

一种基于图像序列轮廓三维重建表面的任意切面图像 提取及纹理映射有效方法

傅由甲¹ 张绍祥² 王金勇³ 刘全利¹ 陈 庄¹

(重庆工学院计算机科学与工程学院 重庆 400050)¹

(中国人民解放军第三军医大学 重庆 400038)² (重庆市畜牧科学研究所 重庆 402460)³

摘 要 针对三维重建后的表面模型的任意剖切,首先通过对象的序列轮廓去掉图像背景,然后计算其模型及图像空间中包围盒和剖切平面的交面,利用向量叠加原理及立方体线性插值方法快速提取交面图像,经 Alpha 测试后映射到模型空间中相应切面上。实验表明,该方法在克服面绘制技术不能体现内部数据缺点的同时,有效地提高了模型任意剖切时剖面纹理绘制速度。

关键词 任意剖切,纹理映射,三维重建,面绘制

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A

Effective Method for Arbitrary Clip Plane Extraction and Texture Mapping Based on Contour Data of Images

FU You-jia¹ ZHANG Shao-xiang² WANG Jin-yong³ LIU Quan-li¹ CHEN Zhuang¹

(School of Computer Science & Technology, CQIT, Chongqing 400050, China)¹

(The Third Military Medical University, Chongqing 400038, China)² (Chongqing Academy of Animal Science, Chongqing 402460, China)³

Abstract Targeted to arbitrary cutting of surface model by 3D reconstruction, this paper first removed the object's background by its contour data, and then computed the intersecting polygon of cutting plane and bounding box of the model in model and image spaces. Then fast extracted the texture of section planes with vector superposition principle and cubic linear interpolation. Last the section texture passing alpha test was mapped to the clip section in the model space. Experiments' testing shows the method solves the problem that inner data is invisible by surface rendering, effectively improving the texture rendering speed of arbitrary clip.

Keywords Arbitrary cutting, Texture mapping, 3D surface reconstruction, Surface rendering

根据图像进行三维重建是科学计算可视化的一个重要研究和应用领域。三维重建的方法大体可分为两类:体绘制和表面绘制。体绘制方法由于直接基于体数据进行显示,可以方便地进行任意切面图像的提取,见文献[1],但受到显卡硬件、图像数据大小的约束,其发展和应用面受到较大限制;面绘制方法由于只能表现物体的表面,对于涉及到生物体内部器官的任意剖切,其图像的生成往往要通过大量插值运算,因而存在速度慢、精度低、实现困难等缺点,目前以3个正交医学切面进行剖切居多,见文献[2]。

本文以基于图像序列轮廓表面绘制的模型为基础,提出了一种可以进行任意切面图像提取及纹理映射的有效方法,在计算机上快速实现了经表面绘制而成的中国高清数字猪内部器官的任意切面的观察。

1 材料

数字化猪研究是畜牧科学、生命科学和信息科学的交叉领域,猪种标本及各器官序列轮廓由重庆市畜牧科学研究所提供,标本原始切片数据由第三军医大学提供。该猪为一只

5月大的荣昌母猪,体长94cm,高44cm,重量45kg,体格健壮,生长发育正常,无器质性创伤。标本在专门的低温实验室中用高精度数控铣床切片,由高精度数码相机摄影采集断面图像,图像质量高,内部结构显示效果好。本研究用原始断面数据切片间距0.5mm,片内像素数目为4064×2704,色深24bit,总片数2315片,文件格式为TIFF,数据总量为70GB。

2 剖分流程

模型的任意切面图像提取及纹理映射流程如图1所示。为了能在计算机上实现数字化猪内部器官的任意剖切纹理快速显示,整个剖切过程分为两个阶段。其中,剖分前的预处理阶段在程序启动及载入剖切对象时完成,而具体剖切时只需完成快速剖分阶段的工作,从而提高了剖切效率。由于原始切片图像分辨率过高,无法全部装入内存,我们在保证显示质量的条件下对配准后的原始图像进行一定比例的缩小,缩小后的图像片内像素为508×338,色深24bit(RGB),共1157片。3D模型与原始切片图像及序列轮廓线之间采用统一的全局坐标系,保证了模型空间和图像空间的数据能快速匹配。

