

面向体三维显示器的图形算法设计

邢建芳 龚华军 沈春林 潘文平 岳 键

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

摘要:针对一种基于旋转双螺旋屏幕逐层扫描技术的体三维显示系统,设计并实现了一套支持真实空间三维显示的图形算法体系。算法核心主要包括立体图元的体素化,切片图像渲染和投影同步控制等3个环节。图形系统通过离散三维网格模型获取体三维显示需要的体数据,并根据螺旋屏幕的几何特征将物体的体数据集渲染成切片图像序列发送至高速投影单元,在保持投影与屏幕旋转同步的情况下,快速变换的投影图像基于视觉暂留融合成具有真实物理深度的三维影像。算法在体三维显示器样机上进行了验证,显示的三维影像占据真实物理空间,具备全方向观察角度,围绕显示器可直接观察到立体图像各个不同侧面,如同观察真实物体一样。

关键词:体三维显示;图形算法;体数据;切片图像;同步控制

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2011)06-0786-07

Graphics Algorithms Design for Volumetric 3-D Display

Xing Jianfang, Gong Huajun, Shen Chunlin, Pan Wenping, Yue Jian

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: For volumetric 3-D display whose imaging space is created by a spinning double bladed helicoidal screen with layer-by-layer scan, a graphics software framework is designed and implemented. The core structure consists of voxelization, sliced image rendering and synchronization control. Graphics system obtains volume data by discretizing mesh models in 3-D sample space, then the volumetric dataset of the object is rendered into a stack of sliced images according to helicoid geometry. Through proper synchronization control, the sliced images are projected onto the spinning screen in rapid succession. Finally, the time serie sliced images fuse into a whole 3-D image in true space because of persistence of vision. The software has been tested on a volumetric 3-D display prototype, the 3-D images occupy real physical space, and viewers can watch them directly from almost all directions and change views simply by walking around the display, just as observing real physical object.

Key words: volumetric 3-D display; graphics algorithm; volumetric data; sliced image; synchronization control

显示和视觉传达技术是人类感知和认识三维世界的重要途径。目前普遍使用的显示设备如CRT或LCD显示器表达能力局限于平面,通过单目视觉线索如透视,明暗处理、纹理梯度和遮挡等向视觉系统传达三维场景的空间信息。人眼最终所观察到的实际上是三维物体在特定观察方向上的

二维投影,深度感的产生还有赖于人的心理想象。这种单一视点的图像不具备运动视差,难以营造动态真实感,阻碍了三维世界的真实再现。立体镜和自动立体镜技术利用双目视觉原理,能够提供具备水平视差的立体显示,通过立体眼镜或从特定的方位可观察到立体影像,但受限于观察视点的数量,

基金项目:国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)(2007AA01Z338)资助项目;江苏省研究生科研创新计划(CX09B_083Z)资助项目。

收稿日期:2010-12-21;**修订日期:**2011-05-03

通讯作者:龚华军,男,教授,博士生导师,1965年1月生,E-mail:ghj301@nuaa.edu.cn。

在大范围内难以通过平面显示器模拟完全的运动视差,另外由于眼球的调节和辐合作用解耦,长时间观看容易导致视觉疲劳^[1]。

体三维显示与传统的平面显示技术有着根本的区别,它的显示介质是一个真实的物理空间,并以体素(Voxel)为基本显示单元构造出具有真实三维尺度的立体影像,保留了物体完整的三维信息。观察者可以直接以裸眼观察到悬浮于立体空间内的三维影像,自动满足心理深度和物理深度的需求。因为三维影像占据真实的物理空间,这种显示器也被称为“真三维”显示器。体三维显示技术的研究始于20世纪60年代前后,主要分动态体显示技术和静态体显示技术^[2]。由于便于硬件实现和易于达到较高的成像质量,关于动态体显示技术的应用研究较为广泛。该技术基于屏幕的时分复用和视觉暂留原理,利用周期性运动的靶屏扫描出一个三维空间用于立体成像,其中旋转扫描技术尤为常用。从20世纪80年代起,美国德州仪器公司(TI Inc),美国空军,海军SPAWAR系统中心,NASA,Actuality Systems,GENEX公司等多家机构对旋转扫描体显示技术相继开展了积极的研究,并应用于空间定位和空间数据分析等诸多领域^[3-8]。早期的代表机型如TI的OmniView™,美国海军的HL3D,德国的FELIX 3D Display等,均采用旋转螺旋扫描屏结合激光随机扫描成像的方式构建,难以实现高速并行和高分辨率的显示;利用阴极射线轰击旋转荧光屏或用主动发光器件形成体素的方式也存在类似问题。随着光电子信息技术的发展,特别是以数字微镜器件(Digital micro-mirror device, DMD)为核心的数字光处理技术的出现,基于DMD的高速投影技术成为主流,其中以Actuality Systems公司的Perspecta™平面旋转体扫描显示器为代表。DMD器件在响应速度、控制精度和数据带宽上具有其他光调制器无法比拟的优势,十分适合体扫描中图像快速变换的需要^[9]。

