

文章编号 1004-924X(2009)09-2292-09

等面积递归分解的部分重叠局部直方图均衡

孙春风, 袁 峰

(哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了克服现有的直方图均衡算法在图像细节信息增强的同时无法保持输入图像亮度的缺点,以部分重叠局部直方图均衡算法(POSHE)为基础,将递归分解的思想引入子块图像直方图均衡过程,提出了一种亮度保持的部分重叠局部直方图均衡算法。子块图像根据其累积概率密度(CDF)的中值,递归地进行不同深度的分解;然后,对每一个分解的子图像在其灰度范围内进行直方图均衡,并将均衡后的子图像合并;最后,根据移动步长对子块图像进行线性或双线性插值消除块效应对图像细节信息的影响。实验结果表明,这种改进的部分重叠局部直方图均衡算法的峰值信噪比(PSNR)比传统方法平均提高了 0.063~6.633 dB。在实际应用中,该算法既能有效地增强图像的细节信息,又能保持输入图像的亮度,并且彻底地消除了块效应对图像均衡结果的影响,使均衡后的图像具有更加自然的视觉效果。

关键词:局部直方图均衡;递归分解;亮度保持;块效应

中图分类号:TP391.41 文献标识码:A

Partially overlapped sub-block histogram equalization based on recursive equal area separateness

SUN Chun-feng, YUAN Feng

(*Department of Automatic Testing and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: The traditional histogram equalization is unable to preserve the input image brightness, when the contrast of an image is enhanced. Based on a Partially Overlapped Sub-block Histogram Equalization algorithm (POSHE), the recursive separateness method is used in the process of sub-block histogram equalization. A brightness preservation partially overlapped local histogram equalization algorithm which can preserve the brightness is proposed. The sub-block image is separated recursively into different sub-images with the cumulative density function (CDF). Then, each sub-image histogram is equalized within its respective gray range, and all the sub-images are incorporated into the equalized sub-blocks. Both linear and bilinear interpolations are used in the equalized sub-block based on a step size to avoid the generation of blocking effects and the influence on image details. Experimental results show that the average Peak Signal Noise Ratio(PSNR) is improved by 0.063~6.633 dB compared with those of traditional interpolation methods. In fact, the local image details are enhanced, and the input image brightness is also preserved effectively. For the influence of the blocking

收稿日期:2008-09-27;修订日期:2008-11-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50275040)

effects on the image is eliminated, the equalized image shows a more natural visual impression.

Key words: local histogram equalization; recursive separation; brightness preservation; blocking effect

1 引言

直方图均衡(HE)方法因为其有效性和简单易用性成为一种常用的图像对比度增强方法。其基本思想是根据输入图像的灰度概率分布来确定其对应的输出灰度值,通过扩展图像的动态范围达到提升图像对比度的目的^[1-2]。直方图均衡方法有全局和局部两种。全局直方图均衡(GHE)使用整幅输入图像的直方图信息作为转换函数。虽然GHE方法适合于图像整体对比度的提高,但存在明显的缺陷:输出图像无法保持输入图像的亮度,并会产生难以接受的加工痕迹。理论上,全局直方图均衡后输出图像的亮度均值总是位于输出图像灰度范围的中值附近,而与输入图像的亮度无关^[3-4]。全局直方图均衡的上述特性使其难以满足商业和军事图像处理领域的要求。

与全局方法相比,局部直方图均衡(LHE)方法可以显著提升图像的局部信息,但要求的计算量大,且局部区域可能出现过度增强现象^[5-6]。为了减小LHE方法的计算复杂度,并获得LHE的图像局部增强效果,提出了多种改进LHE算法。总体来说,局部直方图均衡算法主要有子块不重叠、子块重叠与子块部分重叠三种方式。其中,子块不重叠方式因为经常会产生明显的块效应而很少采用;子块重叠方式,即传统LHE方法,计算量大,处理速度慢,实际应用也不多;子块部分重叠方式与子块重叠方式图像对比度增强的程度相当,且计算量和块效应明显减小,因而倍受青睐。

无论是全局直方图均衡还是局部直方图均衡,都无法保证输入图像亮度与直方图均衡后输出图像亮度一致。因此,为了满足某些商业、军事等图像处理过程的要求,减少加工痕迹,使图像更自然,需要进行图像亮度的保持。目前,许多学者已经提出了多种图像亮度保持的直方图均衡算法,例如:亮度保持的双直方图均衡算法(BBHE)^[7],等面积二元子图像直方图均衡算法(DSIHE)^[8],最小均值亮度差双直方图均衡算法(MMBEBHE)^[9]。BBHE、DSIHE和MMBEBHE算法都能在一定程度上保持原始输入图像的亮度。Chen^[10]提出的基于平均亮度值递归分解

