

基于模糊能量聚类的变分水平集遥感图像分割算法

罗丹, 赵丽

(新疆农业职业技术学院, 乌鲁木齐 831100)

摘要: 提出一种基于模糊能量聚类的变分水平集遥感图像分割算法, 该算法保留了变分水平集能够综合利用区域和边界信息的特点, 改善了变分水平集方法对带噪声遥感图像进行分割时存在去噪效果不明显、分割精度不高的问题。在通过变分法得到能量泛函取极小值的水平集函数演化方程的基础上, 采用了连续的最优隶属度函数, 得到模糊能量聚类的变分水平集。实验仿真及对比结果表明, 该算法分割后的图像区域具有明显灰度差和边界区分, 去噪效果良好, 而且分割精度优于对比算法。

关键词: 遥感图像; 图像分割; 模糊能量聚类; 变分水平集; 最优隶属度函数

中图分类号: V271.4; TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)08-0071-05

Variational Level Set Remote Sensing Image Segmentation Algorithm Based on Fuzzy Energy Clustering

LUO Dan, ZHAO Li

(Xinjiang Agricultural Vocational Technical College, Urumqi 831100, China)

Abstract: A variational level set remote sensing image segmentation algorithm based on fuzzy energy clustering is proposed. The algorithm preserves the feature of variational level set that can use region and boundary information together, while solving the problems of the method in segmenting remote sensing images with noise that the denoising effect is not obvious and the segmentation accuracy is not high. On the basis of obtaining energy functional minimum level set function evolution equation by the variational method, the optimal membership functions are used continually to get variational level set of fuzzy energy clustering. Experimental simulation and comparison results show that: 1) the image area segmented with this algorithm has obvious gray scale difference and boundary; and 2) the denoising effect is fine and the segmentation accuracy is better than the other algorithms in comparison.

Key words: remote sensing image; image segmentation; fuzzy clustering energy; variational level set; optimal membership function

0 引言

高分辨率的遥感图像能够展现出地形以及建筑物等更多的细节信息, 通过遥感卫星所获取的遥感影像, 可以应用于灾害监测、地图测绘、海陆搜救等多个方面^[1-3]。在执行大范围的搜索任务时, 往往需要遥感卫星获取该区域大量的遥感图像, 而遥感图像包含了所拍摄区域的大量形状特征信息、分布特征信息^[4-5], 在这种

情况下采用分类算法从遥感图像中寻找所需要的某些图像细节会消耗大量的时间, 当搜索任务紧迫时, 会对任务的执行进度带来严重影响。为此, 许多研究人员逐渐对遥感图像的分割方法展开了研究, 通过采用分割算法对遥感图像的边缘、纹理区域进行有效分割, 使得图像内的地形、物体之间的方差减小, 有助于提高分类算法对图像进行自动识别分类时的精确度。

研究遥感图像的分割方法有基于半监督聚类、粒子群优化、阈值提取等方法。采用监督聚类^[6]的方法可以根据图像所定义的度量标准, 在样本较少的情况下仍能进行有效的图像区域划分。文献[7]提出基于相似性度量的 Fusion-MRF 模型的遥感图像分割算法, 该方法通过遥感图像的相似性度量进行半监督聚类, 并利用多

收稿日期: 2014-09-10

修回日期: 2014-09-25

基金项目: 2013 年新疆维吾尔自治区高等职业院校专业基础课教学改革项目

作者简介: 罗丹(1980—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士, 讲师, 研究方向为计算机数字图像处理。

层马尔可夫随机场分割,虽然图像各个区域的单独分割效果较好,但失去了较多的纹理信息。采用粒子群优化的方法可以使图像中各个区域的粒子寻找最优位置而进行加速匹配,对图像区域进行有效分割。文献[8]提出基于分数阶达尔文的粒子群优化算法的多级高光谱遥感图像分割算法,基于分数阶达尔文粒子群优化(FODPSO),引入多阈值方法,采用分数阶导数控制粒子的收敛速度。该方法的分割精度与粒子迭代次数以及选择的最优位置有关,因此不能保证图像每次都能得到较好的分割结果。采用阈值提取是一种较为常规的图像分割方法,通过图像内各个区域之间的方差来设定阈值,通过阈值来对图像进行分割。文献[9]提出了一种基于频域分析和显著区域检测的遥感图像目标区域提取算法,通过将遥感图像从RGB空间转换到HSI空间,再采用自适应阈值分割的方法来提取图像的目标区域。阈值提取的方法虽然复杂性更低,但不同图像内的区域方差不同,因此分割效果也不稳定。

