

8-7-2020

Research on 3D Airway Trees Segmentation and Centerline Extraction Algorithm

Yanbo Li

College of Computer Science and Technology. Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China;

Yu Xiang

College of Computer Science and Technology. Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research on 3D Airway Trees Segmentation and Centerline Extraction Algorithm

Abstract

Abstract: Centerline extraction plays an important role in virtual bronchology. Organ segmentation and centerline extraction with correct topology structure is very difficult, especially for multiple branching structure organs. Therefore, a 3D airway tree segmentation and centerline extraction algorithm was proposed. A new region growing method was proposed to extract the main branch and sub-branch. The initial center was extracted based on the relationship of adjacent section. The center was corrected by computing the value of the determinant of Jacobian matrix, and the path with all the points was generated by Dijkstra's shortest path algorithm. The experimental results show that this method can extract the complete lung airway tree with magnitude 5 bronchus, and illustrate the accuracy for the single and multiple branch organs.

Keywords

virtual bronchoscopy, airway tree segmentation, region growing, evaluation function, centerline, Jacobian matrix

Recommended Citation

Li Yanbo, Yu Xiang. Research on 3D Airway Trees Segmentation and Centerline Extraction Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2525-2530.

三维支气管树分割与中心路径提取算法研究

李艳波, 于翔

(黑龙江工程学院计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150050)

摘要: 中心路径提取是虚拟内窥镜的主要关键技术之一, 但是对于复杂的多分支结构器官的分割和准确提取具有正确拓扑结构的中心路径十分困难。因此针对该问题, 提出三维支气管树分割与中心路径提取算法。该方法通过改进的区域增长法分别提取支气管的主干分支和细小分支, 在分割结果中确定初始中心路径点, 利用 Jacobian 矩阵的几何意义矫正中心点, 生成具有正确的拓扑结构的中心路径。实验结果表明: 该方法可以得到包含第 5 级以上的支气管的中心路径, 对于单分支和多分支的器官组织同样具有较好的准确性。

关键词: 虚拟内窥镜; 支气管树分割; 区域增长法; 评价函数; 中心路径; Jacobian 矩阵

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 10-2525-06

Research on 3D Airway Trees Segmentation and Centerline Extraction Algorithm

Li Yanbo, Yu Xiang

(College of Computer Science and Technology, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China)

Abstract: Centerline extraction plays an important role in virtual bronchology. Organ segmentation and centerline extraction with correct topology structure is very difficult, especially for multiple branching structure organs. Therefore, a 3D airway tree segmentation and centerline extraction algorithm was proposed. A new region growing method was proposed to extract the main branch and sub-branch. The initial center was extracted based on the relationship of adjacent section. The center was corrected by computing the value of the determinant of Jacobian matrix, and the path with all the points was generated by Dijkstra's shortest path algorithm. The experimental results show that this method can extract the complete lung airway tree with magnitude 5 bronchus, and illustrate the accuracy for the single and multiple branch organs.

Keywords: virtual bronchoscopy; airway tree segmentation; region growing; evaluation function; centerline; Jacobian matrix

引言

虚拟内窥镜是随着计算机技术、计算机图形学、计算机图像处理、虚拟现实等学科的发展而逐步形成的, 因其非介入性的特点被广泛应用于医

学诊断领域。虚拟内窥镜主要利用 CT、MRI 等断层成像技术获得数据, 并以内窥镜形式显示, 然后模拟传统的内窥镜进行漫游观察, 也可以用交互的方式在器官结构内部进行成像和检查。器官分割和中心路径提取是虚拟内窥镜技术研究的主要关键技术难题(器官分割、路径抽取、碰撞检测、实时绘制)^[1], 其结果直接影响着医生检查和诊断的准确性。

由于实际医学图像数据集 CT、MRI 等提供的



收稿日期: 2015-06-02 修回日期: 2015-07-24;
基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12531539);
作者简介: 李艳波(1980-), 女, 黑龙江, 博士, 讲师,
研究方向为虚拟现实与医学图像处理; 于翔(1978-),
男, 博士, 讲师, 研究方向为数据挖掘与信息安全。

