

# 体绘制中显示隐含分界面的一种方法及其实现\*

彭延军, 石教英

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

E-mail: yjpeng@cad.zju.edu.cn

http://www.zju.edu.cn

**摘要:** 在普通的体光照模型下,使用直接体绘制显示对象内部的隐含分界面(内部不同介质之间的分界面),需要改变传递函数,确定体素的颜色值和不透明度.虽然能够看到对象内部的结构,但是在这种模型下,要透过物体的表面清晰地看到其内部的隐含分界面是不可能的.这一方面是由于普通体光照模型中的粒子不具有选择透光性,即不能透过波长在一定范围内的可见光而吸收另一部分波长不同的可见光,只能同等地吸收各种波长的光;另一方面是因为普通体光照模型缺乏表面信息部分.该算法使用一种具有选择透光性的体光照模型,在这种模型中加入表面散射部分,这一部分与视线、光源位置无关,同时采用非真实感绘制技术来加大隐含分界面的显示效果.在这种光照模型下,可以清晰地显示出隐含分界面具体的细节部分.

**关键词:** 光照模型;直接体绘制;传递函数;体素;散射;非真实感绘制

**中图法分类号:** TP391      **文献标识码:** A

三维标量数据场的显示,特别是 CT,MR 等三维体数据的显示,是目前标量数据场可视化研究的一个主要方向,主要有使用面光照模型的面绘制和使用体光照模型的直接体绘制两种方法.面绘制方法是从三维数据集中抽取出等值面,通过传统的图形学技术来实现.面绘制可有效地绘制出三维体的表面,但缺乏内部信息的表达.直接体绘制方法是以体素作为基本单元,在体光照模型下直接由三维体数据生成三维体的图像.因其具有高度保真性,体绘制技术已经成为目前三维标量数据场可视化研究的一个主要方面.

透过对象表面看清其内部的隐含分界面(内部不同介质之间的界面)和其内部细节而不改变对象的外部形态,这是对医学可视化结果的一个特殊要求.只有在这种结果下,医生才能透过组织表面看清内部的病变结构和细节信息,确定其相对位置,为治疗提供帮助和支持,从而使可视化结果更有利于医疗检查、诊断和辅助治疗.

在体绘制中,透过物体表面显示隐含分界面的现有技术主要有两个方面:一方面是在普通光照模型下改变传递函数;另一方面是通过改变光照模型来解决.我们首先来看一下已有的光照模型:Nelson Max 指出<sup>[1]</sup>,假定连续分布的三维数据场中充满着小粒子,由于这些小粒子具有发光、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.光线的吸收模型:如果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,也就构成了一个光线的吸收模型,这也是体光学模型中最简单的一种.光线的发射模型:如果在火焰、高温气体的可视化中,构成这些物质的小粒子很小而且几乎是透明的,但是发出的光线却很强,就可以认为这些小粒子仅具有发射光线的功能,从而构成了光线的发射模型.光线的吸收与发射模型:如果将光线的吸收模型与发射模型结合起来,就可以更好地反映出一般情况下,光线在充满粒子的三维空间中的变化,进一步构成了光线的吸收与发射模型.这一模型也是在体绘制中应用最广泛的一种.而传递函数是在一定的光照模型下,根据体数据的分类,确定各类体数据对应的颜色( $R, G, B$ )值、不透明度,以用于随后的光

\* 收稿日期: 2002-01-29; 修改日期: 2002-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60033010)

作者简介: 彭延军(1971 - ),男,山东滕州人,博士生,讲师,主要研究领域为数字图像处理,医学可视化;石教英(1937 - ),男,浙江宁波人,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学,虚拟现实,科学计算可视化,多媒体技术.

照和明暗处理并最终生成结果图像。

虽然颜色值和不透明度几乎能模拟出所有的颜色,可以根据需要改变传递函数、决定体素的不透明度,最终显示出物体内部的结构.但是在这种模型下,要透过物体的表面清晰地看到其内部的结构和细节是不可能的.其根本原因在于:一方面,这种模型下的粒子不具有选择透光性,也就是说,不能透过波长在一定范围内的可见光而同时又吸收另一部分波长不同的可见光,它只能同等地吸收各种波长的光;另一方面,普通光照模型中缺乏表面信息部分。

为了显示出内部的隐含分界面,蔡文立等人根据物理光学中运输理论的运输方程<sup>[2,3]</sup>,将体散射和面散射分别计算,组合成一种混合式体绘制光学模型,能够较好地显示隐含分界面和一些细节.这种模型与光源的位置、视线方向有关,计算比较复杂且仍是基于颜色、不透明度的方法,其模型也不具有选择透光性。

