

基于 Ray-Casting 算法对医学图像进行三维体绘制重建

周 娟

(西南政法大学刑事侦查学院重庆高校物证技术工程研究中心 重庆 401120)

摘 要 对医学图像三维体绘制的基本流程、光学模型及原理进行了分析,并深入研究了光线投射 Ray-Casting 算法的模型及原理,就其颜色赋值、重采样、图像合成等关键技术进行了深入讨论和研究,最后在 MITK 平台实现了医学图像的体绘制。该算法对体绘制的三维模型能够进行光照属性、表面属性和环境参数的交互操作;同时可进行法平面切割和动态平面切割显示;此外,还可以进行旋转、缩放、平移等交互操作。

关键词 MITK, Ray-Casting, 光学模型, 颜色赋值, 图像合成

中图法分类号 TP391.41 文献标识码 A

3D-volume Reconstruction of Medical Images Based on Ray-Casting Algorithm

ZHOU Juan

(Chongqing Institutions of Higher Learning Center of Forensic Science Engineering and Research, College of Criminal Investigation, Southwest University of Political Science and Law, Chongqing 401120, China)

Abstract 3D-volume reconstruction of medical images, the basic flow scheme of volume rendering and the theory of its optical model are analysed, especially the model and theory of the ray casting algorithm are examined in depth and the critical technologies of color evaluation, points resample and picture synthesis and so on are deeply discussed. Finally, the volume rendering function of medical images grounds on MITK platform is realized. The 3D volume model rendered by the algorithm can be interactively operated on its photo-illumination attribute, surface attribute and environmental parameters. The system can execute normal plane incision and dynamic vision of the plane. Furthermore, it can rotate, zoom and shift the 3D volume model.

Keywords MITK, Ray-Casting, Optical model, Color evaluation, Picture synthesis

1 引言

医学图像三维重建要求图像尽可能准确地反映对象的结构和细节。由于来自断层图像序列的数据中,不同层次的图像的亮度会有细微的差别,因此对依赖判定对象间的界面进行绘制的表面重建方法非常不利。另外,由于表面绘制方法只显示等值面,因此对于边界明显的组织和器官反映的效果较好,对于边界模糊的情况不够理想。该方法还无法反映对象内部复杂的结构。近十年来发展起来的体绘制^[1]方法很好地解决了表面绘制方法存在的问题,其由于在体数据处理及特征细节信息、表现方面的优势,已经得到越来越多研究者的重视,被广泛地应用于医学领域。

体绘制技术是将三维空间的离散数据直接转换为二维图像而不必生成中间几何图元。三维空间的离散采样点原本是不具有色彩属性的,只具有灰度值,采样点的颜色值是在物质分类的基础上人为赋予的,因而称为伪彩色。体绘制技术实现的功能是,计算全部数据点对屏幕像素的贡献,即每一个屏幕像素的光强度值 I 。由计算机图形学可知,在灰度图像中, I 表示灰度值;在彩色图像中,对红、绿、蓝这 3 个颜色分量会有不同的 I 值,因此需要分别计算这 3 色各自的 I 值。为了实现这一功能,需要给出光学模型,用它来描述三维数据是如

何产生、反射、阻挡以及散射光线的,从而计算出全部采样点对屏幕像素的贡献。

Nelson Max 在《直接体绘制中的光学模型》一文中假定连续分布的三维数据场中充满着小粒子,这些小粒子具有的发光、吸收、反射等功能使得光线通过三维数据场时发生了变化。基于这一假设,形成了几种不同的光学模型^[2],在三维数据场可视化中,体绘制技术是一种基于光学映射的方法,该方法通过模拟光线在物体内部的一系列光学现象,使得到的体绘制图像更具真实感,便于分析和想象。

本文基于对体绘制中的光学模型、Ray-Casting^[3]算法模型及原理的研究,详细分析了该算法的颜色赋值、重采样、图像合成的算法以及该算法在 MITK 算法平台^[4]中对应的类及数据模型等关键技术,实现了医学数据的三维体绘制,并能够进行光照属性、表面属性和环境参数的交互操作,同时设定了法平面切割、动态平面切割显示和抓屏操作。此外也可以进行旋转、缩放、平移等交互操作。

