

# 基于双距离场的三维中心路径提取算法

胡英<sup>1,2)</sup> 侯悦<sup>2)</sup> 徐心和<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(东北大学人工智能与机器人研究所, 沈阳 110004) <sup>2)</sup>(沈阳东软数字医疗系统股份有限公司, 沈阳 110179)

**摘要** 在真实的三维数据场中, 自动地提取中心路径是实现自动漫游的关键问题. 为了解决当前中心路径自动提取算法中存在的效果差, 计算量大的问题, 提出了一种基于双距离场的快速三维中心路径提取算法, 该算法对于任意给定可连通的起点和终点, 首先建立基于起点的源距离场和基于边界的边界距离场, 然后通过两个距离场的共同约束来快速地提取出一条连接起点和终点的中心路径, 同时为了保证漫游的效果, 还采用3次B样条曲线对所获取的路径进行了光滑, 最后在PC机平台上实现和测试了该算法, 实验结果证明, 该算法不仅速度快、效果好, 而且具有很高的灵活性.

**关键词** 三维中心路径 距离场 自动漫游

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)11-1272-05

## A 3-D Center Path Finding Algorithm Base on Two Distance Fields

HU Ying<sup>1,2)</sup>, HOU Yue<sup>2)</sup>, XU Xin-he<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Institute of AI and Robotics, Northeastern University, Shenyang 110004)

<sup>2)</sup>(Shenyang Neusoft Digital Medical Systems Co., Ltd, Shenyang 110179)

**Abstract** Automatic center-path finding in real 3-D data set is the key problem in realization of automatic navigation. Many methods have been proposed, but most of them are either quality depressed or time expensive. In this paper, after summarize the main existent methods, a new 3D center path finding algorithm base on two distance fields is proposed. Between any given start-point and end-point which can be connected, the source distance field base on the start-point and the boundary distance field base on the boundary are established. Through the co-restriction of the two-distance field, a center path that connects the start-point and end-point can be found. In order to enhance the effect of navigation, a cubic B-spline curve is used to smooth the path. The algorithm is realized on PC platform and two medicine image date sets are used for test. Computer time and path finding results are shown in Section 4. As compared with onion peeling algorithm and Dijkstra's Single Source Shortest Path Algorithm, the result shows that the algorithm not only can get fast speed and high quality result, but also has more flexibility. The application in Virtual endoscopy is also shown in the end of the paper.

**Keywords** 3D center path, Dist field, Automatic navigation

## 0 引言

随着可视化技术的发展, 人们已经能够将所获得的三维数据通过各种重建方法来进行显示, 以便获取其中的有用信息. 很多应用领域, 尤其是在医学应用领域, 人们不光需要对重建出来的三维形体的表面进行观察, 还需要深入到形体的内部进行观察. 虚拟内窥技术就是在这一要求下发展起来的一种新的可视化技术. 该技术通过对医学影像设备所获取

的病人的三维数据进行重建, 使医生可以在数字化的病人的器官中进行漫游, 观察器官的内部情形, 以代替传统的内窥镜. 目前的漫游手段主要有如下两种<sup>[1]</sup>: 一种是完全由用户控制漫游中镜头的位置和方向的交互式漫游技术, 这种观察手段的优点是比较灵活, 用户虽可以按照自己的意图来任意观察, 然而当用户所面对的是一个大而复杂的环境(例如有很多分支的血管、盘旋的结肠等)时, 用户往往会迷失漫游的方向, 就好像在一个迷宫中一样, 不知道如何选择, 而且在行进的过程中, 用户需要不断地调整

镜头的位置和方向,以保证在一个合适的位置进行观察,而这些调整是十分繁琐的;另外一种就是自动漫游,在自动漫游方式下,用户只需要给出漫游的起点和终点,即可由计算机自动计算出一条连接起点和终点的中心路径,然后即自动地沿着这条路径进行漫游,在漫游过程中,用户无需任何交互,这不仅大大地减轻了用户的操作负担,也降低了对用户操作技能的要求.由于以上这些优点,自动漫游技术已成为目前主要的研究方向.

