

# 直方图均衡技术综述<sup>①</sup>

李乐鹏, 孙水发, 夏冲, 陈鹏, 董方敏

(三峡大学 智能视觉与图像信息研究所, 宜昌 443002)

**摘要:** 直方图均衡是一种简单而有效的图像增强技术, 在医学图像处理、计算机视觉、遥感影像等领域都有重要作用, 从均衡时选取的区域情况分为全局和局部直方图均衡方法; 从均衡时选取的像素值域可以分为传统直方图均衡、双直方图均衡和递归分解的直方图均衡, 甚至多直方图均衡; 从均衡对象可以分为空域的直方图均衡和结合频域滤波的直方图均衡; 从均衡图像的通道数可以分为灰度图像直方图均衡和彩色图像直方图均衡. 本文对以上涉及的直方图均衡技术进行了较为系统的综述, 对衡量直方图均衡效果的评价指标进行了说明, 展望了直方图均衡技术进一步研究方向.

**关键词:** 直方图均衡; 双直方图均衡; 局部直方图均衡; 彩色图像均衡

## Survey of Histogram Equalization Technology

LI Le-Peng, SUN Shui-Fa, XIA Chong, CHEN Peng, DONG Fang-Min

(Institute of Intelligent Vision and Image Information, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Histogram Equalization is a simple and effective technology in image enhancement, and it is widely used in medical image processing, computer vision and remote sensing image. When selected different equalization regions, histogram equalization can be divided into global and local histogram equalization method. While the equalizations choose different pixel area, it will be divided into traditional histogram equalization, bi-histogram equalization, recursive mean-separate histogram equalization, and even multi-histogram equalization. Histogram equalization also can be divided into histogram equalization based on space domain and histogram equalization combined with frequency domain in equalization objects. From the channel numbers of equalized image, it will be divided gray image equalization and color image equalization. This paper systematically summarizes the histogram equalization methods mentioned above, describes the evaluation index to measure equalization effect, and look into the distance of further research direction in histogram equalization technology.

**Key words:** histogram equalization; Bi-histogram equalization; local histogram equalization; color image equalization

直方图均衡技术将原始图像的灰度直方图从比较集中的某个灰度区间变成在全部灰度范围内的均匀分布, 由于其算法简单, 无需借助外来因素的参数设置, 可以自成系统的运行, 有效地增强图像对比度<sup>[1]</sup>, 是一种常用的图像增强方法. 一直以来, 直方图均衡技术受到各个领域的重视, 比如在消费类电子产品领域, 在均衡图像的同时希望保持图像的亮度信息. 为此, Kim 提出了保持亮度特性的直方图均衡算法(BBHE)<sup>[2]</sup>, 随后, 学者们又提出了各种改进算法<sup>[3-6]</sup>, 以满足不同的需求.

为了保持图像的亮度特性和更好地增强图像的局部细节, 许多学者转而研究局部直方图均衡技术, 其中比较有代表性的是由 Kim 提出的子块部分重叠的局部直方图均衡算法(POSHE)<sup>[11]</sup>, 该算法在一定程度上消除了局部均衡带来的块效应, 并简化了均衡次数. 项目组此前将迭代阈值的直方图均衡算法<sup>[5]</sup>应用到 POSHE 算法中提出了基于迭代阈值的子块部分重叠双直方图均衡算法<sup>[7]</sup>, 该算法对子块部分进行迭代阈值均衡处理, 有效地增强图像的细节信息, 又能保持输入图像的亮度, 使

① 基金项目:国家自然科学基金(61102155,61272237,61272236);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划(T201002)

收稿时间:2013-08-02;收到修改稿时间:2013-09-09

均衡后的图像具有更加自然的视觉效果. 目前, 直方图均衡又应用到频域均衡和彩色图像均衡中, 针对频域变换对图像细节进行增强并抑制噪声干扰, 而在彩色图像中则提取三个彩色分量分别进行均衡.

本文对直方图均衡技术进行了归纳和总结, 给出了全局均衡和局部均衡研究的基本模型, 分析了部分经典的直方图均衡算法, 并对增强后图像的评估参数做了说明. 最后, 本文对彩色图像的直方图均衡技术做出了相关讨论, 展望直方图均衡技术进一步研究方向.

## 1 全局直方图均衡算法

### 1.1 全局均衡算法的基本模型

全局均衡算法可以由图 1 中的模型来说明, 图 1a 中令  $X$  表示原图像,  $Y$  表示经过直方图均衡算法增强

后的图像,  $Y=f(X)$  表示传统直方图均衡过程或其改进算法,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  表示根据给定属性将原图像中满足条件像素点提取出来构成的  $n$  个子图像, 并定义该属性为  $Q(x)$ ,  $x$  是图像的灰度值大小, 例如在 Kim 提出的以亮度均值为分割阈值的双直方图均衡中,  $Q(x)$  表示为是否大于亮度均值而将原图像分割成两个子图像. 需要指出的是  $X_n$  以及  $Y_n$  并不代表图像中一个连续区域, 它只是根据一个属性来提取满足这个条件的像素点, 因此无法用  $X_n$  或者  $Y_n$  来描述原图像中的区域特征. 在这个模型中, 需要的均衡次数是由  $n$  值决定的, 文献[6]中指出  $n$  值过大时均衡后图像的亮度均值会越来越接近原图像, 达不到增强的效果, 所以  $n$  值一般选取在  $2^3$  以内<sup>[6]</sup>, 较小的均衡次数使得全局的均衡算法具有算法简单和便于实现等特点.

