

文章编号:1001-9081(2010)10-2815-04

基于加权检测的脉冲噪声新滤波器

王双双,王士同,李柯材

(江南大学 信息工程学院,江苏 无锡 214122)

(jnuwss@126.com)

摘要:在分析噪声检测与噪声滤波原理的基础上,提出了用于恢复被脉冲噪声污染的图像的去噪算法。该算法基于方向差异性将检测窗口分解为四个子窗口,并取子窗口的中间像素与相邻像素的灰度值之差的加权平均值与预先定义的阈值进行比较,较准确地地区分噪声点和信号点;然后根据方向相关性,采用一种边缘保持滤波方法来重构被噪声污染像素的灰度值。实验结果证明,该算法在提高图像信噪比的同时,可以更好地保持图像的细节信息。

关键词:脉冲噪声;加权检测;图像去噪;滤波器

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

New impulse noise filter based on weighted detection

WANG Shuang-shuang, WANG Shi-tong, LI Ke-cai

(School of Information Technology, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: Based on the analysis of the principles of noise detection and noise filtering, an effective image denoising algorithm was proposed to restore images corrupted by impulse noise. The proposed algorithm utilized the directional difference to decompose the window into four subwindows, and then accurately distinguished noise points from signal points by comparing the absolute weighted mean value of the differences between the center pixel and its neighboring pixels in four subwindows with a predefined threshold. According to the directional correlation-dependence, the proposed algorithm adopted an edge-preservation filtering method to reconstruct the value of the corrupted pixel. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm can obtain higher Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) value and preserve more detailed information.

Key words: impulse noise; weighted detection; image denoising; filter

0 引言

在图像的获取和传输过程中,会不可避免地引入各种噪声,严重影响图像的后期处理工作如边缘检测、图像分割及计算机视觉的效果。去除图像噪声,增加图像的峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)是很多图像处理问题必须进行的重要步骤。椒盐噪声指图像上的黑点或白点,它对图像分割、边缘检测、特征提取等后续处理有严重的破坏作用,其特征是噪声点像素值与其邻域的其他像素值具有明显的不同。中值滤波由于其抑制脉冲噪声的有效性能而得到广泛研究,作为椒盐噪声处理的传统方法,在很多情形下中值滤波方法会模糊图像中物体的边界,丢失许多所需要的原图像的细节信息。为了解决这一问题,许多学者提出了改进的中值滤波算法^[1-5]。文献[2]提出加权中值滤波算法,通过赋予滤波窗口中心像素不同的权值保护细节,但其去噪能力随中心像素权值的增加而下降;文献[3]提出迭代开关滤波算法,先进行噪声定位再滤波,能提高保护图像细节的能力,但对于椒盐噪声污染严重的图像滤波效果较差;文献[4]提出基于模糊规则的中值滤波器;文献[5]提出基于决策的中值滤波器。这些滤波器在一定程度上改善了滤波结果,但仍存在诸多问题,缺乏自适应性。

本文提出了一种基于加权检测的脉冲噪声滤波器,该滤波器通过一种自适应的检测方法,来判断处理像素是否存在噪声,能较准确地区分出信号点和噪声点,并只对那些存在噪

声的像素进行滤波。该算法根据方向差异性将检测窗口分解为四个子窗口,通过计算四个子窗口的中间像素与相邻像素灰度值之差的加权平均值,并取这四个加权平均值中绝对值的最小值与预先定义的阈值进行比较,能准确地检测出脉冲噪声点。然后,利用基于方向相关依赖的边缘滤波方法,重构被噪声污染像素的灰度值。数值仿真结果表明,该方法具有较好的去噪效果,获得了较好的视觉效果。

1 有效去除脉冲噪声的算法原理

本文算法分为噪声检测与噪声滤波两个步骤。首先通过基于方向差异性的噪声检测方法,对含有脉冲噪声的所有像素点进行检测,将其较准确地分为信号点和噪声点;然后对检测出的噪声点进行边缘保持滤波。

