

一种稳健的自适应图像平滑算法

芮杰 吴冰 秦志远 山海涛

(解放军信息工程大学 测绘学院, 郑州 450052)

摘要 图像平滑作为去除图像中含有噪声的图像增强处理技术,是各种与图像有关软件中必不可少的功能模块。优秀的平滑算法应该在有效处理含有多种噪声的受污图像时,仍具备良好的图像细节保持能力。为了能够在有效地处理含有多种噪声的受污图像的同时保持图像细节,提出了一种结合非线性与线性滤波器的稳健平滑算法,该算法是在分析几种细节保持能力良好的平滑算法(梯度加权平滑、自适应中值滤波、稳健平滑、边缘保持滤波器)的基础上,通过吸收上述几种平滑算法细节保持效果较好的优点,结合它们各自对不同噪声的适应性而得到的。针对含有多种噪声的受污图像,用该算法进行了去噪试验,多次试验结果表明,该算法在稳健地处理这些受污图像的同时,仍可以保持良好的图像细节,同时该算法还可以稳健地处理复杂的含噪图像,且具备良好自适应性,可以为涉及图像处理的软件架构,提供相应的算法支持。

关键词 图像平滑 高斯噪声 椒盐噪声 稳健 自适应

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2005)01-0054-05

A Robust Adaptive Image Smoothing Algorithm

RUI Jie, WU Bing, QIN Zhi-yuan, SHAN Hai-tao

(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052)

Abstract As a key image enhancement technology to remove the noise in images, image smoothing is a necessary function in various image-processing software. Excellent smoothing algorithm should be able to deal with images corrupted by various noises and has capability of preserving detailed information. Based on analyzing a few of keeping details smoothing algorithm (gradient weighting filter, self-adapted median filter, robust smoothing, edge keeping filter) and according to each adaptation to various noise, a robust smoothing method is presented combining non-linear and linear filter. Tests on corrupted image of various noise show that the algorithm can deal with corrupted image robustly and keep well image detail at the same time.

Keywords image smoothing, gaussian noise, salt and pepper noise, robust, adapted

1 引言

图像平滑的目的主要是为了消除被污染图像中的噪声,作为数字图像处理领域研究的经典问题之一,其已广泛应用于图像的显示、传输、分析、动画制作、媒体合成等多个方面,是几乎所有涉及到数字图像处理软件开发的基础模块。正是由于该技术应用之普适性,才使得对其进行研究具备了相应的价值。

图像平滑是为了适应人类视觉系统的生理接受

特点而设计的一种改善图像质量的方法,其处理对象是在图像生成、传输、处理、显示等过程中受到多种因素扰动形成的受污图像。在整个图像处理体系中,图像平滑是针对“一幅图像中唯一存在的退化是噪声”时的图像复原技术特例。作为数字图像处理领域研究的经典问题,基于解决实际问题的需求和相关技术的发展产生了众多的图像平滑算法,如:均值滤波器、高斯滤波器、梯度加权滤波器、顺序统计滤波器、稳健平滑、Crimmins 去斑算法、边缘保持滤波器、自适应中值滤波等^[1-3]。

收稿日期:2004-04-26; 改回日期:2004-09-02

第一作者简介:芮杰(1976~),男,1997年毕业于解放军测绘学院。现为解放军信息工程大学测绘学院遥感信息工程系讲师、硕士研究生。主要研究方向为数字摄影测量与遥感、图像处理。E-mail:ruijie@vip.sina.com

由于图像受噪声污染的原因存在差异,致使图像中包含的噪声也不同,且实际应用时,一幅图像中也往往包含多种不同类型的噪声,因此好的图像平滑算法应该具备能对不同类型噪声进行处理的能力。另外,图像平滑往往导致图像中的边缘模糊和位置偏移,由于边缘信息在图像分析和图像理解中起着重要的作用,因此,平滑过程中还应考虑到平滑后图像中边缘的保留情况和边缘位置精度。本文在分析几种细节保持能力良好的平滑算法(梯度加权平滑、自适应中值滤波、稳健平滑、边缘保持滤波器)的基础上,吸收了这些平滑算法的优点,并结合它们各自对不同噪声的适应性,提出了一种结合非线性性和线性滤波器的新的平滑算法。为了检验算法的平滑效果,还利用了基于模糊数学的图像模糊度作为对平滑后图像品质的评价标准,结果表明,本文算法在稳健地处理含有多种噪声的受污图像的同时,仍具备良好的图像细节保持能力。