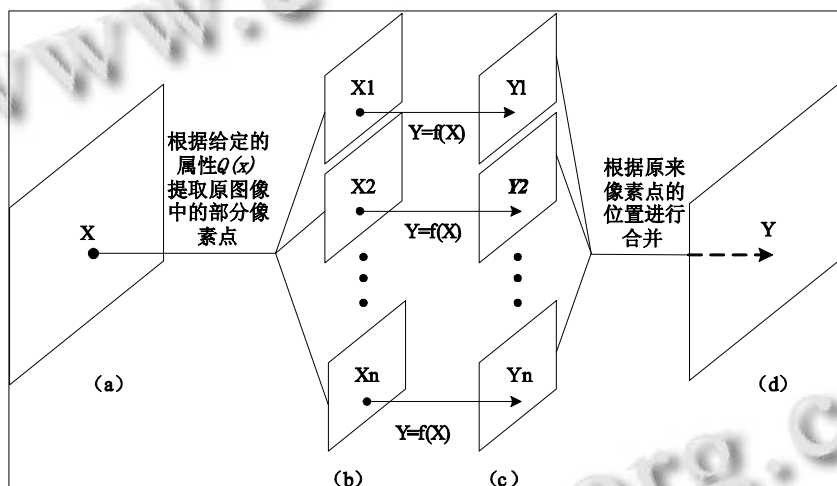


图 1 全局均衡算法的基本模型 (a)原图像 (b) $n$  个子图像 (c)均衡后的  $n$  个子图像 (d)增强后的图像

图 2 给出了一个简单的直方图均衡的例子来说明直方图均衡的核心在于找到合适的变化曲线, 原始图像的平均亮度均值为 180, 从图 2a 到 2b 和从图 2a 到 2c 分别是采用 HE 和 BBHE 均衡的结果, 图 2g 中的变化曲线显示了灰度值小于亮度均值的部分都变换到了一段较低的窄的灰度值上, 而其他一部分则变换到一段较高的宽的灰度值上, 因此均衡后的图像显得较暗. 通过 2h 中对灰度值大于和小于亮度均值的两个部分分别进行重新调整, 有效改善了从原图像到输出图像的变换曲线, 通过图 2c 可以看到均衡后的图像明显改善了像的亮度, 并有更好的视觉效果. 因此, 通过适当设计直方图的变换曲线, 可以有效改善直方图均衡的效果.

### 1.2 直方图均衡算法及其改进

#### 1.2.1 传统直方图均衡算法

传统直方图均衡算法利用一个变换函数将输入图像的灰度级映射到输出图像, 使输出图像各灰度级相对均匀分布, 从而图像的对比度得到增强<sup>[1]</sup>. 该算法是相对于图 1 中  $n=1$ 、均衡函数为 fHE 的简化模型, 即

$$Y=f_{HE}(X) \tag{1}$$

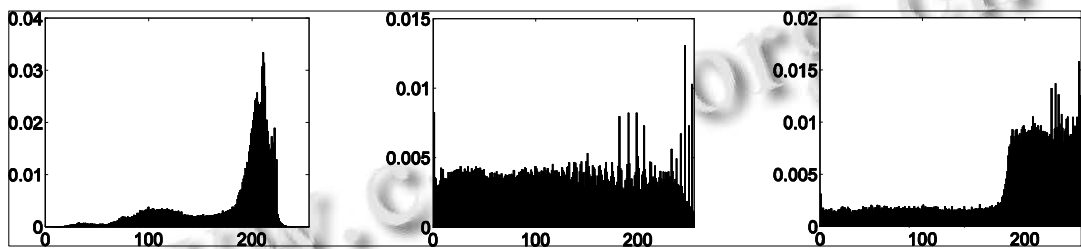
其中函数  $f_{HE}$  表示直方图均衡过程, 它可以由如下过程来计算: 已知输入图像为  $X$ , 总灰度级为  $L$ , 则存在  $X_k \in \{X_0, X_1, \dots, X_{L-1}\}$ , 均衡后输出图像  $Y$  和输入图像之间存在如下变换关系:

$$Y = f_{HE}(X_k) = X_0 - (X_{L-1} - X_0)c(X_k) \tag{2}$$

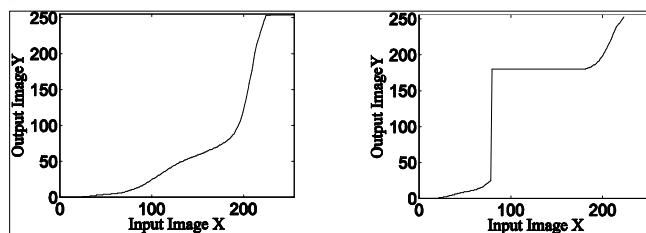
其中  $c(X_k)$  为输入图像灰度级的累积概率分布函数.



