

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.04.007

基于模糊转换的图像椒盐噪声检测和去除

王 义 王江云 宋 晓 韩 亮
(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

摘 要:为了去除椒盐噪声,提高图像的质量,提出了一种基于模糊转换的加权均值方法来有效的对图像中的噪声进行抑制,主要包含两个阶段:噪声检测和噪声去除。在噪声检测阶段,首先将不含噪声的像素点与可能为噪声的像素点(像素取最大值或最小值)区分开来,对于后者,提出了一种相邻处理过点的绝对差分和方法对其是否为噪声进行进一步判别,并引入两个预定的阈值,将可能为噪声的像素点划分为 3 类:无噪声点、轻度噪声点和重度噪声点;在噪声去除阶段,一种 D_8 距离相关的模糊转换加权均值滤波方法被提出对噪声进行有效的去除。仿真结果表明,与一些现存方法相比,提出的方法较好的去除了椒盐噪声,并且在去除噪声的同时较好的保持了图像的细节信息,无论是峰值信噪比(PSNR)还是结构相似度(SSIM)都有了较大的提高。和实验效果与其最接近的自适应加权均值滤波相比,提出方法节省了超过 65% 的运行时间。

关键词: 椒盐噪声;模糊转换; D_8 距离;峰值信噪比;结构相似度

中图分类号: TP319.9;TN27 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Image salt-and-pepper noise detection and removal based on fuzzy switching

Wang Yi Wang Jiangyun Song Xiao Han Liang
(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to remove salt-and-pepper noise, a novel fuzzy switching adaptive weighted mean filter is proposed to eliminate the noise effectively. The method includes two stages: noise detection and noise elimination. In the first stage, first pixels are differentiated into two kinds: noiseless pixels and possible noise pixels. For the second kind pixels, we use the method of the sum of absolute luminance difference with processed pixels next to it and introduce two thresholds to divide them into three categories, noiseless pixels, lightly corrupted pixels and heavily corrupted pixels. In the second stage, a D_8 distance relevant fuzzy switching adaptive weighted mean filter is proposed to remove salt-and-pepper noise. The simulation results show that compared with some existing methods, our method can effectively eliminate salt-and-pepper noise, the results contain more details, and have higher values of two typical image quality metrics: peak signal-to-noise ratio (PSNR) and structural similarity (SSIM). Our method saves over 65% processing time compared with the adaptive weighted mean filter, which has the most similar results.

Keywords: salt-and-pepper noise; fuzzy switching; D_8 distance; peak signal-to-noise ratio; structural similarity

1 引 言

图像在获取过程中由于环境的变化,传感器自身的噪声以及传输过程中的干扰,往往含有大量的噪声^[1-4]。图像去噪是图像处理领域最重要研究内容之一,也是很

多图像处理任务的前提,例如图像配准^[5-6],超分辨率重建^[7]、图像识别等^[8]。椒盐噪声是图像中常见的一类脉冲噪声,其去除问题已引起很多图像处理领域学者的关注,并且取得了很多成果^[9-10]。中值滤波和自适应中值滤波是去除椒盐噪声的重要方法,由于实现容易,计算简便得到了广泛的使用。中值滤波不对噪声点和非噪声点

进行区分,图像像素点都由其邻域中值像素点来替代,这导致处理后图像过度平滑,引起了图像细节的丢失。自适应中值滤波是中值滤波的一种改进,它对图像中像素点是否为噪声进行判断,而只对噪声点进行处理,非噪声点保持不变。Chen 等人^[11]提出了一种保持边界滤波对椒盐噪声进行去除。近年来模糊转换的方法引起了人们的关注,并且被用来去除椒盐噪声^[12-13]。Garnett 等人^[14]提出了一种绝对差分排序方法对噪声进行检测,并实现了混合噪声的去除。Toh 等人^[15]提出了一种最大绝对差分方法对噪声点进行检测,并与模糊转换方法相结合,在去噪的同时较好的保持了图像的细节信息。在 Toh 等人将文献[15]的方法与自适应算法结合,实现了自适应模糊转换中值滤波椒盐噪声去除。当噪声比例较高时,中值所在的位置可能会距离噪声点较远,这时中值与不含噪声原图像噪声点处的像素值偏差可能会比较大,用其来代替噪声点会引起图像的退化。为了解决这个问题,Jourabloo 等人^[17]对自适应中值滤波的邻域半径进行了限制,并迭代运用两次自适应中值滤波来消除噪声。Hsie 等人^[18]提出了一种快速去除椒盐噪声的方法,他们对图像噪声比例进行统计,并将噪声百分比大于 50% 和不超过 50% 的图像采用不同的中值滤波来进行处理。近年来均值滤波逐渐被应用到去除椒盐噪声中,并取得了一些成果^[19-20]。

