

基于噪声调节主成分分析法的彩色图象融合滤波

闫冬梅 赵忠明

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要 彩色图象滤波是图象处理领域中的经典命题之一, 由于滤波算子选择的不同, 滤波后影像的质量也不尽相同. 为此在分析经典滤波算子的滤波器特性的基础上, 将含噪彩色图象的亮度分量分别经过中值滤波与小波软门限滤波, 形成亮度滤波结果图象, 而后利用基于噪声调节的主成分分析法对彩色图象与亮度滤波结果影像进行融合处理, 得到融和滤波图象. 同矢量中值滤波器和 α -TMF 滤波结果影像相比, 融合滤波后影像与原始影像具有更好的峰值归一化均方误差, 能够更加真实地反映原始景物的色彩信息. 实验证明, 该融合滤波方法能有效地滤除高斯噪声、脉冲噪声及其混合噪声.

关键词 计算机图象处理(520·6040) 融合 影像滤波 基于噪声调节的主成分分析

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)10-1126-05

De-noising in Color Image Based on The Noise-Adjusted Principal Components Analysis and Image Fusion

YAN Dong-mei, ZHAO Zhong-ming

(The Institute of Remote Sensing Applications, CAS Beijing 100101)

Abstract De-noising in color image using different filter will get the different image quality. In this paper, we analysis the filter feature of the classic filter, get the filtered illumination image with the median filter and the wavelet filter, and then merge the filtered illumination image with the color image after vector median filter to get the result image. Experiment result shows that the fused filter can suppress the pulse noise, Gaussian noise and the mixed noise. Compared with images by vector filter and-TMF, the fused filtered image has the least normalized peak-value mean square error. It approximately reflect the real colors of nature object like the origin non-noise image.

Keywords Computer image processing, Image fusion, Color image filter, Noise adjusted principal components analysis

0 引言

在彩色影像的采集、传输和处理过程中, 或多或少地会引入噪声, 引起影像降质. 滤除影像噪声, 使影像真实反映客观景物的影像特征, 是影像滤波的目的所在.

彩色图象噪声分析方法将彩色图象看作是 (R, G, B) 灰度矢量信息, 对于一个彩色像素, 若其任意一分量被噪声污染, 则该像素被认为是噪声点. 从图象处理的本质上讲, 彩色噪声滤除方法是建立在 R, G, B 单色图象滤波的基础上. 经典的图象滤

波方法分为两类: 空域平滑法或频域低通滤波法. 两种方法都是对影像的低频成分进行增强、对影像的高频成分进行抑制的过程. 影像在噪声抑制的同时, 也损失了图象边沿与细节信息. 随着基于多分辨率分析的小波变换在图象处理中应用, 针对影像加性高斯噪声模型, Mallet 和 Hwang 通过保留小波变换域极大值的方法对图象去噪, 而 Donoho 和 Johnstone 在阈值的选取方面行了大量的工作^[1], 引出了小波域的硬阈值法和软阈值法, 使小波去噪方法基本克服了经典影像滤波算法的缺点, 在滤波的同时, 较好地保留了图象的边缘和细节信息. 但各种滤波器模型具有不同的空域和频域特性, 针对同

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划项目(2002AA133030)

收稿日期: 2002-11-07; 改回日期: 2003-05-16

一原始图象,采用不同的滤波算子,滤波后的图象质量也不同.如何选取图象滤波算子,尽可能地含噪图象中恢复原始图象,是图象预处理的经典命题之一.本文利用噪声调节的主成分分析数据融合的方法,利用彩色影像波段之间的互补性和冗余性,建立了综合的滤波模型.并采用峰值归一化均方误差的质量客观评价方法对滤波影像进行质量评定.

1 图象噪声与滤波算子

1.1 图象噪声模型

图象噪声产生的原因决定了噪声的分布特性和它与图象信号之间的关系.影响图象质量的噪声主要包括:光电子噪声、颗粒噪声和电子噪声,在通常情况下,将这 3 种噪声均视为加性白高斯分布进行研究.含有加性噪声的影像 $f(x,y)$ 模型为

$$f(x,y) = g(x,y) + n(x,y) \quad (1)$$

其中,噪声 $n(x,y)$ 与信号 $g(x,y)$ 是统计独立的.噪声信号 $n(x,y)$ 符合高斯分布,其期望值为 0,方差为 σ_n^2 ,信噪比为 SNR.