直方图均衡算法(RMSHE)将BBHE算法进一步深化,将输入图像进行 n 次分割,然后分别对产生的 2^n 个子直方图进行HE操作。本文将递归分解的思想引入DSIHE算法中,将其与子块部分重叠局部直方图均衡算法相结合,提出一种基于等面积递归分解的部分重叠局部直方图均衡算法。该算法在增强图像对比度的同时保留了图像的细节信息,减少了块效应,保持了输入图像与输出图像亮度的一致性,更好地满足了商业和军事图像处理领域的应用要求。

2 局部直方图均衡算法

局部直方图均衡算法按照分割子块的重叠程度可分为子块不重叠、子块重叠和子块部分重叠三种方式。如果从模板移动的程度来划分,局部直方图均衡算法又可分为逐点式和步进式。实际上,子块重叠LHE即是逐点式LHE,子块不重叠和子块部分重叠LHE可以统称为步进式LHE。

子块不重叠局部直方图均衡算法根据某个标准或函数将输入图像划分成一系列互不重叠的子块,并对每个子块分别进行独立的直方图均衡。该算法由于各子块的直方图均衡函数差异较大,因此输出图像中不可避免会产生严重的块效应。

子块重叠局部直方图均衡算法是一种逐点式的局部直方图均衡算法。该算法不仅使图像的局部细节信息得到了充分的对比度增强,同时消除了块效应。传统的局部直方图均衡算法即属于这种局部直方图均衡算法。但由于模板均衡的总次数等于输入图像的像素总数,因此该算法的计算量很大,通常不适用于对实时性要求很高的图像处理。

Kim^[11]等人提出的子块部分重叠局部直方图均衡算法(POSHE)是一种步进式的局部直方图均衡算法。该算法与子块重叠LHE相类似,也需要定义一个矩形模板,并对模板区域内的图像进行直方图均衡。但与子块重叠LHE算法不同之处在于,模板内直方图均衡的灰度转换函数不仅用于映射模板中心像素灰度值,而且用于映

射模板内所有像素的灰度值。同时,局部直方图均衡后,模板不再逐像素移动,而是在水平或垂直方向以事先规定的步长进行移动。一般情况下,模板的长或宽的尺寸都是水平或垂直步长的整数倍。因为模板的移动距离小于模板尺寸,因此 POSHE 的过程中必然存在被多次均衡的像素,输出图像中该位置像素的灰度值通常为多次均衡结果的平均值。

POSHE 算法的图像增强能力略逊于子块重叠局部直方图均衡算法,但其模块均衡的总次数要远远小于子块重叠局部直方图均衡算法,算法的计算效率大幅度提高,因此在实时性要求较高的图像处理领域中,POSHE 算法得到了广泛的应用。

3 等面积递归分解的部分重叠局部直方图均衡

图像处理过程中,子块部分重叠局部直方图均衡算法在模板边界处仍然可能出现块效应,影响图像质量,因此需要进行块效应消除操作。POSHE 算法中的块效应消除滤波器(BERF),在检测到存在块效应的时候,用子块边界处分别属于两个子块的相邻两个像素的灰度平均值分别代替这两个像素的灰度值,从而消除子块边界处的灰度差异。实际应用中,BERF 的块效应消除效果并不理想,随着步长的增加,块效应变得越来越明显。因此,需要对 POSHE 算法进行改进,进一步消除块效应对于直方图均衡化后的输出图像细节的影响^[12]。本文将改进的 POSHE 算法与递归分解的 DSIHE 算法相结合,提出一种等面积递归分解的部分重叠局部直方图均衡算法(Partially Overlapped Sub-Block Histogram Equalization based on Recursive Equal Area Separateness)。该算法能够在保持图像亮度和保留图像细节信息的基础上,进一步增强图像的对比度,尽可能消除块效应对于输出图像的影响。

3.1 等面积递归分解直方图均衡算法

由于传统的直方图均衡算法很难保证输出图像与输入图像亮度的一致性,因此在子块的直方图均衡过程中,需要采用新的直方图均衡算法实现图像亮度保持的目的。本文将 RMSHE 算法

中的递归思想引入到 DSIHE 算法,根据累积概率密度的中值递归分解输入子块图像到指定的深度 k ,得到 2^k 个不同灰度级范围的子图像,再对每个子图像分别在其灰度级范围内进行直方图均衡,然后将均衡后的子图像进行合并,得到均衡后的子块图像。随着递归深度 k 的增加,输出图像与输入图像的亮度差异会越来越小。

