

一种新的三维欧式距离变换方法及在数字岩心中的应用

王鑫¹, 姚军^{2*}, 蒋泽云³, 张琦¹, 张臻⁴, 段利亚¹, 贾欣鑫¹

1. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 青岛 266000;

2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580;

3. Institute of Petroleum Engineering in Heriot-Watt University, Edinburgh UK EH14 4AS, Scotland;

4. 亚信科技中国研发中心, 北京 100000

* 联系人, E-mail: yaojunhdpu@126.com

2016-07-07 收稿, 2016-09-18 修回, 2016-09-18 接受, 2016-12-12 网络版发表

国家自然科学基金(51504146, 51234007, 51490654)、高等学校学科创新引智计划(B08028)和山东省科学院青年基金(2015QN016, 2014QN030, 2015QN023)资助

摘要 针对目前距离变换方法在三维数字岩心中应用时, 搜索方向多、计算数据量大、耗费时间多、占用内存大等问题, 提出一种基于几何拓扑学理论中空间邻居关系的新的距离化搜索算法. 根据岩石内部孔隙结构与二维平面欧式距离求解方法, 引入一个三维空间距离游标进行辅助计算. 相比现有方法, 新的算法简化了邻居域欧式距离值的比较规则, 避免了复杂的欧式距离结构体带来的大量运算, 且算法复杂度低, 可以被更好地理解和应用. 本文详细叙述了算法的具体实现过程, 并将该方法推广到具有缝洞特征碳酸盐岩数字岩心的孔隙空间分割工作中. 结果表明该方法准确高效, 对于油气藏孔隙级微观描述具有现实意义.

关键词 距离变换, 数字岩心, 三维图像, 空间邻居关系, 几何拓扑学

距离变换是计算空间点到目标点距离的过程^[1], 被广泛应用于计算机图像处理^[2]、模式识别^[3]、虚拟现实^[4]等领域, 目前在油藏微观研究的载体——数字岩心领域也有重要应用. 数字岩心技术是近年来新兴的一种分析和解释油藏微观渗流特征的工具, 可以基于岩心的数字图像对孔隙空间进行精细描述^[5]. 距离变换作为分割孔隙空间^[6]和建立岩心虚拟网络^[7]工作的基础, 是模拟流体在孔隙空间的流动、分布等一系列渗流过程^[8~10], 从而获得储层渗透率、地层因数和电阻率指数等物性参数的重要一环. 以往在计算岩心孔隙到固体颗粒边界的距离时, 多采用随机模拟、人工选取测量、基于GPU的并行计算等方法^[11], 这些方法会导致数据不准确、运算周期长、对硬件要求高等问题, 因此, 迫切需要一种新的方法快速有效地进行距离变换计算.

对于一个三维二值图像来说, 距离变换过程犹如转换一副灰度图像, 灰度数值代表着各点到目标点的距离值. 距离变换可用于多种空间距离测度, 以及快速行进法(fast marching)、计算局部空间距离最大值等. 欧氏距离变换作为距离变换中的一种, 将所有离散的目标点视为连续, 计算结果最为自然和准确. 传统欧氏距离计算的直接方法是首先计算图像内每个待测点到所有边界点的距离, 然后比较所有的距离值, 选取最小值进行距离变换, 计算复杂度较高, 计算量庞大, 十分耗时. 对大规模数据来说, 使用传统的欧氏距离计算方法快速精确地得到其欧式距离值是不现实的. 所以对精度要求不高时, 距离变换通常利用近似算法完成, 例如曼哈顿(city block)距离^[12]、切比雪夫(chessboard)距离^[13]以及倒角(charmfer)距离^[14]等. 为了保证欧氏距离的旋转不变性以及计

引用格式: 王鑫, 姚军, 蒋泽云, 等. 一种新的三维欧式距离变换方法及在数字岩心中的应用. 科学通报, 2017, 62: 1662–1669

Wang X, Yao J, Jiang Z Y, et al. A new method of fast distance transform 3D image based on “neighborhood between voxels in space” theory (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 1662–1669, doi: 10.1360/N972016-00766

算精度,国内外专家学者对于降低真实欧氏距离计算的复杂度付出了很多努力,基于形态学、围线追踪、Voronoi图搜索、边界剥离、光栅传播等基础理论,提出了多种欧式距离变换算法^[15~20],但多适用于二维图像,且大多效率不高或者太过复杂^[21]。其中Shih等人^[22]提出利用计算游标,通过传递像素间相对地址的方式对二维图像快速扫描的方法,大大提高了计算速度,得到了广泛的认可和应用。

