

图像的中介滤波算法与图像中介保真度量

周宁宁^{1,2}, 赵正旭¹, 秦文虎¹

(1. 东南大学仪器科学与工程系, 江苏南京 210096; 2. 南京邮电大学计算机学院, 江苏南京 210003)

摘 要: 首先通过对图像噪声产生过程的分析, 并根据随机性和模糊性的特征, 提出新的图像噪声的定义; 然后, 以中介真值程度的数值化度量为基础, 设计了新的图像去噪滤波算法. 通过仿真实例, 并采用经典的 PSNR 评价方法, 与已有的典型算法处理结果比较表明, 基于中介真值程度度量的图像去噪算法的去噪效果优越, 因而更具有实用性和有效性. 针对 PNSR 等经典评价方法的结果往往与人们主观视觉不一致的弱点, 本文提出一种新的基于图像中介熵的图像保真度量方法, 对示例的评价结果表明, 该方法符合人们的主观感受.

关键词: 图像噪声; 中介真值程度; 滤波算法; 中介熵; 保真度量

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 05-0979-06

Medium Noise Removal Algorithm and Medium Measuring of Fidelity of Image

ZHOU Ning-ning^{1,2}, ZHAO Zheng-xu¹, QIN Weir-hu¹

(1. Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, china)

Abstract: This paper makes a new definition on image noise according to two features of noise known as the random and fuzzy after the analysis of the progress of image noise production. Following that a new image noise removal algorithm based on the measuring of medium truth scale is given. By sample simulation and classical PSNR evaluation, it shows the image noise removal algorithm based on measuring of medium truth scale brings about a better noise removal effect compared with the classic one, which will lead to its practicable and effective applications in noise removal and image restoration. In addition, a new measuring method of fidelity of image based on image entropy is introduced in this paper to reduce the common deviation between the classical assessment results such as PNSR and the human subjective perception as well as its validity is proved by a sample assessment.

Key words: image noise, medium truth scale, noise removal algorithm, medium entropy, measuring of fidelity

1 引言

图像去噪、图像复原是数字图像处理中一个非常重要的研究领域. 均值滤波和中值滤波是经典的去噪算法, 但它们在抑制噪声的同时, 使图像边缘变得模糊. 在不断地对传统滤波算法改进^[1-4]的同时, 也产生了许多基于不同数学方法的图像滤波算法, 例如基于小波理论的滤波算法^[5,6], 基于遗传算法的滤波算法^[7], 基于粗集的滤波算法^[8]以及基于模糊理论的滤波算法^[9,10]等. 受到去噪和保留有用高频信息边缘的困扰, 探求一种既能去除噪声又有效保持图像细节的方法, 一直是图像增强和复原处理中的研究热点.

图像增强是为了改善图像的主观视觉质量; 图像复原是用于补偿图像的降质, 保真度是衡量复原图像质量的一个重要判据. 传统图像保真度评价方法, 例如: MSE (均方误差)、PSNR (峰值信噪比), 简单易行, 但在某些

情况下, 所求得的结果常与人们主观视觉效果不一致. 近年来, 一些基于人眼的视觉感知模型^[11-15]和视觉兴趣区模型^[16]的图像评价方法被提出. 但这些方法很多是建立在很强的假设基础上的, 存在着一些不足. 因此, 研究新的图像保真度量方法是非常有意义的.

本文首先根据图像噪声的产生原因, 区分了图像噪声的随机性和模糊性, 提出新的图像噪声定义, 同时以中介真值程度的数值化度量为基础, 设计了新的图像去噪滤波算法, 最后, 提出利用图像中介熵对复原图像保真度进行度量的新方法.

2 图像噪声

2.1 经典定义

目前, 对数字图像噪声的定义主要有两种:

(1) 妨碍人的视觉器官或系统传感器对所接收的图

像信息进行理解或分析的各种因素称为噪声^[17].