3.1.1 $k=0$

当递归深度 k 为 0 时,不对子块图像进行任何的分解操作,即仅对子块图像进行常规的直方图均衡处理。对于输入子块图像 $SBLOCK_1$ 来说,若图像灰度级 i 范围为 $[W_0, W_m]$,则灰度级的概率密度函数 $p(i)$ 表示为:

$$p(i) = \frac{n(i)}{n}, \quad (1)$$

其中, $i = W_0, W_1, \dots, W_m$, n 为子块像素总数, $n(i)$ 为子块内灰度级 i 的像素数。子块图像中灰度级 i 的累积概率密度(CDF)为:

$$c(i) = \sum_{j=W_0}^i p(j), \quad (2)$$

若均衡后子块图像为 $SBLOCK_0$,则子块的直方图均衡可以表示为:

$$SBLOCK_0 = f(SBLOCK_1). \quad (3)$$

转换函数:

$$f(\cdot) = W_0 + (W_m - W_0)c(\cdot), \quad (4)$$

其中, $f(\cdot)$ 表示像素灰度值的运算过程, $c(\cdot)$ 是子块图像的累积概率密度。一般认为,直方图均衡后子块图像中各灰度级 i 有近似均衡的概率密度,即:

$$p(i) = 1/(W_m - W_0). \quad (5)$$

均衡后子块图像的亮度均值为其灰度级的中值:

$$E(SBLOCK_0) = \sum_{W_0}^{W_m} ip(i) = \sum_{W_0}^{W_m} \frac{i}{W_m - W_0} = \frac{W_m + W_0}{2}, \quad (6)$$

其中, $E(\cdot)$ 表示数学期望。上式表明,均衡后子块图像的亮度均值与输入图像亮度无关,总在其灰度范围的中值附近。很明显,很多应用中并不希望得到上述结果。

3.1.2 $k=1$

当递归深度 k 为 1 时,对输入子块图像进行一次递归分解,即对子块图像进行 DSIHE 算法处理。假设输入子块图像累积概率密度等于 0.5

时所对应的灰度级为 W_z , 则子块图像可以分解成两个子图像 $SBLOCK_{Idn}$ 和 $SBLOCK_{Iup}$ 。子图像 $SBLOCK_{Idn}$ 包含灰度级 $\{W_0, W_1, \dots, W_z\}$, 子图像 $SBLOCK_{Iup}$ 包含灰度级 $\{W_{z+1}, W_{z+2}, \dots, W_m\}$ 。子图像 $SBLOCK_{Idn}$ 和 $SBLOCK_{Iup}$ 对应的概率密度函数分别为:

$$\begin{cases} p_{dn}(i) = \frac{n_{dni}(i)}{n_{dn}} \\ p_{up}(i) = \frac{n_{upi}(i)}{n_{up}} \end{cases}, \quad (7)$$

其中, n_{dn} 为子图像 $SBLOCK_{Idn}$ 内像素总数, n_{dni} 为子图像 $SBLOCK_{Idn}$ 内灰度级 i 的像素数; n_{up} 为子图像 $SBLOCK_{Iup}$ 内像素总数, n_{upi} 为子图像 $SBLOCK_{Iup}$ 内灰度级 i 的像素数。子图像 $SBLOCK_{Idn}$ 和 $SBLOCK_{Iup}$ 对应的累积概率密度函数分别为

$$\begin{cases} c_{dn}(i) = \sum_{j=W_0}^i p_{dn}(j) \\ c_{up}(i) = \sum_{j=W_z+1}^i p_{up}(j) \end{cases}. \quad (8)$$

$$E(SBLOCK_0) = p(SBLOCK_{Odn})E(SBLOCK_{Odn}) + p(SBLOCK_{Oup})E(SBLOCK_{Oup}) = \frac{1}{2} \frac{(W_z + W_0)}{2} + \frac{1}{2} \frac{(W_m + W_z)}{2} = \frac{W_z + W_g}{2}, \quad (13)$$

其中, $W_g = (W_0 + W_m)/2$, 即输出图像灰度范围的中值。上式表明, 均衡后子块图像的亮度均值是输入图像亮度中值与分界点灰度级的平均。由于 W_z 与 W_g 所占的权重相同, 因此递归深度 k 为 1 时, 即 DSIHE 算法的图像亮度保持作用有限。