Herke 指出,在普通光照模型下,体素的颜色值被用来表示体素的属性,但事实上,在光照过程中,体素很有可能改变入射光谱,体素在不同的光谱照射下可能具有不同的颜色,因此,颜色值作为体素的属性是不合适的<sup>[4]</sup>.实际上,由于人的眼睛只对很窄范围内的光谱敏感,两种不同类别的体素在同一种颜色的光源照射下,人眼的感觉可能是认为这两种体素的颜色没有区别;而在另一种颜色的光源照射下,可以给人以完全不同的感觉.Herke 将介质按散射特性分成 3 种介质,按照吸收特性分成两种介质,介质本身是没有颜色的.只有介质在对照射光谱中相应波长的光进行散射、透射时才显示出颜色.根据上述介质的特性,将光照模型组合成 6 种,但是结果并不是十分理想,其原因就是光照模型中缺少了表面散射部分。

在我们提出的新的光照模型下,体素粒子具有选择透光性.我们同时充分考虑了隐含分界面与梯度值高度相关的这一特性,在光照模型中加入面散射部分,这部分与视线、光源位置无关.同时,我们采用非真实感绘制技术来加大隐含分界面的显示效果,使结果图像不仅能够更加清晰地显示出隐含分界面,还可以显示出具体的细节部分。

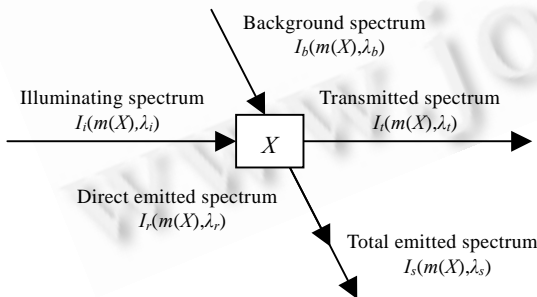
## 1 基本光照模型

我们首先作如下假设: 在三维标量数据场中,构成对象的体素具有一定的密度值; 该对象的体素具有低反照率,在光照过程中仅散射一次,不考虑多散射情况; 光源与观察者在无穷远处,发出的是一种平行光线,计算的是对象的平行投影; 散射处理与光照方向以及视线方向无关。

为了真实地模拟体素的光照效果,我们定义体素还具有下述特性: 体素本身没有颜色属性. 不同密度的体素可以对光照产生不同的散射;对于入射光谱中不同波长的光,其散射性能也不一样,对于某种波长的光可能是无散射,也即完全吸收;而对于另一种波长为  $\lambda_i$  的入射光,散射光的波长为  $\lambda_r, \lambda_t$  可能不等于  $\lambda_i$ ,也即入射光

可能与散射光具有不同的颜色.为了简化计算,我们假定体素只对入射光谱中的一个特定波长的光产生散射. 同一体素对于不同波长的入射光的吸收特性也不一样,即具有选择透光性,透射后的波长保持不变.这一特点最突出的作用就是使内部的隐含分界面和细节内容可以清晰地透过表面显示出来.上述体素属性的假设与一般情况下的体光照模型类似,并且接近真实情况。

我们将光照分成透射和散射两个阶段,如图 1 所示,入射光强为  $I_i(m(X), \lambda_i)$ ,  $X$  为体素的三维坐标  $(x, y, z)$ ,  $m(X)$  为在  $X$  处的体素所属介质类别( $m$  是  $X$  的函数),  $\lambda_i$  为入射光谱  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ . 由入射光  $I_i$  产生直



入射光, 背景光, 透射光, 直接散射光, 总散射光。

Fig.1 Basic light model example

图 1 基本光照模型表示

接散射光  $I_r$ , 总散射光  $I_s$  由直接散射光  $I_r$  和背景光  $I_b$  产生的透射光  $I_t$  构成。

透射部分表示如下:

$$I_t(m(X), \lambda_t) = I_i(m(X), \lambda_i) * (1 - \alpha^* | \Delta X |), \quad (1)$$

$$I_i(m(X + \Delta X), \lambda_i) = I_i(m(X), \lambda_i), \quad (2)$$

$\alpha$  是体素的不透明度,  $\Delta X$  是下一个体素的位移. 由体素的特性 得到  $\lambda_i = \lambda_i$ ; 式(1)和式(2)改写成如下形式:

$$I_i(m(X), \lambda_i) = I_i(m(X), \lambda_i) * (1 - \alpha * |\Delta X|), \quad (1')$$

$$I_i(m(X + \Delta X), \lambda_i) = I_i(m(X), \lambda_i). \quad (2')$$

散射部分表示如下:

$$I_s(m(X), \lambda_s) = I_r(m(X), \lambda_r) + I_b(m(X), \lambda_b) * (1 - \alpha * |\Delta X|), \quad (3)$$

$$I_b(m(X + \Delta X), \lambda_b) = I_s(m(X), \lambda_s), \quad (4,4')$$

$$I_r(m(X), \lambda_r) = \rho(X) * \int_{-\infty}^{\infty} I_i(m(X), \lambda') * \eta(m(X), \lambda', \lambda_r) * \delta(\lambda', \lambda_r) d\lambda' \quad (5)$$

$\rho(X)$  是在  $X$  处的体素密度,  $\eta(m(X), \lambda', \lambda_r)$  是介质  $m(X)$  对于入射光为  $\lambda'$  且散射光为  $\lambda_r$  的散射效率,  $\delta(\lambda', \lambda_r)$  是狄利克雷函数. 由体素的特性, 式(5)改写为

$$I_r(m(X), \lambda_r) = \rho(X) * I_i(m(X), \lambda_i) * \eta(m(X), \lambda_i, \lambda_r). \quad (5')$$

将式(5')带入式(3)中得到:

$$I_s(m(X), \lambda_s) = \rho(X) * I_i(m(X), \lambda_i) * \eta(m(X), \lambda_i, \lambda_r) + I_b(m(X), \lambda_b) * (1 - \alpha * |\Delta X|). \quad (3')$$

这样, 由式(1')~式(4')组成了我们的基本光照模型计算公式. 由以上公式可以看出, 光强的计算与体素的密度、透明度、所属介质类别有关. 正是体素所属的介质决定了对入射光谱中不同波长的光进行透射时具有选择透光性, 但透射后的波长不变; 散射时只对其中特定的一个波长的光进行散射, 散射后的波长可能发生了变化.

## 2 改进的光照模型

由基本光照模型可以看出, 它具有选择透光性和非弹性散射特性(散射光的波长发生了变化), 它只是提供了一个透过表面可以看到内部隐含表面的理论基础, 但是, 基本光照模型中并没有任何有关表面信息的部分. 当然可以按照 phong 模型去做, 但其中包含了光源的位置、视线的方向、表面的法向量等信息, 计算颇为不便. 由第 1 节的假设 得知, 可以进一步简化计算, 能够体现表面信息的只需法向量(用体素的灰度梯度替代)就可以了. 我们在基本光照模型的基础上, 引入采用非真实感绘制技术<sup>[5,6]</sup>来充分体现面信息部分:

$$I_s = I_{so} * (a_1 + b_1 * c^{d_1}). \quad (6)$$

我们将上述处理称为非真实感处理,  $I_s$  是最后产生的光强,  $I_{so}$  是由基本光照模型计算得到的光强,  $a_1$  和  $b_1$  是调整系数. 公式(6)允许用户调整隐含表面所占权值的范围, 当  $a_1 = 1$  且  $b_1 = 0$  时, 没有表面信息部分, 即基本光照模型部分; 当  $a_1 = 0$  且  $b_1 = 1$  时, 表面信息所占权值最大.  $c$  是体现表面信息的梯度值部分, 可以选用梯度算子  $f(X)$ 、Laplacian 算子  $\nabla^2 f(X)$  和 Marr-Hildreth 算子  $\nabla^2 [G(X; \sigma_f) * f(X)]$ ,  $\sigma_f$  是标准方差,  $*$  是卷积运算. Laplacian 算子和 Marr-Hildreth 算子本身是无方向的值, 可以直接运用到公式中, 其中 Marr-Hildreth 算子还可以用 Gaussian 滤波消除噪声的影响. 而  $d_1$  是指数部分用以调整表面信息的权值, 我们选取  $a_1, b_1, d_1 \in (0, 1)$ , 其中  $\nabla^2 f(X)$  可由 Hessian 矩阵计算:

$$\nabla^2 f(X) = \begin{bmatrix} f_{xx} & f_{xy} & f_{xz} \\ f_{yx} & f_{yy} & f_{yz} \\ f_{zx} & f_{zy} & f_{zz} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中  $f_{xx} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} f$ ;  $f_{xy} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} f$ , 为了简化计算, 可以用下式替代式(7):

$$\nabla f^2(X) \approx \frac{\partial^2}{\partial x^2} f + \frac{\partial^2}{\partial y^2} f + \frac{\partial^2}{\partial z^2} f. \quad (8)$$