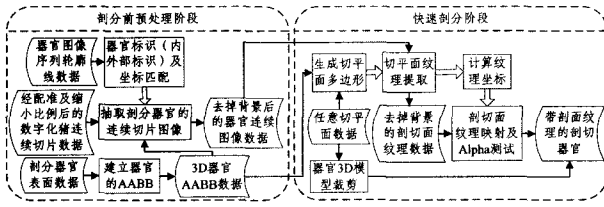


图1 基于图像序列轮廓三维表面的任意切面图像提取及纹理映射流程

3 模型任意剖切的实现原理

3.1 剖分预处理

首先根据剖切对象的表面数据建立模型空间的轴平行包围盒(AABB),将包围盒两极值点坐标缩小相应比例后成为定位剖切对象在连续图像序列中位置的图像空间包围盒,根据该包围盒抽取剖切对象的连续切片图像。

将原始剖切对象序列轮廓线数据缩小相应比例后,采用改进的有效边表扫描线算法^[4]填充内部,然后和其切片图像数据比较,去掉图像中的背景或其它非剖切组织,其 RGB 值置 0。

3.2 切平面多边形的生成

3.2.1 切平面多边形顶点的生成

我们把剖切平面和模型 AABB 的交线构成的多边形称为切平面多边形。切平面多边形顶点生成方法如下:将包围盒的每个面分成两个三角形,利用文献[3]的剖切平面与三角形面片求交方法快速求出切平面和三角面片的交线段,将这些交线段首尾连接并去掉三点共线的中间点得到切平面多边形,将其顶点顺次记录到顶点表中。

3.2.2 切平面多边形方向的确定

我们规定切平面法线 n 的方向为切平面多边形方向,当顶点顺序采用右手螺旋法则确定的方向与平面法线方向不一致时,需将顶点表逆序。由于平面和长方体的相交面一定是凸多边形,采用向量法即可判断顶点顺序和切平面法线的关系:从顶点表中顺序取 3 个顶点 v_0, v_1 和 v_2 ,设 $d_1 = v_1 - v_0$; $d_2 = v_2 - v_1$,则当 $d_1 \times d_2 \cdot n > 0$ 时多边形方向和剖切面法线方向相同,反之则相反。

3.3 切面图像的提取

3.3.1 剖切对象图像空间的切平面多边形的生成

由于图像包围盒是模型包围盒极值点坐标经一定比例缩小后形成的,故将模型空间中的切平面多边形顶点缩小同样比例后,即得到相应图像空间的切平面多边形。

3.3.2 切面纹理图像尺寸确定

将剖切面法线作为新坐标系 $X'Y'Z'$ 的 z' 轴,新坐标原点与原坐标系 XYZ 原点重合,根据欧拉定理,原坐标系绕剖切面法线及原 z 轴所成平面的垂线旋转 θ 角度后与新坐标系重合(θ 为 z 与 z' 的夹角),设原坐标系到新坐标系的转换矩阵为 R ,逆阵为 R^{-1} 。

将图像空间的切平面多边形各顶点 v_i 分别乘以矩阵 R^{-1} ,转化到新坐标系 $X'Y'Z'$ 中,各顶点的 z' 坐标相同,作其 $X'Y'$ 平面的矩形包围盒,取 $X'Y'$ 方向的长度作为切面纹理图像宽高尺寸。

3.3.3 切面纹理提取

设新坐标系 $X'Y'Z'$ 中纹理图像的左下角点及右上角点

分别为 $P'(x_1', y_1', z')$ 和 $Q'(x_2', y_2', z')$,则图像宽高方向单位向量分别为 $d_w' = \text{Normalize}(W'(x_2', y_1', z') - P')$, $d_h' = \text{Normalize}(H'(x_1', y_2', z') - P')$,在原坐标系 XYZ 中,纹理图像左下角点及宽高方向单位向量为: $P = R \times P'$; $d_w = R \times d_w'$; $d_h = R \times d_h'$ 。纹理图像存储采用 RGBA 形式, A 为透明度,像素 RGB 值的提取采用立方体线性插值方法,由于切片图像去掉了背景,这样当插值得到的 RGB 不全为 0 时, $A=255$,否则 $A=0$ 。设纹理图像宽为 $width$,高为 $height$,剖切面纹理提取伪码如下:

```
for (int j=0; j<height; j++)
    for (int i=0; i<width; i++)
    {
        //计算图像中像素 S(i,j)在坐标系 XYZ 中的坐标
        S(x,y,z) = P+d_w * i+d_h * j;
        if 像素 S(i,j)不在剖切器官图像包围盒内
            将像素 S(i,j)的 RGB 的值置 0;
        else
            用立方体线性插值方法计算 S(i,j)的 RGB 值;
        if 像素 S(i,j)的 RGB 值为 0
            S(i,j)的 A=255;
        else
            S(i,j)的 A=0;
    }
```