(2)根据噪声对图像的影响模型来定义的.对于加性噪声模型,噪声 $n(x, y)$ 的定义为:

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

其中 $f(x, y)$ 为理想图像, $g(x, y)$ 为实际输出的一幅退化图像.

上面的定义表明:噪声是不可预测的随机信号,它的出现是不确定的,随机的,只能用概率统计的方法去认识.实际上图像噪声本身也具有模糊性.以上两种定义没有明确区分图像噪声的随机性和模糊性.

2.2 新的定义

模糊性和随机性是不确定性的两个方面,它们具有容易被辨识的特征,并具有独立的概念.模糊性是指事件已经出现,在事件本身的含义是否精确方面表现出不确定的性质;随机性是指“事件本身有明确的含义”,在“事件出现与否上表现出不确定性”^[18].因此,不确定性是模糊性和随机性的上位概念.通过对图像噪声产生过程的分析,根据图像噪声随机性和模糊性的特征,提出新的图像噪声的定义如下:

定义 1 图像中具有不确定性的误差称为图像噪声.

定义 2 只能用统计方法来认识的图像噪声称图像的随机噪声.

定义 3 无法精确判断的已经出现的图像噪声称图像的模糊噪声.

由于图像的随机噪声和模糊噪声表现出的基本性质不同,因此在进行图像处理时,应针对各自的基本特征区别对待.在图像采集和传输过程中,噪声有明确的含义,但是它的出现是不确定的,此时图像噪声主要表现出随机性.对一幅退化了的静态图像而言,对图像噪声的处理应针对其模糊性.

3 中介数学系统简介

中介原则由 20 世纪 80 年代我国两位学者朱植楹、肖奚安提出,并以自创的中介逻辑演算系统 (medium logic)^[19] 作为推理工具,建立了以中介公理集合论 (medium axiomatic set)^[20] 为主要内容的中介数学系统.

3.1 中介数学系统的基本符号^[20]

中介数学系统中记 P 为一谓词 (概念或性质), x 为任一变元, $P(x)$ 表示变元 x 完全具有性质 P . 符号“ \neg ”称反对对立否定词,把谓词 P 的反对对立面记为 $\neg P$,则 P 与 $\neg P$ 就抽象地表示了一对反对对立概念;符号“ \sim ”称模糊否定词,反映了对立物在转化过程中的中介状态,其语义深刻地反映了模糊性.

3.2 中介真值程度的度量

3.2.1 个体真值程度的度量

根据超态概念^[21],将一般数值化应用的数值区域划

分为对应谓词真值的 5 个区域,即 $\neg^+ P$ 、 $\neg P$ 、 $\sim P$ 、 P 、和 $^+ P$,如图 1 所示.在“真”数值区域 \mathbb{T} , α_T 是谓词 P 的 ε_T 标准度;在“假”数值区域 \mathbb{F} , α_F 是 $\neg P$ 的 ε_F 标准度.

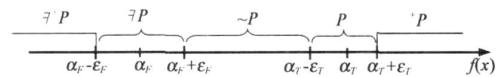


图 1 数值区域与谓词的对应关系

每个数值区域中个体真值程度可以通过计算相对于 P (或 $\neg P$) 的距离比率函数^[21] $h_T(y)$ (或 $h_F(y)$) 得到.

3.2.2 集合真值程度的度量

离散型集合 X 对 P (或 $\neg P$) 的真值程度可以由集合对于 P (或 $\neg P$) 的加性真值度^[22] $A_T(x)$ (或 $A_F(x)$) 和平均加性真值度^[22] $A_{TM}(x)$ (或 $A_{FM}(x)$) 来衡量.

3.3 模糊程度的度量

3.3.1 离散中介熵^[22]

对离散集合模糊程度量化的度量,可以通过计算离散中介熵 $H^-(b)$ ^[22] 得到.

3.3.2 中介熵表示的模糊程度

记 $\frac{1}{n \log 2} H^-(b)$ 为 v_D ,称之为中介熵表示的离散模糊程度,简称离散模糊程度^[22].离散模糊程度是一种描述集合所含模糊性的度量.

