

地质图中地质层的精确分割方法

云挺^{1,2} 徐昇² 曹琳¹

(东南大学计算机科学与工程学院 南京 210096)¹ (南京林业大学信息科学技术学院 南京 210037)²

摘要 针对地质截面图内部的地层信息,提出了一种新颖的抗干扰性强的地层分割算法。该方法首先采用变差函数和置信度计算地质图中区域的方向角度,接着面向方向一致连续的地质图子区域设计基于方向流场引导的蛇模型分割方法;其次摒弃了基于梯度信息的图像方向结构求取方法,构造了融合 Radon 变换获取方向角度的 Gabor 滤波器,从而精确分割出不同地质层并修补了同一地质层内部的断裂处;最后通过在真实地质剖面图中进行的测试验证了该方法的有效性,其能获取更优的分割结果,从而对石油勘探和地质环境的三维重建起到推动作用。

关键词 纹理分割,方向流场,蛇模型,方向滤波器

中图法分类号 TP391.4 **文献标识码** J

Geological Layers Accurate Segmentation Method in Geological Map

YUN Ting^{1,2} XU Sheng² CAO Lin¹

(School of Computer Science & Technology, Southeast University, Nanjing 210096, China)¹

(School of Information Science & Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)²

Abstract For the stratum information about geological sectional view, a novel anti-interference stratum segmentation algorithm was proposed. Firstly the method used the variation functions and the confidence degree to measure the regional orientation angles, then based on the direction flow fields snake model, segmentation method was designed for the sub-regions with inconsistent directions. Secondly the method based on the gradient information to calculate image structure and orientation was abandoned, but image direction obtained by radon transform was integrated into the Gabor filter, thereby different geologic layers were accurately extracted and internal gaps in the same geological layer were repaired. Finally experimental results verify the effectiveness of our proposed method which has a better texture segmentation results in the practical geological section map, and our method plays a role in promoting the oil exploration and geological environment three-dimensional reconstruction.

Keywords Texture segmentation, Direction flow field, Snake model, Direction filter

1 引言

随着油气勘探开发工作的逐步深入,如何准确、快速、自动、无损地观测、描述、评价储层岩心特性,并能实现地质层形态的精确描述,一直是现代石油科技领域中的一大难题,也是高效开发石油存储层的关键。

本课题旨在对含石油的地层进行分析,采用特定材质的沙砾来表达不同岩层的沉积和地质构造特性以及油藏存储区域,同时通过人为的外力来模拟现实中地壳受力运动,观测石油层在不同情形下所发生的改变,以决定勘探方向、布井位置和油气田开发方案。针对截面地质图运用数字图像处理技术,自动对不同地质层截面图像进行处理分析,从而推测地质特征,定位油层位置。

本课题具体实施方案如图 1 所示。在容器中铺置不同材质的沙砾,通过人工对一端推板施力来模拟地壳运动,观测其中石油层的变化;再对整个沙体进行纵向即垂直间距切割,展

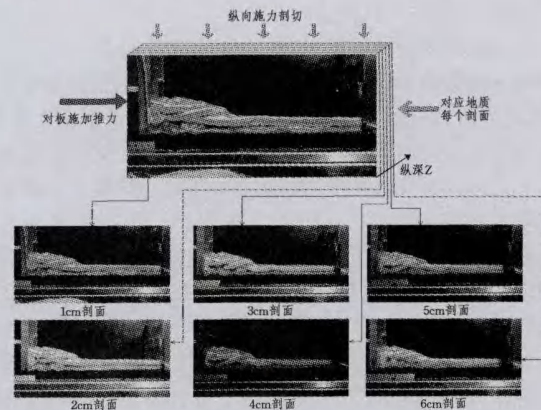


图1 项目实施图

现不同截面水平地质断面图中地质的演变和运动情况,以定位石油带的位置。但由于在数据采集过程中人为的挤压、切割和拍摄角度及光照等变化的影响,原本不同材质的沙砾出

到稿日期:2012-04-20 返修日期:2012-06-20 本文受国家重点基础研究发展计划 973 项目(2011CB707904),江苏省自然科学基金(BK2012418),南京林业大学高学历人才基金(163070052)资助。

云挺(1980—),男,博士后,讲师,主要研究方向为机器视觉、图形图像, E-mail: njyunting@qq.com; 徐昇(1988—),男,硕士生,主要研究方向为机器视觉、图像处理; 曹琳(1987—),女,硕士生,主要研究方向为机器视觉、医学图像处理。

现粘合和混杂,从而导致不同地质层模糊难以辨认。

如何得到截面地层图中地质层的纹理走势并精确定位,是地质分析和石油勘探问题的关键。经过分析发现,截面地质图中地层的特征类似于遥感图像中的桥梁和医学图像中的血管,因此可以借鉴相应的方法并提出本文的解决思路。