1.1 加权噪声检测

对含有椒盐噪声图像进行研究,通常都假定噪声污染前的图像是以边缘为界、局部平滑变化、自然的灰度图像,而且椒盐噪声具有这样的特性:1)图像中只有部分像素受到污染,而其他像素灰度值保持不变;2)噪声像素的灰度值要么远大于周围邻域像素的灰度值,要么远小于周围邻域像素的灰度值^[6-7]。

设 $f_{i,j}$ 表示在窗口 (i,j) 处像素点的灰度值,检测窗口 W_{ij} 以 (i,j) 为中心,大小为 $L_d \times L_d$, $W_{ij} = \{(i+s, j+t), -(L_d-1)/2 \leq s, t \leq (L_d-1)/2\}$, W_{ij} 中的所有像素按照灰度值递增的次序进行排列。根据椒盐脉冲噪声的特征,噪声点

收稿日期:2010-03-12;修回日期:2010-05-15。

作者简介:王双双(1984-),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要研究方向:人工智能、模式识别;王士同(1964-),男,江苏无锡人,教授,博士生导师,主要研究方向:人工智能、模式识别;李柯材(1983-),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向:图形图像处理。

一般位于这个递增序列的两端^[8]。设 F_k 为递增序列中第 K 个数据项,则窗口 W_{ij} 中可能是噪声点的像素为:

$$S_{ij} = \{(i+s, j+t) | (i+s, j+t) \in w_{ij} \wedge (f_{i+s, j+t} \leq F_r \vee f_{i+s, j+t} \geq F_{z-r+1})\} \quad (1)$$

且 $z = L_d \times L_d$, 根据脉冲噪声的类型, r 是一个可选的整数, $1 \leq r \leq (z+1)/2$, \wedge 和 \vee 分别表示“与”和“或”^[9]。

噪声在数字图像中是随机分布的,但是图像像素沿着边缘方向有相近的灰度值。利用图像边缘这一特征可以将图像边缘处的噪声点和信号点较好地地区分出来。取 $L_d = 3$, 操作窗口 W_{ij} 被分解成如图1所示的4个子窗口。理论上应该是考虑 $L_d \geq 5$, 这样会有更多的方向,但实验仿真结果表明,加入更多的方向,在增加计算效率复杂度的情况下,噪声检测准确度的提高有限。因此本文只考虑 $L_d = 3$, 将操作窗口 W_{ij} 分解成4个 3×3 的检测窗口。含有噪声点的4个方向子窗口分别定义如下:

$$W_{ij}^1 = \{(i, j+s), (i, j+s) \in w_{ij} \wedge (i, j+s) \notin S_{ij}\} \quad (2)$$

$$W_{ij}^2 = \{(i+s, j-s), (i+s, j-s) \in w_{ij} \wedge (i+s, j-s) \notin S_{ij}\} \quad (3)$$

$$W_{ij}^3 = \{(i+s, j), (i+s, j) \in w_{ij} \wedge (i+s, j) \notin S_{ij}\} \quad (4)$$

$$W_{ij}^4 = \{(i+s, j+s), (i+s, j+s) \in w_{ij} \wedge (i+s, j+s) \notin S_{ij}\} \quad (5)$$

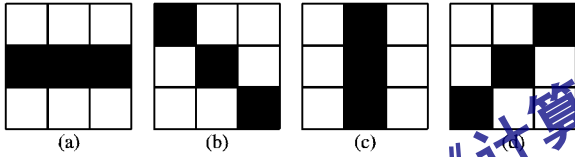


图1 分解为4个 3×3 的检测窗口

在任何一个 W_{ij}^k 子窗口里,每个子窗口中间像素的灰度值与其相邻像素的灰度值之差的加权平均值的绝对值表示如下:

$$\bar{d}_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{\sum_{(i+s, j+t) \in w_{ij}^k} \omega_{i+s, j+t} d_{i+s, j+t}}{\sum_{(i+s, j+t) \in w_{ij}^k} \omega_{i+s, j+t}}, & w_{ij}^k \neq \emptyset \\ F_{z-r+1} - F_r, & w_{ij}^k = \emptyset \end{cases} \quad (6)$$

