

文章编号:1007-2780(2016)10-0973-10

基于广义线性系统和非锐化掩膜的图像增强算法

范日召^{1,2}, 何 斌^{1*}, 刘燕君³, 李军凯⁴, 陈洋君^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055;

4. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:为了解决非锐化掩膜图像增强方法的噪声增益、光晕现象和数据溢出的问题,提出一种基于广义线性系统和非锐化掩膜的图像增强算法。算法首先采用双边滤波器和广义线性减法对图像进行处理,获取图像细节层和基础层;然后对图像细节层和基础层分别进行自适应增益处理和对比度增强处理;最后采用广义线性加法将两者相加,实现图像的增强。并对 3 种不同类型的图像进行测试,结果表明:本文提出的算法很好地抑制了噪声干扰和光晕现象,增强了图像的对比度和细节,视觉效果良好,信息熵分别提高了 10.9012%、16.0143% 和 9.1878%。表明了提出的基于广义线性系统和非锐化掩膜图像增强算法的合理有效性。

关键词:非锐化掩膜;图像增强;广义线性系统;细节层;基础层

中图分类号:TP911.73 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163110.0973

Image enhancement algorithm based on generalized linear system and unsharp masking

FAN Ri-zhao^{1,2}, HE Bin^{1*}, LIU Yan-jun³, LI Jun-kai⁴, CHEN Yang-jun^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China;*

4. *Northeastern University, Shenyang 110819, China*)

Abstract: In order to solve the problem that unsharp masking suffers from noise over-enhancement, halo effect and data overflow, an image enhancement algorithm based on generalized linear system and unsharp masking is proposed. Firstly, the algorithm adopts bilateral filter and generalized subtraction to decompose image and obtains the detail layer and the root layer. Then the detail layer and the root layer are dealt with adaptive gain control and contrast enhancement operation, respectively. Finally,

收稿日期:2016-07-09;修订日期:2016-08-11.

基金项目:广东省引进创新科研团队项目(No.2011S013)

Supported by Guangdong Province, Introduction of Innovation R&D Team (No.2011S013)

* 通信联系人, E-mail:hbemail@163.com

the generalized addition is adopted to carry out superposition to realize image enhancement. And the test experiments for three different types of images are carried out. The outcome shows that the proposed algorithm can get good results in restraining noise and halo effect, enhancing contrast and detail of image and obtaining fine visual effect. The entropy of images is increased by 10.9012%, 16.014 3% and 9.1878% respectively. It indicates that the image enhancement algorithm based on generalized linear system and unsharp masking is reasonable and effective.

Key words: unsharp masking; image enhancement; generalized linear system; detail layer; base layer

1 引言

数字图像处理已经应用到人类生活中的各个方面。随着多媒体等技术的不断发展,对图像质量的要求也越来越高。虽然光电成像技术发展快速,但图像在获取过程中受到成像设备、光照条件等因素影响,使得图像出现对比度低、细节特征不明显等问题,甚至影响后续的人机图像分析与识别。因此,对成像设备获取的图像进行增强是一项重要的研究方向。图像增强是改善图像质量和增强图像视觉效果的方法,其目的是让人和机器能更好地理解和分析图像^[1-2]。目前已经提出很多图像增强的方法,如非锐化掩膜、直方图均衡化、维纳滤波等技术。非锐化掩膜(Unsharp masking, UM)算法是将图像的高频信息叠加到原始图像来增强图像视觉效果,但该方法会有噪声干扰、光晕影响和数据溢出的问题^[2]。Giovanni 提出非锐化掩膜的一种改进算法 Cubic-unsharp masking,对噪声的干扰进行了改进^[3],但对于图像叠加后数据溢出问题没有很好地解决。直方图均衡化可以分为全局直方图均衡化和局部直方图均衡化,两种方法都能够提高图像的对比度,但存在背景过度增强和噪声放大的问题^[1,4]。维纳滤波能抑制图像的噪声,却存在模糊图像边缘的问题^[5]。

上述的图像增强算法,虽然达到了一定的图像增强的效果,但存在放大噪声、微小细节放大不明显或者数据溢出等问题。一幅图像可以分解为基础层与细节层^[2],这是经典 UM 算法的出发点,其原理是利用原始图像减去模糊处理后的图像得到细节层,即图像的高频信息,然后将增强的细节层叠加到原始图像上,但该方法会有放大噪声、光晕影响和数据溢出的问题^[5]。细节层包括(1)图像的细节,(2)存在的噪声,(3)尖锐边缘区

域被模糊后而引起的过冲和欠冲。显然,细节层的增强会带来噪声的放大以及由过冲和欠冲导致的光晕现象^[6-7]。而且,UM 算法存在图像叠加后可能数据溢出的问题,而许多改进的 UM 算法都没有很好地解决这个问题。本文提出使用具有边缘保持作用的双边滤波器来模糊图像,减弱了过冲和欠冲,从而抑制了光晕现象;把滤波后的图像作为图像的基础层,减弱了噪声的影响;在广义线性系统中完成对图像数值运算,可以很好地解决数据溢出问题。实验结果表明,本文算法具有很好的图像增强效果,处理后的图像对比度得到了提高,细节和边缘信息明显,很好的突出了图像的特征区域,整体视觉效果良好。

