

随机值脉冲噪声滤波算法

董继扬¹ 张军英²

¹(厦门大学物理系, 厦门 361005)

²(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 西安 710071)

E-mail: jydong@xmu.edu.cn

摘要 文章详细分析了随机值脉冲噪声污染图像的局部灰度统计特征, 定义了一种噪声可信度的估计函数—灰度等级共现几率, 并在此基础上提出了共现几率极小的中值滤波算法。算法模拟生物视觉在注视过程中的变分辨率特性, 以不同分辨率对噪声进行多层次的定位及滤波。实验结果表明, 该文算法可以有效地滤除噪声, 并较好地保留图像的边缘细节信息, 其滤波效果比其它算法更接近理想的中值滤波, 尤其是对于噪声高度污染的情况。

关键词 随机值脉冲噪声 噪声可信度 灰度等级共现几率

文章编号 1002-8331-(2006)16-0015-04 文献标识码 A 中图分类号 TP391

A New Filter Algorithm for Random Valued Impulse Noise

Dong Jiyang^{1,2} Zhang Junying²

¹(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005)

²(National Key Lab for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract: The locally statistical characters of the random valued impulse noise image are studied in detail. And the gray-levels occurrence probability is defined to measure the noise reliability of the image pixels. Then a nonlinear algorithm called Minimum Occurrence Probability Median (MOPM) filter is presented to remove the random valued impulse noise from grayscale images. The presented algorithm performs noise detection and filtering at multiple resolutions based on the biological concept of foveal vision. Computer simulation results show that the presented algorithm outperforms the other filtering algorithms in the aspects of filtering ability, adaptability and details preserving ability, which is very close to the ideal median filter, especially for highly corrupted images.

Keywords: random valued impulse noise, noise reliability, gray-levels occurrence probability

1 引言

在数字图像的获取和传输过程中, 传感器瞬间失常或传输信道噪声都会对图像产生一定的噪声干扰^[1], 脉冲噪声 (impulse noise) 就是一种常见的噪声形式, 这种噪声使得图像的某些像素的灰度值发生跳变, 形成或亮或暗的干扰噪声。当干扰较强时, 将严重影响图像的质量, 并对图像的后续处理, 如数据压缩、边缘检测、图像分割等产生严重的影响。脉冲噪声的滤波是图像处理的一个重要的预处理环节。

中值滤波是滤除脉冲噪声的常用且有效的方法。传统的中值滤波算法简单且易于硬件实现, 因而得到了广泛的应用, 如, 标准中值滤波、加权中值滤波^[2]以及中心加权中值滤波^[3]等等。但这一类滤波算法对所有像素采用统一的处理方法, 因此, 在滤除噪声的同时也改变了非噪声像素的灰度值, 造成了图像模糊。显然, 理想的滤波算法应该只对噪声干扰像素进行处理, 而保留信号 (未污染的) 像素的灰度值不变。近年来发展起来的滤波算法大部分就是基于先定位、后滤波思想的滤波算法^[4-13]。这类算法往往先设计一个噪声可信度的计算方法, 根据噪声可信度对噪声像素进行检测定位, 最后再进行滤波。这类算法的滤波效果比传统的中值滤波有了很大的改善。不过, 目前大部分的脉冲噪声滤波算法均只考虑固定值脉冲噪声、或者噪声像素

的灰度值处于图像最大灰度值和最小灰度值附近的情况, 针对随机值脉冲噪声的滤波讨论较少, 因而对随机值脉冲噪声的滤波效果均不大理想^[8, 9, 11, 12]。由于实际图像中, 各种灰度值的噪声都有可能出现, 因此随机值脉冲噪声的滤波问题尤为重要。

本文针对噪声值均匀分布的脉冲噪声图像, 详细地分析了图像的局部灰度统计特征, 首先引入了灰度等级共现几率的概念, 分析了图像块内像素、噪声像素以及边缘像素的灰度共现几率的区别; 采用先定位、后滤波的思想, 提出了基于共现几率最小的中值滤波算法, 该算法可以有效地滤除随机值脉冲噪声, 并较好地保留图像的边缘细节信息。文中给出了本文算法与三种滤波算法的比较实验, 结果表明, 本文算法在去噪能力、自适应性以及保留细节等方面都明显比其它算法强, 尤其是对于噪声高度污染的图像, 其滤波效果很接近理想的中值滤波算法。

