

几种变换域体绘制算法的比较研究

王文举, 侯德文

(山东师范大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250014)

摘 要:医学图像三维重建技术具有重要的学术意义和应用价值。变换域体绘制是该重建技术的一个新兴的重要分类, 目前它已成为一个热点研究方向。综述了变换域体绘制下的傅里叶体绘制、哈特里体绘制、小波域射线投射法、小波足迹法典型算法的算法思想和优缺点, 而且通过列表与其它三维医学图像可视化算法的特点及性能进行了分析比较, 从而得出变换域体绘制具有绘制速度快、图像品质高等其它绘制算法不可比拟的优点及其相应的改进之处。

关键词:三维医学图像; 傅里叶体绘制; 哈特里体绘制; 小波域射线投射法; 小波足迹法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2008)04-0080-04

Comparative Research on Several Methods of Transform Domain Volume Rendering

WANG Wen-ju, HOU De-wen

(School of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: It's 3D reconstruction of medical image that has very important academic significance and practical value. Volume rendering in transform domain is an important and new branch of this field, which has been an active topic of research recently. Narrates some algorithms of volume rendering in transform domain, including Fourier volume rendering, Hartley volume rendering, ray tracing in wavelet space, wavelet-based splatting etc, and then evaluates the characteristics of all algorithms for 3D reconstruction of medical image in way of table. Analyzing and comparing their performance, may clearly draw conclusion that the volume rendering in transform domain has higher computational efficiency and can get better images than the others.

Key words: 3D medical image; Fourier volume rendering; Hartley volume rendering; ray tracing in wavelet space; wavelet-based splatting

0 引言

三维医学图像的可视化通常是指利用人类的视觉特性, 通过计算机对二维数字断层图像序列形成的三维体数据进行处理, 将其变换为具有直观立体效果的图像来展示人体组织的三维形态。在临床和医学研究中, 利用三维重建技术可对 CT 图像、核磁共振图像和超声图像进行处理构造出三维几何模型并对重建模型从不同方向观察、剖切, 从而使医生可以对感兴趣部位的大小、形状和空间位置做出定性、定量的认识, 它已在诊断医学、手术规划及模拟仿真、整形及假肢外科、放射治疗规划、解剖教学等方面得到了广泛的应用。由于医学图像三维重建技术具有重要的学术意义和应

用价值, 目前它已成为一个热点研究方向。

三维医学图像可视化技术通常可分为面绘制和体绘制两类。面绘制是指体表面的重建, 它可以有效地绘制三维体的表面, 但缺乏内部信息的表达; 体绘制是以体素作为基本单元, 直接由切片数据集生成三维体的图像, 也称为直接体绘制, 其能够表示对象体的内部信息, 但计算量大, 包括体数据的采样、重构、重采样、组合、绘制等操作。

近年来, 随着计算机运算速度的不断提高, 三维图像的体绘制方法渐趋流行。体绘制算法按处理数据域的不同可分为空间域方法和变换域方法。前者是直接对原始的空间数据(体数据)进行处理显示; 后者是将体数据变换到变换域, 然后再进行处理显示。空间域方法的典型算法包括光线投射算法、单元投影法、Splatting 算法、剪切一曲变算法, 其实质可概括为三维数据场的重采样和颜色合成两大步骤。因为每次绘制都至少要对所有体元访问一遍, 设数据场大小为 N^3 ,

收稿日期: 2007-07-05

基金项目: 山东省自然科学基金(Y2006G20)

作者简介: 王文举(1979-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向为三维可视化技术; 侯德文, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为图像处理、嵌入式系统设计。

则这类算法的复杂度不会低于 $O(N^3)$ 。而变换域方法在不包括预处理的前提下,将计算复杂性降低到 $O(N^2 \log N)$,该方法又可细分为频域体绘制和小波域体绘制两大类。其中频域体绘制包括傅里叶体绘制、哈特里体绘制;小波域体绘制包括小波域射线投射法、小波足迹法。由于变换域体绘制运行速度较快,绘制图像品质较高,显现出了较好的应用前景,现已引起了人们的极大关注。

