

中图分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)04-0522-06

论文索引信息: 杨有, 李波. CLAHE 和细节放大相结合的档案图像增强方法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4): 522-527

CLAHE 和细节放大相结合的档案图像增强方法

杨有^{1),2)}, 李波¹⁾

¹⁾ (北京航空航天大学计算机学院数字媒体实验室, 北京 100191) ²⁾ (重庆师范大学计算机与信息科学学院, 重庆 401331)

摘要: 图像增强可提高扫描档案图像的质量, 关系到档案图像信息系统的生命。运用 CLAHE 可以进行全局对比度拉伸, 运用 Lee 滤波器可进行局部细节放大, 将两者结合可形成放大细节的 CLAHE 方法。对结合的方法从两方面进行改进, 一是引入噪声抑制措施, 使得 Lee 滤波器只放大图像细节而不放大噪声; 二是制定柔性细节放大机制, 使得细节放大更加符合人类视觉习惯。改进后的方法既能提高全局对比度, 又能有效放大局部细节。实验表明, 提出的方法对包含文本、图形和图像的扫描档案具有较好的增强效果, 且能够满足国家行业规范要求和实际应用需要。

关键词: 档案图像; 图像增强; 有约束的自适应直方图均衡化; Lee 滤波器

A method of document image enhancement based on the combination of CLAHE and detail amplifying

Yang You^{1),2)}, Li Bo¹⁾

¹⁾ (Digital Media Laboratory, School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191 China)

²⁾ (School of Computer and Information Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331 China)

Abstract: The document image incorporating with image enhancement method can achieve a good perceptual quality, which is necessary for the document image information system. Contrast-limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) is widely utilized to expand the global dynamic contrast range, and Lee filter is usually used to amplify the local details. A detail-amplifying CLAHE (DAHE) method is proposed by combining the above two methods. Firstly, a noise-resist policy is employed to differentiate the detail and the noise. Secondly, a flexibility amplifying mechanism is proposed to make the amplified image suitable for the human vision system. The proposed method can not only balance the global gray-level dynamic range, but also enhance the local details. The experimental results demonstrate that the proposed method can both enhance the document image, which is suitable for the document image information system, and satisfy the requirements of the national industry standard.

Keywords: document image; image enhancement; contrast-limited adaptive histogram equalization; Lee filter

0 引言

档案图像增强是档案形态迁移中的一项重要工作, 它的目的是改善图像质量, 提高档案图像信息系

统的利用价值。这种增强不意味着能增加原始图像的信息, 有时甚至会损失一些信息, 但图像增强的结果却能加强对特定信息的识别能力, 使图像中我们感兴趣的特征得以加强。根据国家档案局颁布的“纸质档案数字化技术规范”, 扫描档案图像增强面

收稿日期: 2009-11-28; 修回日期: 2010-02-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB327900); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA01Z316)。

第一作者简介: 杨有(1965—), 男, 副教授。北京航空航天大学计算机应用技术专业博士研究生, 主要研究方向为档案图像处理。E-mail: youyung@yahoo.com。

临的主要任务是去污和提高可读性。

受批量生产方式的限制,扫描档案普遍存在对比度动态范围窄小和受噪声污染等问题,部分学者对这些问题进行了研究。2003年,王洪君等人^[1]针对退化类别的档案,提出一种自适应韧性滤波的局部对比度增强方法,以滤除图像中的多类噪声。该方法能根据图像的特点,在噪声干扰比较严重的区域,着重于平滑噪声;在图像细节较多的区域,着重于增强图像的局部对比度。实验表明,该方法能明显改善视觉效果。同年,靳从^[2]提出规则文档分层去除噪声方法,但其方法对包含图像比例过大的档案处理效果不佳。2008年,Shirali-Shahreza 等人^[3],针对波斯语和阿拉伯语的扫描档案图像,提出了去除点类噪声的方法。他们首先对档案页进行区域分割,然后在每个分割区域寻找孤立点,并估计孤立点的大小,最后根据阈值确定孤立点属于噪声还是属于前景信息。实验表明,所提算法具有高速度和抗档案页面倾斜能力。但是,这3种方法限定了待处理对象的种类,对批量生产的多数档案图像具有一定程度的不适应性。