4 图像的中介滤波算法

4.1 图像灰度的真值程度度量

设 $X = [x(i, j)]_{M \times N}$,表示大小为 $M \times N$ 的数字图像,其灰度级为 L , $G = \{0, 1, 2, \dots, L-1\}$ 表示所有灰度值的集合, $x(i, j) \in G$ 是坐标 (i, j) 处像素的灰度值.假设中心点的灰度值为 $x(i, j)$,则该图像的灰度值矩阵为:

$$X(i, j) = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & x(i-1, j-1) & x(i-1, j) & x(i-1, j+1) & \vdots \\ \vdots & x(i, j-1) & x(i, j) & x(i, j+1) & \vdots \\ \vdots & x(i+1, j-1) & x(i+1, j) & x(i+1, j+1) & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2)$$

在像素灰度级用 8bit 表示的灰度图像中,共分 256 种灰度等级.灰度值的范围为 $0 \sim 255$,灰度值越小,对应像素的颜色越黑;灰度值越大,对应像素的颜色越白.用对立观点看,黑与白是一组反对对立面,并存在过渡.

4.1.1 单个像素点灰度的真值程度

若采用相对于白的真值程度进行衡量,记谓词 $W(x)$ 表示 $x(i, j)$ 为白, $^+ W(x)$ 表示 $x(i, j)$ 为超白, $\neg W(x)$ 表示 $x(i, j)$ 为黑, $\neg^+ W$ 表示 $x(i, j)$ 为超黑,并存在过渡 $\sim W(x)$,建立对应于 W 与 $\neg W$ 的标准度 α_T 和 α_F ,如图 2 所示.

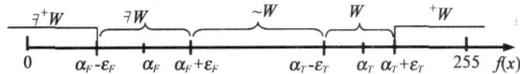


图 2 图像灰度值区域与谓词白的对应关系

利用像素点 $x(i, j)$ 相对于 $W(x)$ (白) 的距离比率函数 $h(x(i, j))$ 的值来确定该像素点是白的真值程度. 该数值越大, 表明该像素点对白的真值程度越高.

4.1.2 图像集合灰度的真值程度

定义 4 在图像灰度集合 G 中, $AG_{TM}(x(i, j)) = \sum_{i=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{j=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} h(x(i, j))$ 称为图像集合 G 相对于 W 的

加性真值度, $AG_{TM}(x(x, j)) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{j=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} h(x(i, j))$ 称为图像集合 G 相对于 W 的平均加性真值度.

在图像的灰度值矩阵中, 属于同一集合体的像素, 它们的灰度值将高度相关, 而如果某一像素点是噪声, 则该像素的灰度值与其邻点的灰度显著不同, 即相关性比较差.

4.2 基于中介真值程度度量的图像去噪算法设计

灰度图像中, 噪声可看做是对灰度的干扰. 记谓词 $Q(x)$ 表示 $x(i, j)$ 为正常图像点, $\bar{Q}_L(x)$ 和 $\bar{Q}_R(x)$ 表示 $x(i, j)$ 为噪声点, 存在过渡 $\sim Q_L(x)$ 和 $\sim Q_R(x)$ 表示 $x(i, j)$ 介于噪声和正常图像点之间. 将多值图像的各个灰度数值区间对应于谓词的不同真值区域 ($\bar{Q}_L, \sim Q_L, Q, \sim Q_R$ 和 \bar{Q}_R), 并建立对应于 Q 与 \bar{Q}_L 的标准度 α_{FL}, α_{TL} , 以及对应于 Q 与 \bar{Q}_R 的标准度 α_{FR}, α_{TR} , 如图 3 所示. 其中 $[a, b]$ 是以 $x(i, j)$ 为中心的邻域中正常图像点的灰度域, 记为集合 A .