2 脉冲噪声模型

脉冲噪声是一种常见的加性噪声, 其特点是噪声污染像素的位置随机分布, 且噪声像素的灰度值与相邻的未干扰像素的灰度值无关。关于脉冲噪声, 目前还没有严格的数学定义。为了研究方便, 通常根据噪声像素的灰度值的分布规律, 将脉冲噪声分成两种类型进行建模^[11, 12]:

(1) 极端值脉冲噪声。其特点是受干扰的像素的灰度值随机地在两个固定灰度值 S_{min} 和 S_{max} ，或者它们的附近取值。其中， S_{min} 和 S_{max} 分别为图像灰度动态范围的极小值和极大值，例如，对于 256 级灰度图像， $S_{min}=0$ ， $S_{max}=255$ 。在很多文献中，常常把这种噪声称椒盐噪声。其数学模型可表示为：

$$S_{ij} = \begin{cases} [S_{min}, S_{min} + \delta] & \text{with probability } p/2 \\ [S_{max} - \delta, S_{max}] & \text{with probability } p/2 \\ S_{ij} & \text{with probability } 1-p \end{cases} \quad (1)$$

其中， S_{ij} 为噪声图像的灰度值， S_{ij} 为原始图像的灰度值， p 为图像的噪声密度， δ 为噪声范围。

(2) 随机值脉冲噪声。随机值脉冲噪声是一种更为一般化的脉冲噪声，即受干扰的像素的灰度值是按照一定的分布，随机、独立地在区间 $[S_{min}, S_{max}]$ 内取值。其数学模型可表示为：

$$S_{ij} = \begin{cases} n_{ij} & \text{with probability } p \\ S_{ij} & \text{with probability } 1-p \end{cases} \quad (2)$$

其中， $n_{ij} \in [S_{min}, S_{max}]$ ，它是按一定的分布，在 $[S_{min}, S_{max}]$ 中随机独立地取值。

在极端脉冲噪声污染图像中，噪声像素和它周围信号像素的灰度值相差较大且相关性差，而信号像素之间有很大的相关性，利用这些特点很容易设计定位准确性高的噪声可信度函数，容易取得较好的滤波效果^[8-13]。而在随机值脉冲噪声污染图像中，虽然噪声像素和它周围信号像素的灰度值相关性也不大，但噪声像素的特点不明显，噪声可信度函数设计困难，噪声定位准确率，因此很难取得好的滤波效果。

现有文献大多侧重对固定值脉冲噪声的讨论，且对固定值脉冲噪声和随机值脉冲噪声采用统一的滤波方法，滤波效果不理想^[8,9,11,12]。本文以自然的灰度图像为例，针对噪声灰度值 n_{ij} 均匀分布的情况进行讨论，并设计相应的滤波算法。

3 算法描述

3.1 灰度等级共现几率

灰度分辨率是数字图像的一个重要特征，通常用可分辨的灰度等级个数表示。例如，8 位的灰度图像可分辨 256 个灰度等级。人眼的灰度分辨率较低，一般只能分辨 32 个左右的等级。因此，在图像处理中，适当地降低灰度分辨率并不会影响图像的视觉效果。以待处理图像为基准，若用 $\gamma=2\delta$ 的灰度分辨率处理图像，则区间 $[x-\delta, x+\delta]$ 内的灰度与 x 不可分辨。或者说，在 γ 分辨率下，灰度 $[x-\delta, x+\delta]$ 和 x 属于同一灰度等级。

在某一局部区域内，若处于同一灰度等级的像素越多，则表示该区域的像素的相关性越大。为了描述某一像素与其周围像素之间的相关性，我们引入灰度等级共现几率这一概念：

在以像素 S_{ij} 为中心的局部区域中，与像素 S_{ij} 处于同一灰度等级 $([S_{ij} - \delta, S_{ij} + \delta])$ 的像素所占的比例，称为像素 S_{ij} 的灰度等级共现几率，记为 P_{ij} (δ 为等级宽度)。