2 体绘制中的光学模型

2.1 光线吸收模型

如果假定三维空间中的小粒子可完全吸收所射入的光线,而无反射和发光功能,则构成了一个光线吸收模型,其为

本文受重庆市教委科学技术研究项目(KJ1400102, KJ1500106)资助。

周 娟(1983—),女,博士,讲师,主要研究方向为医学图像三维重建、人体伤残鉴定、人工智能等, E-mail: zjajf@126.com。

光学模型中最简单的一种。光线吸收模型^[5]如式(1)所示：

$$I(s) = I_0 \exp\left[-\int_0^s \tau(t) dt\right] \quad (1)$$

其中, I_0 是光线进入三维数据场的光线强度。

$$T(s) = \exp\left[-\int_0^s \tau(t) dt\right] \quad (2)$$

表示了光线经过数据场到达 s 这段距离后的光线强度, 也称为透明度。如果定义：

$$a = 1 - T(s) = 1 - \exp\left[-\int_0^s \tau(t) dt\right] \quad (3)$$

则称 a 为光线在这段距离上的不透明度, 即阻光度。在将三维数据场映射为颜色值时, 如果将某一数据值的透明度设定为 1, 表示光线不被吸收而完全穿过, 因而在结果图像中该数据代表的物质将是透明的。与此相反, 如果将对应的透明度设定为 0, 表示光线完全被吸收, 在结果图像中该数据代表的物质将是完全不透明的, 而在它后面的物质将被完全遮挡。这种光学模型很适合于 CT 和 MRI 扫描数据的可视化处理。

2.2 光线发射模型

一般说来, 在三维空间数据场及悬浮状物质的光线模型中, 小粒子都有吸收、反射和发射光线的功能。但是, 在火焰、高温气体等的处理中, 可以认为粒子很小且透明, 但是发出的光线却很强。这时可以认为小粒子仅具有发射光线的功能。设小粒子都是透明的发光体, 向各个方向均匀地发射出光线, 小粒子的投影面积为 A 。设 P 为单位体积内粒子数, 即粒子数密度。光线吸收模型^[6]如下：

$$I(s) = I_0 + \left[\int_0^s g(t) dt \right] \quad (4)$$

其中, $g(t)$ 是光源项, I_0 是初始光线强度, s 为光线投影方向的长度参数。式(4)即光线发射模型的表达式, 其积分没有上限值限制, 公式的计算结果有可能超过输出设备的极限值, 应用时必须加以限制处理, 所以 s 的取值范围必须根据实际情况进行限制。

2.3 光线吸收和发射模型

将光线吸收和发射模型结合起来, 可以更好地反映出光线在充满粒子的二维空间中的变化, 可得：

$$I(D) = I_0 \exp\left[-\int_0^s [\tau(t) dt]\right] + \left[\int_0^v g(s) \exp\left[-\int_0^v \tau(t) dt\right] ds \right] \quad (5)$$

式(5)中的第 1 项表示从背景处射入的光线经过数据场的吸收后, 到达观察点的光强; 第 2 项表示与观察点距离小于或等于 v 的所有点光源对观察点处光强处贡献的总和。

$$I(D) = I_0 T(D) + C(1 - T(D)) \quad (6)$$

其中, $T(D)$ 为透明度, $1 - T(D)$ 为阻光度, $I(D)$ 表示背景 I_0 与所赋颜色值 C 在透明度 $T(D)$ 作用下的合成值。

3 Ray-Casting 算法

在过去的十几年里, 国外学者相继提出的体绘制算法大多是以离散方法实现的。其中, Levy M 提出的光线投射 (Ray-Casting) 算法^[3]就是一种图像空间扫描的实现体绘制的离散方法。该算法中, 不仅数据重新采样使用离散方法, 而且图像合成也应用了光学模型的离散形式, 这大大便于使用数字式计算机进行实现。下面介绍光线投射算法的基本原理, 其流程如图 1 所示。