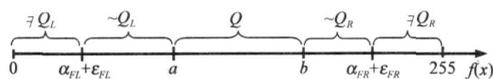


图 3 图像灰度值区域与谓词正常图像点的对应关系

根据图 3, 有:

$$h(x(i, j)) = \begin{cases} 0, & x(i, j) \text{ 在与 } \bar{Q}_L \text{ 对应的数值区域内} \\ \frac{|x(i, j) - (\alpha_{FL} + \epsilon_{FL})|}{|\alpha - (\alpha_{FL} + \epsilon_{FL})|}, & x(i, j) \text{ 在与 } \\ & \sim Q_L \text{ 对应的数值区域内} \\ 1, & x(i, j) \text{ 在与 } Q \text{ 对应的数值区域内} \\ \frac{|x(i, j) - (\alpha_{FR} + \epsilon_{FR})|}{|b - (\alpha_{FR} + \epsilon_{FR})|}, & x(i, j) \text{ 在与 } \\ & \sim Q_R \text{ 对应的数值区域内} \\ 0, & x(i, j) \text{ 在与 } \bar{Q}_R \text{ 对应的数值区域内} \end{cases} \quad (3)$$

距离比率函数 $h(x(i, j))$ 的值确定了点 $x(i, j)$ 是正常图像点的程度.

当 $h(x(i, j)) = 1$, 表示点 $x(i, j)$ 是正常图像点, 进

行图像复原时, 该点的灰度值应保留.

当 $0 < h(x(i, j)) < 1$, 表示点 $x(i, j)$ 介于正常图像点和噪声之间, 点 $x(i, j)$ 处复原图像的灰度值由该点复原前的灰度值 $x(i, j)$, 与以 $x(i, j)$ 为中心的去心邻域中正常图像灰度域中各点灰度值的算术均值加权运算得到.

当 $h(x(i, j)) = 0$, 表示点 $x(i, j)$ 是噪声, 应去除, 进行图像复原时, 该点的灰度值由以 $x(i, j)$ 为中心的去心邻域中正常图像灰度域中各点灰度值的算术均值来取代.

综上所述, 新的图像复原算法如下:

$$x'(i, j) = h(x(i, j)) \times x(i, j) + (1 - h(x(i, j))) \times \bar{x}(s, t), \quad (s, t) \in A \text{ 且 } s \neq i, t \neq j \quad (4)$$

其中, $x'(i, j)$ 代表复原后图像在 (i, j) 点的灰度值, $\bar{x}(s, t)$ 为以 $x(i, j)$ 为中心的去心邻域中正常图像灰度域中各点灰度值的算术均值.

新算法的具体实现步骤如下:

(1) 确定噪声窗口.

在图像的灰度矩阵中, 取一个 $(2n - 1) \times (2n - 1)$, 中心在 (n, n) 的窗口. 以该子窗口中像素的灰度值为论域, 在其上建立一个集合记为 X , 该区域各点的灰度值为 $x(i, j)$, 记集合 $Y = X - x(n, n)$, 即 Y 为以 $x(n, n)$ 为中心的去心邻域. $x(n, n)$ 即为判断是否为噪声的对象.

(2) 根据噪声的类型, 确定正常图像的灰度域.

对于椒盐噪声, 记 B 为集合 X 中除一个最大灰度的点和一个最小灰度的点的集合, 即

$$B = X - \max(X) - \min(X)$$

记 A 为 $x(n, n)$ 的正常灰度域, 即

$$A = [\min(B - \max(B) - \min(B)), \max(B - \max(B) - \min(B))], \text{ 记为 } [a, b].$$

(3) 确定中心点是正常图像点的程度.