本文提出一种基于相邻处理过点绝对差分之和的椒盐噪声检测方法,并将其与模糊转换算法相结合,提出了一种 D_8 距离相关的自适应模糊转换加权均值滤波来实现椒盐噪声去除。在噪声检测阶段采用提出的相邻点绝对差分和方法将最大、最小值点分为 3 类,并且在噪声去除阶段采用模糊转换方法对三类像素点采用不同方法分别进行处理。实验结果表明提出的方法在有效去除噪声的同时很好的保持了图像的细节信息。

2 椒盐噪声

椒盐噪声是一种脉冲噪声,它是图像中最为常见噪声之一。在一幅 8bit 灰度图像中,椒盐噪声表现为像素的最大值或最小值,即 255 或 0,视觉上表现为像盐粒的白点与像胡椒的黑点,这正是其名称的由来。令 x 为不含噪声的原图像, y 为含有椒盐噪声的图像,椒盐噪声的数学模型如下所示:

$$y_{ij} = \begin{cases} I_{\max} \text{ 或 } I_{\min}, & p \\ x_{ij}, & 1 - p \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别为图像 y 中像素点的最大值与最小值。 p 为噪声概率, x_{ij} , y_{ij} 分别为 x 和 y 在 (i, j) 点的值。

3 提出的方法

3.1 噪声检测

从式(1)可以看出,噪声点的值都表现为最大值或最小值,因此引入一个二值标识矩阵 C 将最大值、最小值点与其他的点加以区分

$$C_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{如果 } y_{ij} = I_{\max} \text{ 或 } y_{ij} = I_{\min} \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_{ij} 表示矩阵 C 在 (i, j) 处的值。 C_{ij} 值为 0 表明 y_{ij} 可能为噪声点, C_{ij} 为 1 意味着 y_{ij} 为不含噪声的点。对于不含噪声的点,保持其值不变,而只对可能为噪声的点进行处理。图像中的高频信息通常含有图像的细节信息,像素值为最大或最小值的点既可能为噪声也可能为图像的细节信息,因此对最大值和最小值点进行进一步分类是非常必要的。本文提出了一种相邻处理过点绝对差分和方法来对可能为噪声点进行分类。文中假设处理过的点是不含噪声的,根据自然图像的平滑特性,采用与噪声点相邻处理过的像素点来计算绝对差分之和,当处理 y_{ij} 时,其上方和同一行左边的像素点都是处理过的,记:

$$\Omega = \{(i-1, j-1), (i-1, j), (i-1, j+1), (i, j-1)\} \quad (3)$$

式中: Ω 为与 y_{ij} 相邻的处理过像素点位置的集合。记 H 为部分处理过图像,其中位置在 Ω 集合中的点与 y_{ij} 的绝对差分为:

$$abd_{kl} = |h_{kl} - y_{ij}|, (k, l) \in \Omega \quad (4)$$

h_{kl} 为 H 在 (k, l) 点的值,绝对差分之和为:

$$Sabd = \sum abd_{kl} \quad (5)$$

由于自然图像的平滑性假设,在非边缘区域以及边缘区域沿着边的方向像素点不会发生突变。因此当 $Sabd$ 的值较大时像素点是噪声点,当 $Sabd$ 的值较小时像素点不为噪声。根据 $Sabd$ 值的大小,文中引入两个阈值 T_1 、 T_2 ,将 C_{ij} 值为 0 的点分为 3 类:无噪声点、轻度噪声点和重度噪声点。引入 F_{ij} 作为模糊函数:

$$F_{ij} = \begin{cases} 0, & Sabd < T_1 \\ \frac{Sabd - T_1}{T_2 - T_1}, & T_1 \leq Sabd < T_2 \\ 1, & Sabd \geq T_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: F_{ij} 值为 0,表示 y_{ij} 为非噪声点; $0 < F_{ij} < 1$ 表示 y_{ij} 为轻度噪声点; F_{ij} 值为 1,表示 y_{ij} 为重度噪声点。