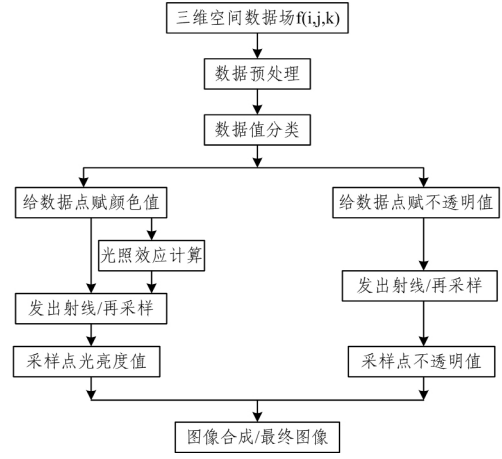


图 1 Ray-Casting 算法流程图

该算法假定三维空间数据 $f(x_i, y_j, z_k)$ 分布在均匀网格或规格网格的网点上(为简便, 说明时采用 $f(i, j, k)$ 表示三维空间数据)。数据预处理包括原始数据的格式转换、剔除冗余数据及导出所需要的数据等。接着进行数据值分类, 其目的是根据数据值的不同, 将其分为若干类, 并给每类数据赋予不同的颜色值和阻光度值, 以求较准确地表示多种物质的不同分布或单一物质的不同属性。然后进行重新采样, 即从屏幕上的每一个像素点根据设定的观察方向发出一条射线, 这条射线穿过三维数据场, 沿着这条射线选择 K 个等距的采样点, 并由距离采样点最近的 8 个数据点(采样点所在的体素)的颜色值和阻光度值作三次线性插值, 求出该采样点的颜色值和阻光度值。同时, 在做重新采样前, 要将具有颜色值及阻光度值的三维数据场由物体空间坐标转换为相应的图像空间坐标。

为了增加逼真度, 需要增加明暗效应, 使用中心差分方法得出各数据点的梯度值, 即

$$\text{Grad}_x = f(i+1, j, k) - f(i-1, j, k) / 2 \quad (7)$$

$$\text{Grad}_y = f(i, j+1, k) - f(i, j-1, k) / 2 \quad (8)$$

$$\text{Grad}_z = f(i, j, k+1) - f(i, j, k-1) / 2 \quad (9)$$

用梯度代替法向向量, 再用传统的 Phone 模型计算出各数据点的光亮度值, 然后进行重采样。最后是图像的合成, 即将每条射线上各采样点的颜色值及阻光度使用图像合成算法, 得到发出该射线的像素点处的颜色值, 生成最终的图像。由于重新采样和图像合成是按屏幕上每条扫描线的每个像素逐个进行的, 因此该算法又称为图像空间扫描的体绘制算法。

3.1 颜色赋值

为了在体绘制的结果图像中显示三维数据场内部结构的丰富细节, 需要生成具有透明效果的图像; 由于来自断层图像的数据都为灰度值, 如果直接生成灰度图像, 细节表现将很差。因为人眼对灰度图像的敏感性不强, 能分辨出的灰度等级很有限, 人眼对某一背景或平均亮度适应以后, 可分辨的灰度等级不大于 30 级, 当照片或显示设备的对比度不足时, 实际可分辨的灰度等级数还要下降, 所以使用灰度图像无法充分展示图像的细节。然而人眼对不同色度和亮度的彩色图像的敏感性却很强, 将灰度图像按一定算法转化成彩色图像后, 虽然信息总量不变, 但人所能接受到的(或感受到的)信息却较灰度图像增加了。在光线投射算法中, 图像合成过程涉及对各采样点的累计处理。由于灰度表示的范围相对较小, 而