但在图象滤波的实践过程中,针对一幅确定的数字图象,由于采集样本的有限性和迭加噪声的随机性,不能严格地运用上述模型进行描述.其模型演变为

$$f(x,y) = g(x,y) + n_1(x,y) + n_2(x,y) \quad (2)$$

$n_1(x,y)$ 代表图象中的脉冲噪声含量,而 $n_2(x,y)$ 代表高斯噪声含量.因此,一个有效的影像滤波算子必须同时具有抑制上述两种噪声的性能.

1.2 常用滤波器滤波性能分析

1.2.1 小波去噪法

相应于图象边缘和细节信息的小波变换系数在不同的尺度具有较强的相关性,与此相反,随着尺度的增加,高斯白噪声小波变换系数逐渐减小,其不同尺度变换系数之间的相关性较弱.图象信号多尺度边界的奇异性和高斯噪声小波变换所具有的不同特性是小波变换域中区分信号与噪声的主要依据.

对于如式(1)的图象,小波滤波的处理流程如图 1 所示.



图 1 小波去噪流程示意图

图 1 所示的小波去噪流程可以用如下算子进行描述

$$F(u,v) = W[f(x,y)] \quad (3)$$

$$\lambda = D(F(u,v)) \quad (4)$$

$$\hat{F}(u,v) = T(F(u,v), \lambda) \quad (5)$$

$$\hat{f}_w(x,y) = W^{-1}[\hat{F}(u,v)] \quad (6)$$

其中,式(3)表示图象的小波分解过程, $F(u,v)$ 代表含噪图象小波变换域系数; $D()$ 代表噪声方差估计与阈值的确定运算,Donoho 和 Johnson 给出了极大极小分析的全局阈值确定方法^[2],即

$$\lambda = D(F(u,v)) = \sigma \frac{\sqrt{2\log(N)}}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

式中, σ 代表噪声的标准差, N 代表观测数据的长度,在图象中可以认为是图象像素的个数;式(5)中 $T()$ 表示阈值为 λ 的小波系数阈值化后产生估计的小波系数 $\hat{F}(u,v)$ 的过程.目前通常使用的 $T(\cdot)$ 为 Donoho 的软门限函数和硬门限函数.下式及图 2 表示 Donoho 的软门限函数.

$$T(F(u,v), \lambda) = \begin{cases} 0 & |F| < \lambda \\ F - \lambda \text{sgn}(F) & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

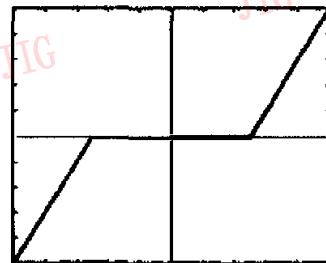


图 2 Donoho 软门限函数

下式及图 3 表示 Donoho 的硬门限函数

$$T(F(u,v), \lambda) = \begin{cases} 0 & |F| < \lambda \\ F & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

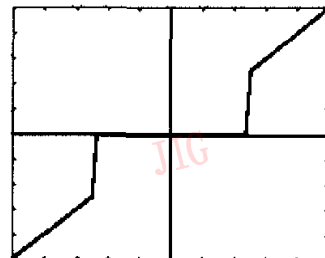


图 3 Donoho 硬门限函数

相对于硬门限而言,Donoho 证明了软门限方法具有如下两个鲜明的特点:(1)在大范围的平滑度量下, $\hat{F}(u,v)$ 以大概率与 $F(u,v)$ 具有相同的平滑度;(2) $\hat{F}(u,v)$ 是 $F(u,v)$ 在任意度量空间中的一个最小均方估计。

滤波后图象通过式(6)对 $\hat{F}(u,v)$ 进行小波反变换得到。

大量实验结果表明,对于图象噪声为加性高斯白噪声或近似高斯白噪声的条件下,小波变换由于其多分辨率特性,通过改进的自适应局部门限确定方法与软门限相结合,均有满意的噪声去除效果。而由于高斯分布函数对数运算后的函数仍具有高斯分布函数的特性,将含乘性高斯噪声的图象进行对数运算,将乘性噪声转变为加性噪声后进行小波滤波处理,同样可以得到满意的滤波效果。