本文将孔隙空间中的邻居关系域理论引入到距离变换的计算中,利用三维计算游标简化距离求解和理解的难度,同时避免了数据灾难,大大缩短了计算时间。以下将从基础理论入手详叙整个方法的实现过程。

1 欧式距离测度

假设 n 维欧式空间 E^n ,空间中存在任意两点 $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $y(y_1, y_2, \dots, y_n)$, 两点之间的欧氏距离公式定义为

$$d_E(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2}.$$

如果点 x, y 与空间中另一点 z 之间的距离函数 d_E 满足条件

$$\begin{aligned} d(x, y) &\geq 0, \\ d(x, y) &= 0 \leftrightarrow x = y, \\ d(x, y) &= d(y, x), \\ d(x, y) &\leq d(z, y) + d(x, z), \end{aligned}$$

那么它就被定义为从 $E^n \times E^n$ 到 Z^+ 的距离测度^[23]。令 n 维向量 $(C_x^1, C_x^2, \dots, C_x^n)$ 代表空间 E^n 中 x 点的坐标,那么

如果有 $L_k(x, y) = \left(\sum_{i=1}^n |C_x^i - C_y^i|^k \right)^{1/k}$, 则函数 L_k 就叫做空间中所有非负整数 k 的距离测度。

在离散空间 Z^n 中,不同于曼哈顿距离和切比雪夫距离,平方运算的加入可能会使欧式距离函数 d_E 里的元素出现非整数情况。而数字岩心领域中欧氏距离的计算,多为进行数字岩心孔隙空间分割和构建网络模型,因此为了计算方便,本文使用平方欧氏距离代替,在平方欧式距离中 x 和 y 之间的距离测度为 $d_{SE}(x, y) = [d_E(x, y)]^2$ 。

2 空间邻居关系域

根据Kong与Rosenfeld^[24]的理论,三维二值图像被定义为一个四维数组 $I=(V, \alpha, \beta, B)$, 其中 α, β 代表

孔隙空间点和背景空间点的邻居个数,表征目标空间与背景空间的邻接关系,基于Rosenfeld^[25]的理论,为保证数字岩心中孔隙空间尽可能大的连通性,从而与真实岩心内部更加相符^[7],孔隙点采用26邻接(图1(a)),即 $\alpha=26$,固体颗粒部分采用面邻接方式的6邻接(图1(b)),即 $\beta=6$,以构成三维空间的基本单元即体素点来表征孔隙点与固体颗粒点的邻接方式。 V 是待研究空间, V 可分为目标空间(即孔隙空间)和背景空间; B 是所有目标点的集合, V/B 即所有背景点的集合。假设空间 V 中的任一点 $q(q_1, q_2, q_3)$, 则 q 点可被赋值0(背景点,如 $I[q]=0$ 或 $I(q_1, q_2, q_3)=0$), 或者1(目标点,如 $I[q]=1$ 或 $I(q_1, q_2, q_3)=1$)。

3 结合空间邻居域的欧式距离变换方法

3.1 基于数字岩心的欧式距离变换

利用距离测度,距离变换可以将一个由目标点和背景点组成的二值图转变为类似等高线的灰度图像,图像中每一个目标点都对应一个到边缘(背景与目标交接处)的最小距离值^[26]。

在一个二值化的三维数字岩心图像 $I=(V, P)$ 中(图2),通常用孔隙空间 P 和骨架颗粒空间 R 分别代表目标点集和背景点集,空间 P 和空间 R 共同组成待研究空间 V 。孔隙空间 P 中的一点 p 到骨架颗粒空间 R 中任一点 r 的距离表示为 $d(p, r)$,最短欧氏距离表示为 $d_E(p, r) = \text{Min}\{d(p, r); r \in R\}$,求解 $d_E(p, r)$ 的过程就是三维欧式距离变换。

