

文章编号 1004-924X(2016)增-0701-09

自适应双量子比特态中值滤波方法

修春波^{1,2*}, 牛莹¹

- (1. 天津工业大学 电气工程与自动化学院 天津 300387;
2. 天津工业大学 电工电能新技术天津市重点实验室 天津 300387)

摘要:针对量子中值滤波方法对图像光照变化等干扰缺少适应能力的缺点,提出一种改进的自适应双量子中值滤波方法。根据图像像素灰度分布信息确定图像像素分布概率,选择分段归一化后的分布概率函数作为量子比特态的概率函数,提高了滤波方法对光照变化等干扰的适应能力,改善了滤波性能。将滤波方法分别对正常光照、低光照及高光照3种情况下的图像进行滤波分析,仿真实验结果表明,与现有中值滤波方法相比,改进方法具有更好的椒盐噪声滤波能力,峰值信噪比、规一化均方误差、图像相似度等评价指标均优于现有方法。当图像中含有50%椒盐噪声时,与现有中值滤波方法相比,本文方法的峰值信噪比可分别提高2.13%、2.71%、3.22%,图像相似度可提高1.52%、1.82%、2.08%,规一化均方误差可降低11.85%、15.70%、15.65%。

关键词:量子;双量子比特态;中值滤波;椒盐噪声

中图分类号:TP394.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0701

Adaptive dual qubit state median filtering method

XIU Chun-bo^{1,2*}, NIU Ying¹

- (1. School of Electrical Engineering and Automation,
Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;
2. Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology,
Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)
* Corresponding author, E-mail: xiuchunbo@tjpu.edu.cn

Abstract: In order to improve the adaptive ability of the quantum median filtering method to the illumination variations, a novel median filtering method based on the dual qubit state is proposed. The distribution probability of the pixels in the image is determined according to the grayscale distribution information. And the normalized distribution probability is determined as the probability function of the quantum bit states. In this way, the filtering method has good adaptive ability to the illumination variations, and the filtering performance can be improved. The method is used to filter noise in the images under the normal, low and high illumination. Simulation results show that the method can get better filtering result to the salt and pepper noise than the other median filtering methods, and the method is also superior to others on some objective evaluation criteria, such as the peak signal to noise ratio, the normalized mean square error, and the structural similarity. For the images with 50% noise, the peak signal to noise ratio of the method can be enhanced by 2.13%, 2.71% and 3.22%,

收稿日期:2016-05-19;修订日期:2016-06-05.

基金项目:天津市应用基础与前沿技术研究计划项目(14JCYBJC18900);国家自然科学基金项目(No. 61203302)

the structural similarity can be enhanced by 1.52%, 1.82%, 2.08%, and the normalized mean square error can be reduced by 11.85%, 15.70%, and 15.65%.

Key words: quantum; double-quantum bit state; median filtering; salt and pepper noise

1 引言

近年来,量子理论得到迅速发展,并广泛应用于计算机、通信、信号处理等众多领域中^[1-4]。特别地,量子图像处理的研究发展也很迅速,在图像增强、图像滤波以及边缘检测等方面取得较好的应用效果^[5-10]。对于图像中经常出现的椒盐噪声,中值滤波具有良好的滤波性能。不过,经典中值滤波方法使用较小滤波模板时对高比例噪声的去除效果不明显,而使用较大滤波模板又会造成图像细节信息的丢失,从而使图像变得模糊,已有的自适应加权滤波方法往往又受到噪声条件的限制^[11]。为此,文献[7]提出了基于量子理论的图像中值滤波方法,将图像伪量子化并进行 Hadamard 变换,结合中值滤波方法对图像进行去噪处理,与传统方法相比,该方法既能够保留更多的图像细节信息,又提高了滤波方法的降噪能力。在此基础上,文献[8]结合量子力学理论,提出了基于双量子比特态测量的量子中值滤波方法,图像的细节信息能够得到进一步保护,而且又具有较少的运算量。不过,该方法中量子比特态概率函数的选取对所处理的图像不具有自适应性,当图像光照等发生变化时,无法保证滤波效果的稳定性。

