frac{1}{L}), \quad k = 0, 1, \dots, L \quad (3)$$

这里调节系数 $r_{uv} \in [0, 1]$, 一般选取位置 (u, v) 所对应邻域像素信息将其构造为

$$r_{uv} = \alpha (1 - e^{-\gamma s_{uv}}), \quad \alpha \in [0, 1], \gamma \geq 0, s_{uv} = \frac{\frac{1}{8} \sum_{a=u-1}^{u+1} \sum_{b=v-1}^{v+1} |g(a, b) - g(u, v)|}{\frac{1}{9} \sum_{a=u-1}^{u+1} \sum_{b=v-1}^{v+1} g(a, b)}.$$

最近, 格鲁吉亚学者 Tarik Arici^[12] 提出了可调全局直方图均衡化图像增强新方法, 它将数学模型(1)修改为

$$\min \sum_{i=0}^{L-1} (h^*(i) - h(i))^2 + \lambda \sum_{i=0}^{L-1} (h^*(i) - \frac{1}{L})^2 \quad (4)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq h^*(i) \leq 1 \text{ 且 } \sum_{i=0}^{L-1} h^*(i) = 1$$

这里 λ 为调节因子. 若 $\lambda = 0$ 则该模型简化为传统直方图均衡化增强所对应的数学模型(1); 若参数 $\lambda \rightarrow +\infty$ 则增强前后两图像完全相同, 此时直方图均衡化增强失去了意义. 因此, 可调直方图均衡化增强图像的本质是传统直方图均衡化增强和图像完全不增强二者之间的折中考虑, 该方法可以避免传统直方图均衡化增强结果中出现亮度过亮或过暗现象.

模型(4)相对模型(1)而言, 仅对目标函数增加了一个约束项, 该约束项反映了图像直方图所对应的灰度级概率 $h^*(i) (i=0, 1, \dots, L-1)$ 与灰度级概率呈均匀分布之间的接近程度. 对该数学模型(4)构造拉格朗日乘子函数求偏导数并令其等于零, 可获得其最小值所对应的解为

$$h^*(i) = \frac{1}{1+\lambda} h(i) + \frac{\lambda}{1+\lambda} \cdot \frac{1}{L} \quad (5)$$

从可调直方图表达式(3)和式(5)来看, 尽管它们针对图像范围是局部与整体之差; 但修改本质是完全相同的, 即加权算术平均法.

对于可调直方图均衡化数学模型(4), 利用

$$\sum_{i=0}^{L-1} h^*(i) = 1$$

可将其目标函数简化为

$$\sum_{i=0}^{L-1} (h^*(i) - h(i))^2 + \lambda \sum_{i=0}^{L-1} (h^*(i))^2 - \frac{\lambda}{L}$$

进一步, 可得到如下基于信息能量的数学模型为

$$\min \sum_{i=0}^{L-1} (h^*(i) - h(i))^2 + \lambda \sum_{i=0}^{L-1} (h^*(i))^2 \quad (6)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq h^*(i) \leq 1 \text{ 且 } \sum_{i=0}^{L-1} h^*(i) = 1$$

因此, 可调直方图均衡化本质是利用可调灰度级概率分布所对应的信息能量作为正则项, 将不适定直方图均衡化增强转化适定问题来研究. 针对基于信息能量的可调直方图数学模型式(6), 可采用拉格朗日乘子法获得其解仍为式(5).

另外, 考虑到信息熵与信息能量之间呈对偶关系, 于是本文提出了基于信息熵作为正则项的可调直方图均衡化另一数学模型为

$$\min \sum_{i=0}^{L-1} h^*(i) \ln \left(\frac{h^*(i)}{h(i)} \right) + \lambda \sum_{i=0}^{L-1} h^*(i) \ln(h^*(i))$$

$$\text{s. t. } 0 \leq h^*(i) \leq 1 \text{ 且 } \sum_{i=0}^{L-1} h^*(i) = 1 \quad (7)$$

利用拉格朗日乘子法获得式(7)的解为

$$h^*(i) = \frac{(h(i))^{\frac{1}{1+\lambda}}}{\sum_{l=0}^{L-1} (h(l))^{\frac{1}{1+\lambda}}}$$

$$= \frac{(1/L)^{\frac{\lambda}{1+\lambda}} \cdot (h(i))^{\frac{1}{1+\lambda}}}{\sum_{l=0}^{L-1} (1/L)^{\frac{\lambda}{1+\lambda}} \cdot (h(l))^{\frac{1}{1+\lambda}}}, i=0, 1, \dots, L-1 \quad (8)$$

则可调直方图所对应的灰度级概率修改方式是一种加权几何平均法.