2 相关平滑算法的分析^[1~5]

对如下几种细节保持能力较好的平滑算法进行分析的目的是为了发现、吸收这些算法保持图像细节的关键技术和分析这些算法用于噪声处理的不足,以期通过对这些算法的改进,提出一种更稳健、适应性更强、平滑效果更好的平滑算法。

2.1 边缘保持滤波器

典型的边缘保持滤波器有 Kuwahara 滤波器和选择式掩模滤波器两种,它们的基本思想是以窗口内中心像素为基准点首先制作多个不同的掩模,然后计算各个掩模区域内像素的均值和方差,最后取标准差最小区域的灰度平均值作为中心点的灰度。在 Kuwahara 滤波器中,选取的是4个正方形窗口,在选择式掩模滤波器中选择的是4个五边形、4个六边形、一个正方形共9个掩模窗口。选择式掩模滤波器与 Kuwahara 滤波器相比,由于对掩模窗口进行了更细致的划分,因而边缘保持效果优于 Kuwahara 滤波器。

通过对算法的分析可以发现,由于边缘保持滤波器是通过以标准差最小这一准则来选取合适掩模窗口的,从而平滑后可达到保持图像细节的这一目的,而且选取掩模窗口后,还可以结合其他更优秀的平滑算法,而不是局限于取均值来进行图像平滑。例如,考虑到中值滤波较均值滤波能更好地保持图像边缘,

且对抑制椒盐噪声更加有效,因此可以通过取标准差最小的掩模窗口内的中值,并用其代替窗口均值作为窗口中心像素的灰度来更好地抑制椒盐噪声。

2.2 自适应中值滤波器

该算法是对中值滤波器的一种改进,相对于中值滤波器而言,自适应中值滤波器能够处理空间密度更大的冲激噪声,并且平滑非冲激噪声时,还可保存更多的图像细节。设 $S_{x,y}$ 表示中心像素点 (x,y) 在滤波时所对应的掩模窗口。令: Z_{\min} 为 $S_{x,y}$ 中的灰度最小值; Z_{\max} 为 $S_{x,y}$ 中的灰度最大值; Z_{med} 为 $S_{x,y}$ 中的灰度中值; $Z_{x,y}$ 为在坐标 (x,y) 上的灰度; S_{\max} 为 $S_{x,y}$ 允许的最大尺寸; 自适应中值滤波器算法工作在两个层次,可定义为 A 层和 B 层。自适应中值滤波算法如下:

A 层: $Z_1^A = Z_{\text{med}} - Z_{\min}$, $Z_2^A = Z_{\max} - Z_{\text{med}}$, 如果 $Z_1^A > 0$, 且 $Z_2^A > 0$, 则转到 B 层。

否则,增大窗口尺寸。如果窗口尺寸小于 S_{\max} , 则重复 A 层。否则,输出 $Z_{x,y}$ 。

B 层: $Z_1^B = Z_{x,y} - Z_{\min}$, $Z_2^B = Z_{\max} - Z_{x,y}$, 如果 $Z_1^B > 0$ 且 $Z_2^B > 0$, 则输出 $Z_{x,y}$ 。否则,输出 Z_{med} 。

A 层用来判断 Z_{med} 是否为一脉冲, B 层用来判断 $Z_{x,y}$ 是否为一脉冲。如果 Z_{med} 和 $Z_{x,y}$ 都不是脉冲, 则算法就利用输出一个不变的像素值 $Z_{x,y}$ 来代替邻域中值作为输出, 以避免不必要的细节损失。为了改进标准中值滤波算法处理空间密度较大的冲激噪声能力不足的问题, 自适应中值滤波算法采用了通过扩大窗口来相对地减少冲激噪声空间密度的这一策略。作为对这一策略的改进, 可以结合选择式掩模算法的思想, 通过改变窗口形状和方向来达到相对减小冲激噪声空间密度的目的。另外, 采用这一方法的一个好处是: 在图像的两个相邻区域, 由于通过改变窗口形状和方向可以更好地选择合适的区域内部窗口, 并可避免因增大窗口尺寸而导致的掩模窗口内可能包含位于两个不同部分区域像素的情况, 因此能更好地保持图像细节。

