

李由. 一种轻量化的支气管 CT 虚拟内窥系统设计[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(9): 69–75. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.25051402

一种轻量化的支气管 CT 虚拟内窥系统设计

李 由

(复旦大学 工程与应用技术研究院, 上海 200433)

摘 要: 本文提出了一种轻量化的支气管 CT 虚拟内窥系统设计方案, 针对当前虚拟内窥技术需求高、成本高的问题, 通过算法优化与资源管理策略, 实现在无独立显卡的普通计算机硬件环境中流畅运行。系统基于 Python 和开源医学图像处理库构建, 集成了优化版 Marching Cubes 算法、非实时交互式分割修正机制、多线程路径规划和面向集成显卡的渲染优化策略。实验结果表明, 该系统能在配备集成显卡的普通笔记本电脑上稳定运行三维重建、路径规划、虚拟漫游和互动分割等核心功能, 满足临床应用所需准确性与稳定性。本研究不仅在技术上实现了虚拟内窥镜系统的轻量化, 更在普惠医疗方面具有重要意义, 为基层医疗机构提供了可及性高的支气管镜手术辅助工具。

关键词: 虚拟内窥镜; 支气管 CT; 医学图像处理; 集成显卡优化; 普惠医疗

中图分类号: TP319

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)09-0069-07

Design of a lightweight bronchial CT virtual endoscopy system

LI You

(Academy for Engineering and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: This paper presents a lightweight bronchial CT virtual endoscopy system. Addressing the high hardware requirements and costs of current virtual endoscopy technology, the proposed system achieves smooth operation on standard computer hardware without dedicated graphics cards through algorithm optimization and resource management strategies. The system is built on Python and open-source medical image processing libraries, integrating an optimized Marching Cubes algorithm, non-real-time interactive segmentation correction mechanism, multi-threaded path planning, and rendering optimization strategies for integrated graphics cards. Experimental results demonstrate that the system can stably perform core functions including 3D reconstruction, path planning, virtual navigation, and interactive segmentation on ordinary laptops equipped with integrated graphics cards, meeting the accuracy and stability required for clinical applications. This research not only technically achieves the lightweight implementation of virtual endoscopy systems, but also has significant implications for affordable healthcare, providing highly accessible bronchoscopy surgical assistance tools for primary healthcare institutions.

Key words: virtual endoscopy; bronchial CT; medical image processing; integrated graphics card optimization; affordable healthcare

0 引 言

支气管镜检查是呼吸系统疾病, 如肺癌^[1]、肺结核^[2]、儿童肺炎支原体肺炎^[3]、支气管扩张症^[4]等疾病诊断的重要手段, 但传统支气管镜检查具有侵入性, 可能引起患者不适甚至并发症。随着计算机视觉与医学图像处理技术的发展, 基于 CT 图像的虚拟内窥镜技术为临床提供了一种非侵入性支气管检查替代方案^[5-6], 在减少不必要侵入性检查、辅助术前规划、医生培训以及病变精确定位等方面具

有显著价值^[7-8]。

虽然虚拟内窥技术在临床应用前景广阔^[9-12], 但当前主流虚拟内窥系统普遍存在硬件需求高的问题。此外, 市场上大多数商业系统^[13]需要依赖专业工作站级别的硬件配置, 特别是独立显卡支持, 这导致系统建设与维护成本高昂; 而部分开源^[14]和商业软件也存在许可价格昂贵、操作不够友好等问题。在国内医疗资源分布不均的现状下, 基层医疗机构难以承担这些高昂成本, 使得先进医学影像技术的普及面临严峻挑战。

作者简介: 李 由 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机视觉, 医学图像处理, 机器学习。Email: youli22@m.fudan.edu.cn。

收稿日期: 2025-05-14

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

为解决这一问题,本文提出了一种轻量化的、面向集成显卡环境的虚拟内窥镜系统设计方案。与传统系统不同,本系统针对普通办公级硬件环境进行优化设计,特别适配具有集成显卡的普通笔记本电脑。系统通过一系列算法优化与资源管理策略,在保证临床应用所需准确性与功能完整性的同时,显著降低了硬件门槛,使基层医疗机构也能负担得起相关设备采购与维护成本。这种设计理念符合当前医疗资源均等化发展方向,对推动《“健康中国 2030”规划纲要》中提出的基本公共卫生服务均等化^[15],以及推进普惠医疗信息化建设具有重要意义。