但对于脉冲噪声信号,其小波变换系数在不同的尺度上具有较强的相关性,与图象的细节与边缘信息在小波系数特征相一致,不能滤除掉。

1.2.2 中值滤波器与排序统计滤波法

图象中值滤波是一种非线性的排序影像滤波方法^[3]。中值滤波窗口的大小和形状对滤波效果的影响很大,且如果输入信号为脉宽小于滤波窗口一半的脉冲信号时,该脉冲将被滤除。即中值滤波器对于抑制脉冲噪声的效果最好,而对于符合高斯分布和均匀分布的噪声抑制能力差^[4]。

对于区域内不同像素灰度赋予不同权值 α_i , 可以改变区域内像素对滤波图象的影响,但当图象同时受到高斯噪声和脉冲噪声的影响时,滤波质量与最优权值之间存在矛盾。

针对小波滤波与中值滤波的优缺点,可以将一幅含混合噪声的图象先经过中值滤波,而后经过小波滤波,得到较满意的滤波后图象。

2 彩色图象融合滤波

2.1 彩色图象融合滤波流程

彩色图象的 R、G、B 3 波段从不同的谱段对原始影像进行描述,波段数据之间具有严格的空同配准关系^[5,6]。因此可以利用数据融合技术,采用一定的算法将各影像数据中所含的信息优势或互补性有机地结合起来产生新影像。融合影像具有描述所研究对象的较优化的信息特征,能减少或抑制对被感知对象或环境解释中可能存在的多义性、不完全性、不

确定性和误差,最大限度地利用各种信息源提供的信息^[7]。彩色影像融合滤波的流程如图 4 所示。

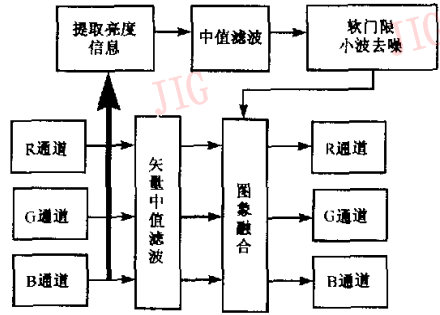


图 4 彩色图象融合滤波流程

2.2 基于噪声调节主成分分析法的彩色图象融合滤波

彩色图象经过矢量中值滤波的 R、G、B 3 波段彼此之间的相关性较强。采用主成分分析法的正交变换,保证在变换后所得到向量的 n 个元素中仅保留第 1 个元素时所产生的误差满足平均误差最小的准则^[8]。

主成分分析的原理如图 5 所示,假设原始数据为二维数据,两个分量 a_1, a_2 之间存在相关性,具有如图 5 所示的分布,通过投影,各数据可以表示为 b_1 轴上的一维点数据,从二维空间中的数据变成一维空间的数据会有信息损失,为了使信息损失量最小,必须按照使一维数据的信息量(方差)最大的原则确定 b_1 轴的取向,新轴 b_1 称为第 1 主成分。对于单影像源融合滤波问题,第 1 主分量 b_1 为平滑分量,占据了影像能量信息的 90% 以上,且与第 2 分量边缘和噪声分量 b_2 相垂直,可以反映影像的能量分布特征。

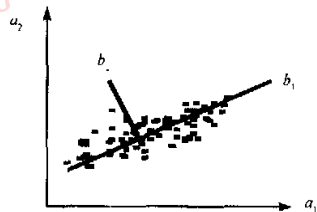


图 5 主分量分析示意图

2.2.1 彩色图象 NAPC 变换

Green 等人在多光谱信息分析的研究^[9]中指出:当图象噪声不能使用单一的白色高斯噪声模型描述时,上述基于最大方差的主成分分析的主成分

分量并不是最大信噪比分量,不能反映变换前图象的质量. Green 等人提出了最大信噪比变换(Maximum Noise Fraction Transform, MNF),其保证了变换后分量按照信噪比次序排列. Lee 等人对上述算法进行了改进,提出了基于噪声调节的主成分分析法^[10](Noise-adjusted Principal Components Transform, NAPC),将 MNF 算法分为噪声白化和主成分变换两个步骤,从而保证了变换后第 1 分量即是最大方差分量,也是最大信噪比分量.