其中: \emptyset 表示空集; $d_{i+s, j+t}$ 表示 $f_{i,j}$ 和 $f_{i+s, j+t}$ 之差,即中间像素灰度值与相邻像素灰度值之差; $\omega_{i+s, j+t}$ 表示 $d_{i+s, j+t}$ 的权重,权重 $\omega_{i+s, j+t}$ 主要用于去减小加权平均值的误差。根据多次仿真结果,把 $\omega_{i+s, j+t}$ 表示如下:

$$\omega_{i+s, j+t} = 1/(1 + |d_{i+s, j+t}|^2) \quad (7)$$

设 $D_{i,j} = \min\{\bar{d}_{i,j}^k, 1 \leq k \leq 4\}$ 为4个加权平均值的绝对值中的最小值。如果中间像素被噪声污染, $D_{i,j}$ 的值将会很大;在4个检测的子窗口中, $f_{i,j}$ 和 $f_{i+s, j+t}$ 之差,即中间像素灰度值与相邻像素灰度值之差会很大,同样地,4个平均值也会很大。在光滑区域里,当中间像素没有被噪声污染时,任何一个子窗口 W_{ij}^k 中的像素有相近的灰度值,所以 $\bar{d}_{i,j}^k$ 的值会很小,这时 $D_{i,j}$ 的值也会很小。同样的道理,如果中间像素点是一个无噪声点的边缘像素点, $D_{i,j}$ 也会很小,因为边缘处要确保4个平均值中有一个值很小。

从上面的分析可以看出, $D_{i,j}$ 可以作为检测噪声的一种方法。用 $D_{i,j}$ 与预先定义的阈值 T 进行比较,如果 $D_{i,j} \geq T$,则在 (i, j) 处的像素点被噪声污染,用二进制数 $b_{i,j} = 1$ 标识;如果 $D_{i,j} < T$,则 (i, j) 处的像素点没有被噪声污染,用 $b_{i,j} = 0$ 标识。在某种程度上阈值 T 的大小影响着本文检测方法的性

能。通过对灰度级图像的广泛仿真,结果表明在 $0 < T < 10$ 时可以获得良好的检测结果。即:

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & f_{i,j} \text{ 为信号点}, D_{i,j} \geq T \\ 1, & f_{i,j} \text{ 为噪声点}, D_{i,j} < T \end{cases} \quad (8)$$

1.2 噪声滤波

本文提出的边缘保持的脉冲噪声去噪算法,采用的是方向相关依赖的滤波方法,该方法是基于观测六个不同方向的样本相关系数^[10]。对于每一个噪声点,本文的滤波算法先检测在六个方向上的边缘,然后重构这个被噪声所污染像素的灰度值。选择 $W_{i,j}$ 为滤波操作窗口,大小为 3×3 。窗口 $W_{i,j}$ 中所有像素表示如下: $f_{i-1, j-1}, f_{i-1, j}, f_{i-1, j+1}, f_{i, j-1}, f_{i, j}, f_{i, j+1}, f_{i+1, j-1}, f_{i+1, j}, f_{i+1, j+1}$ 。设 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$ 分别表示像素 $f_{i-1, j-1}, f_{i-1, j}, f_{i-1, j+1}, f_{i, j-1}, f_{i, j}, f_{i, j+1}, f_{i+1, j-1}, f_{i+1, j}$ 的灰度值。这些像素都是以窗口中心像素 $f_{i,j}$ 为中心,如图2所示。在滤波窗口 $W_{i,j}$ 中,中心像素 $f_{i,j}$ 的周围,找出六个方向差异,这些方向差异表示如下:

$$\begin{cases} E_1 = |x_4 - x_8| + |x_1 - x_5| \\ E_2 = |x_1 - x_7| + |x_2 - x_8| \\ E_3 = 2 \times |x_2 - x_7| \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} E_4 = |x_2 - x_6| + |x_3 - x_7| \\ E_5 = |x_3 - x_4| + |x_5 - x_6| \\ E_6 = 2 \times |x_3 - x_5| \end{cases} \quad (10)$$

