

一种多层自适应形态滤波算法

王家良 程春玲

(南京邮电大学计算机学院 南京 210003)

摘要 针对现有形态滤波算法结构固定、预设结构元素和偏倚校正系数等不足,提出一种具有多层结构的自适应形态滤波算法,多层结构共分为 3 层:输入层、中间计算层、偏倚系数校正层。该算法在面对复杂变化的干扰信号时,可以灵活地选择利用不同结构元素计算得到的结果;同时针对形态开运算和形态闭运算所带来的偏倚现象,通过优化设置偏倚校正系数向量来减弱偏倚现象对滤波效果产生的负面影响。仿真结果表明,该算法改善了形态滤波的性能,具有设计简单、实用性强的特点。

关键词 形态滤波器,多层结构,结构元素,自适应

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.5.015

Multi-layer Adaptive Morphology Filtering Algorithm

WANG Jia-liang CHENG Chun-ling

(School of Computer Science & Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract In view of deficiencies of the exiting morphology filtering algorithms, such as the fixing structure, the pre-set structuring element and bias correction coefficient, an adaptive filtering algorithm with a multi-layer structure was presented. The multi-layer structure is combined with three layers: an input layer, an intermediate layer for calculating, and a layer for correcting the bias. Facing the complicated changing interfering signal, the proposed algorithm can make a choice flexibly among the results calculated by using different structuring elements. In addition, aiming at the bias caused by the opening operation and closing operation, the proposed algorithm can weaken the negative impact that the bias brings to filtering effect by optimizing the bias correction coefficient vector. Simulation results show that the proposed algorithm improves the performance of morphological filtering, and it has the characteristics of simple design and strong practicability.

Keywords Morphological filters, Multi-layer structure, Structuring element, Adaptive

数学形态学(Mathematical Morphology)理论是由法国数学家 G. Matheron 和 H. Serra 等人在 60 年代创立的。当初主要目的是进行地质和金属标本微观图像结构的分析,以及了解分析结果与岩石和矿物物理特性之间的关系。数学形态学作为一种非线性信号处理和分析工具,具有一套完整的理论、方法和算法体系。它用一套独特的变换或运算来描述信号的基本特征或基本结构,其基本思想是将信号看作欧氏空间点的集合,利用预先定义的结构元素对信号进行移位、交、并等集合运算,以达到提取信号、抑制干扰信息的目的^[1]。其在图像处理、模式识别和计算机视觉等领域获得了广泛的应用,同时这些应用也促进了形态滤波的进一步发展。

基于数学形态学的形态滤波算法通过选取比较小的结构元素即信号特征与目标信号相互作用来实现滤波的效果,它不仅计算简单、方便,时间复杂度低,而且克服了传统线性滤波在抑制各种非加性高斯噪声时效果不佳且不能很好地保持信号细节特征等缺点^[2]。形态滤波算法是由以集合论为基础

的开、闭运算及其级联运算组成。开、闭运算分别处理信号的凸、凹部分,均为单边滤波,单独使用它们进行滤波存在很明显的偏倚现象,采用二者的级联运算可以达到双边滤波的目的,并且可以一定程度上弱化此种偏倚现象对滤波结果带来的负面影响。由于非线性滤波理论和算法的复杂性、多样性,形态滤波目前尚没有形成系统的设计方法。

根据提高滤波效果方法的不同,将形态滤波主要分为 3 类,并从这 3 个方面考虑提升滤波效果。第一类是通过改变形态滤波的变换形式;第二类是通过为形态滤波选择较优的结构元素;第三类是通过改善设置偏倚校正系数的方法,降低偏倚现象对滤波效果的影响。

就改变形态滤波变换形式而言,文献[3,4]都是采用级联的方式将开闭运算级联计算的结果再作为下一个开闭运算的输入信号,进行滤波运算。文献[5,6]采用的是先级联后并联的方式,即先将开闭运算级联运算,再将其与另一个开闭运算进行并联。文献[7]采用并联的方式,将信号分别经过形态开

到稿日期:2014-02-18 返修日期:2014-04-14 本文受江苏省科技支撑项目(BE2012849),江苏省研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0483)资助。

王家良(1989—),男,硕士生,主要研究方向为机器学习;程春玲(1972—),女,教授,CCF 会员,主要研究方向为数据管理、分布式资源管理和性能优化,E-mail:chengcl@njupt.edu.cn.