2.3 稳健平滑滤波器

稳健平滑滤波器是一种简单、快速的非线性滤波器, 它可以有效地消除空间密度不大的椒盐噪声。该算法执行过程中, 由于采用了牺牲平滑能力来保留更多图像细节的策略, 因此, 相对于中值滤波器而言, 其可保留更多的图像边缘。该算法描述如下:

(1) 计算掩模窗口内除中心点外的其他像素点的最大值和最小值;

(2) 将掩模窗口中心点的灰度值与掩模窗口内

的最大值和最小值进行比较;

(3) 如果掩模窗口内中心点灰度值大于最大值,则输出该最大值;如果掩模窗口内中心点灰度值小于最小值,则输出该最小值;如果掩模窗口内中心点灰度值介于最大值和最小值之间,则输出该掩模窗口中心点灰度值。

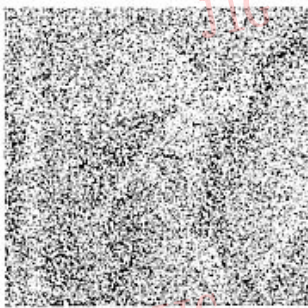
为了更好地保持图像细节,稳健平滑滤波器采取了与自适应中值滤波器相同的思想,即通过不改变“中间水平”的点来减少图像的失真。针对稳健平滑滤波器只能消除空间密度不大的椒盐噪声这一不足,本文对稳健平滑滤波器进行了改进,改进后的算法描述如下:

(1) 排除掩模窗口内和中心点灰度值相等的

点,对余下的点进行排序,首先得到中值;

(2) 将掩模窗口中心点的灰度值与最大值和最小值比较,如果介于最大值和最小值之间,则输出中心点灰度值;如果大于最大值,则视中值是否介于最大值和最小值之间,若是,则输出为中值,否则输出最大值。同样,如果小于最小值,则视中值是否介于最大值和最小值之间,若是,则输出为中值,否则输出最小值。

改进后的稳健平滑算法不仅可以处理空间密度大的椒盐噪声,并可对高斯噪声有一定的抑制作用。与自适应中值滤波器比较,该算法在得到相同的平滑效果时,有更小的计算复杂度。图 1 是对加入空间密度为 0.7 椒盐噪声后的图像进行平滑处理的结果。



(a) 被椒盐噪声污染图像



(b) 稳健平滑处理结果



(c) 改进算法处理结果

图 1 稳健平滑滤波器与改进的算法处理结果

Fig. 1 Results of filtering with the robust and the improvement

2.4 与梯度相关的加权滤波器

与梯度相关的一系列加权滤波器主要是基于以下原理,即在一帧离散图像中,相邻区域多像元属性值的变化大于区域内部的变化,在同一区域内部,中间像素的变化小于边缘像素的变化,且图像灰度梯度值正比于邻近像素的灰度差值,即在图像灰度变化缓慢区域,梯度值小,反之则大。若取一随梯度值增加而单调减小的函数,并以该函数值作为子图像窗口内的相应像素的权重因子,则窗口中心像素的平滑贡献主要来自于区域内部像素,因此平滑之后图像的边缘和细节不会受到明显的损失。

在这一系列滤波器中,经常采用的函数为幂函数和指数函数。特别当采用的幂函数的幂值取 -1 时,滤波器称为梯度倒数加权滤波器。当采用指数函数时,滤波器称为自适应滤波器。在进行遥感影像线状特征提取时,经常采用自适应滤波器来对图像进行预处理,以达到去噪和增强边缘的目的,该滤波器采用的与梯度相关的函数为一指数函数,其数