(a) 原始图像 (b) HE 均衡的图像 (c) BBHE 均衡的图像



(d) 原始图像的直方图 (e) HE 均衡后图像的直方图 (f) BBHE 均衡后图像的直方图



(g) HE 均衡对应的变化曲线 (h) BBHE 均衡对应的变化曲线

图 2 直方图均衡核心在于变换曲线

假设输入图像  $X$  是一个连续随机的变量, 即  $L = \infty$ , 则输出图像  $Y$  也认为是一个随机变量, 均衡后输出图像灰度级的概率分布将趋于均匀分布, 则输出图像的亮度均值为:

$$E(Y) = \frac{X_0 + X_{L-1}}{2} \quad (3)$$

因此均衡后图像的均值分布在灰度级的中值附近而与原图像无关, 故不能有效保持原始图像的亮度. 而且由于原图像中各灰度级的概率密度不同, 在均衡后会出现灰度简并的现象, 由造成图像部分细节信息丢失和过度增强现象, 造成不自然感.

### 1.2.2 带可变增强度的直方图均衡算法

文献[8]是 Kota 提出的带有可变增强度的直方图均衡算法(Histogram Equalization with Variable Enhancement Degree, HEwVED), 该算法使均衡后的图像乘以一个变量因子  $\alpha$  然后加到原图像中, 其表达式为:

$$Y_\alpha = f_{HEwVED}(X) = \alpha \cdot f_{HE}(X) + (1 - \alpha) \cdot X \quad (4)$$

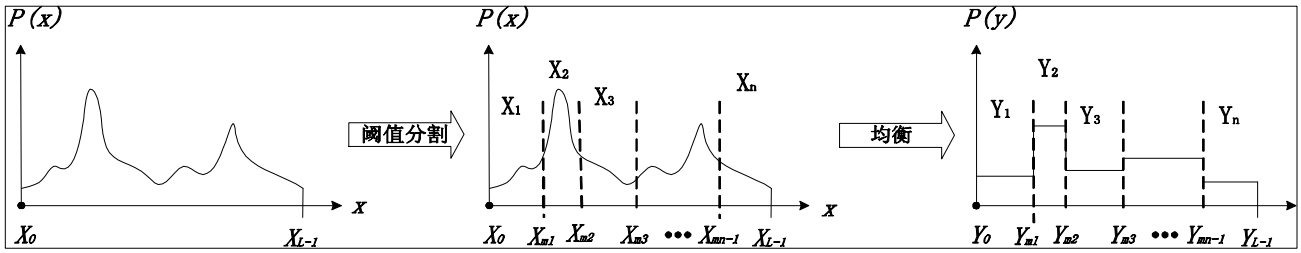
其中  $\alpha$  的取值范围为  $[0, 1]$ , 当  $\alpha = 0$  时, 增强后的图像等效于原图像; 当  $\alpha = 1$  时, 增强后的图像等效于 HE 均衡后图像的亮度均值可表示为

$$E(Y) = \alpha \cdot \frac{X_0 + X_{L-1}}{2} + (1 - \alpha) \cdot E(X) \quad (5)$$

该式表明这种算法在一定程度上可以保持图像的亮度. 与传统的直方图均衡算法相比, 该算法通过一个可调的参数能合适调节均衡效果而更具实用性.

### 1.3 基于阈值的直方图均衡算法

在图 1 中定义属性  $Q(x)$  为选取不同的阈值来分割图像的直方图并确定  $x$  所属的子图范围时, 全局均衡算法可以由下面图 3 中表示, 其中  $X_{m_1}, X_{m_2}, \dots, X_{m(n-1)}$  表示为分割阈值将原图像的直方图分割成  $n$  个子图像,  $X_1, X_2, \dots, X_n, Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  为  $n$  个子图像均衡后的图像, 再对这些子图像根据像素位置进行合并即可得到均衡后的图像.