彩色表示的范围却很大,如果使用灰度值进行合成图像处理,容易使许多信息随着运算过程中的数据取舍而丢失,造成信息量的减少,采用彩色值运算就可以大大避免这种情况的发生,从而有利于达到尽可能全面和完整地体现原始数据的目的。因此,对每个体素不仅要分配颜色值(R, G, B),而且要分配相应的透明度 a 或阻光度 p 。 $a=1$ 表示完全透明; $a=0$ 表示该体素完全不透明,即对光线的阻挡作用最大。实际中也可以采用设置阻光度的方法,它与透明度有 $p=1-a$ 的数学关系。由于各体素的颜色值是人为赋予的,因此最终图像中的颜色是伪彩色。

对数据进行伪彩色处理,主要是按照某种函数关系,将灰度值映射成对应的彩色^[7]。采用这种映射方法是因为它简单、速度快、易用,而且可以和对数据进行分类的阈值法很好地配合,显示效果好。映射函数图像如图 2 所示,与人体 CT 灰度值的分布很相似,通过对关键点 $\min, a1, a2, a3, \max$ 的调整,可以和阈值法对物质的分类相对应,每个色带区域对应不同种物质,使得显示效果较好。其中 $\min, a1, a2, a3, \max$ 的值确定伪彩色成色比例关系,通过调节它们可以调节 4 个色带的宽度和位置,按灰度值法对 C 值划分出的不同类别的物质可以对应这几个色带,使得不同物质对应的颜色类型也不同。并用 $a1, a2, a3$ 实际值以取成对数据进行分类所对应的阈值,而 $\min$ 和 $\max$ 是对灰度值范围的限定,可以过滤掉不相关的数据。

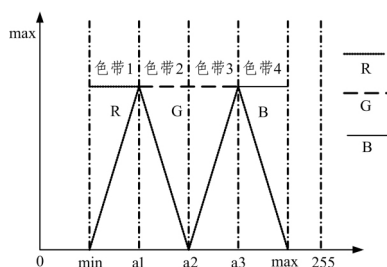


图 2 伪彩色函数映射图

该方法很好地实现了分类和映射成伪彩色对应相关,增强了观察效果。采用设定透明度与灰度值呈线性的方法,即灰度值除以某个数值,确保透明度值在 $(0, 1)$ 之间,而且图像的质量较好,过渡圆滑。根据实际需要还可以调整透明度设置的范围,减小分母的值,使透明度降低。由于阻光度与透明度值的和为 1,因此也可以获得阻光度。在实践中这种透明度随灰度值连续变化的方法绘制效果好,图像连贯、自然。

3.2 明暗效应

在计算机图形学中,明暗计算一般都是在面绘制中为了增加图像的真实感而进行的。但是,在体绘制中,也可以利用明暗计算的效果更加突出地显示出不同物质之间的边界面,增加逼真度。由于面绘制中的明暗计算是基于面的法向向量的,而在体绘制中没有面的信息,因此必须求出等价的法向向量才能进行明暗计算。在体绘制中,用各数据点上的梯度值来代替法向向量(参见式(7)一式(9))。计算出各个数据点的法向向量后,采用明暗模型^[8]可以对绘制效果进行加强,得到立体感强的效果图。

假定光源为点光源且为单光源,照射到物体表面上,反射出来的光可以分为 3 类:泛光、漫反射光和镜面反射光。

泛光:在任何方向上都有,均匀分布,用于模拟从环境中周围物体散射到物体表面再反射出来的光,如式(10)所示:

$$I = K_a \beta_a \quad (10)$$

其中, K_a 是漫反射常数,与物体表面性质有关; β_a 是入射的泛光光强,与环境的明暗程度有关。

漫反射光:漫反射光的空间分布也是均匀的,但它和入射光的强度、入射角的余弦及物体表面性质有关。实际使用时,用式(11)表示:

$$I = K_d I_i \cos \theta \quad (11)$$

其中, K_d 是漫反射常数,与物体表面性质有关; I_i 是光源的光强; θ 是入射角。

镜面反射光:对于镜面反射光,只能近似地描述。对于一般的较光滑表面,尽管不是理想反射表面,但是在沿反射方向传播的反射光相对较多,沿其他方向的光线就与该方向和反射方向的夹角大小有关。式(12)描述的是对一个较光滑表面,在视点所见的反射光强随视线与反射方向的夹角的增加而减少的现象。

$$I = K_s I_i \cos^n \alpha \quad (12)$$

其中, K_s 是物体表面镜面反射系数,与入射角和波长有关,但实际往往取常数; α 是视线与反射方向的夹角;近似描述镜面反射光的空间分布, n 越大,物体表面越光滑。