运算和形态闭运算,然后将它们的结果进行合并。以上这些变换形式的设计方法在滤波过程中有以下缺点:第一,在滤波过程中,滤波算法不能灵活地选择结构元素。对于这种设计方式,只能预先选定结构元素,然后再参与运算,当干扰信号发生变化时,不能灵活变动及改变结构元素的相关参数。第二,对于开闭运算的偏倚现象,不能自适应调整,只能预先设定好偏倚校正系数,使得在滤除稳定性差的干扰信号时,达不到较好的预期结果。

就形态滤波的结构元素选择而言,文献[8]采用多结构元素的方法构造了广义形态开最大和广义形态闭最小滤波算法,这类滤波算法具有平移不变性、递增性、对偶性等重要性质。构造这样的形态滤波算法可以减少算法的运算量,较好地保持了有用信号的细节,同时起到抑制正负脉冲噪声的作用。但是这种广义形态开最大、闭最小滤波器不具有幂等性,进行一次滤波不能求出根信号。文献[9]提出了一种形态滤波的优化改进算法,给出了一种非凸型结构元素。利用这种结构元素进行信号处理,促进了滤波质量和运算速度的双向提高,并且改善了对杂波起伏不够敏感的固有缺陷。文献[10]采用了多尺度和多结构元素,提出了一种新的多结构尺度形态学算法,通过构建新算子实现图像处理。在该算法中,分别将各个结构元素下的检测结果进行加权求和,这种方法具有更好的噪声抑制能力,而且边缘定位准确,检测到的边缘轮廓更加清晰完整,但是其自适应效果较差,对于选择较好结构元素存在较大的困难。文献[11]提出了一种新型的形态滤波方式,其采用了一种形式、尺寸不断增大的结构元素对信号进行滤波处理。这种方法可以很好地保持某种几何信息,但是如果也要同时保留多种几何信息,它就不行了,因为采用一种形状的结构元素只会保留一种几何信息,其他的几何信息会与干扰信号一起被滤除。

除了以上两类主要的方法,还可以通过优化偏倚校正系数来改善偏倚现象,从而提高形态滤波算法的滤波效果,因为通过校正由形态开的反扩展性和形态闭的扩展性带来的偏倚,有利于脉冲噪声的抑制。文献[12]将形态开运算和形态闭运算进行级联的滤波方式,没有设置偏倚校正系数,这类滤波方式不能有效抑制加性白噪声。相对文献[12]而言,文献[13]虽然设置了偏倚校正系数,但是其校正系数是事先人为规定的,在不断变化的复杂环境中无法达到较好的校正效果。

综上所述,形态滤波效果的好坏取决于3个方面:1)滤波的变换形式的设计;2)结构元素的选择;3)偏倚校正系数的设置。以上关于形态滤波的算法大多都是对结构元素选择方面的改进,很少涉及变换形式的设计方法和偏倚校正系数的优化设置。因此,在考虑到结构元素的灵活选择的同时,将综合考虑偏倚校正系数的优化设置,提出一种多层自适应形态滤波算法,以有效提高形态滤波算法的滤波效果。

1 形态滤波

形态变换是一种局部修改信号特征的非线性变换,采用不同的结构元素,可以提取出信号不同的形态特征^[14]。建立在数字空间中的离散形态变换是构造形态滤波算法的基础。由于数字信号可以用离散函数来表征,因此函数的极大和极小运算可用函数的最大值和最小值运算来代替。形态滤波最基本的变换有腐蚀、膨胀,它们互为对偶运算,两者都满足对

偶性、单调性、平移不变性、扩展(收缩)性,以及交换律、分配率、结合律等性质^[15]。由于最初提出的形态学滤波方式是用图像处理的,因此在图像处理方面,经过腐蚀运算的图像将会达到收缩图像的功能。与之相反的是经过膨胀运算的图像,将会达到扩大图像的功能^[16]。由腐蚀运算和膨胀运算可以定义开运算和闭运算,它们同样是互为对偶运算,是形态学中最重要变换或运算,因为它们可以保证不产生全局上的几何失真并且其它的一些形态学算法都是由它们构造而来^[17]。

设 $f(n)$ 和 $g(n)$ 分别为定义在 $F\{0,1,\dots,N-1\}$ 和 $G=\{0,1,\dots,M-1\}$ 上的离散函数,其中 $f(n)$ 为输入函数, $g(n)$ 为结构元素。 $f(n)$ 关于 $g(n)$ 的腐蚀和膨胀运算分别定义如下。