国内外近年在带状物体分割中所做的工作可概括为两部分:一部分是基于活动轮廓模型思想演变的算法来得到问题的求解,如 J. S. Tang^[1]采用 B 样条和多尺度 GVF 模型相结合的方法进行了舒张血管边缘定位。Y. Lin 等人^[2]采用了结合局部和全局的统计特性的 Chan-Vese 模型,并做了快速算法方面的改进,将其应用于血管跟踪和复杂纹理图像的分割取得了良好的效果。J. Egger 等人^[3]运用手动的初始点和结束点来规定血管的方向,而对于弯曲的方向不一致的血管结构采用了 Dijkstra 算法来计算中心线,再根据中心线结合主动轮廓模型来提取血管区域。B. A. Diri^[4]定义了一个双重带状的 snake 模型来进行脉管边界的定位,分别定义了一个内部和外部的主动轮廓模型,通过最小化能量函数,使得内外轮廓线收敛于脉管的边界,整个算法需要采用 Tramline 算法先得到脉管的中心线和方向,再通过人工设置初始内部和外部轮廓模型位置,且计算量较大。W. K. Law 等人^[5]在脉管分割中应用了权重局部方差来确定血管的局部方向场,再结合方向场和确定的边界,定义新的主动轮廓模型进行分割。另一些学者采用了滤波器的方法来解决带状问题的分割,如 J. Hajer 等人^[6]对视网膜中的血管采用数学形态学的方法进行初始的分割,再结合计算出的方向场和频率值,利用短时傅立叶变换进行滤波,得到精细的血管纹理。H. Ertan C 等人^[7]构造了一个刚性可旋转的滤波器来确定医学图像中的管状结构的方向性,得到相应的方向角。再设计一个跟踪管状结构的算法,从初始点出发,按照前序算出的方向角度进行平滑,将其应用于各类微管取得了较好的效果。Tamir Y 等人^[8]在视网膜图像的血管中采用了先找寻种子点的策略,接着采用 6 个方向的滤波器来确定种子点所对应的血管延伸方向和血管的宽度,最后根据上面所得的信息,运用卡尔曼滤波进行分割,并证明了其算法的有效性。

从上述文献中可以看出,近年来研究者们对于条形状的纹理的分割都是利用具有方向引导的滤波器组或活动轮廓模型,因此如何获得带条形纹理准确的方向角度显得尤为重要。现有的计算方向场的算法如下: M. B. Asker^[9]采用梯度矢量流的方法来计算图像中每个区域的方向场,但对于区域中纹理混乱的情况其效果并不理想。有学者^[10,11]采用离散傅利叶变换来得到木材细胞电镜图像的频谱图,再采用主成分分析确定区域的主方向,但效果一般。T. S. Roger^[12]采用变差函数的方法来判断航拍图像中森林、果园、田地区域的均衡性和方向性,取得了较好的效果。Law W K^[5]通过权重局部方差的最小化去估计血管边界的方向,这种方法对噪声并不敏感,较为鲁棒。H. Ertan C 等人^[7]在刚性滤波器的基础上提出了一个可绕轴旋转的滤波器来确定医学图像中纤维的方向,并结合种子点定位指导跟踪管状结构。本文即按照上述思路进行了算法的设计。

2 多阈值初始分割优劣分析

地质断面图在拍摄过程中会随着光照条件的改变而改变,这样会影响地质图检测的准确性并对地质层区域的分割产生干扰。因此本文采用 HSV 模式,即色相、饱和度和明

度,根据动态设置饱和度和阈值进行初始分割:

$$B(i, j) = \begin{cases} 255, & S(i, j) \geq ave(i, j) * e^{(ave(i, j) - \beta)^\alpha} \\ 0, & S(i, j) < ave(i, j) * e^{(ave(i, j) - \beta)^\alpha} \end{cases} \quad (1)$$

$$ave(i, j) = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S(i, j) \right) / (n * n) \quad (2)$$

式中,把图像划分为 $n * n$ 大小的子块 B, α, β 为调节系数, S 代表切片图像的饱和度分量。通过 $ave(i, j)$ 可以自适应调节阈值大小,从而得到最优的分割效果。具体结果如图 2 所示。

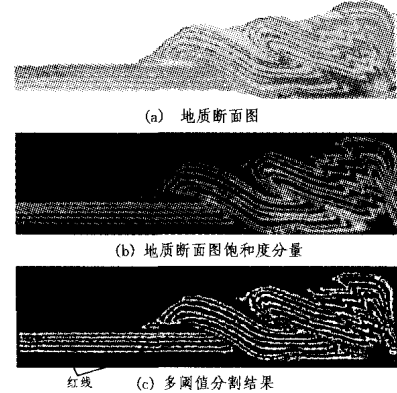


图 2 实验结果

从结果可以看出,联合饱和度和分量的多阈值分割方法可以获取大致的不同地层信息,但由于地质图经过人为的受力和断面切割后,造成沙石的粘滞和混合,使得原本完整的地层中间出现断裂,如图 2(c) 中红色圈所标记的局部断裂区域,对后期的三维重建存在很大影响。因此本文接下来的工作就是如何按照地层的走势恢复这些断裂区域,从而实现完整地层的分割。

3 基于方向流的蛇模型分割方法

3.1 区域方向流场获取

为了获取方向连续的完整地址层,本文通过计算区域流向提取截面中不同地质层的方向信息,得到每个子块图像的方向走势,为后续的分割提供依据。具体步骤如下:

- 1) 将截面图像分成互不重叠的 $w \times w$ 的子块;
- 2) 计算块中每个像素 (i, j) 的梯度 $S_{x_1}(i, j)$ 和 $S_{y_1}(i, j)$;
- 3) 计算每块图像的区域流向:

定义子块 $A(w \times w)$ 大小的梯度平均为:

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_{ax_1} \\ \bar{S}_{ay_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_A S_{ax_1} \\ \sum_A S_{ay_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_A (S_{x_1}^2 - S_{y_1}^2) \\ \sum_A 2S_{x_1} S_{y_1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

定义的区域流向为:

$$\theta_1 \left(\text{ceil} \left(\frac{i}{w} \right), \text{ceil} \left(\frac{j}{w} \right) \right) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^{\text{size}(A,1)} \sum_{j=1}^{\text{size}(A,2)} 2(S_{x_1}(i, j) S_{y_1}(i, j))}{\sum_{i=1}^{\text{size}(A,1)} \sum_{j=1}^{\text{size}(A,2)} (S_{x_1}(i, j)^2 - S_{y_1}(i, j)^2)} \right], \theta_1 \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

ceil 为向较大的数取整, $\left(\text{ceil} \left(\frac{i}{w} \right), \text{ceil} \left(\frac{j}{w} \right) \right)$ 为当前像素点所在的块。为保证区域流向计算具有良好的精确度,可对流向的置信度进行估计。本文采用了变差函数的方法^[12]来判断每个区域的纹理是否具有均衡性和一致性,从而对区域流向的置信度进行评判,具体如下:

计算相应的自相关值并存入进矩阵 $D[u_1]$ 中。

$$D[u_1] = \sqrt{\left(\sum_{z \in S_u} \|I[z] - I[z+u_1]\|^2 \right) / \text{count}(B_u)} \quad (5)$$

式中, $B_{u_1} = \{z \in B; z+u_1 \in B\}$, I 为整幅图像, $z = (i, j)$, z 和 $z+u_1$ 分别代表图像中的像素点坐标, B_{u_1} 代表图像域中 z 和 $z+u_1$ 这样的像素点对。 count 表示在该图像中对应不同点对的数量。通过式(5), 可以得到 $D[u_1]$ 矩阵的值。 u_1 为可调节的正整数。

$$u_1 \in \{-32, -31, \dots, 31, 32\} \times \{-32, -31, \dots, 31, 32\}$$

$$\text{取 } d_{\max} = \max_{\|u_1\| \geq 3} D[u_1], d_{\min} = \max_{\|u_1\| \geq 3} D[u_1],$$

$$V[u_1] = \text{bound}_{[0,1]} \frac{d_{\max} - D[u_1]}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (6)$$

式中, $\text{bound}(x_2) = \begin{cases} 0, & x_2 < 0 \\ y_2, & 0 \leq x_2 \leq 1 \\ 1, & x_2 > 1 \end{cases}$; 称 $V[u_1]$ 矩阵为变差函数矩阵; 计算该矩阵对应的 $e_{in} = \max_{\|\bar{u}\| \leq u_1} V[\bar{u}]$, $e_{out} = \max_{\|\bar{u}\| \geq u_1} V[\bar{u}]$, 当 $e_{in} \cdot e_{out} < \text{thresh}_1$ 时, 认为该区域没有任何方向性。

3.2 蛇模型中初始轮廓选取

本文在气球模型的思想设计上设计了一个可由生长能量驱动的膨胀曲线, 并且本文的蛇模型是按照区域流场的方向进行发散, 从而分割出符合地层走势的完整地质区域。初始的轮廓线选取遵循了方向信息一致的原则, 具体的选取步骤如下:

1) 地质图先分割成各个子块 ($n_1 * n_1$), 保证子块大小基本可包含至少一个地层。根据式(1)得到地质图二值化结果, 选取其中为高亮的点 $B(i, j) = 255$ 。

2) 根据式(4)计算该点所在的块 ($\text{ceil}(i/n_1), \text{ceil}(j/n_1)$) 的区域流场角度 $\theta_1(\text{ceil}(i/n_1), \text{ceil}(j/n_1))$, 简称为 $\theta_1(\bar{b}_1, \bar{b}_2)$ 。

3) 按照当前 $\theta_1(\bar{b}_1, \bar{b}_2)$ 的方向来找寻其两侧的区域块, 判断两侧的块方向与该块的方向是否一致, 即是否在某个阈值 ξ 范围内。

$$(|\theta_1(\bar{b}_1, \bar{b}_2 + 1) - \theta_1(\bar{b}_1, \bar{b}_2)| + |\theta_1(\bar{b}_1, \bar{b}_2 - 1) - \theta_1(\bar{b}_1, \bar{b}_2)|) \leq \xi$$

$$\text{if } |\tan(\theta_1)| \leq 0.5$$

$$(|\theta_1(\bar{b}_1 + 1, \bar{b}_2) - \theta_1(\bar{b}_1, \bar{b}_2)| + |\theta_1(\bar{b}_1 - 1, \bar{b}_2) - \theta_1(\bar{b}_1, \bar{b}_2)|) \leq \xi$$