用 $|W_p|$ 表示区域 W_p 内像素的总数， H_{ij} 表示在 W_p 区域内与像素 S_{ij} 的灰度值之差小于 δ 的像素集合，即：

$$H_{ij} = \{ S_{ki} | S_{ki} \in W_p, \text{ 且 } |S_{ki} - S_{ij}| \leq \delta \} \quad (3)$$

用 $|H_{ij}|$ 表示集合 H_{ij} 内像素的个数，则 S_{ij} 的灰度等级共现几率 P_{ij} 为：

$$P_{ij} = \frac{|H_{ij}|}{|W_p|} \quad (4)$$

像素 S_{ij} 的灰度等级共现几率 P_{ij} 越大，表明在 S_{ij} 周围的像素中，与像素 S_{ij} 处于同一灰度等级的像素数目就越多，也就是说， S_{ij} 与周围像素的相关性越大， S_{ij} 的噪声可信度越小，因此， P_{ij} 可以作为噪声可信度函数。下面给出一个例子说明和噪声可信度的关系：

由于噪声是 $[0, 255]$ 均匀分布的，即噪声处于 S_{ij} 这一灰度值上的可能性只有 $\frac{1}{256} \approx 0.39\%$ ，设灰度等级宽度 $\delta=20$ ，则噪声的灰度值落入 $[S_{ij} - \delta, S_{ij} + \delta]$ 范围内的几率只有 $\frac{40}{256} \approx 15.6\%$ 。

以噪声密度为 60% 的图像为例，则噪声的灰度值落入 $[S_{ij} - \delta, S_{ij} + \delta]$ 范围内的几率为 $15.6\% \times 60\% = 9.2\%$ 。因此，在 60% 的随机值脉冲噪声污染图像中，取灰度等级宽度 $\delta=20$ ，若像素 S_{ij} 的灰度等级共现几率 P_{ij} 接近或小于 9.2% 时，则可将 S_{ij} 判为噪声像素，若 P_{ij} 远大于 9.2% 时，可将 S_{ij} 判为信号像素。

对于光滑自然图像，当区域 W_p 足够大时，灰度等级共现几率 P 和相应灰度值 x 应有类似于图 1 所示的关系：

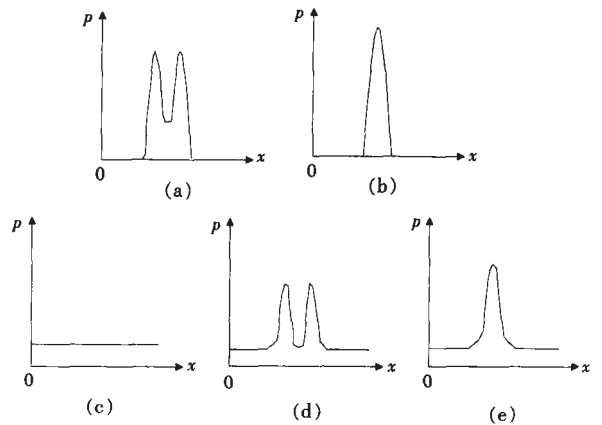


图 1 局部区域内的灰度等级分布示意图
(a) 无污染图像中，边缘区域内灰度分布示意图；(b) 无污染图像中，图像块内的灰度分布示意图；(c) 随机值脉冲噪声分布示意图；(d) 随机值脉冲噪声污染图像中，边缘区域的灰度分布示意图；(e) 随机值脉冲噪声污染图像中，图像块内的灰度分布示意图

图 1 局部区域内的灰度等级分布示意图

从图 1 可见，不管是在边缘区域还是在图像块内区域，大部分噪声像素的灰度等级共现几率都比信号像素的灰度等级共现几率小得多。本文就是利用这一性质设计的滤波算法。

3.2 算法流程

人类视觉系有一个很重要的特性，即在注视过程中其分辨率是根据注意机制改变的。例如，人在看一幅图像时，并不是第一眼就看清图像所有的细节，而是先用较低的分辨率把握图像的总体结构，然后再根据自己的兴趣用较高的分辨率注视图像的细节。这一特性可以减少视觉系统的信息处理量，提高处理速度。我们将人类视觉系统这一变分辨率的特性引入噪声定位过程中，先以较低的灰度分辨率 (γ) 及空间分辨率 (W_p) 对噪声进行粗定位，将相关性较小的噪声分离出来，然后再以较高分辨率对噪声进行细定位，逐步提高噪声定位的准确性。