腐蚀运算:

$$(f \ominus g)(n) = \min\{f(n+m) - g(m)\} (m \in G) \quad (1)$$

膨胀运算:

$$(f \oplus g)(n) = \max\{f(n-m) + g(m)\} (m \in G) \quad (2)$$

其中, \ominus 和 \oplus 分别表示腐蚀和膨胀运算符。形态开、闭运算是这两个运算进行串联复合而成的,可分别定义如下。

开运算:

$$(f \circ g)(n) = [(f \ominus g) \oplus g](n) \quad (3)$$

闭运算:

$$(f \cdot g)(n) = [(f \oplus g) \ominus g](n) \quad (4)$$

其中, \circ 、 \cdot 运算分别表示形态开、形态闭运算符。这两种运算也都满足对偶性、单调性、平移不变性、扩展(收缩)性、幂等性等性质。其中幂等性是开、闭运算的一个重要性质,即:

$$(f(n) \circ g(n)) \circ g(n) = f(n) \circ g(n) \quad (5)$$

$$(f(n) \cdot g(n)) \cdot g(n) = f(n) \cdot g(n) \quad (6)$$

它意味着进行一次开或闭变换后,可以达到最终结果,再进行重复变换,不会获得新的信息。这一点与经典的变换方法(如中值变换、线性卷积等)完全不同。同时开、闭运算也是最基本的滤波方式。通常,形态开、闭运算用于形态滤波,它们以不同的方式平滑信号。形态开可以抑制信号中的峰值(正脉冲)噪声,而形态闭可以抑制信号中的低谷(负脉冲)噪声^[15]。为了同时去除信号中的正、负两种脉冲噪声,常采用形态开、闭的级联形式,这样便形成了经典的两种滤波方式^[17]:

$$F_{oc}(f(n)) = ((f \circ g) \cdot g)(n) \quad (7)$$

$$F_{co}(f(n)) = ((f \cdot g) \circ g)(n) \quad (8)$$

这两种经典的滤波方式,在实际应用中都能达到双边滤波的目的,提高了滤波算法的性能。

2 多层自适应形态滤波算法

多层自适应形态滤波算法建立了3层结构的变换形式,这种变换形式与传统变换形式的不同点在于:传统的变换形式是以二维的方式展现的,这种变换形式不可能在相邻的计算节点之间做任何其他的操作,且不可能根据实际需求设置偏倚校正系数;而本文提出的形态滤波的变换形式是以三维方式展现的,且能够很好地解决传统变换形式存在的问题。在结构元素的选择方面,现有的许多形态滤波算法中结构元素往往事先人为确定,这类滤波算法仅在所对应的某类信号模型中具有很好的性能,然而,通常情况下的信号极其复杂且

处于不断变化中,本文的形态滤波算法可以根据实际需求,灵活选择结构元素,提高了滤波算法的滤波效果。

多层自适应形态滤波算法中建立的3层结构分别为:第一层是由常用结构元素构成的开闭运算的计算节点,常用结构元素包括:线性结构、抛物型结构、三角形结构等;第二层同样为计算节点,但是其计算节点是根据第一层的输出进行设置的;第三层是一维偏倚校正系数向量。第一层是与外界环境连接的节点层,称为输入层。每层的节点之间没有连接,但层与层之间存在连接。在层与层之间进行选择时,选取满足预先设定阈值的计算结果作为下一层的输入。将第二层的输出与第三层的一维偏倚校正系数向量进行向量的点乘运算,并利用外罚函数法计算向量值,从而达到优化偏倚校正系数设置的目的。这样可以使得形态滤波算法在针对不同的干扰信号或不稳定的干扰信号时,都能较好地滤除干扰信号,达到最优的滤波效果。

2.1 多层结构

形态滤波的运算主要分为膨胀、腐蚀、开运算和闭运算,其中开运算和闭运算是由膨胀运算和腐蚀运算复合而成的,它们也是最基本的单边滤波方式,但是在计算过程中开闭运算会产生严重的偏倚现象;而且现有的形态滤波算法都是根据传统的变换形式按部就班地进行各个计算节点的运算,在相邻计算节点之间无法选择阶段性较优的滤波结果。因此,本文提出了一种多层形态滤波算法,该算法的结构如图1所示。其中 \circ 表示开运算; \bullet 表示闭运算; \uparrow 表示将下层的输出进行选择后,输入到上层; $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$ 表示偏倚校正系数向量,其中 k 为第二层输出的个数;最下面的 $\hat{\uparrow}$ 表示输入信号;最上面的 $\hat{\uparrow}$ 表示输出信号; y_i 表示第一层未经选择前的输出; y_i 表示第二层未经选择前的输出; S 为原始的信号; η 为预先设定的阈值。