水平集方法是采用高维曲面来表达低维曲线,通过定义曲线上的能量函数,使函数收敛到极小值时曲线能收敛至目标边界,从而实现图像的区域分割^[10]。然而传统的水平集方法对于噪声较大、形状较为复杂的实际图像,往往得到的分割效果^[11-12]并不理想。为了改进水平集方法的这些缺陷,本文提出了模糊能量聚类的变分水平集,该方法不仅能够保留图像的区域和边界信息,而且在图像去噪、分割精度上都取得了较好的效果。

1 相关工作

水平集是由SETHIAN和OSHER于1988年提出的,是一种能将低维计算上升至高维,将平面闭合曲线表达为连续函数曲面的一种具有相同函数值的同值曲线。将目标曲线表示在零水平集函数 $\{\phi(x, y, t) = 0\}$ 中,在 t 时刻的零水平集为

$$\begin{cases} C(p, 0) = \{(x, y) | \phi(x, y, 0) = 0\} \\ C(p, t) = \{(x, y) | \phi(x, y, t) = 0\} \end{cases} \quad (1)$$

用 p 表示图像的任意参数化变量,则用于演化的平面闭合曲线表示为

$$C(p, t) = (x(p, t), y(p, t)) \quad (2)$$

设曲线的曲率为 k ,曲线的内向法向量为 \bar{N} ,则曲线沿着其法向量方向的演化可以用偏微分方程来表示,即

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\nabla \phi \cdot V(k) \bar{N} = \nabla \phi \cdot V(k) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} = V(k) |\nabla \phi| \quad (3)$$

初始水平集函数 ϕ 为初始曲线生成的符号距离函数,即

$$\phi = \begin{cases} (-d(x, y), C) & \text{位于 } C \text{ 内} \\ 0 & \text{位于 } C \text{ 边上} \\ d((x, y), C) & \text{位于 } C \text{ 外} \end{cases} \quad (4)$$

采用传统的水平集方法在演化过程中需要周期性地对水平集函数进行校正,而且重新执行初始化需要进行多个迭代步骤,计算量非常大,演化速度较慢。

为了解决这个问题,文献[13]引入一个惩罚项到能量泛函

$$E_g(\phi) = \mu \int_{\Omega} \frac{1}{2} (|\nabla \phi| - 1)^2 dx dy + \lambda \int_{\Omega} g \xi(\phi) |\nabla \phi| dx dy + \sigma \int_{\Omega} g f(-\phi) dx dy \quad (5)$$

式中: ϕ 表示水平集函数; μ , λ 和 σ 分别代表3种能量控制的权值参数; Ω 表示图像域; $f(\cdot)$ 表示一个Heaviside函数,狄拉克函数 $\xi(\cdot)$ 是其导数。

关于图像的梯度定义为

$$g = \frac{1}{1 + |\nabla H(x) \times I|^2} \quad (6)$$

式中: $H(\cdot)$ 表示带标准偏差的高斯函数; I 表示要被分割的图像。但函数 g 只考虑了图像的梯度,这导致了在含噪图像中算法的鲁棒性较差。

文献[14]利用分段常数函数来逼近被分割的图像,提出一种基于新水平集的非均匀图像分割方法,拟合误差作为能量函数的外部能量,即

$$E_g(\phi) = \mu \xi(\phi) \int_{\Omega} |\nabla \phi| dx dy + \sigma \int_{\Omega} f(\phi) dx dy + \alpha \int_{\Omega} |I - A|^2 dx dy + (1 - \alpha) \int_{\Omega} |I - B|^2 dx dy \quad (7)$$

