

文章编号 1004-924X(2009)10-2528-07

基于升序复核的并行三维图像骨架化算法

滕奇志, 康 瑕, 唐 棠, 何小海

(四川大学 电子信息学院 图像信息研究所, 四川 成都 610064)

摘要:为了准确有效地提取三维图像的骨架,提出一种新的并行三维图像骨架化算法。首先对原图像进行距离变换,然后迭代并行细化。每轮迭代分为6个子迭代,每个子迭代处理一类边界点,标记满足初选规则的前景点。在6个子迭代结束后,按距离值升序复核初选标记点,批量删除满足条件的点,完成一轮迭代。重复这一过程直到没有点被删除,得到最终骨架。将该算法应用于二维和三维图像,得到了与人类视觉感知相一致的目标骨架。新算法能够保证得到的骨架的连通性和拓扑结构,通过计算骨架点的距离值验证了其居中性,反映了目标的本质结构特征。

关键词:骨架化;8-6树;升序复核;并行算法

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A

Parallel 3D skeletonization algorithm based on sort ascending rechecking

TENG Qi-zhi, KANG Xia, TANG Tang, HE Xiao-hai

(Image Information Research Institute, School of Electronics and information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In order to accurately and efficiently extract skeletons from 3D images, a new parallel 3D skeletonization algorithm is proposed. The distances of original images are firstly transformed, and then iterative parallel thinning is performed. Each iteration is divided into 6 sub iterations, one sub iteration is used to process a kind of boundary points, and the foreground points satisfying the primary selection rule are labeled. After 6 sub iterations are completed, labeled points are rechecked in an ascending distance order, and those who satisfy thinning conditions are deleted. This process is repeated until there is no point deleted. This algorithm is applied to 2D and 3D images, obtained skeletons are consistent with that by the visual apperception. This algorithm guarantees the connectivity and topology of extracted skeletons, and its median can be validated by caculating the distance values of skeleton points, which reflects the essence characteristics of the object.

Key words: skeletonization; 8-6 trees; sort ascending rechecking; parallel algorithm

收稿日期:2008-09-24;修订日期:2008-11-18.

基金项目:四川省科技攻关基金资助项目(No. 05GG021-026-03)

1 引 言

骨架是描述物体最直观有效的方法之一。目前,二维图像骨架化方法已经较为成熟。随着 MRI,CT 等三维图像数据的广泛应用,三维图像的骨架化也越来越多地受到人们的重视,该方法可用于自动导航,三维数据压缩,目标特征提取和识别^[1-2]等。由于在医学图像,工业制造和石油地质等领域有非常好的应用前景,因此三维骨架化方法近十多年来一直是三维图像处理的一个研究热点。国外已有许多学者对此进行了研究,而国内研究相对较少^[3]。

目前三维图像骨架化方法主要有 3 种,细化方法^[4]、基于距离变换方法和路径规划方法。细化方法能较好地保持拓扑结构,但由于此法为多次迭代,当数据量较大时,处理速度较慢,且骨架对边界的噪声较敏感。距离变换方法得到的骨架具有中间性,但是不能较好地保持拓扑结构,且不一定是最细。路径规划方法存在的问题是物体表面不光滑会导致初始路径呈锯齿状,以至于中心化后的骨架也不光滑,且分支端点的确定对噪声较为敏感,容易产生毛刺。

上述分析可见距离变换法和细化法优缺点正好互补,本文由此提出一种将距离变换和 6 轮子迭代并行细化相结合的骨架化新算法。一个优良的骨架应该具有 3 个特性^[4]:(1)拓扑等价:骨架应和原始图像拓扑等价,即具有相同数量的前景目标,背景目标和孔;(2)细:骨架为单像素宽;(3)居中:骨架应位于前景点的中心。在研究三维骨架化新算法时,应该强调:(1)删除简单点保留拓扑结构;(2)并行细化直至没有可删除的点,得到最细骨架;(3)按距离值由小到大重新检查(升序复核)初选标记的结果是否可删除,使骨架居中。文中有关三维图像的前景点,边界点,邻域及连通等概念的基本定义参照文献^[5]的 2.1 节,这里不再赘述。