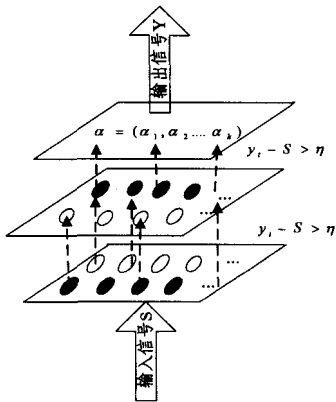


图1 多层形态滤波器

在图1中,第一层分布着由不同结构元素构成的开闭运算的计算节点。该层将接收原始输入信号,并与结构元素进行开闭运算,从而输出第一次的滤波结果。第二层根据第一层输出同样分布着不同的开闭运算的计算节点。在第一层上进行开运算的信号,在第二层上进行闭运算;反之,在第一层上进行闭运算的信号,在第二层上进行开运算。第三层为一维偏倚校正系数向量。利用外罚函数法计算向量值使得最终的输出结果与原始信号的误差值的平方的倒数最小,其中约束条件为一维偏倚校正系数向量的各分量的和为1。在层与层之间进行选择时,假设第一层的运算结果为 y_i ,其中 i 为第一层上的结构元素的个数,则 for $j=1, 1:i$, 计算 $\Delta S = 1/$

$|y_i - S|$,若 ΔS 在 η 之内,则选择运算后的结果作为下一层的输入。第二层输出结果 y_i 的选择类似于第一层输出结果的选择,其中 t 为第一层选择后的滤波结果个数。将第二层的输出与第三层的一维偏倚校正系数向量进行向量的点乘运算,将得到的结果作为最终的输出结果。

多层形态滤波不但可以在层与层之间根据预先设定的阈值灵活选择不同结构元素运算得到的滤波结果,而且可以优化设置一维偏倚校正系数向量,减弱形态开的反扩展性和形态闭的扩展性带来的偏倚现象。虽然相对于传统的方式而言,这种多层结构的变换形式的时间复杂度和空间复杂度都相对较高,但是它能够提高形态滤波算法的滤波效果。

2.2 自适应设置一维偏倚校正系数向量

假设一维偏倚校正系数向量 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$,第二层经选择后的输出结果为 $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ik}$,将其表示为一维向量的形式,即 $y = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ik})$,则经过向量的点乘运算后的值为:

$$Y = \alpha_1 y_{i1} + \alpha_2 y_{i2} + \dots + \alpha_k y_{ik} = \alpha^T y \quad (9)$$

通过使误差的平方的倒数 $e = 1/(|Y - S|)^2$ 最小,求得 α 值,因为误差 e 越小,滤波信号就越接近没有干扰情况下的信号。最小值的求解用形式化的方式描述即为

$$\min_a \arg e = \min_a \arg (1/(|Y - S|)^2) \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k = 1 \quad (11)$$

因此,根据外罚函数法将其转化为以下无约束问题:

$$P(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \sigma) = e + \sigma(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k - 1)^2 \quad (12)$$

其中, $\sigma > 0$ 。

假设:

$$(\alpha_1 y_{i1} + \alpha_2 y_{i2} + \dots + \alpha_k y_{ik}) - S = D \quad (13)$$

则一阶导数为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \alpha_m} &= \frac{\partial (e + \sigma(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k - 1)^2)}{\partial \alpha_m} \\ &= \frac{\partial (1/(|Y - S|)^2 + \sigma(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k - 1)^2)}{\partial \alpha_m} \\ &= \frac{\partial (1/(|\alpha_1 y_{i1} + \alpha_2 y_{i2} + \dots + \alpha_k y_{ik} - S|)^2 + \sigma(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k - 1)^2)}{\partial \alpha_m} \\ &= -2y_{im} D^{-3} + 2\sigma(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k - 1), m \in (1, k) \end{aligned} \quad (14)$$

令一阶导数等于零,即:

$$\frac{\partial P}{\partial \alpha_m} = -2y_{im} D^{-3} + 2\sigma(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k - 1) = 0 \quad (15)$$

便可以求得 $\alpha_1(\sigma), \alpha_2(\sigma), \dots, \alpha_k(\sigma)$,当 σ 取无穷大时,即可得到一维偏倚校正系数向量 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$,从而得到第二层的输出与第三层一维偏倚校正系数向量的点乘结果,即为最终的输出结果。