3.2 基于空间邻居域的计算游标的设计

为了提高二维欧式距离变换算法的计算速度,Shih等人^[22]提出利用 3×3 像素规模的平面距离计算游标替代原始的单像素全局扫描方式对二维图像快速

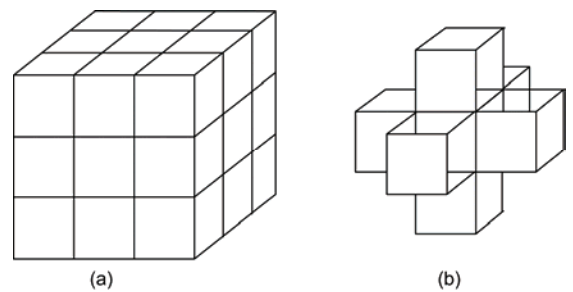


图1 邻接关系图。(a) 26 邻接; (b) 6 邻接

Figure 1 Spatial neighbor relation. (a) 26 neighbor; (b) 6 neighbor

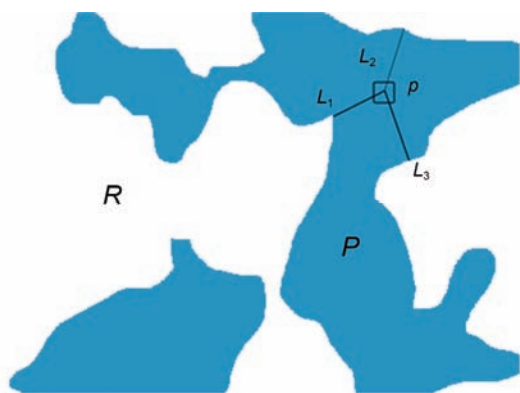


图2 (网络版彩色)数字岩心孔隙空间的欧式距离变换图示。R为骨架颗粒空间;P为孔隙空间;p为孔隙空间中一点; L_1, L_2, L_3 为点p到空间R的欧式距离

Figure 2 (Color online) Euclidean distance transform of pore space of digital core. R: skeleton particles; P: pore space; p: a point of pore space; L_1, L_2, L_3 : euclidean distance between point p and space R

扫描, 计算游标大小即单次扫描基本单元。在此算法的两次扫描过程中, 记录每一个目标点距离最近的背景点的地址, 同时利用目标点到每个邻居的距离和它每个邻居到最近背景点的距离可以得到当前这个点对应的欧式距离值。如图3(a)是一个 3×3 的二维距离计算游标, 图中深色阴影方格部分表示被测点, 将此游标置于一个如图3(b)的二值平面图像中并按所示方向, 由下到上, 由左到右以单像素方式移动, 计算局部欧式距离。

将以上方法扩展到三维图像, 由于孔隙点采用26邻接, 因此设计一个 $3 \times 3 \times 3$ 规模的三维空间游标来辅助计算欧氏距离。三维游标的扫描顺序是由面到体, 面上扫描顺序与二维游标相同。以图4为例详细说明游标的使用方法: 图4(a)所示是一个 $3 \times 3 \times 3$ 的游标, 其中心点p(图中菱形体)为平方欧氏距离待测点,

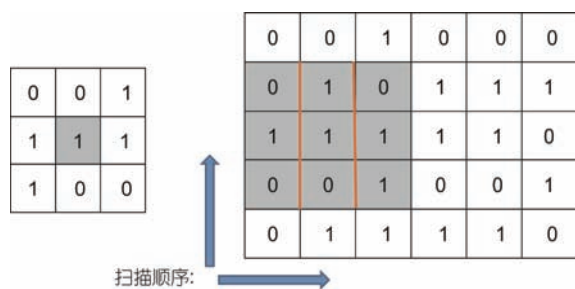


图3 (网络版彩色)二维图像距离计算游标和在二维图像游标扫描顺序示意图

Figure 3 (Color online) 2D cursor of distance calculation and its scanning order

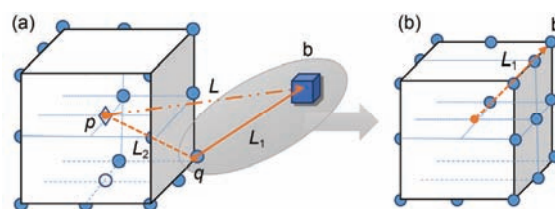


图4 (网络版彩色)三维游标以及距离计算示意图。(a) p点的欧氏距离计算示意图, 其中p点为待测点,q点为p点的某邻居点,b点为距离p点最近的边缘点,L为p点与b点的最短平方欧氏距离, L_1 为q点与b点的最短平方欧氏距离, L_2 为q点与p点的最短平方欧氏距离;(b) L_1 距离计算部分放大, 即q点与b点间的平方欧氏距离计算示意图