另外, 仿照以上方法, 我们还可以对不透明度信息进行上述的非真实感处理, 使隐含表面体素的不透明度加大, 降低非表面体素的不透明度, 以进一步体现隐含表面信息.

$$\alpha = \alpha_o * (a_2 + b_2 * \|\nabla f(X)\|^{d_2}), \quad (9)$$

$\alpha$  是处理后的不透明度,  $\alpha_o$  为原始不透明度. 在式(9)中, 我们直接使用梯度大小作为标准.

### 3 算法及实现

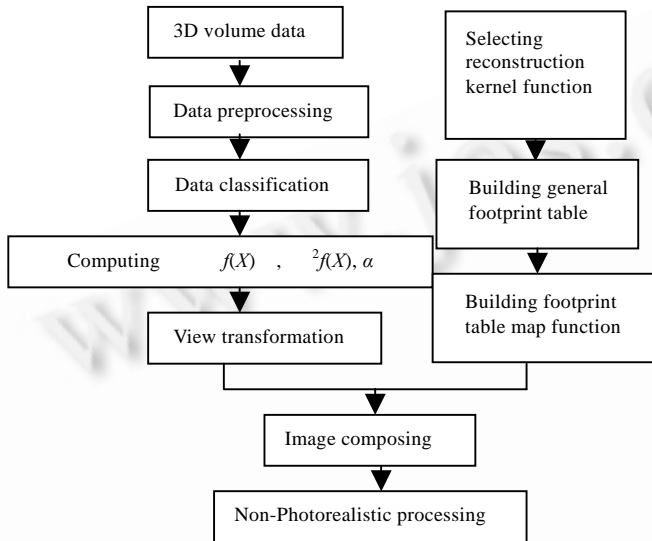
对于切片数据集中的每个切片数据,首先进行数据的预处理.按照分类函数进行分类,确定每个体素所属的介质类别  $m(X)$ .

确定每类介质对于不同波长(R,G,B)光的散射效率  $\eta$ 、透光性能以及不透明度  $\alpha$ ,还要确定式(6)和式(9)中的可调系数.

计算  $f(X)$ ,  $^2f(X)$ 以及非真实感处理后的  $\alpha$ .

按照光线投射方法或其他方法,从初始的白光照射到第 1 个体素,由后向前经采样,按照基本光照模型合成计算每个像素的  $I_s$ .

对于  $I_s$  进行非真实感处理,计算得到最终结果图像中每个像素的颜色值.



三维体数据, 数据预处理, 数据分类, 计算, 视觉变换, 选择重构核, 建立通用足迹表, 建立足迹映射函数, 图像组合, 非真实感绘制.

Fig.2 Applying the light model to Splatting method  
图 2 光照模型应用于 Splatting 方法的处理

图 2 是把此光照模型应用于 Splatting 方法的处理过程.

为了减少计算量,无须对每个体素的不透明度进行非真实感处理,只需首先根据梯度确定几个阈值区域,对于在每个区域的不透明度统一处理一次,将这一区域处理后的不透明度值视为相同来对待.这对于非表面体素不透明度的非真实感处理在视觉效果上几乎没有什么影响,但对于光强的计算,由于存在累加效应,因而不能如此简单地进行处理.

由于 shear-warp 算法将三维的视觉变换转换成物体的错切和两维的变形,错切后的物体首先投射到中间图像平面上,然后再经变形生成最后的结果图像.物体投影的方向并不是任意的,而是沿着最主要轴( $\pm x, \pm y, \pm z$  坐标轴)的方向,这就大大简化了光线投射和 Splatting 方法的过程.

因此,我们在图 2 的基础上采用 shear-warp 算法来绘制结果图像.

在数据预处理阶段,对每个切片数据采用类似于 Run-Length 编码的数据压缩方法,以减少所占用的存储空间.在编码过程中,可以假设灰度差值为  $\Delta g$  的体素有相同的属性,这样会使绘制速度成倍地提高.在高质量的要求下,  $\Delta g$  取值小一些,结果图像的质量会较高,绘制速度也较慢;  $\Delta g$  增加,则图像的质量下降,但绘制速度加快.另外,我们还在此处理过程中引入了索引机制<sup>[7]</sup>,对切片数据按介质类别索引,采用链表存储.在索引时,切片数据按照先后列的顺序.索引机制的引入,加快了局部体数据的抽取,使局部体数据的绘制速度得到了提高.