	$j-1$	j	$j+1$
$i-1$	x_1	x_2	x_3
i	x_4	x_5	x_6
$i+1$	x_7	x_8	x_9

图2 本文滤波窗口 $W_{i,j}$

检查窗口 $W_{i,j}$ 中的四个像素 x_5, x_6, x_7, x_8 分别对应的 $b_{i, j+1}, b_{i+1, j-1}, b_{i+1, j}$ 和 $b_{i+1, j+1}$ 是否为1,如果为1,则对应的像素被椒盐噪声所污染。此时,不需要考虑包含它的方向差异,把含有它的 E_i 值置为512。判断 E_1, E_2, E_4 和 E_5 是否分别等于512。如果 E_1 和 E_2 中至少有一个值为512且像素 $f_{i+1, j+1}$ 未被椒盐噪声所污染,则考虑增加一个方向差异 E_7 来改善图像的质量。进而,如果 E_4 和 E_5 中至少有一个值为512且像素 $f_{i+1, j-1}$ 点为信号点,则考虑增加另一个方向差异 E_8 。其中 E_7 和 E_8 定义如下:

$$\begin{cases} E_7 = 2 \times |x_1 - x_8| \\ E_8 = 2 \times |x_3 - x_6| \end{cases} \quad (11)$$

在这些方向差异中,找出最小值 E_{\min} 。这个最小的方向差异有最强的相关性,在这个方向上,可能有一个边缘。因此,这个被噪声污染像素 $f_{i,j}$ 的灰度值 $x_{i,j}$ 被重构为:

$$x_{i,j} = \begin{cases} \frac{(x_1 + x_4 + x_5 + x_8)}{4}, & E_{\min} = E_1 \\ \frac{(x_1 + x_2 + x_7 + x_8)}{4}, & E_{\min} = E_2 \end{cases} \quad (12)$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} \frac{(x_2 + x_7)}{2}, & E_{\min} = E_3 \\ \frac{(x_2 + x_3 + x_6 + x_7)}{4}, & E_{\min} = E_4 \end{cases} \quad (13)$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} \frac{(x_3 + x_4 + x_5 + x_6)}{4}, & E_{\min} = E_5 \\ \frac{(x_4 + x_5)}{2}, & E_{\min} = E_6 \end{cases} \quad (14)$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} \frac{(x_1 + x_8)}{2}, & E_{\min} = E_7 \\ \frac{(x_3 + x_6)}{2}, & E_{\min} = E_8 \end{cases} \quad (15)$$

其中 $x_{i,j}$ 表示滤波后像素 $f_{i,j}$ 的灰度值。如果 E_{\min} 的值为 512, 则像素 $f_{i,j+1}$, $f_{i+1,j-1}$, $f_{i+1,j}$ 和 $f_{i+1,j+1}$ 都被椒盐噪声所污染。在这种情况下, 不考虑边缘。此时, 被噪声污染像素 $f_{i,j}$ 的灰度值 $x_{i,j}$ 是由两个之前已经被处理或未被噪声污染像素 $f_{i-1,j+1}$ 和 $f_{i,j-1}$ 的灰度值的平均值来重构。即:

$$x_{i,j} = (x_3 + x_4)/2 \quad (16)$$

2 本文算法实现

本文算法由噪声检测和噪声滤波两个部分组成。它采用一种基于方向差异性的加权检测方法, 对那些可能为噪声点的像素进行判断, 准确地鉴定其是否为噪声点, 然后在保留信号点的同时, 只对噪声点进行边缘滤波处理。该算法可以很好地滤除受脉冲噪声不同程度污染的图像, 能有效地保持图像边缘, 自适应能力强, 且计算简便。该算法的具体步骤如下。

1) 一个 3×3 的操作窗口 W_y 在图像上滑动, 每次一个像素, 窗口从图像的左上角开始, 移动到右下角, 遍历完图像的所有像素点。

2) W_y 中的所有像素按照灰度值递增的次序进行排列, 然后把 W_y 分解成 4 个子窗口 $W_y^k (1 \leq k \leq 4)$; 并根据式(1) 计算检测窗口 W_y 中可能是噪声点的像素点, 本文取 $r = 1$ 。