2003年,何希平等人^[4]针对档案图像对边缘轮廓特征的敏感性,提出用像素间的二次距离代替平滑算法中相关性的线性距离,使得算法具有旋转不变性,且平滑效果比线性距离更理想。2007年,Kountchev 等人^[5]针对扫描档案图像,提出了一种提高视觉质量和有利于压缩的档案图像增强方法。该方法使用自适应模糊滤波器滤除扫描过程带来的大量黑点,使用直方图校正技术清除扫描背景的模糊。实验表明该方法对包含签名、文本、图形、手写体的众多扫描档案均有效,而且有助于提高图像压缩。但这些方法在平滑噪声的同时没有强化图像细节的功能,改善可读性的效果尚需提高。

现有的噪声滤波技术包括线性方法、非线性方法和基于最优准则的保边缘方法等,处理后都免不了产生一定程度的边缘模糊,这样会使对比度进一步下降,给进一步处理带来困难;而现有的对比度增强技术,尤其是局部对比度增强技术,大都在增强对比度的同时提升了图像噪声。基于此,首先运用 CLAHE 方法增强全局对比度,改善图像的整体视觉效果,运用 Lee 滤波器放大细节,改善图像的局部视觉效果;其次,将 CLAHE 和 Lee 滤波器相结合,形成强化细节的 CLAHE 方法;最后,对强化细节的 CLAHE 方法进行两个方面的改进,一是保证放大的

细节是真实的前景像素而非噪声,二是保证放大细节的程度符合人类视觉习惯。改进后的最终方法是全局增强、局部增强和抑制噪声3种技术的有效结合,对扫描产生的多类档案图像具有明显的增强效果,且符合相关的行业标准。

1 相关工作介绍

1.1 CLAHE

CLAHE (contrast-limited adaptive histogram equalization,有约束的自适应直方图均衡化)是全局对比度增强的常用方法,它从整幅图像的视觉效果方面改善图像的质量,而不是对局部和细节质量的强调。

CLAHE 增强的基础是 HE (histogram equalization,直方图均衡化)和 AHE (adaptive HE,自适应直方图均衡化)方法。HE 方法对频数较少的灰度进行了归并,能够扩大图像灰度的动态分布范围,改善整体视觉效果;但处理后的图像会出现“过暗或过亮”的现象,而且可能损失图像细节。基本形式的 AHE 方法,是在一个像素的邻域内对每个像素执行 HE 映射操作,即每个像素根据它与待处理像素的权重贡献灰度值。AHE 方法主要改变了 HE 方法构造累积直方图时区间大小完全相等的特点,可以使分割区间的大小随着特征值样本聚集程度的变化而变化。因此,AHE 比 HE 对因噪声引起的失真的补偿性能更加有效。

AHE 的构造方法仅仅考虑了局部区域内的像素,而忽略了图像其他区域内的像素。这不符合人的视觉特性,因为一方面视觉系统随着相关区域的改变而改变,另一方面它还受相关区域周边环境的影响。为此,Cromartie 等人^[6]提出一种有约束的局部直方图 (CLAHE) 构造方法,它既考虑窗口内也考虑窗口外的直方图,即由矩形窗内的直方图和矩形窗外的直方图两部分构成,其形式描述为

$$h_L(r) = \alpha h_w(r) + (1 - \alpha) h_b(r) \quad (1)$$

式中, $h_w(r)$ 是窗内的归一化直方图, $h_b(r)$ 是窗外的归一化直方图,并且有 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。设 A_w 和 A_b 分别代表区域 W 和区域 B 的面积。如果 $\alpha = A_w / (A_w + A_b)$,那么 $h_w(r) = h(r)$,这就意味着局部直方图等于全局直方图;如果 $\alpha > A_w / (A_w + A_b)$,则局部直方图着重强调局部信息。在这种情况下,可以通过 α 调节局部直方图来模拟周围环境对相关区域的影响