2 简单点

如果一个边界点删除后,前景点及背景点中的连通体和孔的数量不改变,这样的点为简单点。其概念最早由 Morgenthaler 提出。Lee, Kashyap

与 Chu^[5]使用 8 树和欧拉表判断简单点。本文提出了判别简单点的新方法,称之为 8-6 树法。在 8 树基础上新增 6 树检查 18 邻域中背景点的连通性,不用欧拉表即可判别简单点,简化了运算。

定义简单点^[6]: v 为三维图像(Z^3, m, n, S)的前景边界点,其中 m 和 n 分别取 26 和 6, S 表示前景点的集合, NC_a 表示连通体的数目。如果 v 同时满足以下两个条件,则 v 为简单点:

条件 1:

$$NC_a(N_{26}(v) \cap S) = 1, \tag{1}$$

条件 2:

$$NC_a(N_{18}(v) \cap \bar{S}) = 1. \tag{2}$$

式(1)表示 v 的 26 邻域中前景点组成 26-连通体的数目为 1;式(2)表示 v 的 18 邻域中背景点组成 6-连通体的数目也为 1。

条件 1 用文献^[5]中的 8 树检查,这里不再赘述;条件 2 用本文提出的 6 树检查:

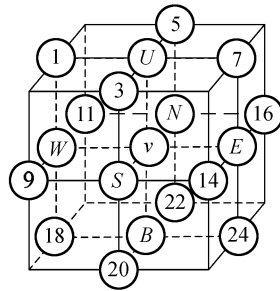


图 1 $N_{18}(v)$ 及 6 类边界点

Fig. 1 $N_{18}(v)$ and six kinds of boundary points

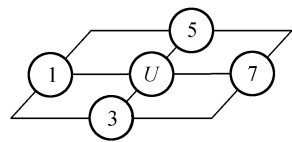


图 2 U 方向的面

Fig. 2 Surface of up-direction

本算法首先将 v 点和 $N_{18}(v)$ 组成的立方体(图 1)分割成 6 个方向的面,图 2 显示了 U 方向的面。由此构建 6 树(图 3),其根节点为 v ,子节点为 $N_6(v)$,叶子节点为 $N_{18}(v) - N_6(v)$ 。共有的叶子节点说明 6 个面相互之间的邻接关系。接着遍历 6 树进行标记,确定 18 邻域中背景点组成 6-连通体的数目。

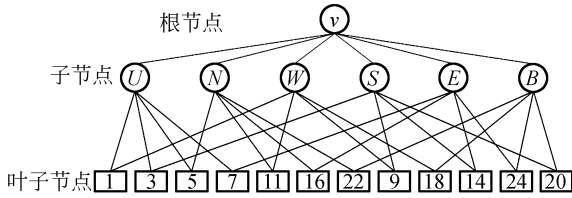
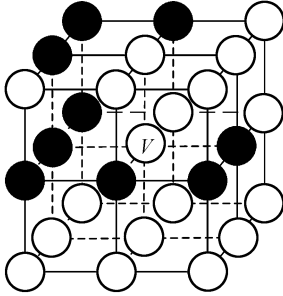
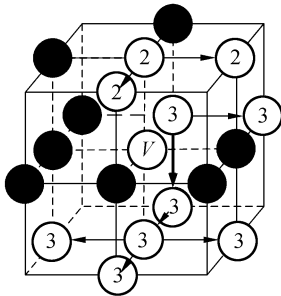


图 3 6 树
Fig. 3 6 tree



(a) 非简单点 v
(a) A non-simple point v



(b) 6 树标记
(b) 6-tree label

图 4 非简单点和 6 树标记

Fig. 4 A non-simple point v and 6-tree label

计算 18 邻域中背景点组成 6-连通体数目的算法流程如下：

输入：点 v 的 18 邻域 $N_{18}(v)$ 。

输出：18 邻域中背景点组成 6-连通体的数目。

步骤 1：设置初始标号；

步骤 2：依次处理为背景点的子节点，将该子节点及其为背景点的叶子节点置为当前标号；

步骤 3：如果已标号的叶子节点所属的其余子节点为背景点，则将该子节点及其为背景点的

叶子节点也置为当前标号；

步骤 4：如果还有为背景点的子节点未标号，则标号加 1，重复执行步骤 2~4，直到为背景点的子节点都被标号。

上述标号的种类数即为 18 邻域中背景点组成 6-连通体的数目。

图 4(b)为使用 6 树对图 4(a)中点 v 的 18 邻域背景点进行标号的示意图。黑色点代表前景点，白色点代表背景点。设置初始标号为 2。图 4(b)出现两种标号(2,3)，所以其 18 邻域背景点组成 6-连通体数目为 2，不满足简单点条件 2，不是简单点。