灰度图像只包含亮度信息, 根据色度学知识, 在很宽的背景亮度 L 值变动范围内, 人眼能察觉到的最小亮度差异 (亮度分辨能力) $\Delta L_{\min}/L$ 近似等于 0.02, 根据相对灵敏度实验结果, 在背景亮度为白色 (灰度值 = 0) 或黑色 (灰度值 = 255) 时, 人眼所能分辨的最小灰度变化值近似等于 $3^{[23]}$, 所以取 $\alpha_{FL} + \alpha_{FL} = 3, \alpha_{FR} + \alpha_{FR} = (255 - 3) = 252$. 根据式 (3) 计算出相应的距离比率函数值, 确定出中心点是正常图像点的程度.

(4) 根据式 (4) 确定中心点复原后的灰度值.

(5) 在大小为 $M \times N$ 的数字图像的灰度值矩阵中, 从左到右, 从上到下, 遍历整个矩阵取 $(2n - 1) \times (2n - 1)$ 的矩形子图像, 并利用上述步骤进行图像复原. 就可以得到一幅复原的图像.

4.3 仿真结果及分析

为了检验本文提出的基于中介真值程度度量的滤

波器对噪声进行滤除的有效性,用被方差为 0.2 的椒盐噪声污染的图像作为输入图像,取 $n=2$,分别利用均值滤波、中值滤波、模糊滤波^[10]和中介滤波对图像进行了复原.实验结果如图 4 所示:



图 4 方差为 0.2 的椒盐噪声污染的图像仿真结果

下面从主观和客观两个方面对去噪质量进行评价.

(1) 主观视觉效果更好.从图 4 可以看到,新算法复原的图像比均值滤波、中值滤波和模糊滤波复原的图像更清晰,视觉效果更好,而且,在保护图像细节方面,新算法也强于另外三种滤波器.

(2) 客观评价效果较好. PSNR 是经典的图像复原评价方法,其定义如下式:

$$PSNR = 10 \lg \frac{X_{\max}^2}{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x(i, j) - \hat{x}(i, j)]^2} \quad (5)$$

其中 $x(i, j)$ 代表未被污染的原始图像在 (i, j) 点的灰度值, $\hat{x}(i, j)$ 代表复原后图像在 (i, j) 点的灰度值; M 和 N 分别代表图像的宽和高; X_{\max} 为图像的最大灰度值.

采用 PSNR 评价方法,分别对均值滤波、中值滤波、模糊滤波^[10]和本文提出的中介滤波算法进行了比较,结果见表 1.

表 1 不同方差下四种滤波算法 PSNR 比较

椒盐噪声(方差)	PSNR			
	中值滤波	均值滤波	模糊滤波	中介滤波
0.02	125.73	87.88	125.74	159.28
0.05	124.86	87.00	125.16	154.07
0.10	123.75	86.31	124.98	141.83
0.20	121.43	85.62	115.79	132.50

从表 1 结果可以看到,在不同的噪声强度下,新的滤波器的性能均优于另外三种滤波器,尤其是当噪声的强度较大时,其优势更加明显.

5 图像的中介保真度量方法

人们经常会用相似、相差大等词汇来描述主观视觉对图像保真度的感受,相似是一个模糊的概念,相似性

的模糊程度可以利用中介熵来定量描述.本文利用图像中介熵对复原图像的保真程度进行定量的描述.

5.1 图像中介熵

根据中介熵的定义,并结合图像的实际模型,定义一种图像中介熵如下:

定义 5 在图像灰度集合 G 中

$$H^-(g) = \sum_{i=- (M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{j=- (N-1)/2}^{(N-1)/2} S(h_-(x(i, j))), \quad (6)$$

称为图像的中介熵.

其中 $S(h_-(x(i, j))) = -h_-(x(i, j)) \log h_-(x(i, j)) - (1 - h_-(x(i, j))) \log(1 - h_-(x(i, j)))$

5.2 基于图像中介熵的保真度量

设 $x(i, j)$ 代表未被污染的原始图像在 (i, j) 点的灰度值, $\hat{x}(i, j)$ 代表复原后图像在 (i, j) 点的灰度值. $x(i, j)$ 和 $\hat{x}(i, j)$ 的相似程度,可通过计算距离比率函数 $h(i, j)$ 得到,根据 $x(i, j)$ 的灰度值范围,分以下三种情况加以讨论:

(1) $x(i, j) = 0$, 记谓词 $S(x)$ 表示点 x 是黑色,对应于 S 的图像灰度数值区域是一个点,对应于 $\sim S$ 的图像灰度值范围为 $1 \sim 255$, 如图 5 所示.

