

结合小波变换和改进邻域权值的 FCM 算法^①

彭 婷, 王福龙

(广东工业大学 应用数学学院, 广州 510520)

摘 要: 针对改进的模糊 C 均值聚类算法在进行图像分割时构建的邻域权值函数未能同时考虑空间结构信息和灰度值域信息, 而导致对噪声敏感及边缘纹理信息的处理粗糙的问题, 提出了一种结合小波变换和改进邻域权值的 FCM 算法. 该算法首先在原始灰度图像的基础上进行小波多分辨率分析的自适应阈值去噪处理; 然后在重构图像上结合双边滤波的思想构建一个基于图像块局部空间邻域信息和灰度值域信息的改进邻域权值函数. 实验结果表明, 该算法比传统 FCM 算法以及 FCM 的改进算法有更高的分割精确度, 对强噪声更具鲁棒性, 图像边缘也更加平整.

关键词: 模糊 C 均值聚类; 图像分割; 小波变换; 双边滤波; 图像块; 邻域信息; 灰度信息

FCM Algorithm Combined with Wavelet Transform and Improved Neighborhood Weights

PENG Ting, WANG Fu-Long

(College of Applied Mathematics, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China)

Abstract: The neighborhood weight function built in image segmentation using the improved fuzzy c-means clustering algorithm fails to simultaneously consider space structure and grayscale range information, which results in the problem of noise sensitivity and rough dealing with edge texture information. To this problem, in this paper, a FCM algorithm combined with wavelet transform and improved neighborhood weights is proposed. First, the algorithm deals with the original gray image by using the adapt threshold denoising method, which is based on wavelet used for multi-resolution analysis. Second, it constructs an improved neighborhood weight function based on the local spatial neighborhood information and grayscale range information of the image patches by combining with the thought of bilateral filtering in the reconstructed image. The experiment results show that the proposed algorithm has a higher accuracy of segmentation than the traditional FCM algorithm and improved FCM algorithm and is more robustness to the strong noise with more smooth image edges.

Key words: fuzzy c-means clustering; image segmentation; wavelet transform; bilateral filtering; image patches; neighborhood information; grayscale information

图像分割是指将图像分成若干个具有独特性质的区域并提取感兴趣区域的技术和过程, 是完成图像识别、目标跟踪等复杂处理任务的关键步骤^[1]. 近年来, 聚类算法作为一种无监督的分割算法由于能够保留更多的原始图像信息, 因而受到了广泛的研究和关注. 特别是由 Dunn 提出, 并由 Bezdek 推广的模糊 C 均值 (Fuzzy C-mean, FCM) 聚类算法^[2], 通过对目标函数的

迭代优化实现了对数据集合的模糊划分, 获取了较好的图像分割效果. 但是传统的 FCM 算法在聚类过程中并未考虑像素的邻域空间信息和结构特征, 因此对噪声十分敏感, 对含噪图像以及纹理细节丰富的图像的分割效果并不理想.

为了有效地消除噪声, 达到更好的分割效果, 国内外很多学者结合邻域空间信息对传统 FCM 算法作

^① 基金项目: 广东省自然科学基金(S2011040004273)