2 广义线性系统

2.1 广义线性系统模型

图像处理中常用的一些灰度变换函数,如对数变换、gamma 变换,可以实现图像灰度值的拉伸和压缩。文献[8-12]中提出的图像处理方法将灰度值进行对数变换或映射到其它域后进行操作,这些方法都为图像处理中数据溢出的问题提供了借鉴。基于此,本文引入了一种广义域的处理方法,将原始图像灰度值映射到广义域,在广义域内进行线性运算^[11],其基本框架如图 1,该方法被称为广义线性系统。

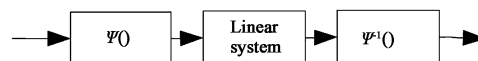


图 1 广义线性系统框图

Fig.1 Block diagram of generalized linear system

图(1)中 $\psi()$ 为一种非线性函数,将原始图像灰度值映射到广义域,然后进行线性运算。 $\psi^{-1}()$ 为一种非线性函数,将广义域的数据映射到原始图像灰度值。若 $\psi()$ 为线性函数,则运算系统可

等同于正常的线性运算。

在广义线性系统中,加法操作、减法操作和乘法操作 $\oplus$ 、 $\ominus$ 和 $\odot$ 表示,公式表示如下,

$$x_1 \oplus x_2 = \psi^{-1}[\psi(x_1) + \psi(x_2)], \quad (2)$$

$$x_1 \ominus x_2 = \frac{1}{1 + \psi(x_1)\psi(\ominus x_2)}, \quad (3)$$

$$x_1 \odot \alpha = \psi^{-1}[\alpha\psi(x_1)], \quad (4)$$

其中: x_1 和 x_2 是信号采样值, α 是信号伸缩变量, $\psi(\cdot)$ 、 $\psi^{-1}(\cdot)$ 是两个自行设计的非线性域变换函数。

2.2 广义线性系统运算法则

在本文算法中,待处理的图像灰度值 $x \in (0,1]$,根据需求定义了原始图像灰度值与反转图像的广义域数值转换的非线性变换函数:

$$\psi(x) = \frac{1-x}{x}, \quad (5)$$

$$\psi^{-1}(x) = \frac{4}{4+x^2}, \quad (6)$$

其中: $\psi(x)$ 将图像灰度值 $x(x \in (0,1])$ 映射到 $x'(x' \in [1, +\infty))$, $\psi(x)$ 的反函数 $\psi^{-1}(x)$ 将 $x(x \in [1, +\infty))$ 映射到 $x'(x' \in (0,1])$ 。

将公式(5)、(6)带入公式(2)、(3)、(4)中,可以得到灰度值 x_1 和 x_2 的加法操作、减法操作和乘法操作:

$$x_1 \oplus x_2 = \frac{1}{1 + \psi(x_1)\psi(x_2)} = \frac{1}{1 + X_1 X_2}, \quad (7)$$

$$x_1 \ominus x_2 = \frac{1}{1 + \psi(x_1)\psi(\ominus x_2)} = \frac{1}{1 + X_1 X_2^{-1}}, \quad (8)$$

$$x_1 \odot \alpha = \frac{1}{1 + X_1^\alpha}, \quad (9)$$

其中: $X_1 = \psi(x_1)$, $X_2 = \psi(x_2)$, $\alpha(\alpha \in (-\infty, +\infty))$ 为信号伸缩变量。

设此运算系统下广义域的零灰度值为 Z ,则有:

$$x \oplus Z = x. \quad (10)$$

显然可以得到 Z 的值为0.5。因此,可以定义 $(0,0.5)$ 和 $(0.5,1)$ 对应于广义域的正区域和负区域。对于灰度值 x 和其广义域下的反转值 x' ,则有:

$$x \oplus x' = 0.5. \quad (11)$$

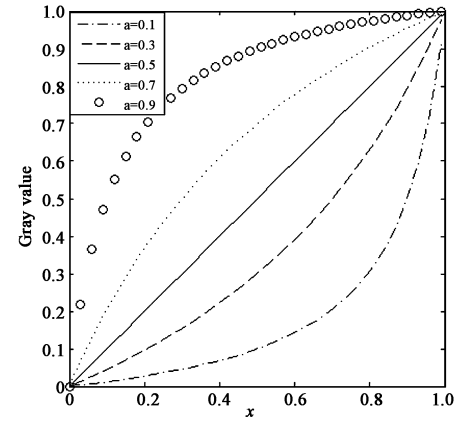
同理,可以得到:

$$x_1 \oplus x_2 = x_2 \oplus x_1, \quad (12)$$

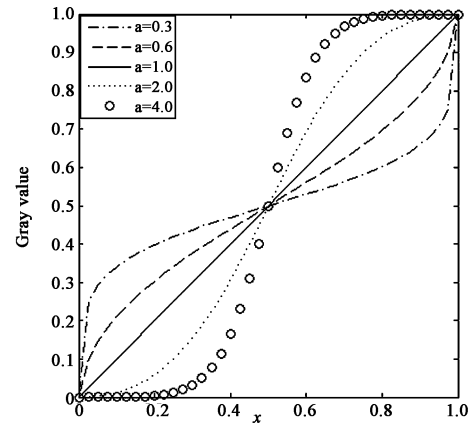
$$(\alpha \times \beta) \odot x = \alpha \odot (\beta \odot x), \quad (13)$$

$$(\alpha \times x_1) \oplus (\beta \times x_2) = \frac{1}{1 + X_1^\alpha X_2^\beta}, \quad (14)$$

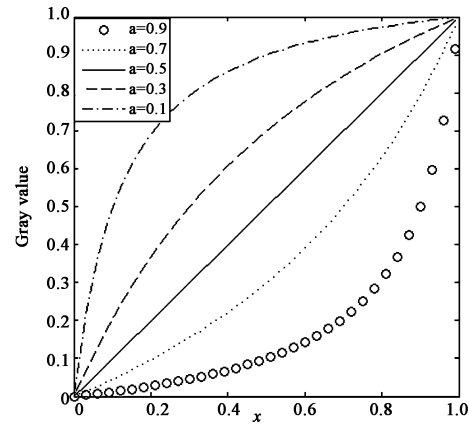
广义线性系统运算效果图如图2所示。



(a) $y = x \oplus a$



(b) $y = x \odot a$



(c) $y = x \ominus a$

图2 广义线性系统的运算效果图

Fig.2 Operation effects of the generalized linear system

从图 2 的运算效果图可以得出结论,在广义线性加法中,灰度值 x 增加一个常数 a ($a \in (0,1)$) 时,若 $0.5 < a < 1$ 时,运算结果对灰度值较低的区域进行了拉伸,灰度值较高的区域进行了压缩;当 $0 < a < 0.5$ 时,则情况相反。在广义线性乘法中,灰度值 x 乘以一个常数 a ($a > 0$),当 $a > 1$ 时,运算结果对灰度值接近 0 和 1 的部分被压缩,0.5 附近的灰度值则被拉伸;当 $0 < a < 1$ 时,则情况相反; a 越趋近于 1,映射曲线越趋近于 $y = x$ 。在广义线性减法中,灰度值 x 减去一个常数 a ($a \in (0,1)$) 时,若 $0 < a < 0.5$ 时,运算结果对灰度值较低的区域进行了拉伸,对灰度值较高的区域进行了压缩;当 $0.5 < a < 1$ 时,则情况相反。

3 本文提出的算法

3.1 图像基础层和细节层的获取

在经典 UM 算法中,通常以高斯滤波的方法模糊图像,使灰度变化相对平滑,然后通过原始图像减去模糊化的图像来获取细节层,但原始图像与增益处理后的细节层叠加后,在图像尖锐边缘区域会产生由大的跳变而引起的过冲和欠冲,如图 3 所示,而过冲和欠冲会产生光晕现象^[13]。为了改善这种现象,本文算法采用了具有边缘保持作用的双边滤波器来对图像进行滤波,将滤波后的图像作为基础层,然后原始图像与基础层进行广义线性减法得到图像的细节层。

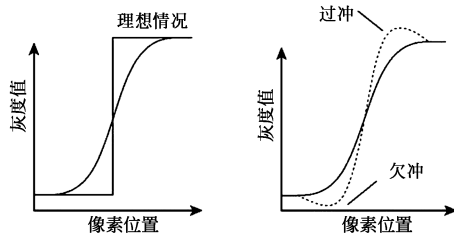


图 3 过冲和欠冲的示意图

Fig.3 Diagram of overshoot and undershoot

双边滤波 (bilateral filter) 理论最早由 Tomasi 和 Manduchi 在 1998 年提出,是一种基于图像局部信息的非线性滤波算法,具有很好的边缘保持性^[14]。双边滤波在处理各像素值时,将空间邻近度和灰度相似性的两个权重核非线性组合,不仅考虑到中心像元与周围像元的空间关系,还考虑了临近像元间灰度值的相似性,达到自适应滤波的效果^[15]。双边滤波公式:

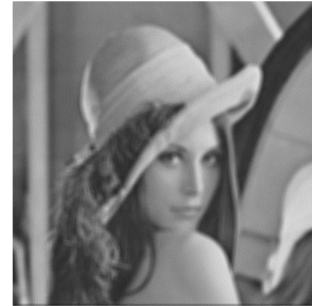
$$BF(I) = \frac{1}{w} \sum_{j \in N} G_{\sigma_d}(\|j - i\|) \times G_{\sigma_r}(I_j - I_i) I_i, \quad (15)$$