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of 3D cursor of distance calculation. (a) Euclidean distance calculation of point p, point n: the nearest neighborhood point of point p, point b: the nearest edge point of point p, L: the shortest square Euclidean distance between point p and point b, L_1 : the shortest square Euclidean distance between point q and point b, L_2 : the shortest square Euclidean distance between point q and point p; (b) magnification of square euclidean distance between point q and point p

p点到边缘处的最小平方欧式距离为L。假设点q为点p的26邻居中距离边缘最近的邻居点, 即q点的平方欧式距离值最小, 点q到相应边缘点b的平方欧式距离在另一 $3 \times 3 \times 3$ 的三维游标中计算求得, 为 L_1 (图4(b))。中心点p到邻居点q的平方欧式距离为 L_2 ($1 \leq L_2 \leq 3$), 则L与 L_1, L_2 之间的关系有

$$L = L_1 + L_2 + 2\mathbf{V}(p, q)\mathbf{R}(q, b)^T,$$

其中, $\mathbf{V}(p, q)$ 为点p与邻居点q之间的方向向量, $\mathbf{V}(p, q) = (p_x - q_x, p_y - q_y, p_z - q_z) \in \{(1, 1, 1), (0, 1, 1), \dots, (-1, -1, -1)\}$, $\mathbf{R}(q, b)$ 为点q距离边缘最近的方向向量, $\mathbf{R}(q, b) = (q_x - b_x, q_y - b_y, q_z - b_z)$ 。

3.3 变换过程中数字岩心边界的处理方法

在检测数字岩心空间边界上的点时, 会遇到如图5所示的情况。由于空间O与空间R中的点都为除孔隙空间以外的点, 此时如果将空间O中的点等同于固体颗粒空间, 并且若 $L' < L$, 则在欧氏距离变换过程中p点的距离值会储存为 L' , 这是不符合数字岩心距离变换要求的。同理, 如果将空间O处理成孔隙空间, 那么在转换过程中游标就会继续向边界外延伸扫描, 这也是不正确的。因此需要将空间O中的点处理成“空气”, 即不存在的空间。具体实现方法是: 如果在变换过程中, 若检测到被测点位于边界附近, 则将它邻居域中属于空间O的邻居点赋值为任意一个负值, 并且不再扫描它们的邻居点。

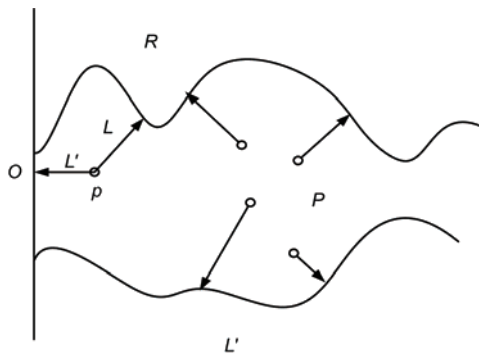


图5 边界点处理示意图. R: 固体颗粒空间; O: 数字岩心以外的空间; P: 孔隙空间; p: 孔隙空间中一点; L: p到空间R的最短距离; L': p到空间O的最短距离

Figure 5 Sketch map of process of boundary point. R: skeleton particles space; O: space out of digital core; P: pore space; p: a point in pore space; L: the shortest distance between point p and space R; L': the shortest distance between point p and space O

3.4 变换过程主要步骤与分析

假设三维数字岩心二值图中, 数值为“1”的点代表孔隙点, 数值为“0”的点代表固体颗粒点. 算法过程如下: 首先将所有数值为“1”的孔隙点全部赋值为无穷大, 方便在游标扫过时进行距离比较; 其次设定一个如上文所述 $3 \times 3 \times 3$ 的距离游标开始扫描, 在扫描过程中距离游标如容器般包裹所有待测孔隙点. 第一次扫描过程中, 标记所有含有数值“0”的游标容器, 计算容器中间体素到数值为“0”的邻居体素点的距离, 并取其最小值作为该中间体素的欧式距离最小值替换初始所设的无穷大值. 随着扫描计算的深入, 不断更新数据, 直到在立方容器中不再出现值为“0”的点, 但同时又会出现一些已经被赋值为最小距离的邻居点, 此时只需要在所有这些邻居点的距离值中找到一个最小的值, 如3.2节所述, 被测点的最短欧式平方距离即为该值、被测点到该点距离与两倍的两距离向量的乘积值三者相加所得到的值. 最后, 以相反方向再扫描一次. 如此前后两次扫描, 便可得到所有被测孔隙点的最短欧氏距离值. 流程图如图6所示.