响。CLAHE 的构造方法,保证了所有的局部直方图都像全局直方图那样具有相同的灰度级,但是它们的每一个灰度级在不同的位置具有不同的幅值。

1.2 Lee 滤波器

Lee 滤波算法^[7-9]是局部统计法的典型应用,而局部统计法又是局部对比度增强最具代表性的技术。

局部统计法以概率论为基础,运用统计学的方法对图像的局部数据进行分析、研究,导出其统计规律性。其一般计算公式为

$$g(i,j) = \bar{f}(i,j) + K[f(i,j) - \bar{f}(i,j)] \quad (2)$$

式中, $f(i,j)$ 为增强前的图像, $g(i,j)$ 为增强后的图像, $\bar{f}(i,j)$ 是输入图像在以 (i,j) 为中心的某个邻域内的局部均值, K 是增益系数。因此,经过上式处理,图像在 (i,j) 点的局部均值保持不变,而标准偏差是原来的 K 倍。当 $K > 1$ 时,图像中各点的局部方差增大到 K^2 倍,局部对比度得到增强。为了提高文字图像的局部对比度, K 值应取较大的数值,但是 K 值大,对图像中噪声的提升作用也较大。

Lee 滤波器,当初提出时是为了抑制图像的散斑噪声,后来用于强化图像细节时, Lee 给出了局部对比度增强的经典公式^[10]

$$x'_{i,j} = m_{i,j} + k(x_{i,j} - m_{i,j}) \quad (3)$$

式中, $m_{i,j} = \frac{1}{mn} \sum_{(i,j) \in W} x_{i,j}$ 为局部窗口 W 内像素的平均灰度值; $x_{i,j}$ 和 $x'_{i,j}$ 分别为变换前后中心像素的灰度值, k 为一自适应参数。

式(2)(3)并无本质区别,只是式(3)中的参数 k 有了更加明确的定义

$$k = k' \left(\frac{\sigma_{i,j}^2}{\sigma_n^2} - 1 \right) \quad (4)$$

式中, $\sigma_{i,j}^2$ 为邻域内的噪声方差, σ_n^2 为整幅图像的噪声方差, k' 为一比例系数,代表细节放大倍数,它根据应用的对象由实验给出。

结合式(3)(4)可以看出,当邻域方差 $\sigma_{i,j}^2$ 与图像方差 σ_n^2 接近时,表明图像在此处无细节存在,此时 $k \rightarrow 0$,只对邻域内的中心像素点进行均值滤波处理,以抑制噪声;当邻域方差 $\sigma_{i,j}^2$ 逐渐大于图像方差 σ_n^2 时, k 值也逐渐变大,表明图像在此处的细节因素应该越来越得到重视。因此,式(3)(4)描述的 Lee 滤波器方法可以放大细节和抑制噪声。

2 CLAHE 和 Lee 滤波器的结合

将全局和局部对比度增强结合在一起,即将 CLAHE 方法和 Lee 滤波器方法相结合,就形成了强化细节的 CLAHE 方法,简称 DAHE (detail amplifying CLAHE),其数学表达式为

$$x'_{i,j} = \text{CLAHE}(x_{i,j}) + k(x_{i,j} - m_{i,j}) \quad (5)$$

式中,CLAHE($x_{i,j}$)表示对 $x_{i,j}$ 像素执行 CLAHE 操作后的像素灰度值,其他符号的含义与式(3)中对应符号一致。

DAHE 方法的具体含义可以这样来理解:在实施直方图均衡操作之前,先将原图像中的细节部分保存下来,在直方图均衡时再将这些细节加上,如图 1 所示。曲线 1 对应原始输入图像,曲线 3 对应原始输入图像经 CLAHE 方法增强后的图像,曲线 2 和曲线 4 分别为曲线 1、3 放大细节后的效果。从图中不难看出,曲线 3、4 的动态灰度范围明显大于曲线 1、2,它表明 CLAHE 方法提高了全局对比度;相对于曲线 3,曲线 4 的细节明显被放大,它表明 DAHE 方法放大了 CLAHE 处理后的细节。因此,DAHE 方法具有全局增强和局部放大两种功能。