<http://www.china-simulation.com>

• 2525 •

断层切片图像除了包含特定组织外,还包含了其他信息,例如人的运动、图像重建、容积效应等一些外在因素导致分割困难。器官分割和中心路径提取息息相关,通常支气管树分割的结果都不是理想,存在内部空洞或者受到没有拓扑结构变化的干扰。这些错误将会导致支气管树的拓扑结构发生错误的改变,以及影响中心线提取过程,生成错误的中心线。因此支气管树分割和提取中心路径是目前虚拟内窥镜领域的主要难题。

1 相关工作

1.1 器官分割

研究者们致力于研究不同的方法分割具有特殊结构的组织^[2],自动^[3-5]和半自动图像分割^[6,7]方法是目前医学图像分割研究的重点。自动分割方法根据区域增长法的原理,将具有相似性质的像素来构成区域。但是当区域增长的过快或者假设没有气管的形状和大小等先验知识时,那么就需要选择一个全局阈值来区分空气和软组织之间的像素。但是肺部充满空气,全局阈值的选择非常困难,会将一个气道壁错误的分类到肺部软组织上。在采用区域增长法之前对图像进行滤波处理可以解决这个问题,但是滤波方法会过滤掉一些小的外围器官。半自动图像分割方法也是基于自适应的区域增长法的原理,例如 Jason D.Gibbs^[1]提出将支气管树分割过程分为两步:首先采用自适应的区域增长法获得支气管树,然后通过基于图形原理的方法由用户干预剪切掉多余的支气管树。该方法不需要支气管的形状或大小等先验知识,但是一些噪音和体容积均值导致特征提取非常困难,还会造成支气管壁像素的破坏。Michael W.Graham^[8]根据局部信息和全局信息分别计算出主支气管和候选支气管的位置,并权衡效率和代价之间的关系,通过图形优化方法查找候选支气管中的重要部分,最终合成完整的支气管。虽然该方法与其他方法相比可以有效的获得2-3级别的

支气管,但是该方法还远远达不到虚拟内窥镜的需求。

1.2 中心路径提取

中心路径是从空腔结构对象的一端到另一端,所能通过的最大球心的运动轨迹,是对象内部体素的点的集合,中心路径上的点即是中心点。中心路径具有中心性、连通性、单一性、鲁棒性、自动性和高效性6个特性^[9]。对于肠道,只有唯一的中心线,但是对于血管、气管、支气管等复杂器官,拓扑结构相对复杂。中心路径提取的主要方法有细化算法、距离变化法、基于表面体素提取算法、手工定点生成方法等。其中,距离变换法^[10-14]因其能够保证中心线的连通性和单一性而被广泛应用,但是无法对有分叉结构器官提取中心线,并且在空腔的拐弯位置,提取的路径常会出现贴近边界的现象^[15]。TaoSong He^[16]提出了一个可靠路径提取方法,他指出中心路径只是一般意义上的,为满足虚拟内窥镜漫游的要求,提出了可靠路径的概念。可靠路径^[15]是指虚拟模型内部的一组相互连接的点,满足如下条件:(1)使得整个模型表面都能被看到;(2)不能穿过模型表面;(3)尽可能远离模型表面以保证漫游时具有较宽的视角(即尽量接近模型的中心线);(4)路径尽可能短。此外,李光明^[17]等人在TaoSong He的方法上进行了改进,利用Hessian矩阵的几何特征进行中心路径提取。这两个算法对于中心路径的提取有着重要意义,但是还存在一些不足,例如提取的中心路径都要经过可视性检测以确定最终的路径点,检测速度比较慢。

针对支气管树分割和中心路径提取困难以及提取不准确的问题,提出三维支气管树分割和中心路径提取方法,目的在于获取完整的支气管树,并能够快速精确地生成达到ROI(Region of Interest)的有效路径,使得该路径满足可靠路径的定义要求。

2 算法描述

考虑到支气管的复杂结构特点, 将算法分为三个阶段, 流程如图 1 所示:

(1) 支气管树分割: 支气管树分割分为主干分割和细小分支分割两个阶段。主干分割的主要目的是生成包含气道主干的主气道, 细小分支分割主要是获得细小分支并筛选出伪分支, 生成与气道具有高相似度的所有气道断层。