这些工作不仅在技术上实现了支气管虚拟内窥镜系统的轻量化与普通适性,更为普惠医疗技术的广泛应用提供了新的思路与方案。本文详细阐述系统设计、核心算法与优化策略,并通过实验验证了系统在普通硬件环境下的可用性与性能,为同类医学图像应用的开发提供参考。

本文系统中的核心创新见表 1。本文的主要工作与创新点包括:

(1) 提出了适应集成显卡环境的优化版 Marching Cubes 算法,通过分块并行处理与自适应细节级别控制,平衡重建精度与性能。

(2) 设计了非实时更新的交互式分割修正机制,避免频繁重建导致的性能开销。

(3) 实现了基于支气管半径加权的多线程路径规划算法,提供符合临床操作习惯的导航路径。

(4) 开发了针对集成显卡的渲染优化策略,包括多级网格简化、离屏渲染缓冲与视锥裁剪等技术。

(5) 构建了完整的医学影像处理流程与交互界面,实现从 CT 图像到虚拟内窥镜导航的端到端系统。

表 1 本文系统中的核心创新一览

Table 1 Overview of the core innovations in the system		
项目	常见方法	本文创新
三维重建	适配特定工作站高要求环境	依照内存大小分块,进行轻量化处理
路径规划	传统 A* 算法的路径规划	基于支气管宽度优化的 A* 算法
交互修改	不支持进行编辑	画笔、橡皮擦和填充工具进行编辑

1 系统需求与整体设计

1.1 临床背景与需求分析

支气管镜检查作为呼吸系统疾病诊断的常用方法,具有直观可靠的优势,虽然总体上较为安全,但

其侵入性特性仍然可能导致患者不适甚至引发并发症^[16-17],且因为对患者刺激大,可能需要进行额外的麻醉,从而导致额外的不良反应^[18-19]。CT 图像能够提供支气管三维结构信息^[20],结合计算机图形学技术,虚拟支气管内窥镜系统在临床应用中展现出显著价值。系统核心需求包括:非侵入性预览支气管内部结构,减少不必要侵入性检查;辅助术前规划,确定最佳路径到达病灶位置;提供训练医生操作支气管镜的技能平台;以及实现病变区域精确定位与测量功能。

1.2 功能需求分析

基于临床应用场景与项目实际需求,确定了系统 4 项核心功能需求,具体如下。

(1) 三维重建功能:根据 CT 图像与支气管分割掩码,重建精确的支气管三维模型。

(2) 路径规划功能:在支气管树结构中自动规划从入口到目标病灶的最优路径。

(3) 虚拟漫游功能:模拟支气管镜在支气管内移动,提供真实的内窥视图。

(4) 互动分割功能:允许在支气管分割结果不理想时,通过用户交互式操作修正分割结果。

1.3 非功能需求

除核心功能外,系统还需满足多项非功能需求。性能方面,需针对普通集成显卡进行轻量化优化,降低硬件门槛。资源管理上,需合理利用有限计算资源,平衡渲染质量与性能。更新机制上,采用标注完成后手动触发更新机制,避免频繁重建带来的计算负担。易用性上,界面设计需直观简洁,操作简单,使医生无需专业计算机背景即可使用。稳定性方面,系统需具备足够的错误处理机制,确保临床使用的稳定性。

1.4 系统架构设计

系统采用模块化设计,遵循模型-视图-控制器(MVC)架构模式,分为数据层、逻辑层与表示层三个主要部分。为适应集成显卡环境,系统特别注重针对普通硬件环境的优化,充分利用多核处理器与 DirectX 12 优势。系统总体架构如图 1 所示。