式中, α 和 $1 - \alpha$ 分别表示内部和闭曲线外的像素灰度平均值。由于此方法只利用区域信息驱动的曲线边界,因此某些细节部分的分割效果并不明显。

2 VLFC 算法

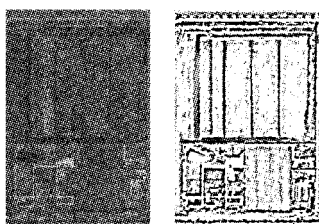
2.1 变分水平集

在图像分割中采用变分水平集的方法,定义图像域为 $\Omega \in \mathbf{R}^2$,令图像函数表示为 $f(x) : \Omega \rightarrow \mathbf{R}$,图像分割等效为将图像域 Ω 划分多个次域 k 的最小化问题,即

$$\begin{aligned} \zeta_g(\phi_1, \dots, \phi_k) = & \sum_{i=1}^k u_i \int_{\Omega} \frac{(f(x) - c_i)^2}{\sigma_i} H(\phi_i(x)) dx + \\ & \sum_{i=1}^k \lambda \int_{\Omega} g(f(x) | \nabla H(\phi_i(x)) |) dx + \\ & \sum_{i=1}^k \sigma_i \int_{\Omega} \left(\sum_{i=1}^k H(\phi_i(x)) - 1 \right) dx \end{aligned} \quad (8)$$

式中,图像灰度是均值为 c_i 的高斯分布,标准偏差为 σ_i 。变分水平集分割带有噪声的遥感图像如图1a所示,从图1b中可以看出分割后的图像仍然受到噪声的

影响。



a 原始图像 b 分割后图像的效果

图1 变分水平集图像分割效果

Fig.1 Effect of the variational level set image segmentation

为了使带噪声的遥感图像仍然得到较好的分割效果,本文在变分法得到能量泛函取极小值的水平集函数演化方程的基础上,引入了一种讨论图像能量分布的模糊聚类方法,得到模糊能量聚类的水平集方法。

2.2 基于模糊能量聚类的变分水平集

2.2.1 模型的创建

大多数现有的模糊聚类算法是基于离散数据,并利用隶属度矩阵来确定每个数据的归属,该矩阵难以直接应用于变分公式中。因此本文采用连续的隶属函数,在变分水平集的基础上,提出模糊能量聚类的变分水平集模型

$$\zeta_g(\phi_i, \mu_i, c_i) = \sum_{i=1}^k \int_{\Omega} \mu_i(x) \int_{\Omega} G(x-y)(E(y) - c_i)^2 dy H(\phi_i(x)) dx \quad (9)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^k H(\phi_i(x)) = 1, \quad \sum_{i=1}^k \mu_i(x) = 1$$

式中:约束方程 $\sum_{i=1}^k H(\phi_i(x)) = 1$,为聚类区重叠和空白部分的惩罚项; $\sum_{i=1}^k \mu_i(x) = 1$,则表示自然约束; $G(x-y)$ 表示点扩展函数; $E(\cdot)$ 为能量函数。在某一个图像域中点扩展后的能量分布方程为

$$\tilde{E}(x) = \int_{\Omega} G(x-y)E(y) dy$$

当点扩展函数 $G(x)$ 满足 $\int_{\Omega} G(x) dx = 1$, 得到

$$\int_{\Omega} G(x-y)(E(y) - c_i)^2 dy = \int_{\Omega} G(x-y)E(y)^2 dy - \tilde{E}(x)^2 + (\tilde{E}(x) - c_i)^2 + (\tilde{E}(x) - c_i)\tilde{E}(x) - \tilde{E}(x)(\tilde{E}(x) - c_i) \quad (10)$$

当属于同个域的像素点灰度值之间的标准偏差的高斯函数接近零时,则 $\int_{\Omega} G(x-y)E(y)^2 dy - \tilde{E}(x)^2 \rightarrow 0$,那么式(9)可简化为

$$\zeta_g(\phi_i, \mu_i, c_i) = \sum_{i=1}^k \int_{\Omega} \mu_i(x) (\tilde{E}(x) - c_i)^2 H(\phi_i(x)) dx \quad (11)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^k H(\phi_i(x)) = 1, \quad \sum_{i=1}^k \mu_i(x) = 1 \quad .$$

为了进一步提高算法对噪声的鲁棒性,引入了调节参数 λ 和能量函数的平均值 $\bar{E}(x)$, 得到

$$\zeta_g(\phi_i, \mu_i, c_i) = \sum_{i=1}^k \int_{\Omega} \mu_i(x) (E(y) - c_i)^2 dy H(\phi_i(x)) dx + \sum_{i=1}^k \lambda \int_{\Omega} \mu_i(x) (\bar{E}(x) - c_i)^2 H(\phi_i(x)) dx \quad (12)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^k H(\phi_i(x)) = 1, \quad \sum_{i=1}^k \mu_i(x) = 1 \quad .$$