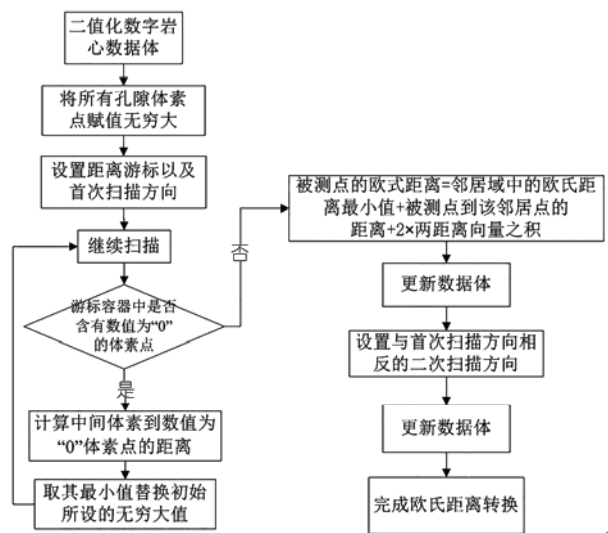


图6 基于空间邻居域的欧氏距离转换流程图

Figure 6 Flow chat of Euclidean distance transform based on neighborhood in 3D space

与传统欧氏距离计算方法相比, 本文所述基于空间邻居域的欧氏距离计算方法在保证距离计算精确度的情况下, 简化了传统计算方法中对每个待测孔隙点到边界距离的遍历比较过程, 可以简单迅速地找准距离最近边缘点的位置, 并计算得到相应的平方欧式距离值, 大大减小时间复杂度, 缩短计算时间, 为大规模数字岩心数据处理提供了基础.

4 实例分析与验证

20世纪80年代初, Elliott研制了世界上第一台CT机后, CT技术首先在医学领域被广泛应用. Lindquist等人^[27]将CT技术加以改进并应用到石油开发领域, Coenen等人^[28]应用CT机对岩心进行扫描得到了分辨率小于 $1 \mu\text{m}$ 的三维孔隙空间图像. 目前扫描岩心的CT机已非常先进, 多采用旋转CT扫描技术^[29], 分辨率可以达到准纳米级. 采用本文所述算法, 计算二值化后的明显缝洞特征的碳酸盐岩数据体(图7)以及含平板状裂缝的致密岩心数据体(图8)的欧氏距离, 数据体基本参数见表1.

表1 岩心数据体的基本参数

Table 1 Basic parameters of cores

岩心基本情况	数据来源	数据规模	分辨率(μm)	欧氏距离变化范围	欧氏距离图
具有明显缝洞特征的碳酸盐岩	ICCR国际碳酸盐协会	100×100×100	5.032	1~18	图9(a)
含平板状裂缝的致密岩心	长庆油田致密油气藏	100×100×100	1.13	1~7	图9(b)

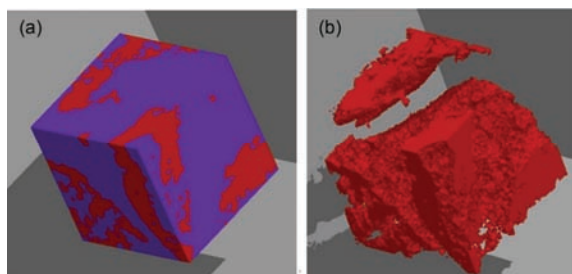


图7 (网络版彩色)二值化三维数字岩心(a)以及孔隙部分(b)可视化展示

Figure 7 (Color online) Binary 3D digital core (a) and pore space (b)

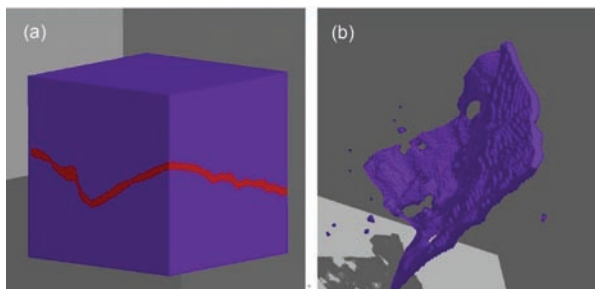


图8 (网络版彩色)二值化裂缝型数字岩心(a)以及裂缝部分(b)可视化展示

Figure 8 (Color online) Binary 3D fractured digital core (a) and fracture space (b)

按照本文所述方法对具有明显缝洞特征的碳酸盐岩数据体进行距离变换(表2), 得到距离数值范围为1~18, 经检验与传统欧氏距离所得值相同, 但计算时间大大缩短. 可视化岩心的欧氏距离图如图9所示, 以颜色从深到浅代表其欧式距离由小到大的排列顺序.