收稿时间: 2015-05-13; 收到修改稿时间: 2015-06-08

出了改进. Ahmed 等^[3]人提出了基于空间约束的 FCM 算法(FCM-S), 该算法考虑了邻域像素对中心像素的影响, 具有一定的抗噪性, 但是算法在每次迭代中都需要对邻域信息进行一系列计算, 计算复杂度很高. 为了减少计算量, Chen 和 Zhang^[4]结合均值滤波思想和中值滤波思想提出了 FCM-S1 和 FCM-S2, 减少了计算时间, 改善了算法性能. Szilayi 等^[5]提出了增强型模糊 C 均值(enhanced FCM, EnFCM)算法, 该方法首先对图像进行均值滤波, 而后在其灰度直方图上进行模糊 C 均值聚类, 由于图像中灰度级的数量远远小于图像像素点的个数, 该算法大大降低了计算复杂度, 但是在进行均值滤波处理时, 会导致原始纹理细节信息的丢失, 造成图像边缘模糊. Cai 等^[6]结合局部空间和灰度信息, 提出快速通用 FCM 聚类算法(fast generalized FCM, FGFCM), 在一定程度上减弱了图像边缘的模糊, 但其中引入的控制参数无法通过实验自动获取, 分割精度也并不理想. Stelios 等^[7]提出了基于局部信息的 FCM 算法(fuzzy local information C-Means, FLICM), 结合局部空间信息和灰度信息构造新的局部邻域模糊因子, 该模糊因子不含任何参数, 具有自适应性. 同时该算法在迭代过程中使用原始图像, 避免了预处理可能导致的细节丢失, 但是由于其构造的局部空间的局限性, 导致图像分割过程中部分细节的丢失. Zhao 等^[8]结合了图像块和局部空间信息引入一个新的权重函数, 用高斯加权的欧式距离代替传统 FCM 目标函数中的欧氏距离, 提出了邻域加权的 FCM 算法(neighbourhood weighted FCM, NWFCM), 该方法能有效地保留图像结构信息, 对无噪图像或噪声强度较低的图像能得到较高的分割精度, 但是当噪声强度较大时, 分割精度不大理想, 且分割过程中对图像块的中心像素关注度不高, 容易造成边缘模糊.

本文在 NWFCM 算法的基础上, 提出了结合小波分析和改进邻域权值的 FCM 算法. 该算法首先对灰度图像进行小波多分辨率分解得到低频信息和高频信息, 在高频部分利用自适应阈值去噪算法去除含有噪声的小波系数, 再利用图像的低频部分和去除噪声后的高频部分进行小波重构; 然后借鉴双边滤波思想在重构图像上度量图像块像素间的相似性, 强调了图像块中心像素的影响, 构建一个基于图像块的局部邻域信息和灰度值域信息的权值函数, 用改进的加权距离取代目标函数中的欧氏距离; 最后通过对隶属度矩阵和聚

类中心的不断迭代优化进行分割, 有效地抑制了强度较大的噪声对分割的影响, 且对于边缘纹理信息丰富的图像, 具有更好的区域完整性, 分割精确度更高. 如图 1 所示给出了本文分割算法的总流程图.