2.3 多层自适应形态滤波算法

多层自适应形态滤波算法的工作流程如下:第一,输入信号,并将输入信号与形态滤波算法的第一层上未参与计算的结构元素进行开闭运算;第二,根据初始设定的阈值 η ,选择满足阈值的开闭运算滤波结果作为第二层的输入,否则重新选择未参与计算的结构元素进行开闭运算,直到第一层上的结构元素都参与了运算;第三,将从第一层的输出中选择得到的滤波结果作为第二层的输入,进行开闭运算,输出第二层的滤波结果;第四,类似于第二步,对第二层的输出结果进行选择;第五,将第二层的输出结果与第三层的一维偏倚校正系数向量进行向量的点乘运算,利用外罚函数法计算向量值,并将

向量的点乘运算所得到的计算结果作为最终的输出结果。其算法伪代码如表 1 所列。

表 1 算法伪代码

```

Algorithm 1 Multi-layer Adaptive Morphology Filtering Algorithm
Input: the image with noise SN="Leo.jpg"
Setting the structuring element for the first and second layer; SE = {SE1, SE2, ..., SEn}
Setting the threshold value  $\eta$ 
Y=zeros(n,m); %% 建立一个矩阵用于存储第一次选择后的结果, n 为结构个数, m 为单个图像信号的维度
for i=1 to u do
    yi=imopen(SN, SEi);
    if (1/norm(yi-SN))< $\eta$  %% 判断是否满足阈值
        Y(i,:)=yi; %% 将结果存储到 Y 矩阵中;
    end
end
for i=u+1 to n do
    yi=imclose(SN, SEi);
    if (1/norm(yi-SN))< $\eta$ 
        Y(i,:)=yi; %% 将结果存储到 Y 矩阵中;
    end
end
X=zeros(N,m); %% 建立一个矩阵用于存储第二次选择后的结果, N 为第一次选择后图像信号个数
for j=1 to v do %% 对第一次 for 循环当中满足条件的 v 个计算结果与
    for k=1 to n do %% 第二层上的每个结构元素进行闭运算;
        xj=imclose(Y(j,:), SEk);
        if (1/norm(xj-SN))< $\eta$  %% 判断是否满足阈值
            X(j,:)=xj; %% 将结果存储到 X 矩阵中;
        end
    end
end
for j=v+1 to v+e do %% 对第二个 for 循环中满足条件的 e 个计算结果与
    for k=1 to n do %% 第二层上的每个结构元素进行开运算;
        xj=imopen(Y(j,:), SEk);
        if (1/norm(xj-SN))< $\eta$ 
            X(j,:)=xj; %% 将结果存储到 X 矩阵中;
        end
    end
end
end
end

```

设向量 $\alpha=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$, 利用外罚函数法求解 α 的最优解, 从而得到最后的滤波结果。

Input: 目标函数 $f(\alpha)$, 约束条件 $g(\alpha)$;
Output: $\alpha=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$

多层自适应形态滤波算法是严谨的数学形态学理论。该算法所具有的多层结构, 可以针对复杂变化的实际情况灵活选择结构元素以及自适应设置偏倚校正系数, 对于不同的干扰信号都能达到较好的滤波效果。针对图像信号而言, 假设对于图像 A, 一般只会受到噪声 a 的干扰, 但是在某些意料之外的情况下, 很可能出现噪声 b 对图像进行干扰, 同时假设噪声 a 是极其不稳定的, 很容易发生变化。此时, 本文的滤波算法能够很好地处理这种情况, 而常用的方法则不能很好地处理。常用方法是在滤波之前设置好变换形式、结构元素、偏倚系数, 当进行滤波出现这种意料之外的噪声时, 常用方法是无法给予相应处理的, 即改变结构元素、修改偏倚系数。而本文在针对以上情况, 可以灵活地选择结构元素, 且自适应设置一维偏倚校正系数向量的值的同时, 滤波算法依旧能够有效滤波。

3 仿真结果与分析

本节对噪声污染的图像信号进行处理, 比较本文算法与中值滤波算法^[18]、文献[10]以及文献[13]中算法的滤波效

果。所用的仿真软件为 MATLAB。针对噪声为椒盐噪声、高斯噪声、同时含有椒盐噪声和高斯噪声以及同时含有椒盐噪声、高斯噪声、斑点噪声这 4 种情况下的“Leo”图像进行滤波, 以测试本文所述滤波算法的性能。“Leo”的原始图像如图 2 所示。