根据文献[14, 15]的研究成果得知, 基于信息能量或信息熵的可调直方图均衡化模型式(6)和(8)适合不同类型图像, 前者主要适合图像灰度级概率呈正态或近似正态分布, 后者更适合图像灰度级概率分布呈泊松或近似泊松分布.

5 可调直方图正则项系数的选取方法

将基于信息能量或熵的可调直方图均衡化方法用于图像增强时, 所面临的最大问题是正则项系数 λ 的选取问题. 若该正则项系数选取不当, 将导致图像增强效果不满意, 甚至影响到后续图像分割、目标识别等处理的正确性. 从数学本质来看, 正则项系数 λ 的作用是从传统直方图均衡化增强到图像不完全增强之间的一种同伦变换, 而系数 λ 的最优选取是正则化方法中的重要课题, 很多学者在这方面做出了大量的工作^[16]. 通常, 选择正则项系数分为先验和后验两类策略. 本文根据图像灰度级概率分布和灰度级概率呈均匀分布之间的相似性, 提出了一种可调直方图均衡化正则项系数自动选取的先验办法, 解决了文献[12]中正则项系数 λ 的选取问题.

针对利用信息能量作为正则项的可调直方图均衡化增强数学模型式(7), 本文提出了正则项系数 λ 的选取方法为

$$\lambda = \sqrt{2} k \left(\frac{\sum_{i=0}^{L-1} (h(i))^2}{\sum_{i=0}^{L-1} (\frac{1}{L})^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

同理, 利用信息熵作为正则项的可调直方图均衡化增强模型式(8), 其正则项系数 λ 的选取方法为

$$\lambda = \sqrt{2} k \left(\frac{-\sum_{i=0}^{L-1} \frac{1}{L} \ln(\frac{1}{L})}{-\sum_{i=0}^{L-1} h(i) \ln(h(i))} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

其中式(9)和(10)中的参数 k 可选取为 10.

假设原始图像灰度级概率分布 $h(i) (i=0, 1, \dots, L-1)$ 呈均匀分布, 则可调直方图数学模型式(7)和(8)中正泽项系数 $\lambda = 0$ 是合理的, 其原因在于直方图本身是

均衡的,采用式(2)实现图像均衡化失去了意义.若可调直方图均衡化数学模型式(7)和(8)中正则项系数 λ 趋于正无穷时,则可调直方图所对应的灰度级概率 $h^*(i) = \frac{1}{L} (i=0, 1, \dots, L-1)$, 采用式(2)将不能修改图像灰度级大小,使得增强前后两幅图像完全一致.

6 改善可调直方图均衡化增强效果的方法

假设采用可调直方图方法获得新的灰度级概率为 $h^*(i) (i=0, 1, \dots, L-1)$, 其累计概率分布为

$$c(i) = \sum_{l=0}^i h^*(l), i=0, 1, \dots, L-1$$

灰度图像直方图均衡化增强所对应的灰度级修改方式应满足下列约束条件

$$c(i) - \frac{g(i)}{L} \geq 0$$

一般而言,常选取 $g(i) = \lfloor c(i) \cdot L \rfloor$ (如传统直方图均衡化方法).但是,这种直方图均衡化方法对许多图片不能改善图像的增强效果或明亮程度(如灰度级概率呈均匀分布的图像),其原因在于可调直方图均衡化增强本身是传统直方图均衡化增强和图像完全不增强之间的折中考虑.为此,本文提出了可调直方图均衡化增强中灰度级修改新准则为

$$f(c(i)) - \frac{g(i)}{L} \geq 0$$

这里所涉及函数 $f(x)$ 是闭区间 $[0, 1]$ 上的严格凸单调递增函数且 $f(0) = 0$ 和 $f(1) = 1$. 一般而言,可选取函数 $f(x) = x - x \ln(x)$ 或 $f(x) = x(2-x)$ 等,这些函数已在图像增强得到了应用^[17,18]. 这样,可获得新的直方图均衡化增强中灰度级修改公式为

$$i^* = g(i) = \lfloor f(c(i)) \cdot L \rfloor = \lfloor f\left(\sum_{l=0}^i h^*(l)\right) \cdot L \rfloor \quad (11)$$