南京航空航天大学真三维显示实验室自2000年起一直致力于体三维显示理论与关键技术的研究,先后成功研制了基于全固态激光和基于DMD的旋转平面扫描体三维显示系统^[10-12]。近期采用旋转双螺旋屏的逐层扫描方案,结合DMD高速并行光寻址技术构建了一种高清晰度体三维显示系统,本文针对该系统设计开发了一套适合体三维显示的图形算法体系,主要包括模型的体素化、体数据的切片绘制以及高速投影的同步控制等。

1 系统概述

系统主要包括控制主机、高速投影单元,双螺旋面扫描屏幕以及运动伺服单元等,如图1所示。系统工作时,控制主机采集屏幕的位置信息并发送图像数据到投影单元,投影单元将物体轮廓的若干截面图像(切片)依次快速投影到同步旋转的屏幕上,基于视觉暂留效应,连续变换的切片图像序列被人眼融合并感知为完整的立体影像。

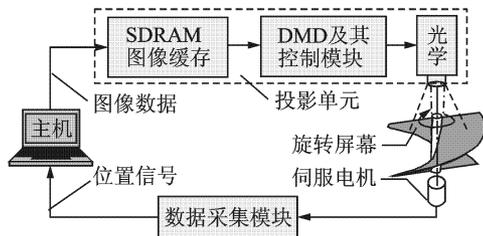


图1 系统结构框图

采用双螺旋面作为成像屏幕克服了平面旋转易产生不均匀空间和成像死区的缺点,有利于构造大体积、高保真的成像空间^[13]。双螺旋屏幕是单导程螺旋面沿垂直中轴平均截成两半,其中一半逆向旋转180°后与另一半拼合,结构对称易于保证转动平衡。光线沿屏幕转轴方向从上至下或从下至上投射到屏幕上,在旋转过程中,成像点在相邻位置的螺旋面之间被垂直拉伸成发光体素。屏幕材料采用高强度半透明光敏树脂,具有各项同性的散射特点,可保证被点亮体素无遮挡地穿透屏幕进入人眼。光源可置于显示空间的上方或者下方,观察者位于屏幕周围,光路与视线互不干扰,有利于提供全方位的观察视角。

为了避免图像闪烁,采用扫描技术的成像设备需要满足一定的刷新率要求,如CRT或LCD显示器的刷新率通常大于60 Hz。在体三维显示中,实验证明当体刷新率达到10 Hz时即可满足视觉系统闪光融合的要求。

2 图形算法核心

在经典三维图形API(如OpenGL, Direct3D等)中,三维几何对象经过多次变换和裁剪后,最终得到的基本图元必须投影成二维对象,然后进行光栅化处理成为屏幕上的像素。体三维显示是基于体素的显示,三维数据直接映射到真实的立体空间内,生成的三维影像不依赖于特定的视点,支持全方位观察,可完整再现场景的三维特征。由于体三维显示独立于视点的特征,在渲染管线中不需要投

影变换和判断空间点的遮挡关系,免去了隐藏面消除工作,离散化操作直接在三维体素空间内进行。参照经典三维图形渲染管线,针对旋转螺旋面体扫描的空间立体显示器,给出一种面向体三维显示的图形渲染管线,如图2所示。渲染管线通过体素化获取模型的体数据,然后利用体绘制的方法将体数据分层绘制到切片图像供投影显示,实现立体影像的空间再现。