(a) 原图像的直方图 (b) 原图像的直方图分成 n 个子图像 (c) n 个子图像均衡后的图像  
图 3 基于阈值的直方图均衡算法流程

1.3.1 双直方图均衡算法

在图 2 中选取  $n$  值为 2 时我们得到双直方图均衡的算法原型。Kim 首先提出了保持亮度的双直方图均衡(BBHE)<sup>[2]</sup>, 根据原图像的亮度均值将图像划分为两个子图分别进行均衡; 其后 Wang 提出了二维子图直方图均衡算法(DSIHE)<sup>[3]</sup>, 将图像分成等大小的两部分使图像的熵值最大; 接着 Chen 提出最小均方误差双直方图均衡(MMBEBHE)<sup>[4]</sup>, 使输出图像的亮度均值与原始图像的亮度均值误差最小; 项目组之前通过迭代的方法选取分割阈值提出了迭代阈值的双直方图均衡算法(IBBHE)<sup>[5]</sup>, 使两个子图均值收敛到最佳, 针对目标和背景像素的灰度分布十分明显的图像进行阈值选取, 对目标和背景像素分别进行直方图均衡, 避免了传统直方图均衡混淆目标和背景进行均衡的特点。

文献[2-5]中均采用选取分割阈值  $X_m$  将图像分割成灰度级大于等于  $X_m$  的子图像  $X_1$  和灰度级小于  $X_m$  的子图像  $X_2$ , 对应图 3 中的模型, 然后对  $X_1$ 、 $X_2$  分别进行均衡得到均衡后的图像  $Y_1$ 、 $Y_2$ , 合并后得到增强图像  $Y$ 。均衡的过程可以表示为:

$$Y = \begin{cases} f(X_1) & \text{if } X_k \leq X_m \\ f(X_2) & \text{else} \end{cases} = \begin{cases} X_0 + (X_m - X_0)c_1(X_k), & \text{if } X_k \leq X_m \\ X_{m+1} + (X_{L-1} - X_{m+1})c_2(X_k), & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

假定原图像的直方图在  $X_m$  两侧均匀分布时, 均衡后图像的亮度均值为:

$$\begin{aligned} E(Y) &= E(Y_1)P(Y_1) + E(Y_2)P(Y_2) \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{X_0 + X_m}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{X_m + X_{L-1}}{2} \\ &= \frac{X_m + X_G}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $X_G = (X_0 + X_{L-1})/2$ , 当  $X_m$  取图像的亮度均值时, 均衡后的图像亮度均值位于原图像的亮度均值和中值

之间, 表明 BBHE 算法在一定程度上保持了图像的亮度。DSIHE 算法将图像分成等大小的亮图像和暗图像, 均衡后两部分的灰度级分别得到保持, 因此其平均亮度也有所保持, 但保持效果相对 BBHE 有所欠佳; MMBEBHE 算法通过一个选定的阈值使输入图像和输出图像亮度均值误差最小, 有效地保持了图像亮度, 但是过分的亮度保持会达不到对比度增强的效果; IBBHE 通过迭代的方法是分割后的两个子图像均值收敛到最佳, 达到增强对比度和亮度保持的效果。

1.3.2 基于递归分解的直方图均衡算法

将图像进一步进行分割, Chen 在 BBHE 的基础上提出了基于平均亮度值递归分解的直方图均衡算法(RMSHE)<sup>[6]</sup>, 根据亮度均值递归分解到指定的深度  $r$  得到  $2^r$  个子图像, 对每一个子图像分别在其灰度范围内进行直方图均衡, 然后将均衡后的子图像进行合并, 得到均衡后的图像。

当  $r=0$  时, 该算法可以等效为 HE; 当  $r=1$  时, 该算法等效为 BBHE; 考虑当  $r=2$  的情况, 在 BBHE 的基础上, 继续以两个子图像  $X_1$ 、 $X_2$  的亮度均值为阈值, 将  $X_1$ 、 $X_2$  进一步分解为  $X_{11}$ 、 $X_{12}$  和  $X_{21}$ 、 $X_{22}$ , 对这四个子图像分别进行均衡得到  $Y_{11}$ 、 $Y_{12}$  和  $Y_{21}$ 、 $Y_{22}$ , 合并得到增强后的图像  $Y$ 。类似于式(6)的计算可以得到均衡后的图像亮度均值如式(8)所示。

$$\begin{aligned} E(Y) &= E(Y_{11})P(Y_{11}) + E(Y_{12})P(Y_{12}) + \dots + E(Y_{22})P(Y_{22}) \\ &= \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{X_0 + X_{m_1}}{2} + \frac{X_{m_1} + X_m}{2} + \dots + \frac{X_{m_2} + X_{L-1}}{2} \right) \\ &= \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{X_0 + X_{L-1}}{2} + X_{m_1} + X_{m_2} + X_m \right) \\ &= \frac{1}{4} (X_G + 3X_m) \end{aligned} \quad (8)$$

可以证明  $(X_{m_1} + X_{m_2})/2 = X_m$ 。式表明, 均衡后的图像的亮度均值中  $X_m$  的权重相比式由 1/2 上升到 3/4,

即  $r=2$  比  $r=1$  更大程度上保持了图像的亮度. 与此类推, 当进一步提高递归深度时, 均衡后图像的亮度均值仍为输入图像中值和各阈值点灰度值的平均. 随着递归深度的增加, 输出图像的亮度均衡会越来越接近输入图像的亮度均衡, 过多的增加递归深度会使输出图像接近输入图像, 不仅起不到增强的目的, 而且还增加了算法的复杂度.