1 变换域体绘制算法的理论基础

变换域体绘制算法的理论基础是1993年Malzbender提出的傅里叶切片投影定理。它指出了可以从另一个途径来得到三维函数在某个方向上的投影:在此三维函数对应的频谱函数中,截取一个二维切片,如果这个切片是经过原点并且平行于投影平面,那么,其反变换就是原函数对应的投影。Malzbender把三维数据场的体绘制结果粗略地看作为沿视线方向的投影,于是设计了由2个步骤组成的基本频域体绘制算法。算法第1步进行预处理,计算三维数据场的频域表示,尽管对大小是 N^3 的数据场而言其计算复杂度将高达 $O(N^2 \log N)$,但其计算结果可以中间结果的形式保存下来,所以对任何数据场这一步只需进行1次,在得到了这个中间结果之后,算法第2步可以重复执行:对于某给定视线方向,在频域数据场中沿此方向截取一个过原点的切片,然后将其反变换至空域。这样,在整个体绘制算法的时间消耗中占主要部分的重采样过程只需在二维切片上进行,而不再如空域方法那样在整个三维范围内进行,这部分计算的复杂度由 $O(N^3)$ 降至 $O(N^2)$ 。考虑到反变换这样就可以按傅里叶切片定理指出的方法来得到这个投影,整个算法复杂度是 $O(N^2 \log N) + O(N^2)$,即 $O(N^2 \log N)$ [1]。

2 变换域—频域体绘制

2.1 频域体绘制方法的优缺点及分类

频域体绘制方法绘制速度较快,时间复杂度为 $O(N^2 \log N)$,图像品质也较高,可以在频域内灵活地根据不同的视点离散频谱抽取平面,因此可以方便快速地得到不同视角的图像;但由于光照模型具有低反射率,没有相互反射,从而不能保留体素的光吸收特性,绘制结果像X-ray扫描过的图像;另外,体数据预处理结束后,用户在绘制过程中很难与系统进行交互操作改变传递函数。频域体绘制方法又可细分为傅里叶体绘制和哈特里体绘制。

2.2 傅里叶体绘制

基本思想:完全遵循傅里叶切片投影定理。形式

化语言描述如下:设在三维空间离散数据场内一点 (x, y, z) 处的密度值为 $f_{3d}(x, y, z)$,所对应的傅里叶变换表示为 $F_{3d} = \xi(f_{3d})$,即对体数据做预处理,将其从空间域变换到频域。如果在频域中,沿空间方向 θ 并且通过原点的平面对 F_{3d} 进行采样,可以得到一个二维函数 F_{2d}^θ ,它被称为 F_{3d} 在 θ 方向上的截面。再将这个截面做傅里叶逆变换 $f_{2d}^\theta = \xi^{-1}(F_{2d}^\theta)$,就可在空域的图像平面中得到给定观察方向上的投影 [2]。

其中的连续函数傅里叶变换工作可用下面的一对等式描述:

$$\begin{cases} H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{2\pi i f t} dt \\ h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f) e^{-2\pi i f t} df \end{cases}$$

$h(t)$ 表示空间域连续函数, $H(f)$ 表示相对应的频域函数。

但在实际工作中要用计算机处理,所以采用离散傅里叶变换形式。一维离散傅里叶变换可用下式表示:

$$\begin{cases} H_n = \sum_{k=0}^{N-1} h_k e^{2\pi i k n / N} \\ h_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_n e^{-2\pi i k n / N} \end{cases}$$

周期为 $[0, N-1]$ 。二维离散傅里叶变换表示为:

$$\begin{cases} H_{u,v} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} h_{x,y} e^{2\pi i (ux/M + vy/N)} \\ h_{x,y} = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} H_{u,v} e^{-2\pi i (ux/M + vy/N)} \end{cases}$$