2.2.2 最优隶属度函数

当确定了水平集函数 $\{\phi_i\}_{i=1}^k$ 以及聚类中心 $\{c_i\}_{i=1}^k$ 后,最优的隶属函数 $\mu_i(x)$ 可以使得模糊能量聚类的变分水平集模型 $\zeta_g(\phi_i, \mu_i, c_i)$ 收敛到局部最小值。为了提高水平集主动轮廓的能力,使其能够捕捉到归属于特定簇的像素。本文计算适合整个图像域 Ω 的最佳隶属函数,即计算每个像素和它的聚类中心之间的隶属关系,通过最优的隶属函数 $\mu_i(x)$ 最小化 $\zeta_g(\phi_i, \mu_i, c_i)$

$$\min \{ \zeta_g(\phi_i, \mu_i, c_i) \} = \min \left\{ \sum_{i=1}^k \int_{\Omega} \mu_i(x) (E(y) - c_i)^2 dy dx + \sum_{i=1}^k \lambda \int_{\Omega} \mu_i(x) (\bar{E}(x) - c_i)^2 dx \right\} \quad (13)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^k \mu_i(x) = 1 \quad .$$

利用变分法和拉格朗日乘法,对于最小化式(13)的必要条件是一个 $\mu_i(x)$ 的局部最小值问题,可以得到最优的隶属函数为

$$\mu_i(x) = \frac{\left(\int_{\Omega} G(x-y)(E(y) - c_i)^2 dy + \lambda (\bar{E}(x) - c_i)^2 \right)^{(m-1)}}{\sum_{i=1}^k \left(\int_{\Omega} G(x-y)(E(y) - c_i)^2 dy + \lambda (\bar{E}(x) - c_i)^2 \right)^{(m-1)}} \quad (14)$$

式中, m 表示每个模糊隶属度加权指数。

算法流程如下所述。

- 1) 初始化图像函数 $f(x)$, 水平集函数 ϕ 以及参数 c_i 和 σ_i , 设置参数 μ_i, k 。
- 2) 根据式(9)创建模糊能量聚类的变分水平集模型 $\zeta_g(\phi_i, \mu_i, c_i)$ 。
- 3) 根据式(12)在模型 $\zeta_g(\phi_i, \mu_i, c_i)$ 中引入调节参数和能量函数平均值 $\bar{E}(x)$, 并更新 c_i 和 σ_i 。
- 4) 根据式(13)和式(14)计算最佳隶属函数 $\mu_i(x)$, 更新模型 $\zeta_g(\phi_i, \mu_i, c_i)$ 。
- 5) 判断是否满足迭代停止条件,若不满足,返回步骤3)并更新调节参数;若满足,则停止迭代。

3 实验仿真及分析

为了验证本文提出的分割算法的可行性及有效

性,采用 Matlab7.1 仿真软件,实验平台是一个 CPU 为 Intel Core i5,主频 3.2 GHz,内存为 4G 的 PC 机,在 Window 平台下进行了 Matlab 编程仿真。实验中选取了两幅带噪声的 QuickBird 遥感数据图作为仿真测试图,如图 2 所示。

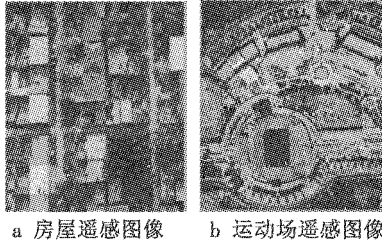


图 2 QuickBird 遥感数据图

Fig. 2 QuickBird remote sensing figure

图 2 中遥感图像的灰度阶为 0 ~ 255,在实验中,初始水平集函数都选择为 $\phi_i(x) = 1, i = 1, \dots, k$,采用一种简单的方法来选择初始聚类中心,令

$$m = \min_{x \in \Omega} f(x) \quad (15)$$

$$c_i = \left(\frac{\min_{x \in \Omega} f(x)}{|\Omega|} \right) \circ \quad (16)$$

为了突显本文方法的分割效果,在实验中还加入了两个对比算法,分别为文献[15]的基于改进符号距离函数的变分水平集图像分割算法,以及文献[16]的基于多相水平集方法的快速多阈值图像分割算法。