### 1.3.3 多直方图均衡算法

根据这种阈值分割的思想, 将其推广到更一般的情况. 在图 1 的模型中, 将原始图像  $X$  根据阈值  $X_{m1}, X_{m2}, \dots, X_{m(n-1)}$  不同的将图像表示为  $n$  个子图像  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , 即

$$X = X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_n \quad (9)$$

然后通过对这  $n$  个子图像进行直方图均衡, 均衡后的子图像表示为  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , 最后对均衡后的子图

像进行合并即可以得到增强后的图像. 假定图像的直方图相对于阈值点均匀分布, 根据式(8)的推导同理可得均衡后的图像亮度均值为:

$$E(Y) = \frac{1}{n} \cdot \left( \frac{X_0 + X_{L-1}}{2} + X_{m1} + X_{m2} + \dots + X_{m(n-1)} \right) \quad (10)$$

由式(10)知, 均衡后图像的亮度均值是原图像亮度中值和各阈值点灰度值的平均, 因此可以根据式(10)来设计所需要满足的分割阈值点来达到相应的均衡效果.

## 2 局部直方图均衡算法

### 2.1 局部直方图均衡算法

与全局方法相比, 局部直方图均衡方法可以更好地增强图像的局部细节. 局部方法可以分为子块不重叠、子块重叠<sup>[9,10]</sup>与子块部分重叠(POSHE)<sup>[11]</sup>三种方法, 如图 4 所示.

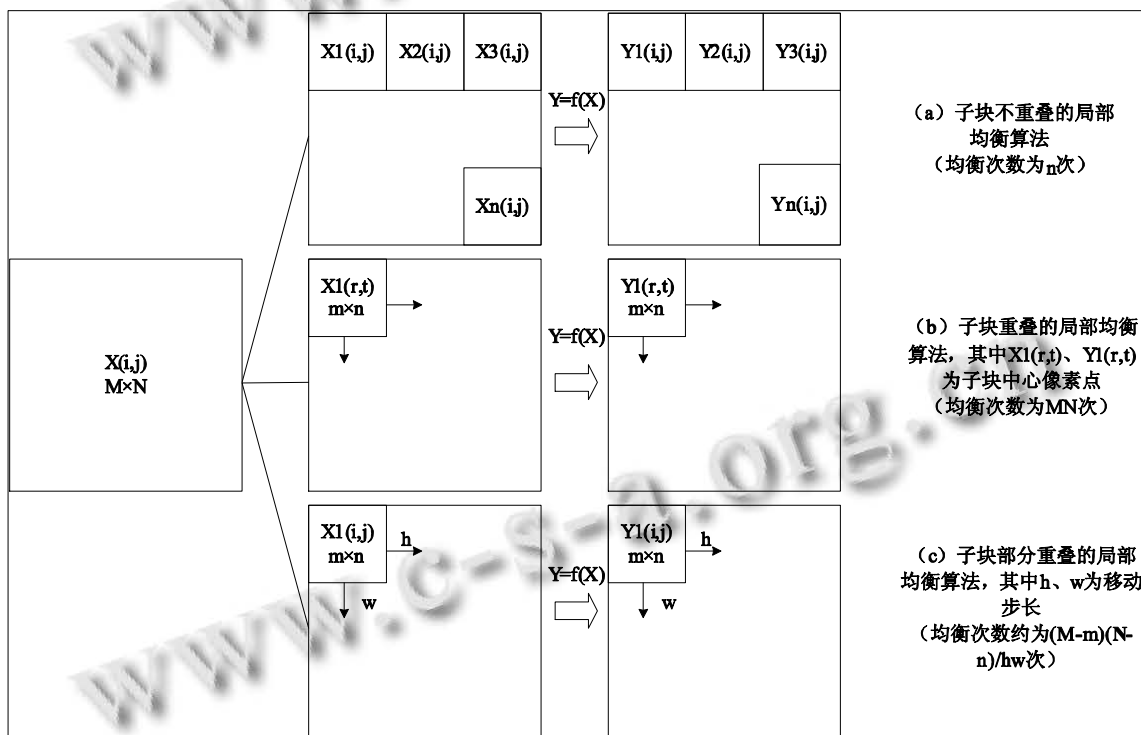


图 4 局部均衡算法的基本模型

#### (1) 子块不重叠的均衡算法

如图 4a, 该算法将输入图像划分为  $n$  个不重叠的子块, 并对每一个子块进行独立的直方图均衡. 其优点是图像局部细节对比度能得到充分的增强, 缺点是各子块的直方图均衡函数差异较大, 输出图像中难以避免块效应. 均衡次数为  $n$ , 相比全局算法的算法效率

较低.