3) 根据式(6) 和式(7) 分别计算每个子窗口 W_y^k 中间像素的灰度值与其相邻像素的灰度值之差的加权平均值的绝对值 \bar{a}_{ij}^k ; 取 $\bar{a}_{ij}^1, \bar{a}_{ij}^2, \bar{a}_{ij}^3$ 和 \bar{a}_{ij}^4 中最小的一个值为 $D_{i,j}$ 。

4) 预先定义一个阈值 $T (0 < T < 10)$, 如果 $D_{i,j} \geq T$, 则 $f_{i,j}$ 为信号点, 用 $b_{i,j} = 0$ 标识; 当 $D_{i,j} < T$, 则 $f_{i,j}$ 为噪声点, 用 $b_{i,j} = 1$ 标识。

5) 经过检测, 若 $f_{i,j}$ 为信号点, 则对其给予保留, 输出原值; 若 $f_{i,j}$ 为噪声点, 则对其进行滤波处理, 重构其灰度值。

6) 在滤波窗口 $W_{i,j}$ 中, 中心像素 $f_{i,j}$ 的周围, 由式(9)、式(10) 求出六个方向差异的值。判断像素 $f_{i,j+1}$, $f_{i+1,j-1}$, $f_{i+1,j}$ 和 $f_{i+1,j+1}$ 分别对应的 b 是否为 1, 若是, 则其对应的像素被噪声所污染, 把含有该像素的 E_i 值置为 512。

7) 如果 E_1 和 E_2 中至少有一个值为 512 且像素 $f_{i+1,j+1}$ 未受噪声所污染, 则由式(11) 增加一个方向差异 E_7 ; 同理, 也增添一个方向差异 E_8 。

8) 依据最小的方向差异有最强的相关性, 由式(12) ~ (15) 来重构被噪声污染像素 $f_{i,j}$ 的灰度值 $x_{i,j}$; 如果 E_{\min} 的值为 512, 则由式(16) 来重构 $x_{i,j}$ 。

9) 依此类推, 其他像素按照上述步骤 2) ~ 8) 进行处理, 得到滤波后的灰度值。重构图像, 得到去除脉冲噪声后的图像。

3 实验结果与分析

为验证本文算法效果, 选择 Boats、Peppers、Girl 三幅典型的标准测试图像对本文算法进行了仿真实验, 三幅图像均为 8 位整型, 大小为 512×512 像素, 灰度为 256 级。实验中, 人工选取脉冲噪声密度为 0.2、0.3、0.5、0.7、0.8, 以检测本文滤波方法对不同密度噪声的滤波性能。以峰值信噪比 $PSNR$ 作为去噪效果检测指标, $PSNR$ 值越大表示滤波效果越好。用标准中值滤波 (Standard Median Filter, SMF) 算法、文献[11] 提出的有效去除图像中脉冲噪声的细节保持算法 (Efficient

Detail-Preserving Approach, EDPA)、文献[12] 提出的去除椒盐脉冲噪声的基于区间类型 2 模糊系统 (Interval Type2 Fuzzy Logic System, FLS) 滤波方法、文献[13] 提出的基于噪声检测的有效去除图像中脉冲噪声的新型滤波算法 (New Effective Filtering Algorithm, EMF) 与本文提出的算法 (New Impulse Noise Filter, EIF) 进行比较。

本文实验为 Boats、Peppers、Girl 三幅原图像分别添加噪声密度分别为 0.2、0.3、0.5、0.7 和 0.8 的椒盐噪声, 并选用 $PSNR$ 值作为评价标准来比较这五种算法的滤波性能。实验结果数据如表 1 所示。

表 1 不同噪声密度下五种滤波算法的 $PSNR$ 比较 dB

图像	噪声密度	$PSNR$				
		SMF 算法	EDPA	FLS 算法	EMF 算法	EIF 算法
Boats	0.2	27.41	32.18	33.39	34.04	34.91
	0.3	22.83	30.02	32.09	31.99	32.71
	0.5	15.24	24.68	27.67	28.50	29.54
	0.7	10.05	17.65	19.17	24.74	26.54
	0.8	8.22	13.97	14.53	22.38	24.41
Peppers	0.2	29.33	35.16	36.77	35.90	36.78
	0.3	23.92	32.21	34.83	33.85	34.84
	0.5	15.24	25.17	29.54	30.36	31.51
	0.7	9.89	17.55	19.38	26.03	28.48
	0.8	8.00	13.98	14.43	23.15	25.91
Girl	0.2	30.21	36.53	34.03	35.04	37.19
	0.3	25.88	33.47	31.47	34.15	35.11
	0.5	15.04	25.72	26.09	31.21	32.43
	0.7	9.61	17.88	18.05	27.62	29.48
	0.8	7.67	13.86	13.69	24.85	27.28