3.2 噪声去除

在噪声去除阶段,为了避免噪声比例较高时,中值与不含噪声原图像对应点的差值过大而导致图像退化的问题,本文采用 D_8 距离相关的加权均值来代替中值,并结

合模糊转换算法来实现椒盐噪声去除。算法中均值由噪声点邻域内非最大值和非最小值的像素点来计算,不妨令图像 (i,j) 处邻域半径为 r ,则邻域 N_{ij}^r 表示如下:

$$N_{ij}^r = \{(k,l) \mid |k-i| \leq r, |l-j| \leq r\} \quad (7)$$

在计算均值之前先要对邻域是否含有非最大值和非最小值点判断,计算下式:

$$Q = \sum_{k,l} C_{k,l}, (k,l) \in N_{ij}^r$$

如果 $Q > 0$,则邻域含有非最大值和非最小值点;否则令 $r = r + 1$,重新计算 Q 的值,重复此过程直到 $Q > 0$ 为止。

自然图像中距离较近的像素点倾向于含有相似的像素值,算法在计算均值时充分考虑了距离因素,距离较近的像素点赋予较大的权重值,反之则赋予较小的权重值,在此采用 D_8 距离来表示权重, (k,l) 点与 (i,j) 点的 D_8 距离定义如下:

$$D_8 = \max\{|k-i|, |l-j|\} \quad (8)$$

权重的定义为:

$$w_{klj} = \begin{cases} \frac{1}{D_8}, (k,l) \neq (i,j) \cap C_{kl} = 1 \\ 0, (k,l) = (i,j) \cup C_{kl} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

y_{ij} 邻域像素点加权均值表示为:

$$M_{avg} = \frac{\sum_{k,l} w_{klj} y_{kl}}{\sum_{k,l} w_{klj}}, (k,l) \in N_{ij}^r \quad (10)$$

其中分母项是为了对权重进行正则化。对于不含噪声原图像 x_{ij} 的值采用模糊转换方法来进行估计:

$$\hat{x}_{ij} = (1 - F_{ij})y_{ij} + F_{ij}M_{avg} \quad (11)$$

式中: $\hat{x}_{ij}$ 为 x_{ij} 的估计值。从式(11)中可以看出,当 $F_{ij} = 0$ 时, y_{ij} 为非噪声点,处理时保持其值不变;当 $0 < F_{ij} < 1$, y_{ij} 为轻度噪声点,估计值由 y_{ij} 与其邻域均值的加权平均来获得;当 $F_{ij} = 1$ 时, y_{ij} 为重度噪声点,其值由其邻域均值来替代。

4 实验结果及比较

为了对实验结果进行评估,在此采用了基于误差敏感性的峰值信噪比(PSNR)和基于视觉敏感性的结构相似度(SSIM)两种图像质量度量^[21]方法对去噪后图像的质量进行度量。

在本文中设定半径 $r = 1$,阈值 $T_1 = 30$, $T_2 = 60$ 。采用一些标准图像进行仿真实验,对算法的有效性进行验证。如图1所示分别给出了椒盐噪声百分比为30%、50%和70%的噪声图像,算法去噪后图像和不含噪声原图像。从图中可以看出算法有效的去除了椒盐噪声,即使在噪声百分比高达70%时,依然可以达到很好的去噪效果。如图2所示给出了‘Lena’在噪声百分比为90%