#### (2) 子块重叠的均衡算法

如图 4b, 该算法在大小为  $M \times N$  输入图像上定义一个矩形子块  $m \times n$ , 利用该子块图像的直方图信息对子块中心的像素进行均衡. 将子块中心逐像素点移动并重复以上处理过程, 直至遍历输入图像的所有像

素. 该方法不仅使图像局部细节得到充分的对比度增强, 同时消除了块效应. 由于子块均衡总次数等于输入图像的像素总数  $MN$ , 算法效率极低.

(3) 子块部分重叠的均衡算法(POSHE)

如图 4c, 该算法定义一个矩形子块  $m \times n$  和一个移动步长  $h \times w$ , 将子块按照步长移动, 遍历整个输入图像, 然后对子块的所有像素进行均衡处理, 对多次被均衡的像素, 将均衡结果取平均作为该像素在输出图像中的灰度值.

算法的特点是: 1)由于子块部分重叠方式减少了相邻子块间的均衡函数的差异, 使块效应基本得以消除. 2)子块均衡次数为, 比子块重叠方式少得多, 计算效率大幅度提高. 3)图像细节的增强能力与子块重叠算法相近.

2.2 局部直方图均衡的改进算法

POSHE 算法<sup>[11]</sup>对子块的处理是采用传统的直方图均衡算法, 均衡后的子块图像仍然存在图像过增强的现象, 因此学者们提出了多种对子块图像均衡进行改进的算法.

文献[12]基于 BBHE 和 RMSHE 提出了保持图像亮度的局部直方图均衡算法, 该算法对子块部分进行 RMSHE 均衡, 有效地保持了子块图像的亮度均值. 文献[13]基于 DSIHE 和 RMSHE 提出了等面积递归分解的部分重叠局部直方图均衡算法, 该算法结合 DSIHE 和 RMSHE 对子块进行多次等面积递归分解, 相比 DSIHE 进一步保持了图像亮度, 同时该算法提出了一种新的块效应消除方法, 采用双线性差值来消除子块与位于子块外部的相邻两个子块的对比度差异, 提升了图像的视觉效果. 文献[14]提出基于熵值最大化和亮度保持的局部直方图均衡算法, 该算法使子块图像在均衡前后保持亮度均值相等的情况下其熵值最大, 有效增强了图像的细节. 文献[7]是项目组此前提出的基于迭代阈值的子块部分重叠双直方图均衡算法, 使子块图像中目标和背景的像素均值收敛到最佳, 均衡后的图像具有更加自然的视觉效果.

这几类算法的实现过程如下:

(1) 对于给定大小为  $M \times N$  的输入图像, 在其左上角定义一个  $m \times n$  的子块, 并设其沿水平与垂直方向移动的步长分别为  $h$  和  $w$ ;

(2) 按照全局直方图均衡算法对子块图像进行均衡处理, 将其结果累加到输出图像中, 并记录每个像素点累加次数.

(3) 将子块以水平步长  $h$  水平移动子块, 以垂直步长  $w$  垂直移动子块, 若子块没有超出图像边界, 重复步骤(2); 否则进入下一步;

(4) 将输出图像中所有像素点的灰度值除以相应的累加次数得到输出图像.

局部直方图均衡在增强图像细节的同时, 损失的是算法复杂度的大量增加, 因此对子块部分的处理需要选择尽量少的均衡次数并达到尽可能好的增强效果, 局部直方图均衡的改进算法主要源于的对全局算法的改进, 通过对子块图像的适当处理来得到最优的增强效果. 同时随着计算机技术的进一步发展, 直方图均衡技术也不仅仅局限于全局算法和局部算法, 更多的情况下需要考虑多种算法的结合处理.

3 基于分频和融合的直方图均衡算法

之前讨论的直方图均衡算法没有考虑图像的细节和噪声, 在增强的过程中往往会导致图像细节的丢失和噪声放大. 从频率的特性考虑, 图像中的细节信息(包括边缘和图像噪声)一般对应于图像的高频分量, 而影响图像整体视觉效果的是图像的低频分量<sup>[15]</sup>. 文献[15]中考虑到将图像的高频分量和低频分量分开, 对低频分量进行直方图均衡处理, 对高频分量进行线性加权增强, 再将两者融合, 就可以避免直方图均衡算法导致图像细节信息丢失和噪声放大的问题. 通过该思想设计的算法有效的保持了图像细节并抑制了高频噪声, 该算法的处理过程如图 5 所示. 其中,  $G(\bullet)$  表示分频滤波器; HE 表示直方图均衡过程;  $k$  表示高频分量的加权系数, 通过设置较大的  $k$  可以起到强化图像细节的作用;  $X(i, j)$ 、 $X_L(i, j)$ 、 $X_H(i, j)$ 、 $X_L^{(HE)}(i, j)$ 、 $Y(i, j)$  分别表示原图像、低频分量、高频分量、直方图均衡后的低频分量、最终增强的效果.