本文仅选取 $f(x) = x(2-x)$, 这种灰度级修改方式能改善许多图像采用可调直方图均衡化增强后的视觉效果,甚至可以避免传统直方图均衡化所产生图像过暗、过亮、细节损失等众多不足^[19]. 为了后面实验部分叙述方便,将这种灰度级修改方式(11)称为灰度级累计概率变换增强法.

7 实验结果及分析

针对彩色图均衡化增强实验,本文首先将彩色图像从 RGB 空间变换到 HSV 空间,其次仅对其亮度分量进行直方图均衡化增强,最后将增强结果变换到 RGB 空间.实验测试了可调直方图均衡化增强法及其改进方法,并与典型图像增强法作了比较.

7.1 基于信息能量的可调直方图均衡化增强测试

针对基于信息能量的可调直方图均衡化增加数学

模型式(6),采用彩色鸭子图片增强所得结果如图 1 所示.其中图 1(a)是原始图像,图 1(b)是 $\lambda = 0$ 时所对应的传统直方图增强的结果,图 1(c)是 $\lambda = 0$ 并结合式(11)增强的结果,图 1(d) ~ (f)分别是 $\lambda = 1$ 、 $\lambda = 2$ 和 λ 由式(9)确定的条件下并结合式(2)增强的结果,图 1(g) ~ (i)分别是 $\lambda = 1$ 、 $\lambda = 2$ 和 λ 由式(9)确定的条件下并结合式(11)增强的结果.

从图 1 所示的鸭子图片增强结果来看,传统直方图均衡化增强法,传统直方图灰度级累计概率变换增强法,以及基于信息能量的可调直方图均衡化增强都很难达到满意的增强结果(出现过度增强或增强不足等现象,图 1(b) ~ (h)所示);但基于信息能量的可调直方图(参数 λ 由式(9)确定)与灰度级累计概率变换式(11)相结合能获得满意的增强效果(图 1(i)所示).

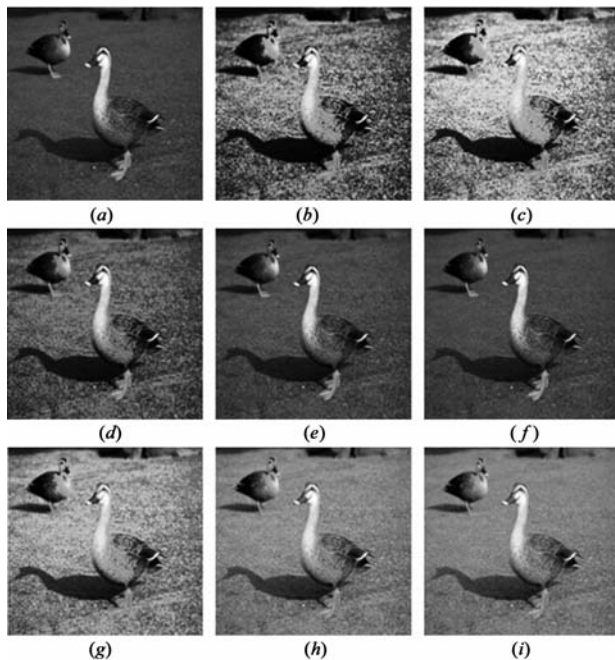


图1 鸭子图片及其增强结果

7.2 基于信息熵的可调直方图均衡化增强测试

针对基于信息熵的可调直方图均衡化增加数学模型式(7),采用光照很暗的木桶图片增强所得结果如图 2 所示.其中图 2(a)是原始图像,图 2(b)是 $\lambda = 0$ 时所对应的传统直方图增强的结果,图 2(c)是 $\lambda = 0$ 并结合式(11)增强的结果,图 2(d) ~ (f)分别是 $\lambda = 1$ 、 $\lambda = 2$ 和 λ 由式(10)确定的条件下并结合式(2)增强的结果,图 2(g) ~ (i)分别是 $\lambda = 1$ 、 $\lambda = 2$ 和 λ 由式(10)确定的条件下并结合式(11)增强的结果.