(2) 初始中心点确定: 根据相邻断层支气管树中点确定中心路径上的初始中心点。

(3) 中心点矫正: 根据 Jacobian 矩阵的几何特征, 即 Jacobian 行列式的值调整中心点坐标。

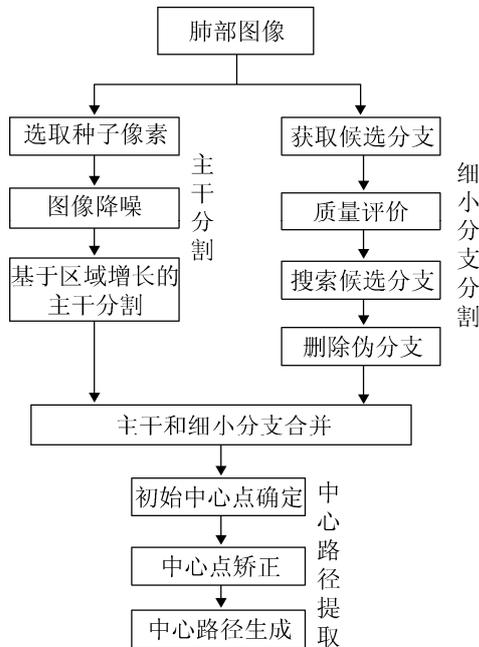


图 1 支气管树分割与中心路径提取流程图

2.1 支气管树分割

支气管树分割算法基本思想: 首先利用区域增长法提取主要气道树(即主干分割), 整个过程即为重复迭代区域增长和回退的过程; 然后选取细小气管作为候选区域, 通过质量评价指标筛选出部分支气管分支, 利用断层搜索删除伪支气管分支, 获得完整的三维支气管树。最后将主干分支和细小分支进行合并。

定义 I 为输入的胸部图像, (x, y, z) 为像素点的坐标, $I(x, y, z)$ 为像素点 (x, y, z) 的像素值。像素值采用 Hounsfield 单位(HU), 空气的像素值约为 -1000 HU, 软组织的像素值约为 0 HU。设 $T = \min_{(x,y,z)} \{I_f(x, y, z)\}$ 为图像 I_f 中最小像素值, $V_T = |I_S| \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ 为当前图像 I_S 的体积, Δx , Δy , Δz 分别为像素点在三个轴向上的间隔, $V_e = 75000 \text{ mm}^3$ 为体积临界值。候选断层分支 $A = \{A_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, 其中 $A_i = \{I(x, y, z_i)\}$, 当且仅当 $I(x, y, z_i) \leq -600$; ∂A_i 为断层分支的边界点集; $|A_i|$ 为断层气管分支 A_i 像素总数。断层分支 A_i 的中心点为 $c_i = \left(\frac{1}{|A_i|} \sum x, \frac{1}{|A_i|} \sum y, z_i \right)$ 。

具体的算法描述如下:

(1) 首先在图像 I 的气管内部手动选择一种种子像素 I_S , 利用公式 1 对图像 I 降噪生成图像 I_f 。

$$I_f(x, y, z) = \begin{cases} I(x, y, z), & \text{if } I(x, y, z) < -500 \\ -500, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 根据阈值 T 重复迭代图像区域增长过程, 直至图像 I_S 的体积 V_T 大于体积临界值 V_e ($V_e = 75000 \text{ mm}^3$), 此时图像 I_S 已超过支气管的可选范围。然后利用回退区域增长法使得 V_T 在安全范围内。最后在 V_T 和 V_e 之间再次重复步骤(2)的上述操作, 缩小 T 的变化步长, 即可获得主干分支。

(3) 获取候选分支 A 。

(4) 通过评价指标对候选分支 A 进行分析, 将质量好的分支加入到分支集合 S 中, 在 A 中删除该部分分支。

$f(A_i)$ 为评价指标^[8], 等于气管壁最小像素与气管分支像素平均值的差, 如公式(2)所示。当 $f(A_i) > 0$ 时, A_i 可确定为气管分支, 则集合 $S = \{A_i | A_i \in A, \text{并且 } f(A_i) > 0\}$ 。

$$f(A_i) = \min_{(x,y,z_i) \in \partial A_i} \{I(x, y, z_i)\} - \frac{1}{|A_i|} \sum_{(x,y,z_i) \in A_i} I(x, y, z_i) \quad (2)$$