其中: $w = \sum_{j \in N} G_{\sigma_d}(\|j - i\|) G_{\sigma_r}(I_j - I_i)$ 为归一化参数, I_i 为待求解的像素, $j \in N$ 表示图像 I 中以 I_i 为中心的搜索区域, I_i 表示搜索区域内任何像素,参数 σ_d 和 σ_r 为高斯函数的标准差,决定滤波器的滤波能力, G_{σ_d} 为空间权重, G_{σ_r} 为灰度权重,空间权重表征距离中心像素越远得到权值越小,灰度权重表征灰度值差异越大的像素得到的权重越小。结合文献[14-15]分析,双边滤波器的参数选择非常关键,本文设置滤波搜索窗口 $w = 5$, $\sigma_d = 3$, $\sigma_r = 0.15$ 。本文通过一组实验数据来说明效果,如图 4 所示。



(a) 原始图像

(a) Original image



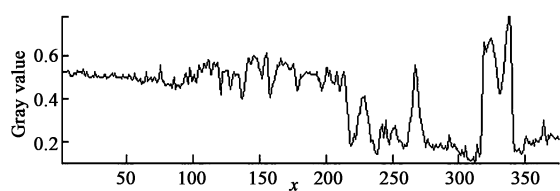
(b) 高斯滤波图像

(b) Gaussian filter



(c) 双边滤波图像

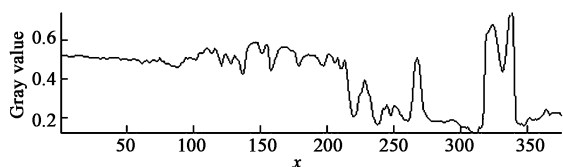
(c) Bilateral filter



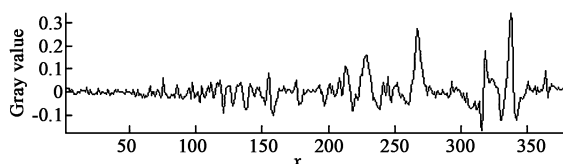
(d)图(a)的第 200 行像素的部分灰度值一维表示
(d) Part of the 200th line pixels' 1-D representation for Fig.(a)



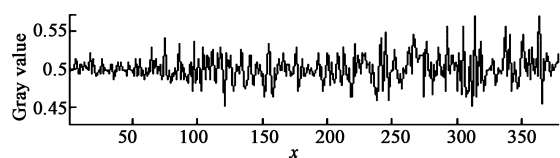
(e)图(b)的第 200 行像素的灰度值一维表示
(e) Part of the 200th line pixels' 1-D representation for Fig.(b)



(f)图(c)的第 200 行像素的灰度值一维表示
(f) Part of the 200th line pixels' 1-D representation for Fig.(c)



(g)传统细节层的第 200 行像素部分灰度值一维表示
(g) part of the 200th line pixels' 1-D representation for the classical base layer



(h)本文获取细节层第 200 行像素部分灰度值一维表示
(h) Part of the 200th line pixels' 1-D representation for the base layer of the paper

图 4 实验效果对比图

Fig.4 Comparison of experiment result

从图 4 的实验效果可以看出,在图像平滑区获得相同的平滑效果时,高斯滤波后的图像变得模糊,灰度变化缓慢,噪声被平滑,但同时边缘区域也被模糊了,很多细节丢失,仅保留图像中急剧变化的边缘信息,而双边滤波器处理后的图像,平滑区域的噪声被平滑,同时边缘信息得到了很好的保留。从图 4 中(g)、(h)可以看到经典 UM 算法和本文算法得到的细节层灰度值分布在传统零值(0)和广义域零值(0.5)两侧,而且前者的细节层波动范围更大,有较多大的波峰和波谷,由上文分析可知,这是造成了光晕现象的原因,而本文得到细节层分布较为平稳,有更多更小的波峰与波谷,不存在过多大的波峰与波谷,这样就可以有效的避免光晕现象。

3.2 图像基础层的增强

对比度是图像的基本感知之一,图像增强的目的之一便是提高图像的对比度,因此本文算法选择对图像的基础层做对比度增强处理^[16]。基础层的噪声被抑制,而且边缘信息得到较好的保留。本文算法采用文献[17]提出的对比度受限自适应直方图均衡化(Contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE)对基础层进行对比度增强处理,抑制了噪声的影响,提高了图像的对比度,结果如图 5 所示。



图 5 图 4(c)对比度提高结果

Fig.5 Result of Fig.4(c)'s Contrast Enhancement

对图 5 进行观察发现,增强后的图像整体对比度明显提高。虽然 CLAHE 算法存在放大噪声的缺点,但通过与图 4(a)比较,可以发现图中人物面部细节没有明显噪声放大,这是因为选择了滤波后的图像进行对比度增强。但同时可以观察到帽子、睫毛等部分微小细节放大效果不明显,部分边缘区域过亮。虽然增强后的基础层存在一些微小细节的丢失和部分区域亮度过大的问题,但图像整体对比度得到了提高,而且噪声得到了