$$\text{if } |\tan(\theta_1)| \geq 2$$

$$(|\theta_1(\bar{b}_1 + 1, \bar{b}_2 + 1) - \theta_1(\bar{b}_1, \bar{b}_2)| + |\theta_1(\bar{b}_1 - 1, \bar{b}_2 - 1) - \theta_1(\bar{b}_1, \bar{b}_2)|) \leq \xi$$

$$\text{if } -0.5 > \tan(\theta_1) > -2$$

$$(|\theta_1(\bar{b}_1 - 1, \bar{b}_2 + 1) - \theta_1(\bar{b}_1, \bar{b}_2)| + |\theta_1(\bar{b}_1 + 1, \bar{b}_2 - 1) - \theta_1(\bar{b}_1, \bar{b}_2)|) \leq \xi$$

$$\text{if } 2 > \tan(\theta_1) > 0.5 \quad (7)$$

式(7)给出了角度选取的范围, 在第一个、第二个式中, $|\tan(\theta_1)| \leq 0.5$ 和 $|\tan(\theta_1)| \geq 2$ 所对应的角度分别为小于 26.6° 和大于 63.4° , 即可认为接近垂直, 因此是对上、中、下 3 个图像子块进行判别, 判断其方向是否一致; 而第三个和第四个式中所对应的角度在 26.6° 和 63.4° 之间, 可认为接近 45° , 因此选取斜对角的 3 个块进行方向一致性判别。

4) 根据步骤 3) 得到符合的区域块, 把初始轮廓线放入该块高亮区域的内部。

3.3 基于方向流场引导的蛇模型

根据原有的气球模型, 提出了融合方向信息的 snake 模型, 使地质区域按照地层规律完整有效地连接起来。本文构

造了新型的基于方向流场的蛇模型:

$$\begin{aligned} E(X) &= \sum_{j=0}^{n-1} (E_{int}(X) + E_{ext}(X) + E_{direction}(X)) \\ &= \frac{1}{2} \left[\alpha(s) \left| \frac{\partial X}{\partial s} \right|^2 + \beta(s) \left| \frac{\partial^2 X}{\partial s^2} \right|^2 \right] - |\nabla[I(x, y)]|^2 \\ &\quad + k_1 \tilde{N}_b(v) + k_2 \tilde{N}_d(v) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $E_{int}(X)$ 保证曲线的张力和曲率连续性, 外能 $E_{ext}(X)$ 保证在边缘处停止伸展, X 为轮廓线上每个点所组成的向量, $\tilde{N}_b(X)$ 为气球力的发散向量, 计算 $\tilde{N}_b(X)$ 的方法是先计算轮廓线上的每个点法向量:

$$\vec{n}_b(X_j) = \frac{X_{i+1} - X_i}{\|X_{i+1} - X_i\|} + \frac{X_i - X_{i-1}}{\|X_i - X_{i-1}\|}$$

再计算垂直于 $\vec{n}_b(X_j)$ 的法向量 $\tilde{N}_b(X)$, 则获取气球膨胀力, 如图 3 中的红色箭头线代表气球的膨胀力。符合纹理方向流场部分的作用力 $\tilde{N}_d(X_d)$ 求取如式(9)所示(说明参见图 3):

$$\begin{cases} X_d = X_d + \delta_{sr} \tilde{N}_d(X_d) \\ \text{where } \{X_d | \arg \tan[X_d - \text{centre}] \in (\theta_1 \pm \text{thresh})\} \end{cases} \quad (9)$$

式中, centre 为轮廓线上所有点的中心点, θ_1 是区域纹理方向, 通过 $\arg \tan[X_d - \text{centre}] \in (\theta_1 \pm \text{thresh})$ 来计算轮廓线上哪些点到 centre 的角度和区域纹理方向一致, 从而得到如图 3 中绿色的点 X_d ; 接着对这些点施加一个与区域纹理方向一致的力 $\tilde{N}_d(X_d)$ (如图 3 中的蓝色箭头), 使得轮廓沿着纹理的方向拉伸, 而 δ_{sr} 分为 δ_{sr}^+ 、 δ_{sr} 、 δ_{sr}^- 控制了正方向拉伸力的大小, 而 δ_{sr} 控制反方向拉力大小, 并且可以通过轮廓点和中心点的距离或迭代次数来判别蛇模型的停止条件。

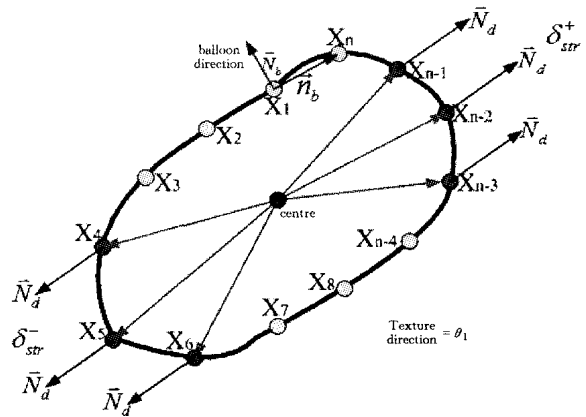


图 3 轮廓线上节点的受力模型

4 基于方向滤波器的地质图分割优化

区域方向场虽然能得到大部分区域的方向信息, 但主要依靠梯度向量在某些区域还是会出现计算不精确, 因此本文又设计了另一种不依赖梯度信息来计算方向场的方法, 即采用 Radon 变换来修正那些未得到正确方向的区域。

