

基于边界距离场的管腔中心路径自动提取算法

竺海, 姬红兵, 高新波

(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

(zhuhai@gr.xidian.edu.cn)

摘要 首先计算三维空腔目标的精确边界距离场,然后建立基于该距离场的代价最大生成树,最后从生成树中提取中心路径。实验结果表明,精确的边界距离场使得提取的中心路径更加精确,而快速算法的应用提高了该算法的效率,获得的结果可直接用作虚拟内窥镜的漫游路径。

关键词 虚拟内窥镜;边界距离场;中心路径提取

中图法分类号 TP391

An Automatic Centerline Extraction Algorithm Based on Distance from Boundary Field

Zhu Hai Ji Hongbing Gao Xinbo

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract The proposed algorithm generates the accurate distance from boundary (DFB) field for the 3D tubular object, then the maximal-spanning tree (MST) is constructed based on the DFB field. By Dijkstra algorithm the centerline of the tubular object is extracted from the MST tree. The experimental results show that an accurate DFB field can indeed make the extracted centerline much more accurate, and the fast implementation method improves the computational efficiency of the proposed algorithm. In addition, the extracted centerline of the tubular object can be directly used in the system of virtual endoscopy.

Key words virtual endoscopy; distance from boundary field; centerline extraction

0 引言

虚拟内窥镜技术随着高分辨医学图像(CT, MRI等)的出现,以及虚拟现实技术的不断完善和提高,已得到迅速发展,同时也成为虚拟现实技术走向实际应用最为活跃的研究领域之一^[1]。虚拟内窥镜技术是随着医学影像技术、计算机图形学和可视化技术的发展而形成的一种新兴技术,可以在计算机上模拟传统的光学内窥镜对人体器官的内部结构进行细致的检查^[2]。在进行真实的内窥镜检查时,

内窥镜在人体内沿着管道中心移动。同样,为了获得类似的观察效果,在虚拟内窥镜漫游数字器官的过程中,虚拟相机最好也能够沿着一定的路径行走。因此,漫游路径的自动规划技术成为虚拟内窥镜系统中的关键技术之一。

实现漫游路径的自动规划一般可分为拓扑逻辑细化法和距离变换法2种。拓扑逻辑细化法通过反复剥除物体的最外层体素,直到只剩下一个体素作为该物体的骨架。虽然这种算法的思想非常简单,但是其计算量非常大^[2],即使是其快速算法^[3],也难以满足要求。

收稿日期:2005-05-07;修回日期:2005-12-06

基金项目:国家自然科学基金(60202004);教育部重点项目(104173)

距离变换法分为 2 步:首先计算三维空腔内的所有体素到用户指定点的距离,本文称这种距离场为源距离(distance from source, DFS)场;然后从最大的 DFS 点出发,采用 Dijkstra 最短路径算法连接到源点. 这种算法的优点是计算速度快,缺点是在拐角处容易贴近内壁,求得的路径必须进行中心化处理^[4].

近来也有一些算法考虑到使用另外一种距离场——边界距离(distance from boundary, DFB)场,其定义为目标体素到它最近边界的距离. 如文献[5]采用基于双距离场的方法提取三维中心路径,即首先建立基于源点的 DFS 场和基于边界的 DFB 场;然后通过 2 个距离场的共同约束提取一条连接用户指定的起点和终点的中心路径. 该方法由于使用 DFB 距离可以很好地保证路径处在管腔的中心位置,但是在建立 DFB 场时采用了近似计算,使得产生的中心路径会出现偏差,而且双距离场的约束过程也比较烦琐. 为此,本文提出基于精确 DFB 场的中心路径自动提取算法. 该算法也利用了 DFB 距离场的优点,而且计算的是精确的 DFB 场,并在此基础上建立以 DFB 距离为代价的最大生成树,使得这棵树的主干位于管腔的中心位置,可以在最大树上提取中心路径和分支路径.

1 算法描述

在虚拟内窥镜系统中,为了使虚拟相机在自动漫游数字器官时达到好的观察效果,其规划的漫游

路径必须满足以下条件^[6]:1)26-邻域连通;2)尽可能地位于中心轴上;3)单体素宽;4)鲁棒性好;5)自动化程度高;6)能处理多分支情形;7)计算效率高. 本文算法正是基于以上 7 个条件所设计的.

本文算法包括 3 个步骤:计算 DFB 场,建立最大生成树,提取中心路径和处理多分支情形.