为此,本文结合量子信号处理框架(Quantum Signal Processing, QSP)理论^[12],根据图像像素的分布特征,提出一种自适应双量子比特态的图像滤波方法。量子比特态的概率函数根据滤波图像的像素灰度分布信息自适应选取,从而有效提高了滤波方法对光照变化等干扰的适应能力。

2 量子力学基础

在量子体系中,所有的状态矢量都满足空间叠加原理,即任一矢量 $|\varphi\rangle$ 可表示为:

$$|\varphi\rangle = \sum_n a_n |n\rangle, \quad (1)$$

其中 a_n 为对应基态的概率幅, $|n\rangle$ 为基底。

量子比特是量子计算机存储量子信息的基本单位,一个量子比特态对应二维 Hilbert 空间的一个矢量,记为:

$$|\varphi\rangle = a_0 |0\rangle + a_1 |1\rangle, \quad (2)$$

式中, a_0, a_1 称为概率幅,满足归一化条件 $|a_0|^2 + |a_1|^2 = 1$, $|a_0|^2$ 和 $|a_1|^2$ 分别代表极化状态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 出现的概率。对于一个复合量子系统,假设它由 n 个量子位构成,记第 i 个量子位的状态为:

$$|\varphi^i\rangle = a_0^i |0\rangle + a_1^i |1\rangle, \quad (3)$$

则该系统可以由 n 个量子比特态的张量积表示:

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= |\varphi^1\rangle \otimes |\varphi^2\rangle \otimes \cdots \otimes |\varphi^n\rangle = \\ & \otimes_{i=1}^n |\varphi^i\rangle = \\ & (a_0^1 |0\rangle + a_1^1 |1\rangle) \otimes (a_0^2 |0\rangle + a_1^2 |1\rangle) \\ & \otimes \cdots \otimes (a_0^n |0\rangle + a_1^n |1\rangle) = \\ & (a_0^1 a_0^2 \cdots a_0^n) |00\cdots 0\rangle + (a_0^1 a_0^2 \cdots a_1^n) |00\cdots 1\rangle \\ & + \cdots + (a_1^1 a_1^2 \cdots a_1^n) |11\cdots 1\rangle = \\ & \sum_{i=0}^{2^n-1} a_i |i\rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $|i\rangle$ 表示量子比特系统 $|\psi\rangle$ 的第 i 个基态, a_i 表示相应基态的概率幅,满足归一化条件 $\sum_{i=0}^{2^n-1} |a_i|^2 = 1$ 。

3 改进量子中值滤波方法

3.1 图像的双量子比特态描述

记输入图像为 I ,带噪图像大小为 $H \times W$,将输入图像进行归一化,并记为 S 。设 z_{xy} 是图像 S 中的点 (x, y) 处的灰度值,图像的中值滤波模板大小为 $m \times n$, T_{xy} 代表以点 (x, y) 为中心被当前滤波掩模覆盖的图像区域, z_{med} 代表 T_{xy} 区域中的像素中值。图像中像素点 (x, y) 的双量子比特态表示为:

$$|\varphi\rangle_{xy} = \sum_{i=0}^1 a_i^0 |i\rangle \otimes \sum_{i=0}^1 a_i^1 |i\rangle, \quad (5)$$

其中任一单量子比特态满足叠加定理,即:

$$\sum_{i=0}^1 a_i^0 |i\rangle = a_0^0 |0\rangle + a_1^0 |1\rangle, \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^1 a_i^1 |i\rangle = a_0^1 |0\rangle + a_1^1 |1\rangle. \quad (7)$$