综上,可以得到传统的光学模型描述的明暗度计算公式:

$$I = k_w I_w + K_d I_i \cos \theta + K_s I_i \cos^n \alpha \quad (13)$$

3.3 叠加反射分量

获得了体素对光源的反射分量后,需要把反射分量叠加到体素颜色值中,新的颜色值可以表现出物体上某点在有光照情况下的效果。由于光源一般为白色,在 RGB 颜色模型下 3 个分量 R, G, B 的值相同,实际上可以认为是该点亮度的变化值。亮度值在 RGB 颜色模型下不能直接对 R, G, B 3 分量进行叠加,因为 RGB 颜色模型是面向硬件的,而亮度是由人眼的感受确定的,所以要使用面向用户的颜色模型。人眼对亮度的感受对应于 RGB 颜色模型,其中 R, G, B 分量值的变化不是同步的,有一定的比例关系。这种叠加运算在某些颜色模型中却很简单,可以使用直接含有亮度分量的颜色模型进行运算。在这些颜色模型下,可以直接在亮度分量上增加亮度数值,然后将其结果再转换成 RGB 颜色模型,用于最终显示在屏幕上。这里选用 HSV (Hue, Saturation, Value) 模型,它属于色调模型,可以模拟人眼感知色彩的方式。其中 V 分量就是亮度分量,在 HSV 模型下,增加亮度只需要增加分量即可。但是在计算机技术中显示和存储颜色信息时,都采用 RGB 颜色模型,所以最终的结果是在 RGB 颜色模型下的形式。在开始对数据作伪彩色处理时,采用了 RGB 颜色模型,因此整个体绘制过程中,只有在叠加明暗效应时需要转换成 HSV 模型,叠加后再转换成 RGB 颜色模型。

3.4 重采样

在由屏幕发出的射线上选择了采样点后,需要找出距采样点最近的 8 个数据点,这个步骤是非常重要的,因为采样点在图像空间内使用图像空间坐标进行定位,而待寻找的数据点是在物体空间,即在原始数据场空间内,采用的是物体空间坐标。所以必须完成这种转换,将采样点转换到物体空间坐标系下,从而进行确定相邻数据点的处理。

要完成由图像空间 (x, y, z) 到物体空间 (u, v, w) 的转换,首先需确定两个坐标系之间的关系,它们之间只存在平移和旋转变换。

物体空间 (u, v, w) 为 O-UVW 坐标系, 图像空间 (x, y, z) 为 O-XYZ 坐标系。

首先确定其旋转变换关系, 设 O-XYZ 坐标系各坐标轴在 O-UVW 坐标系上的欧拉夹角分别为 α, β, γ 。

设矩阵 A 是图像空间到物体空间的旋转变换阵, 则有

$A =$

$$\begin{pmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma & -\sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma & \cos\beta\sin\gamma & \sin\alpha\cos\beta \\ \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{pmatrix} \quad (14)$$

再确定平移变换关系, 设 O-XYZ 坐标原点在 O-UVW 坐标系下的位置为 P_u, P_v, P_w , 则最终的变换公式为

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_u \\ p_v \\ p_w \end{pmatrix} \quad (15)$$

在显示过程中要改变视角和图像中物体的位置, 只需要分别修改上述公式中的夹角。坐标 p_u, p_v, p_w 就可以改变两个坐标系的空间位置关系, 完成视图中物体的旋转和平移。光线投射算法实际上是一种平行投影到屏幕下的处理, 所以通过移动是无法改变其图像大小的。