要实现自动漫游,最关键的部分就是连接起点和终点的三维中心路径的提取.目前提取中心路径主要有以下几种方法:

(1) 拓扑逻辑瘦身法 (topological thinning)<sup>[2-4]</sup> 又称为剥洋葱法 (onion peeling), 该方法是通过反复剥取物体最外层体素,直到只剩下单个体素宽度的骨架为止,其所获得的骨架即可作为漫游的中心路径,但这种算法计算量十分庞大,不仅计算时间长,而且不能直接连接到任意给定的两点(对于不在骨架上的点,需要先连接到骨架上).

(2) Dijkstra 最短路径法<sup>[5]</sup> 该方法首先是建立基于起点的源距离场,然后从终点开始,沿着距离下降最快的方向,连接到起点.这种方法找到的路径实际上是一条连通起点到终点的最短路径.这种算法的优点是计算量小,速度快,而缺点是容易出现贴近内壁的情况,即求得的路径不在中心位置.

(3) 最小距离场算法<sup>[6-9]</sup> 这种算法以边界距离场为核心,首先建立基于边界的距离场,然后标识所有的局部极值点,再通过最小代价优化方法连接这些极值点来形成基本骨架.类似于瘦身法,这种方法对于不在骨架上的点,需要先连接到骨架上,然后才能在骨架上寻找连通路径.虽然这种算法可以获得几何意义上的中心路径,且相对于瘦身法来说计算量小,但是算法比较复杂,计算时间也较长.

本文提出一种基于双距离场的三维中心路径提取算法,该算法对于任意给定的可连通的起点和终点,首先建立基于起点的源距离场和基于边界的边界距离场,然后通过两个距离场的共同约束来快速地提取出一条连接起点和终点的中心路径.

## 1 基于起点的源距离场

本算法的输入数据是已经分类的二值化三维体数据集,即数据集中的体素被分为物体内部的体素

和物体外部的体素.基于起点的源距离场实际上就是物体内部的体素相对于起点的距离的集合.对于任意两个相邻的体素,根据它们的空间相对位置关系,其对应的欧氏距离有 3 种:1,  $\sqrt{2}$ ,  $\sqrt{3}$ , 为了简化计算,可采用文献<sup>[10]</sup>所介绍的方法,将以上 3 种距离用 10, 14, 17 代替,具体的表示如图 1 所示.

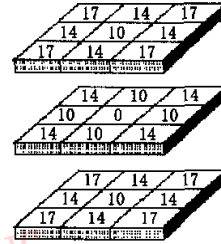


图 1 距离对应关系

对于给定的起点,可采用如下的区域增长算法来建立源距离场:

- (1) 将起点的距离标识为 0;
- (2) 创建一个队列并将起点加入到队列中
- (3) If(队列中至少存在一个体素)

提取队列中的第一个体素  $x$ ;

For( $x$  的 26 邻域中的每个体素  $y$ ) {

If( $y$  是物体内的体素并且未被标识) {

将  $y$  加入队列;

/\* 对体素进行标识 \*/

$d = +\infty$ ; //  $d$  代表距离值

For(对  $y$  的 26 邻域中的每个体素  $z$ ) {

If ( $z$  在物体内部,并且已被标识为  $n_z$ ) {

$d_z = n_z + D(y, z)$ ; // 其中  $D(y, z)$  根据  $y$  和  $z$  的邻域关系,按照图 1 所示的距离对应关系,等于 10, 14 或 17

}

If ( $d > d_z$ ) {

将  $y$  标识为  $d$ ;

$d = d_z$ ;

}

}

}

}

将  $x$  从队列中删除;

}

Else {

距离场建立完毕;

}

通过上述算法建立的源距离场如图 2 所示,颜色由浅到深表示距离由小到大(在某一区间内的值由一种颜色表示,例如白色表示距离值为 0~200)。

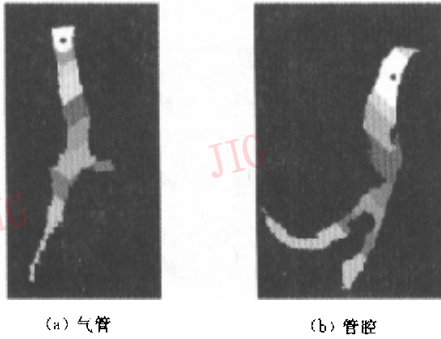


图 2 源距离场(黑圆点为起点)