### 4 实验结果和结论

我们使用 Visible-Human 提供的头部 CT 数据,大小为  $256 \times 256 \times 169$ ,在配置为 Duron 700M Hz CPU,128M 内存上使用上述算法测得的数据见表 1.

图 3~图 8 是使用不同光照模型的绘制结果.在基本光照模型下,对象内部的隐含表面和细微结构看不清楚.使用基本光照模型可以看清内部结构,但还是缺乏表面信息.使用改进的光照模型,调整不同的参数,可以显示出不同的效果.从结果图像上来看,该算法不但可以突出地显示出隐含表面,还可以显示出细节结构.

隐含交界面的清晰显示不但与体素粒子的选择透光性和散射特性有关,分界面本身的特性也是一个重要因素.只有充分考虑了这些特性,才能使结果图像比较理想.

**Table 1** Runtime among steps of the algorithm and runtime comparison among three light models  
**表 1** 算法各阶段运行时间与 3 种光照模型的运行时间对比

| Runtime of the pretreatment (s) |          | Runtime among three light models (s) |                   |                      |
|---------------------------------|----------|--------------------------------------|-------------------|----------------------|
| Coding                          | Indexing | General light model                  | Basic light model | Advanced light model |
| 18.15                           | 0.85     | 0.69                                 | 0.78              | 0.87                 |

预处理时间, 3 种光照模型的运行时间, 编码, 索引, 普通光照模型, 基本光照模型, 改进的光照模型.



Fig.3 Result 1 of the general light model  
 图 3 普通光照模型绘制结果 1

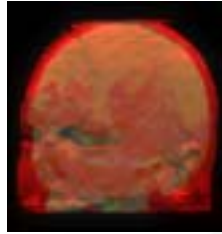


Fig.4 Result 2 of the general light model  
 图 4 普通光照模型绘制结果 2

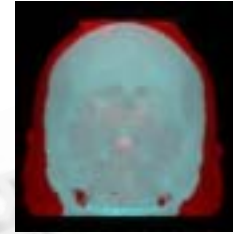


Fig.5 Result 1 of the basic light model  
 图 5 基本光照模型绘制结果 1

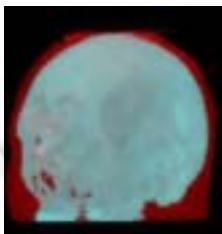


Fig.6 Result 2 of the basic light model  
 图 6 基本光照模型绘制结果 2

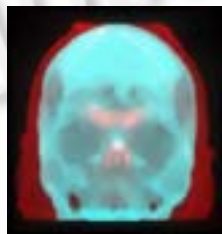


Fig.7 Result 1 of the advanced light model  
 图 7 改进光照模型绘制结果 1

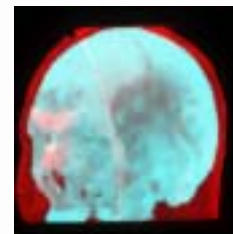


Fig.8 Result 2 of the advanced light model  
 图 8 改进光照模型绘制结果 2

**References:**

[1] Nelson, M. Optical models for direct volume rendering. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1995,1(2): 99~108.

[2] Cai, Wen-li, Shi, Jiao-ying. Composed volume rendering model based on transfer equation. *Chinese Journal of Computers*, 1995,18(5):330~338 (in Chinese).

[3] Cai, Wen-li, Chen, Tian-zhou, Shi, Jiao-ying. Rendering of surface and volume details in volume data. In: Post, F., ed. *Proceedings of the EUROGRAPHICS'95*. London: Cambridge Press, 1995. 421~430.

[4] Herke, J.N., Hans, T.M., Arnold, W.M. Spectral volume rendering. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2000,6(3):196~207.

[5] Gooch, A., Gooch, B., Shirley, P., *et al.* A non-photorealistic light model for automatic technical illustration. In: Alexander, G., ed. *Proceedings of the SIGGRAPH'98*. New York: ACM Press, 1998. 447~452.

[6] Ebert, D., Rheingans, P. Volume illustration: non-photorealistic rendering of volume models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2001,7(3):253~264.

[7] Ihm, I., Lee, R. Indexing data structures for faster volume rendering. *Computer Graphics*, 1997,21(4):497~506.

**附中文参考文献:**

[2] 蔡文立, 石教英. 基于运输方程的混合式体绘制模型. *计算机学报*, 1995,18(5):330~338.