表2 基于空间邻居域的欧氏距离变换方法与传统欧氏距离方法的对比

Table 2 Comparison between traditional method of Euclidean distance transform and new method based on neighborhood in 3D space

岩心基本情况	数据规模	计算方法	欧氏距离变化范围	时间复杂度 $T(n)$
具有明显缝洞特征的碳酸盐岩	100×100×100	传统欧氏距离方法	1~18	$O(n!)$
具有明显缝洞特征的碳酸盐岩	100×100×100	基于空间邻居域的新方法	1~18	$O(2n)$

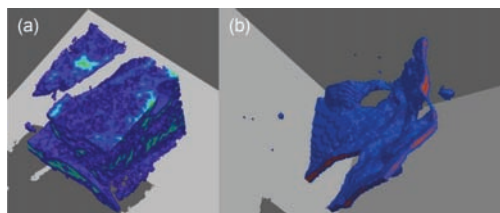


图9 (网络版彩色)缝洞型(a)和裂缝型(b)数字岩心距离变换结果可视化展示, 颜色从深到浅代表其欧式距离由小到大

Figure 9 (Color online) Euclidean distance map of fractured-vuggy digital core (a) and fractured digital core (b), colors from light to dark: Euclidean distance increase

大范围平板状裂缝数据体由中国石油大学渗流研究中心购买的Zeiss公司生产的Micro-XCT400型^[30]旋转CT扫描获得. 同样采用本文所述的距离变换方法(表2), 得到欧氏距离变换范围在1~7之间. 在可视化岩心的欧氏距离图(图9(b))中可以看出对于准规则形状的三维空间来说, 欧氏距离体素集呈规则层状分布规律.

随后, 针对不同属性的数字岩心(砂岩、页岩等, 数据规模为300×300×300)开展算法测试, 传统的直接欧氏距离方法约需15 min, 本文所述的距离变换方法仅需5 min左右. 结果表明, 本文所述的距离变换方法同样准确有效, 且计算时间短. 部分岩心距离变换剖切图如图10所示.

5 结论

距离变换在数字岩心中应用广泛, 是孔隙分割以及建立孔隙网络模型的基础. 针对目前距离变换在数字岩心研究工作中所遇到的数据量不准确、运算量大和运行周期长等问题, 本文首先对几何拓扑学中的邻居域理论、欧式距离测度、距离游标等概念进行了介绍; 然后根据相关理论提出了一种新的基于空间邻居域的欧式距离变换方法, 并详述方法的实现过程以及边界点的处理方法; 最后, 对物性不同的几块数字岩心数据进行了实例验证和分析, 运算结果表明该方法准确有效, 运算时间相对于以往方法大大缩短, 可以进行大规模数字岩心孔隙空间数据体的欧式距离变换工作.