当起点和终点不连通时,由于源距离场不能覆盖到终点,终点到起点的距离值为无穷大,因此本算法可以自动地检测起点和终点的连通性。

### 2 基于边界的边界距离场

基于边界的距离场实际上就是物体内部的体素相对于边界距离的集合。其生成边界距离场的一般方法是:首先将各边界体素的距离值赋为 0,然后以每一个边界体素为源点,按照上节所介绍的方法对物体内的每个体素进行标识,直到所有边界体素都遍历完为止。

从以上的描述可以看出,有多少个边界点就需要对物体内的边界点遍历多少次,对于一个三维物体,其边界体素往往多达数万甚至更多,由于计算量十分庞大,因此本文采用一种简化的算法来建立边界距离场:对于物体内部的每个体素,首先从这个体素出发,并沿着它的 26 个邻域的方向发出 26 条射线,每条射线不断延伸,直到碰到边界体素为止;然后按照图 1 给出的距离对应关系来表示该体素到各边界体素的距离,并以其中的最小距离作为该体素最终的边界距离,本算法的二维表示如图 3 所示。实验证明,本算法较之常规算法计算量大幅度减少。虽然在一些特殊情况下某些体素的距离值与常规算法相比会出现较大的偏差,但由于本文采用双距离场共同约束,因此少数特殊体素的偏差,不会对求取的中心路径造成严重的影响。

灰色为当前需要标识的点



图 3 边界距离场算法的二维表示

通过本算法所建立的边界距离场如图 4 所示,颜色由浅到深表示距离由小到大(在某一区间内的值由一种灰度表示)。

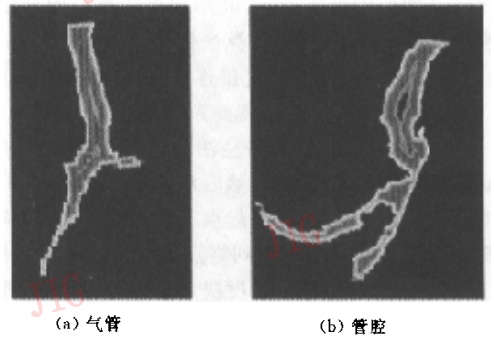


图 4 边界距离场

### 3 中心路径的生成

要生成中心路径,首先要给出中心路径的定义<sup>[7]</sup>,该定义有如下 4 个条件:

- (1) 它应当是 26 连通的;
- (2) 它应当是单体素宽度;
- (3) 它应当趋近物体的中轴线;
- (4) 它应当尽可能的光滑。

条件 1 保证它是一条从起点到终点的可连通的路径;条件 2 保证在路径中行进的时候不存在二义性;条件 3 保证它是一条中心路径;条件 4 保证在路径中可以比较顺利的行进。

根据中心路径的定义,本文提出如下基于双距离场的中心路径生成算法:

- (1) 建立源距离场  $D_s$ 。
- (2) 建立边界距离场  $D_b$ 。

(3) 建立路径队列,并将终点放入队列.

(4) 取出队列中的最后一个体素  $V$ ,如果  $V$  等于起点,则跳转到步骤 9.

(5) 令  $d = D_s(V)$ ,  $D_s(V)$  为体素的源距离场值,在体素  $V$  的 26 邻域内搜索满足源距离场中的值小于  $d$  的体素.此条件可保证找到一条 26 连通的路径.

(6) 在满足条件 5 的体素中,找出距离起点最近的体素  $V_{D_{min}^{(s)}}$  (即源距离场值最小的体素)和距离边界最远的体素  $V_{D_{max}^{(b)}}$  (即边界距离场值最大的体素).