由表 1 中的实验数据可知, 本文算法和另外四种去噪算法相比, $PSNR$ 值都得到了提高。以 Girl 图为例分析实验数据, 在噪声密度为 0.5 时, 由本文算法得到的 $PSNR$ 值, 相比较于 SMF 算法提高了约 17 dB, 比 EDPA 提高了约 7 dB, 比 FLS 算法高出约 6 dB 左右, 比 EMF 算法高出约 2 dB 左右。另外, 随着噪声密度的提高, 本文算法的 $PSNR$ 值明显高于其他四种算法。

图 3 给出本文方法与其他四种图像去噪方法在噪声密度为 0.5 时的视觉效果对比。由于完整图像的去噪细节很难分辨, 故截取局部图像进行比较。由图易知, SMF 算法的去噪效果比较差, 去噪后图像呈现出大量的斑块; EDPA 对图像的边缘细节不能有效地保持, 并且去噪后图像同样呈现了零碎的斑块; FLS 算法在图像的边缘方面保持相对较好, 但去噪后图像还是呈现了少许小的斑块; 当噪声密度较大时, EMF 算法虽然使图像的噪声得到了有效抑制, 图像的轮廓也比较清晰, 但放大观察后仍可发现图像的细节部分保持效果不佳, 图像在边缘处产生了模糊失真, 存在小斑点。从图中可以看出, 本文算法在有效滤除噪声点的同时, 对图像的边缘和纹理部分的信息保持最好, 图像的视觉效果有显著地提高。

4 结语

针对受不同程度椒盐噪声污染的灰度图像去噪问题, 本文提出了一种有效去除脉冲噪声的图像滤波器。该滤波器有以下特点: 1) 考虑相邻像素的相关性, 采用基于方向差异性的噪声检测方法, 使误检率降小, 改善了滤波效果; 2) 利用检测窗口中心像素周围的六个方向差异, 找出相邻相关性较强的像素, 来重构被噪声污染像素的灰度值; 3) 计算结构简便,

易于实现。实验结果证明,本文算法提高了去噪图像的PSNR值,对于噪声强度具有很强的适应性,且较好地保持了图像的边缘与纹理的细节信息,可以适用于处理受不同程度椒盐脉冲噪声污染的灰度级图像。

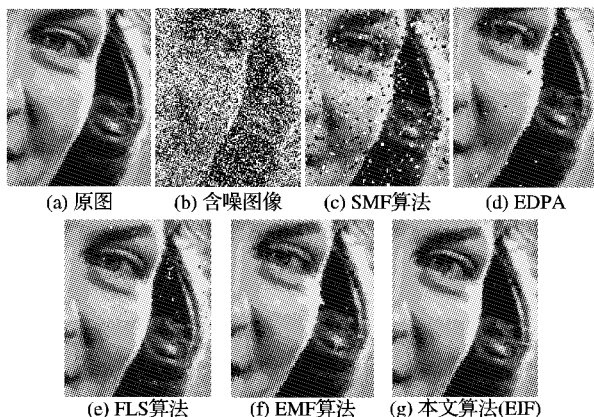


图3 噪声密度为0.5时的滤波效果比较

参考文献:

- [1] BAR L, KIRYATI N, SOCHEN N. Image deblurring in the presence of impulsive noise [J]. International Journal of Computer Vision, 2006, 70(3): 279–298.
- [2] KO S J, LEE Y H. Center weighted median filters and their applications to image enhancement [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991, 38(9): 984–993.
- [3] WANG Z, ZHANG D. Progressive switching median filter for the removal of impulse noise from highly corrupted images [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, II: Analog and Digital Signal Processing, 1999, 46(1): 78–80.
- [4] ARAKAWA K. Median filters based on fuzzy rules and its applica-

tion to image restoration [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 77(1): 3–13.