根据量子计算机存储特点,式(5)等价于:

$$\begin{aligned} & |\varphi\rangle_{xy} = \\ & (a_0^0 |0\rangle + a_1^0 |1\rangle) \otimes (a_0^1 |0\rangle + a_1^1 |1\rangle) = \\ & a_{00} |00\rangle + a_{01} |01\rangle + a_{10} |10\rangle + a_{11} |11\rangle, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, a_{ij} ($ij \in \{00, 01, 10, 11\}$) 为基态 $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$ 的概率幅, 满足归一化条件 $\sum_{ij \in \{00, 01, 10, 11\}} |a_{ij}|^2 = 1$ 。由于每个量子比特态可以单独考虑^[8], 则可设量子比特态出现的概率函数为:

$$|a_1|^2 = f(z), \quad (9)$$

$$|a_0|^2 = 1 - f(z), \quad (10)$$

$|a_1|$ 和 $|a_0|$ 表示单量子 $|1\rangle$ 态和 $|0\rangle$ 态的概率幅, $|a_1|^2$ 和 $|a_0|^2$ 则分别表示这两种比特态出现的概率。文献[8]定义单量子比特态取 $|1\rangle$ 的概率为:

$$f(z) = \sin^2(\pi z), \quad (11)$$

其中, z 为归一化后的灰度值 z_{xy} 或中值 z_{med} 。文献[8]之所以选择式(11)的函数形式, 主要是针对椒盐噪声的特点而设计的, 即当像素的灰度值较小或较大时, 其归一化后的灰度值接近 0 或 1, 该点处的量子比特态取 $|1\rangle$ 的概率接近为 0, 这样可有效滤除椒盐噪声。但也可看出, 该函数没有考虑到图像自身像素分布的特点, 缺少对所处理图像的自适应性。

为此, 本文根据所处理图像的像素分布信息, 重新定义量子比特态 $|1\rangle$ 出现的概率函数。假设图像的像素灰度值符合正态分布, 其均值为 μ , 方差为 σ^2 , 即像素灰度值分布符合正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 记为:

$$g(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{则可求得: } g(0) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}}, \quad g(1) = \\ & \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(1-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad g(\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}. \end{aligned}$$

这样, 可将 $f(z)$ 定义为分段归一化函数:

$$f(z) = \begin{cases} \frac{g(z) - g(0)}{g(\mu) - g(0)}, & z \leq \mu \\ \frac{g(z) - g(1)}{g(\mu) - g(1)}, & z > \mu \end{cases}. \quad (13)$$

$f(z)$ 实质上是将 $g(z)$ 分段归一化后所得结果, 由于 $f(0) = f(1) = 0$, 因此, $f(z)$ 也满足滤除椒盐噪声的要求。同时, 由于 $f(z)$ 还能够反映图像像素灰度分布的信息, 因此, 提高了对光照变化等干扰的适应性。

定义 $|a_1|_{med}^2$, $|a_0|_{med}^2$ 和 $|a_1|_{xy}^2$, $|a_0|_{xy}^2$ 是双量子比特态系统中量子分别在 $|1\rangle$ 态和 $|0\rangle$ 态处的概率, 即:

$$|a_1|_{med}^2 = f(z_{med}), \quad (14)$$

$$|a_0|_{med}^2 = 1 - f(z_{med}), \quad (15)$$

$$|a_1|_{xy}^2 = f(z_{xy}), \quad (16)$$

$$|a_0|_{xy}^2 = 1 - f(z_{xy}). \quad (17)$$

在图像双量子比特态系统中, $|11\rangle$ 态可表示图像某个点的双量子同时处于 $|1\rangle$ 态, $|10\rangle$ 态表示第一个单量子处于 $|1\rangle$ 态, 而第二个单量子处于 $|0\rangle$ 态, $|01\rangle$ 态表示第一个量子处于 $|0\rangle$ 态而第二个量子处于 $|1\rangle$ 态, $|00\rangle$ 态表示双量子都为 $|0\rangle$ 态。本文中的双量子比特态分别描述图像的中值信息和灰度信息, 因此有:

$$|a_{11}|^2 = f(z_{med}) \cdot f(z_{xy}), \quad (18)$$

$$|a_{10}|^2 = f(z_{med}) \cdot (1 - f(z_{xy})), \quad (19)$$

$$|a_{01}|^2 = (1 - f(z_{med})) \cdot f(z_{xy}), \quad (20)$$

$$|a_{00}|^2 = (1 - f(z_{med})) \cdot (1 - f(z_{xy})), \quad (21)$$

其中, $|a_{11}|^2$, $|a_{10}|^2$, $|a_{01}|^2$, $|a_{00}|^2$ 分别代表双量子系统中出现 $|11\rangle$ 态、 $|10\rangle$ 态、 $|01\rangle$ 态和 $|00\rangle$ 态的概率。

3.2 量子测量与结果输出

对量子系统中的粒子进行测量时, 其状态会被投射到与测量值相对应的状态空间。由测量一致性可知, 对一幅用量子系统表示的图像进行反复测量的结果与第一次进行测量后的结果相同^[13]。假设输入图像的双量子比特态存储在矩阵 \mathbf{H} 中, 对矩阵 \mathbf{H} 中的每一个双量子比特态, 令其产生随机数 r , 且 $r \in [0, 1]$, 对该双量子比特的测量结果用 $|h_{ij}\rangle$ 表示为:

$$|h_{ij}\rangle = \begin{cases} |11\rangle, r \in [0, |a_1|_{med}^2] \\ \quad \text{且 } r \in [0, |a_1|_{nm}^2] \\ |10\rangle, r \in [0, |a_1|_{med}^2] \\ \quad \text{且 } r \in [0, |a_1|_{nm}^2, 1] \\ |01\rangle, r \in [0, |a_1|_{med}^2, 1] \\ \quad \text{且 } r \in [0, |a_1|_{nm}^2] \\ |00\rangle, r \in [0, |a_1|_{med}^2, 1] \\ \quad \text{且 } r \in [0, |a_1|_{nm}^2, 1] \end{cases}. \quad (22)$$

定义输出图像为 W , 它的标记矩阵为 F , W 在 (x, y) 点处的像素值 $w(x, y)$ 由测量结果 $|h_{ij}\rangle$ 决定, 具体为:

(1) 初始化 $W=0, F=0$, 其大小均为 $H \times W$, 中值滤波模板的大小为 $k \times k$;

(2) 遍历搜索标记矩阵 F 中是否有 0 元素, 如果有, 假设其在矩阵 F 中的位置坐标为 (i, j) , 即 $f(i, j)=0$, 则找到与其位置相对应的 H 中的元素, 并对其进行量子测量, 如果测量结果为 $|11\rangle$, 则令 $w(i, j)=z_{sm}, f(i, j)=1$; 如果测量结果为 $|10\rangle$, 则令 $w(i, j)=z_{med}, f(i, j)=1$; 如果测量结果为 $|01\rangle$ 或 $|00\rangle$, 则 $w(i, j)$ 和 $f(i, j)$ 的值保持不变;

(3) 判断标记矩阵 F 中是否还有 0 元素, 如果有, 增大中值滤波模板尺寸, 本文取 $k=k+2$;

(4) 重复执行步骤(2)、(3), 直到 F 中的所有元素都为 1 或 k 达到最大值。本文设定 k 的最大值为 11。当 k 达到最大值时, 若 F 中仍有元素为

0, 则令 F 中 0 元素的位置对应的 $w(i, j)=z_{med}$, 且 $f(i, j)=1$ 。

4 实验结果与分析

采用大小为 256×256 的 Lena 图像作为初始图像, 将加入椒盐噪声后的 Lena 图像作为输入图像, 并采用经典中值滤波方法、自适应中值滤波方法^[11]、双量子比特态滤波方法^[8]及本文方法分别对正常光照、低强度光照和高强度光照 3 种情况下的加噪图像分别进行滤波分析, 并比较各种方法的滤波性能。选用图像的规一化均方误差 (NMSE)、峰值信噪比 (PSNR) 以及图像相似度评价指标 (SSIM)^[14-15] 作为图像滤波结果的客观评价指标。