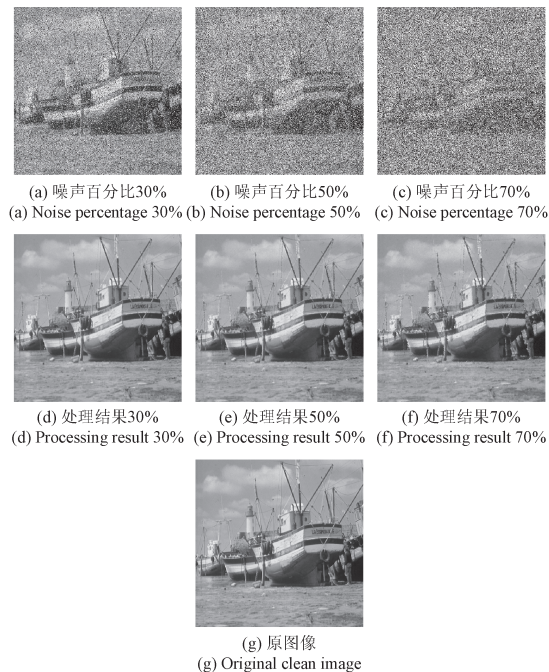


图1 实验结果比较

Fig. 1 Comparison of experiment results

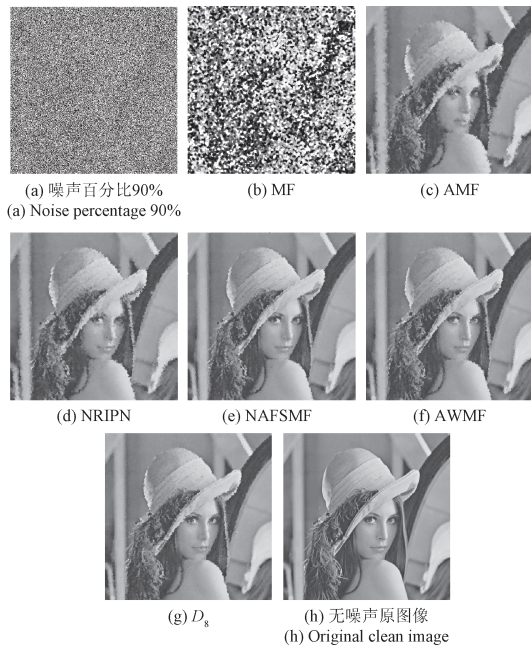


图2 ‘Lena’图像在噪声比例90%时提出方法与其他几种方法结果比较

几种方法处理结果的峰值信噪比(dB)与结构相似度分别为MF(8.52, 0.0533), AMF(22.17, 0.7621), NRIPN(23.05, 0.7929), NAFSMF(25.96, 0.8731), AWMF(26.12, 0.8730), D_8 (26.20, 0.8752)

Fig. 2 Comparison of results of several methods of image ‘Lena’ with noise percentage 90%

The PSNR and SSIM are: MF(8.52, 0.0533), AMF(22.17, 0.7621), NRIPN(23.05, 0.7929), NAFSMF(25.96, 0.8731), AWMF(26.12, 0.8730), D_8 (26.20, 0.8752)

时提出方法(D_8)仿真结果,并与中值滤波(MF),自适应中值滤波(AMF)、NRIPN^[16]、NAFSMF^[15]、AWMF^[19]的仿真结果进行了比较。从图上看到在噪声比例高达 90% 时,提出方法在去除噪声的同时很好的保持了图像的细节信息。定量来看,相对其他方法仿真结果,提出方法处理后图像具有更高的峰值信噪比和结构相似度值。表 1 所示为几幅图像在不同噪声百分比下的峰值信噪比

的值(dB)。从表中可以看到当噪声百分比为 30% 时,对于图像‘Lena’、‘house’和‘boat’,AWMF 的峰值信噪比值要小于 NAFSMF,当噪声百分比大于 30% 时,AWMF 是优于 NAFSMF 的。AWMF 的结果最接近文中提出的方法,提出的方法取得最高的峰值信噪比的值。表 2 所示为不同方法几种噪声百分比下的结构相似度的值,其结果与峰值信噪比相似,本文提出的方法取得最好的结果。