4.1 Radon 变换求取方向角

Radon 变换的一个重要特性是可以实现图像线性特征的提取, 因此本文利用 Radon 变换中有角度方向的线性特征来确定地质图中的方向信息。

$$r_k[t] = \text{FRAT}_f(k, t) = \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{(x_1, y_1) \in L_{k,t}} f[x, y] \quad (10)$$

f 是经过蛇模型分割后的二值化地质图像中某大小为 $(n_1 * n_1)$ 的块, $L_{k,t} = \{(x, y) : y = ((kx + t) \bmod p), x \in \Omega\}$, Ω 是 $(n_1 * n_1)$ 大小子块域, p 是一个正常数, (x, y) 为 f 块中各像素的坐标。 $L_{k,t}$ 为满足该线性条件的一系列像素, 如图 4 中

有限 Radon 变换中颜色一致(比如全是绿色标记)的像素。其中该条件 $L_{k,t}$ 由斜率 k 和 t 控制, $t \in \{0, 1, 2, \dots, n_1 - 1\}$, 计算最大 $r_k[t]$ 所对应的 k 值, $(k, t) = \arg \max(r_k[t])$, 从而确定该块的方向角度 $\theta_2 = \arctan k$ 。具体如图 4 所示。

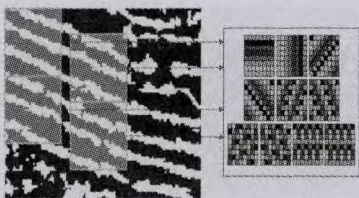


图 4 有限 Radon 变换图

4.2 方向滤波器分割

根据滤波器原理, 采用如下步骤进行地层图像的再分割。

- 1) 根据该块的中心点选取一个大小为 $n_1 * n_1$ 的窗口, 并通过 Radon 变换得到该区域的方向 θ_2 ;
- 2) 定义的方向滤波器为:

$$\begin{cases} h(u, v, \theta_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u^2}{\sigma_x^2} + \frac{v^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \times P(x_{\theta_2}) \\ u = x \cos\theta_2 + y \sin\theta_2 \\ v = -x \sin\theta_2 + y \cos\theta_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $P(x_{\theta_2})$ 是指根据脊线和谷线得到的不同距离而构造的脉冲函数, 根据脊线和谷线之间的距离进行调节。

- 3) 进行滤波增强, w_g 是滤波器的尺寸。

$$f_e(i, j) = \sum_{u=-w_g/2}^{u=w_g/2} \sum_{v=-w_g/2}^{v=w_g/2} h(u, v, \theta_2) f(x-u, y-v) \quad (12)$$

- 4) 设置合理的阈值, 得到连接结果。

$$f_e(i, j) = \begin{cases} 1, & f_e(i, j) \geq \text{thresh}_1 \\ 0, & f_e(i, j) < \text{thresh}_1 \end{cases}$$

实验图如图 5 所示。

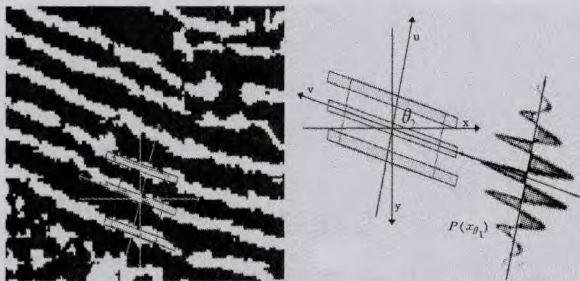


图 5 方向滤波器的断层连接

5 实验结果及分析

本文首先把每个地质图像分成各个小区域, 再采用变差函数的方法判断每个小区域的方向一致性, 并用梯度和离散 Radon 变换算出区域流场角度, 当该小区域方向性满足一致性条件时, 按照结合方向角的主动轮廓模型和方向滤波器进行完整分割。实验结果描述如下。

5.1 方向流场实验

地质截面图像缩放为 300×1000 大小, 划分为 50×50 大小的子块, 计算每个区域子块的 θ_1 , $V[u_1]$ 和 e_{in} , e_{out} 值, 判断该区域纹理是否有一致性的方向。其中 $u_1 = 10$, $\text{thresh}_1 = 0.85$ 。结果如图 6 所示。从图 6(a) 可以看出其中红色框代表区域纹理走势紊乱, 虽然可以从式(4)中计算出每个区域的方向

向, 但通过变差函数表明其置信度不高, 因此判别其方向无效。而非红色框区域方向具备一致性, 为有间隔规律的方向条纹, 表 1 列出了采用的变差函数方法判别区域纹理方向一致性的结果。