图 1~3 为正常光照下, 对含有不同比例噪声的图像进行滤波所得结果。



图 1 各种方法对 10% 加噪图像的滤波结果

Fig. 1 Filtering results by different methods on normal illumination image with 10% noise



图 2 各种方法对 30% 加噪图像的滤波结果

Fig. 2 Filtering results by different methods on normal illumination image with 30% noise

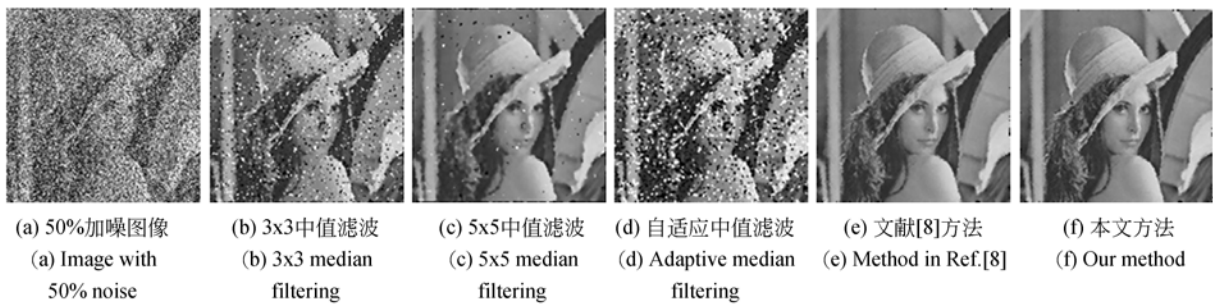


图 3 各种滤波方法的滤波结果

Fig. 3 Filtering results by different methods on normal illumination image with 50% noise

正常光照下各种方法滤波性能指标如表 1 所示。

表 1 正常光照下不同方法的滤波性能比较

Tab. 1 Filtering performances comparison of different methods under normal illumination

性能参数	滤波方法	噪声比例				
		10%	20%	30%	40%	50%
NMSE	3×3 中值滤波	0.0043733	0.0091968	0.021596	0.0560450	0.1187200
	5×5 中值滤波	0.0075455	0.0108290	0.013681	0.0199150	0.0329010
	自适应权值滤波	0.0019809	0.0064678	0.020936	0.0657140	0.1630300
	原文方法	0.0022066	0.0032471	0.0047159	0.0064996	0.0100970
	本文方法	0.0018126	0.0026901	0.0040522	0.0058545	0.0089003
PSNR	3×3 中值滤波	29.3667	26.1384	22.431	18.2894	15.0294
	5×5 中值滤波	26.9979	25.4289	24.4135	22.7830	20.6027
	自适应权值滤波	32.8062	27.6672	22.5659	17.5982	13.6521
	原文方法	32.3375	30.6598	29.0391	27.6459	25.7329
	本文方法	33.7371	31.4771	29.6978	28.0999	26.2807
SSIM	3×3 中值滤波	0.91107	0.85282	0.71668	0.48582	0.27896
	5×5 中值滤波	0.83024	0.82032	0.80590	0.77682	0.69878
	自适应权值滤波	0.97377	0.89365	0.72664	0.44839	0.21989
	原文方法	0.96185	0.94268	0.91956	0.89112	0.85310
	本文方法	0.97586	0.95244	0.92981	0.90149	0.86603

由图 1~3 可见,正常光照下,3×3 模板的中值滤波方法对小比例噪声图像具有一定的滤波效果。而 5×5 模板的中值滤波方法则会使去噪后的图像变得模糊,且输入图像含有的噪声越大,滤波后的图像就越模糊。自适应中值滤波方法对噪声比例较小的图像去噪能力较好,但随着输入图像的噪声比例的增加,其处理结果也逐渐变差。文献[8]的方法在一定程度上改善了前 3 种方法的缺陷,但当输入图像中含有较大噪声时,其滤波后的图像在细节边缘处开始变得模糊。而本文方