(5) 对于 S 中的每一断层 A_i , 搜索候选断层集

合 A ，找到与 A_i 相邻的候选断层分支，即 $\{A_{i-1}, A_i, A_{i+1}\}$ ，当三个连续的候选断层分支部分或全部重叠，并且相邻两个断层分支中心的距离满足 $0.5 \text{ mm} \leq |c_{i-1} - c_i| \leq 3 \text{ mm}$ 时，可判定其为气管分支，加入到 S 中。并在 A 中删除该断层分支。重复上述过程(4)，直至 A 中没有符合条件的断层分支为止， A 中剩余的即为伪断层分支。

2.2 初始中心点确定

初始中心点的确定在气道断层分割结果上加以处理，以能够通过相邻气道断层的最大球的球心即为中心点。如图 2 所示。A、B、C 为相邻气道断层，黄色椭圆为气道断层，通过相邻气道断层可获得包含三层气道的最小立方体，则该立方体的最大球的球心为中心点。

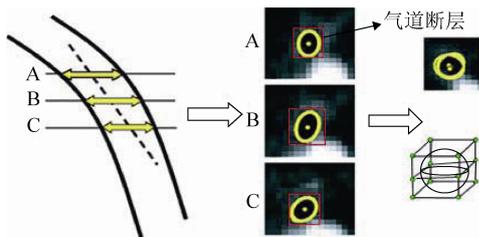


图 2 中心路径上的中心点

2.3 中心路径矫正

对于形状相对规则的支气管，其形状接近于圆形或椭圆形，上述过程确定的初始中心点能够满足可靠路径的要求，但是对于形状不规则的支气管，则该中心点不够理想。雅可比矩阵的重要性在于它体现了一个可微方程与给出点的最优线性逼近，因此这里利用 Jacobian 矩阵对初始中心点进行矫正。

对于我们要处理的三维体数据而言， $I: (x, y, z) \rightarrow (u, v, w)$ ，其中 $u = u(x, y, z)$ ， $v = v(x, y, z)$ ， $w = w(x, y, z)$ ，则它的 Jacobian 行列式为：

$$JI(p) = \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{vmatrix}$$

如果连续可微函数 I 在 p 点的雅可比行列式不是零，那么它在该点附近具有反函数，这称为反函数定理。如果 p 点的雅可比行列式是正数，则 I 在 p 点的取向不变；如果是负数，则 I 的取向相反。雅可比行列式的绝对值就是函数 I 在 p 点的缩放因子。由 $I(p)$ 描述的线性算子即接近点 p 的 I 的最优线性逼近， x 逼近于 $p: I(x) \approx I(p) + JI(p) \cdot (x - p)$ 。

对于任一断层支气管的边界体素，通过判断初始中心点 c_i 与交点 p_m 和 p_n 的位置关系(即 $JI(p_m)$ 和 $JI(p_n)$ 的值)，调整中心点 c_i 的坐标，其中 p_m 和 p_n 为过 c_i 的横纵轴线与边界的交点。

令 $JI(p_m)$ 和 $JI(p_n)$ 为 p_m 和 p_n 的雅可比行列式值， c_i 逼近于 p_m ，则 c_i 与 p_m 和 p_n 的位置关系的判定如下：

(1) 如果 $JI(p_m) - JI(p_n) \approx 0$ 时，则 c_i 为中心路径上的点，不需要再调整；

(2) 如果 $JI(p_m) \cdot JI(p_n) < 0$ 时，即 p_m 和 p_n 的雅可比行列式值不同号，说明原始中心点在边界体素的内部，则 $c_i = c_i + \frac{(|JI(p_m)| - |JI(p_n)|)}{2}$ 。

(3) 如果 $JI(p_m) \cdot JI(p_n) > 0$ ，即 p_m 和 p_n 的雅可比行列式值同号，说明初始中心点在边界体素的外侧，则 $c_i = c_i + \frac{(|JI(p_m)| + |JI(p_n)|)}{2}$ 。

Dijkstra 最短路径生成算法主要是将生成的中心点连成中心路径，是一个较为成熟的算法，这里不再赘述。但是对于结构复杂的模型来说，该算法会将两个不相连的模型连接在一起。因此在将各中心点连接成路径的过程中，需要判断该连线是否穿越模型的边界。对于那些穿越边界的路径则是不应该相连的，因此需要将两点断开，在中间插入新点，直至其不穿过模型为止。