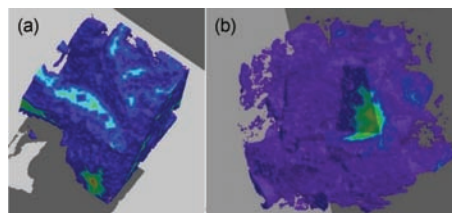


图10 (网络版彩色)不同属性数字岩心距离变换结果展示

Figure 10 (Color online) Distance map of different kinds of digital core

参考文献

- Chen L. Optimal algorithm for complete euclidean distance transform (in Chinese). *Chin J Comput*, 1995, 18: 611–616 [陈峻. 完全欧几里德距离变换的最优算法. *计算机学报*, 1995, 18: 611–616]
- Wang Y N, Li S T, Mao J X. *Research of Computer Image Processing and Identification Technology* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2001 [王耀南, 李树涛, 毛建旭. *计算机图像处理与识别技术*. 北京: 高等教育出版社, 2001]
- Bian Z Q, Zhang X G. *Pattern Recognition* (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2000 [边肇祺, 张学工. *模式识别*. 北京: 清华大学出版社, 2000]
- Zhao Q P. Review of virtual reality (in Chinese). *Sci China-Inf Sci*, 2009, 39: 2–46 [赵沁平. 虚拟现实综述. *中国科学: 信息科学*, 2009, 39: 2–46]
- Yao J, Zhao X C, Yi Y J, et al. The current situation and prospect on digital core technology (in Chinese). *Pet Geol Recovery Efficiency*, 2005, 12: 52–54 [姚军, 赵秀才, 衣艳静, 等. 数字岩心技术现状及展望. *油气地质与采收率*, 2005, 12: 52–54]
- Zhao K, Li Q, Xuan Y M. A reconstruction technique for three dimensional porous media using image analysis and fourier transform (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2008, 29: 287–290 [赵凯, 李强, 宣益民. 基于图象处理和傅里叶变换的三维多孔介质重构方法. *工程热物理学报*, 2008, 29: 287–290]
- Zhao X C. Numerical rock construction and pore network extraction (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2009 [赵秀才. 数字岩心及孔隙网络模型重构方法研究. 博士学位论文. 东营: 中国石油大学(华东), 2009]
- Zhao Y P, Chen J, Yuan Q, et al. Microcrack connectivity in rocks: A real-space renormalization group approach for 3D anisotropic bond percolation. *J Stat Mech Theory Exp*, 2016, 1: 013205
- Guo X J, He S L, Chen S, et al. Research on microstructure of shale pores and distribution features based on nano-CT scanning and digital core analysis (in Chinese). *Coal Geol China*, 2016, 28: 28–34 [郭雪晶, 何顺利, 陈胜, 等. 基于纳米 CT 及数字岩心的页岩孔隙微观结构及分布特征研究. *中国煤炭地质*, 2016, 28: 28–34]
- Yang Y F, Wang C C, Yao J, et al. A new method for microscopic pore structure analysis in shale matrix (in Chinese). *J Earth Sci*, 2016, 6: 1067–1073 [杨永飞, 王晨晨, 姚军, 等. 页岩基质微观孔隙结构分析新方法. *地球科学*, 2016, 6: 1067–1073]
- Zhao X C, Yao J, Fang K R. A new reasonable segmentation method for microstructure image of reservoir rock (in Chinese). *J China Univ Pet*, 2009, 33: 64–67 [赵秀才, 姚军, 房克荣. 合理分割岩心微观结构图像的新方法. *中国石油大学学报*, 2009, 33: 64–67]
- de Souza R M, De Carvalho F A. Clustering of interval data based on city-block distances. *Pattern Recogn Lett*, 2004, 25: 353–365
- Yoshimoto S, Honda Y, Ito O, et al. Supramolecular pattern of fullerene on 2D bimolecular “chessboard” consisting of bottom-up assembly of porphyrin and phthalocyanine molecules. *J Am Chem Soc*, 2008, 130: 1085–1092
- Elinas P. Matching maximally stable extremal regions using edge information and the chamfer distance function. In: *Proceedings of the Computer and Robot Vision*. Ottawa: IEEE, 2010. 17–24
- Lotufo R A, Falcão A X, Zampiroli F A. Fast Euclidean distance transform using a graph-search algorithm. In: *Proceedings of Computer Graphics and Image*. Gramado: IEEE, 2000. 269–275
- Svensson S, Borgefors G. Digital distance transforms in 3D images using information from neighbourhoods up to $5 \times 5 \times 5$. *Comput Vis Image Und*, 2002, 88: 24–53
- Maurer C R, Qi R, Raghavan V. A linear time algorithm for computing exact euclidean distance transforms of binary images in arbitrary dimensions. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2003, 25: 265–270
- Liu X B, Zou B J, Wang S C. A new algorithm for complete euclidean distance transform (in Chinese). *Comput Eng Appl*, 2005, 41: 44–45 [刘相滨, 邹北骥, 王胜春. 一种新的完全欧氏距离变换算法. *计算机工程与应用*, 2005, 41: 44–45]
- Torelli B, Cesar J. Parallel implementation of the exact Euclidean distance transform. Universidade Federal De Goiás, 2014
- Chen L C, Zhang Y M, Liu Y S, et al. 3D spatial data models of GIS based on grid (in Chinese). *Comput Eng*, 2004, 30: 4–6 [陈立潮, 张永梅, 刘玉树, 等. 基于栅格的 GIS 三维空间数据模型. *计算机工程*, 2004, 30: 4–6]
- Cuisenaire O, Macq B. Fast euclidean distance transformation by propagation using multiple neighborhoods. *Comput Vis Image Und*, 1999, 76: 163–172
- Shih F Y, Wu Y T. Fast Euclidean distance transformation in two scans using a 3×3 neighborhood. *Comput Vis Image Und*, 2004, 93: 195–205
- O'Reilly U M. Using a distance metric on genetic programs to understand genetic operators. In: *Proceedings of the Systems, Man, and Cybernetics*, 1997 Computational Cybernetics and Simulation. Orlando: IEEE, 1997. 4092–4097

