

# 自适应图像直方图均衡算法

张 懿, 刘 旭, 李海峰

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 为了改善直方图均衡对低灰度层密集分布图像的处理效果, 通过分析图像直方图均衡理论对同一灰度像素在处理映射到同一灰度的过程中存在的理论缺陷, 提出了一种高效的、自适应的算法. 该算法首先对图像进行常规的直方图均衡处理, 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, 保证变换后的图像有较大的灰度动态范围, 最后对结果进行适当的亮度修正, 保证变换图像整体有较高的对比度, 便于观察图像的细节. 通过实验证明, 改进后的算法可以明显地改善直方图均衡处理低灰度层密集分布图像的效果, 同时具有较高的算法效率, 适合在实时图像处理系统中采用.

**关键词:** 直方图均衡; 图像增强; 自适应算法; 实时图像处理

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2007)04-0630-04

## Self-adaptive image histogram equalization algorithm

ZHANG Yi, LIU Xu, LI Hai-feng

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** There are disadvantages in the image histogram equalization algorithm when it maps the pixels in the same gray level to the same new gray level, which results in unsatisfactory performance of the processed image, especially when the picture has many pixels distributed at low gray levels. To resolve this problem, an improved self-adaptive image histogram equalization algorithm was presented. After the image histogram equalization processing, the new method extends the gray levels to ensure the pixels distribute at large-scale gray levels and corrects the brightness of the resulting image to make the details be seen easily. Theoretical analysis and experiments showed that the algorithm is effective for histogram equalization to low gray level distributing image and that it is relatively better for real-time image processing system.

**Key words:** image histogram equalization; image enhancement; self-adaptive algorithm; real time image processing

直方图均衡是一种重要的空间域图像处理方法, 它是图像增强、图像压缩和图像识别的基础. 假如一幅图像的灰度分布在某个较小的区域中, 那么该图像的动态范围就比较小, 对图像的细节就不容易观察. 为了对图像的细节进行处理, 可以使用直方图均衡的方法对图像进行预处理, 通过增加图像的动态范围来增强图像的细节表现能力<sup>[1]</sup>.

但直方图均衡在对灰度呈现两端分布, 同时在

图像的低灰度区域有较多像素点分布的图像进行处理时得不到满意的效果. 传统上, 为了克服这个问题, 采用直方图匹配算法<sup>[1]</sup>, 即首先根据原图像的灰度分布特点, 人为确定较为理想的结果图像的直方图分布, 然后通过直方图匹配算法来实现较好的变换效果. 但是使用直方图匹配算法有以下的缺点: 1) 要根据原图像的直方图分布情况进行人为的判断, 不利于实现图像变换的自动化, 不能在实时图像处

理系统中使用;2)使用直方图均衡匹配算法,相当于执行2遍直方图均衡,计算量较直方图均衡要大一倍,算法比较复杂.为了解决以上直方图均衡处理中的问题,本文提出了一种高效的、自适应的算法,使该算法对所有的图像进行变换后都能达到较好的处理效果.

## 1 计算原理

### 1.1 直方图均衡原理

要寻找一种算法,对图像变换后,使所有灰度层上的像素分布概率密度为1.设原像素的灰度值为 $r$  ( $0 \leq r \leq 1$ ),概率密度为 $p_r(r)$ ;经过变换后的像素灰度为 $s$ ,概率密度为 $p_s(s)$ ;变换函数为 $T(r)$ ,则有以下等式<sup>[1]</sup>:

$$s = T(r), 0 \leq r \leq 1; \quad (1)$$

$$p_s(s)ds = p_r(r)dr. \quad (2)$$

同时,必须满足:1) $T(r)$ 是单值单调递增函数,这样就确保了灰度的单值映射和灰度不会出现反转(即原图中小灰度像素经过变换后大于原图中大灰度像素的变换值);2) $0 \leq T(r) \leq 1$ ,这样就确保了经过变换不会缩小原图像的灰度动态范围.假如令

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(w)dw, \quad (3)$$

则有

$$\frac{ds}{dr} = \frac{dT(r)}{dr} = \frac{d}{dr} \left[ \int_0^r p_r(w)dw \right] = p_r(r). \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)可得

$$p_s(s) = p_r(r) \left| \frac{dr}{ds} \right| = p_r(r) \left| \frac{1}{p_r(r)} \right| = 1; \quad (5)$$

$$0 \leq s \leq 1.$$

由此可知,当变换函数取式(3)时,则变换后的概率密度函数为常量1.以上是连续函数变换的公式,当应用于数字图像处理时,如果数字图像灰度有 $L$ 阶,则变为如下形式:

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n}; \quad (6)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, L-1.$$

式中: $k$ 代表数字图像的灰阶, $n$ 代表总像素数, $n_j$ 代表 $j$ 灰度层上像素的个数, $p_r(r_j)$ 代表 $j$ 灰度层上的概率密度, $T(r_k)$ 代表 $k$ 灰度层上像素的变换函数, $s_k$  ( $0 \leq s_k \leq 1$ )为最终的变化结果.因此,最终变换后所得的灰度值为

$$S_k = (L-1) \times s_k. \quad (7)$$

### 1.2 直方图均衡存在的问题

由于直方图均衡的理论来源于连续函数,而数

字图像的灰度是离散值,应用于数字图像的变换函数进行了从连续到离散的近似.如式(3)中应用于连续函数中的积分运算,到了式(6)就换成了累加运算.因而在直方图均衡中存在的问题有:

1)量化误差,造成原图某些灰度信息的丢失.如式(7)所示最后的灰度值 $S_k$ 是由 $s_k \times (L-1)$ 得到的,由于 $s_k$ 是一个连续量,在最终形成离散灰度值 $S$ 时存在量化误差.例如当 $L$ 为256时,2个 $s_k$ 分别为0.2和0.201,两者由原图中2个不同灰度层上的像素变换所得,经计算, $S_k$ 分别为51和51.255.由于最终的图像只有256阶灰度,2个原本不同灰度的像素在直方图变换后的结果中以相同灰度显示,丢失了一部分原图的信息<sup>[2]</sup>.丢失的信息一定是数量很少的像素(由式(6)可知,上例中丢失信息的像素个数为0.001乘以图像像素总数),同时又可以使用较大灰阶数的结果图像(例如使用1000个灰度阶的结果图像就能保留以上2像素的结果在图中的区别)来缓解这一现象.使用Pizer<sup>[3]</sup>提出的自适应直方图均衡算法(AHE)和文献[4,5]中使用的加权直方图均衡算法可以从根本上减小这种现象.由于该现象对处理结果影响不大,不在本文中讨论.

2)结果图像中概率密度的不均匀性.由式(2)可知,输入图像在同一灰度层上的像素,经过直方图均衡后,在输出图像中也在同一灰度层上.由于原图像中像素在各灰度分布的不均匀性与不连续性,结果图像中的概率密度 $p_s(s)$ 不可能始终为1,同时 $p_s(s)$ 的值与输入图像的各灰度层上的像素分布有关.当输入图像在某一灰度上的概率密度值最大时,在变换后的图像对应该灰度层的变化上也有最大值.直方图均衡只是改变原图像中同一灰度层上所有像素的灰度,并不能改变单个像素点在灰度层上的分布,因为从信息的角度来看,原图中同一灰度层上的像素点代表了相同的信息,不能通过变换使原本带有相同信息的像素点变成带有不同信息的像素点.以上的原因也就造成了直方图均衡在对灰度呈现两端分布,同时在图像的低灰度区域有较多像素点的图像进行处理后,得不到满意的效果,表现为处理后图像的亮度过度提升,而整幅图像的灰度动态范围没有有效提升,达不到突出图像细节的目的.

## 2 改进的直方图均衡算法

造成整幅图像的灰度动态范围没有有效提升的原因是原图像中由于低灰度层的像素过多,在进行直方图均衡时,原先的低灰度像素被变换到了过高

的灰度层上,有信息的灰度层占据了结果图像灰度范围的一小部分.为了使灰度如此分布的图像经过处理后达到理想的效果,要对常规的直方图变换进行如下修正:1)控制原图像中最低灰度层在结果图像中的灰度,使结果图像灰度分布有较大的范围;2)由于原图像低灰度层像素密集,原图像整体偏暗或偏亮,不利于观察,在结果图像中要进行适当的亮度修正.可进行如下变换:先对原图像进行常规的直方图均衡变换,得到结果图像  $X$ . 结果图像  $X$  有  $L$  个灰度阶,灰度范围为  $k=0,1,2,3,\dots,L-1$ ,再对结果图像  $X$  的各灰度层进行如下的映射:

$$T_k = \frac{(L-1)-aS_{\min}}{S_{\max}-S_{\min}}(S_k-S_{\min})+aS_{\min};$$

$$k=1,2,3,\dots,L-1, 0 \leq a \leq 1. \quad (8)$$

式中:  $T_k$  为最终图像中的灰度值;  $S_{\max}$  是  $X$  中有像素占据的最大灰度值;  $S_{\min}$  是  $X$  中有像素占据的最小灰度值;  $S_k$  是  $X$  中的像素灰度值;  $a$  为亮度补偿系数,取值在 0 到 1 之间.由式(8)可得,  $a$  用于控制常规直方图均衡后,最低灰度层的映射位置.当  $a=0$  时,最低层被映射到了结果图像的 0 灰度;当  $a=1$  时,与常规直方图变换的结果相同;实验证明当  $a$  取 0.2 左右时,既可以控制原图像中最低灰度层不在结果图像中被变换到过高的灰度,使结果图像有较高的对比度,表现出原图中的细节,同时又可以同时对原图像作适当的亮度修正,得到较好的观察效果,同时使该算法具有自适应性.该算法的特点为:1)使结果图像具有比常规直方图均衡更大的动态范围,从而保证了结果图像的对比度与平均亮度.由人眼视觉理论认为,当平均亮度适中时,能分辨的亮度上下限之比为 1 000 : 1;而当平均亮度较低时,该比值只有 10 : 1<sup>[6]</sup>.从而可知由该算法处理后的图像比原图像有更好的细节表现力.2)该算法具有自适应性,不用根据直方图均衡后得到的结果再判断是否使用该算法.假如直方图均衡后,得到的结果较为理想,各灰度层分布都较均匀,可得式(8)中的  $S_{\max} \approx L-1$ ,  $S_{\min} \approx 0$ ,则对其进行式(6)的变换后,灰度分布基本不变.3)由于该算法运算时只是对常规的直方图均衡的结果图像又进行了一次灰度映射,与直方图匹配算法相比计算量小,运算简单,容易实现,十分适合实时图像处理系统.

### 3 实验结果

图 1(a)<sup>[7]</sup> 为灰度呈现两端分布的图像,图 1(b)<sup>[7]</sup> 为(a)的直方图,从中可以看出在图像的低灰

度区域有较多的像素分布.图 2(a)<sup>[7]</sup> 是使用直方图均衡对图 1(a)进行处理后的结果.从图可以看出,低灰度区域被变换到了过高的灰度,原图像的动态范围以及对比度并没有提升,只是将原图像的低灰度层上的像素都移动到了高灰度层上,从整体上增加了图像的亮度<sup>[1]</sup>,这一点也可以从变换后图像的直方图中得到验证,如图 2(b)<sup>[7]</sup>.

同时,对图 2(a)进行直方图均衡,得到的结果还是图 2(a).因为对同一图像进行直方图均衡的结果与进行直方图均衡的次数无关,所以对具有图 2(b)这样的直方图分布的图像进行直方图均衡算法也得不到满意的效果.从中可以看出,低灰度区域密集分布仅对图像而言,并非是对灰度的绝对值而言.

对图 1(a)使用改进的直方图均衡算法后,结果如图 3(a)所示.从图 2(b)与 3(b)的直方图分布可以明显看出:1)经过映射后,像素的灰度分布比使用常规直方图均衡处理后的图像灰度分布范围要大得多,因而图像有较大的动态范围,从而保证了图像有较大的对比度;2)该算法又是以常规直方图均衡为基础的,在结果图像中保留了常规直方图均衡对灰度的变换与排列顺序,因而又具有直方图均衡的特