系统的数据流设计遵循“数据-处理-结果”的层级结构,通过严格控制数据依赖关系和处理顺序,确保系统运行效率和资源利用的最优化。在输入层,系统接收 DICOM/NIFTI 格式的 CT 数据及相应的支气管分割掩码,同时通过用户交互界面获取操作指令。中间处理层包含优化版 Marching Cubes 算法和支气管树结构提取功能。系统设计了双向数据

流,使交互式分割修正的结果能够反馈至掩码优化模块,实现掩码数据的迭代改进,同时避免整个流程的完全重建。

产生的锯齿状伪影,提高网格质量。在完成局部处理后,采用空间哈希技术快速合并各个块的局部网格,并消除重复顶点和边缘伪影,确保最终网格的完整性和视觉一致性。优化版 Marching Cubes 算法描述具体如下。

算法 1 面向普通硬件的优化版 Marching Cubes 算法

输入 体素数据 V , 基础阈值区间 $[T_{min}, T_{max}]$, 细节级别 LOD

输出 三角网格表面 S

1. 根据 LOD 计算采样步长:

$$step = base_step \times LOD_factor \tag{1}$$

2. 根据 LOD 确定平滑迭代次数:

$$smooth_iter = base_iter / LOD_factor \tag{2}$$

3. 将体素数据划分为大小为 $block_size$ 的重叠块 $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$

4. 初始化空网格集合 $S_{all} = \emptyset$

5. 对每个块 B_i 并行处理:

6. 提取块内等值面,生成局部网格 S_i

7. 如果 S_i 不为空:

8. 进行 $smooth_iter$ 次 Laplacian 平滑

9. 将 S_i 添加到全局网格集合 S_{all}

10. 合并所有局部网格得到初始全局网格 $S_{init} = \cup S_i$

11. 去除重复顶点和边缘伪影得到最终网格 S

12. 返回 S

与传统 Marching Cubes 算法相比,本算法在处理大规模体素数据时,提高了计算效率,同时减少了内存占用,并保持了等值面的拓扑正确性。这种性能提升使得该算法能够在普通硬件环境下实现医学成像数据的交互式可视化,满足临床应用对准确性的要求。

2.2 非实时交互式分割算法

为适应普通硬件环境,特别是集成显卡的性能限制,本系统在交互式分割模块设计中采用了非实时更新机制。这种设计思路避免了每次用户交互操作后立即重建三维模型的计算负担,转而采用用户完成一系列标注后手动触发更新的方式,从而在保证交互流畅性的同时确保分割精度。

非实时交互式分割修正算法的工作流程可分为 4 个主要阶段:三维位置映射、多平面重构显示、用户交互式修改和模型更新。在三维位置映射阶段,系统首先计算从相机位置通过用户点击点的射线,然后求解该射线与三维模型的交点,并将该世界坐

互动虚拟内窥镜系统架构

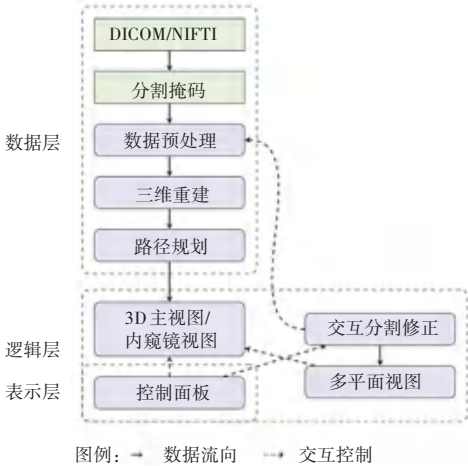


图 1 系统总体架构图

Fig. 1 The overall structure of the system

2 核心算法与优化策略

2.1 优化版 Marching Cubes 算法

为适应集成显卡环境,本系统设计了优化版 Marching Cubes 算法,通过分块并行处理策略降低计算复杂度,实现在普通硬件环境下的高质量三维重建。算法核心思想是将大型体素数据划分为具有少量重叠的小块,这些块可以并行处理,充分利用现代多核处理器的并行计算能力,同时减少内存占用。系统数据流程如图 2 所示。