另外, 为了使处理更加高效, 可以事先确定数据场在屏幕上沿 z 轴的平行投影区域, 即 x, y 轴方向上的范围, 在进行光线投射时, 只在此屏幕区域内发射光线, 可以保证对数据场扫描的完整性, 又减少了无效的运算。如果进一步确定数据场在图像空间内 z 轴方向上的范围, 也可以进一步减少无效采样, 提高速度。

通过上述坐标变换运算, 确定采样点在物体空间中的位置坐标, 选取采样点附近最近的 8 个数据点构成体素, 求取重采样值。

3.5 图像合成

光线投射算法中的最后一步是图像合成, 其目的为沿着某一像素点发出的射线, 逐一计算该射线上各采样点的颜色值和阻光度值, 并按照一定的规则合成, 以形成该屏幕像素点的最终颜色值。将屏幕上各像素点的颜色值都计算出来后即形成了一幅图像。在图像空间扫描的体绘制中, 有两种不同的图像合成算法, 这种合成算法^[9]是沿射线方向将各种采样点的颜色值和阻光度值合成以得到最终图像。

设第 i 个体素的颜色值为 C_{out} , 阻光度为 α_{out} , 进入第 i 个体素的颜色值为 C_{in} , 阻光度为 α_{in} 。

由前向后的图像合成公式为:

$$\tilde{C}_{out} = \tilde{C}_{in} + C_{out}\alpha_{now}(1 - \alpha_{in}) \quad (16)$$

其中, $\tilde{C} = C \cdot \alpha$, 可见, 由前向后的图像合成也是基于光线吸收和发射模型的。它的主要优点是在图像合成过程中, 阻光度必定逐步增大, 当不透明度值趋近于 1 时, 说明该像素的图像已接近完全不透明, 后面的体素不会再对图像做出贡献, 因而不需要再计算了, 节省了无效的计算, 速度较快。

4 算法实现及实验结果

4.1 算法实现

(1) 在 MITK 算法平台^[4]中, 实现体绘制功能要用到以下两个类。

mitkVolumeModel: 该类是一个 Data Model, 表示 Data 对象

在三维场景中的显示模型。mitkVolumeModel 即是对应于 mitkVolume 对象的显示模型, 即直接对 Volume data 进行绘制。

mitkVolumeRendererRayCastingLoD: 该类是一个 Filter, 它代表一个算法对象, 封装了光线投影体绘制算法, 是本文要使用的算法。要使用它必须先包含 mitkVolumeRendererRayCastingLoD.h 头文件。

(2) 下面对读入的 Volume 数据进行体绘制, 重建的结果通过 VolumeModel 显示, 工作步骤如下:

1) 在 CMITKTestDoc 类添加 mitkVolume* 类型的成员变量, mitkVolume 是 MITK 重要的数据对象。在使用 mitkVolume 的文件中要包含 mitkVolume.h 头文件。

2) 在菜单栏添加按钮, 对读入的 Volume 数据进行 ray casting 算法的体绘制。在 CMITKTestView 类中添加代码实现功能。该算法封装在 mitkVolumeRendererRayCastingLoD 类中, 它是一个 Filter, 代表算法对象。接收一个 mitkVolume 输入, 直接进行绘制。因此在该文件中要包含 mitkVolumeRendererRayCastingLoD.h 头文件。

3) 设置 3 个对话框, 并在工具栏添加按钮, 用来弹出各对话框对重建后三维模型的颜色属性、光照属性、环境系数进行交互操作, 也在 CMITKTestView 类添加代码实现功能。