学表达式为 $f(x) = e^{-x^2/2k^2}$,其中, x 表示图像的梯度幅值, k 为决定平滑程度的参数。通过分析可以发现, k 可用来调节该指数函数的陡峭程度, k 越大,指数函数就越平缓,如果信号的梯度幅度大于 k ,则迭代过程中,梯度幅值将随着迭代次数的增加而增强,以便达到锐化边缘的作用;反之则相反,最终这些弱的细节将会被平滑掉。由此可见, k 的取值对最终的平滑效果的好坏起着决定性的作用,但是,在关于自适应滤波器算法的描述中,对 k 并没有太多的定量分析,基于上述考虑,本文对 k 的取值问题进行了相关探讨,与梯度相关的加权滤波器算法表述如下:

① 对图像的梯度幅值图像进行延拓,即对每个像素点的梯度幅值延拓一个相应的负数值,以使得延拓后的新的图像均值等于 0;

② 求新图像序列的方差 $\sigma^2 = E(\hat{x} - \bar{x})^2 = \bar{x}^2$; \bar{x} 表示未延拓图像灰度梯度幅值 x 的均值, \hat{x} 表示延拓后图像相关像素点的灰度梯度幅值。

③ 取 $k = \sigma$, 此时所取的指数函数为标准正态分布;

若以该值作为自适应平滑时的参数就可以在滤除噪声的同时, 有效地保持图像细节。

3 稳健的自适应平滑算法

该算法是在吸收上述相关算法优点的基础上, 综合应用了多窗口掩模、梯度加权、非脉冲点灰度值输出不变、改进的稳健平滑的算法思想提出来的。按照自适应中值滤波器中的符号设定, 该算法步骤如下:

(1) 按照选择式掩模滤波器的方法在窗口 $S_{x,y}$ 中选择了 4 个五边形、4 个六边形、1 个正方形 9 个子掩模窗口, 其子掩模窗口的方向、形状如图 2 所示。

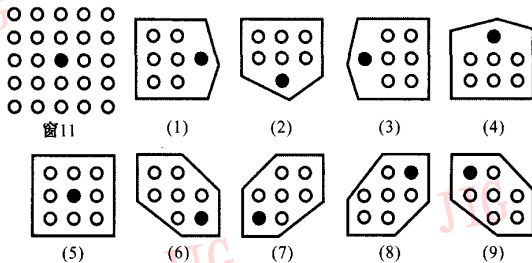


图 2 5 × 5 窗口和它的 9 个子掩模窗口 (●表示中心像素)
Fig. 2 5 × 5 Neighborhood and 9 masks of various sizes
(●Refers the center pixel)

(2) 针对 9 个子掩模窗口, 如果有一个窗口满足: $Z_1^A = Z_{med} - Z_{min} > 0, Z_2^A = Z_{max} - Z_{med} > 0, Z_1^B = Z_{x,y} - Z_{min} > 0, Z_2^B = Z_{max} - Z_{x,y} > 0$, 则输出 $Z_{x,y}$ 。否则, 转入第 3 步。

(3) 在每个满足 $Z_1^A > 0$, 且 $Z_2^A > 0$ 的子掩模窗



(a) 加入强度为 0.3 椒盐噪声的 Lena 图像



(b) 改进的稳健平滑算法 (模糊指数 0.28) 平滑后图像



(c) 自适应中值平滑算法 (模糊指数 0.29) 平滑后图像



(d) 本文方法平滑后图像 (模糊指数 0.24)

图 3 本文方法及改进的稳健平滑滤波算法、自适应中值滤波算法平滑后的 Lena 图像

Fig. 3 Results of filtering with the method put forward this paper, the improvement robust and the adaptive median

由图 3 可见, 本文方法能更好地保持图像的边缘。

4.2 平滑能力分析

图 4(a) 是加入强度为 0.01 高斯噪声的 Lena

口内, 按照和梯度相关的加权算法 (本文选用的是自适应滤波器) 计算该窗口的输出值 Z_{grad} , 如果 Z_{grad} 和 Z_{med} 的差小于一定的阈值, 则输出 Z_{grad} 和 Z_{med} 的平均值; 否则, 扩大窗口尺寸。