算法分为噪声定位和噪声滤除两部分：

(1) 噪声定位阶段

步骤 1 初始化：设所有像素的噪声值 $N_{ij}=0$ (非噪声)，将

图像 S_{ij} 另存为 f_{ij} , 在噪声定位过程中只对图像 f_{ij} 操作, 选择合适的灰度分辨率(δ)及空间分辨率(窗口 W_p);

步骤 2 按式(3)和式(4)计算各象素的 P_{ij} 值;

步骤 3 计算各象素的噪声值, 即:

$$N_{ij} = \begin{cases} 1 & P_{ij} < 0.1 \\ N_{ij} & \text{otherwise} \end{cases}$$

步骤 4 选择适当的窗口 W_N , 计算窗口中心 f_{ij} 的信号象素集合 $X_{ij} = \{f_{ki} | P_{ki} > 0.4, f_{ki} \in W_N\}$ 及其中值 $M_{ij} = \text{GetMedian}(X_{ij})$, 让:

$$f'_{ij} = \begin{cases} M_{ij} & X_{ij} \neq \Phi \text{ and } N_{ij} = 1 \\ f_{ij} & \text{otherwise} \end{cases}$$

步骤 5 将 f'_{ij} 作为新图像, 改变灰度分辨率(γ)和空间分辨率(W_p)的大小, 进行多层次循环定位(步骤 2~步骤 4)。

(2) 噪声滤除阶段

步骤 1 选择适当的滤波窗口 W_F , 根据噪声定位结果(N_{ij}), 计算窗口内的信号点集合, 即 $X_{ij} = \{S_{ki} | N_{ki} = 0, S_{ki} \in W_F\}$ 及其中值, $M_{ij} = \text{GetMedian}(X_{ij})$, ij 为窗口中心;

步骤 2 灰度值和噪声值更新:

$$S_{ij} = \begin{cases} M_{ij} & X_{ij} \neq \Phi \text{ and } N_{ij} = 1 \\ S_{ij} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$N_{ij} = \begin{cases} 0 & S_{ij} = S_{ij} \\ N_{ij} & S_{ij} \neq S_{ij} \end{cases}$$

步骤 3 让 $S_{ij} = S_{ij}$, $N_{ij} = N_{ij}$, 重复滤波(步骤 1~步骤 2)一次。

称上述算法为共现几率极小中值滤波(Minimum Occurrence Probability Median Filter—MOPM)。

在算法的定位过程中改变 δ 和 W_p 的值, 相当于在不同的灰度分辨率(δ)和空间分辨率(W_p)分辨率下对图像噪声进行多层次的定位, 与人类视觉在注视过程中所具有变分辨率特性类似。

上述算法中, W_N 和 W_F 一般取较小的窗口(如 3×3 或 5×5), δ 和 W_p 的取值范围较广(如 δ [10, 30], W_p 为 3×3 到 11×11 之间)。

4 仿真实验及结果分析

为了检验 MOPM 算法的滤波效果, 我们同时实现了标准中值滤波算法(Stand)、MMEM 算法^[9]、PSM 算法^[9], 并设计了理想的中值滤波算法(Ideal), 与本文算法进行比较。这里所谓的理想中值滤波算法是指图像所有的噪声象素和信号象素的位置均为已知, 滤波过程中保持信号象素的灰度值不变, 并用噪声象素周围的信号象素灰度值的中值替代噪声象素的一种理想的滤波算法。我们在计算机上进行了大量的模拟实验, 实验结果表明 MOPM 算法的滤波效果在 PSNR 值、视觉效果等各方面指标均比其它算法更接近理想中值滤波算法。

例如, 在 256×256 的 Lena 灰度图像(见图 2)中加入 0~255 间均匀分布的, 噪声密度为 60% 的随机脉冲噪声(见图 3(a)), 然后用不同的滤波算法, 并进行滤波效果比较, 见图 3(b)~(f)。