3.1.3 $k=2$

当递归深度 k 为 2 时, 子块图像在 3.1.2 节分解的基础上, 分别对子图像 $SBLOCK_{Idn}$ 和 $SBLOCK_{Iup}$ 计算各自的 CDF, 并以各自 CDF 等于 0.5 时所对应的灰度级为分界点, 将 $SBLOCK_{Idn}$ 和 $SBLOCK_{Iup}$ 进一步分解成 4 个子图像 $SBLOCK_{Idn1}$ 、 $SBLOCK_{Idn2}$ 、 $SBLOCK_{Iup1}$ 和 $SBLOCK_{Iup2}$, 分别对应灰度级 $\{W_0, W_1, \dots, W_{z1}\}$ 、 $\{W_{z1+1}, W_{z1+2}, \dots, W_z\}$ 、 $\{W_{z+1}, W_{z+2}, \dots, W_{z2}\}$ 和 $\{W_{z2+1}, W_{z2+2}, \dots, W_m\}$ 。对应的 CDF 可分别表示为:

均衡后子图像分别为 $SBLOCK_{Odn}$ 和 $SBLOCK_{Oup}$ 。子图像的直方图均衡可分别表示为:

$$\begin{cases} SBLOCK_{Odn} = f_{dn}(SBLOCK_{Idn}) \\ SBLOCK_{Oup} = f_{up}(SBLOCK_{Iup}) \end{cases}. \quad (9)$$

转换函数:

$$\begin{cases} f_{dn}(\cdot) = W_0 + (W_z - W_0)c_{dn}(\cdot) \\ f_{up}(\cdot) = W_z + (W_m - W_z)c_{up}(\cdot) \end{cases}. \quad (10)$$

最后, 将处理后子图像合并得到均衡后的子块图像:

$$SBLOCK_0 = SBLOCK_{Odn} + SBLOCK_{Oup}, \quad (11)$$

与 3.1.1 中的推导过程相类似, 子图像 $SBLOCK_{Odn}$ 和 $SBLOCK_{Oup}$ 的亮度均值分别为其灰度范围中值:

$$\begin{cases} E(SBLOCK_{Odn}) = (W_z + W_0)/2 \\ E(SBLOCK_{Oup}) = (W_m + W_z)/2 \end{cases}. \quad (12)$$

均衡后子块图像的亮度均值:

$$\begin{cases} c_{dn1}(i) = \sum_{j=W_0}^i n_{dni1}(j)/n_{dn1} \\ c_{dn2}(i) = \sum_{j=W_{z1}}^i n_{dni2}(j)/n_{dn2} \\ c_{up1}(i) = \sum_{j=W_z}^i n_{upi1}(j)/n_{up1} \\ c_{up2}(i) = \sum_{j=W_{z2}}^i n_{upi2}(j)/n_{up2} \end{cases}, \quad (14)$$

其中, n_{dn1} 、 n_{dn2} 、 n_{up1} 和 n_{up2} 分别为 4 个子图像内像素总数, n_{dni1} 、 n_{dni2} 、 n_{upi1} 和 n_{upi2} 分别为 4 个子图像内灰度级 i 的像素数。4 个子图像分别在各自灰度级范围内进行直方图均衡后得到子图像 $SBLOCK_{Odn1}$ 、 $SBLOCK_{Odn2}$ 、 $SBLOCK_{Oup1}$ 和 $SBLOCK_{Oup2}$, 经合并得到子块图像:

$$SBLOCK_0 = SBLOCK_{Odn1} \cup SBLOCK_{Odn2} \cup SBLOCK_{Oup1} \cup SBLOCK_{Oup2}. \quad (15)$$

均衡后子块图像的亮度均值:

$$\begin{aligned}
 E(\text{SBLOCK}_0) &= p(\text{SBLOCK}_{\text{dn1}})E(\text{SBLOCK}_{\text{dn1}}) + p(\text{SBLOCK}_{\text{dn2}})E(\text{SBLOCK}_{\text{dn2}}) + \\
 & p(\text{SBLOCK}_{\text{up1}})E(\text{SBLOCK}_{\text{up1}}) + p(\text{SBLOCK}_{\text{up2}})E(\text{SBLOCK}_{\text{up2}}) = \\
 & \frac{1}{4} \frac{W_0 + W_{z1}}{2} + \frac{1}{4} \frac{W_{z1} + W_z}{2} + \frac{1}{4} \frac{W_z + W_{z2}}{2} + \frac{1}{4} \frac{W_{z2} + W_m}{2} = \frac{1}{4} (W_{z1} + W_z + W_{z2} + W_g),
 \end{aligned} \tag{16}$$