3.4 模型空间中切平面多边形纹理坐标的计算

设图像空间的切平面多边形顶点 v_i 在新坐标系 $X'Y'Z'$ 中的坐标为 v_i' ,切面纹理图像宽为 $width$,高为 $height$,由于模型空间和图像空间中的切平面多边形相似,故模型空间中与 v_i 相对应的顶点 v_m 的纹理坐标为:

$$v_m' \cdot s = v_i' \cdot x / (width - 1)$$

$$v_m' \cdot t = v_i' \cdot y / (height - 1)$$

3.5 模型裁剪、剖切面纹理映射及 Alpha 测试

模型剖切部分裁剪、纹理映射及 Alpha 测试均采用 OpenGL^[5],模型裁剪通过调用 `glClipPlane` 函数进行;纹理映射包括纹理创建、纹理绑定、Mipmaps 设置。渲染纹理时先激活纹理映射、打开混合模式,指定混合绘制方式,激活 Alpha 测试,指定 Alpha 测试方式,在粘贴纹理前需说明纹理相对于片元如何排列,即指定切平面多边形的纹理坐标和几何坐标,由于剖切面是凸多边形,无需对其进行三角剖分,用 `GL_POLYGON` 绘制方式顺序绘制多边形各顶点即可。设裁剪平面方程为 $ax+by+cz+d=0$,模型裁剪、剖切面渲染及 Alpha 测试伪码如下:

```
glEnable(GL_TEXTURE_2D);
glEnable(GL_BLEND);
glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA);
glEnable(GL_ALPHA_TEST);
glAlphaFunc(GL_GREATER, 0);
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, 1);
glBegin(GL_POLYGON);
for 模型空间切平面多边形每个顶点 v
{
    glNormal3f(a, b, c);
    glTexCoord2f(v_s, v_t);
    glVertex3f(v_x, v_y, v_z);
}
```

```

}
glEnd();
glDisable(GL_TEXTURE_2D);
glDisable(GL_ALPHA);
glDisable(GL_BLEND);
GLdouble eqn[4] = {a,b,c,d};
glClipPlane (GL_CLIP_PLANE0,eqn);
glEnable (GL_CLIP_PLANE0);
绘制器官表面模型;
glDisable(GL_CLIP_PLANE0);

```

4 实验结果与分析

通过读取经缩小比例后的数字化猪 1157 张 RGB 断面切片, 925 张躯干序列轮廓(位于原始切片 1~1850 间)及大部分躯干面绘制模型(位于原始切片 484~1844 间), 进行躯干内部器官的任意剖切显示。操作者可以通过切平面控制面板控制切平面的方向和位置, 实现对数字化猪躯干部分的任意切割和连续切割, 其中任意切割采用高精度的立方体三线性



图2 数字化猪躯干任意切割剖切面效果图

插值抽取剖切面纹理保证显示效果, 对任意方向连续切割的实时动画采用速度较快, 精度略低的立方体邻近插值抽取切面纹理, 从而在显示的速度和精度上达到平衡。图 2 给出了采用本文方法剖切的数字化猪躯干部分。

结束语 本文为基于图像序列轮廓三维重建表面的任意切面纹理提取及映射提供了一个简单有效的方法, 其创新点为: (1) 通过将纹理贴在切平面多边形上而不是直接贴在形状复杂的模型剖切面上, 避免了模型剖切面的多边形链化、三角化、纹理映射等大量运算; (2) 剖切面纹理提取时, 用矢量叠加原理确定纹理图像中每个像素在图像序列空间中的位置, 避免将每个像素都和变换矩阵相乘, 从而较大幅度地提高了运行速度。实践证明该方法能准确、快速地对数字化猪器官进行任意剖切面的纹理显示。