在该仿真实验中评价图像分割效果的边界条件以区域间灰度值对比度、噪声分布度、形状轮廓的光滑度为主。

区域间灰度值对比度的计算方法为:计算两个相邻区域的图像灰度均值分别为 c_i, c_j ,则区域间灰度值对比度为 $\Gamma = \frac{|c_i - c_j|}{c_i + c_j}$ 。

噪声分布度表示为分割后图像区域的噪声像素点占该图像区域总像素点的比值。

形状轮廓的光滑度表示为

$$S_{SM} = \frac{1}{C} \left\{ \sum_{x,y} \text{sgn}[c_i - c_j] g(x,y) + \text{sgn}[c_i - T] \right\} \quad (17)$$

式中: C 表示归一化系数; sgn 表示单位阶跃函数; $g(x, y)$ 表示像素点 (x, y) 处的梯度; T 表示预定的阈值。

图 3 显示了基于改进符号距离函数的变分水平集方法所得到的遥感图像分割效果,从图中的房屋遥感图像可以看出,该算法的分割效果受图像噪声的影响较小,分割后的图像噪声明显减少,但不同房屋的形状信息并没有很好地分割出来,有的房屋因为灰度值相差较小而被分割在了一起。图 4 显示了文献[16]中多相水平集方法所得到的遥感图像分割效果,虽然该方法能够将图像中不同区域的建筑和地形信息划分出来,对于灰

度值相差较小的相邻房屋也能进行有效分割,但图像去噪效果不明显,分割后的图像仍带有较多噪声。

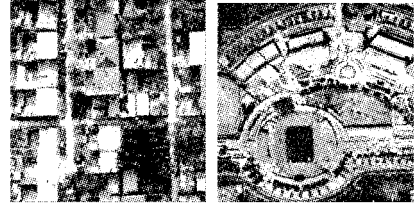


图 3 文献[15]分割结果

Fig. 3 Segmentation results of literature [15]

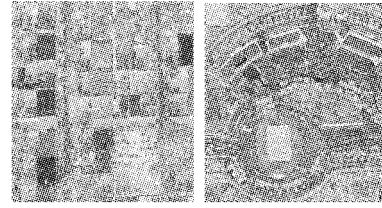


图 4 文献[16]分割结果

Fig. 4 Segmentation results of literature [16]

图 5 显示了本文提出的基于模糊能量聚类的变分水平集对带噪声的遥感图像的分割效果。从图像的分割结果可以看出,图像中不同区域的建筑结构、道路路线都被较好地划分出来,并且带有明显的灰度差,即使是相邻的房屋建筑从视觉上都能够较易地分辨出来,并且分割后的图像噪声相比分割前的图像噪声明显减少,从遥感图像分割后的综合效果来看,相比文献[15]和文献[16]的方法,本文提出的方法取得了更好的分割效果。

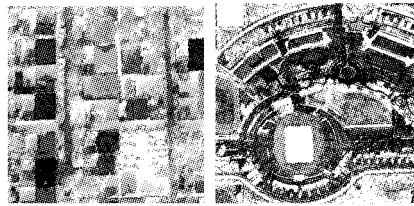


图 5 本文方法的分割结果

Fig. 5 Segmentation results of the proposed method

为了定量地描述本文算法的分割精度,分别统计这两张实验测试图的所有建筑、场地个数 n ,以及整个城区的像素总数 $Pixel(n)$,并分别统计这 3 种算法分割后的图像的所有建筑、场地个数 m ,以及整个城区的像素总数 $Pixel(m)$ 。分割精度的算式为

$$\eta = \frac{m}{n} \times \frac{Pixel(m)}{Pixel(n)} \quad (18)$$

在图像噪声增多的情况下,3 种算法的分割精度对比结果如图 6、图 7 所示。图 6 是对房屋遥感图像的分割精度,图 7 是对运动场遥感图像的分割精度。从图中的数据结果可以看出,随着图像噪声像素占图像

总像素比重的增加,3种算法的分割精度都开始逐渐降低,因此图像噪声对算法的分割精度具有一定的负面影响,因为噪声使得图像中不同物体的形状信息的模糊度加大,并且弱化了不同物体之间的灰度差。从3种算法的对比情况来看,本文提出的基于模糊能量聚类的变分水平集方法相比文献[15]和文献[16]的算法具有更高的分割精度,在图6中平均分割精度分别提升了3.8%和7.4%。在图7中平均分割精度分别提升了4.7%和7.3%。