3 并行算法

细化算法按迭代方式不同分为串行算法和并行算法。串行算法一次只删除一个前景点，而并行算法每轮迭代删除一批前景点。由于串行算法的处理结果依赖于对像素处理的先后顺序，因而像素点的消除或保留不可预测；而并行算法利用相同的条件同时检测所有像素点，其结果具有各向同性。因此，从算法原理上看并行算法明显优于串行算法。

本算法首先对原图像进行距离变换，为了计算简便，本文使用文献[7]中提出的切削距离变

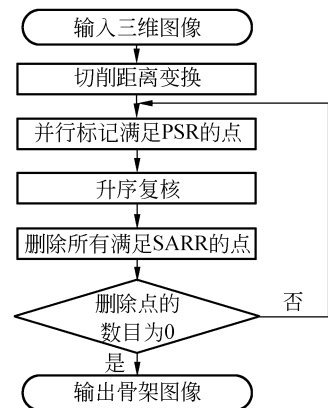


图 5 流程图

Fig. 5 Flowchart

换;再做并行细化,将每轮迭代分为 6 个子迭代,每个子迭代处理一种类型(U, N, W, S, E, B)的边界点,标记满足 3.1 中初选规则(Primary Selection rule, PSR)的点;6 个子迭代结束后,按照距离值由小到大的顺序复核(升序复核)所有标记点是否可删除;升序复核完后,删除所有满足 3.2 中升序复核规则(Sort Ascending Rechecking Rule, SARR)的点;如果本轮删除点的数目不为 0 进入下一轮细化,如果删除点的数目为 0,算法结束,得到最终骨架。图 5 为算法流程图。

3.1 初选规则(PSR)

骨架点处的距离值比大多数邻接点的距离值要大,这些特殊的点必然是潜在的骨架点,称之为凸点。保留这些特殊点,有助于准确定位最终骨架,减少噪声带来的影响。

定义(凸点):

$$d(v) \geq d(p), \forall p \in N_{26}(v). \quad (3)$$

其中, $d(v)$ 和 $d(p)$ 是点 v, p 的距离变换值。不断剥除简单点可以使骨架较好地保持拓扑结构^[5],而保留凸点可以使骨架的位置准确,因此制定如下初选规则。

初选规则:如果 v 是简单点,且不是凸点,则标记 v 。

3.2 升序复核

并行细化时,满足相同条件的点集同时被删除,可能造成一个目标完全消失,破坏拓扑结构。Lee, Kashyap 与 Chu 使用了相继复核法(Sequential Rechecking, SR)保持连通性^[5]取得了较好的结果。为了进一步使骨架居中,本文采用了基于距离值的升序复核法。所谓升序复核就是按照距离值由小到大重新检查标记点是否可删除。

骨架是由互相连接的曲线构成,如果一个点的领域中前景点数目少于 2,那么这个点就是端点。不闭合曲线的端点是简单点,虽然删除端点不影响图像的拓扑结构,但不闭合的曲线会被细化为一点,改变图像的几何形态特征。所以必须在升序复核中加入几何约束条件,防止端点被删除。

升序复核规则(SARR):

$$N_{26}(v) \cap S \geq 2, \quad (4)$$

$$O(\{B \cap N_{26}(v)\} \cup \{R \cap N_{26}(v)\}) = 1. \quad (5)$$

式(4)表示点 v 不是端点。式(5)中, B 表示初选规则标记点的集合; R 表示前景点 S 删除 B 后余

下点的集合($R=S-B$); O 表示连通体的数量,用 8 树计算。标记点中满足升序复核规则的点可被删除,否则不可删除。

4 结果与分析

4.1 三维图像

本文以 VC++6.0 为开发工具实现了上述三维图像骨架化算法。实验结果如图 6 所示,图 6(a)为同类文献[3-5]测试骨架化常用的三维物体模型,图 6(b)为本算法的实验结果。实验表明,本算法得到的骨架有很好的连通性,保持了原图像的拓扑和形状特征。