图 2 原始“Leo”图像

3.1 椒盐噪声的滤波仿真

实验取 10% 的椒盐噪声, 滤波的仿真结果如图 3 所示。



(a) 添加噪声的图像



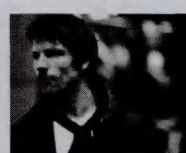
(b) 本算法滤波结果



(c) 中值滤波的结果



(d) 文献[10]算法滤波结果



(e) 文献[13]算法滤波结果

图 3 椒盐噪声图像处理

图 3 中, 将受到椒盐噪声干扰的图像分别利用本文算法、中值滤波算法、文献[10]以及文献[13]中的算法进行处理。从处理后的图像可知, 采用本文算法处理后的图像能够较多地保持图像原有的细节信息, 而其他算法在滤波后丢失了部分细节信息, 对人的主观感受产生了一定的影响。

利用以上滤波算法对含有椒盐噪声的图像进行处理, 其滤波效果分别通过噪声方差、噪声均值以及信噪比这 3 个性能指标进行对比, 结果如表 2 所列。

表 2 Leo 图像的方差、均值和信噪比参数比较(10%的椒盐噪声)

图像类型	加噪图像 (椒盐噪声)	中值滤波	文献[10]	文献[13]	本文算法
噪声方差	1954.9	132.4	15.4	210.2	14.7
噪声均值	2.8	-0.7	-3.92	3.4	-0.3
信噪比	15.2	27.3	32.5	23.6	35.4

由表 2 可知, 经本文算法滤波后的图像, 总体性能都有所提高, 其中本文算法对加噪后的图像进行滤波, 噪声方差从 1954.9 降到 14.7, 相比于文献[10]提出的预设多尺度和多结构元素滤波算法, 其噪声方差降低 4.5%, 信噪比提高 8.9%。

3.2 高斯噪声的滤波仿真

高斯噪声取均值为 0、方差为 0.01, 其仿真结果如图 4 所示。图中, 将受到高斯噪声的图像分别利用本文算法、中值滤波算法、文献[10]以及文献[13]中的算法进行处理。从处理后的图像可知, 本文滤波后的图像无论是在画质还是图像的细节信息方面都与原始图像最为接近, 而其他算法滤波后的图像就略显模糊。



(a) 添加噪声的图像 (b) 本算法滤波结果 (c) 中值滤波的结果



(d) 文献[10]算法滤波结果 (e) 文献[13]算法滤波结果

图4 高斯噪声图像处理

通过噪声方差、噪声均值以及信噪比这3个主要的性能指标对本文算法、中值滤波算法、文献[10]以及文献[13]中的算法进行对比,结果如表3所列。

表3 Leo图像的方差、均值和信噪比参数比较((0,0.01)的高斯噪声)

图像类型	加噪图像 (高斯噪声)	中值滤波	文献[10]	文献[13]	本文算法
噪声方差	617.2	187.1	37.2	427.3	21.7
噪声均值	0.5	-0.6	-5.8	7.3	-1.2
信噪比	20.2	27.7	30.4	18.9	32.9

从表3可知,本文的多层自适应形态滤波算法相对于经典的中值滤波算法、文献[10]提出的预设多尺度和多结构元素滤波算法和文献[13]提出的预置偏倚校正系数算法都有明显的改善,在信噪比方面分别提高了18.8%、8.2%和74%;在噪声方差方面,本文算法分别降低了88.3%、41.7%以及94.9%。

3.3 椒盐噪声和高斯噪声混合的滤波仿真

传统的滤波算法都是面对单一的稳定的噪声干扰,在面对复杂多变的噪声干扰时,其滤波效果就会下降,而本文的滤波算法却可以达到较好的滤波效果。因此,本小节先将图像叠加10%的椒盐噪声,再和均值为0、方差为0.01的高斯噪声进行叠加,模拟复杂噪声对于图像的干扰,其仿真结果如图5所示。图中,本文算法对复杂噪声干扰的图像进行滤波时,能够保持良好的主观感受,相对于其他滤波算法能够很好地保持原有图像的细节信息,而其他算法在面对复杂噪声干扰时,滤波效果不佳,在滤除所有的噪声后,图像也变得很模糊,丢失较多的细节信息,严重影响人的主观感受。