对于同时含高斯噪声和脉冲噪声的原始彩色图象 $f(x, y)$,波段分量 f_R, f_G 和 f_B 中,仍然有大量可分离的噪声 n_R, n_G 和 n_B 存在,可以建立观测模型

$$f = f_s + n \quad (12)$$

即

$$\begin{bmatrix} f_R \\ f_G \\ f_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{SR} \\ f_{SG} \\ f_{SB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_R \\ n_G \\ n_B \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, f 是协方差矩阵为 Cov_f 的观察矢量, f_s 是信号矢量, n 代表独立于信号的噪声矢量. 由于单一滤波所获得的图象间噪声具有相关性,且不能用白高斯噪声模型进行描述,因此噪声协方差矩阵 Cov_n 虽随具有对称性,但不是单位矩阵. 噪声白化的过程也就是使噪声协方差矩阵单位化的过程.

对于实对称矩阵 Cov_n , 必存在正交矩阵 M_1 , 使得

$$M_1^T Cov_n M_1 = \Delta_n \quad (14)$$

Δ_n 为协方差矩阵 Cov_n 的特征值对角矩阵, 即

$$M_1^T Cov_n M_1 \Delta_n^{-1} = I \quad (15)$$

$$M_1^T \Delta_n^{-1/2} Cov_n M_1 \Delta_n^{-1/2} = I \quad (16)$$

$$(M_1 \Delta_n^{1/2})^T Cov_n (M_1 \Delta_n^{1/2}) = I \quad (17)$$

令矩阵 $M_2 = M_1 \Delta_n^{1/2}$, 则有

$$M_2^T Cov_n M_2 = I \quad (18)$$

$$M_2^T M_2 = \Delta^{-1} \quad (19)$$

称矩阵 M_2 为噪声白化矩阵, 通过式(18)变换, 保证了噪声信号为相互独立的高斯白噪声.

同理, 对观察矢量的协方差矩阵 Cov_f 进行如式(18)的运算, 则有

$$Cov_{f_T} = M_2^T Cov_f M_2 \quad (20)$$

令矩阵 M_3 表示 Cov_{f_T} 的特征向量矩阵, 按照 PCA 主成分分析, 存在

$$M_3^T Cov_{f_T} M_3 = \Lambda_{f_T} \quad (21)$$

$$M_3^T M_3 = I \quad (22)$$

其中, Λ_{f_T} 表示 Cov_{f_T} 的特征值所组成的对角矩阵.

显然

$$(M_2 M_3)^T Cov_f (M_2 M_3) = \Lambda_{f_T} \quad (23)$$

因此, NAPC 变换因子为 $M_2 M_3$. 通过 NAPC 变换, 保证了变换后最大方差分量与最大信噪比分量的一致, 变换后的第 1 分量具有最大信息量和最大信噪比, 可以更加真实地反映图象质量.

2.2.2 融合滤波

基于 PCA 变换的像素级融合技术是遥感多光谱图象融合技术的重要组成部分, 在多光谱数据压缩和提高光谱数据空间分辨率等方面有较为广泛的应用. 这里将其引入到彩色图象滤波的应用上. 融合参考图象为经过中值滤波和小波滤波的亮度图象. 融合步骤如下:

(1) 将原始图象 $f(x, y)$ 经矢量中值滤波器后的 R, G, B 经过 NAPC 变换, 形成按信噪比排序的正交分量: $Comp_1, Comp_2, Comp_3$;

(2) 用经过中值滤波和小波去噪的亮度分量 I 代替 $Comp_1$, 将 $I, Comp_2, Comp_3$ 进行 NAPC 反变换, 生成彩色融合滤波图象 $f'(x, y)$.

3 图象滤波试验及分析

实验图象选用标准 Lena 图象(见图版 I 图 1(a)), 添加 $\sigma=30$ 的标准高斯噪声和随机分布 $p=10\%$ 的脉冲噪声后形成图版 I 图 1(b). 亮度分量 I (见图版 I 图 1(c))为

$$I = 0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (24)$$

亮度分量滤波算法中, 小波软门限去噪法选用 Daubechies 小波, 滤波器选用正交镜像滤波器 $h(x) = \{0.230378, 0.714866, 0.63088, -0.027984, \dots, 0.187035, 0.03084, 0.03288, -0.01060\}$, 小波分解层数为 2. 图版 I 图 1(d)为经过中值滤波和小波滤波后亮度影像. 运用矢量中值滤波器对含噪彩色图象进行滤波, 得到的图象见图版 I 图 1(e); 而后, 经过基于 NAPC 的融合后, 产生融合后滤波图象(见图版 I 图 1(f)).