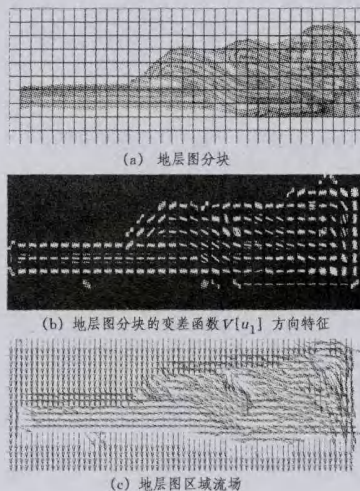


图 6 纹理方向辨识图

表 1 区域纹理方向一致性分析结果表

区域纹理一致性判别	Fourier 方法	变差函数方法		
		u_1	thresh_1	u_1
		10	0.85	15
		正确识别率 76%	正确识别率 96%	正确识别率 95%

5.2 本文蛇模型分割实验

笔者采用了局部的纹理来说明该文构造的蛇模型的有效性, 如图 7 所示, 白色区域代表一根完整的地质层, 由于拍摄效果和人为因素, 中间存在断裂(gap), 需要进行填补。图 7(a1)中蓝色线代表初始轮廓, 图 7(a2)为现有的气球模型分割结果, 因为两边没有拉力, 所以只能在局部区域中扩张, 无法到达地质的边缘; 图 7(b1)中的 3 个区域 R_1, R_2, R_3 的纹理角度一致, 即 $\theta_{R_1} = \theta_{R_2} = \theta_{R_3}$, 满足式(7)条件, 则通过本文构造的蛇模型可以填补 3 个区域之间的断裂处, 并做完整分割, 结果如图 7(b2)所示; 图 7(c1)中 3 个区域 R_1, R_2, R_3 纹理角度不一致, 则只向纹理一致的区域给予拉伸力, 填补纹理部分断裂处, 结果如图 7(c2)所示; 图 7(d1)显示了 3 个初始的轮廓线种子, 经过迭代后得到的效果如图 7(d2)所示。从实验图 7 可以看出, 该算法的目的是实现同一地质层断裂处的连接, 从而实现同一地质层的完整分割。

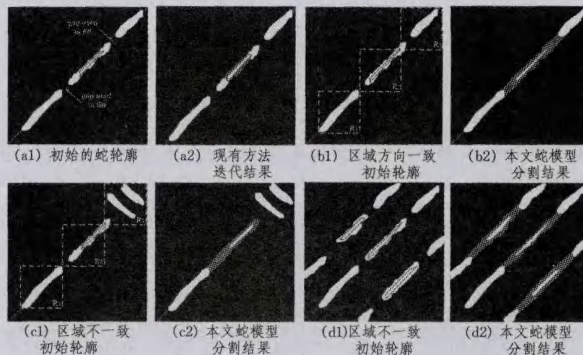


图 7 蛇模型实验结果演示

5.3 方向滤波器实验结果

从图 8 可以看出, 根据 4.1 节计算的区域方向角 θ_2 和

4.2节中的方向滤波器,可以完整地修补地质之间的断裂。

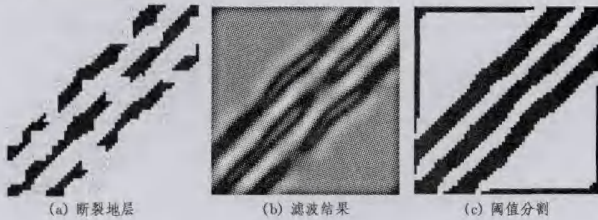


图8 方向滤波器结果

5.4 综合实验结果

接下来对整个地质截面图进行分割,如图9所示:首先采用多阈值分割方法,从结果图9(b)中可以看出,其虽能大体分割不同地层区域,但会在同一地层中出现多处断裂;接着运用了本文构造的蛇模型对多阈值分割的结果(见图9(b))进行断裂修复,实验结果如图9(c)所示;最后采用方向滤波器的方法对图9(c)进行再修复优化,最终结果如图9(d)所示,从而达到了不同地质层的完整精确分割。现有的基于灰度信息的 chan-veese 方法分割结果如图9(e)和图9(f)所示。

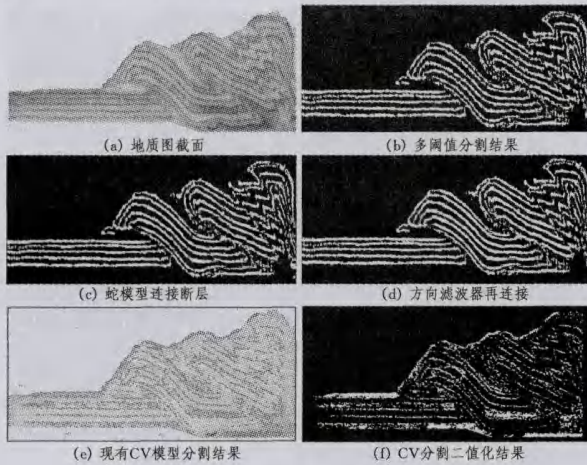


图9 综合实验结果图

本文接着通过3个标量:区域内均匀性 UR 、区域内差异性 DR 、区域间差异性 DIR 来判断算法的有效性。其中区域内均匀性通过区域内像素特征(如灰度)的相似度来计算区域的均匀性,公式为:

$$UR = 1 - \frac{1}{|I|} \sum_{k=1}^N \frac{\sum_{s \in R_k} [g_I(s) - \frac{1}{|R_k|} \sum_{t_1 \in R_k} g_I(t_1)]^2}{[\max_{s \in R_k} (g_I(s)) - \min_{s \in R_k} (g_I(s))]^2} \quad (13)$$