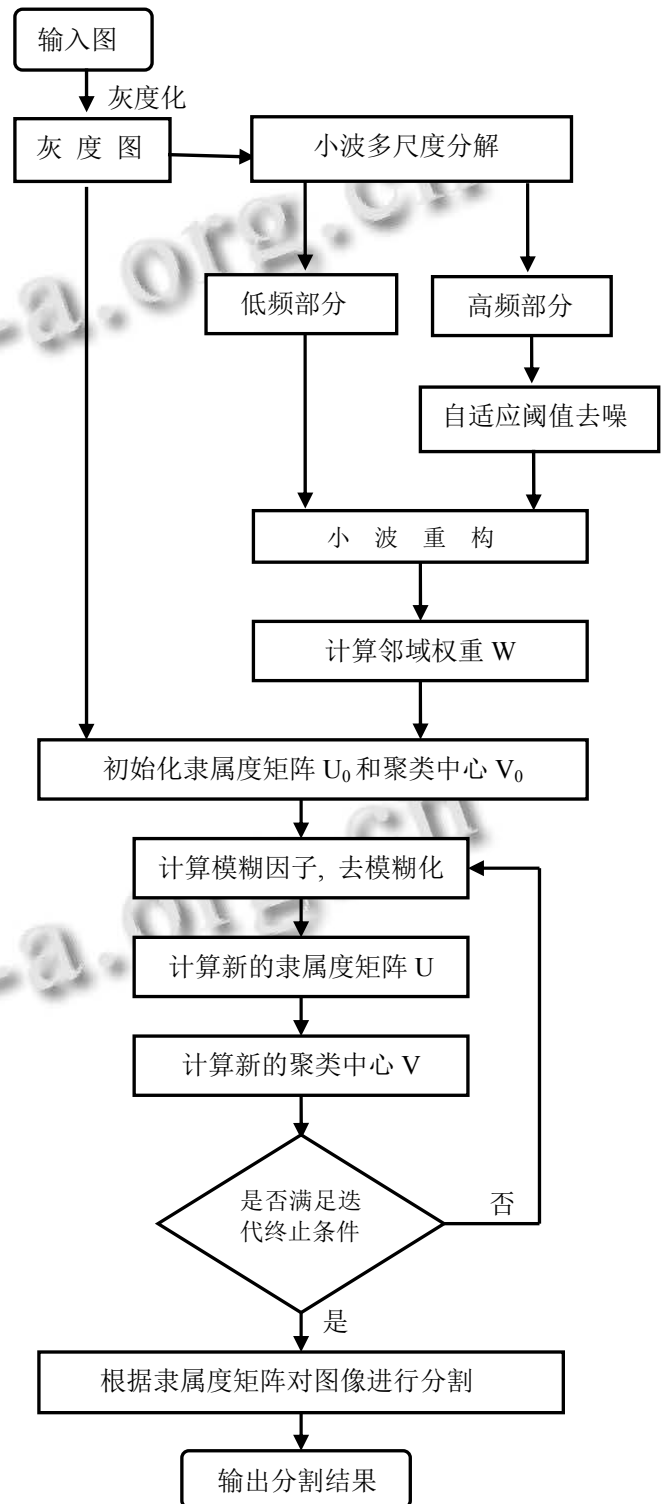


图 1 算法流程图

1 邻域加权模糊C均值聚类分割算法 (NWFCM)^[8]

NWFCM 算法的基本思想是结合图像块和局部空间信息定义了像素间的相似性度量, 用加权距离取代传统 FCM 算法目标函数中的欧氏距离, 通过不断迭代优化得到分割结果. NWFCM 算法的目标函数 J_{NWFCM} 定义如下:

$$J_{NWFCM} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij}^m d_N^2(x_i, v_j) \quad (1)$$

满足约束条件:

$$\sum_{j=1}^c u_{ij} = 1, u_{ij} \in [0, 1], \forall i \text{ 和 } 0 < \sum_{i=1}^n u_{ij} < n, \forall j \quad (2)$$

其中, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是样本集; c 为类别数; $m \in [1, \infty)$ 是模糊加权指数, 大量研究表明, m 的最佳选择范围为 $[1.5, 2.5]$, 通常取 $m = 2$ 较为理想; $V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\}$ 为聚类中心; u_{ij} 表示样本 x_i 对第 j 类的隶属度; $d_N(x_i, v_j)$ 为样本 x_i 到聚类中心 v_j 的加权距离, 定义为:

$$d_N(x_i, v_j) = \sum_{r \in N_i} \omega_{ir} d_{x_r, v_j} \quad (3)$$

d_{x_r, v_j} 是 x_r 和 v_j 的 l_1 距离, 即 $d_{x_r, v_j} = \sum \left| \{x_r\}_q - \{v_j\}_q \right|$, $\{x_r\}_q$ 和 $\{v_j\}_q$ 分别代表向量 x_r 和 v_j 的第 q 个元素, N_i 表示以像素 i 为中心的搜索窗口, 权重 ω_{ir} 由中心像素 i 与其邻域像素 r 的相似性确定, 且满足约束条件 $\sum_{r \in N_i} \omega_{ir} = 1$, 定义如下:

$$\omega_{ir} = \frac{1}{Z_i} \exp\left(-\frac{\|G_\sigma^*(X(S_i) - X(S_r))\|^2}{\lambda_g \sigma_i^2}\right), r \in N_i \quad (4)$$

S_i 表示以 i 为中心的图像块, $X(S_i) = (x_j, j \in S_i)$ 表示图像块 S_i 中所有像素灰度值构成的向量; $\|G_\sigma^*(X(S_i) - X(S_r))\|^2$ 表示两个图像块的高斯加权欧氏距离, 图像块大小为 $(2p+1) \times (2p+1)$, p 为正整数, σ 为高斯方差, 取 $\sigma = p/2$, λ_g 为权值的全局衰减参数,