1.1 DFB 场

本文算法的输入数据是对原始体数据经过组织分割后得到的二值数据,即空腔内的目标体素和背景. 由于人体内的管腔形状都是分段近似于圆柱形的,要找到管腔的中心线,首先需要体现这种特征的物理量,而 DFB 场正好满足这个要求. 当 DFB 场建立起来以后,DFB 距离大的体素比 DFB 距离小的体素更接近于管腔的中心位置. 以二维为例,图 1b 所示为图 1a 的 DFB 场. 在图 1a 中,白色区域代表目标,灰色区域代表背景. 在图 1b 中,亮的点代表的 DFB 距离大(为了便于显示,把灰度拉伸到了 0~255). 利用 DFB 场的这一特性可以很好地保证满足条件 2. 但是现有的许多中心路径提取算法都没有利用 DFB 场,其中主要的原因是计算 DFB 距离非常耗时,特别是对于这种高分辨的三维医学体数据. 因此,设计精确快速的三维 DFB 距离变换算法是整个算法的基础,也是至关重要的一步. 由于 DFB 距离值的大小反映的是该点位于空腔中心的程度,所以为了减少运算时间,只需计算平方欧氏 DFB 距离即可. 下文提到的 DFB 距离均为平方欧氏 DFB 距离.

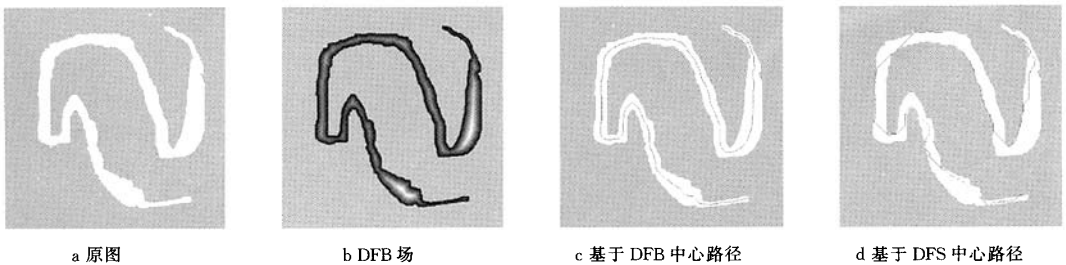


图 1 DFB 场及用 2 种方法提取的中心路径

在三维 DFB 场中,设点 p 的 DFB 距离值为 $f(i, j, k)$,那么总可以把 $f(i, j, k)$ 分解为 3 个整数的平方和^[7],即

$$f(i, j, k) = (I_{\max})^2 + (I_{\text{mid}})^2 + (I_{\min})^2;$$

其中 $I_{\max} \geq I_{\text{mid}} \geq I_{\min}$,且 $I_{\max}, I_{\text{mid}}, I_{\min}$ 都为整数. 如果用 $N^3(p)$ 表示点 p 的 26-邻域,那么可以把

$N^3(p)$ 分成 3 类: $N^{3-1}(p)$, $N^{3-2}(p)$ 和 $N^{3-3}(p)$,它们分别表示 p 的最近邻域,面对角邻域和体对角邻域. 因此,当已知点 p 的 DFB 距离值时,其 3 类邻域的距离分别为

$$f(N^{3-1}(p)) = \min(f(N^{3-1}(p))), \\ (I_{\max} + 1)^2 + (I_{\text{mid}})^2 + (I_{\min})^2 \quad (1)$$

$$f(N^{3-2}(p)) = \min(f(N^{3-2}(p)), (I_{\max} + 1)^2 + (I_{\text{mid}} + 1)^2 + (I_{\min})^2) \quad (2)$$

$$f(N^{3-3}(p)) = \min(f(N^{3-3}(p)), (I_{\max} + 1)^2 + (I_{\text{mid}} + 1)^2 + (I_{\min} + 1)^2) \quad (3)$$

这里的 I_{\max} , I_{mid} 和 I_{\min} 是由 $f(p)$ 分解的, 当分解不止一种时, 需要通过考察 $f(p)$ 的父代决定采用何种分解^[7].

