

一种改进的双边滤波算法

张志强^{1),2)} 王万玉¹⁾

¹⁾(中国科学院对地观测与数字地球科学中心,北京 100086) ²⁾(中国科学院研究生院,北京 100039)

摘要 双边滤波是一种既可有效降低图像加性噪声又可保持图像边缘细节的滤波技术,它能同时利用邻域内像素点的空间邻近度信息和亮度像似度信息。然而,双边滤波器的 2 维实现方式和浮点型空间邻近度因子不利于硬件实现,且计算量大。提出了一种改进的双边滤波算法,该算法设计了整数型空间邻近度因子,使用水平和垂直方向上的 1 维滤波实现方式,并能自适应地设置空间邻近度控制参数的值。实验结果表明,改进的双边滤波算法可获得较好的滤波效果。

关键词 双边滤波器 高斯噪声 边缘保持 图像复原

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)03-0443-05

A Modified Bilateral Filtering Algorithm

ZHANG Zhi-qiang^{1),2)}, WANG Wan-yu¹⁾

¹⁾(Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086)

²⁾(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract Bilateral filtering is an edge-preserving filtering technique; it employs both geometric closeness and radiometric similarity of neighboring pixels. A 2-dimensional implementation of the bilateral filter and its float closeness, however, are not suitable for hardware implementation and computationally expensive. In this paper, a modified bilateral filtering algorithm is proposed. It improves the bilateral filtering in three aspects: designing integer geometric closeness, restoring image in 1-dimensional and adaptively choosing control parameter of radiometric similarity. Experiments show that the modified bilateral filtering can achieve better performance.

Keywords bilateral filter, Gaussian noise, edge-preserving, image restoration

1 引言

图像获取过程中会系统地引入噪声,尤其是加性高斯噪声。在对图像进行压缩编码和传输之前,必须解决一个很重要的问题,就是如何快速有效地滤除这些噪声并保持图像边缘细节。解决好这一问题对视频监控应用尤为迫切。

加性高斯噪声可表征为,附加给图像每一像素亮度值上的一个服从零均值高斯分布的值。零均值特性使得利用局部像素亮度值平均的方法滤除加性

噪声成为可能。经典的高斯低通滤波器就是利用局部加权平均的思想设计出来的,然而它平滑了图像的同时,也退化了图像的边缘。为了在滤除噪声的同时保持图像边缘,Tomasi 等人提出了双边滤波算法^[1]。

双边滤波器是在总结 Overton 等人的思想方法^[2]和经典高斯滤波算法的基础上设计出来的非线性滤波器,具有非迭代、局部和简单等特性。同经典高斯滤波器一样,双边滤波器也仅仅利用了局部加权平均;不同的是双边滤波器在 2 维邻域内的加权系数由两部分因子乘积组合而成,一部分由像素

收稿日期:2007-08-02; 改回日期:2007-10-17

第一作者简介:张志强(1982~),男,中国科学院对地观测与数字地球科学中心信号与信息处理专业硕士研究生。主要研究方向为数字图像处理、图像压缩等。E-mail: jackyy313@yahoo.com.cn

间的空间距离决定,可称之为空间邻近度因子;另一部分由像素间的亮度值之差决定,称之为亮度像似度因子。

这里亮度像似度因子受到一个参数的控制,该参数受图像噪声标准差的影响很大,如果仅给出一个固定的值,无法满足不同噪声水平下图像降噪的要求;当滤波邻域比较小时,空间邻近度因子接近 1,其作用未能很好地利用;当滤波邻域比较大时,其运算量比较大。虽然 Pham 等人提出的分离型双边滤波器可降低运算量^[3],但是该滤波器的加权系数直接采用高斯函数生成,结果是浮点型,不利于硬件实现。鉴于此,提出了一种改进的双边滤波算法。

在改进的双边滤波算法中,利用掩频技术^[4-7]及其优化方法^[5-7]重新设计了空间邻近度因子,也就是空间低通滤波部分,使其性能得到充分利用;采用水平和垂直两个方向上的 1 维滤波替代 2 维邻域内加权平均,在其性能不下降的情况下,能够有效减少运算量,这使得在实时系统中应用图像降噪处理成为可能;另外,还提出了一种快速估计图像加性高斯噪声标准差的方法,用以自适应地调整亮度像似度因子的控制参数。实验结果表明,改进的双边滤波算法具有性能好、速度快等特点。