$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{r \in N_i} \|x_i - x_r\|^2}{N_R}}$ 能够自适应的控制权值从而控制局部空间信息的影响, N_R 代表像素点 x_i 的邻域像素

个数, $Z_i = \sum_{r \in N_i} \exp\left(-\frac{\|X(S_i) - X(S_r)\|^2}{\lambda_g \sigma_i^2}\right)$ 为归一化因子

利用约束条件(2), 采用拉格朗日乘子法, 可推导出目标函数的两个迭代优化公式:

$$u_{ij} = \frac{\left(\sum_{r \in N_i} \omega_{ir} \|x_r - v_j\|\right)^{-2/(m-1)}}{\sum_{k=1}^c \left(\sum_{r \in N_i} \omega_{ir} \|x_r - v_k\|\right)^{-2/(m-1)}} \quad (5)$$

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n \xi_i u_{ij}^m}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m} \quad (6)$$

其中 $\xi_i = \sum_{r \in N_i} \omega_{ir} x_r$, 通过迭代不断更新式(5)、式(6), 直到算法收敛.

2 结合小波变换和改进邻域权值的FCM算法

NWFCM 算法将去噪和聚类同时进行处理, 避免了在图像预处理过程中精细纹理结构信息的丢失, 进一步提高了分割精度. 它的一个显著特点就是结合了图像块的思想, 用图像块之间的相似性度量像素点间的相似性, 进而构建邻域权值函数. 由于构建权值函数过程中综合考虑了像素空间欧氏距离和灰度距离, 因此能较完整地保留结构信息, 得到较好的分割效果. 但是像素间的相似性是通过计算图像块之间的高斯加权欧氏距离度量的, 在无噪或者低噪声图像中, 能得到较为准确的相似性度量, 然而在噪声强度比较大的图像中, 这种基于图像块内像素灰度值的加权欧氏距离会得到较大误差, 因此分割精确度不大理想. 此外, NWFCM 算法在构建邻域权值函数的过程中, 对边缘处图像块中心像素的关注度不高, 导致计算的权重不合理, 致使在边缘纹理信息较丰富的图像中, 容易造成边缘模糊.

针对上述问题, 本文在 NWFCM 算法的基础上结合小波变换和双边滤波思想进行了改进, 在经过小波多分辨率分析自适应阈值去噪处理的重构图像上, 借鉴双边滤波思想, 强调图像块中心像素的作用, 改进了权值函数, 使得分割精确度更高, 对噪声具有较强鲁棒性, 图像边缘更加平整, 具有更好的区域完整性.

2.1 小波多分辨率分析自适应阈值去噪算法^[9]

小波变换与傅里叶变换相比, 具有时频二维分辨率的特点, 因而能精确的从信号中提取信息. 而对函数或信号进行多尺度细化分析, 有效地推动了小波变换在图像分解和重构方面的应用, 解决了傅里叶变换

不能解决的许多困难问题,已被广泛应用于各个领域.小波基的构造是小波变换的核心部分,在图像去噪中,小波基选取的好坏直接影响到去噪的效果,图像去噪质量好坏取决于所选的小波基是否能将噪声与有效信息(纹理)较好的分开.由于正交小波基具有有限紧支集,且进行小波分解时具有正交性和数据冗余最小的优点,因此本文选用正交小波基 sym4 进行图像滤波.

多分辨率分析(MRA)理论^[10]由 Mallat 于 1989 年提出,从空间的概念上形象地说明了小波的多分辨率特性,并提供了正交小波变换的快速算法即 Mallat 算法.随着尺度由大到小的变化,在各尺度上可以由粗糙到精细地观察目标.由于信号各个不同的尺度或分辨率中常常包含有不同的物理相关特性,因此对于图像信号的应用来说,要正确理解图像信号,多分辨率分析方法就显得至关重要.