表 1 几种方法在几幅图像不同噪声百分比下处理结果的峰值信噪比

Table 1 PSNR of several images of several methods with different noise percentages								
图像	方法	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Lena	NRIPN	34.420 1	32.271 2	30.386 7	28.654 1	26.808 1	25.019 5	23.046 1
	NAFSMF	36.846 3	34.882 9	33.225 5	31.788 2	30.232 0	28.535 6	25.962 5
	AWMF	36.136 0	34.913 3	33.567 4	32.150 0	30.506 9	28.701 4	26.123 0
	D_8	37.194 3	35.433 9	33.839 3	32.312 0	30.599 1	28.768 8	26.205 1
house	NRIPN	33.154 9	31.020 3	29.060 1	27.658 7	25.895 3	24.251 2	22.248 1
	NAFSMF	35.429 7	33.455 8	31.797 1	30.272 5	28.884 2	27.265 5	24.696 2
	AWMF	34.926 3	33.539 0	32.204 7	30.967 8	29.493 0	27.489 1	24.959 3
	D_8	35.777 5	34.355 0	32.617 8	31.243 9	29.558 2	27.561 6	25.152 8
boat	NRIPN	30.952 2	28.986 2	27.339 3	25.738 4	24.246 1	22.747 3	21.060 4
	NAFSMF	33.004 4	31.161 0	29.517 0	28.247 4	26.932 4	25.396 1	23.297 2
	AWMF	32.393 5	31.215 4	29.871 8	28.622 4	27.257 6	25.541 3	23.348 8
	D_8	33.208 6	31.711 0	30.276 2	28.739 9	27.301 7	25.642 4	23.418 9
Barbara	NRIPN	27.324 7	25.669 6	24.268 7	23.059 3	21.953 0	20.784 6	19.620 1
	NAFSMF	28.537 6	26.974 6	25.702 8	24.605 1	23.513 5	22.402 5	21.094 8
	AWMF	28.880 6	27.514 0	26.319 8	25.115 3	23.929 7	22.682 4	21.168 1
	D_8	29.215 8	27.732 3	26.428 4	25.190 2	23.962 0	22.753 0	21.268 5

表 2 几种方法在几幅图像不同噪声百分比下处理结果的结构相似度

Table 2 SSIM of several images of several methods with different noise percentages								
图像	方法	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Lena	NRIPN	0.985 9	0.976 6	0.963 1	0.943 7	0.914 3	0.867 5	0.792 9
	NAFSMF	0.990 8	0.985 6	0.978 9	0.969 7	0.955 8	0.929 9	0.873 1
	AWMF	0.990 1	0.985 6	0.979 5	0.971 0	0.956 3	0.931 3	0.873 0
	D_8	0.991 4	0.986 6	0.980 3	0.971 3	0.957 2	0.931 8	0.875 2
house	NRIPN	0.940 0	0.911 7	0.875 4	0.838 9	0.791 5	0.728 5	0.653 6
	NAFSMF	0.954 2	0.933 4	0.909 8	0.882 0	0.850 3	0.806 6	0.737 7
	AWMF	0.953 5	0.936 2	0.915 4	0.891 5	0.857 1	0.811 8	0.741 1
	D_8	0.956 9	0.941 4	0.918 0	0.893 7	0.857 5	0.813 9	0.748 9
boat	NRIPN	0.973 6	0.956 0	0.933 9	0.901 5	0.859 9	0.794 9	0.693 7
	NAFSMF	0.981 7	0.971 0	0.957 8	0.942 7	0.917 4	0.878 3	0.787 1
	AWMF	0.981 2	0.972 7	0.960 9	0.946 5	0.921 4	0.878 2	0.787 2
	D_8	0.982 9	0.974 8	0.962 5	0.946 9	0.922 4	0.881 2	0.787 6
Barbara	NRIPN	0.947 6	0.921 5	0.890 8	0.853 5	0.810 1	0.752 5	0.668 0
	NAFSMF	0.958 1	0.937 6	0.916 5	0.891 7	0.858 5	0.815 8	0.742 4
	AWMF	0.962 1	0.945 3	0.923 9	0.897 8	0.864 2	0.817 4	0.742 7
	D_8	0.963 2	0.948 1	0.925 8	0.901 2	0.865 2	0.824 2	0.744 1

如图 3 所示,给出了上面 4 幅图像在不同去噪算法下的平均运行时间曲线,从图 3 可以看到当噪声百分比低于 70% 时,NRIPN 消耗时间略少于 D_8 所用时间,当噪