互动虚拟内窥镜系统数据流程图

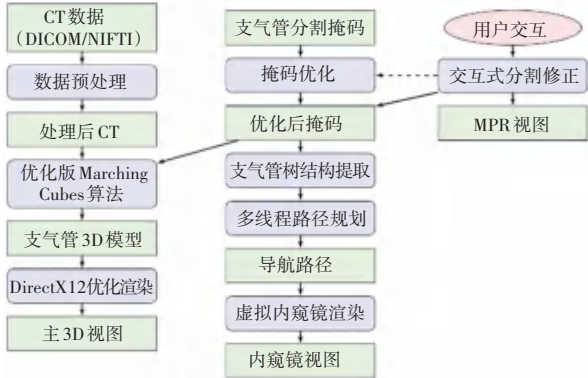


图 2 系统数据流程图

Fig. 2 The data pipeline of the system

算法实现了自适应细节级别 (Level of Detail, LOD) 控制,通过动态调整采样步长和平滑迭代次数,在不同视距下平衡渲染质量与计算负担。

对于每个分块生成的局部网格,算法应用 Laplacian 平滑处理,有效减少由于体素数据离散化

标点转换为体素数据空间中的索引坐标。在多平面重构显示阶段,系统提取 3 个正交平面,为用户提供精确的解剖学参考。

在用户交互式修改阶段,系统提供画笔、橡皮擦和填充工具进行编辑,每次修改操作会在 MPR 视图的掩码叠加层上即时显示,但不会立即触发三维模型重建。在模型更新阶段,用户点击“更新模型”按钮后,系统才会执行掩码优化、计算修改区域边界框、局部执行 Marching Cubes 算法并更新三维模型。这种局部更新策略显著减少了计算量,使系统能够在普通硬件环境下实现高效的交互式分割修正。系统的非实时更新机制特别适合医学场景的工作流特点,因为医学图像分割通常需要精确性而非实时性,医生更倾向于仔细审视和调整分割结果,而非快速但粗糙的实时反馈。

研究所提的这种设计理念不仅解决了技术限制,也更符合临床需求,体现了面向实际应用的系统设计思路。

2.3 路径规划算法

路径规划模块基于支气管树的拓扑结构,在用户指定起点(通常为气管入口)和目标位置(如病灶所在支气管分支)后,负责计算最优导航路径。不同于传统基于几何最短路径的算法,本系统设计了半径加权的路径规划方法,更符合临床支气管镜操作的实际需求和偏好。

路径规划算法基于经典 A* 搜索框架,但引入了支气管半径的惩罚项,使算法倾向于选择半径较大的通道,即使这可能导致路径略微延长。路径规划的成本函数被定义为:

$$f(n) = g(n) + h(n) + \alpha \cdot c(n) \tag{3}$$

其中, $g(n)$ 表示从起点到当前节点的实际累积距离成本; $h(n)$ 表示从当前节点到目标的欧几里得距离估计; $c(n) = 1/r(n)$ 表示反比于通道半径的惩罚项; α 为权重系数,通常设置在 0.5~2.0 之间,可根据用户偏好和特定临床需求动态调整。

为提高算法性能,本系统实现了 2 项关键优化策略:预处理阶段并行计算所有节点对之间的欧几里得距离作为启发函数的查找表,以及在节点扩展阶段对邻居节点的处理采用多线程并行机制。路径生成后,系统还应用 Douglas-Peucker 算法对初始路径进行简化,随后使用 B-spline 插值技术生成光滑的连续路径曲线,提供更自然、更符合实际支气管镜运动特性的虚拟导航体验。多线程优化的支气管路径规划算法如下所示。