相应的三维离散傅里叶变换可用一、二维离散傅里叶变换进行扩展得到。

2.3 哈特里体绘制

基本思想:在傅里叶体绘制中,采用傅里叶变换将空域数据场变换到频域以后,发现中间结果的每一个点都必须用一个复数表示。实际上,初始的三维空间数据场和最终得到的二维图像都是实数域,从而导致内存开销扩大了一倍。而在同样基于傅里叶投影切片定理的哈特里体绘制中,用哈特里变换代替傅里叶变换就很好解决了这个问题,因为经哈特里变换后得到的中间结果都属于实数域 [3]。一维连续哈特里变换等式如下所示:

$$\begin{cases} H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) (\cos ft + \sin ft) dt \\ h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f) (\cos ft + \sin ft) df \end{cases}$$

对应一维哈特里变换如下式所示:

$$\begin{cases} H_n = \sum_{k=0}^{N-1} h_k \cos(2\pi nk/N) \\ h_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_n \cos(2\pi nk/N) \end{cases}$$

其中 $\text{casa} = \cos\alpha + \sin\alpha$ 。

二维离散哈特里变换表示为:

$$\begin{cases} H_{u,v} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} h_{x,y} \cos[2\pi(ux/M + vy/N)] \\ h_{x,y} = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} H_{u,v} \cos[2\pi(ux/M + vy/N)] \end{cases}$$

相应的三维离散哈特里变换可用一、二维离散哈特里变换进行扩展得到。

3 变换域一小波域体绘制

基于小波的体绘制是一种通过对体数据进行三维离散小波变换,以构成体数据的多分辨率表示,然后代入到体绘制方程中,来生成三维图像的方法。它包括小波足迹法和

3.1 小波域足迹法

基本思想:基于傅里叶投影切片定理,先从普通的 FVR 开始,计算切平面的傅里叶变换,再在傅里叶域中的切平面上完成小波分解,求出小波和尺度函数的足迹,再通过小波系数加权、傅里叶反变换得到投影图像。它属于物体空间序算法。其最大优点是绘制速度快,时间复杂度为 $O(N^2 \log N)$,可以达到网络交互级的速率,但缺点是不能保留不同媒质的光吸收特性,而且绘制的图像质量呈现一种指数型的自阻塞特性^[4,5]。

3.2 小波域光线投射法

基本思想:与以上三种变换域体绘制算法不同,它并不基于傅里叶投影切片定理,而只是将空间域光线投射法的光照模型方程放到了频域上进行求解。它的低反射率光照模型可用下式表示:

$$I(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} q(x_{in} + t * s) e^{-\int_{t_0}^t \alpha(u) du} dt$$

表示光线从 t_0 处传输到 t_1 处时 $x_{in} + t * s$ 处的光源对观察点处的光强度贡献的总和。 $q()$ 表示光源项, $\alpha()$ 表示不透明度项,其中颜色 $q_{RGB}()$, $\alpha()$ 都可在小波域求解,实质上是將体数据的小波近似结果代入到体绘制方程中求解光强度进行明暗处理,是射线投射法在小波变换域的实现,是一种象空间序的方法^[6]。因此它具有射线投射法的许多优点:可以保留光吸收特性,并可以加入各种光照模型进行明暗处理,从而得到高品质的图像,半透明的视觉效果,但计算量大,绘制速度慢,时间复杂度为 $O(N^3)$ 。

变换域体绘制算法与其它三维医学图像可视化算法的性能比较如表 1 所示。

表 1 变换域体绘制算法与其它三维医学图像可视化算法的主要性能评价

医学体数据三维可视化方法				图像品质	绘制速度	绘制效果和算法特点			适用场合
体域绘制空间域	变换域	频域绘制算法	傅里叶体绘制	较高	较快	直接研究光线通过体数据场与体素的相互关系, 无需构造中间面, 体素的许多细节信息得以保留, 绘制结果的保真性高于面绘制, 但交互性能和算法效率逊于面绘制	呈 X 光片效果	应用 FFT, 算法简洁, 但占用内存较大	绘制多种组织和器官构成的整体, 表现其内部相互间的结构关系, 或根据实际需要选择并突出某一部分信息, 尤其适用于形状特征模糊的组织器官进行三维显示
			哈特里体绘制	较高	快			应用 FHT, 算法简洁, 但占用内存较小	
		小波域绘制算法	小波足迹法	较高	较快			可逐级提炼渐进显示, 进行局部细节添加	
			射线投射法	高	慢		可利用不透明度得到整体的层次结构, 占用内存大		
	空间域	基于软件的算法	射线投射法	最高	慢	可以利用吸收性映出体整层结构, 要求精细的据割	内存开销大, 是图像空间绘制算法		
			足迹法	高	中等		可实现渐进显示, 内存开销小, 是物体空间绘制算法		
			错切变形法	中等	最快		通过二维形变简化体数据旋转变换, 内存开销小, 是图像、物体空间的混合绘制算法		
		基于图形硬件	3D 纹理映射	较低	快		算法中的重采样以及颜色和不透明度值的计算由硬件完成, 因此内存开销大; 图像品质依赖帧存储设备分辨率		