本文借鉴文献[7]提出的前后向扫描方法. 在体数据分割时, 把体数据分成三部分, 其中空腔内体数据和空腔外体数据分别称为内部体素和外部体素, 而与内部体素 26-邻域相邻的外部体素为边界体素. 标记内部体素为无穷大, 边界体素为 0, 外部体素为 -1, 扫描时对外部体素不用处理, 可以大大地节省运算时间. 在扫描过程中, 内部体素的距离值由式(1)~(3)计算, 算法的具体实现类似文献[7].

1.2 建立基于 DFB 场的最大生成树

第 1.1 节建立的精确 DFB 场包含了丰富的边界距离信息. 从每一个横截面上看, 中心点的 DFB 距离值是最大的, 如果把这些中心点连接起来, 就可以得到全局最优的中心路径. 但是在实际计算时寻找每一个横截面是非常困难的, 而且由于管腔粗细不一, 在粗部位离中心点较远的点的 DFB 距离值比在细部位中心点的 DFB 距离值还要大. 所以必须通过有效的方法把 DFB 场的这一信息提取出来, 并且最终形成一条路径. 本文参考文献[6]的方法, 以用户指定的源点 S 为根节点建立一棵基于 DFB 场的最大生成树, 使得 DFB 距离值大的点位于这棵树的主干上, 最后只要提取树的主干即能得到中心路径.

最大生成树的建立可以借鉴 Dijkstra 动态规划的思想. 首先把空腔内的体素点看成树的节点, 而每个节点(除了根节点 S)都指向一个父节点, 从而形成一棵连通空腔内所有体素的有向树. 而且在树的生成过程中要很好地利用 DFB 距离值, 定义 A 指向 B 的权为 $W_{AB} = \text{DFB}(B)$. 即如果 B 是 A 的父节点, 则 A 连通到 B 的代价就是 $\text{DFB}(B)$. 最大生成树的建立过程如下:

Step1. 从源点 S 开始, 把它所有 26-邻域点均指向 S 作为其父节点, 并且把它们的 DFB 距离值放入一个排序队列 q 中.

Step2. 从排序队列 q 中取出 DFB 距离最大的那个点 C 作为当前处理的点, 让 C 的 26-邻域中未被处理过的点均指向 C 作为父节点, 使这些连接边的权值都是 $\text{DFB}(C)$, 保证新增的连接边的权值最大, 再把这些点的 DFB 距离值放入排序队列 q .

Step3. 如此循环, 直到把空腔内的所有体素都处理完.

从以上过程可以看出, 每次优先处理的都是队列中 DFB 距离值大的点, 而这个 DFB 距离值又是所有指向这个节点的边的权值, 从而使得这棵树就是以 DFB 距离为权值的最大代价树. 因此树的主干上的权值最大, 也就是说 DFB 距离值大的点位于树的主干上, 从而确保树的主干就是空腔的中心路径. 另外, 在生成最大树的同时还可以记录每个节点到根节点的 DFS 距离, 这个 DFS 场可以用来确定路径的结束节点以及用来处理多分支的情形.

在最大树的生成过程中, 设计一个快速的队列排序算法是决定整个算法执行效率的关键. 本文采用查找表的方法对算法进行优化, 首先建立一个动态的查找表, 表的索引范围为 0~255; 接着在 Step1 时把每个 DFB 距离值归到 0~255, 再把该点的体素序号放入对应的查找表; 在 Step2 时始终从索引值最大的不为空的查找表中提取体素序号, 直到所有的查找表都为空. 该方法省去了排序比较的过程, 大大提高了算法的执行效率. 特别是对于像结肠这种空腔内部体素量非常大的应用场合, 该方法明显快于采用最快的排序算法的计算速度.

1.3 提取中心路径和处理多分支情形

当最大生成树建立以后, 它的主干就在空腔的中心位置, 因此路径的提取相对就比较简单了. 一般分 2 步进行提取: 1) 如果用户没有指定结束点, 系统就指定通过第 1.2 节中计算出来的 DFS 距离值最大的那个点为终点 E , 这样可以提取最长的那条路径; 2) 从终点 E 开始, 根据节点的指向关系可以直接连通到源点 S . 图 1c 所示为对图 1a 提取到的中心路径结果, 图 1d 所示为只使用 DFS 距离和 Dijkstra 最短路径算法而没有使用 DFB 距离所提取的结果, 路径明显不在中心位置.

由于第 1.2 节计算的 DFS 场保存了空腔内部所有点到源点 S 的距离值, 所以对于多分支情形的处理也是非常容易的. 如图 2 所示, 具体实现步骤如下:

Step1. 从结束点 E 开始, 沿着中心路径逐个扫描路径上的点直到源点 S .