算法 2 多线程优化的支气管路径规划算法

输入 支气管骨架图 $G = (V, E)$, 起点 s , 终点 t , 支气管半径映射 R

输出 最优路径 P

1. 并行计算所有节点对之间欧几里得距离作为启发函数 $h(n)$ // 第一阶段:并行预处理
2. 并行计算所有边权重,包含距离与半径惩罚项
3. 初始化开集 $OPEN = \{s\}$, 闭集 $CLOSED = \emptyset$
//第二阶段:A* 搜索
4. 对每个节点 n , 设置 $g(n) = \infty, g(s) = 0$
5. 当 $OPEN \neq \emptyset$ 时循环:
6. 从 $OPEN$ 中选择 $f(n) = g(n) + h(n) + \alpha \cdot 1/R(n)$ 最小节点 n
7. 如果 $n = t$:
8. 回溯构建初始路径 P_{init}
9. 并行应用 Douglas-Peucker 算法简化路径得到 $P_{simplified}$
10. 并行应用 B-spline 插值平滑路径得到最终路径 P
11. 返回 P
12. 将 n 从 $OPEN$ 移到 $CLOSED$
13. 对 n 的邻居 m 并行处理:
14. 如果 $m \in CLOSED$:
15. 继续循环
16. 否则:
17. 计算 $g' = g(n) + weight(n, m)$
18. 如果 $m \notin OPEN$ 或 $g' < g(m)$:
19. 更新 $g(m) = g'$ 和父节点
20. 如果 $m \notin OPEN$:
21. 将 m 加入 $OPEN$
22. 返回找不到路径

与传统基于纯几何最短距离的路径规划方法相比,本系统的半径加权路径规划更加符合临床实际操作习惯,能够优先选择主支气管等较宽通道,避免进入过窄的支气管分支,从而提供更接近真实支气管镜操作的虚拟体验。

3 集成显卡环境下的性能优化

3.1 内存优化策略

针对集成显卡环境下普遍存在的内存共享特性,本系统开发了多项内存优化策略,确保在有限内存条件下的稳定运行。首先,系统实现了延迟加载机制,仅在实际需要时才加载完整 CT 数据,避免一

次性占用大量内存。

其次,应用数据分块处理策略,将大型 CT 数据分成多个带有少量重叠的小块,分别处理后再合并结果,显著降低了峰值内存占用。

系统还设计了智能缓存机制,根据访问频率和重要性对数据进行分级管理,低频访问的大型数据会被优先释放。在交互式分割过程中,系统采用稀疏表示方法存储用户修改的区域,避免为每次微小修改都复制完整掩码数据。此外,针对大型三维网格模型,系统实现了渐进式网格表示方法,允许根据系统可用内存动态调整网格精度,在性能受限情况下自动降低细节以保证系统响应性。

这些内存优化策略的组合应用,使得系统能够在仅有 4 GB 共享内存的集成显卡环境下处理大于 512×512×500 尺寸的肺部 CT 数据,为基层医疗机构的普及应用提供了可能。

3.2 渲染优化策略

虚拟内窥镜的渲染过程是系统性能的关键瓶颈,特别是对于性能受限的集成显卡。本系统针对此环境特点,设计了多项渲染优化策略。首先,实现了多级网格简化技术,根据相机视距自动调整网格精度,远处使用低精度网格减少顶点数量,近处使用高精度网格保证细节表现。

其次,系统采用离屏渲染缓冲技术,将主 3D 视图与内窥镜视图的渲染过程分离,减少资源竞争。这种方法先在后台缓冲区完成内窥镜视图的渲染,再将结果复制到前台显示,避免了渲染管线的频繁切换,提高了整体性能。同时,系统实现了视锥裁剪技术,通过精确计算相机视锥体,仅渲染可能进入视野的几何体,大幅减少了渲染负担。

针对支气管内表面的纹理渲染,系统设计了基于程序化纹理的简化材质模型,避免了传统 PBR 材质的高计算开销,同时保持了足够的视觉真实感。此外,系统还优化了光照计算,采用预计算环境光遮蔽和简化版阴影映射技术,在不显著增加渲染负担的情况下提升了场景的深度感和立体感。

3.3 计算优化策略

除内存和渲染优化外,系统还针对计算密集型任务实施了全面的优化策略。首先,全面应用多线程并行计算技术,针对 Marching Cubes、路径规划和渲染过程进行任务分解,充分利用多核处理器的硬件优势。系统根据运行环境自动检测可用核心数量,并动态调整并行任务数以达到最佳性能。

其次,系统实现了非实时更新模式,将计算密集

型操作(如三维重建)与用户交互解耦,仅在用户明确触发的情况下执行模型重建,避免了频繁的中间状态计算。这种设计特别适合医学图像分析的工作流程,医生通常需要仔细审视和确认修改结果,而非频繁快速地重建模型。