抑制,因此本文算法选择增强后的滤波图像作为基础层。

3.3 图像细节层的自适应增益

在经典 UM 算法中,获得的细节层进行同等倍数的增益,这种情况下,微小细节往往湮没于比较大的细节中,达不到放大微小细节的效果。在文献[13]中提出一种自适应的细节放大函数,对于不同的细节进行不同的增益作用,可以起到放大大小细节的作用。本文将这种自适应的思想推广到广义域内,对不同的灰度值进行不同的增益,以达到放大微小细节的效果。从图 4 中(h)可以看出,在广义域内,细节层中的微小细节分布于零值(0.5)附近,当灰度值趋于 0 或 1 时,对应于细节层中比较大的细节。因此本文提出的一种自适应增益函数 $g(x)$ 在 $x=0.5$ 附近的取值较大,灰度值被拉伸,对微小细节的放大作用较大;当 x 趋近于 0 或 1 时,增益函数 $g(x)$ 的取值越小,灰度值被压缩,较大的细节放大作用减小,这样就可以起到整体细节放大的效果。

本文提出的自适应增益函数表达式如下:

$$g(x) = \alpha \times \exp(-abs(2 \times x - 1)), \quad (16)$$

其中: x 为细节层中的灰度值, α 为增益控制系数。 $g_{\min}$ 、 $g_{\max}$ 分别为细节层中最小细节和最大细节的增益倍数:

$$\begin{cases} g_{\min} = g(0) = g(1) \\ g_{\max} = g(0.5) \end{cases}, \quad (17)$$

一般可设定为 $g_{\min}$ 为 1, $g_{\max}$ 的设置不宜过大,过大的系数会带来噪声放大的影响,视觉效果下降。本文所提出的细节层增益曲线如图 6 所示。

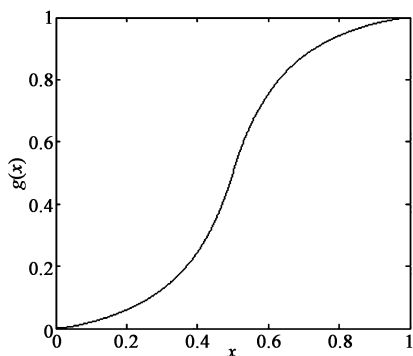


图 6 细节层增益曲线

Fig.6 Gain curve of detail component

3.4 生成增强图像

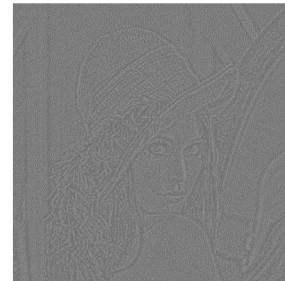
将对比度增强后的图像基础层和自适应增益

后的图像细节层进行广义线性加法,完成图像的增强,此时的图像仍为灰度归一化图像,映射到 0~255 即可得到 8 bit 图像。图像增强效果图如图 7 所示。



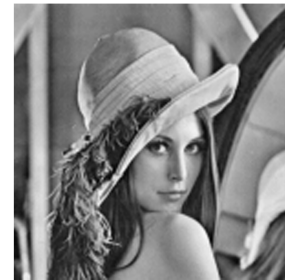
(a)增强的基础层

(a)Enhanced base layer



(b)自适应增益的细节层

(b)Adaptive gained detail layer



(c)增强后的结果

(c)Result after enhancement

图 7 增强图像效果图

Fig.7 Effect of enhanced image

对图 7 观察,从帽子的纹理和人眼的睫毛等可以看出,增强后的结果(c)相对于(a)在微小细节得到了改善,而且边缘区域的亮度得到了很大的改善。对比图 4(a)的原始图像可以发现,对比度大大提高,而且噪声没有被明显放大,整体的视觉效果得到了改善。