声百分比高于 70% 时, D_8 消耗较少的时间,但 D_8 取得较好的实验结果。AWMF 处理后图像质量与 D_8 最为接近,但其消耗的时间远远大于 D_8 消耗的时间。总的来

说 D_8 消耗的时间要少于大部分其他算法。

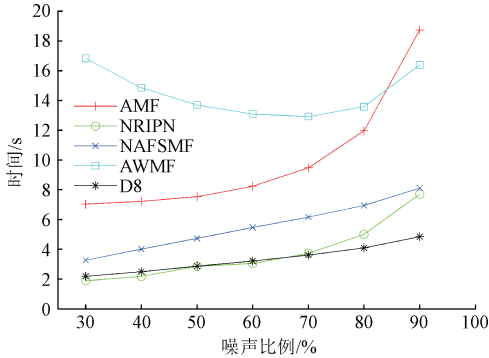


图3 4幅图像不同噪声百分比下的平均运行时间曲线

Fig.3 The curves of mean proceeding time of four images with different noise percentages

5 遥感图像领域应用

在遥感领域中由于卫星与地面之间的距离比较远,受到大气扰动的影响获得的图像往往含有较高的噪声,在卫星寿命期间,硬件的更换也极为困难,因此采用一些软件方法消除图像中的噪声尤为重要。如图4所示,给出了一幅噪声比例50%的地形图像及其处理结果,从图4可以看到,噪声图像中由于椒盐噪声的存在,图中的房屋道路等目标几乎无法识别,在目标识别、航路规划等任务中完全无法使用。处理后图像可以清晰的看到各类地形信息,很好的应用到各类实际应用中。

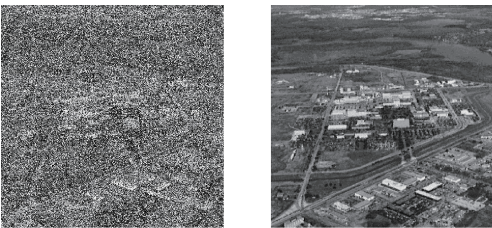


图4 含有椒盐噪声50%的地形图像及其处理结果

Fig.4 Terrain image with noise ratio 50% and its proceeding result

6 结 论

本文提出了一种 D_8 距离相关的自适应模糊转换加权均值滤波算法,实现了椒盐噪声的去除,主要结论如下。

1) 在噪声检测阶段,提出一种相邻处理过点的绝对差分和的方法对可能为噪声点进行分类,可以更为准确的对噪声点进行检测。2) 使用距离相关加权均值代替

中值滤波实现模糊转换方法,有效避免了图像边缘模糊等人工效应,在去除图像噪声的同时很好的保持了图像的细节信息。

参考文献

[1] 张爱民. 一种基于小波变换的夜视图像去噪和融合方法[J]. 电子测量技术,2015,38(1):38-40.
ZHANG AI M. Denoising and fusion method of night vision image based on wavelet transform[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(1): 38-40.

[2] TALEBI H, M ILANFAR P. Global image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(2): 755-768.

[3] ZHOU Z, GUO Z, DONG G, et al. A doubly degenerate diffusion model based on the gray level indicator for multiplicative noise removal[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(1): 249-260.

[4] LUO E, CHAN S H, NGUYEN T Q. Adaptive image denoising by targeted databases[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(7): 2167-2181.

[5] 许佳佳, 张叶, 张赫. 基于改进 Harris-SIFT 算子的快速图像配准算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 48-54.
XU J J, ZHANG Y, ZHANG H. Fast image registration algorithm based on improved Harris SIFT descriptor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 24(7): 2176-2181.

[6] 朱奇光, 张朋珍, 李昊立, 等. 基于全局和局部特征融合的图像匹配算法研[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1):170-176.
ZHU Q G, ZHANG P ZH, LI H L. Investigation on the image matching algorithm based on global and local feature fusion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 170-176.

[7] PURKAIT P. PAL N R, CHANDA B. A fuzzy-rule-based approach for single frame super resolution [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(5): 2277-2290.

[8] 王震, 侯加林, 唐凯, 等. 图像识别和 GPRS 技术在植物生长检测中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(6): 574-579.
WANG ZH, HOU J L, TANG K, et al. Application of image recognition and GPRS technology in plant grow detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(6): 574-579.