第三,系统开发了基于变化区域检测的局部更新算法。当用户修改掩码数据时,系统自动识别变化区域的边界框,并仅对该区域进行重建,而保持其余部分不变。针对典型的局部修正操作,这种策略比全局重建减少了计算量,显著提升了响应速度。

4 实验结果与系统性能

4.1 系统实现环境

本文选择中端笔记本电脑作为轻量化开发测试平台,旨在验证系统在普通硬件配置下的性能表现。表 2 展示了系统开发与测试的详细软硬件环境。所选配置代表了当前市场中端笔记本电脑的典型水平。

表 2 虚拟内窥系统开发与测试的软硬件环境
Table 2 Software and hardware environment for virtual endoscopy system development and testing

类别	组件	详细配置
开发环境	编程语言	Python 3. 10. 9
	医学图像处理	SimpleITK 2. 3. 1
	图形渲染	VTK 9. 3. 1, PyVista 0. 44. 2
	数值计算	NumPy 1. 23. 5, SciPy 1. 10. 0
	图形界面	PyQt5 5. 15. 6
硬件配置	处理器	AMDRyzen 7 7735H (8 核 16 线程,最高睿频 4. 75 GHz)
	内存	32 GB DDR4 RAM
	图形处理器	AMD Radeon 680 M 集成 显卡 (RDNA2 架构)
系统环境	操作系统	Windows 11 家庭中文版 64 位 (版本 22631)
	图形 API	DirectX 12

这种选择具有明确的现实意义,因为基层医疗机构通常难以配备专业工作站级硬件。系统设计过程中特别注重针对集成显卡进行算法优化,充分利用现代多核处理器的并行计算能力,并针对 DirectX 12 特性进行了底层渲染适配。

4.2 功能展示与性能测试

系统实现了从数据加载到虚拟内窥导航的完整

工作流程。系统采用优化版 Marching Cubes 算法重建支气管三维模型,并提供多种标准视图切换功能;还展示了系统的三维重建结果和交互式分割修正界面,包括 3 个正交平面视图和多种标注工具。

用户可以在任意平面进行标注修改,并通过

“更新模型”按钮触发局部重建过程。在图 3 中对矢状面图中的截面进行了修改;图 4 展示了 3D 重建的视图;图 5 展示了虚拟内窥镜导航视图,包括内窥镜视角和外部三维模型导航位置显示。