3.5 算法总结

本文所提出的算法流程如图 8 所示。

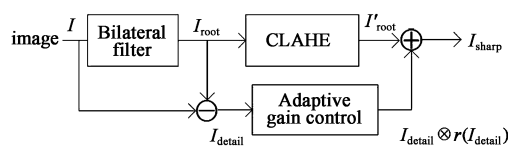


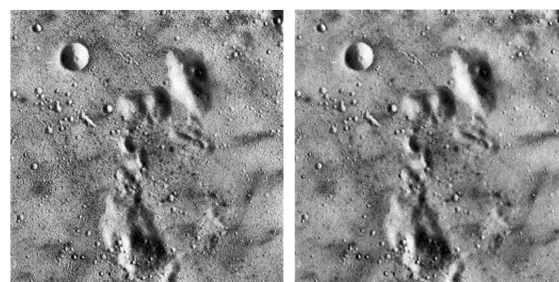
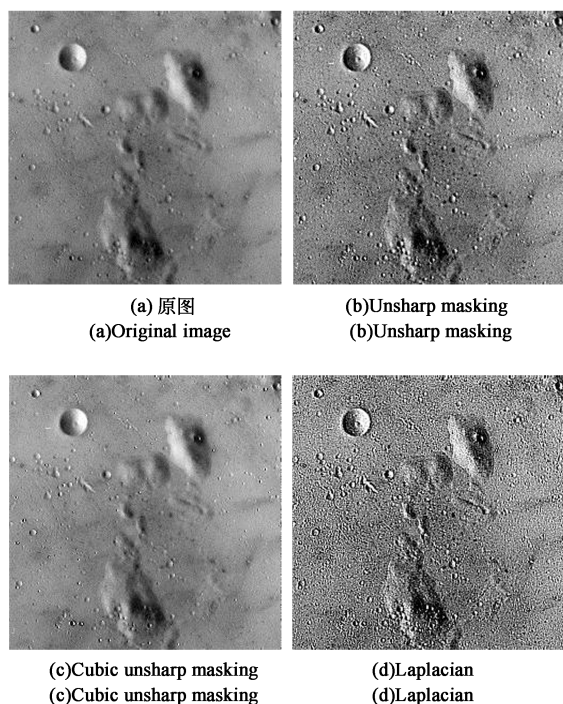
图 8 基于广义线性系统的非锐化掩膜算法流程图

Fig.8 Block diagram of unsharp masking based on generalized linear system

在广义域内的非锐化掩膜算法中,待处理的图像为灰度归一化图像,其灰度值 $x \in (0,1]$, 对其进行双边滤波,获得图像的基础层 I_{root} , 然后原始图像与基础层进行广义线性减法运算得到细节层 I_{detail} 。 I_{root} 和 I_{detail} 分别经过对 CLAHE 和自适应增益处理,获得对比度增强的基础层 I'_{root} 和增强的细节层 I'_{detail} , 然后将两者进行广义线性加法运算获得了增强后的图像。

4 实验结果与分析

本文依据提出的算法进行了实验验证,并与经典 UM 算法、Laplacian 算法、文献[3]提出的 Cubic unsharp masking 算法以及文献[17]提出 CLAHE 算法进行了对比实验。对比实验结果如图 9 所示。

(e)CLAHE
(e)CLAHE(f) 本文算法
(f)The proposed method图 9 地表图像增强效果对比
Fig.9 Enhancement effect comparison of surface image

通过对图 9 的观察对比,可以看出经典 UM 算法在增强图像时,细节被放大,但背景噪声也被放大,而且在边缘区域产生光晕现象。(c)中的 Cubic unsharp masking 算法虽然降低了噪声的敏感性,但存在微小细节特征不突出的问题,而且边缘区域产生一定的光晕现象。(d)中 Laplacian 算法在放大细节的同时,背景噪声被放大,严重影响了细节的识别,视觉效果不佳。(e)中 CLAHE 处理后图像,对比度得到了提高,但背景噪声和细节同时放大,影响了细节的辨识,而且存在边缘区域亮度过大的问题。本文算法处理后的图像在背景噪声被抑制的前提下,整体对比度提高,避免了光晕现象,较好地突出了图像的微小细节和边缘信息,视觉效果良好。

为了进一步验证本算法的合理性,本文选取几种不同类型的图像进行增强效果对比,如图 10 为低对比度图像增强对比,图 11 为多细节图像增强对比。

从图 10 的低对比度图像增强效果图中可以看出,相对于(a),(b)、(c)、(d)的图像对比度并没有改善,在图像的强边缘和轮廓等区域都有明显的光晕现象,细节特征不突出,视觉效果不佳,(b)、(d)中平滑区域受到背景噪声影响。(e)、(f)中图像的全局对比度得到了提高,壁纸、纹理等微小细节增强明显,屋顶等暗背景也得到一定的增强,但同时可以看出,(f)相对于(e)一些细节特征突出更明显,如圆形屋顶的纹理,而且拱柱等平滑区的噪声被抑制,视觉效果更为自然,得到更好的增强效果。