- [5] CHEN T, MA K K, CHEN L H. Tri-state median filter for image denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(12): 1834–1838.
- [6] SRINIVASAN K S, EBENEZER D. A new fast and efficient decision-based algorithm for removal of high-density impulse noises [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(3): 189–192.
- [7] LUO WENBIN. Efficient removal of impulse noise from digital images [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2006, 52(2): 523–527.
- [8] ZHANG XUMING, XIONG YOULUN. Impulse noise removal using directional difference based noise detector and adaptive weighted mean filter [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(4): 295–298.
- [9] AIZENBERG I, BUTAKOFF C. Effective impulse detector based on rank-order criteria [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(3): 363–366.
- [10] CHEN PEI-YIN, LIEN CHIH-YUAN. An efficient edge-preserving algorithm for removal of salt-and-pepper noise [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2008, 15(2): 833–836.
- [11] LUO WENBIN. An efficient detail-preserving approach for removing impulse noise in images [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2006, 13(7): 413–416.
- [12] 李岳阳, 王士同, 胡德文. 基于区间类型2模糊系统的高斯噪声检测滤波器[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(9): 1507–1513.
- [13] 曲延峰, 徐建, 李卫军, 等. 有效去除图像中脉冲噪声的新型滤波算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(4): 397–401.
- [14] 满利红, 王士同. 彩色图像脉冲噪声的模糊检测和滤波[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(3): 1198–1201.

(上接第2780页)

处理领域有乐观的应用前景。

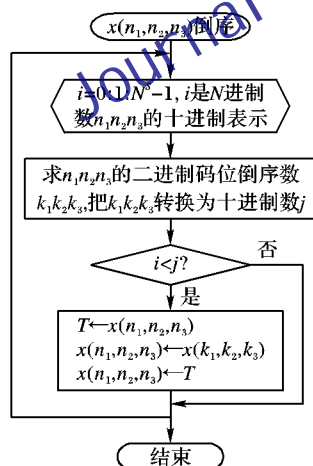


图6 $x(n_1, n_2, n_3)$ 倒序

参考文献:

- [1] COOLEY J W, TUKEY J W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series [J]. Mathematics of Computation, 1965, 19(4): 297–301.
- [2] OPPENHEIM A V, SCHAFER R W, BUCK J R. Discrete-time signal processing [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 629–677.
- [3] DUHAMEL P, VETTERLI M. Fast Fourier transforms: A tutorial review and a state of the art [J]. Signal Processing, 1990, 19(4): 259–299.

- [4] HARRIS D B, MCCLELLAN J H, CHAN D S K, et al. Vector radix fast Fourier transform [C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Washington, DC: IEEE, 1977, 548–551.
- [5] HONG P P. Fast two-dimensional Fourier transform [C]// Proceedings of the Third Hawaii International Conference on System Science. Honolulu, Hawaii, USA: [s. n.], 1970, 990–993.
- [6] MOU Z J, DUHAMEL P. In-place butterfly-style FFT of 2-D real sequences [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1988, 36(10): 1642–1650.
- [7] WU H R, PAOLOAI F J. On the two-dimensional vector split-radix FFT algorithm [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1989, 37(8): 1302–1304.
- [8] WU H R, PAOLONI F J. The structure of vector radix fast Fourier transform [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1989, 37(9): 1415–1424.
- [9] JOHNSON S G, FRIGO M. A modified split-radix FFT with fewer arithmetic operations [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(1): 111–119.
- [10] 徐妮妮, 吴云峰, 肖志涛. 频域抽取二维向量基快速傅里叶变换[J]. 天津工业大学学报, 2008, 27(6): 47–50.
- [11] CHEN ZHAODOU, ZHANG LJING. Vector coding algorithms for multidimensional discrete Fourier transform [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2008, 212(1): 63–74.
- [12] 吴云峰, 徐妮妮, 肖志涛, 等. 三维向量基快速傅里叶算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(2): 618–621.