2 双边滤波器

在描述双边滤波器之前,有必要了解它所处理的对象,即噪声图像。这里给出的是零均值加性高斯噪声图像模型^[8]:

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

式中, f 表示无噪声图像, n 是服从零均值高斯分布的噪声, g 是噪声图像; $g(x, y)$ 表示图像 g 在位置 (x, y) 上的像素值。

本文的目标是滤除噪声图像 g 中的噪声 n , 重建无噪声图像 f 。双边滤波器采用局部加权平均的方法获取复原图像 \hat{f} 的像素值:

$$\hat{f}(x, y) = \frac{\sum_{(i, j) \in S_{x, y}} w(i, j) g(i, j)}{\sum_{(i, j) \in S_{x, y}} w(i, j)} \quad (2)$$

式中, $S_{x, y}$ 表示中心点 (x, y) 的 $(2N + 1) \times (2N + 1)$ 大小的邻域。实际上,式(2)右边就是中心像素点邻域内像素亮度值的加权平均。对该邻域内的每一

个像素点 $g(i, j)$, 其加权系数 $w(i, j)$ 由两部分因子的乘积组成:

$$w_s(i, j) = e^{-\frac{|i-x|^2 + |j-y|^2}{2\sigma_s^2}} \quad (3)$$

和

$$w_r(i, j) = e^{-\frac{|g(i, j) - g(x, y)|^2}{2\sigma_r^2}} \quad (4)$$

因此,

$$w(i, j) = w_s(i, j) w_r(i, j) \quad (5)$$

从式(5)可以看出,双边滤波器的加权系数是这两部分因子的非线性组合,空间邻近度因子 w_s 和亮度像似度因子 w_r 的乘积。前者随着像素点与中心点之间欧几里德距离的增加而减小,后者随着两像素亮度值之差的增大而减小。在图像变化平缓的区域,邻域内像素亮度值相差不大,双边滤波转化为高斯低通滤波器;在图像变化剧烈的区域,滤波器利用边缘点附近亮度值相近的像素点的亮度值平均替代原亮度值。因此,双边滤波器既平滑滤波了图像,又保持了图像边缘。

双边滤波器受 3 个参数的控制:滤波器半宽 N 、参数 σ_s 和 σ_r 。 N 越大,平滑作用越强; σ_s 和 σ_r 分别控制着空间邻近度因子 w_s 和亮度像似度因子 w_r 的衰减程度。

3 改进的双边滤波器

从 3 个方面对双边滤波器进行了改进:重新设计了空间邻近度因子,变 2 维滤波为水平和垂直方向的 1 维滤波,以及自适应估计参数 σ_r 。

3.1 空间邻近度因子设计

假设,期望设计的空间邻近度因子 w_{sd} 的频率响应为 $W_{sd}(\omega)$, 其幅值在通带内为 1, 阻带内为 0, 在预先设定好的频域采样点集合 $\{\omega_k \in \Omega\}$ 上定义目标函数:

$$e(k) = W(\omega_k) | W_s(\omega_k) - W_{sd}(\omega_k) | \quad (6)$$

式中, $W_s(\omega)$ 是设计的空间邻近度因子 w_s 的频率响应; $W(\omega)$ 是误差函数的加权系数,通带内为 1, 阻带内为通带波纹与阻带波纹的比值 δ_p/δ_s ; 密集频率采样点 $\omega_k \in \Omega = [0, \omega_p] \cup [\omega_s, 0.5]$ 。优化目标是使式(6)中 e 的最大值最小,从而得到一个等波纹的

FIR 滤波器。为此,使用 MATLAB 中的顺序二次规划(SQP)函数 $fminimax$ ^[9],具体设计步骤如下:

- (1) 给定初始解 w_{s0} ;
- (2) 调用函数 $fminimax$ 确定参数值,使得目标函数值 e 最小;
- (3) 整数化所得滤波器系数即可得到整数型空间邻近度因子,并验证其频率响应。