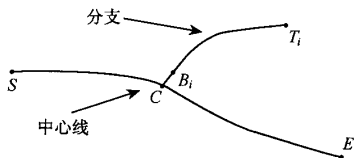


图 2 分支处理

Step2. 对于每一个在中心路径上的点 C , 检查它的 24-邻域(在中心路径上的 2 个邻域点除外), 找到与 C 有连接关系的点 B_i , 即 $pathlink(B_i) = C$.

Step3. 对于每一个 B_i , 找出所有与 B_i 有连接关系的体素点(可以是和 B_i 间接相连), 然后找出 DFS 距离最大的那个点 T_i . 如果 $DFS(T_i)$ 大于某个指定的阈值 T (这种指定是合理的, 并且不同的部位 T 值的大小也是不同的), 则将 T_i 保存为一个连接到 C 的分支结束点, T_i 到 C 的路径提取同中心路径的提取方法.

由于多分支处理算法对每一个空腔内的体素只扫描一次, 因此算法的复杂度为 $O(N)$, 其中 N 为空腔内体素的个数. 当分支的级数不止一级时, 即分支中还有分支时, 再按照上面的方法扫描分支中的路径点, 以获取下一级的分支. 设分支的级数为 m , 则整个算法的复杂度也只有 $O(mN)$.

1.4 算法归纳与分析

本文算法以距离变换为基础, 构造基于 DFB 场的最大代价生成树, 最后是在最大树上提取中心路径和处理多分支的情形, 基本步骤总结如下:

Step1. 将体数据分为外部体素、内部体素和边界体素 3 类.

Step2. 对所有的内部体素进行三维平方欧氏距离变换, 得到精确 DFB 场.

Step3. 借鉴 Dijkstra 算法思想建立以 DFB 距离为代价

的最大代价树.
Step4. 在最大树上提出中心路径和分支路径.

从以上对算法的描述中可以看出, 本文提出的新算法可以很好地满足漫游路径 7 个条件中的 1), 2), 3) 和 6), 而且算法设计的每一个步骤都尽量提高算法的执行效率. 从下文的实验结果也能看出本文算法能较好地满足条件 7). 对于条件 5), 本文算法只需要用户指定一个路径的起始点, 系统就能自动提取出一条中心路径, 具有很高的自动化程度. 而好的鲁棒性主要由本文算法采用精确 DFB 场和最大树生成过程中借鉴 Dijkstra 算法思想决定的. 因此, 本文算法提取的中心路径更加精确、快速和稳健.

2 实验结果

为了验证本文算法的有效性, 我们采用 2 组数据进行测试. 这 2 组数据是直接来自医学 CT 上获得的 100 层肺部支气管序列和 112 层的结肠序列, 分别通过交互式分割提取支气管数据和区域增长技术提取结肠空腔数据. 所有实验均在 1 台 P IV 2.4 GHz, 512 MB 内存, Windows XP 计算机上实现, 实验平台为 VC++, 用标准 OpenGL 图形库函数显示三维管腔和路径.

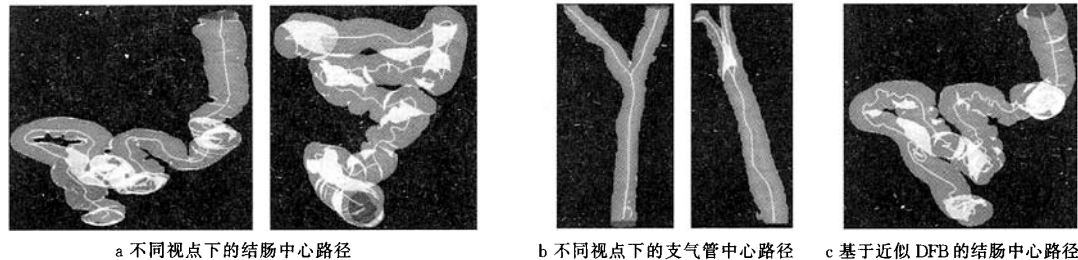


图 3 本文算法提取的中心路径及比较

图 3 a, 3 b 所示为利用本文算法提取的结肠和支气管的中心路径. 为了较好地显示路径, 三维管腔采用了 Alpha 混合的透明绘制方法. 图 3 c 所示为用近似 DFB 距离代替精确 DFB 距离所提取的中心路径结果. 由于 DFB 距离计算不精确, 使得提取的路径在有些地方有褶皱和回旋. 表 1 所示为 2 种空腔组织的内部体素个数以及算法各个部分的执行时间, 其中总时间还包括路径提取时间和分支提取时间. 从实验结果可以看出, DFB 距离变换的时间与内部体素的个数具有一定的比例关系, 但是当内部体素个数很大时, 计算生成树的时间明显变长. 生成树时间一栏括号内为采用快速排序算法所耗时