从图 2 所示的木桶图片增强结果来看,传统直方图均衡化增强法,传统直方图灰度级累计概率变换增强法,以及基于信息熵的可调直方图均衡化增强都很难达到满意的增强结果(出现过度增强且不协调等现象,

图 2(b)~(f)所示);但基于信息熵的可调直方图($\lambda = 1, \lambda = 2$ 和 λ 由式(10)确定)与灰度级累计概率变换式(11)相结合能获得较满意的增强效果(图 2(g)~(i)所示).

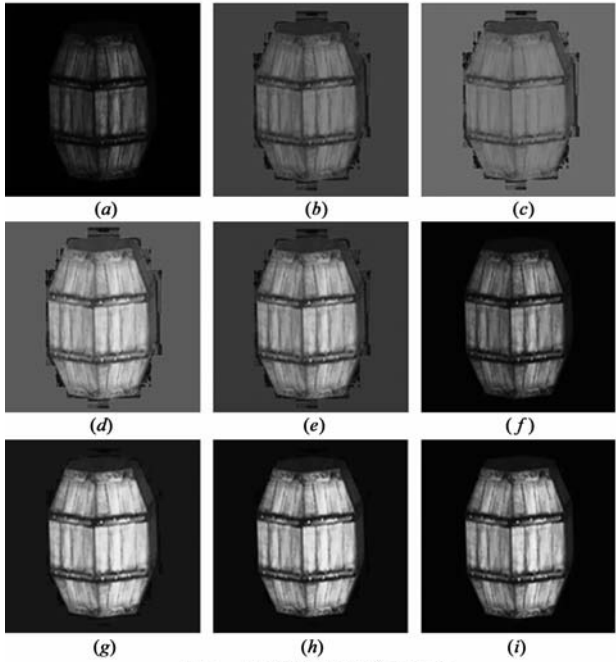


图2 木桶图片及其增强结果

7.3 基于信息能量或熵的可调直方图均衡化测试比较

基于信息能量或熵的可调直方图均衡化模型(式(6)和(7))因度量概率分布差异程度准则不同,导致两个模型对同一图像增强结果有差异.本文给出 3 幅图片

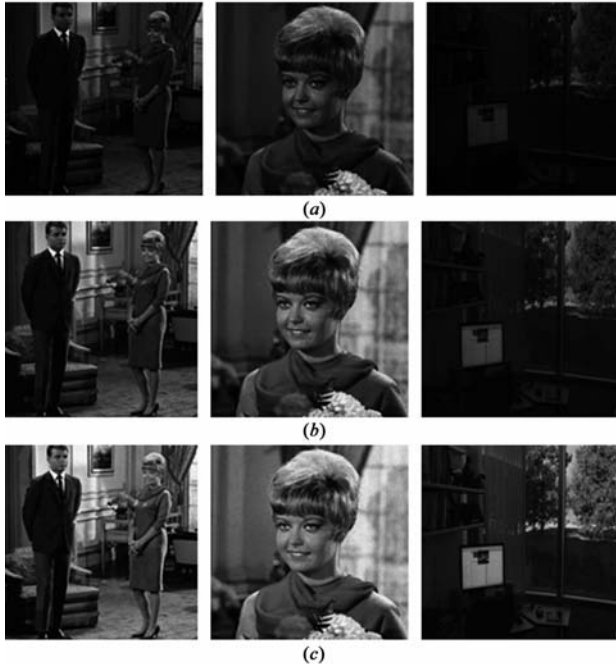


图3 可调直方图均衡化模型增强结果的比较

的测试结果如图 3 所示,其中图 3(a)是原始图片;图 3(b)是基于信息能量的可调直方图(λ 由式(9)确定)与灰度级累计概率变换表达式(11)相结合获得的增强效果,图 3(c)是基于信息熵的可调直方图(λ 由式(10)确定)与灰度级累计概率变换表达式(11)相结合获得的增强效果.从图 3 所示的实验结果来看,基于信息熵的可调直方图累计概率变换增强更有效(图 3(c)所示),这表明探讨基于信息熵的可调直方图均衡化图像增强法是必要的.