参考文献

- [1] 潘群娜, 熊小飞. 基于人脑数据体的任意切面研究[J]. 微计算机信息, 测控自动化, 2007, 23(7-1): 269-273
- [2] 徐鹏, 尧德中. 一种在三个医学剖面上任意切面图像提取的有效方法[J]. 计算机应用, 2005, 25(2): 320-325
- [3] 张艳君, 叶伯生, 曾理湛. 基于医学图像序列轮廓线重建三维表面的改进算法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 13: 215-218
- [4] 陈传波, 陆枫. 计算机图形学基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 125-127
- [5] Shreiner D, Woo M, Neider J, et al. OpenGL 权威编程指南(原书第五版)[M]. 徐波, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2006

(上接第 249 页)

道容量 C 。信息论指出, 当输入信源 X 为高斯分布时, 才能使 Y 成为一个高斯分布的随机变量。当载体图像被分解后, 其统计分布有可能不是高斯分布, 此时需要对其进行高斯化处理, 以获得高斯分布的 σ_{ik}^2 。为计算 σ_{ik}^2 , 我们做如下变换:

① 计算载体图像的方差 σ_{ij}^2 (若采用了 DCT 或 DWT 分解, 则计算出各个系数的 σ_{ij}^2), 把具有相近 σ_{ij}^2 值的系数点视为一个通道;

② 画出各个通道的直方图, 并计算其信息熵。设 Δx 为区间 n 的宽度, $g(m)$, $m=1, 2, \dots, n$ 为频数累计值, p 为各个频道中系数总数, 信息熵和伪高斯分布方差 σ_{ik}^2 为:

$$H_j = -\sum_{i=1}^n \frac{g(i)}{p\Delta x} \log_2 \left(\frac{g(i)}{p\Delta x} \right) \Delta x, \sigma_{ik}^2 = \frac{2^{2H_j}}{2\pi e}$$

③ 频域水印技术将载体图像分解成多个频段后再嵌入水印。根据通信理论, 可将其视为多通道的独立并列信道。设载体图像被分解成 L 个通道, 每个频道都有相应的两个噪声, 其信道容量为^[9]

$$C = \frac{XY}{2L} \sum_{j=1}^L \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_{mj}^2}{\sigma_{ikj}^2 + \sigma_{pj}^2} \right) \quad (11)$$

其中, XY 为图像的像素, σ_{ik}^2 为伪高斯分布的图像方差。

4.2 载体能量对鲁棒性的影响

我们从式(3)还可看出, 在保持最大容量 C 不变的情况下, 水印载体能量 P 越大, 所能经受的噪声干扰能量 N 也越大, 即水印的鲁棒性越强; 水印载体所受噪声干扰越小, 所能嵌入的水印信息量越大, 水印的鲁棒性也就越好。

4.3 其他方法

水印信道的容量可以根据编码者、解码者、攻击者的不同目的有不同的表示方法^[3]。同时, 信息论中的编码理论, 特别是限失真信源编码, 也是分析水印算法的有力工具。这些内容及问题我们将在今后的研究中进行深入的探讨。

结束语 本文提出一种运用通信系统理论研究数字水印系统的方法。通过分析水印信道的特性来研究水印系统的性能, 通过计算有关信号的交互信息、条件熵等数据对水印系统的嵌入强度、嵌入位置等问题进行了分析, 推导出有效提取水印的信息论下限, 所得结果对于设计水印算法具有较强的指导作用。

参考文献

- [1] 刘瑞祯, 谭铁牛. 数字图像水印研究综述. 通信学报, 2000, 21(8): 8-14
- [2] Cox J, et al. Watermarking as Communications with Side Information//Proceeding of the IEEE, 1999, 87(7): 1127-1141
- [3] Moulin P. Information - Theoretic Analysis of Information Hiding. IEEE Trans on Information Theory, 2003, 49(3): 563-593
- [4] Cohen AS, et al. The Gaussian Watermarking Game. IEEE Trans on information theory, 2002, 48(6): 1639-1667
- [5] Costa M M. Writing on Dirty Paper. IEEE Trans on information theory, 1983, 29(5): 439-441
- [6] 刘瑞祯, 谭铁牛. 水印能量估计的一般性框架. 计算机学报, 2001, 24(3): 242-246
- [7] 姜丹. 信息论与编码. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001