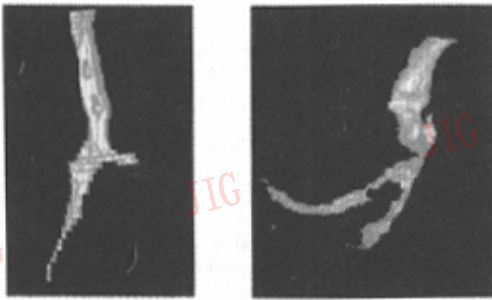
(7) 令  $d = D_b(V_{D_{min}^{(s)}})$ ,如果  $d$  大于给定阈值  $T_d$ ,则将  $V_{D_{min}^{(s)}}$  放入队列,否则将  $V_{D_{max}^{(b)}}$  放入队列.实践证明,

此条件可保证找到一条趋近物体中轴线的单像素宽度的路径.之所以在有的时候将  $V_{D_{min}^{(s)}}$  放入队列是因为这样可以保证在通道比较宽的时候,路径不会随着边界的变化而急剧的变化,以便使路径相对比较平滑.

(8) 返回步骤 4.

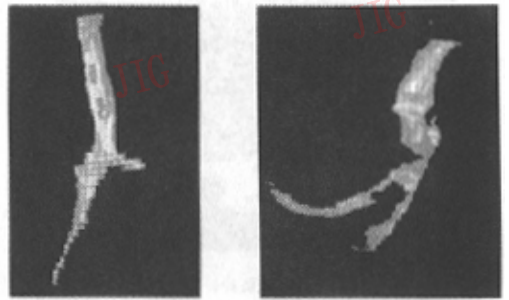
(9) 中心路径求取结束.

利用本算法求取得到的中心路径如图 5 所示,从图 5 可以看出,路径仍然不是很平滑,由于直接将它应用于自动漫游将造成场景的急剧变化,因此还需要做平滑处理.本文采用 3 次 B 样条曲线对路径进行了平滑,平滑后的结果如图 6 所示.



(a) 气管 (b) 管腔

图 5 本算法求取的中心路径



(a) 气管 (b) 管腔

图 6 光滑后的中心路径

### 4 实验结果

实验数据全部来源于沈阳东软数字医疗系统股份有限公司,计算机配置为 P IV 1.7G,256M DDR 内存.数据场的大小及本算法路径搜索的时间如表 1 所示.

表 1 两组实验数据的实验结果

	数据场大小	路径搜索时间(ms)
气管	512×512×43	278
管腔	512×512×99	984

从表 1 数据来看,本算法的搜索速度是非常快的.另外,由于本算法可以直接生成连接起点和终点的路径,所以用户可以通过多次给定起点和终点来平滑地到达任意位置,这一点是引言所介绍的各种算法都不能实现的.现以一个二维图例来说明.

图 7 所示为在一个复杂的二维环境(存在空洞、分支和窄通道)中,直接给定起点和终点所获取的中心路径;图 8 为给定多个中间点所确定的路径;图 9 为剥洋葱法所提取的骨架;图 10 为 Dijkstra 最短路径法所获取的路径.