3.2 1 维双边滤波

从式(4)可以看出,亮度像似度因子依赖于像素值,是不可分离的。为了降低滤波运算量提高执行效率,将式(4)改为水平和垂直两方向上的加权系数:

$$w_r(x, j) = e^{-\frac{|g(x, j) - g(x, y)|^2}{2\sigma_r^2}} \quad (7)$$

和

$$w_r(i, y) = e^{-\frac{|g(i, y) - g(x, y)|^2}{2\sigma_r^2}} \quad (8)$$

结合 3.1 节所设计的空间邻近度因子,先对噪声图像进行水平方向上的 1 维滤波,再对水平滤波结果进行垂直方向上的 1 维滤波。若采用 5×5 大小的滤波器,则运算量可降低 60%。尽管采取分离的实现方式,新的滤波器仍能满足双边滤波器设计要求,降低噪声和保持边缘^[3]。

3.3 参数 σ_r 自适应设置

实验过程中,发现参数 σ_r 对滤波效果影响很大,这里将其设置为加性高斯噪声标准差 σ_n 的 2 倍。实际应用中,通常仅有噪声图像,没有对应的无噪声理想图像,需要估计图像的噪声水平。Immerkaer 提出了一种简单的快速估计加性噪声标准差的方法^[10]。受小波变换分解思想^[11]的启发,

改进了这种方法,提出了一种新的加性噪声标准差估计方法:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{\sum_{i,j=1}^{H/2, W/2} |(HD^T * (HD * g))_{(i,j)}|}{6(H/2)(W/2)}} \quad (9)$$

式中, $HD = (1, -2, 1)$ 是与拉普拉斯滤波器相关的高通滤波器; * 表示先卷积后 $1/2$ 下采样运算; H 和 W 分别是图像 g 的高和宽。

4 实验结果

实验选用两幅的 8 比特灰度图像 Lena512^[12] 和 Peppers256^[13],为每一测试图像在不同噪声水平下构建一组 5 个含加性高斯噪声的图像,实验结果是这一组噪声图像输出的平均值。

实验分别使用本文提出的改进型双边滤波器与原始双边滤波器^[1]及分离型双边滤波器^[3]对上述 2 幅图像进行滤波复原处理。实验过程中,设置双边滤波器的半宽 N 等于 2,即滤波器窗口大小为 5×5 ;原始和分离型双边滤波器控制参数 σ_s 值为 5。

4.1 主观质量

滤波的主要目标是改善图像的主观质量。图 1(a)是加性高斯噪声标准差为 30 的 Lena 噪声图像;图 1(b)是原始双边滤波器对图 1(a)进行滤波的结果,可以看出,双边滤波器即可以滤除噪声又可以保持图像边缘细节信息;图 1(c)是分离型双边滤波器对噪声图像进行处理的结果;图 1(d)是本文提出的改进型双边滤波器所复原的结果。从图 1 中可以看出,改进型双边滤波器所复原的结果与分离型双边滤波器的几乎没有差别,但好于原始双边滤



(a) 噪声图像($\sigma=30$) (b) 原始双边滤波器对(a)复原结果 (c) 分离型双边滤波器复原结果 (d) 新型双边滤波器复原结果

图 1 Lena 高斯噪声图像及其 3 种滤波器复原的结果

Fig. 1 Lena image corrupted with a zero-mean Gaussian noise and the results of applying three filters

波器的结果。

4.2 客观质量

在观察测试了双边滤波器和改进型双边滤波器所重建的图像的主观质量之后,考察一下它们的客观质量。计算了重建图像的峰值信噪比(PSNR):

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i,j=1}^{H,W} 255^2}{\sum_{i,j=1}^{H,W} (\hat{f}(i,j) - f(i,j))^2} \right)$$

PSNR 值越大表明图像复原的越好,但并不意

味着主观质量越高。

表 1 比较了 3 种滤波器重建图像的平均 PSNR 值,图像噪声标准差 $\sigma \in \{10, 20, 30, 40, 50\}$ 。噪声图像由原始图像添加零均值高斯白噪声构成,其 MATLAB 命令如下:

```
randn('seed', 0);
```

```
noisy = original + sigma * randn( size( original) );
```