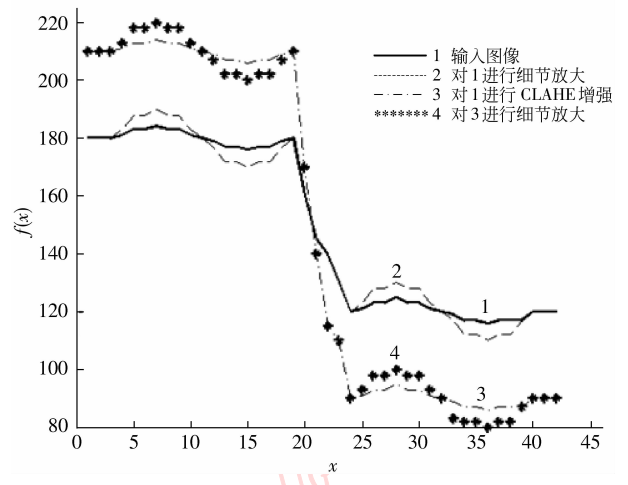


图 1 DAHE 增强方法示意图

Fig. 1 Conceptual diagram of DAHE

3 对 DAHE 的改进

在式(5)表达的 DAHE 方法中,存在如下两个问题:一是只要图像细节存在就会被放大,而不管该细节是图像本身的真正细节还是由于图像噪声引起

的干扰;二是细节放大的倍数只与邻域方差有关,没有考虑人类的视觉习惯。因此,有必要对 DAHE 方法进行改进,使之具有图像空间自适应能力,只放大真正的图像细节,而且放大程度平滑柔软,符合人类视觉习惯。

首先,对于图像的空域噪声,可以认为,梯度幅值小于某一阈值的像素点是由于噪声引起的,因此没有必要对该点进行细节增强。但是档案图像的种类繁多,应该如何确定某像素点的梯度幅值呢?因为不同的梯度算子检测的边缘方向不一样,因此使用多个梯度算子的组合作为该像素点的梯度幅值,具体表示为

$$|\nabla x_{i,j}| = \max\{g_1, g_2, \dots, g_n\} \quad (6)$$

式中, $\nabla x_{i,j}$ 表示图像在像素点 (i,j) 处的梯度, $g_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为不同梯度算子的模值。

又因为无论是哪类档案图像,考察当前像素点 (i,j) 周围的 8 个方向,都能找到一个方向代表图像纹理路径,所以选择 X 轴、Y 轴方向和对角线方向的梯度算子的组合作为该点总的梯度幅值是合理的。能够代表 X 轴、Y 轴方向的梯度算子可以选择梯度模,其离散近似表达式定义为

$$g_1 = \max\{|f(i,j+1) - f(i,j)|, |f(i+1,j) - f(i,j)|\} \quad (7)$$

能够代表对角线方向的梯度算子可以选择 Roberts 算子,其离散近似表达式定义为

$$g_2 = \max\{|f(i+1,j+1) - f(i,j)|, |f(i+1,j) - f(i,j+1)|\} \quad (8)$$

当然,式(7)(8)的定义有多种形式,此处选择最大值函数,意在获取该像素点周围的最大灰度变化情况。

这样,根据式(6)可确定 (i,j) 在各个方向中的最大梯度幅值,并以此作为噪声的判断依据。如果 $|\nabla x_{i,j}| > \varepsilon$,则认为该点梯度变化不是由噪声引起,图像细节需要放大;否则不需放大该点细节。其中 $\varepsilon (\varepsilon > 0)$ 为一阈值梯度。

其次,根据档案图像的纹理特点,对细节放大倍数 k 进行改进。式(4)中的 k 是由邻域方差相对于整幅图像方差的变化来决定的,这种决定使得灰度变化大的地方增强幅度也大,灰度变化小的地方增强幅度相应减小。而这种细节放大不符合档案图像具有粗糙纹理的特点,我们希望梯度大的地方放大系数相对较小,梯度小的地方放大系数相对较大,这样在不易察觉的图像细节得到较好增强的同时,也

使得增强后的档案图像总体上比较柔和。换句话说,对于原本梯度大的地方,视觉效果本身就比较清晰,不需要增强,而对于原本图像梯度小的地方,才是真正需要增强的部分。因此,根据像素点的梯度幅值 $|\nabla x_{i,j}|$ 来决定放大倍数 k 更为合理。