从本质上讲, 影像滤波的过程就是降质影像的恢复过程. 采用滤波后影像 $f(i, j)$ 与原始影像的逼真度作为滤波质量定量评价标准, 所选择的逼真度测度函数为峰值归一化均方误差

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \|f(i,j) - g(i,j)\|^2}{MN(\max\|f(i,j)\|^2)} \quad (25)$$

峰值归一化均方误差值域为 $[0,1]$,当 $\epsilon \rightarrow 0$ 时,表明两幅影像的逼近度越好,表1给出了上述滤波方法的峰值归一化均方误差数据,其结果表明,融合滤波法优于矢量中值滤波器和 α -TMF,具有更好的图象色彩恢复效果。

表1 滤波影像逼真度数据

	中值滤波法	α -TMF	融合滤波法
$p=2\%, \sigma=5$	0.043	0.037	0.0128
$p=5\%, \sigma=10$	0.069	0.054	0.049
$p=8\%, \sigma=20$	0.13	0.138	0.106
$p=10\%, \sigma=30$	0.228	0.21	0.185

此外,由于融合滤波法中融合参考图象经过了软门限小波去噪处理,在图象细节和边缘信息的保留上优于矢量中值滤波器和 α -TMF滤波器,滤波图象中的方块效应明显小于其他两种滤波器滤波后图象的方块效应。

4 结 语

在彩色图象滤波中,目前采用的矢量滤波器在滤除脉冲噪声和高斯噪声以及混合噪声的同时,往往会引起图象颜色的失真。而在引入遥感图象多光谱数据主成分分析的基础上,建立的彩色图象观察模型,通过对噪声的白化过程,保证了主成分分析最大方差分量与最大信噪比分量的统一。

同时,结合中值滤波器和小波滤波器的滤波性能,对彩色图象的亮度分量进行联合滤波后,作为融合参考图象,通过基于噪声调节的主成分分析数据融合技术,对彩色图象进行图象滤波。实验结果表明,本文方法在滤波性能、色彩保持和细节保留等方面均优于矢量中值滤波器和 α -TMF。

参 考 文 献

1 Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaption via wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994,81(3):425~455.

2 Donoho D L. De-noising by Soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995,41(3):613~627.

3 Astola J, Haavisto P, Neuvo Y. Vector median filter[J]. Processing of the IEEE, 1990,78(4):678~689.

4 孙即祥. 数字影像处理[M]. 河北:河北教育出版社,1993:131~132.

5 Irhanias P E, Pitas I, Venetsanopoulos A N. Directional processing of color image: Theory and experimental results[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996,5(6):868~880.

6 蒋刚毅,郁梅,郁伯康等. 自适应彩色图像滤波新方法[J]. 科学通报,1999,44(18):1937~1942.

7 何有,王国宏,陆大金等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2000,11.

8 朱述龙,张占睦. 遥感影像获取与分析[M]. 北京:科学出版社,2000:140~142.

9 Green A A, Berman M, Swizer P *et al.* A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal[J]. IEEE Transactions on GeoScience Remote Sensing, 1988,26(1):65~74.

10 Lee L B, Woodyatt A S, Berman M. Enhancement of high spectral resolution remote sensing data by a noise-adjusted principal components transform[J]. IEEE Transactions on GeoScience Remote Sensing, 1990,28(3):295~304.

11 Chang Chin-I, Du Qian. Interference and Noise Adjusted Principal Components Analysis[J]. IEEE Transactions on GeoScience and Remote Sensing, 1999,37(5):2387~2395.



闫冬梅 1973年生,中国科学院遥感应用研究所国家遥感应用工程技术研究中心博士生,主要研究领域为图象处理、计算机视觉、数据融合等。



赵志明 1961年生,中国科学院遥感应用研究所副所长,国家遥感应用工程技术研究中心主任,研究员,博士生导师。主要研究领域遥感图象处理、小波分析与尺度效应等。