[9] FABIJANSKA A, SANKOWSKI D. Noise adaptive switching median-based filter for impulse noise removal from extremely corrupted images [J]. IET Image Processing, 2011, 5(5): 472-480.

- [10] ESAKKIRAJAN S, VEERAKUMAR T, Subramanyam A N, et al. Removal of high density salt and pepper noise through modified decision based unsymmetric trimmed median filter[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(5):287-290.
- [11] CHEN P Y, LIEN C Y. An efficient edge-preserving algorithm for removal of salt-and-pepper noise [C]. Signal Processing Letters, IEEE, 2008, 15: 833-836.
- [12] LUO W. An efficient algorithm for the removal of impulse noise from corrupted images [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2007, 61(8): 551-555.
- [13] TOH K K V, ISA N A M. Cluster-based adaptive fuzzy switching median filter for universal impulse noise reduction [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56(4): 2560-2568.
- [14] GARNETT R, HUEGERICH T, CHUIC, et al. A universal noise removal algorithm with an impulse detector[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(11): 1747-1754.
- [15] TOH K K V, IBRAHIM H, MAHYUDDIN M N. Salt-and-pepper noise detection and reduction using fuzzy switching median filter [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(4): 1956-1961.
- [16] TOH K K V, ISA N A M, ASHIDI N. Noise adaptive fuzzy switching median filter for salt-and-pepper noise reduction[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(3):281-284.
- [17] JOURABLOO A, FEGHAHATI A H, JAMZADM. New algorithms for recovering highly corrupted images with impulse noise [J]. Scientia Iranica, 2012, 19(6): 1738-1745.
- [18] HSIE H M H, CHENG F C, SHIE M C, et al. Fast and efficient median filter for removing 1-99% levels of salt-and-pepper noise in images [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(4): 1333-1338.
- [19] ZHANG X, XIONG Y. Impulse noise removal using directional difference based noise detector and adaptive weighted mean filter [J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2009, 16(4): 295-298.
- [20] ZHANG P, LI F. A new adaptive weighted mean filter for removing salt-and-pepper noise [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(10): 1280-1283.
- [21] HORE A, ZIOU D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM [C]. 20th International Conference on Pattern

Recognition (ICPR), IEEE, 2010: 2366-2369.

作者简介



王义, 2006 年于山东科技大学取得学士学位, 2010 于山东科技大学取得硕士学位, 现为北京航空航天大学博士研究生, 主要研究方向为计算机仿真、数字图像处理。

E-mail: y_wangskd@163.com

Wang Yi received B. Sc. from Shandong University of Science and Technology in 2006 and M. Sc. from Shandong University of Science and Technology in 2010, respectively. Now he is a Ph. D. candidate in Beihang University. His main research interests include computer simulation, and image processing.



王江云, 1995 年于西北工业大学取得学士学位, 1998 于西北工业大学取得硕士学位, 2002 年于北京航空航天大学取得博士学位, 现为北京航空航天大学副教授, 主要研究方向为飞行控制、飞行仿真。

E-mail: wangjiangyun@buaa.edu.cn

Wang Jiangyun received B. Sc. from Northwestern Polytechnical University in 1995, M. Sc. from Northwestern Polytechnical University in 1998, and Ph. D. from Beihang University in 2002, respectively. Now she is associate professor in Beihang University. Her main research interests include flight control and flight simulation.



宋晓, 于北京航空航天大学取得博士学位, 现为北京航空航天大学副教授, 目前主要研究方向为大数据分析、云计算、飞行仿真和图像处理。

Song Xiao received Ph. D. from Beihang University. Now he is associate professor in Beihang University. His main research interests include Big Data Analysis, cloud computing, flight simulation, and image processing.



韩亮, 于复旦大学取得学士学位, 于哈尔滨工业大学取得硕士学位, 于北京航空航天大学取得博士学位, 现为北京航空航天大学教授, 目前主要研究方向为飞行控制、飞行仿真。

Email: hanliang@buaa.edu.cn

Han Liang received B. Sc. from Fudan University, M. Sc. from Harbin Institute of Technology, and Ph. D. from Beihang University, respectively. Now he is professor in Beihang University. His main research interests include flight control and flight simulation.