小波多分辨率分析自适应阈值去噪算法的基本过程是首先对二维图像进行多尺度分解,将图像分解为低频部分和高频部分,低频系数主要反映图像的基本轮廓信息,高频系数则反映图像的纹理细节和噪声,低频部分还可以逐级分解,分解后得到的各级子图像都包含原始图像的空间结构信息;然后根据信号和噪声在各个尺度上高频分解系数的不同表现,对每一层采用最小均方误差(LMS)算法构造自适应的阈值函数,这就保证了每层的阈值基本上是最优的,再对各层高频分解系数进行自适应阈值处理;最后在利用图像的低频部分和去掉噪声后的高频部分进行小波重构.该方法能有效的去除噪声,同时较好地保留了图像细节信息和纹理特征.

2.2 结合双边滤波思想改进权值函数^[11]

为了突出图像块中心像素的地位,本文借鉴双边滤波^[12]思想,任意一个像素 i 的估计值为

$$BF_i = \frac{1}{C_i} \sum_{r \in N_i} x_r \exp(-D_{ir}^2 / \rho^2) \times \exp(-|x_r - x_i|^2 / g^2) \quad (7)$$

其中, D_{ir} 为像素 i, r 的空间欧氏距离,度量空间差异对权值的影响; $|x_r - x_i|$ 为像素 i, r 的灰度距离,度量灰度差异对权值的影响; C_i 为归一化因子.在噪声方差较小时,能较好估计真实像素灰度差异,而噪声方差较大时,则不能很好的估计,甚至可能得到错误的估计.因此采用像素 i 的 3×3 邻域算术平均值 \bar{x}_i 代替 x_i ,能得到更好的结果.

故考虑图像块中心像素灰度差异的权值计算公式

为

$$\omega'_{ir} = \frac{1}{Z'_i} \exp(-\|G_\sigma * (X(S_i) - X(S_r))\|^2 / h^2) \times \exp(-D_{ir}^2 / \rho^2) \times \exp(-|\bar{x}_r - \bar{x}_i|^2 / g^2), r \in N_i \quad (8)$$

其中, Z'_i 为归一化因子,参数 h, ρ, g 控制指数函数的衰减程度.因此结合双边滤波思想的邻域加权距离 $d_B(x_i, v_j)$ 定义为

$$d_B(x_i, v_j) = \sum_{r \in N_i} \omega'_{ir} d_{x_r, v_j} \quad (9)$$

2.3 结合小波变换和改进邻域权值的 FCM 算法(WNWFCM)

本文结合了小波多分辨率分析自适应阈值去噪算法和双边滤波思想改进了邻域加权 FCM 算法(WNWFCM),目标函数定义为

$$J_{WNWFCM} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij}^m d_B^2(x_i, v_j) \quad (10)$$

运用拉格朗日乘子法,可得到模糊隶属度 U 和聚类中心 V 的迭代函数为

$$u_{ij} = \frac{\left(\sum_{r \in N_i} \omega'_{ir} \|x_r - v_j\| \right)^{-2/(m-1)}}{\sum_{k=1}^c \left(\sum_{r \in N_i} \omega'_{ir} \|x_r - v_k\| \right)^{-2/(m-1)}} \quad (11)$$

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n \xi_i u_{ij}^m}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m} \quad (12)$$

其中 $\xi'_i = \sum_{r \in N_i} \omega'_{ir} x_r$ 是一个线性加权和图像,可以预先计算出来.

算法的执行步骤如下:

步骤1. 对灰度图像进行小波多分辨率分析自适应阈值去噪处理,在重构图像上根据式(8)计算出权重,得到加权图像 ξ .

步骤2. 设置聚类类数 c , 模糊指数 m , 算法迭代终止阈值 ε , 初始迭代次数 $l = 0$, 最大循环迭代次数 T_{\max} , 初始隶属度 $U^{(0)}$ 和聚类中心 $V^{(0)}$

步骤3. 分别利用式(11)和式(12)更新隶属度 U 和聚类中心 V .

步骤4. 如果 $\|U^{l+1} - U^l\| < \varepsilon$ 或者 $k > T_{\max}$, 则停止迭代; 否则转到步骤3继续更新迭代.