7.4 本文方法与其它典型增强法的比较测试

为了进一步证实本文所建议的基于信息能量或熵的可调直方图与灰度级累计概率变换相结合的有效性,文中针对蝎子图片进行增强测试,其结果如图 4 所示,其中图 4(a)是原始图片,图 4(b)是传统直方图均衡化增强的结果,图 4(c)是基于信息能量的可调直方图(λ 由式(9)确定)与灰度级累计概率变换式(11)相结合增强的结果,图 4(d)是基于信息熵的可调直方图(λ 由式(10)确定)与灰度级累计概率变换式(11)相结合增强的结果,图 4(e)~(g)是尺度参数为 10、10² 和 10³ 所对应高斯单尺度卷积滤波的 Retinex^[20] 增强结果,图 4(h)是仿生增强^[21] 结果,图 4(i)是基于 S 隶属函数的最大对数型模糊熵增强^[22] 结果.

从图 4 所示的实验结果,蝎子图片采用 Retinex 方法、仿生增强法和模糊熵增强法对其增强都出现过增强而无法达到满意的增强效果,而采用基于可调直方图灰度级累积概率变换增强法可达到相对满意的效果.

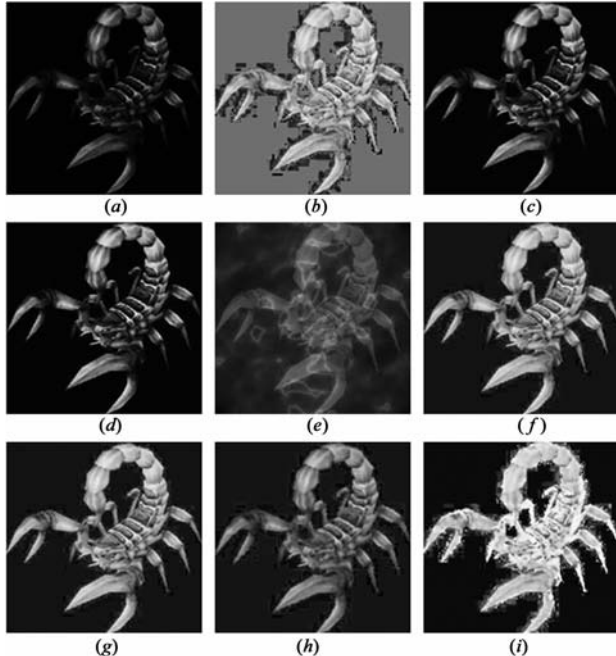


图4 蝎子图片采用多种增强法的结果

综合上述实验结果来看,将基于信息能量或熵的可调直方图与灰度级累积概率变换相结合用于图像增强能达到满意的效果,相对现有的如传统直方图均衡化增强、Retinex 增强、仿生增强和模糊熵增强等的优点在于本文方法充分考虑图像增强是典型的不适定问题,利用信息能量或熵作为正则项实现传统图像直方图均衡化增强和图像不增强之间同伦变换的折中考虑,再利用灰度级累积概率变换法从而能获得满意的增强效果。

8 结论

本文将现代数学物理反演问题所表现出的不适定性引入图像增强研究中,提出了基于信息能量作为正则项的可调直方图均衡化正则解释;同时,根据图像灰度级概率分布信息,得到了可调直方图均衡化中正则项系数选取的实用方法.为了进一步增强可调直方图均衡化图像增强的效果,提出了灰度级累积概率变换图像增强的崭新思想,对图像均衡化增强具有深远的价值意义。

另外,将本文工作推广到局部直方图和空间邻域直方图,探讨基于信息能量的可调局部直方图或空间邻域直方图灰度级累积概率变换增强法,应用于医学和遥感图像增强会有很大价值意义,限于本文篇幅有限省略讨论。