(a) 混合噪声的图像 (b) 本算法滤波结果 (c) 中值滤波的结果



(d) 文献[10]算法滤波结果 (e) 文献[13]算法滤波结果

图5 高斯噪声和椒盐噪声混合的图像处理

在对受到复杂噪声干扰的图像进行滤波时,分别从噪声

方差、噪声均值以及信噪比3个方面将本文算法、中值滤波算法、文献[10]和文献[13]中的方法进行对比,结果如表4所列。

表4 Leo图像的方差、均值和信噪比参数比较(高斯噪声和椒盐噪声混合)

图像类型	加噪图像 (混合噪声)	中值滤波	文献[10]	文献[13]	本文算法
噪声方差	2487.2	156.9	204.1	317.6	39.4
噪声均值	3.4	-0.6	-2.4	7.8	-1.9
信噪比	11.6	20.4	23.5	14.3	31.7

从上表可知,对复杂噪声干扰的图像进行处理时,本文算法的滤波效果优于其他算法,特别在噪声方差和信噪比这两个方面,本文滤波算法的噪声方差相对于文献[10]提出的算法降低了80.7%,信噪比提高了39.1%。

3.4 椒盐噪声、高斯噪声和斑点噪声混合的滤波仿真

为了进一步验证本文算法在面对复杂变化噪声时的滤波效果,在上一节混合椒盐噪声、高斯噪声的基础上,进一步混合斑点噪声模拟复杂变化的干扰信号。各噪声的参数设置如下:高斯噪声的参数取值为(0,0.01),椒盐噪声的参数取值为0.1,斑点噪声的取值为0.04。其仿真结果如图6所示。



(a) 混合噪声的图像 (b) 本算法滤波结果 (c) 中值滤波结果



(d) 文献[10]算法滤波结果 (e) 文献[13]算法滤波结果

图6 噪声混合的图像处理

从图6可知,其他几种算法的滤波效果并没有本算法的滤波效果理想,处理后的图像存在部分噪声,或者在滤除噪声的同时,图像变得模糊,细节信息丢失,严重影响了视觉效果。

表5将利用噪声方差、噪声均值和信噪比这3个主要的性能指标来对利用不同算法滤波后的图像进行对比。

表5 Leo图像的方差、均值和信噪比比较(椒盐噪声、高斯噪声和斑点噪声混合)

图像类型	加噪图像 (混合噪声)	中值滤波	文献[10]	文献[13]	本文算法
噪声方差	2741.8	416.3	307.1	527.9	75.8
噪声均值	5.3	-1.0	-3.7	8.3	-2.3
信噪比	8.3	17.6	20.2	11.1	31.4

从表5可知,利用混合噪声来模拟复杂变化的信号对于图像的干扰时,就信噪比而言,其他算法在处理这种情况时下降的幅度比本文算法下降的幅度要大。无论面对什么样的干扰信号,本文算法处理后的图像,其信噪比始终保持在30以上,下降幅度小于11.3%。

从以上的仿真结果分析可知,无论面对单一、稳定的噪声干扰还是复杂多变的噪声干扰,本文提出的滤波算法均可以灵活选择不同结构元素计算得到的结果和自适应地设置偏倚

校正系数,与其他的滤波算法相比,其能够很好地保持图像的细节信息,给人以良好的主观感受。在噪声方差、噪声均值以及信噪比这3个主要的性能指标上,本算法有明显的改进。

结束语 本文提出的多层自适应形态滤波算法利用多层结构变换形式的优点,在层与层之间灵活地选择不同结构元素计算得到的中间结果,以及优化设置一维偏倚校正系数向量来降低偏倚现象对滤波产生的负面影响。这样使得该算法在滤除不同噪声和保护图像细节方面相对现有的滤波算法均有较大的改善,提高了形态滤波算法的适应性。在仿真过程中发现,初始结构元素设置越多,对于图像的描述性就越强,滤波后输出的结果就越好。但是,这样会导致程序的时间复杂度和空间复杂度会相应提高。因此,下一步的工作将结合实际图像的特点,在设置初始结构元素时进一步考虑对结构元素进行选择的方法,达到在保持滤波效果不变的同时降低时间复杂度和空间复杂度的目的。