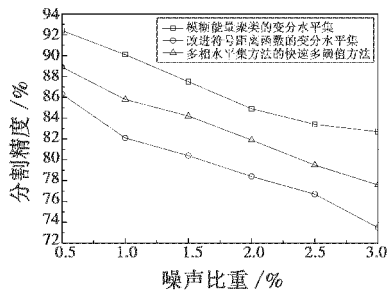


图6 房屋遥感图像的分割精度

Fig. 6 Segmentation accuracy of remote sensing images of houses

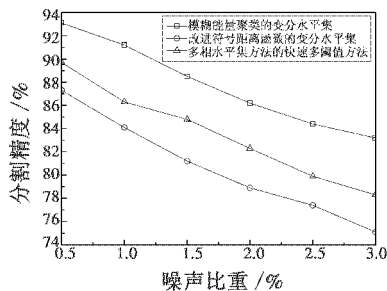


图7 运动场遥感图像的分割精度

Fig. 7 Segmentation accuracy of remote sensing image of playground

4 结论

考虑到水平集方法在图像分割领域上的广泛应用及其有效性,本文提出了一种基于模糊能量聚类的变分水平集遥感图像分割算法,由于变分水平集能够综合利用区域和边界的信息,因此该算法在变分水平集方法上进行改进和扩展,考虑到变分水平集方法去噪效果不明显,并且分割精度并不高,因此在模糊聚类算法的基础上提出了具有连续隶属函数的模糊能量聚类,并将该方法与变分水平集方法进行了有效结合。在实验中对带噪声的遥感图像进行了算法的仿真测试,从仿真后的分割效果及算法的对比情况来看,本文提出的方法所分割后的图像具有明显灰度差和边界区分,而且分割精度也高于对比算法。

参考文献

[1] GHAMISI P, BENEDIKTSSON J A, ULFARSSON M O.

Spectral-spatial classification of hyperspectral images based on hidden Markov random fields [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(5): 2565-2574.

- [2] 赵贝,钟燕飞,张良培. 高空间分辨率遥感影像的多智能体分割方法研究[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 108-115. (ZHAO B, ZHONG Y F, ZHANG L P. High spatial resolution remote sensing image segmentation based on multi-agent theory [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 108-115.)
- [3] 周家香,朱建军,梅小明,等. 多维特征自适应 Mean-Shift 遥感图像分割方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(4): 419-422, 440. (ZHOU J X, ZHU J J, MEI X M, et al. An adaptive MeanShift segmentation method of remote sensing images based on multi-dimension features [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(4): 419-422, 440.)
- [4] SUBUDHI B N, BOVOLO F, GHOSH A, et al. Spatio-contextual fuzzy clustering with Markov random field model for change detection in remotely sensed images [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57: 284-292.
- [5] 刘雅蓉,汪西莉. LUV 色彩空间中多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 530-536. (LIU Y R, WANG X L. Adaptive spectral clustering algorithm based on Nyström method with multi-level structure in LUV color space [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(4): 530-536.)
- [6] 陈永健,汪西莉. FCM 预选取样本的半监督 SVM 图像分类方法[J]. 计算机应用, 2014, 34(1): 260-264. (CHEN Y J, WANG X L. Semi-supervised SVM image classification method with pre-selected sample by fuzzy C-mean [J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(1): 260-264.)
- [7] SZIRANYI T, SHADAYDEH M. Segmentation of remote sensing images using similarity-measure-based fusion-MRF model [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(9): 1544-1548.
- [8] GHAMISI P, COUCEIRO M S, MARTINS F M L, et al. Multilevel image segmentation based on fractional-order Darwinian particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(5): 2382-2394.
- [9] ZHANG L, YANG K. Region-of-interest extraction based on frequency domain analysis and salient region detection for remote sensing image [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(5): 916-920.
- [10] 王卫卫,杨堃鹏,吕畅,等. 一种新的水平集图像分割模型[J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(6): 39-