根据上述要求,定义

$$k = k'(1 + \lambda_1 e^{-|\nabla x_{i,j}|/\lambda_2}) \quad (9)$$

式中, k' 为一个正比例系数,且 $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ 。这样,放大系数 k 将随梯度增大反而减小,以满足实际放大的需求。在式(9)中,常量 1 是为了保证 $k > 1$,以实现细节的正向放大; λ_1 反映了对比度的最大放大倍数, λ_2 反映了放大系数随梯度增大的衰减速度。采用这样的参数定义方式,可以使得高对比度地方增强较少,增强后的图像效果总体比较柔和,视觉效果不至于太锐化,同时又起到了对于一些有用的、原本不易察觉的图像细节进行增强的效果。

根据上面的改进,对式(5)表示的 DAHE 方法进行修改,得到如下的档案图像增强公式

$$x'_{i,j} = \begin{cases} \text{CLAHE}(x_{i,j}) + k(x_{i,j} - m_{i,j}) & |\nabla x_{i,j}| > \varepsilon \\ \text{CLAHE}(x_{i,j}) & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中, k 为细节放大参数,其值由式(9)给出。

综上所述,式(6)——(10)描述了一种改进的 DAHE 方法,称为 IDAHE(improved DAHE)方法,它基于 CLAHE 扩大全局对比度范围,结合 Lee 滤波器放大图像细节,并根据像素点的梯度幅值决定细节放大和细节放大的程度。

4 实验分析

4.1 实验与结果

选取某市的工商企业登记档案作为测试图像,诸如此类的档案图像既包括印刷体文字,又包括印章和手写体,目标信息的灰度值千差万别,经扫描生产的数字图像其视觉效果不理想,经过 CLAHE、DAHE 和 IDAHE 方法增强后,其主观视觉效果得到明显改善,如图 2 和图 3 所示。

从图 2 和图 3 可以看出,IDAHE 方法获得的主观质量是最好的。从总体上看,CLAHE、DAHE 和 IDAHE 都拉伸了输入图像的对比度,改善了输入图像的视觉效果。从局部上看,IDAHE 方法增强后的图像,其细节最为丰富,而且非常明显,如图 2 五角星内的细节明显多余其他两种方法,图 3 任意处的

细节比其他方法更加清晰可见。相对于 DAHE 方法, IDAHE 方法对图像边缘的锐化效果比较柔和, 但图像的前景和背景分得更开, 更适合人类的视觉习惯。如图 2(c) 中的文字边缘, 其锐化效果相当强烈, 这是由于邻域方差在这些边缘处比较大, 导致放大倍数比较高, 而不像 IDAHE 方法那样, 放大倍数随梯度值增加反而衰减。