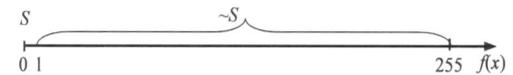


图 5 谓词 $S(x)$ 是黑色时, 图像灰度数值区域与谓词的对应关系

根据图 5, 有:

$$h_{i, j} = \begin{cases} 1, & x(i, j) = 0 \\ \frac{256 - x(i, j)}{256}, & 0 < x(i, j) < 255 \end{cases} \quad (7)$$

(2) $0 < x(i, j) < 255$, 记谓词 $S(x)$ 表示点 x 不是白色也不是黑色, 对应于 S 的图像灰度数值区域是一个点, 对应于 $\sim S_L$ 的图像灰度值范围为 $0 \sim x(i, j) - 1$, 对应于 $\sim S_R$ 的图像灰度值范围为 $x(i, j) + 1 \sim 255$, 如图 6 所示.

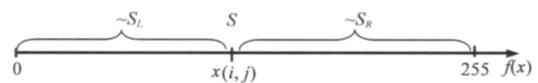


图 6 谓词 $S(x)$ 不是白色也不是黑色时, 图像灰度数值区域与谓词的对应关系

根据图 6, 有:

$$h(i, j) = \begin{cases} \frac{x(i, j) + 1}{x(i, j) + 1}, & 0 < x(i, j) < x(i, j) \\ 1, & x(i, j) = x(i, j) \\ \frac{256 - x(i, j)}{256 - x(i, j)}, & x(i, j) < x(i, j) < 255 \end{cases} \quad (8)$$

(3) $x(i, j) = 255$, 记谓词 $S(x)$ 表示点 x 是白色, 对应于 S 的图像灰度数值区域是一个点, 对应于 $\sim S$ 的图像灰度值范围为 $0 \sim 254$, 如图 7 所示.



图 7 谓词 $S(x)$ 是白色时, 图像灰度数值区域与谓词的对应关系

根据图 7, 有:

$$h(i, j) = \begin{cases} \frac{x(i, j) + 1}{256}, & 0 \leq x(i, j) < 255 \\ 1, & x(i, j) = 255 \end{cases} \quad (9)$$

保真度是通过比较标准图像和它的退化图像的“接近程度”来衡量的,“接近程度”是一个模糊的概念,可以利用复原后的图像与原始图像之间的相似性的模糊程度来衡量. 本文提出的图像中介保真度量方法是利用图像中介熵表示的离散模糊程度^[22]来衡量图像之间的相似性. 根据离散模糊程度^[22]的定义,并结合图像的实际模型,给出利用图像中介熵表示的离散模糊程度,如下式:

$$V = \frac{1}{(M \times N) \log_2 \left(\frac{1}{2^{-(M-1)/2} - 2^{-(N-1)/2}} \right) - (1 - h(i, j)) \log(1 - h(i, j)) - h(i, j) \log h(i, j)} \quad (10)$$

V 的值越小,说明模糊程度越小.

定义 6 记 $1-V$ 为 F_m ,称之为图像中介熵表示的保真程度. F_m 的值越大,表示图像的保真度越高,即复原图像与原始图像相似性高.

5.3 结果分析

利用图像中介熵表示的保真程度作为评价的客观准则来判定图像复原的效果,分别对不同方差椒盐噪声污染的图像进行均值滤波、中值滤波、模糊滤波^[10]和本文提出的中介滤波算法进行了比较,结果见表 2.