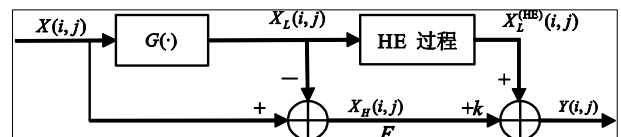


图 5 基于分频和融合的直方图均衡算法过程

文献[15]中是采用低通滤波器作为分频器, 将图像分成低频分量和高频分量进行上述操作. 随着小波变换的广泛应用, 文献[16,17]采用小波变换的方法将图像分为 LL, LH, HL 和 HH 四个子频带, 并对低频带

LL 进行直方图均衡处理, 再将均衡后的子频带与 LH, HL, HH 进行小波重构, 得到增强后的图像. 该类算法的优点在于对图像的细节进行均衡而避免噪声的干扰, 但是频率变换的过程相对复杂.

#### 4 彩色图像直方图均衡算法

计算机视觉和计算机图形学的发展使得彩色图像和视频得到广泛应用, 对彩色图像进行直方图均衡的研究也越来越多, 现有的几种彩色图像直方图增强方法有如下几种:

##### (1) R、G、B 三幅子图像分别均衡并合并

灰度图像通过直方图均衡算法可以很好地达到对比度增强的效果, 但针对具有三个分量的彩色图像, 通过简单的对 R、G、B 三幅子图像分别均衡及合并, 会使均衡后的图像出现严重的色彩失真现象<sup>[18]</sup>, 其主要原因在于传统直方图均衡算法过度地增强了图像的亮度. 例如, 当一幅彩色图像 R、G、B 中某一子图像的亮度均值过暗或者过亮时, 均衡后这一子图像的亮度均值将处于该分量的灰度中值附近, 这样会使增强后这一子图像的色彩得到加强或者减弱, 使得彩色图像出现明显的色彩失真和不协调. 因此, 采用这种方法进行彩色图像直方图均衡首要目标是增强图像对比度时保持图像的亮度均值.

##### (2) 根据联合概率密度进行均衡

直接对彩色图像进行处理, 计算 R、G、B 三幅子图像的联合概率密度函数, 并根据联合概率密度函数进行直方图均衡计算, 这种方法虽然一定程度消除了色彩失真的现象, 但是却因需要计算联合概率密度函数加大了算法的复杂度, 运算十分困难<sup>[19]</sup>.

##### (3) HSI 模型对亮度分量进行均衡

这种方法将彩色图像从 RGB 彩色模型转化到 HIS 彩色模型, 然后对亮度分量 I 进行直方图均衡增强, 再还原到 RGB 模型中, 该方法使均衡次数从 3 次简化到 1 次, 但是需要对图像进行彩色模型的相互转化, 仍需要一定的计算量, 并且增强后的图像也会存在过增强的现象<sup>[20]</sup>.

文献[21]对彩色图像的三个子图像进行亮度保持的直方图分割均衡处理, 并在对图像进行合并时引入色彩恢复因子进行子图合并, 提出了基于直方图分割的彩色图像增强算法, 该算法不仅具有较低的运算复杂度, 而且合并后的图像在色彩上具有良好的视觉效果. 类似地,

通过 RGB 模型中对三幅子图像的均衡处理进行全局直方图均衡算法的改进, 可以有效地保持增强后图像的亮度, 并且增强后的图像不会存在严重色彩失真的现象. 同样, 将图像从 RGB 模型转化到 HIS 模型对亮度分量进行全局直方图均衡的改进处理, 可以将均衡次数减少到原来的 1/3, 也可以达到保持彩色图像色彩保真的效果.

#### 5 均衡后图像效果的衡量标准及算法评价

##### 5.1 均衡后图像效果的衡量标准

###### (1) 亮度均值 $E$ 和均值误差 $\Delta E$ :

$$E = \sum_{k=0}^{L-1} X_k p(X_k) \quad (11)$$

$$\Delta E = |E(Y) - E(X)| \quad (12)$$

均衡前后图像的均值误差越小, 即可说明均衡保持图像的亮度越好.

###### (2) 信息熵值:

$$H = \sum_{k=0}^{L-1} (p(X_k) \cdot \log_2 p(X_k)) \quad (13)$$

根据信息论的原理, 图像的熵值越大, 图像的灰度分布越均匀, 对比度就越大, 图像视觉效果就越好.

###### (3) 均值差-熵比 MDER:

同时考虑到图像的均值误差和熵值能更加准确地衡量均衡后的图像, 文献[7]此前定义了一个新的评估参数均值差-熵比(MDER):

$$MDER = \frac{\Delta E}{H} = \frac{|E(Y) - E(X)|}{H} \quad (14)$$

显然, MDER 越小, 说明图像的均衡效果越好, 并且考虑到信息熵  $H$  不会为零, 从而式(14)不会被零除; 同时理论上存在  $\Delta E$  等于零的情况, 但是实际操作过程中  $\Delta E$  也不会为零.