步骤5. 用隶属度最大准则去模糊化,即将像素点归为隶属度最大的那一类中,用 C_i 表示像素点 i 所属的类别,则有

$$C_i = \arg_j \left\{ \max \{u_{ij}\} \right\}, j = 1, 2, \dots, c \quad (13)$$

3 实验结果及分析

本文用 WNWFCM 算法与传统 FCM 算法、FLICM 算法、NWFCM 算法对合成图像和自然图像进行分割比较, 实验中有关参数进行如下设置: $m=2$, $\varepsilon=10^{-3}$, $T_{\max}=500$, 搜索窗口和图像块大小分别取值 9×9 和 3×3 . 对于算法中的参数 h 、 ρ 、 g , 采用尝试错误法调节使其达到最好的效果, 其中在不加噪的图像中参数 h 取值为 0.05, 参数 ρ 取值为 0.03 达到最优, 随着图像中噪声的增加, 参数 h 、 ρ 的取值也随之增大; 参数 g 取值则对应于图像块的大小.

3.1 合成图像分割结果

图 2 给出了添加 1% 和 2% 高斯噪声的合成图像分别运用上述 4 种算法进行分割的实验结果, 类别数 $c=3$. 实验结果表明, 传统 FCM 算法由于没有考虑空间邻域信息对分割的影响, 对噪声十分敏感, 缺乏去除噪声的能力, 分割结果不理想; FLICM 算法、NWFCM 算法及 WNWFCM 算法分割效果明显比传统 FCM 算法好, 但 FLICM 算法和 NWFCM 算法的分割结果存在明显误分类现象, 且 WNWFCM 算法在图像边缘处分割效果优于前两种, 得到比较理想的分割结果.