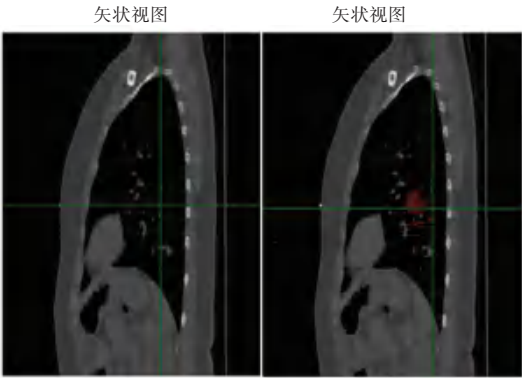


图 3 交互式掩码修正

Fig. 3 Interactive refinement of the mask

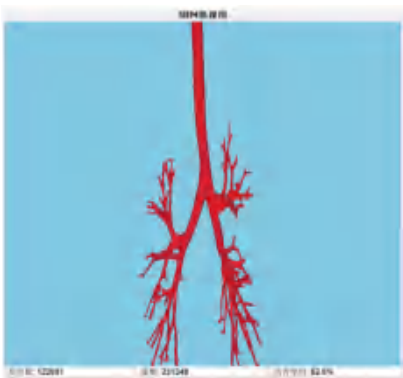


图 4 3D 支气管重建视图

Fig. 4 3D bronchial reconstruction view

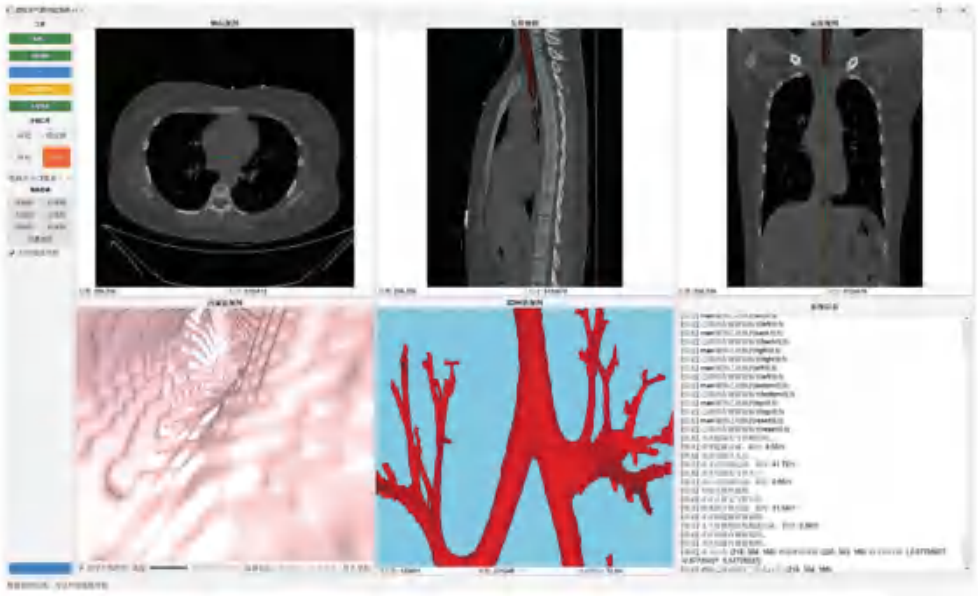


图 5 虚拟内窥镜导航视图

Fig. 5 Virtual endoscopic navigation view

在性能测试方面,本系统在测试硬件环境下实现了令人满意的性能表现。对于肺部 CT (512×512×679) 进行三维重建平均耗时 50 s 左右,生成包含约 12 万顶点的支气管网格模型。

虚拟内窥镜导航过程中,系统能够满足流畅交互的要求。与依赖独立显卡或者其他专业设备等配置的商业系统相比,本系统在功能完整性和精度方面保持了竞争力,同时显著降低了硬件门槛,为基层医疗机构提供了可及性更高的解决方案。使用 ATM’22^[21]数据集部分数据测试的平均流程时间,

保留一位小数之后见表 3。

表 3 系统平均耗时结果

Table 3 Average processing time of the system	
流程	平均时间/s
分支点识别	84.7
三维重建	52.3
距离图计算	30.3
骨架提取	10.3

5 结束语

本文设计实现了一种轻量化的面向普通硬件环境的支气管 CT 虚拟内窥系统,通过优化版 Marching Cubes 算法、非实时交互式分割机制、半径加权路径规划和针对集成显卡的渲染优化等技术创新,实现了在普通计算机硬件环境下的流畅运行。系统提供了三维重建、路径规划、虚拟漫游和互动分割四大核心功能,满足临床应用对准确性和稳定性的要求,为基层医疗机构术前规划、医学教育与培训、远程会诊等场景提供了有力支持。但是对于大规模、复杂区域等对精度有高要求的场景,本文提供的方法仍待改进。

实验结果表明,本系统能够在配备集成显卡的普通笔记本电脑上流畅运行,为医生提供便捷的支气管检查辅助工具。这一成果不仅在技术上实现了虚拟内窥镜系统的轻量化,更在普惠医疗方面具有重要意义,使基层医疗机构也能获取高质量的医学影像辅助诊断工具,从而减小医疗资源分配不均的现状,提高整体医疗服务水平。未来工作可继续优化系统性能,并扩展其临床应用范围。在技术层面,计划探索基于深度学习的智能分割辅助功能,进一步提高标注效率;研究更高效的数据压缩与管理策略,支持更大规模医学图像处理;以及开发面向移动设备的轻量级版本,进一步提升系统可及性。在临床应用层面,将加强系统的临床验证,探索在更多肺部疾病诊断场景中的应用价值,并建立标准化的临床工作流程,促进技术成果向实际诊疗转化。

参考文献

[1] 原发性肺癌诊疗规范(2018 年版)[J]. 肿瘤综合治疗电子杂志,2019,5(3):100-120.