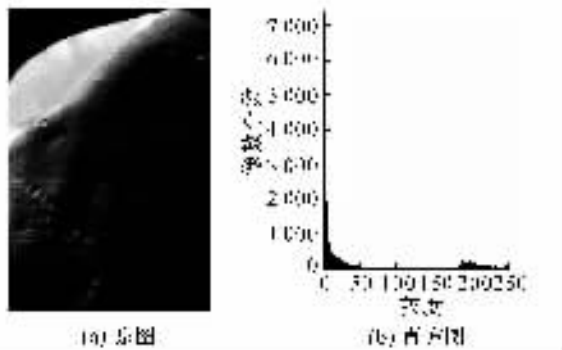


图 1 原图和相应的直方图

Fig. 1 Original image and its histogram

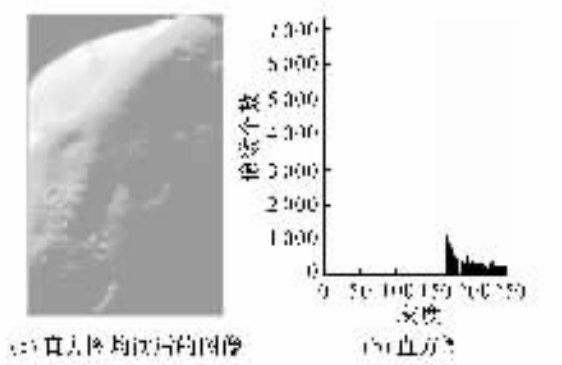


图 2 直方图均衡后的图像和相应的直方图

Fig. 2 Image after histogram equalization and its histogram

点,强调了图像的部分细节特征.通过图 1(a)与图 3(a)结果图像的比较可以验证以下 2 点:1)图 3(a)比图 1(a)有更合理的灰度分布,同时又与图 1(a)有相似的亮度特征,克服了图 2(a)亮度趋于饱和的缺点;2)图 3(a)又继承了图 2(a)的优点,显示出物体表面的细部特征.

图 4(a)是根据原始图像的像素分布特点,人为确定图 4(b)所示的概率密度函数后,再采用直方图匹配算法得到的较为理想的图像处理结果.对比图 3(a)与图 4(a),可以看出使用该自适应、小运算量算法的直方图增强结果已经比较接近采用人为控制的大运算量的直方图匹配算法.

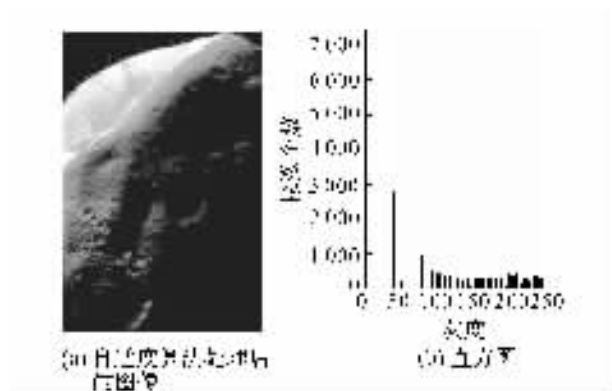


图 3 自适应算法处理后的图像和相应的直方图

Fig. 3 Image processed by self-adaptive algorithm and its histogram

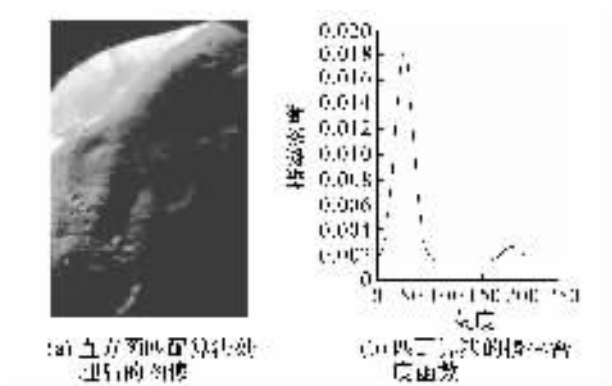


图 4 直方图匹配算法处理后的图像和相应的概率密度函数

Fig. 4 Image after histogram's matching and its probability density

## 4 结 语

提出了一种高效的、自适应的灰度映射算法,弥补了图像直方图均衡在处理低灰度层密集分布的图像时,不能有效增加图像动态范围与对比度的缺陷.该算法与直方图匹配算法相比,算法简单,计算量小,对图像处理系统要求低,容易实现.在图像实时处理领域中可以使用该算法来取代直方图匹配算法,以实现图像直方图均衡的处理.

## 参考文献 (References):

- [1] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2002.
- [2] 王炳健, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 基于平台直方图的红外图像自适应增强算法[J]. 光子学报, 2005, 34(2): 299 - 301.  
WANG Bing-jian, LIU Shang-qian, ZHOU Hui-xin, et al. Self-adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on plateau histogram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2): 299 - 301.
- [3] PIZER S. Adaptive histogram equalization and its variations [J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1987, 39(3): 355 - 368.
- [4] 杨词银, 黄廉卿. 基于幂函数的加权自适应直方图均衡 [J]. 光电子·激光, 2002, 13(5): 515 - 517.  
YANG Ci-yin, HUANG Lian-qing. Weighted adaptive histogram equalization based on exponential function [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(5): 515 - 517.
- [5] 曹聚亮, 吕海宝, 李冠章. 基于自适应局部灰度修正的直方图均匀算法 [J]. 红外与激光工程, 2004, 33(5): 513 - 515.  
CAO Ju-liang, LU Hai-bao, LI Guan-zhang. Histogram equalization algorithm based on adaptive local gray level modification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 513 - 515.
- [6] 荆其诚, 焦书兰, 喻柏林, 等. 色度学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [7] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. 数字图像处理 (MATLAB 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.