参考文献

- [1] 徐艳蕾,赵继印,李敏. 基于顺序形态学的医学图像插值算法的研究[J]. 电子学报, 2010, 38(5): 32-37
- [2] Adesso P, Conte R, Longo M. A pansharpening algorithm based on genetic optimization of Morphological Filters, 2012[C]// IEEE: Piscataway, NJ, 2012: 5438-5441
- [3] Song H, Huang B. Shadow Detection and Reconstruction in High Resolution Satellite Images via Morphological Filtering and Example-Based Learning[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 23(99): 1-10
- [4] Ashtiani S, Shahrtash M. Feature-oriented De-noising of Partial Discharge Signals Employing Mathematical Morphology Filters [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 2128-2136
- [5] Bouaynaya N, Charif-Chefchaoui M. M-Idempotent and Self-Dual Morphological Filters[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(4): 805-813
- [6] Bouaynaya N, Charif-Chefchaoui M. M-Idempotent and Self-Dual Morphological Filters[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(4): 805-813
- [7] Guan Ming-shan, Ren Hong, Ma Yan. Multi-scale morphological filtering method for preserving the details of images[C]// IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application (PACIIA). IEEE: Piscataway, NJ, 2009: 417-420
- [8] 白银刚,于盛林. 一种广义多结构元形态滤波器[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 792-796
- [9] 余农,吴常泳,汤心溢. 红外目标检测的自适应背景感知算法[J]. 电子学报, 2005, 33(2): 200-204
- [10] 张伟,王军锋,王涛. 一种基于改进算子的形态学边缘检测算法[J]. 计算机技术与发展, 2013, 28(4): 24-28
- [11] Verd-Monedero R, Angulo J, Serra J. Anisotropic Morphological Filters With Spatially Variant Structuring Elements Based on Image Dependent Gradient Fields [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(1): 200-212
- [12] Guan Jing, Zhang Tian-xu, Wang Xiao-ping. New class of Grayscale Morphological Filter to enhance infrared building target[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2012, 27(6): 5-10
- [13] Tan Xiang-yu, Yang Zhuo, Zhao Xian-ping. Applied research of multilevel generalized morphological filter for ultrasonic signal of PD in processing, 2011[C]// IEEE: Piscataway, NJ, 2011: 297-300
- [14] Li Qi-Yue, Xu Jie, Wang Wei-hua. Slope displacement prediction based on morphological filtering[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(6): 1724-1730
- [15] Lei Tao, Fan Yang-yu. Double operator morphological filters [J]. Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica, 2011, 37(4): 449-463
- [16] 朱康,贺新光. 基于形态学和 Contourlet 系数区域特征的遥感图像融合方法[J]. 计算机科学, 2013, 40(4): 301-305
- [17] Li jin, Tang Jing-tian, Xiao Xiao. De-noising algorithm for magnetotelluric signal based of mathematical morphology filtering [J]. Noise and Vibration Worldwide, 2011, 42(11): 65-72
- [18] Hung Mao-hsiung, Pan Jeng-shyang, Hsieh Chaur-heh. A fast algorithm of temporal media filter for background subtraction [J]. Journal of information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2014, 5(1): 33-40
- [19] Jasper. 文本分类入门(十)特征选择算法之开方检验[OL]. 2008-08-31[2014-01-18]. <http://www.blogjava.net/zhenandaci/archive/2008/08/31/225966.html>
- [4] Yu Lei, Liu Huan. Efficient Feature Selection via Analysis of Relevance and Redundancy[J]. Journal of Machine Learning Research, 2004, 10(5): 1205-1224
- [5] Battiti R. Using mutual information for selecting features in supervised neural net learning[J]. IEEE Trans. Neural Network, 1994, 5(4): 537-550
- [6] Estevez P, Tesmer M, Perez C, et al. Normalized mutual information feature selection [J]. IEEE Trans. Neural Network, 2009, 20(2): 189-201
- [7] Sun X, Liu Y, Xu M, et al. Feature selection using dynamic weights for classification[J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 37: 541-549
- [8] Li B, Chow T W S, Huang D. A novel feature selection method and its application [J]. Journal of Intelligent Information Systems, 2013, 41(2): 235-268
- [9] Lee S, Park Y T, d'Auriol B J. A novel feature selection method based on normalized mutual information [J]. Applied Intelligence, 2012, 37(1): 100-120
- [10] Aliferis C F, Statnikov A, Tsamardinos I, et al. Local causal and markov blanket induction for causal discovery and feature selection for classification part i: Algorithms and empirical evaluation [J]. The Journal of Machine Learning Research, 2010, 11: 171-234
- [11] Lv Jian-cheng, Tan K K, Zhang Yi, et al. A family of fuzzy learning algorithms for robust principal component analysis neural networks[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2010, 18(1): 217-226
- [12] Lv Jian-cheng, Zhang Yi, Tan K K. Global Convergence of Oja's PCA Learning Algorithm with a Non-Zero-Approaching Adaptive Learning Rate[J]. Theoretical Computer Science, 2006, 367(3): 286-307

(上接第 56 页)