4) 设置一个对话框, 并给工程添加一个类 CNormSetDlg, 用来设定一个法平面对生成的三维模型进行切割。

5) 创建一个 mitkObserver 的子类 MyReslicePlaneObserver 用来动态显示三维空间中的一个平面切割三维模型的截面图形。

6) 在工具栏里增加一个按钮来控制光照开关, 并添加代码实现。

4.2 测试结果

图 3 为一个医学图像序列文件的 3 个方向上的断面图像, 每个方向有 16 张切片。

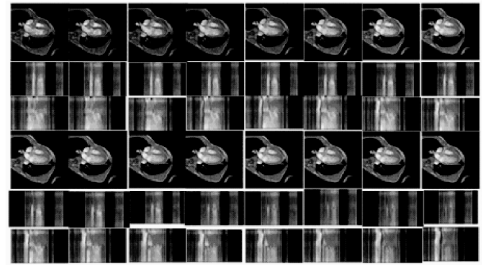


图 3 三维断面切片图(每个方向有 16 张)

图 4(a)是对图 3 所示的断面图像进行体绘制重建的初始模型, 图 4(b)是经过颜色属性调节后的模型, 图 4(c)是进行动态平面切割显示的模型。与传统的表面绘制相比, 可以看到图像质量更好、更逼真。

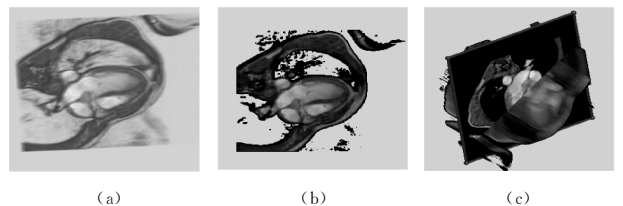


图 4 体绘制重建示意图以及交互操作 1

图 5(a)是体绘制重建的初始模型, 图 5(b)是对该模型进行动态平面切割显示, 图 5(c)是人工设定一个法平面进行剪切后的模型。

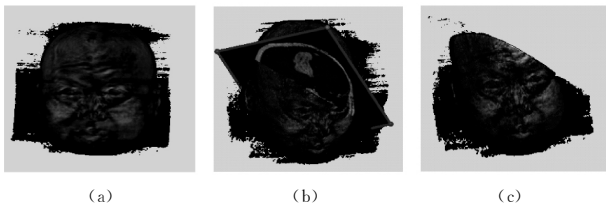


图5 体绘制重建示意图以及交互操作 2

结束语 本文对体绘制技术的基本流程进行了研究,进一步详细分析和研究其光学成像的数学模型,分析并利用图像空间扫描法中的光线投射 Ray Casting 方法进行体绘制,对其颜色赋值、重采样、图像合成等关键技术进行了深入讨论和研究,然后利用 MITK 算法平台中的数据模型和算法模型,结合 Ray Casting 的原理进行算法类的创建并实现了医学数据的体绘制,最后在医学三维重建系统中显示出重建组织的三维模型,对体绘制的三维模型能够进行光照属性、表面属性和环境参数的交互操作。在系统功能上设定了法平面切割以及动态平面切割显示和抓屏操作。此外也可以进行旋转、缩放、平移等交互操作。

本文的工作既是基于 MITK 算法平台进行三维体绘制的一个成功尝试,同时也验证了 Ray Casting 算法的可行性实现,并可以在未来进一步拓展其功能并进行不同算法的探索研究。