[2] 综合医疗机构肺结核早期发现临床实践指南[J]. 中国防痨杂志,2024,46(2):127-140.

[3] 赵顺英,钱素云,陈志敏,等. 儿童肺炎支原体肺炎诊疗指南(2023 年版)[J]. 传染病信息,2023,36(4):291-297.

[4] 蔡柏蔷,何权瀛,高占成,等. 成人支气管扩张症诊治专家共识(2012 版)[J]. 中华危重症医学杂志(电子版),2012,5(5):315-328.

[5] 申皓,唐泽圣,唐龙. 分支结构中的虚拟内窥技术[J]. 系统仿

真学报,2004,16(11):2456-2458.

[6] 孟晓林,秦安,陈武凡,等. 基于 VTK 的医学虚拟内窥镜系统的研究[J]. 医疗卫生装备,2009,30(10):8-9.

[7] CICIENIA J, AVASARALA S K, GILDEA T R. Navigational bronchoscopy: A guide through history, current use, and developing technology[J]. Journal of Thoracic Disease, 2020, 12(6):3263-3271.

[8] KAJIWARA N, MAEHARA S, MAEDA J, et al. Clinical applications of virtual navigation bronchial intervention[J]. Journal of Thoracic Disease, 2018, 10(1):307.

[9] MAYER D, BARTZ D, FISCHER J, et al. Hybrid segmentation and virtual bronchoscopy based on ct images [J]. Academic Radiology, 2004, 11(5):551-565.

[10] SHALLIK N, LABIB A, GANAW A, et al. Virtual bronchoscopy and 3D reconstruction in the critical care setting[J]. Qatar Medical Journal, 2019, 2019(2):81.

[11] HELFERTY J P, SHERBONDY A J, KIRALY A P, et al. Computer-based system for the virtual-endoscopic guidance of bronchoscopy [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2007, 108(1-2):171-187.

[12] WEVER D W, BOGAERT J, VERSCHAKELEN J. Virtual bronchoscopy: accuracy and usefulness - an overview [J]. Seminars in Ultrasound, CT and MRI, 2005, 26(5):364-373.

[13] MEDTRONIC. Superdimension™ navigation system [EB/OL]. (2025-01). <https://www.medtronic.com/en-us/healthcare-professionals/products/lung-health-thoracic-surgery/diagnostic-screening-systems/superdimension-navigation-system.html>.

[14] RAMÍREZ E, SÁNCHEZ C, BORRÀS A, et al. Bronchox: Bronchoscopy exploration software for biopsy intervention planning [J]. Healthcare Technology Letters, 2018, 5(5):177-182.

[15] 新华社. 中共中央 国务院印发《“健康中国 2030”规划纲要》[J]. 中华人民共和国国务院公报,2016(32):5-20.

[16] 王洪武,李冬妹. 中国支气管镜介入治疗现状及进展[J]. 中国研究型医院,2020,7(4):1-10.

[17] 金发光,钱桂生,傅恩清,等. 支气管镜在诊疗过程中发生的严重并发症及防治方法探讨[J]. 中国急救医学,2005(5):315-317.

[18] 陈志敏,刘金玲,王财富. 小儿纤维支气管镜检查与治疗的安全性探讨[J]. 临床儿科杂志,2006(1):31-33.

[19] 张悦,杨丽,陈星曲,等. 环泊酚复合瑞芬太尼在肺结核患者纤维支气管镜检查中的麻醉效果研究[J]. 成都医学院学报,2025,20(2):256-260.

[20] 边子健,覃文军,刘积仁,等. 肺部 CT 图像中的解剖结构分割方法综述[J]. 中国图象图形学报,2018,23(10):1450-1471.

[21] ZHANG Minghui, WU Yangqian, ZHANG Hanxiao, et al. Multi-site, multi-domain airway tree modeling (ATM'22): A public benchmark for pulmonary airway segmentation [J]. arXiv preprint arXiv, 2303.05745,2023.