法不仅能有效保留大噪声图像滤波后的细节信息,使其更接近原始图像,而且具有更好的去噪能力。由表 1 的数据可见,图像处于正常光照情况下,本文方法所得滤波结果的峰值信噪比(PSNR)和图像相似度的评价指标(SSIM)的值均大于前 4 种方法,而归一化均方误差(NMSE)的值则小于前 4 种方法,证明了本文方法的有效性。

图 4~6 为在光照亮度降低 20% 情况下,对含不同比例噪声的图像进行滤波所得结果。



图 4 低光照下各种算法对 10%加噪图像的滤波结果

Fig. 4 Filtering results by different methods on low illumination image with 10% noise



图 5 低照度下各种方法对加噪 30%图像的滤波结果

Fig. 5 Filtering results by different methods on low illumination image with 30% noise

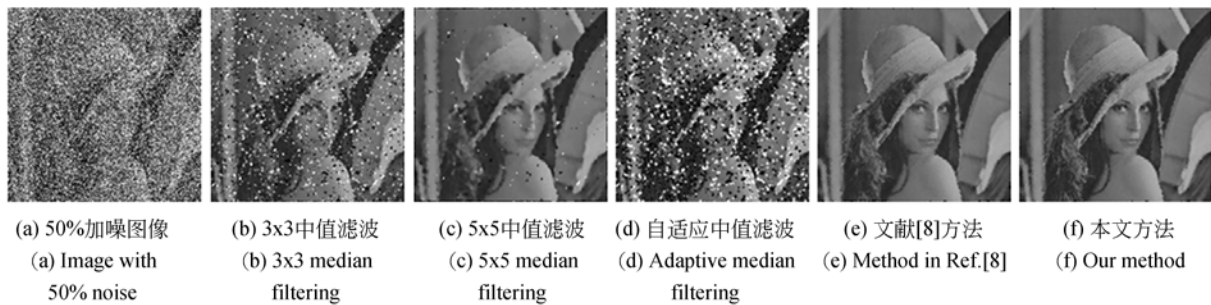


图 6 低光照下各种滤波方法对加噪 50%图像的滤波结果

Fig. 6 Filtering results by different methods on low illumination image with 50% noise

低光照强度情况下,各方法滤波结果指标如 表 2 所示。

表 2 低光照下不同方法的滤波性能比较

Tab. 2 Filtering performances comparison of different methods under low illumination

性能参数	滤波方法	图像所受噪声干扰大小				
		10%	20%	30%	40%	50%
NMSE	3×3 中值滤波	0.0042901	0.0094874	0.028500	0.0833930	0.1788700
	5×5 中值滤波	0.0076413	0.0102440	0.015285	0.0200280	0.0374870
	自适应权值滤波	0.0015573	0.0071688	0.026161	0.0990420	0.2445000
	原文方法	0.0024424	0.0035337	0.0049653	0.0067908	0.0108730
	本文方法	0.0015128	0.0025110	0.0036885	0.0057931	0.0091663

续表

性能参数	滤波方法	图像所受噪声干扰大小				
		10%	20%	30%	40%	50%
PSNR	3×3 中值滤波	31.3881	27.9413	23.1644	18.5015	15.1874
	5×5 中值滤波	28.8811	27.6079	25.8700	24.6965	21.9740
	自适应权值滤波	35.7891	29.1583	23.5362	17.7546	13.8300
	原文方法	33.8345	32.2305	30.7533	29.3935	27.3494
	本文方法	36.6369	33.7143	32.0443	30.0836	28.0908
SSIM	3×3 中值滤波	0.92256	0.87395	0.72131	0.46182	0.25311
	5×5 中值滤波	0.85078	0.84233	0.82565	0.80008	0.69710
	自适应权值滤波	0.97932	0.91078	0.73961	0.42550	0.19657
	原文方法	0.96004	0.94315	0.92150	0.89451	0.86126
	本文方法	0.98433	0.96025	0.94023	0.91078	0.87695