其中, $W_g = (W_0 + W_m)/2$ 。上式表明, 均衡后子块图像的亮度均值是输入图像亮度中值与各分界点灰度值的平均。由于 W_g 所占的权重仅为 $1/4$, 因此递归深度 k 为 2 时, 较 DSHE 算法的亮度保持作用进一步加强。

与此相类似, 任意递归深度 k 时, 子块图像可以根据各自灰度范围内 CDF 的计算结果分解成 2^k 个子图像, 将其分别在各自的灰度范围内进行直方图均衡, 再将均衡后的子图像合并, 即可得到等面积递归深度为 k 时的子块图像。此时, 子块图像的亮度均值是输入图像亮度中值与各分界点灰度值的平均。随着递归深度的增加, 输出子块图像的亮度均值会越来越接近输入子块图像的亮度均值。但如果过分增加递归的深度, 会使得输出子块图像过分接近输入子块图像, 起不到图像增强的目的。通常情况下, 递归深度不应超过 8, 一般取为 $k \leq 4$ 。

3.2 块效应消除方法

POSHE 算法对于子块边缘的块效应采用块效应消除滤波器 (BERF) 进行消除。BERF 用子块边缘处分别属于两个子块的相邻两个像素的灰度平均值分别代替这两个像素的灰度值, 消除子块边界处的灰度差异。随着移动步长的增加, BERF 的块效应消除效果并不理想。本文对 POSHE 算法中的块效应消除过程进行改进, 根据每个步块在子块内的不同位置进行线性或双线性插值等不同处理, 进而消除块效应对于输出图像的影响。

如果像素 (x, y) 的亮度为 i , 则经过相邻四点双线性插值后的新亮度为:

$$\begin{aligned}
 q(i) &= v h q_{--}(i) + (1-v) h q_{+-}(i) + \\
 & v(1-h) q_{-+}(i) + (1-v)(1-h) q_{++}(i),
 \end{aligned} \tag{17}$$

其中, $v = (x_+ - x)/(x_+ - x_-)$, $h = (y_+ - y)/(y_+ - y_-)$ 。 $q_{--}(i)$ 、 $q_{+-}(i)$ 、 $q_{-+}(i)$ 和 $q_{++}(i)$ 分别对应像素 (x_-, y_-) 、 (x_+, y_-) 、 (x_-, y_+) 和 (x_+, y_+) 。

设子块移动的水平 and 垂直步长分别为 s_x 和

s_y , 随着子块以步长 s_x 和 s_y 移动, 子块内将形成栅格状的步块。子块与步块之间的相对关系如图 1 所示, 其中, 步块的尺寸为 $s_x \times s_y$, 子块尺寸为 $h \times l$ 。相邻步块 s_1 和 s_2 包含在子块 a 和 c 中, 如果对子块 a 和 c 进行图像对比度增强, 则步块 s_1 和 s_2 的像素亮度增强程度是均匀的, 不会造成对比度的差异。但如果子块 b 进行图像对比度增强, 由于步块 s_1 未包含在子块 b 内, 则步块 s_1 和 s_2 之间会出现对比度的差异。

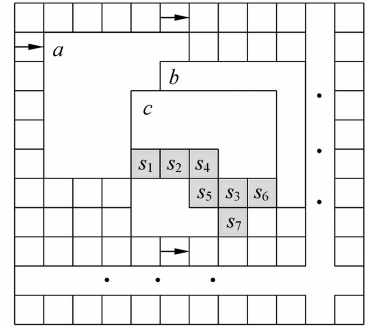


图 1 子块与步块之间的相对关系

Fig. 1 Position relationship between step-blocks and sub-blocks

为了避免产生块效应, 每个步块可以根据其在子块中的不同位置进行不同处理。如果一个步块不在图像的角落处, 则至少有两个子块包含。相对于子块来说, 步块可能位于子块的角落、边缘、内部。例如: 图 1 中 s_2 分别位于子块 a 的角落, 子块 b 的边缘和子块 c 的内部。当步块位于子块的角落处时, 采用矩阵形式的双线性插值来解决步块与其位于子块外部的相邻两个步块之间的对比度差异问题。矩阵形式的双线性插值为:

$$\begin{aligned}
 Q(i) &= P_1 Q_{--}(i) + P_2 Q_{+-}(i) + P_3 Q_{-+}(i) + \\
 & P_4 Q_{++}(i),
 \end{aligned} \tag{18}$$

其中, Q 、 Q_{--} 、 Q_{+-} 、 Q_{-+} 和 Q_{++} 分别对应公式 (17) 中的 q 、 $q_{--}(+)$ 、 $q_{+-}(i)$ 、 $q_{-+}(i)$ 和 $q_{++}(i)$ 。系数矩阵 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 来自于公式 (17) 中的系数。当步块位于子块的边缘处时, 采用线性插值来解决对比度差异问题。当步块位于子块内部