用图像的 PSNR 值作为评价算法的滤波效果好坏的标准, 即:

$$\text{PSNR} = 10 \cdot \lg \left(\frac{255^2}{\text{MSE}} \right) \text{dB} \quad (5)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (S_{ij} - S'_{ij})^2$$



图 2 无噪声 lena 灰度图



图 3 不同滤波算法的结果比较

其中, m, n 分别为图像在水平方向和垂直方向上的象素的个数, 则图 3 各图与图 1 之间的 PSNR 值如表 1 所示。

表 1 各种滤波算法对图 3(a) 的滤波结果的 PSNR 值

滤波算法	噪声图像	标准中值	MMEM	PSM	MOPM	理想中值
PSNR 值/dB	10.82	14.02	17.10	12.45	20.88	23.61

此外, 我们还对不同噪声密度污染图像进行滤波比较, 以 Lena 图像为例, 各种滤波算法的 PSNR 值随噪声密度变化曲线如图 4 所示。

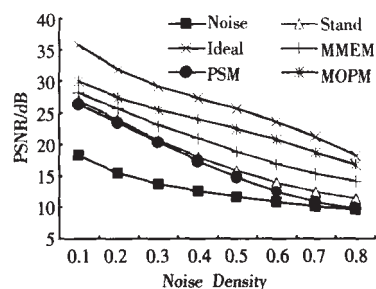


图 4 PSNR 值随噪声密度变化的曲线

从图 3、图 4 和表 1 可以看出, MOPM 算法的滤波效果无论是在主观的视觉效果上还是在客观的 PSNR 值上都明显地比标准中值滤波、MMEM 算法以及 PSM 算法的滤波效果好, 特别是在图像高度污染的情况下, 它都能够很好地保留图像的细节, 没有造成严重的图像模糊, 其滤波效果很接近理想的中值滤波算法。

5 结论

基于噪声定位的滤波算法是消除图像脉冲噪声主流算法。脉冲噪声干扰像素与图像信号像素之间的最大区别在于: 噪声像素与其周围像素的相关性较小, 而信号像素与其周围像素具有很强的相关性。由于随机值脉冲噪声的灰度值是均匀分布的, 因此可能很大一部分的噪声像素与它周围信号像素没有明显的差别, 这大大限制了噪声像素定位的准确性, 影响了滤波的效果。

本文针对随机值脉冲噪声的滤波问题, 提出了共现几率最小的中值滤波算法。算法用灰度等级共现几率作为噪声可信度的度量, 并通过改变分辨率的方法, 进行多层次的噪声定位, 提高了噪声定位的准确性, 从而在滤除噪声的同时, 较好地保留图像的边缘和细节信息。实验证明本文算法能胜任噪声高度污染图像的滤波任务, 其滤波效果接近理想的中值滤波算法。不仅如此, 算法对密度较小(小于 40%)的固定值脉冲噪声的情况同样能够取得很好的滤波效果。

由于本文假设的边缘为两个不同灰度等级的交界, 因此算法对于图像平滑区和直线边缘区的滤波效果较好, 而对于边缘较为复杂的区域滤波效果还不是很理想, 如 lena 图像的头发生区域, 眼睛区域等。下一步工作应考虑如何在算法中引入一些其它保持复杂边缘信息的措施。(收稿日期: 2006 年 3 月)