图 7~9 为在光照亮度增加 20% 情况下,对 含不同比例噪声的图像进行滤波所得结果。



图 7 高光照下各种滤波方法对加噪 10% 图像的滤波结果

Fig. 7 Filtering results by different methods on high illumination image with 10% noise



图 8 高光照下各种滤波方法对加噪 30% 图像的滤波结果

Fig. 8 Filtering results by different methods on high illumination image with 30% noise



图 9 高光照下各种滤波方法的滤波结果

Fig. 9 Filtering results by different methods on high illumination image with 50% noise

高光照情况下,各方法滤波结果指标如表 3 所示。

表 3 高光照下不同方法的滤波性能比较

Tab. 3 Filtering performances comparison of different methods under high illumination

性能参数	滤波方法	图像所受噪声干扰大小				
		10%	20%	30%	40%	50%
NMSE	3×3 中值滤波	0.0042612	0.0077441	0.0420290	0.0420290	0.092816
	5×5 中值滤波	0.0073634	0.0097769	0.0205160	0.0205160	0.029153
	自适应权值滤波	0.0026630	0.0063526	0.0490330	0.0490330	0.116230
	原文方法	0.0030683	0.0041220	0.0089809	0.0089809	0.013320
	本文方法	0.0024883	0.0033151	0.0073897	0.0073897	0.011235
PSNR	3×3 中值滤波	27.9029	25.3085	17.9628	17.9628	14.5220
	5×5 中值滤波	25.5275	24.2963	21.0772	21.0772	19.5515
	自适应权值滤波	29.9446	26.1687	17.2933	17.2933	13.5451
	原文方法	29.3293	28.0472	24.6650	24.6650	22.9532
	本文方法	30.2392	28.9933	25.5120	25.5120	23.6924
SSIM	3×3 中值滤波	0.90215	0.85424	0.52176	0.52176	0.30407
	5×5 中值滤波	0.81323	0.80141	0.75395	0.75395	0.68134
	自适应权值滤波	0.96000	0.88394	0.47201	0.47201	0.25227
	原文方法	0.94559	0.92659	0.87110	0.87110	0.82841
	本文方法	0.96553	0.93878	0.89583	0.88583	0.84567

由图 4~9 可见,当图像处于非正常光照情况下时,3×3 和 5×5 模板的经典中值滤波方法均不能很好的去除噪声,自适应中值滤波方法也无法适应光照变化的影响,得到的滤波效果甚至更差。文献[8]中的方法,由于没有考虑图像灰度值的特有分布信息,当图像处于非正常光照情况下时,其去噪能力也有所降低。而本文所提出的方法由于在构造比特态概率函数时融入了图像的全局信息,同时保留了量子滤波的原有优势,因此,其滤波效果要优于前几种方法,滤波后的图像具有更多的细节信息,并且,在输入图像含有较大的噪声比例时,依然具有很好的去噪效果。由表 2 和表 3 给出的客观评价指标也可知,本文方法的各项滤波性能指标均优于其他各种对比方法。

5 结 论

本文提出了基于双量子比特态的图像自适应中值滤波方法,根据输入图像的像素分布信息,确定了量子比特态的概率函数,提高了算法的自适应能力。当图像中含有 50%椒盐噪声时,正常光照、低光照和高光照情况下,本文方法的峰值信噪比可分别提高 2.13%、2.71%、3.22%,图像相似度可提高 1.52%、1.82%、2.08%,归一化均方误差可降低 11.85%、15.70%、15.65%。由此可见,本文方法不但能够提高图像的滤波性能,而且对光照变化等干扰具有更强的适应能力。