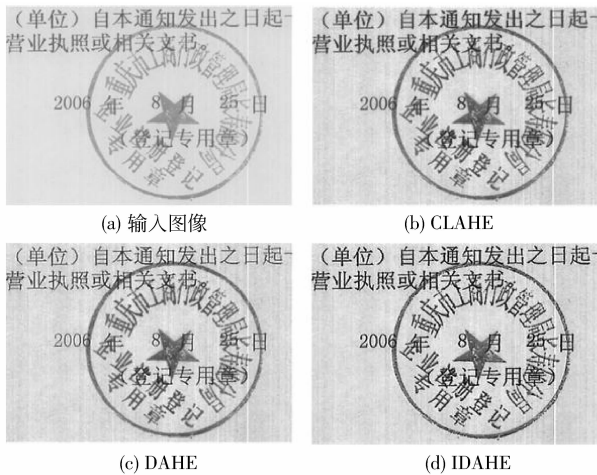


图 2 IDAHE 对包含印章档案的增强效果
Fig.2 IDAHE solution for document contains a seal

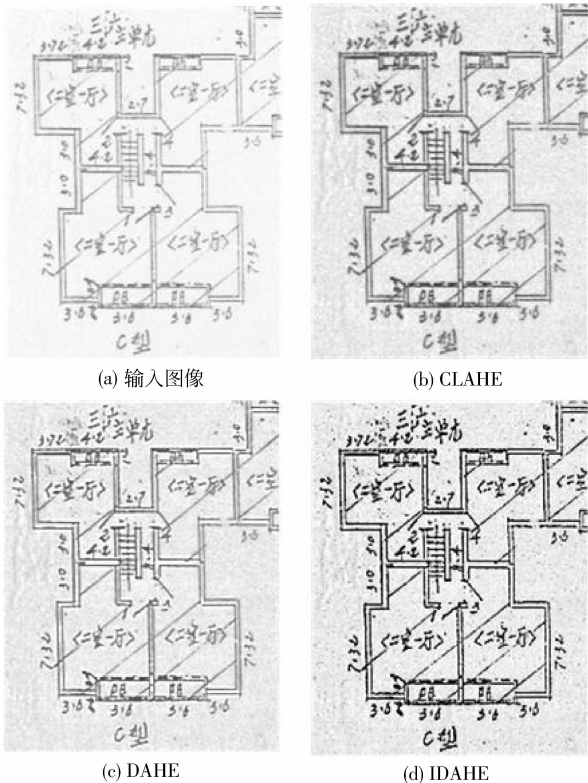


图 3 IDAHE 对包含图形档案的增强效果
Fig.3 IDAHE solution for graphic document

在档案图像信息系统中, 主观判断是图像增强度量的主要方法, 而客观的特征数据是辅助手段。图 2(a) 和图 3(a) 两幅输入图像经 CLAHE、DAHE 和 IDAHE 增强方法处理后的 PSNR 值如表 1 所示。从表 1 可知, IDAHE 增强方法所产生的 PSNR 值大幅低于其他两种方法, 这表明噪声抑制策略对 PSNR 值影响甚大。这种现象与图像的主观效果是吻合的, 它表现为经 IDAHE 方法增强后的图像不如 CLAHE 和 DAHE 方法那么锐化。

表 1 档案图像增强的 PSNR 比较
Tab.1 Document image enhancement comparison by PSNR

输入图像	CLAHE 增强/dB	DAHE 增强/dB	IDAHE 增强/dB
图 2(a)	20.231 8	20.823 8	13.251 4
图 3(a)	23.574 6	24.264 4	17.392 9

4.2 实验参数讨论

在式(9)(10)中, 参数 ϵ 、 k 、 λ_1 和 λ_2 的取值要视图像增强的对象而定。对于我们处理的工商企业登记档案图像, 实验表明, ϵ 的取值在 3 ~ 10, k 的取值在 2 ~ 5, λ_1 的取值在 0.5 ~ 2, λ_2 的取值在 2 ~ 20。

图 4 描述了图 3(a) 这幅图像使用 IDAHE 方法增强时图像的灰度均值随噪声阈值 ϵ 的变化情况。灰度均值代表图像的明亮程度, 与人类视觉相关, 考察它与 ϵ 之间的关系对 ϵ 值的确定比较重要。从图 4 可以看出, 当 $\epsilon \rightarrow 0$ 时, 图像均值最大, 它表示只要像素点 (i, j) 周围有灰度变化, 就要放大图像在该点的细节; 当 $\epsilon \rightarrow \infty$ 时, 图像均值最小, 它表示无论像素点 (i, j) 周围有多大的灰度变化, 该点的细节都得不到放大, 此时相当于无细节放大的 CLAHE 方法;

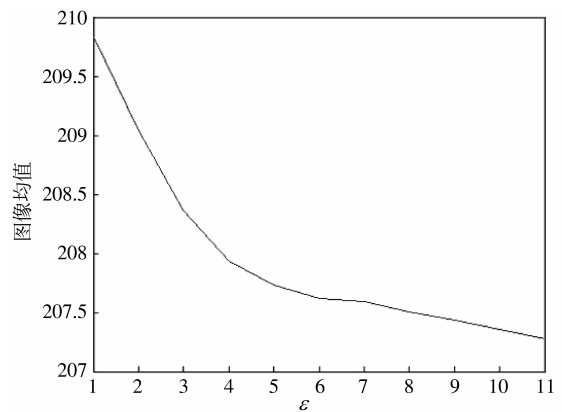


图 4 图像均值和噪声阈值 ϵ 的关系
Fig.4 The relationship between image mean value and noise threshold ϵ