- [8] 刘超. 基于 DM368 的嵌入式数字高清网络摄像机采集处理模块设计[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012. (LIU C. DM368-based embedded digital HD IP network camera acquisition and processing module design [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.)
- [9] 颜学究. 基于 TMS320DM6467 的视频编码系统研究与实现[D]. 重庆:重庆大学, 2012. (YAN X J. The research and implementation on video coding system based on TMS320DM6467 [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.)
- [10] 李宏, 吴衡. 机载 LVDS 数字视频信号采集记录技术研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(5):72-75. (LI H, WU H. Acquisition and recording of onboard LVDS digital video signal [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(5):72-75.)
- [11] 陈智, 邱跃洪, 董佳. LVDS 接口原理及其在电路设计中的应用[J]. 科学技术与工程, 2005, 5(21):1656-1657. (CHEN Z, QIU Y H, DONG J. LVDS interface principle and its application in the circuit design [J]. Science Technology and Engineering, 2005, 5(21):1656-1657.)
- [12] 高非非, 刘辛国. ARM-Linux 中 I2C 总线驱动开发[J]. 微型机与应用, 2012, 31(5):57-58. (GAO F F, LIU X G. Design of I2C bus driver based on ARM-Linux [J]. Microcomputer & Its Applications, 2012, 31(5):57-58.)

(上接第 65 页)

- [22] GU J, PECHT M. Prognostics and health management using physics-of-failure [C]//54th Annual Reliability & Maintainability Symposium, RAMS 2008:481-487.
- [23] AVIZIENIS A, LAPRIE J C, RANDELL B. Fundamental concepts of dependability [C]//Proceedings of the 3rd Information Survivability, 2000:7-12.
- [24] 章新瑞, 任占勇. 可靠性试验中环境应力与产品故障机理间关系研究 [J]. 环境技术, 2000(5):7-11. (ZHANG X R, REN Z Y. Research on relationship between stress and product reliability failure mechanisms environment experiment [J]. Environment Technology, 2000(5):7-11.)
- [25] 丛伟, 景博, 樊晓光. 综合航电系统健康管理体系统结构设计 [J]. 测控技术, 2013, 32(8):126-130. (CONG W, JING B, FAN X G. Design of health management architecture of integrated avionics system [J]. Measurement & Control Technology, 2013, 32(8):126-130.)
- [26] SAHA B, GOEBEL K, POLL S, et al. Prognostics methods for battery health monitoring using a Bayesian framework [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(2):291-296.

(上接第 70 页)

- 34(3):227-229. (WANG X Y, LIU Z, TANG L J. A multi-attribute evaluation based on expert knowledge of software quality methods [J]. Computer Technology and Application Development, 2008, 34(3):227-229.)
- [7] 李文静. 软件缺陷与软件测试 [J]. 计算机与网络, 2001(21):31-32. (LI W J. Software defects and software testing [J]. Computer and Network, 2001(21):31-32.)
- [8] FENTON N, NEIL M. A critique of software defect prediction models [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1999, 25(5):675-689.
- [9] 郭飞, 侯朝桢, 戴忠建, 等. 基于模糊 - 证据理论的软件缺陷评估新方法 [J]. 计算机应用, 2006(s1):275-276. (GUO F, HOU C Z, DAI Z J, et al. Fuzzy-software defects evidence theory methods to evaluate new computer application [J]. Computer Applications, 2006(s1):275-276.)

(上接第 75 页)

45. (WANG W W, YANG G P, LYU C, et al. New image segmentation model based on the level set method [J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(6):39-45.)
- [11] DIRAMI A, HAMMOUCHE K, DIAF M, et al. Fast multilevel thresholding for image segmentation through a multiphase level set method [J]. Signal Processing, 2013, 93(1):139-153.
- [12] BALLA-ARABÉ S, GAO X, WANG B. A fast and robust level set method for image segmentation using fuzzy clustering and lattice Boltzmann method [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(3):910-920.
- [13] WANG L F, PAN C H. Image-guided regularization level set evolution for MR image segmentation and bias field correction [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2014, 32(1):71-83.
- [14] DONG F F, CHEN Z S, WANG J W. A new level set method for inhomogeneous image segmentation [J]. Image and Vision Computing, 2013, 31(10):809-822.
- [15] 崔玉玲. 基于改进符号距离函数的变分水平集图像分割算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(11):1033-1040. (CUI Y L. A variational level set method for image segmentation based on improved signed distance function [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(11):1033-1040.)
- [16] DIRAMIA A, HAMMOUCHEA K, DIAFA M. Fast multilevel thresholding for image segmentation through a multiphase level set method [J]. Signal Processing, 2013, 93(1):139-153.