- 24 Kong T Y, Rosenfeld A. Digital topology: Introduction and survey. *Comput Vision Graph*, 1989, 48: 357–393
- 25 Rosenfeld A. Cellular architectures for pattern recognition. Research Report. Maryland Univ College Park Computer Vision Lab, 1982. TR–1151
- 26 Connor R, Simeoni F, Iakovos M, et al. A bounded distance metric for comparing tree structure. *Inf Syst*, 2011, 36: 748–764
- 27 Lindquist W B, Venkatarangan A, Dunsmuir J, et al. Pore and throat size distributions measured from synchrotron X-ray tomographic images of Fontainebleau sandstones. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2000, 105: 21509–21527
- 28 Coenen J, Tchouparova E, Jing X. Measurement parameters and resolution aspects of micro X-ray tomography for advanced core analysis. In: *Proceedings of the International Symposium of the Society of Core Analysts*. Abu Dhabi, 2004
- 29 Shearing P, Bradley R, Gelb J, et al. Using synchrotron X-ray nano-CT to characterize SOFC electrode microstructures in three-dimensions at operating temperature. *Electrochem Solid St*, 2011, 14: B117–B120
- 30 Yin L. X-ray computerized microtomography. In: *Nanotech Research Methods for Food and Bioproducts*. New York: John Wiley & Sons, 2012. 215–234

Summary for “一种新的三维欧式距离变换方法及在数字岩心中的应用”

A new method of fast distance transform 3D image based on “neighborhood between voxels in space” theory

WANG Xin¹, YAO Jun^{2*}, JIANG ZeYun³, ZHANG Qi¹, ZHANG Zhen⁴, DUAN LiYa¹ & JIA XinXin¹

¹ Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266000, China;

² School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

³ Institute of Petroleum Engineering in Heriot-Watt University, Edinburgh UK EH14 4AS, Scotland;

⁴ AsiaInfo's Technology China Research Center, Beijing 100000, China

* Corresponding author, E-mail: yaojunhdp@126.com

Digital core technology is a new type of tool for analyzing and explaining the flow characteristics and fluid distribution of reservoir. Digital core technology has been widely used in recent years to describe features of pore space and simulate the process of fluid flow. As the basement of segmentation of pore space and reconstruction of pore network, the improvement of distance transform method has great impact on the development of digital core analysis technology. The accuracy and computation speed of distance transform method can directly affect the size of digital data and the detailedness of pore network model. Euclidean distance transform is the most precise one among all the distance transform methods, which means it is suitable for processing digital core data and calculating distance map. For traditional Euclidean distance transform method application in three-dimensional space data, there exist problems, such as too many search directions, large amount of data, and time-consuming. Large-scale data of digital core is hard to be transformed by this method. Therefore, a new theory of space based geometric topology neighbor relationship distance search algorithm was proposed in this paper.

By introducing theory of neighborhood in 3D space, the relationship between 3×3×3 neighborhood with whole core data can be constructed, the computational area is greatly narrowed so that computation speed can be improved markedly. Then, instead of calculating every distance between pore voxels and skeleton voxels, the Euclidean distance of a pore voxel can be obtained by scanning the distance value of its 3×3×3 neighborhood. Exact Euclidean distance map of digital core data includes large-scale data showed after only two-scans. Noteworthily, due to the disturbing of boundary points which out the range of data size, special treatment is needed to process the pore voxels which near boundary of digital core data. Compared to existing methods, according to the interior of the rock pore structure characteristics, we simplified the comparison rules of the neighbor domain Euclidean distance value so that we can significantly improve computing capacity and computation speed of the Euclidean distance transform method. By this way, a large number of operations by the complex Euclidean distance structure can be avoided. And the complexity of the algorithm is better understood and applied. This article describes the process of the algorithm in detail and the method is extended to characterize pore space segmentation work of digital cores. Fractured-cave digital core, fractured digital core and kinds of digital core data were transformed by the new method, the results show that the method is more accurate and efficient for the segmentation and reconstruction of pore space model. On this basis, pore structure characteristics of pore space can be extracted and analyzed by digital core technology, and more parameters like permeability, formation factor, and so on, can be simulated. This paper created a new distance transform method on digital rock identification and extraction, which laid a theoretical foundation for the efficient development of microscopic description of oil and gas reservoirs, especially for fractured and vuggy reservoirs.

distance transformation, digital rock, 3D image, neighborhood in 3D space, the spatial geometric topology theory

doi: 10.1360/N972016-00766