参考文献

- [1] 翟争峰, 蒲立新, 等. 基于 GPU 的医学图像三维重建体绘制技术综述[J]. 中国数字医学, 2015, 10(4): 11-13
- [2] Max N. First International Symposium on 3DPVT 2002 [J]. Computer Graphics Forum, 2002, 21(4): 814-815
- [3] Herrera I, Buchart C, Aguinaga I, et al. Study of a ray-casting technique for the visualization of deformable volumes [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(11): 1555-1565
- [4] Marz K, Franz A M. MITK-US: real-time ultrasound support within MITK [J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2014, 9(3): 411-420
- [5] 谢树森, 黄禄华, 黄梅珍, 等. 一种模拟生物组织的光学模型[J]. 中国激光医学杂志, 1992(3): 131-134
- [6] 陈坤, 刘新国. 基于光线的全局优化多视图三维重建方法[J]. 计算机工程, 2013, 39(11): 235-239
- [7] 何正权. 伪彩色编码的物理基础及其电路实现[J]. 中国超声医学杂志, 1994, 10(7): 1-3
- [8] 何江平, 瞿中. 计算机断层扫描图像的剖切研究[J]. 计算机科学, 2006, 33(1): 267-277
- [9] 孙一鸣. PACS 系统中三维图像重构及可视化技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007
- [10] (上接第 122 页)
- [12] Zitzler E, Künzli S. Indicator-based selection in multiobjective search[C] // Parallel Problem Solving from Nature. Springer, 2004: 832-842
- [13] Beume N, Naujoks B, Emmerich M. SMS-EMOA: Multiobjective selection based on dominated hypervolume[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 181(3): 1653-1669
- [14] Bader J, Zitzler E. HypE: An algorithm for fast hypervolume-based many-objective optimization[J]. Evolutionary Computation, 2011, 19(1): 45-76
- [15] Li Hui, Zhang Qing-fu. Multiobjective Optimization Problems With Complicated Pareto Sets [C] // MOEA/D and NSGA-II IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2009: 284-302
- [16] Zhang Qing-fu, Liu Wu-dong, Tsang E, et al. Expensive Multiobjective Optimization by MOEA/D with Gaussian Process Mode[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2010, 14(3): 456-474
- [17] Ishibuchi H, Sakane Y, Tsukamoto N, et al. Simultaneous Use of Different Scalarizing Functions in MOEA/D [C] // Genetic and Evolutionary Computation Conference. 2010: 519-526
- [18] Ishibuchi H, Akedo N, Nojima Y. Relation between Neighborhood Size and MOEA/D Performance on Many-Objective Problems [C] // Evolutionary Multi-criterion Optimization. 2013: 459-474
- [19] Liao Jian-ping, et al. MOEA/ D Multi-objective Optimization with Adaptive ϵ -domination based Random Elitist and Non-uniform Domination Strategy [C] // CENET 2015. 2015: 061
- [20] Deb K, Thiele L, Laumanns M, et al. Scalable test problems for evolutionary multi-objective optimization [C] // Evolutionary Multiobjective Optimization, ser. Advanced Information and Knowledge Processing. Springer, 2005: 105-145
- [21] Corne D W, Knowles J D. Techniques for highly multiobjective optimisation: Some nondominated points are better than others [C] // Genetic and Evolutionary Computation Conference. London, England, UK, 2007: 773-780
- [22] Li M, Yang S, Liu X. A test problem for visual investigation of high-dimensional multi-objective search [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2014
- [23] Veldhuizen D A V, Lamont G B. Evolutionary computation and convergence to a Pareto front [C] // Late Breaking Papers at the Genetic Programming 1998 Conference. University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, USA; Stanford University Bookstore, October 1998: 221-228
- [24] Bosman P A, Thierens I G D. The balance between proximity and diversity in multi-objective evolutionary algorithms [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(2): 174-188
- [25] Bader J, Deb K, Zitzler E. Faster hypervolume-based search using monte carlo sampling [C] // Multiple Criteria Decision Making for Sustainable Energy and Transportation Systems, vol. 634. Auckland, New Zealand: Springer, 2008: 313-326
- [26] Huband S, Hingston P, Barone L, et al. A Review of Multiobjective Test Problems and a Scalable Test Problem Toolkit [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(5): 477-506
- [27] Veldhuizen D A V, Lamont G B. Multiobjective evolutionary algorithm test suites [C] // Proceedings of the 1999 ACM Symposium on Applied Computing. San Antonio, Texas: ACM, 1999: 351-357
- [28] Zitzler E, Deb K, Thiele L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results [J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(2): 173-195
- [29] Deb K, Thiele L, Laumanns M, et al. Scalable test problems for evolutionary multi-objective optimization [C] // Evolutionary Multiobjective Optimization, ser. Advanced Information and Knowledge Processing. Springer, 2005: 105-145