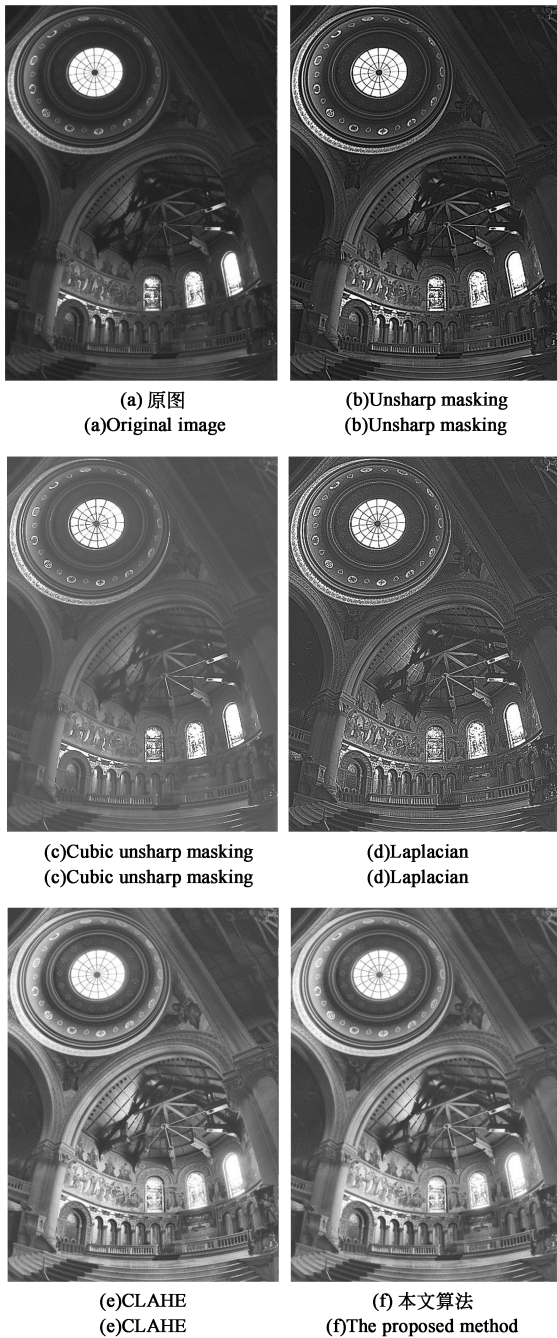


图 10 低对比度图像增强效果对比

Fig.10 Enhancement effect comparison of low contrast image

对图 11 观察可以发现, (b)、(c) 相对于 (a) 墙体上的字母特征明显, 清晰可辨, 但在灰度突变的交界处都产生了明显的光晕现象, 同时, (b) 中存在墙体平滑区的噪声放大明显的问题, (c) 中墙体本身的纹理则变得不明显。 (d) 中背景噪声被放大, 严重影响了字母的分辨。 (e) 中细节增强效果明显, 背景噪声被放大, 影响了部分细节的辨识

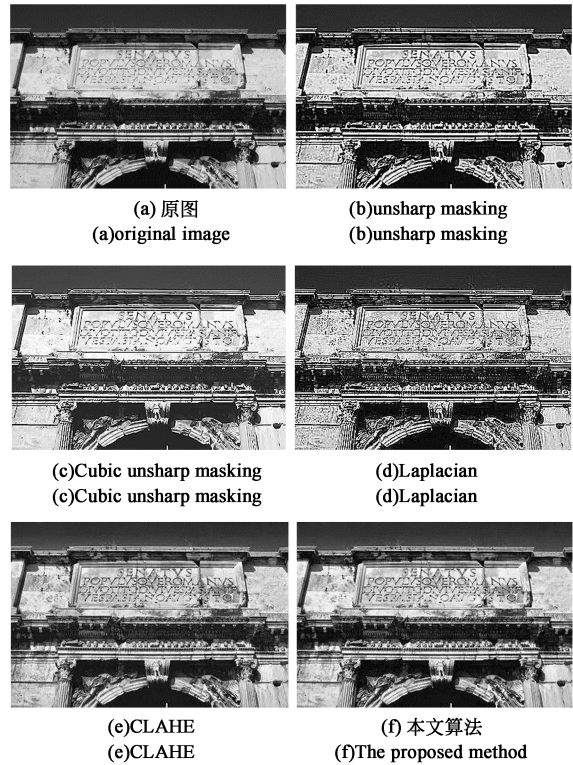


图 11 多细节图像增强效果对比

Fig.11 Enhancement effect comparison of multi-detail image

度。 (f) 改善了图对比度, 抑制背景噪声, 辨识度更高。

除了上述的主观观察外, 本文引入了信息熵的评价方法来放映图像所包含的平均信息量^[18]。设 P_i 为一幅 $M \times N$ 图像中灰度级为 i 的灰度出现的概率, L 为图像的最大灰度级别, $h(i)$ 为其出现的频数, 则

$$P_i = \frac{h(i)}{M \times N} . \quad (18)$$

信息熵计算可表述如下:

$$H_f = - \sum_{i=0}^{L-1} P_i \log P_i . \quad (19)$$

图像的信息熵值越大, 表明其灰度值越分散, 所包含信息量越大。表 1 列出了图 9、图 10、图 11 各算法增强结果的信息熵值。信息熵虽然是图像信息量的一种指标, 但并非图像质量的绝对评价, 如图 8 中的 Laplacian 增强算法高信息熵却图像质量不佳。表 1 的图像信息熵值, 一定程度上反映出增强算法的增强效果, 从表中数据可以看出, 本文提出的算法具有针对

三种不同类型的图像都具有较高的信息熵,相 16.014 3%、9.187 8%,结合主观评价,进一步对于原始图像分别提高了 10.901 2%、证明本文提出算法的增强效果。