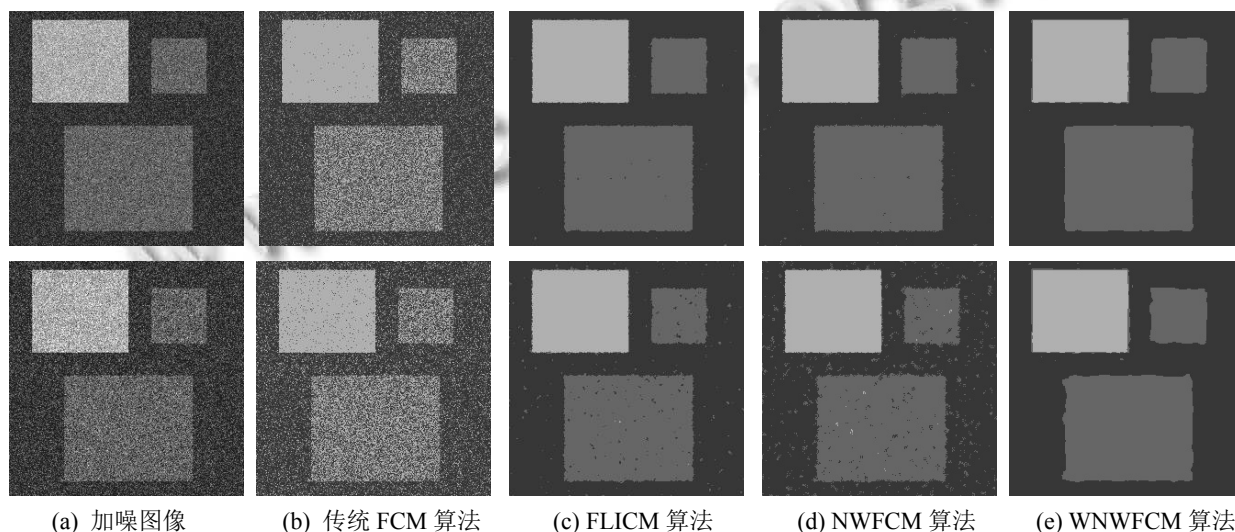


图 2 合成图像分割效果比较

为了量化地评估各种算法的分割结果, 本文定义合成图像的分割精度为

$$I = \frac{\text{正确分类的像素点数}}{\text{图像中像素点总数}} \times 100\%$$

表 1 给出了实验中传统 FCM 算法、FLICM 算法、NWFCM 算法以及 WNWFCM 算法对叠加不同强度高斯噪声合成图像的分割精确度. 从数据可以看出, 基于图像块的 NWFCM 算法和 WNWFCM 算法的分割精度明显高于传统 FCM 算法和 FLICM 算法, 这是由于当图像灰度值受到噪声干扰时, 这些基于像素点的方法不能给出一个合理的相似性度量, 导致像素被误分类, 而基于图像块的方法有效地克服了这个缺点, 较为准确地度量出像素的相似性, 且能有效地保留图像的结构纹理信息. 对比 NWFCM 算法和 WNWFCM 算法可以看出, WNWFCM 算法的分割精度高于 NWFCM 算法, 且噪声强度越大, WNWFCM 算法的优

越性越明显, 这是因为噪声强度越大, 图像灰度值受到的干扰也就越大, 仅仅通过度量图像块之间的欧氏距离不能准确的度量出像素间的相似性, 而 WNWFCM 算法结合了小波变换的思想, 在计算相似权重前先对图像进行小波多尺度分解, 再利用自适应阈值有效地去除了噪声的影响, 同时保留了较为完整的纹理结构特征, 从而得到了更为精确的相似性度量.

表 1 不同噪声水平下各算法分割精度的定量分析(%)

噪声类型	聚类算法			
	FCM	FLICM	NWFCM	WNWFCM
Gaussian 0.2%	96.34	97.80	99.25	99.38
Gaussian 0.5%	96.54	96.82	99.16	99.21
Gaussian 1%	71.46	95.64	97.81	98.77
Gaussian 2%	68.66	90.43	95.95	98.42
Gaussian 3%	66.81	83.40	94.42	98.34

3.2 自然图像分割结果

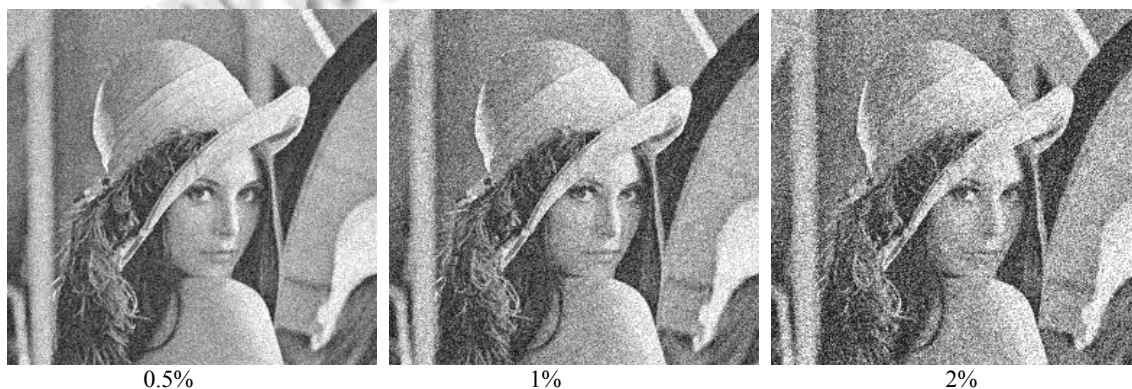
为了进一步验证 WNWFCM 算法的优越性, 本文

还运用 NWFCM 算法和 WNWFCM 算法对经典的 lena、couple、bird、peppers 图像进行分割. 图 3 是原始自然图像的分割结果, 可以看出, 这两种算法对图像基本的细节信息和纹理特征如 lena 的眼睛眉毛等都保留得较好, 但 WNWFCM 算法在边缘处的分割更为平整, 具有更好的区域完整性, 这是由于 NWFCM 算

法没有考虑中心像素的影响, 造成边缘模糊, WNWFCM 算法结合了双边滤波思想, 强调了中心像素的地位, 得到更好的分割效果. 图 4 为叠加不同强度噪声的 lena 图像的分割结果, 对比明显可以看出, WNWFCM 算法对噪声具有更强的抑制能力, 获得比 NWFCM 算法更理想的分割结果.