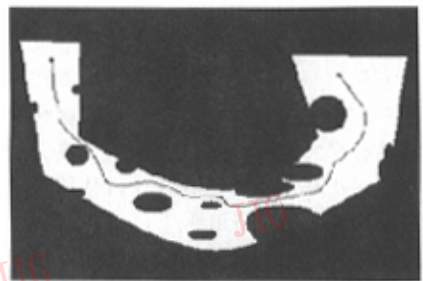


图 7 直接给定起点和终点所获取的中心路径

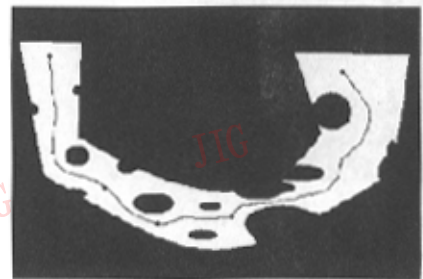


图 8 给定多个中间点所获取的中心路径

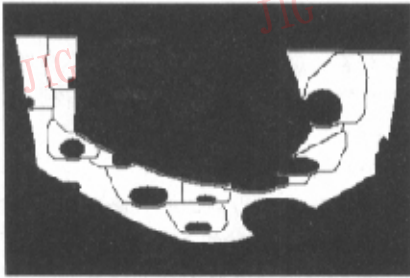


图9 剥洋葱法牙骨取的骨架

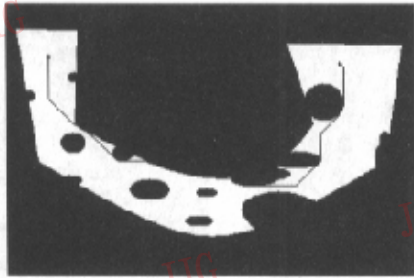


图10 Dijkstra 最短路径法所获取的路径

## 5 结论

通过对算法的描述和实际的实验结果可以看出,基于双距离场的三维中心路径提取算法不仅可以以非常小的计算代价提取出令人满意的中心路径,而且具有很大的灵活性.由于本算法是完全基于距离场的,对于环境本身不存在任何特殊要求和依赖性,因此具有广泛的适用性.

目前笔者已经成功地将本算法应用于虚拟内窥镜的自动漫游中,图11为实际漫游中的屏幕镜头.

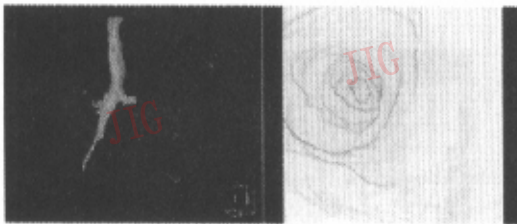


图11 虚拟内窥镜自动漫游的屏幕镜头

## 参考文献

1 Hong L, Muraki S, He T *et al.* Physically-based interactive

navigation[R]. TR. 96. 01. 09, Computer Science Department, State University of New York at Stony Brook, USA, 1996.

- 2 Ge Y, Stelts D R, Wang J *et al.* Computing the centerline of a colon: A robust and efficient method based on 3D skeletons[J]. *Computer Assisted Tomography*, 1999, 23(5):786~794.
- 3 Hong L, Muraki S, Kaufman A *et al.* Virtual voyage: Interactive navigation in the human colon[A]. In: *Proceedings of Association for Computing Machinery SIGGRAPH '97[C]*, Los Angeles, CA, USA, 1997: 27~34.
- 4 Ma C M, Wan S Y. Parallel thinning algorithms on 3D(18,6) binary images[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, 80(3):364~378.
- 5 Blezek D, Robb R. Centerline algorithm for virtual endoscopy based on chamfer distance transform and Dijkstra's single source shortest path algorithm [A]. In: *proceedings of SPIE International Symposium on Physiology and Function from Multidimensional Images[C]*. San Diego, CA, USA, 1999: 225~233.
- 6 Zhou Y, Kaufman A, Toga A W. Three-dimensional skeleton and centerline generation based on an approximate minimum distance field[J]. *The Visual Computer*, 1998, 14(7):303~314.
- 7 Bitter I, Sato M, Bender M *et al.* A smooth, accurate and robust centerline extraction algorithm[A]. In: *Proceedings of IEEE Visualization 2000[C]*, Salt Lake City, USA, 2000: 42~52.
- 8 Sato M Bitter I, Bender M *et al.* Tree-structure extraction algorithm for accurate and robust skeletons[A]. In: *Proceedings of IEEE Pacific Graphics 2000[C]*, Hong Kong, 2000: 281~289.
- 9 Bitter I, Kaufman A, Sato M. Penalized-distance volumetric skeleton algorithm[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2001, 7(3):195~206.
- 10 Chen D, Liang Z, Wan M *et al.* A tree-branch searching, multi-resolution approach to skeletonization for virtual endoscopy[A]. In: *Proceedings of SPIE International Symposium on Medical Imaging 2000[C]*, San Diego, CA, USA, 2000:126~133.

胡英 1977年生,2001年获东北大学控制理论与控制工程专业硕士学位,现为东北大学人工智能与机器人研究所博士生.研究领域为科学计算可视化、虚拟现实、机器人视觉.



侯悦 1973年生,1999年获东北大学工程图学专业工学硕士学位,现为沈阳东软数字医疗系统股份有限公司软件技术部软件工程师.研究方向为医学图象处理、计算机图形学.



徐心和 1940年生,东北大学人工智能与机器人研究所,教授,博士生导师.研究领域为智能机器人、人工智能、模式识别、智能控制.