(4) 如果当窗口尺寸达到 S_{max} 时, 仍没有满意的输出, 则保留 $Z_{x,y}$, 等待下次迭代。

(5) 按照上面 4 个步骤迭代求解, 直至达到满意的平滑效果为止。

为了更大限度地保留图像的细节, 本文在计算过程中采取了对非脉冲噪声点保持原值的方法, 同时, 为了处理空间密度大的椒盐噪声, 还采用了扩大窗口和选择多种形状与方向子窗口的策略来相对地减少椒盐噪声的空间密度。由于算法的处理过程结合了线性和非线性滤波器的方法, 因此算法对多种类型的噪声有着很好的适应性。

4 平滑效果评价

为评价本文方法的平滑效果, 参照一种图像模糊度评价标准, 将本文方法和其他几种平滑算法进行了对比分析, 并通过提取平滑前后图像的边缘来检验几种算法的平滑能力。

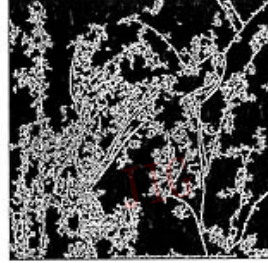
4.1 平滑算法品质对比

为了合理评价各种滤波算法的效果, 将徐钡、王超提出的基于模糊数学的图像模糊度^[6]作为平滑后图像品质的评价标准, 该度量标准可以有效地反映边缘的清晰程度和整幅图像的模糊度, 详细算法可参看文献[6]。图 3 是加入强度为 0.3 椒盐噪声的 Lena 图像及用本文方法、改进的平滑滤波算法、自适应中值滤波算法的平滑结果。

图像, 图 4(b)、图 4(c) 为用本文方法平滑前和平滑后的图像用同一种方法提取的边缘, 由图 4(c) 可见, 该方法可有效地滤除图像中的高斯噪声。



(a) 加入强度为 0.01 的高斯噪声的 Lena 图像



(b) 平滑前图像的边缘检测结果



(c) 平滑后图像的边缘检测结果

图 4 带噪 Lena 图像用本文方法平滑前后图像的边缘检测结果

Fig. 4 Edge detection result of after filtering with the method put forward by this paper on noised Lena image

5 结 论

本文在分析几种细节保持能力良好的平滑算法(自适应中值滤波、与梯度相关的加权平滑、稳健平滑、边缘保持滤波器)的基础上,吸收了上述几种平滑算法的优点,并结合各自对不同噪声的适应性,提出了一种结合非线性和线性滤波器的新的平滑算法。针对含有多种噪声的受污图像,多次试验的结果表明,该算法在稳健地处理受污图像的同时,仍可以保持良好的图像细节。

参考文献 (Reference)

1 Castleman Kenneth R. Translated by ZHU Zhigang etc. Digital Image Processing [M]. Beijing: Electronic and Industrial Press, 1998. [Castleman Kenneth R. 著,朱志刚等译. 数字图像处理[M]. 北

京:电子工业出版社,1998.]

2 Ruan Qiuqi. Digital image processing [M]. Beijing: Electronic and Industrial Press, 2001. [阮秋琦著. 数字图像处理学[M]. 北京:电子工业出版社,2001.]

3 Keiji Taniguchi. Digital image processing (basical) [M]. Beijing: Science Press and Kyoritsu Shuppan Co., Ltd., 2002. [日]谷口庆治. 数字图像处理(基础篇)[M]. 北京:科学出版社,共立出版,2002.]

4 WANG Jifen, Zhang Xinrong. Computer Image Recognition [M]. Beijing: China Railway Press, 1988. [王积分,张新荣编著. 计算机图像识别[M]. 北京:中国铁道出版社,1988.]

5 Carlo Braccini (Eds.). Image analysis and processing [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995:483 ~ 487.

6 XU Yan, WANG Chao. Digital Image Fuzzy Index Based on Fuzzy [J]. Journal of Computer Aided Design and Graphis, 2002, 14(8): 45 ~ 47. [徐钹,王超. 基于模糊数学的数字图像模糊度[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2002, 14(8):45 ~ 47.]