参考文献:

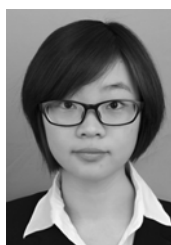
- [1] NAVEED N, HUSSAIN A, JAFFAR M A, *et al.*. Quantum and impulse noise filtering from breast mammogram images[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2012, 108 (3): 1062-1069.
- [2] ZHOU L, SHENG Y B. Efficient single-photon entanglement concentration for quantum communications[J]. *Optics Communications*, 2014, 313: 217-222.
- [3] CHENG M F, FANG J H. A universal quantum frequency converter via four-wave-mixing processes [J]. *Optics Communications*, 2016, 368: 54-57.
- [4] FRITZSCHE S. The feynman tools for quantum information processing: design and implementation

- [J]. *Computer Physics Communications*, 2014, 185 (6): 1697-1718.
- [5] 付晓薇,丁明跃,周成平,等. 基于量子概率统计的医学图像增强算法研究[J]. *电子学报*, 2010, 38 (7): 1590-1596.
- FU X W, DING M Y, ZHOU CH P, *et al.*. Research on image enhancement algorithms of medical images based on quantum probability statistics[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(7): 1590-1596. (in Chinese)
- [6] GOLDIN M A, FRANCISCO D, LEDESMA S. Classical images as quantum entanglement: An image processing analogy of the GHZ experiment[J]. *Optics Communications*, 2011, 284 (7): 2089-2093.
- [7] 谢可夫,许悟生. 基于量子理论的图像中值滤波[J]. *计算机工程*, 2013, 39(1): 244-247.
- XIE K F, XU W SH. Image median filtering based on quantum theory [J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(1): 244-247. (in Chinese)
- [8] 袁素真,毛峡,陈立江,等. 基于双量子比特态测量的量子自适应中值滤波[J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(11): 1443-1448.
- YUAN S ZH, MAO X, CHEN L J, *et al.*. Quantum adaptive median filtering based on dual qubits state measurement[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39 (11): 1443-1448. (in Chinese)
- [9] YANG Y G, TIAN J, LEI H, *et al.*. Novel quantum image encryption using one-dimensional quantum cellular automata [J]. *Information Sciences*, 2016, 345: 257-270.
- [10] YUAN S Z, MAO X, CHEN L J, *et al.*. Quantum digital image processing algorithms based on quantum measurement [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124 (23): 6386-6390.
- [11] 王明佳,张旭光,韩广良,等. 自适应权值滤波消除图像椒盐噪声的方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 779-783.
- WANG M J, ZHANG X G, HAN G L, *et al.*. Elimination of impulse noise by auto-adapted weight filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (5): 779-783. (in Chinese)
- [12] ELDAR Y C, OPPENHEIM A V. Quantum signal processing[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, 19(6): 12-32.
- [13] 王鹏,李建平. 量子信号处理[J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(4): 1033-1035+1038.
- WANG P, LI J P. Quantum signal processing[J]. *Application Research on Computers*, 2008, 25(4): 1033-1035+1038. (in Chinese)
- [14] 佟雨兵,张其善,祁云平. 基于 PSNR 与 SSIM 联合的图像质量评价模型[J]. *中国图象图形学报*, 2006, 11(12): 1758-1763.
- TONG Y B, ZHANG Q SH, QI Y P. Image quality assessing by combining PSNR with SSIM[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(12): 1758-1763. (in Chinese)
- [15] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.*. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.

作者简介:



修春波(1978—),男,黑龙江肇州人,博士,教授,2000年、2005年于北京理工大学分别获得学士学位和博士学位,主要从事人工神经网络及目标识别方面的研究。E-mail: xiuchunbo@tjpu.edu.cn



牛莹(1990—),女,山东菏泽人,硕士研究生,2014年于烟台大学获得学士学位,主要从事机器视觉与目标检测方面的研究。E-mail: 383113780@qq.com