续表 1

医学体数据三维可视化方法		图像品质	绘制速度	绘制效果和算法特点		适用场合
面 制	Contour Connection	较低	最快	可采用比较成熟的计算机图形学方法进行显示,计算量小,运行速度快,借助于专用硬件支持,在高性能PC上面绘制完全可以实现实时交互	方法简单且数据量小,但是绘制效果不很直观,精度也不高	绘制表面特征明显的组织或器官
	Cuberille	中等	快		简单定义体素及其等值面的生成,计算简单,便于并行处理;但会出现严重走样尤其在边界处走样明显,显示粗糙,不能很好显示物体的细节	
	Marching Cube	较高	较快		精确定义体素及其体素内等值面的生成,但在其等值面的连接模式中存在着许多二义性连接	
	Marching Tetrahedral	高	较快		基于MC算法,立方体剖分为四面体,算法简单,等值面精度高,避免了二义性问题	
	Dividing Cube	高	快		使体素在图像空间被绘制成一表面点而不是绘制成体素内等值面片,节省了大量计算时间	
	几何变形曲面算法	最高	较快		生成的等值面具有拓扑连通性,同时是对等值面的最佳逼近	

像简单地视为沿视线方向的线性积分,使得绘图效果呈X光片效果。(3)在数据预处理之后,传递函数就不能再与系统进行交互使用了。这些都是值得研究的问题。近年来计算机技术和网络技术的迅速发展又为体绘制绘制速度达到实时交互创造了条件,从算法的性能评价中可见,小波足迹法在此方面显现出了巨大的发展潜力,可作为重点方向进行研究。

总体来说,现在国外专家已对变换域体绘制算法进行了较为深入的研究,而在国内还处于起步阶段,面对三维可视化技术所具有的广泛应用价值和变换域体绘制深远的发展前景,应尽早开展这方面的研究。

参考文献:

- [1] Totsuka T, Levoy M. Frequency domain volume rendering[C]// In Kajiya J T. Computer Graphics (SIGGRAPH '93 Proceedings). [s.l.]:[s.n.],1993:271-278.
- [2] Malzbender T. Fourier volume rendering[J]. ACM Transactions on Graphics, 1993, 12(3):233-250.
- [3] Hao Hong, Bracewell R N. A three-dimensional DFT algorithm using the fast Hartley

transform[J]. Proceedings of the IEEE, 1987,75(2):264-266.

- [4] Westenberg M, Roerdink J. Frequency domain volume rendering by the wavelet x-ray transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000,9(7):1249-1261.
- [5] 丁爱玲,周秦武. 基于小波的三维图像频域显示方法研究[J]. 计算机工程与应用,2005(6):50-53.
- [6] Gross M H, Lippert L, Ditttrich R, et al. Two methods for wavelet-based volume rendering[J]. Computer & Graphics, 1997,21(2):237-252.

4 研究展望

目前,由于变换域体绘制(小波域射线投射法除外)继承了体绘制算法的优点且具有运行速度快、绘制图像品质较高等优点,越来越受到人们的高度重视,得到了快速发展,但在以下三个方面还有待提高:(1)没有空域体绘制的光照效果。其采用基于半球形光源模型的方向光照方法,在此光照模型中,体元的颜色取决于光源颜色,而不是像传统光照模型一样取决于物质分类结果。(2)缺乏深度信息或遮挡效果,只把投影图