图 3 自然图像的分割结果



(a) 叠加不同高斯噪声的 Lena 图像



图 4 lena 加噪图像的分割结果对比

本文采用划分系数 V_{pc} ^[13]和划分熵 V_{pe} ^[13]对分割结果进行定量分析, 定义为

$$V_{pc} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij}^2}{n}$$

$$V_{pe} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c [u_{ij} \log u_{ij}]}{n}$$

其中, $0 \leq V_{pc} \leq 1$, $0 \leq V_{pe} \leq 1$, V_{pc} 越大分割效果越好, V_{pe} 越小分割效果越好. 表 2 给出了 NWFCM 算法和 WNWFCM 算法对 lena 图像及其加噪图像的分割结果比较, 实验结果显示, WNWFCM 算法得到的划分系数较大, 划分熵较小, 说明本文算法得到的分割结果更合理、更有效.

表 2 两种算法分割结果比较

图像	算法	V_{pc}	V_{pe}
Lena 图像	NWFCM 算法	0.8392	0.2696
	本文算法	0.8395	0.2691
高斯噪声 0.5%	NWFCM 算法	0.8032	0.3295
	本文算法	0.8357	0.2747
高斯噪声 1%	NWFCM 算法	0.7681	0.3870
	本文算法	0.8346	0.2757
高斯噪声 2%	NWFCM 算法	0.7081	0.4593
	本文算法	0.8368	0.2728

4 结论

本文结合小波变换和双边滤波思想对 NWFCM 算法进行了改进, 首先对图像进行小波多分辨率分析自适应阈值处理, 去除噪声的同时保留了图像的细节信息; 然后在重构图像上结合双边滤波思想建立了一个基于图像块相似性度量的权值函数, 用加权距离取代目标函数的欧氏距离对隶属度矩阵进行迭代优化, 实现图像的分割. 实验结果表明, 本文算法有效地消除了噪声对图像分割的影响, 具有较高的分割精确度, 在对边缘处的分割和区域完整性的保留方面, 也有显著地提高.

参考文献

- 徐瑞. 图像分割方法及性能评价综述. 宁波工程学院学报, 2011, 23(3): 76-79.
- Dunn JC. Pattern recognition with fuzzy objection function algorithm. New York: Plenum Press, 1981.
- 张翡, 范虹. 基于模糊 C 均值聚类的医学图像分割研究. 计算机工程与应用, 2014, 50(4): 144-151.
- Krinidis S, Chatzis V. A robust fuzzy local information

- C-means clustering algorithm. IEEE Trans. on Image Processing, 2010, 19(5): 1328–1337.
- 5 纪则轩,陈强,孙权森等.各向异性权重的模糊 C 均值聚类图像分割.计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(10): 1451–1459.
- 6 Cai W, Chen S, Zhang DQ. Fast and robust fuzzy C-means clustering algorithms incorporating local information for image segmentation. Pattern Recognition, 2007, 40(3): 825–838.
- 7 Gong MG, Liang Y, Shi J, et al. Fuzzy C-means with local information and kernel metric for image segmentation. IEEE Trans. on Image Processing, 2013, 22(2): 573–584.
- 8 Zhao ZX, Cheng LZ, Cheng GQ. Neighbourhood weighted fuzzy C-means clustering algorithm for image segmentation. IEEE Trans. on Image Processing, 2014, 8(3): 150–161.
- 9 张毅,王福龙.基于小波变换的分水岭图像分割.小型微型计算机系统,2014,35(6):1382–1386.
- 10 张郝.基于小波变换的图像去噪方法研究[硕士学位论文].北京:北京交通大学,2008.
- 11 单建华.改进权值函数的非局部均值去噪算法.中国图象图形学报,2012,17(10):1227–1231.
- 12 杨学志,徐勇,方静,等.结合区域分割和双边滤波的图像去噪新算法.中国图象图形学报,2012,17(1):40–48.
- 13 孟丽敏,宋余庆,朱峰.基于空间邻域加权的模糊 C-均值聚类及其应用研究.计算机应用研究,2010,27(10):3968–3973.