表 2 不同方差下四种滤波算法的保真程度比较

椒盐噪声(方差)	F_m			
	中值滤波	均值滤波	模糊滤波	中介滤波
0.02	0.8476	0.6995	0.8113	0.9746
0.05	0.8432	0.6407	0.8053	0.9680
0.10	0.8364	0.5709	0.7999	0.9580
0.20	0.8323	0.4732	0.7850	0.9355

从表 2 结果可以看到,采用新的滤波方法复原的图像的保真度最高.随着椒盐噪声的增加,中值滤波、均值滤波、模糊滤波^[10]和中介滤波复原的图像保真度降低,这和人们的主观感受是一致的.

6 结束语

我们用中介真值程度的数值化度量方法对图像处理中的一些问题进行了研究,要点如下:

(1) 通过分析噪声的产生原因和对图像的影响,区分了图像噪声的随机性和模糊性,提出噪声、随机噪声和模糊噪声的新概念,并定义了图像噪声、图像的随机噪声和图像的模糊噪声.

(2) 设计了有别于其它数学方法的新图像去噪滤波

算法.

(3) 采用 3×3 中介滤波算法,对被方差为 0.2 的椒盐噪声污染的图像进行了处理,仿真结果表明,该方法更具有实用性和有效性.

(4) 提出采用图像中介熵对复原图像的质量进行评价的新方法,结果表明该方法符合人的视觉特性.

我们将继续采用中介真值程度的度量方法对图像处理中的模糊现象进行研究,进一步提出自适应的方法自动选择参数,以及设计图像分割、边缘检测等领域的新方法是我们下一步研究的重点.

致谢 衷心感谢审稿专家对本文提出了许多非常有价值的建议.

参考文献:

- [1] 张宇,王希勤. 自适应中心加权的改进均值滤波算法[J]. 清华大学学报(自然科学版),1999,39(9):76-78. Zhang Yu, Wang Xi-qin. Adaptive center weighted modified trimmed mean filter[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 1999, 39(9):76-78. (in Chinese)
- [2] 胡浩,王明照,杨杰. 自适应模糊加权均值滤波器[J]. 系统工程与电子技术,2002,24(2):15-17. Hu Hao, Wang Ming-zhao, Yang Jie. Adaptive fuzzy weighted mean filter[J]. System Engineering and Electronics, 2002, 24(2):15-17. (in Chinese)
- [3] 刘兴伟,殷国富,罗小宾,等. 工程扫描图的一种新型的自适应中值滤波算法[J]. 中国机械工程,2002,13(5):403-405. Liu Xing-wei, Ying Guo-fu, Luo Xiao-bin, et al. A new style adaptive median filter algorithm for engineering drawing[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(5):403-405. (in Chinese)
- [4] 倪臣敏,叶懋冬,陈孝春. 一种改进的自适应中值滤波算法[J]. 中国图象图形学报,2006,11(5):672-678. Ni Chen-min, Ye Mao-dong, Chen Xiao-chun. An improved adaptive median filter algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(5):672-678. (in Chinese)
- [5] 李旭超,朱善安. 基于小波模极大值和 Neyman Pearson 准则阈值的图像去噪[J]. 中国图象图形学报,2005,10(8):964-969. Li Xu-chao, ZHU Shan-an. Image denoising based on wavelet modulus maxima and neyman-pearson principle threshold[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(8):964-969. (in Chinese)
- [6] Shark L, K, Yu C. Denoising by optimal fuzzy thresholding in wavelet domain[J]. Electronics Letters, 2000, 36(6):581-582.
- [7] 芦丽明,李言俊. 基于遗传算法的模糊熵图像分割算法[J]. 计算机仿真,2002,19(5):34-35.