图2 体三维图形渲染管线

2.1 立体图元的体素化

体三维显示的相关概念是基于体图形学的。传统的计算机图形学是基于面的,大多采用三角网格来逼近物体的表面。在体图形学中,物体模型采用体数据来表达,即采用三维离散空间中的体素集合来表示。体素可以看作二维像素在三维离散空间的推广^[14]。体数据可以通过各种影像扫描或三维测量设备获得,如CT、磁共振、超声波以及立体相机等,也可以通过对已有几何模型进行体素化来获得。体素化将连续的物体模型离散采样后转换成体素表示形式,如图3所示。在这里以网格模型为数据源,通过对模型表面二值体素化得到模型的表面体数据。

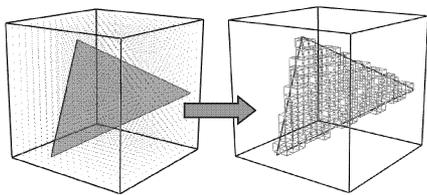


图3 空间三角形的体素化

体素化算法一方面注重实时性能,依赖于图形硬件,实现过程较复杂^[15-16]。另一方面关注算法鲁棒性和准确性,通常利用距离计算或扫描转换来确定空间图元所占有的体素,几何意义明确,易于操作^[17-19]。文献[19]从离散拓扑的概念出发,提出了生成最小可分离表面的标准,根据表面法向量和体素的几何尺寸设置不同的距离阈值,可分别生成6-邻接、18-邻接和26-邻接的体素模型。本文以文献[19]提出的距离标准为依据,在仿射坐标系内,利用基于方向导数计算最小距离的方法设计实现了一种网格模型的表面二值体素化算法。

2.1.1 预处理

预处理阶段包括体素空间的初始化和针对模

型的几何变换。设置体素空间为一个归一化的正立方体空间,利用分辨率为 $n \times n \times n$ 三维笛卡尔栅格在3个轴向上等间隔采样,采样点位于栅格点。采样点的Voronoi邻域定义为一个体素,是一个以采样点为中心的正立方体单元。体素空间的范围为 $x, y, z \in [-0.5, 0.5]$,采样点逻辑坐标为 (i, j, k) ,表示其所在的列、行和层的索引;物理坐标为 (x, y, z) ,表示采样点的物理位置。逻辑坐标和物理坐标之间的映射关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_j \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} & 0 & 0 & -0.5 + \frac{1}{2n} \\ 0 & \frac{1}{n} & 0 & -0.5 + \frac{1}{2n} \\ 0 & 0 & \frac{1}{n} & -0.5 + \frac{1}{2n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于每一个体素,为其赋一个“颜色”值 $f(x_i, y_j, z_k)$,对于二值体素化,有

$$f(x_i, y_j, z_k) = \begin{cases} 1 & \text{体素被对象占有} \\ 0 & \text{体素不被对象占有} \end{cases} \quad (2)$$

值为1的体素称为物体体素,值为0的称为背景体素,在初始化阶段,所有体素均被赋值为0。

读取网格模型(如3DS, STL模型等)得到几何数据后,需要将模型缩放到体素空间内。遍历模型的所有顶点,得到模型在3个坐标轴向上的跨度分别为 $(x_{\max} - x_{\min}), (y_{\max} - y_{\min}), (z_{\max} - z_{\min})$,取其中的最大值并记为 d 。设变换前模型顶点坐标为 (x, y, z) ,变换后的坐标为 (x_n, y_n, z_n) ,则

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d} & 0 & 0 & \frac{-(x_{\max} + y_{\min})}{2d} \\ 0 & \frac{1}{d} & 0 & \frac{-(x_{\max} + y_{\min})}{2d} \\ 0 & 0 & \frac{1}{d} & \frac{-(x_{\max} + y_{\min})}{2d} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

网格模型的表面由许多三角面片镶嵌而成,体素化时需要在体素空间内遍历每个三角形,计算每个体素的中心到当前三角形的距离,然后按照距离判定标准确定该三角形所占有的体素集合。对于一个三角形,为了减少计算开销,同时不损失计算精度,只需对三角形最小包围盒内的体素进行距离判断,而不需要遍历整个体素空间。取3个顶点的坐标,分别找出在 x, y, z 方向上的最小值和最大值,构造沿坐标轴的长方体最小包围盒。将最小包围盒的顶点坐标代入式(1)可求包围盒内的体素索引范围,以 x 方向为例