设图像 I 被分割成 N 个区域(集合), R_k 表示第 k 个区域(集合), $|I|$ 代表图像 I 中像素的总数, $g_I(s)$ 对应像素 s 的灰度级强度函数或其他像素特征函数(颜色、纹理等), $|R_k|$ 代表区域 R_k 中像素的总数。

区域内差异性:计算区域内像素灰度的二阶导数的平方均值并将其作为区域内差异性的测度,公式为:

$$DR = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{1}{|R_k|} \sum_{s \in R_k} \left(\frac{d^2 g_I(s)}{ds^2} \right)^2 \right] \quad (14)$$

区域间差异性:通过计算两区域间的不一致性,获得区域间的差异性,公式为:

$$DIR = \frac{1}{C_N} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{|avg_I(R_i) - avg_I(R_j)|}{\max_{s \in I} (g_I(s)) - \min_{s \in I} (g_I(s))} \quad (15)$$

式中, C_N 为区域组合数, $g_I(s)$ 为像素灰度特征函数, avg_I

(R_i) 为区域特征函数,一般为区域平均灰度。

从表2可以看出,经过本文算法的不断优化处理,区域内的均匀性基本保持不变,而部分地层断裂点却得到修补,这些断裂点仅依赖灰度值是无法正确分类别的,但结合图像结构性特征的判别和本文算法可以正确连接,因此按照灰度值计算的 DR 和 DIR 都在降低;而采用现有的 chan-veese 分割方法按照灰度值进行分割时,由于迭代时间和次数的限制,不能达到完整分割,因此区域内差异性较大,分割效果如图9(e)和图9(f)所示,劣于本文分割效果。

表2 实验结果表

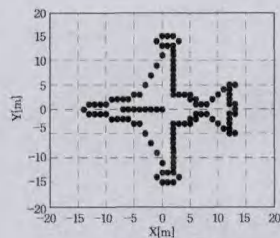
	区域内 均匀性 UR	区域内 差异性 DR	区域间 差异性 DIR	连接的 断裂数
多阈值初始分割	0.9844	0.9185	0.1499	
蛇模型填补断裂	0.9846	0.8587	0.1454	13
方向滤波器再优化结果	0.9844	0.8365	0.1399	11
CV模型分割结果	0.9877	8.2534	0.1292	

结束语 本文针对油藏断面地质图提出了一种新颖的地质层分割方法。该方法沿用了医学影像中微细血管的分割思想,首先获取区域的方向角度场,再把纹理的方向信息同蛇模型及滤波器组相结合,对不同地质层进行跟踪分割,从而提升了不同地质层间边界处分割的准确性并修补了同一地质层内部的断裂点。实验结果表明,本文方法应用于存在干扰较多的地质图中得到了优秀的分割效果,为现实中的石油勘探和地壳运动中不同地层的三维建模奠定了坚实的基础。

参考文献

- [1] Tang Jin-shan, Vessel Boundary Tracking for Intravital Microscopy Via Multiscale Gradient Vector Flow Snakes[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2004, 51(2): 316-324
- [2] Lin Ying, Yang Yun, Wang Xiao-fang. A Fast Active Contour Model Driven by Global-local Statistical Energy[C]// Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application. Shanghai, China; IITA08, 2008; 407-411
- [3] Egger J, Mostarkic Z, Großkopf S, et al. A Fast Vessel Centerline Extraction Algorithm for Catheter Simulation[C]// Twentieth IEEE International Symposium on Computer Based Medical Systems. Maribor, Slovenia; CBMS07, 2007; 177-182
- [4] Al-Diri B, Hunter A, Steel D. An Active Contour Model for Segmenting and Measuring Retinal Vessels[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2009, 28(9): 1488-1497
- [5] Law W K, Albert C S. Segmentation of vessels using weighted local variances and an active contour model[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2007, 26(9): 1224-1241
- [6] Hajer J, Kamel H, Noureddine E. Blood Vessels Segmentation in Retina image using Mathematical Morphology and the STFT analysis[C]// The 2nd Information and Communication Technologies. Damascus, 2006, ICTTA06; 1130-1134
- [7] Çetingül H E, Vidal R, Plank G, et al. Nonlinear Filtering For Extracting Orientation Online Filtering For Extracting Orientation And Tracing Tubular Structures In 2-D Medical Images [C]// 5th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging. Paris, 2008; 260-263
- [8] Yedidya T, Hartley R. Tracking of Blood Vessels in Retinal Images Using Kalman Filter. Digital Image Computing: Techniques and Applications [C]// 2008 Digital Image Computing: Techniques and Applications. Canberra, ACT, 2008; 52-58

(下转第297页)