- Lu Li-ming, Li Yan-jun. Fuzzy entropy thresholding method based on genetic algorithm[J]. Computer Emulation, 2002, 19(5):34 - 35. (in Chinese)
- [8] 胡一萍,徐涛.一种基于粗糙集的模糊数学形态学方法[J].数据采集与处理,2002,17(3):334 - 336.
- [9] 马彪,孟详固.图像模糊度参数估计与图像复原的实验及分析[J].微计算机应用,2006,27(5):513 - 516.
- [10] 王保平,范九伦,谢维信.基于模糊熵的多值图像恢复方法[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2004,31(2):214 - 217.
- [11] 丁绪星,朱日宏,李建欣.一种基于人眼视觉特性的图像质量评价[J].中国图象图形学报,2004,9(2):190 - 194.
Ding Xu-xing, Zhu Ri-hong, Li Jian. A criterion of image quality assessment based on property of HVS[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(2):190 - 194. (in Chinese)
- [12] Watson A B, Hu J, McGowan J F. III. Digital video quality metric based on human vision[J]. Journal of Electronic Imaging, 2001, 10(1):20 - 29.
- [13] S Winkler. A perceptual distortion metric for digital color video[A]. In proceeding of SPIE Human Vision and Electronic Imaging[C]. San Jose, USA, January 23 - 29, 1999, 3644:175 - 184.
- [14] Wen Xu, G Hauske. Picture quality evaluation based on error segmentation[A]. In proceeding of SPIE[C]. Chicago, USA, 1994. 2308. 1454 - 1465.
- [15] S Daly. The visible differences predictor: An algorithm for the assessment of image fidelity[A]. In Digital Image and Human Vision[M], A. B. Watson, editor. Cambridge, MA: MIT Press, 1993. 176 - 206.
- [16] 汪孔桥,沈兰荪,邢昕.一种基于视觉兴趣性的图象质量评价方法[J].中国图象图形学报,2000,5(4):300 - 303.
Wang Kong-qiao, Shen Lan-sun, Xing Ting. A quality assessment method of image based on visual interests[J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5(4):300 - 303. (in Chinese)
- [17] 贾永红.数字图像处理[M].武汉:武汉大学出版社,2003.9.
- [18] 汪培庄.模糊集合论及其应用[M].上海:上海科技出版社,1983.
- [19] 朱梧楨,肖奚安.中介逻辑的命题演算系统(1)[J].自然杂志,1985,8(4):315 - 316.
- [20] Xiao Xi 'An, Zhu Wujia. A system of medium axiomatic set theory[J]. Science in China (A), 1988, 11(2):1320 - 1335.
- [21] 洪龙,肖奚安,朱梧楨.中介真值程度的度量及其应用[1][J].计算机学报,2006,29(12):2186 - 2193.
Hong Long, Xiao Xi-An, Zhu WuJia. Measure of medium truth scale and its application[1][J]. Journal of Computer, 2006, 29(12):2186 - 2193. (in Chinese)
- [22] 洪龙,肖奚安,朱梧楨.中介真值程度的度量及其应用[2][J].计算机学报,2007,30(7):1551 - 1558.
Hong Long, Xiao Xi-An, Zhu WuJia. Measure of medium truth scale and its application[2][J]. Journal of Computer, 2007, 30(7):1551 - 1558. (in Chinese)
- [23] 陆洋.数字视频系统图像质量评价方法的研究[D].安徽大学硕士论文,安徽:安徽大学研究生院,2005.

作者简介:



周宁宁 女,1972年生于江苏南京,东南大学仪器科学与技术系精密仪器专业博士研究生,南京邮电大学计算机学院副教授.主要研究方向为虚拟现实、图像处理、计算机应用.
E-mail:zhounn@njupt.edu.cn



赵正旭 男,1960年生于山东青岛,东南大学长江学者特聘教授,精密仪器及机械专业博士生导师,任教于英国达华大学计算机科学与技术学院,博士生导师,从事计算机科学与工程专业.主要研究方向为虚拟现实技术和应用.



秦文虎 男,1969年生于江苏靖江,博士,东南大学仪器科学与技术系副教授.主要研究方向为检测与控制、人工智能和虚拟现实.