(a) 原始三维图像

(a) Original 3D images



(b) 骨架

(b) Skeletons

图 6 本文算法的实验结果

Fig. 6 Experimental results of proposed algorithm

4.2 二维图像

本算法用于二维图像也有其优势。目前较多算法得到的骨架在顶端往往存在分叉,出现畸变^[8],在结构上与人为感知的骨架存在差异。这些分叉导致骨架端点位置的变化,对于如指纹对比等需要精确定位骨架端点的应用来说,其影响十分不利。本文以二维图像为中间图层,在其前后各加一层无前景点的背景图层,即可对其骨架化。本算法用于如文献[9]的英文字母 H(图 7),消除了不必要的分支如图 7(c),与其他算法相比具有明显的优势。图 8 和图 9 分别是本算法对手写汉字及指纹图像黑色纹理进行骨架化的结果。



(a)Liu 等人的算法结果^[10]

(a)Result of Liu algorithm



(b)文献[9]的算法结果

(b) Result of refs. 9



(c)本算法的结果

(c)Result of our algorithm

图 7 字母 H 的骨架

Fig. 7 Skeletons of H

自在飞花轻似梦 自在飞花轻似梦

图 8 手写汉字及其骨架

Fig. 8 Handwritten Chinese characters and their skeletons



(a)指纹

(b)骨架

(a) Fingerprint

(b) skeleton

图 9 指纹及其骨架

Fig. 9 Fingerprint and its skeleton

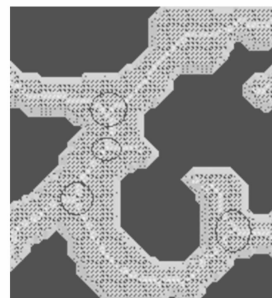
4.3 岩石孔隙微观结构三维图像

本文研究三维图像骨架化的重要应用是针对岩石微观三维图像分析,在石油地质勘探开发基础研究中,岩石孔隙的微观结构是重要的分析数



(a)砂岩孔隙微观结构三维图像

(a) Three dimensional image of sandstone pore microstructure



(b)骨架(椭圆标示孔腔的位置)

(b) Skeleton (The locations of pores labeled by ellipses)

图 10 砂岩孔隙微观结构三维图像和骨架

Fig. 10 Three dimensional image of sandstone pore microstructure and its skeleton

据。孔隙由孔隙和喉道(连接孔隙的通道)组成,它们的分布和尺寸是储集层研究的关键,对油气的勘探开发具有重要的意义。通过 CT 扫描或基于二维薄片图像重建技术可以获取岩石中孔隙的微观结构三维图像^[11-12],再由三维图像的骨架识别孔隙和喉道。

图 10(a)是砂岩孔隙微观结构的三维图像,图 10(b)为本文算法提取的骨架。通过骨架上的交叉点(图中用椭圆标示)可定位对应的孔隙,识别连接孔隙的喉道。在此基础上,可以分析孔隙连通性、配位数(孔隙连接的喉道数)、喉道宽度、孔隙体积等,为三维参数定量分析提供重要依据。

参考文献:

- [1] 刘桂雄,申柏华,冯云庆. 基于笔划趋势分析的二值图像细化方法[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 527-530.
LIU G X, SHEN B H, FENG Y Q. Thinning of binary image based on stroke trend analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 527-530. (in Chinese)
- [2] 刘桂雄,申柏华,冯云庆,等. 基于改进的 Hough 变换图像分割方法[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3): 257-260.
LIU G X, SHEN B H, FENG Y Q, *et al.*. Study on image segmentation based on improved Hough transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3): 257-260. (in Chinese)
- [3] 韩国强,田绪红,李志垣,等. 三维图像骨架化方法综述[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(9): 1695-1699.
HAN G Q, TIAN X H, LI ZH Y, *et al.*. Survey of 3D image skeletonization[J]. *Chinese Computer Systems*, 2007, 28(9): 1695-1699. (in Chinese)
- [4] PUDNEY C. Distance-ordered homotopic thinning: a skeletonization algorithm for 3D digital Image [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1998, 72(3): 404-413.
- [5] LEE T C, KASHYAP R L K, CHU C N. Building skeleton models via 3-D medial surface/axis thinning

5 结 论

本文提出一种新的并行三维图像骨架化算法。利用初选规则和升序复核,将距离变换和 6 轮子迭代并行细化相结合,弥补了一般串行算法的缺陷。所得骨架具有很好的连通性,中间性和拓扑等价性,本算法对于二维图像同样有效。