3 实验分析

实验主要针对人体的肺部器官进行，所有实验都在同一台计算机上完成，用标准的 OpenGL 图形函数库进行显示。实验设备为 Windows 7 操作系

统, CPU 为 Intel® Core 2 2.93GHz, 3G 内存。为验证本文算法的有效性, 数据直接从医学 CT 上获得的 80 层肺部支气管序列。实验分析的 CT 数据参数为: 切片图像大小为 512×512 , 像素大小 $0.549 \sim 0.625(\text{mm}/\text{pixel})$, 厚度 $1.0 \sim 2.5(\text{mm})$ 。

利用 Marching Cube 方法对分割后的支气管树进行三维重建, 效果如图 3 所示。图中蓝色部分为肺支气管的主分支, 绿色为细小分支, 通过主分支与细小分支的合并, 形成最终的支气管树。本文的方法可以提取完整的肺部气道树, 得到包含 5 级以上约 60% 的支气管, 解决了支气管断裂和分割泄露的现象。

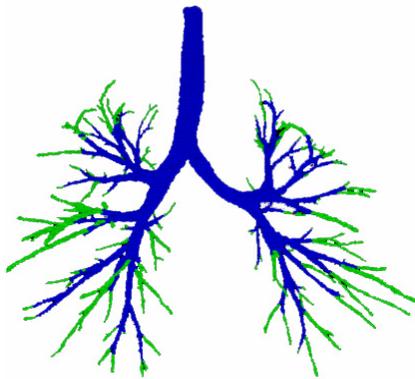


图 3 三维支气管树

图 4 为在支气管树分割基础上提取的中心路径。该方法对于结肠这类的单分支结构对象, 可以得到唯一的中心路径, 并且能够满足可靠路径的要求。对于多分支结构的器官, 同样可以得到准确的中心路径。图 5 为以支气管中心路径上的点作为视点看到的支气管的三帧漫游图像。

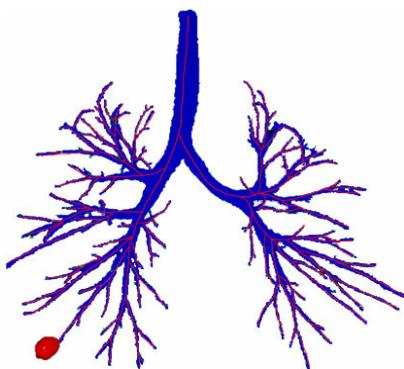
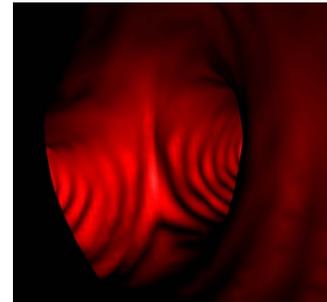


图 4 支气管树中心路径



(a) 第 5 帧图像



(b) 第 30 帧图像



(c) 第 60 帧图像

图 5 支气管漫游图像

表 1 给出了肺部组织的内部体素个数、分支数、中心点数和算法各部分的执行时间, 其中总时间包括支气管树分割时间、初始中心点提取时间、中心点矫正时间和路径生成时间。初始中心点的确定可在器官组织分割阶段完成, 耗时相对较少, 中心点矫正涉及到矩阵计算以及中心点的重新计算, 所以在整个中心路径提取过程中耗时占据较大比例, 属于最耗时间的一步。由于支气管具有多分支的树形结构, 因此在支气管树分割、矫正和路径生成的过程中消耗的时间更多。这些都与边界体素和内部体素以及模型的复杂度密切相关。图 6 为支气管各断层中心路径点在 x 和 y 方向上的坐标分布图, 这里只取一条中心路径中的前 130 个中心点。

表 1 支气管树分割与中心路径提取相关信息和运行时间

	内部体素 个数	分支个数	中心点数	时间(s)			总时间
				支气管分割	初始中心点确定	中心点矫正	
支气管	510152	168	384	151.3	20	256	578.3