参考文献

- [1] Cheng H D, Shi X J. A simple and effective histogram equalization approach to image enhancement[J]. Digital Signal Processing, 2004, 14, 158 – 170.
- [2] 张懿,刘旭,李海峰.自适应图像直方图均衡化算法[J].浙江大学学报(工学版),2007,41(4):630 – 633.
Zhang Yi, Liu Xu, Li Haifeng. Self-adaptive image histogram equalization algorithm[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2007, 41(4): 630 – 633. (in Chinese)
- [3] Kim Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization[J]. IEEE Trans Consum Electron, 1997, 43(1): 1 – 8.
- [4] Kim S Y, Kim L, Hwang S. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization[J]. IEEE Trans Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11(4): 474 – 484.
- [5] 江巨浪,张佑生,等.保持图像亮度的局部直方图均衡算法[J].电子学报,2006,34(5):861 – 866.
Jiang Julang, Zhang Yousheng, et al. Local histogram equalization with brightness preservation[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(5): 861 – 866. (in Chinese)
- [6] 翟东清,吴陈,曾庆军.保持亮度的多峰值直方图均衡算

法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(1): 222 – 224.

Zhai Dongqing, Wu Chen, Zeng Qingjun. Brightness preserving multipeak histogram equalization [J]. Computer Simulation, 2009, 26(1): 222 – 224. (in Chinese)

- [7] Ogorman L, Brotman L S. Entropy-constant image enhancement by histogram transformation[A]. Applications of Digital image Processing VIII; Proceedings of the Meeting[C]. Bellingham, WA; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1985. 106 – 113.
- [8] Agaian S S, Silver B, Panetta K A. Transform coefficient histogram-based image enhancement using contrast entropy[J]. IEEE Trans Image Processing, 2007, 16(3): 741 – 758.
- [9] Paranjape R, Morrow M, Sapiro G. Adaptive-neighborhood histogram equalization for image enhancement [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1992, 54(3): 259 – 267.
- [10] Kim T, Paik J, Kang B. Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering[J]. IEEE Trans Consum Electron, 1998, 44(1): 82 – 87.
- [11] Yoon B W, Song W J. Image contrast enhancement based on the generalized histogram[J]. Journal of Electronic Imaging, 2007, 16(3): 033005-1-8.
- [12] Arici T, Dikbas S, Altunbasak Y. A histogram modification framework and its application for image contrast enhancement [J]. IEEE Trans Image Processing, 2009, 18(9): 1921 – 1935.
- [13] Onicescu O. Energic Informationnelle (Ser A) [M]. Paris: C R Acad Sci, 1966. 841 – 842.
- [14] Banerjee A, Merugu S, et al. Clustering with bregman divergences[J]. Journal of Machine Learning Research, 2005, 6: 1705 – 1749.
- [15] 刘维湘,郑南宁,游屈波.非负矩阵分解及其在模式识别中的应用[J].科学通报,2006,51(3),241 – 250.
Liu Weixiang, Zheng Nanning, You Qubo. Non-negative matrix factorization and its application in pattern recognition[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(3): 241 – 250. (in Chinese)
- [16] 刘继光.不适定问题的正则化方法及应用[M].北京:科学出版社,2005.
Liu Jiguang. Ill-posed Problem of Regularization Method and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [17] Mitra S K, Yu T H. Transform amplitude sharpening: A new method of image enhancement[J]. Compu Vis Graph Image Process, 1987, 40: 205 – 218.
- [18] Mukherjee J, Mitra S K. Enhancement of color images by scaling the DCT coefficients[J]. IEEE Trans Image Processing, 2008, 17(10): 1783 – 1794.
- [19] 乔闹生.一种改进的直方图均衡化[J].光学技术,2008, 34(s): 141 – 142.

Qiao Naosheng. An improved histogram equalization[J]. Optical Technique, 2008, 34(s), 141 – 142. (in Chinese)

- [20] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 100 – 110.

- [21] 王守觉, 丁兴号, 等. 一种新的仿生彩色图像增强方法[J]. 电子学报, 2008, 36(10): 1970 – 1973.

Wang Shoujue, Ding Xinghao, et al. A novel bio-inspired algorithm for color image enhancement[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(10): 1970 – 1973. (in Chinese)

- [22] Vlachos I K, Sergiadis G D. Parametric indices of fuzziness

for automated image enhancement[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2006, 157: 1126 – 1138.

作者简介



吴成茂 男, 1968 年出生, 四川仪陇人, 高级工程师, 主要研究领域为模式识别与图像处理, 图像信息安全.

E-mail: wuchengmao123@sohu.com