(a) 仿真飞机原图

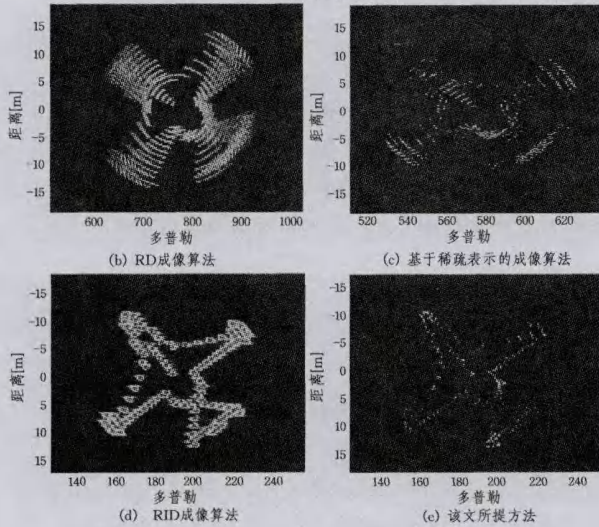


图4 仿真数据下的4种成像算法的成像效果图

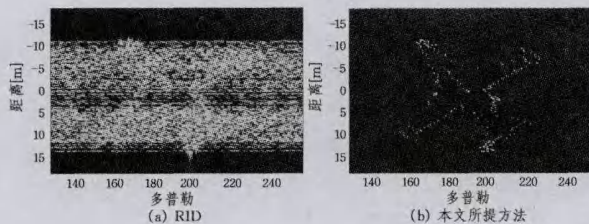


图5 数据缺损50%的情况下两种算法的成像对比图

为说明数据缺损程度对成像方法的影响,利用图像峰值信噪比(PSNR)准则对不同缺损程度进行评判。其准则为:

$$PSNR = 10 * \log_{10} \left(\frac{255^2}{E_{MSE}} \right) \quad (15)$$

式中, E_{MSE} 为缺损数据下生成图像与完整数据下生成图像的最小均方误差。

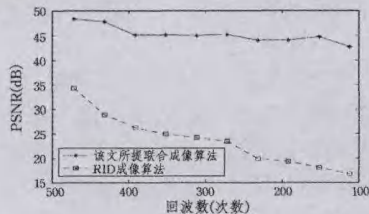


图6 方位回波不同缺损程度下对成像效果的影响

图6中,实线为方位回波不同缺损程度对本文所提算法成像结果的影响,虚线为距离-瞬时多普勒成像算法成像结果的影响。实验结果表明,本文所提方法生成图像的PSNR大于RID算法成像结果;并且随着成像所用回波次数的减少,RID的成像性能显著下降,进一步验证了本文所提方法的有效性和可行性。

结束语 利用传统成像方法和基于稀疏表示的雷达成像算法直接对机动目标回波数据进行成像,所成像效果模糊。本文提出了一种基于稀疏表示和时频变换的ISAR成像算法,此算法通过构造合适的时频基字典,利用非线性优化重构算法进行成像。实验结果证明,本文所提算法能够有效地处理多普勒时变的回波数据,并能生成高分辨、聚焦效果好的瞬时ISAR图像序列。相比基于FFT变换的谱估计成像算法,其成像效果有一定的提高,且能够有效处理缺损数据。

参考文献

- [1] 保铮,王根原,罗琳. 逆合成孔径雷达的距离-瞬时多普勒成像方法[J]. 电子学报,1998,26(12):79-83
- [2] Samadi S, Cetin M, Masnadi-Shirazi M A. Sparse representation-based synthetic aperture radar imaging[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2011, 5(2): 182-193
- [3] Varshney K R, Cetin M, Fisher J W, et al. Sparse Representation in Structured Dictionaries with Application to Synthetic Aperture Radar[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2008, 56(8): 3548-3561
- [4] Zhang L, Xing M D, Qui C W, et al. Achieving higher resolution ISAR imaging with limited pulses via compressed sampling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letter, 2009, 6(3): 567-571
- [5] Austin C D, Ertin E, Moses R L. Sparse Signal Methods for 3-D Radar Imaging[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(3): 408-423
- [6] 王伟伟, 廖桂生, 吴孙勇, 等. 基于小波稀疏表示的压缩感知SAR成像算法研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1140-1146
- [7] Donoho D. Compressed sensing [J]. IEEE Trans. Information Theory, 2006, 52(4): 5406-5425
- [8] Cetin M, Karl W C. Feature-Enhanced Synthetic Aperture Radar Image Formation Based on Non-quadratic Regularization [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2001, 10(4): 623-631
- [9] Tropp J, Gilbert A. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2007, 53(12): 4655-4666
- [10] Dai W, Milenkovic O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2009, 26: 301-321
- [11] Batu O, Cetin M. Parameter Selection in Sparsity-Driven SAR Imaging [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 3040-3050

(上接第281页)

- [9] Asker M B, Sabih H G. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 905-919
- [10] Marquez J P. Fourier analysis and automated measurement of cell and fiber angular orientation distributions [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(21): 6413-6423

- [11] Nishimura T, Ansell M P. Fast Fourier Transform and Filtered Image Analyses of Fiber Orientation in OSB [J]. Wood Science and Technology, 2002, 36(4): 287-307
- [12] Roger T S. Texture orientation and period estimator for discriminating between forests, orchards, vineyards, and tilled fields [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10): 2755-2760