间, 验证了第 1.2 节的结论. DFB 时间一栏括号内为 DFB 近似计算时间, 虽然精确计算时间比近似计算时间长 1 倍左右, 但是得到的结果要精确得多. 因此, 本文算法在保证精度的同时, 也很好地满足了时间上的要求. 图 4, 5 所示分别为把视点放在路径点上看到的支气管和结肠的漫游图像.

表 1 2 组实验数据的实验结果					
空腔组织	内部体素 个数	分支 个数	DFB 时间/s	生成树 时间/s	总时间/s
肺支气管	51 015	2	1.0 (0.4)	0.5 (0.7)	1.9
结肠	561 521	1	9.4 (4.6)	59.6 (182.5)	69.4

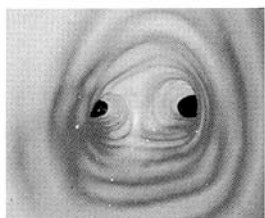


图4 支气管漫游图像

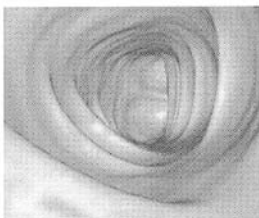


图5 结肠漫游图像

3 结 论

本文算法能够快速、精确地提取三维管腔的中心路径,并可以应用到实际的虚拟内窥镜系统中。但是,本文算法也存在一些局限性,当内部体素非常大时,算法的时间复杂度会进一步增大,需要进一步优化。另外,本文提出的中心路径自动提取算法是基于距离变换的,因此要求所处理的三维空腔必须是封闭的。如何提取封闭空腔也将是今后需要研究的一个重要内容。

参 考 文 献

- [1] Peng Yanjun, Shi Jiaoying, Zheng Yongguo. Accelerating the volume rendering in virtual endoscopy [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(2): 186-190 (in Chinese)
(彭延军, 石教英, 郑水果. 虚拟内窥镜实时体绘制技术研究 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(2): 186-190)
- [2] Hong L, Kaufman A, et al. 3D virtual colonoscopy [C] //Proceedings of IEEE Symposium on Frontier in Biomedical Visualization, Los Alamitos, 1995: 26-32
- [3] Yeorong G, et al. Computing the centerline of a colon: a robust and efficient method based on 3-D skeleton [J]. Journal of Computer Assisted Tomography, 1999, 23(5): 786-794

- [4] Wang Gang, Gao Xinbo, Ji Hongbing, et al. A method for the automatic extraction of the skeleton for tree-like organs based on the region growing algorithm [J]. Journal of Xidian University: Natural Science, 2003, 30(5): 594-597 (in Chinese)
(王 刚, 高新波, 姬红兵, 等. 基于区域增长技术的树状器官的骨架提取算法 [J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2003, 30(5): 594-597)
- [5] Hu Ying, Hou Yue, Xu Xinhe. A 3-D center path finding algorithm base on two distance fields [J]. Journal of Image and Graphics: A, 2003, 8(11): 1272-1276 (in Chinese)
(胡 英, 侯 悦, 徐心和. 基于双距离场的三维中心路径提取算法 [J]. 中国图象图形学报: A, 2003, 8(11): 1272-1276)
- [6] Wan M, Kaufman A, et al. Automatic centerline extraction for virtual colonoscopy [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2002, 21(12): 1450-1460
- [7] Shih Frank Y, Wu Yi-Ta. Three-dimensional Euclidean distance transformation and its application to shortest path planning [J]. Pattern Recognition, 2004, 37(1): 79-92



竺 海 男, 1979 年生, 硕士, 主要研究方向为图像处理、科学计算可视化等。



姬红兵 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号处理、模式识别、医学影像信息处理等。



高新波 男, 1972 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为影像处理分析和理解、模式识别、机器学习、计算机视觉等。