由于三维图像数据量较大,而细化方法需要多次迭代,在处理较大图像时速度较慢,因此,对算法的优化及数据结构的改进有待进一步研究。此外在实际应用中,针对不同特点的三维图像可考虑在本算法加入特定目标的相关先验知识,通过在初选规则中加入新的约束条件筛选出最初的标记点,从而获得感兴趣目标的骨架。

- algorithms[J]. *CVGIP: Graphical Models Image Process*, 1994, 56(6): 462-478.
- [6] MALANDAIN G, BERTRAND G B. Fast characterization of 3D simple points[C]. *IEEE International Conference on Pattern Recognition*, 1992: 232-235.
- [7] BORGEFORS G. Distance Transformations in arbitrary dimensions [J]. *Computer Vision Graphics Image Process*, 1984, 27: 321-345.
- [8] 何永义,夏俊日升. 工程图像的矢量化技术[J]. 光学精密工程, 2002, 10(4): 374-378.
HE Y Y, XIA J R SH. Vectorizational of engineering image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4): 374-378. (in Chinese)
- [9] 陈晓飞,王润生. 基于非脊点下降算子的多尺度骨架化算法[J]. 软件学报, 2003, 14(5): 925-929.
CHEN X F, WANG R SH. A multi-scale skeletonization algorithm based on non-ridge points lowering operation [J]. *Software*, 2003, 14(5): 925-929. (in Chinese)
- [10] LIU J Y, WANG R SH. Sketching a gray scale pattern based on non-ridge points lowering operation [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2000(5): 544-547.
- [11] TANG T, TENG Q Z, HE X H. A hybrid reconstruction method of sandstone from 2D section image[C]. *Neural Networks and Signal Processing*, 2008: 342-347.
- [12] 周怡佳,滕奇志,唐棠. 基于改进模拟退火算法的

岩石薄片图像三维重建[J]. 石油矿场机械, 2007, 36(11):13-16.

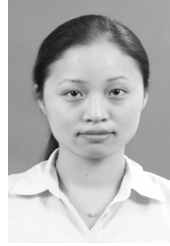
ZHOU Y J, TENG Q ZH, TANG T. 3D recon-

struction from rock slice based on simulated annealing algorithm [J]. *Oil Field Equipment*, 2007, 36(11):13-16. (in Chinese)

作者简介:



滕奇志 (1961—), 女, 四川成都人, 博士, 教授, 1982 年于电子科技大学获学士学位, 1996 年于四川大学获博士学位, 主要从事图像处理, 模式识别等方面的研究。E-mail: nic5602@scu.edu.cn



唐棠 (1981—), 女, 四川成都人, 博士研究生, 2003 年于四川大学获学士学位, 主要从事图像处理, 三维重建技术等方面的研究。E-mail: tangtangscu@gmail.com



康瑕 (1985—), 女, 四川宜宾人, 硕士研究生, 2007 年于四川大学获学士学位, 主要从事三维图像处理, 模式识别等方面的研究。E-mail: kangxiazai@126.com



何小海 (1964—), 男, 四川盐亭人, 博士, 教授, 1985 年于四川大学获学士学位, 以后分别获硕士、博士学位, 主要从事通信与信息处理, 图像处理等方面的研究。E-mail: hxx@scu.edu.cn

● 下期预告

二维微硅片狭缝阵列的阿达玛光谱仪

范玉^{1,2}, 吴一辉¹, 宣明¹, 张平¹, 周连群^{1,2}, 庄须叶^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

为了实现对微弱信号的光谱分析, 采用 Offner 光学结构, 制作了高光通量和高分辨率阿达玛光谱仪, 并对光谱仪中入射狭缝的类型选择进行分析。利用 MEMS 加工技术制作出阿达玛微硅片狭缝阵列, 分析了入射狭缝的衍射现象, 推导出衍射后的光强分布公式, 采用 Matlab 软件对光强分布进行仿真, 搭建了实验测量平台对仿真结果验证。得到在相同的条件下, 阿达玛 S15 型狭缝阵列比阿达玛循环 S15 型狭缝阵列的光通量提高 1.45 倍。最终得出推导的衍射后光强分布公式正确, 仿真方法准确, 测试方法合理, 阿达玛 S 型微硅片狭缝阵列适合本文设计的光谱仪。