参考文献

1.Pitas I, Venetsanopoulos A N.Nonlinear Digital Filters: Principles and

Applications[M].Boston, MA: Kluwer, 1990

- 2.Brownring D.The Weighted Median Filter[J].Communications of the ACM, 1984; 27(8): 807-818
- 3.Ko S J,Lee S J.Center Weighted Median Filters and Their Applications to Image Enhancement[J].IEEE Trans, Circuits Syst, 1991; 38(9): 984-993
- 4.Sun T, Neuvo Y.Detail-preserving Median Based Filters in Image Processing[J].Pattern Recognit Lett, 1994; 15(4): 341-347
- 5.Florescio D, Schafer R.Decision-based Median Filter Using Local Signal Statistics[C].In: Proc SPIE Int Symp Visual Communications Image Processing, Chicago, 1994; 2308: 268-275
- 6.Eng How-Lung, Ma Kai-Kuang.Noise Adaptive Soft-switching Median Filter[J].IEEE Trans Image Processing, 2001; 10(2): 242-251
- 7.Abreu E, Lightstone M, Mitra S K et al.A New Efficient Approach for the Removal of Impulse Noise from Highly Corrupted Images[J]. IEEE Trans Image Processing, 1996; 5(6): 1012-1025
- 8.Wang Z, Zhang D.Progressive Switching Median Filter for the Removal of Impulse Noise from Highly Corrupted Images[J].IEEE Trans Circuits and systems—II: analog and digital signal processing, 1999; 46(1): 78-80
- 9.Han W, Lin J.Minimum-maximum Exclusive Mean (MMEM) Filter to Remove Impulse Noise from Highly Corrupted Images[J].Electronics Lett, 1997; 33(2): 124-125
- 10.董继扬, 张军英.严重椒盐噪声污染图像的非线性滤波算法[J].光子.激光, 2003; 14(12): 1336-1339
- 11.Piotr S Windyga.Fast Impulse Noise Removal[J].IEEE Trans Image Processing, 2001; 10(1): 173-179
- 12.Zhang D, Wang Z.Impulse Noise Detection and Removal Using Fuzzy Techniques[J].Electronics Lett, 1997; 33(5): 378-379
- 13.张军英, 卢志军, 石林等.基于脉冲耦合神经网络的椒盐噪声图像滤波[J].中国科学(E 辑), 2004; 34(8): 882-894

(上接 5 页)

有一定的指导意义。当然, 研究如何构造性能较好的认证系统也是十分重要的课题。(收稿日期: 2006 年 3 月)

参考文献

- 1.Toneli H Wang, Chih-Hung Wang.Arbitrated authentication schemes with multi-sender [C].In: Advances in Crypto-Crpto '97, Springer-Verlag, 1997: 266-272
- 2.K Kurosawa.New bound on authentication code with arbitration[C].In: Proceeding of CRYPTO 94, LNCS, Springer-Verlag, 1994; 839: 140-149
- 3.Y Desmedt.Society and group oriented cryptograph: a new concept[C].

In: Advances in cryptology - Crpto '87, LNCS, Springer - Verlag, 1987; 576: 457-469

- 4.D R Stinson.Universal hashing and authentication codes[J].Designs, Codes and Cryptograph, 1994; 4: 369-380
- 5.Pete Gemell, Moni Naor.Codes for interactive authentication[C].In: Advances in Cryptology-Crypto 93, LNCS, Springer-Verlag, 1994; 773: 355-367
- 6.马文平, 王新梅.具有仲裁人的认证码组合特征[J].通信学报, 2000; 21(7): 9-13
- 7.王永传, 杨义先.有仲裁人认证码的信息论下界[J].电子学报, 1999; 27(4): 90-93

(上接 11 页)

算法的高效的混合智能算法。该方法充分考虑了序列二次规划法和遗传算法的优点, 使之融为一体, 提高了算法的全局收敛性以及收敛速度。数值结果表明该算法对求解全局最优问题迅速有效。(收稿日期: 2006 年 4 月)

参考文献

- 1.陈开周.最优化计算方法[M].西安: 西安电子科技大学出版社, 1990
- 2.袁亚湘, 孙文瑜.最优化理论与方法[M].北京: 科学出版社, 2003

- 3.王凌.智能优化算法及其应用[M].北京: 清华大学出版社, 2003
- 4.王登刚, 刘迎曦, 李守巨.最优化问题全局寻优的混合遗传算法[J].力学学报, 2002; 34(3): 469-474
- 5.Xin Yao, Yong Liu, Guangming Lin.Evolutionary programming made faster[J].IEEE Trans Evol Comput, 1999; 3(2): 82-102
- 6.Hong Li, Yong-Chang Jiao, Yuping Wang.Integrating the simplified quadratic interpolation into the genetic algorithm for solving constrained optimization problems[C].In: International Conference on CIS2005, Xi'an, 2005: 247-254