从表中可以看出,改进的双边滤波算法与分离型双边滤波算法的结果相近,但高于原始双边滤波算法。

表 1 3 种滤波器的 PSNR 对比结果

Tab. 1 PSNR value (in decibels) of noisy images restored with the three filters

单位: dB

图像	Lena 512 × 512					Peppers 256 × 256					
	标准差 σ	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50
双边滤波器 ^[1]		33.72	29.75	27.19	25.26	23.71	33.22	28.99	26.27	24.29	22.78
分离型双边滤波器 ^[3]		33.82	30.58	28.36	26.60	25.15	33.20	29.65	27.21	25.35	23.91
本文改进型滤波器		33.87	30.60	28.32	26.51	25.03	33.23	29.67	27.21	25.33	23.87

4.3 时间开销

滤波性能通常是图像质量和计算开销的权衡。前面两节考察了 3 种滤波器复原图像的主客观质量,下面分析它们计算开销,主要是运行时间。实验采用 Intel Pentium D, 双核 CPU 2.80 GHz 2.79 GHz, 内存 0.99 GB; 在 MATLAB 7.0.1 平台下,使用函数

tic 和 toc 统计 3 种滤波器分别处理两幅灰度图像所运行的时间,结果如表 2 所示。从表中可以看出,改进型双边滤波算法所需时间仅为原始双边滤波算法的 28.7%, 是分离型双边滤波算法的 77.1%。因此,本文所改进的双边滤波算法是有效的。

表 2 3 种滤波器的时间开销对比结果

Tab. 2 Time cost (in seconds) of noisy images restored with the three filters

单位: s

图像	Lena 512 × 512					Peppers 256 × 256					
	标准差 σ	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50
双边滤波器 ^[1]		3.860	3.796	3.797	3.781	3.750	0.969	0.953	0.953	0.938	0.938
分离型双边滤波器 ^[3]		1.422	1.421	1.390	1.391	1.391	0.360	0.359	0.344	0.344	0.360
本文改进型滤波器		1.109	1.079	1.094	1.078	1.078	0.281	0.266	0.265	0.281	0.265

5 结论

本文提出了一种改进的双边滤波算法,分别从整数化设计空间邻近度因子、1 维化滤波运算和自适应估计控制参数 3 个方面对原始双边滤波算法进

行了改进,实现了原始双边滤波算法降低加性噪声和保持图像边缘的功能的同时,减少了运算量。与分离型双边滤波算法相比,改进型双边滤波算法在主客观性能不下降的情况下,整数化设计空间邻近度因子为硬件实现带来了方便。下一步将继续研究如何整数化设计亮度像似度因子 w_r , 即实现整数型

双边滤波器,以便硬件实现。

参考文献 (References)

- 1 Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [A]. In: Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision [C], Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1998: 839-846.
- 2 Overton K J, Weymouth T E. A noise reducing preprocessing algorithm [A]. In: Proceedings of IEEE Computer Science Conference on Pattern Recognition and Image Processing [C], Chicago, Illinois, USA, 1979: 498-507.
- 3 Pham T Q, Vliet L J. Separable bilateral filtering for fast video preprocessing [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo [C], Amsterdam, Netherlands, 2005: 454-457.
- 4 Lim Y C, Parker S R. FIR filter design over a discrete powers-of-two coefficient space [J]. IEEE Transactions on Acoustic Speech, Signal Processing, 1983, **31**(6): 583-591.
- 5 Lim Y C. Design of discrete-coefficient-value linear phase FIR filters with optimum normalized peak ripple magnitude [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1990, **37**(12): 1480-1486.
- 6 Li D, Lim Y C, Lian Y, *et al.* A polynomial-time algorithm for designing FIR filters with power-of-two coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, **50**(8): 1935-1941.
- 7 Yu J H, Lian Y. Frequency-response masking based filters with the even-length bandedge shaping filter [A]. In: Proceedings of the 2004 International Symposium on Circuits and Systems [C], Vancouver, British Columbia, Canada, 2004: 536-539.
- 8 Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing Second Edition (English Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- 9 Coleman T, Branch M A, Grace A. User's Guide of Optimization Toolbox [M]. Natick, MA, USA: The Math Works, 1999.
- 10 Immerkaer J. Fast noise variance estimation [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1996, **64**(2): 300-302.
- 11 Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, **11**(7): 674-693.
- 12 Wakin M. Standard test images [EB/OL]. <http://www.ece.rice.edu/~wakin/images/>, 2003-05-13/2007-07-03.
- 13 Dabov K, Peppers256.png [EB/OL]. <http://www.cs.tut.fi/~foi/GCF-BM3D/>, 2008-02-26/2007-07-03.