时,由于图像对比度增强不会造成亮度差异,因此无需进行块效应消除。

基于上述分析,本文采用一种双函数块效应消除滤波器来消除块效应的影响。双函数块效应消除滤波器是一种与子块大小相同的幂矩阵。图 2 所示为子块角落处的块效应消除幂矩阵。在幂矩阵的边缘,幂值在 $[0,1]$ 范围内从内至外线性递减。幂矩阵内部,幂值总为 1。

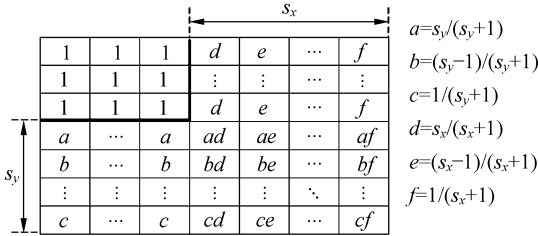


图 2 幂矩阵阵列

Fig. 2 Power matrix for array multiplication

每个像素在整个图像对比度增强的过程中,至少经历一次局部直方图均衡,每个像素的最终亮度:

$$I(x,y) = \left\{ \sum_{i=1}^n [Q_i(x,y)I_i(x,y)] \right\} / \sum_{i=1}^n p_i(x,y), \quad (19)$$

其中, $I(x,y)$ 是像素 (x,y) 的最终亮度, n 是子块经过像素的次数, $Q_i(x,y)$ 是第 i 次局部直方图均衡时的幂矩阵的值。

3.3 RSPOSHE 算法描述

(1) 对于 $H \times L$ 的输入图像,定义一个尺寸相同的输出图像,并将其中所有像素灰度值置为零;

(2) 定义一个 $h \times l$ 的子块。为了计算方便, h 和 l 的取值应满足 H 和 L 分别为 h 和 l 的 2 的整数倍。同时,子块的起点应与输入图像的起点一致;

(3) 按照 3.1 节中提出的等面积递归分解直方图均衡算法对当前子块图像进行直方图均衡化处理;

(4) 按照 3.2 节中提出的块效应消除方法,对当前子块进行线性或双线性插值等不同处理,累加在输出图像的对应像素灰度值上,同时记录下线性或双线性插值的系数矩阵;

(5) 将子块在水平方向向右移动水平步长

S_x , 如果子块的水平坐标小于输入图像水平尺寸时,则转到步骤(3),否则,转到(6);

(6) 将子块在垂直方向向下移动垂直步长 S_y , 如果子块的垂直坐标小于输入图像垂直尺寸时,则子块的最左端像素的水平坐标置为输入图像最左端像素的水平坐标值,并转到步骤(3),否则,转到(7);

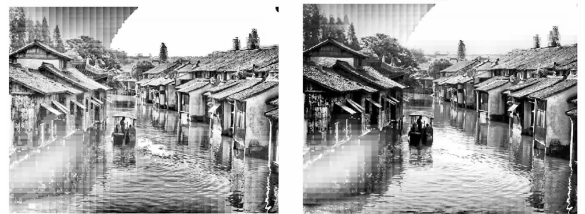
(7) 将输出图像的所有像素灰度值除以各自的累加总系数。

4 实验结果与讨论

图 3 是对一幅 800×600 的黑白图像采用不同的直方图均衡算法处理后的效果图。其中, (a) 是原始图像; (b) 是采用传统的直方图均衡算法



(a) 原始图像 (a)Original image
(b) 传统的 HE (b)Traditional HE



(c) POSHE (c)POSHE
(d) 递归分解 POSHE (d)Recursively separated POSHE



(e) 块效应改进 POSHE (e)POSHE improved by block effect
(f) RSPOSHE (f)RSPOSHE

图 3 不同的直方图均衡算法的效果

Fig. 3 Simulation results of different histogram equalization algorithms

得到的结果；(c)是采用 POSHE 算法得到的结果；(d)是将等面积递归分解直方图均衡算法应用于 POSHE 算法中得到的结果；(e)是采用本文 3.2 节提出的块效应消除方法对 POSHE 算法进行改进得到的结果；(f)为采用本文提出的 RSPOSHE 算法得到的结果，其中，递归分解的深度为 2。图 4 是图 3 中对应图像的直方图。图像的客观质量用其峰值信噪比 (PSNR) 衡量，表 1 给出了图 3 所涉及的几种直方图均衡算法的 PSNR 值。