表 1 增强算法的信息熵对比

Tab.1 Index comparison for information entropy enhancement algorithms

	原始图像	Unsharp masking	Cubic unsharp masking	Laplacian	CLAHE	本文算法
图 8	6.709 3	7.206 5	6.760 7	7.499 8	7.444 0	7.440 7
图 9	6.459 2	6.613 5	6.294 0	6.571 5	7.493 5	7.493 6
图 10	7.156 2	6.431 6	6.676 6	5.646 2	7.828 3	7.813 7

5 结 论

本文提出一种基于广义线性系统的非锐化掩膜图像增强算法,与经典 UM 算法相比,优点在于抑制了噪声,减弱了光晕现象,避免数据溢出的情况。本文对原始图像进行双边滤波,获得图像的基础层,然后原始图像与基础层进行广义线性减法得到图像的细节层,对基础层和细节层分别进行对比

度增强和自适应增益处理后,将两者叠加完成图像增强。因为本文提出的算法采用具有边缘保护作用的双边滤波器,可以很好地保持图像的边缘,抑制了光晕现象;对基础层进行了对比度增强,从而提高了图像对比度;对细节层做自适应增益,使得微小细节放大明显;采用广义线性系统中,避免了数值溢出的情况。与其它增强算法实验对比证明了本文提出的增强算法很好的抑制了噪声,提高图像的对比度,具有很好的实用价值。

参 考 文 献:

- [1] 陈永亮.灰度图像的直方图均衡化处理研究[D].合肥:安徽大学,2014.
CHEN Y L. Gray image histogram equalization processing research [D]. Hefei: Anhui University, 2014. (in Chinese)
- [2] 贺梦颖.医学图像的增强技术研究仿真[D].太原:中北大学,2015.
HE M Y. Research and simulation on medical image enhancement algorithm [D]. Taiyuan: North University of China, 2015. (in Chinese)
- [3] RAMPONI G. A cubic unsharp masking technique for contrast enhancement [J]. *Signal Processing*, 1998, 67(2): 211-222.
- [4] 陈莹,朱明.多子直方图均衡微光图像增强及 FPGA 实现[J].中国光学,2014,7(2):225-233.
CHEN Y, ZHU M. Multiple sub-histogram equalization low light level image enhancement and realization on FPGA [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 225-233. (in Chinese)
- [5] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital Image Processing* [M]. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2009.
- [6] 冯策,戴树岭.一种改进的非锐化掩模深度图像增强算法[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(8):107-112.
FENG C, DAI S L. An improved unsharp masking method for depth map enhancement [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(8): 107-112. (in Chinese)
- [7] 黄梅,吴志勇,梁敏华,等.暗背景下低灰度图像的实时增强[J].液晶与显示,2011,26(3):374-378.
HUANG M, WU Z Y, LIANG M H, et al. Real-time enhancement method of low gray image under dark background [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 374-378. (in Chinese)
- [8] 焦竹青,徐保国.基于同态滤波的彩色图像光照补偿方法[J].光电子 激光,2010,21(4):602-605.
JIAO Z Q, XU B G. Color image illumination compensation based on homomorphic filtering[J]. *Journal of Optoe-*

- lectronics • Laser*, 2010, 21(4): 602-605. (in Chinese)
- [9] YANG C C. A modification for the mask-filtering approach by superposing anisotropic derivatives in an image [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2011, 122(18): 1684-1687.
 - [10] ZHOU J J, ZHOU F G. Single image dehazing motivated by Retinex theory[C]//2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA). Toronto: IEEE, 2013: 243-247.
 - [11] DENG G. Parametric generalized linear system based on the notion of the t-norm[J]. *IEEE on Image processing*, 2013, 22(7): 2903-2909.
 - [12] DENG G. A generalized unsharp masking algorithm [J]. *IEEE transactions on Image Processing*, 2011, 20(5): 1249-1261.
 - [13] 刘艳莉, 桂志国, 张权, 等. 基于局部梯度和复杂度的反锐化掩膜法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1539-1545.
LIU Y L, GUI Z G, ZHANG Q, *et al.* Unsharp masking algorithm based on local gradient and complexity [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(7): 1539-1545. (in Chinese)
 - [14] 王玉灵. 基于双边滤波的图像处理算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
WANG Y L. Study of Algorithm in image processing based on the bilateral filter[D]. XIAN: Xidian University, 2010. (in Chinese)
 - [15] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Sixth International Conference on Computer Vision, 1998. Bombay: IEEE, 1998: 839-846.
 - [16] RUSSO F. An image enhancement technique combining sharpening and noise reduction[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(4): 824-828.
 - [17] ZUIDERVELD K. Contrast limited adaptive histogram equalization [M]//HECKBERT P S. Graphics gems IV. San Diego: Academic Press Professional, Inc., 1994: 474-485.
 - [18] 黄君. 图像质量评价的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.
HUANG J. The research on image quality assessment [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2012. (in Chinese)

作者简介: 范日召(1990—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 研究方向为图像处理和光电成像技术。E-mail: fanrizhao@163.com

何斌(1961—), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 主要研究方向卫星成像技术。E-mail: hbemail@163.com