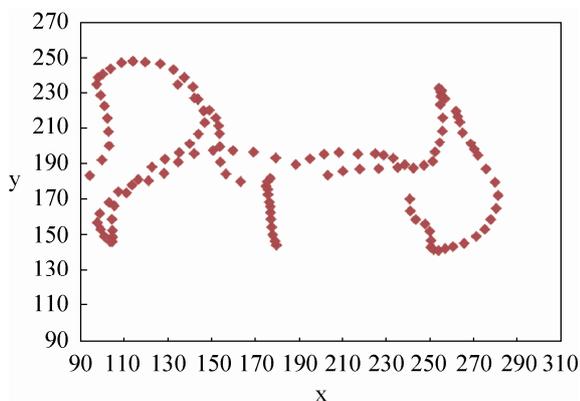


图 6 断层中心点坐标分布

4 结论

支气管树分割和中心路径提取是虚拟内窥镜系统中路径导航的前提条件。本文提出了三维支气管树分割和中心路径提取算法。以区域增长法为理论基础，并加以改进，有效去除冗余分支。并在分割结果上根据 Jacobian 矩阵的特性对中心点位置进行调整，以生成满足可靠路径要求的中心路径。本文的算法在效果和速度上取得了较好的效果。得到中心路径后，如何指导医生更快、更好的观察管腔内部结构，实时漫游是今后研究的重要内容。

参考文献:

- [1] M W Graham, J D Gibbs, W E Higgins. A robust system for human airway tree segmentation [C]// SPIE Medical Imaging: Image Processing. USA: SPIE, 2008: 69141J-1-69141J-18.
- [2] M W Graham, J D Gibbs, W E Higgins. Computer based route definition system for peripheral bronchoscopy [J]. Journal of Digital Imaging (S0897-1889), 2012, 25(2): 307-317.
- [3] A P Kiraly, W E Higgins, E A Hoffman, et al. 3D human airway segmentation method for virtual bronchoscopy [J]. Academic Radiology (S1076-6332), 2002, 19(10): 1153-1168.
- [4] Wenjun Tan, Jinzhu Yang, Dazhe Zhao, et al. A Novel Method for Automated Segmentation of Airway Tree [C]// 24th Chinese Control and Decision Conference. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2012: 976-979.
- [5] A Fabijanska. Two pass region growing algorithm for segmenting airway trees for MDCT chest scans [J]. Computerized Medical Imaging and Graphics (S0895-6111), 2009, 11(23): 1353-1364.
- [6] T Y Law, P Heng. Automated extraction of bronchus from 3D CT images of lung based on genetic algorithm and 3D region growing [C]// Proceeding of SPIE Medical Imaging. USA: SPIE, 2000, 3979: 906-916.
- [7] B van Ginneken, W Baggerman, E M Van Rikxort. Robust segmentation and anatomical labeling of the airway tree from thoracic CT scans [C]// Proceeding of MICCAI. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2008: 219-226.
- [8] Michael W Graham, Jason D Gibbs, et al. Robust 3d airway tree segmentation for image guided peripheral bronchoscopy [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging (S0278-0062), 2010, 29(4): 982-997.
- [9] 王怡, 周明全, 耿国华. 虚拟内窥镜中心路径抽取技术 [J]. 西北大学学报自然科学版, 2005, 35(6): 695-698.
- [10] Saito T, Toriwaki J I. New algorithm for Euclidean distance transformation of an n-dimensional digitized picture with applications [J]. Pattern Recognition (S0031-3203), 1994, 27(11): 1551-1565.
- [11] 彭延军, 石教英. 一种新的抽取中心路径算法 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, 37(3): 259-263.
- [12] 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]. 中国图像图形学报, 2003, 8(11): 1272-1276.
- [13] 竺海, 姬红兵, 高新波. 基于边界距离场的管腔中心路径自动提取算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(6): 860-864.
- [14] 王海录. 体绘制下虚拟内窥镜系统自动漫游技术研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
- [15] 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, 2003, 8(11): 1272-1276.
- [16] He TS, Hong LC, Chen DQ, Liang ZR. Reliable path for virtual endoscopy: Ensuring complete examination of human organs [J]. IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 2001, 7(4): 33-342.
- [17] 李光明, 田捷, 赵明昌, 等. 基于 Hessian 矩阵的中心路径提取算法 [J]. 软件学报, 2003, 14(12): 2074-2081.