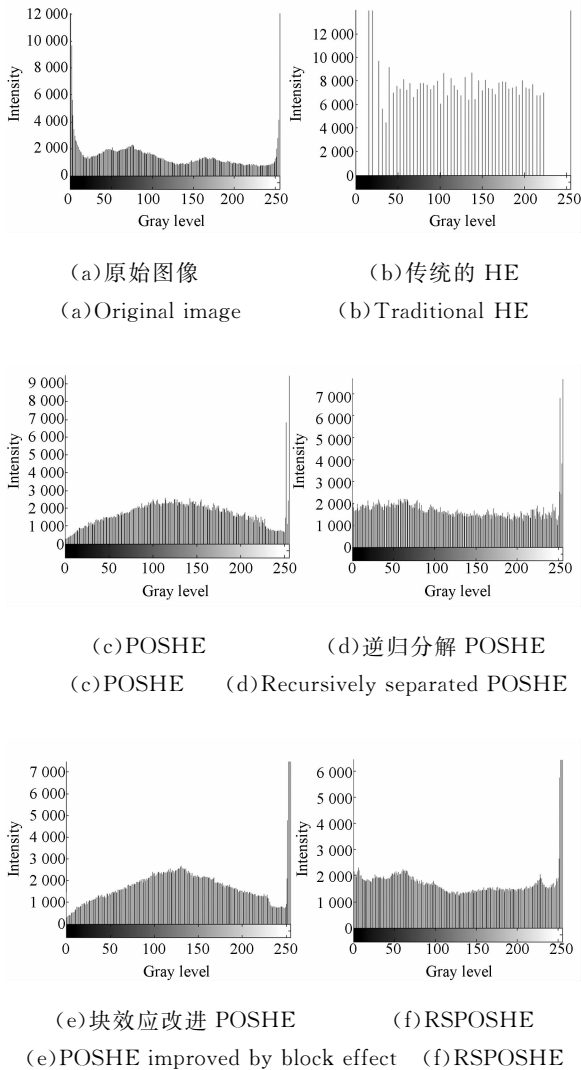


图 4 不同直方图均衡算法的直方图

Fig. 4 Histograms of different histogram equalization algorithms

由于全局直方图均衡算法是对整幅图像的均衡，均衡后图像亮度均值一般在图像灰度级中值

的附近，图 3(b)可以看出整幅图像与原始图像相比并没有太大的变化，图像左面的细节仍然比较模糊，由图 4(b)也可以知道，传统 HE 算法的直方图分布比较稀疏，大量的图像细节信息丢失。图 3(c)和图 4(c)所示分别为采用 POSHE 算法的效果图及其直方图，局部直方图均衡后图像的细节信息得到了较好的增强，但图像左面的亮度与原始图像相比有较大的变化，且整幅图像有明显块效应存在，其均衡后直方图仍然集中在灰度级中值附近。图 3(d)是在 POSHE 算法的子块图像处理过程中采用等面积递归分解直方图均衡算法的效果图。由效果图可知，虽然均衡后图像的亮度得到了一定程度的保持，但块效应现象仍然比较明显；图 3(e)是将 POSHE 算法中块效应消除的方法进行改进以后得到的效果图。由图中可知，块效应现象基本得到了消除，但左半部图像的亮度有较大的变化，且整幅图像看起来不够平滑，因此上述两种算法都在一定程度上存在某种缺陷，由它们的直方图也可以看出其直方图与原始直方图存在较大的不同。图 3(f)和 4(f)分别对应本文提出的 RSPOSHE 算法的效果图和直方图，图像的细节信息得到了有效的增强，且图像亮度和直方图形状都与原始图像较为接近，同时块效应被彻底消除。由表 1 可以看出，传统的直方图均衡算法处理后图像 PSNR 值最低，而 RSPOSHE 算法得到的结果图像 PSNR 值比上面的 4 种直方图均衡算法平均提高了 0.063 ~ 6.633 dB。

表 1 图 3 中不同算法的 PSNR 值比较

Tab. 1 PSNR values of different algorithms of Fig. 3 (unit: dB)

算 法	平均亮度	RMSE	PSNR
原始图像	113.45		
传统 HE (b)	139.89	124.857	6.203
POSHE (c)	144.52	87.895	9.252
递归分解的 POSHE (d)	131.61	58.599	12.773
改进块效应的 POSHE (e)	144.58	88.175	9.224
RSPOSHE (f)	131.77	58.177	12.836