当 $\varepsilon > 4$ 时,由于 ε 和灰度均值之间的关系近似为指数曲线,此时灰度均值下降很慢,这暗示着 ε 的取值应该处于这个转折点附近。

IDAHE 方法使用的另一参数是邻域窗口的大小 W 。设窗口 W 的大小为 $(2n + 1) \times (2n + 1)$,则边长 n 的选择主要考虑两个因素:一是边长 n 太小,邻域方差 $\sigma_{i,j}^2$ 对颗粒噪声非常敏感,使噪声得到强化;二是 n 太大,一些不在细节上而是在细节邻域的噪声同样得到增强。实验表明,对于细节较多的档案图像,一般取 5×5 或 7×7 的 W 窗口较为合适,对于细节较少的档案图像,可以适当取更大一点的窗口。

5 结 论

提出的 IDAHE 方法有效结合了如下 3 种技术:CLAHE 技术、放大细节技术和噪声限幅策略。CLAHE 技术能够从整体上改善输入图像的灰度分布范围,提供更佳的视觉效果;放大细节的 Lee 滤波器技术能够从局部提升对比度,对输出图像的质量起到了更好的补充效果;噪声限幅策略利用了档案图像的噪声特点,使得放大细节的增强技术只放大图像细节而非噪声;对细节放大倍数的改进,使得图像锐化效果随梯度值增加反而减小,处理后得到的图像更加符合人类视觉习惯。实验表明,这种增强方法对档案数码化过程中批量生产的绝大多数档案具有良好的性能。

值得指出的是,档案图像细节的保持与放大为电子档案的客观真实性提供了保障,尤其是在当今档案信息网络化建设面临着法律规定滞后的困境下显得更为突出。除此之外,档案图像增强不仅涉及对比度增强和抑制噪声,而且涉及其他图像质量的改善问题。如双面文字的档案,扫描后存在透影(window-through)问题;历史老档案,墨水书写的文字可能存在印侵(bleed-through)问题。这些问题的解决不仅仅是图像增强的问题,而且还涉及档案

图像分类的问题。档案图像自动处理面临的挑战尚多,研究仍将继续。

参考文献 (References)

- [1] Wang Hongjun, Shi Jun. An image enhancement method of local contrast based on adaptive toughness filter [J]. Computer Applications, 2003, 23(6) : 40-42. [王洪君, 石钧. 基于自适应韧性滤波的局部对比度增强法 [J]. 计算机应用, 2003, 23(6) : 40-42.]
- [2] Jin Cong. Processing method of noise in standard document image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(4) : 393-394. [靳从. 规则文档图像噪声处理方法 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4) : 393-394.]
- [3] Shirali-Shahreza M H, Shirali-Shahreza S. Removing noises similar to dots from Persian scanned documents [C] // Proceedings of ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. Los Alamitos, California, USA: IEEE Computer Society, 2008 : 313-317.
- [4] He Xiping, Zhu Qingsheng. The novel smoothing method of document image based on dynamic correlation using second order distance [J]. Microcomputer & Its Applications, 2003, 22(3) : 56-58. [何希平, 朱庆生. 基于二次距离动态相关的文档图像平滑新技术 [J]. 微型机与应用, 2003, 22(3) : 56-58.]
- [5] Kountchev R, Milanova M, Todorov V. Enhancement of the visual quality of scanned documents [C] // Proceedings of International Conference on Information Reuse and Integration (IRI 2007). Las Vegas, Nevada, USA: The Printing House, Inc., 2007 : 367-372.
- [6] Cromartie R, Pizer S M. Structure sensitive adaptive contrast enhancement methods and their evaluation [J]. Image and Vision Computer, 1993, (11) : 385.
- [7] Jongsan L. Refined filtering of image noise using local statistics [J]. Computer Graph Image Process, 1981, 15 : 380-389.
- [8] Jongsan L. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar image [J]. Optical Engineering, 1986, 25(5) : 634-643.
- [9] Jongsan L, Jurkevich I, Dewaele P, et al. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: a review [J]. Remote Sensing Rev., 1994, 8(4) : 313-340.
- [10] Jongsan L. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1980, 1(2) : 165-168.