##### 5.2 算法评价及比较

###### (1) 全局直方图均衡算法

传统的直方图均衡算法在均衡后会得到一个相对较大的  $\Delta E$  值, 考虑到消费类电子产品中要求保持图像亮度信息的特点, 带可变增强度的改进算法和双直方图均衡算法可以在保持熵值  $H$  几乎不变的情况下, 有效减小均值误差  $\Delta E$  的值, 从而得到一个较小的 MDER 值以达到更好的增强效果.

根据式(8)和式(10)可知, 根据不同的需要, 可以设计不同的多直方图均衡和带可变增强度的改进算法相结合以得到一个合适的增强图像.

## (2) 其他改进均衡算法

局部均衡适合增强图像的细节, 分频和融合的直方图均衡适合控制图像的噪声, 彩色均衡主要应用于彩色均衡, 其共同在于以全局算法为基础, 而对应的应用环境不同而已, 因此在今后的研究及应用中, 可以根据不同的应用所需来选择合适的均衡算法。

## 6 结语

本文分析了现有的直方图均衡技术在灰度图像中的典型算法, 并给出了两个统一性的模型来分析全局直方图均衡技术和局部直方图均衡技术, 提出了相应的改进算法。具体针对全局直方图均衡过程进行描述和归纳, 根据不同的处理需要来设计不同的增强算法, 并将全局增强的特点引入局部增强, 在增强图像细节的同时有效保持图像亮度。同时, 本文提到了在彩色图像中采用亮度的均衡方法, 可以避免彩色均衡中容易出现色彩失真, 增强后的图像也会有更好的视觉效果。但是, 在实际的图像增强过程中, 直方图均衡仍然有一定的局限性, 通常需要考虑多种简单有效的算法同时并用或者结合其增强技术来达到最终的增强效果, 因此综合性的图像增强技术也将成为后续研究的重点。

## 参考文献

- 1 Gonzalez RC, Woods RE, Eddins SL. Digital image processing. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- 2 Kim YT. Contrast enhancement using brightness preserving Bi-histogram equalization. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 1997, 43(1): 1-8.
- 3 Wang Y, Chen Q, Zhang BM. Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization Method. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 1999, 45(1): 68-75.
- 4 Chen SD, Ramli AR. Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2003, 49(4): 1310-1319.
- 5 Shen H, Sun S, Lei B, et al. An adaptive brightness preserving bi-histogram equalization. Proc. 2011 Multispectral Image Processing & Pattern Recognition. 2011.
- 6 Chen SD, Ramli AR. Contrast enhancement using recursive mean-separate histogram equalization for scalable brightness preservation. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2003, 49(4): 1301-1309.
- 7 孙水发, 李乐鹏, 董方敏等. 基于迭代阈值的子块部分重叠双直方图均衡算法. 广西师范大学学报, 2013, 31(3): 110-117.
- 8 Murahira K, Kawakami T, Taguchi A. Modified histogram equalization for image contrast enhancement. Proc. of the 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing. ISCCSP 2010, Limassol, Cyprus. 2010.
- 9 Pizer S. Adaptive histogram equalization and its variations. Computer Vision Graphics & Image Processing, 1987, 9(3): 355-368.
- 10 Caselles V. Shape preserving local contrast enhancement. Proc. of the 1997 International Conference on Image Processing (ICIP'97). Washington IEEE Computer Society. 1997.
- 11 Kim JY, Kim LS, Hwang SH. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technique, 2001, 11(4): 475-484.
- 12 江巨浪, 张佑生, 薛峰等. 保持图像亮度的局部直方图均衡算法. 电子学报, 2006, 34(5): 861-866.
- 13 孙春风, 袁锋等. 面积递归分解的部分重叠局部直方图均衡. 光学精密工程, 2006, 17(90): 2292-2230.
- 14 Tian YF, Wan QT, Wu FJ. Local histogram equalization based on the minimum brightness error. Fourth International Conference on Image and Graphics, ICIG 2007.
- 15 张志龙, 李吉成, 沈振康. 一种保持图像细节的直方图均衡新算法. 计算机工程与科学, 2006, 28(5): 36-38.
- 16 郑辉, 吴谨. 基于小波分频与直方图均衡的图像增强算法. 现代电子技术, 2010, 16: 149-153.
- 17 张燕红, 侯德文. 基于小波分频和二次均衡的图像增强算法. 计算机应用与软件, 2007, 24(11): 159-161.
- 18 Bassiou N. Color image histogram equalization by absolute discounting back off. Computer Vision and Image Understanding, 2007, 107(122): 108-122.
- 19 Yang YY, Lin XZ. Research on the comparison of color image enhancement techniques. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2006, 14(3): 432-471.
- 20 Kumar NS, Cal M. Hue preserving color image enhancement without gamut problem. IEEE Trans. on Image Processing, 2003, 12(12): 1591-1598.
- 21 胡琼, 汪荣贵, 胡韦伟等. 基于直方图分割的彩色图像增强算法. 中国图像图形学报, 2009, 14(9): 1776-1781.