子块尺寸和移动步长的选择与文献[10]中的

原则相类似,子块尺寸一般选为图像尺寸的 $1/10 \sim 1/2$,移动步长一般小于子块尺寸的 $1/8$ 。步长越小,块效应越不明显,但整个算法的计算量会成倍地增加。

5 结 论

本文将自适应插值的 POSHE 算法与递归分解的 DSIHE 算法相结合,提出了一种等面积递归分解的部分重叠局部直方图均衡算法(RSPOSHE)。该算法将递归分解的思想引入 DSIHE 算法,并将其用于子块的直方图均衡过

程,在增强图像细节信息的同时有效地保持了输入图像亮度与输出图像亮度的一致性。在 RSPOSHE 算法的块效应消除过程中,根据像素在子块中所处位置的差异,自适应地采用线性或双线性插值方法进行块效应消除,彻底地解决了传统的部分重叠直方图均衡算法存在的随着步长的增加块效应消除效果越来越差的问题。实验结果表明,RSPOSHE 算法的峰值信噪比(PSNR)比传统的直方图均衡算法平均提高了 $0.063 \sim 6.633$ dB。因此,可以更好地满足商业和军事图像处理领域对于图像对比度增强和图像亮度保持的应用要求。

参考文献:

- [1] SINGHAI J, RAWAT P. Image enhancement method for underwater, ground and satellite images using brightness preserving histogram equalization with maximum entropy [C]. *Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications*, 2007, 3:507-512.
- [2] 付树军,阮秋琦,王文洽. 基于特征驱动的双向耦合扩散方程的图像去噪和边缘锐化[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2):315-319.
FU SH J, YUAN Q Q, WANG W Q. Feature-oriented coupled bidirectional flow equation for image denoising and edge sharpening [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):315-319. (in Chinese)
- [3] WANG CH, YE ZH F. Brightness preserving histogram equalization with maximum entropy: a variational perspective [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 51(4):1326-1334.
- [4] 李志敏,林越伟,黄俊,等. PCB 走线检测的预处理算法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 272-276.
LI ZH M, LIN Y W, HUANG J, et al.. Preprocess algorithm of PCB line detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):272-276. (in Chinese)
- [5] YEGANEH H, ZIAEI A, REZAI E A. A novel approach for contrast enhancement based on Histogram Equalization [C]. *Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering*, 2008:256-260.
- [6] JAFAR I, HAO Y. Image contrast enhancement by constrained variational histogram equalization [C]. *Proceedings of the International Conference on Electro/Information Technology*, 2007:120-125.
- [7] KIM Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1997, 43(1):1-8.
- [8] WANG Y, CHEN Q, ZHANG B. Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1999, 45(1):68-75.
- [9] CHEN S D, RAMLI A R. Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, 49(4):1310-1319.
- [10] CHEN S D, RAMLI A R. Contrast enhancement using recursive mean-separate histogram equalization for scalable brightness preservation [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, 49(4):1301-1309.
- [11] KIM J Y, KIM L S, HWANG S H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, 11(4):475-484.
- [12] 何博侠,张志胜,戴敏,等. 基于序列局部图像的高精度测量[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2):367-373.
HE B X, ZHANG ZH SH, DAI M, et al.. A high-precision dimension measurement method based on sequential partial images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):367-373. (in Chinese)

作者简介:



孙春风(1976—),女,黑龙江哈尔滨人,1998年于上海理工大学获得学士学位,2005年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,现在哈尔滨工业大学攻读博士学位,主要从事计算机视觉、图像处理、光电检测技术等方面的研究。E-mail: amysun01@sina.com



袁峰(1963—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1985年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1988年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事光电检测技术及精密几何参数测量技术等方面的研究。E-mail: yuanf@hit.edu.cn

● 下期预告

地外太阳紫外光谱测量

王淑荣¹,李福田¹,宋克非¹,王立朋¹,汪龙祺¹,
林冠宇¹,黄煜¹,刘海波¹,曲艺¹,黄富祥²,王维和²

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国气象局 国家卫星气象中心,北京 100081)

地外太阳紫外光谱及其随时间的变化研究有重要的科学意义和应用价值,近年随空间技术的发展,国外太阳紫外光谱观测研究十分活跃。研制了中国首台 FY-3 紫外臭氧垂直探测仪并于 2008 年 5 月发射。这是一台结构紧凑、小型化、紫外-真空紫外光谱辐射计,取得 160~400 nm 太阳紫外光谱数据,数据稳定。本文报导仪器结构、工作模式、辐射定标、太阳紫外光谱数据处理及结果。与美国 SBUV/2 测试结果比较,一致性在±5%以内,达到国际同类仪器的先进水平。