$$i = (x + 0.5) \times n - 0.5 \quad (4)$$

同样可求 j, k ,其中 $x, y, z \in [-0.5, 0.5]$,则

$i, j, k \in [-0.5, n-0.5]$, 由于不能保证 i, j, k 为整数, 需对结果做量化处理, 获得值为整数的逻辑坐标 i' 为

$$i' = \text{floor}(i + 0.5) \quad (5)$$

式中函数 floor 用于返回小于或等于输入参数的最大整数。 j', k' 亦然。

2.1.2 网格模型体素化

对于当前处理的三角形 $V_0V_1V_2$, 记 $e_0 = V_1 - V_0, e_1 = V_2 - V_0$, 以 V_0 为基点, e_0, e_1 为基向量建立仿射标架, 则在三角形 $V_0V_1V_2$ 上的任意一点 V 可表示为

$$V(s, t) = V_0 + s \cdot e_0 + t \cdot e_1 \quad (6)$$

式中: (s, t) 为点 V 的仿射坐标或重心坐标; $(s, t) \in D = \{(s, t) | 0 \leq s \leq 1, 0 \leq t \leq 1, s+t \leq 1\}$ 。

遍历三角形 $V_0V_1V_2$ 最小包围盒内的体素, 记当前体素的几何中心为 P , 则点 P 到点 V 的距离可以表示为 $|V(s, t) - P|$, 为了方便, 计算距离的平方 $Q(s, t)$

$$Q(s, t) = |V(s, t) - P|^2 \quad (7)$$

将式(6)代入式(7), 展开后可得距离函数

$$Q(s, t) = as^2 + 2bst + ct^2 + 2ds + 2et + f \quad (8)$$

式中, $a = e_0 \cdot e_0, b = e_0 \cdot e_1, c = e_1 \cdot e_1, d = e_0 \cdot (V_0 - P), e = e_1 \cdot (V_0 - P), f = (V_0 - P) \cdot (V_0 - P)$ 。 P 到三角形 $V_0V_1V_2$ 的距离 l 即为函数 $Q(s, t)$ 在有界闭区域 D 上的最小值。 $Q(s, t)$ 连续可微, 令其梯度 $\text{grad } Q(s, t) = 0$, 可得 $Q(s, t)$ 的驻点为

$$P'(\bar{s}, \bar{t}) = \left(\frac{be - cd}{ac - b^2}, \frac{bd - ae}{ac - b^2} \right) \quad (9)$$

根据多元函数的极值判定定理, P' 为 $Q(s, t)$ 的全局极小值点。 相对于三角形 $V_0V_1V_2, P'$ 可能分布在7个不同区域内, 如图4所示。 若 $(\bar{s}, \bar{t}) \in D$, 则 P' 落在区域0, $Q(s, t)$ 在极小值点 P' 取得最小值, 此时 l 为点 P 到三角形 $V_0V_1V_2$ 所在平面的距离。 若 $(\bar{s}, \bar{t}) \notin D$, 则点 P' 落在三角形外部。 如果 P' 落在区域1, 3或5, 则最小距离点取在三角形的某条边上, l 为 P 到三角形某条边的距离。 如果 P' 落在区域2, 4或6, 则最小距离点取在三角形的某个顶点上, l 为 P 到对应顶点的距离。 因此求取 l 的关键是判断 P' 所在区域。

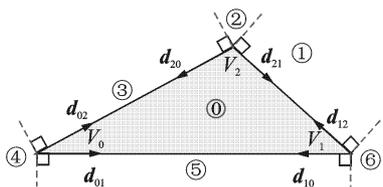


图4 三角形区域划分

关于最小距离点所在区域的判断, 文献[17, 18]均有论述, 需要针对各分界面逐个判断, 效率不高。 文献[20]利用极值点的仿射坐标进行区域划分, 但是各区域之间存在交叉重叠, 需要多次判断。 本文在文献[20]基础上给出一种基于方向导数的区域判断方法, 不存在冗余判断, 简化了判断逻辑和计算量。 在图4中, 分别在点 V_0, V_1 和 V_2 的邻域内规定方向向量如下: $d_{01} = e_0 = (1, 0), d_{02} = e_1 = (0, 1), d_{10} = -e_0 = (-1, 0), d_{12} = e_1 - e_0 = (-1, 1), d_{20} = -e_1 = (0, -1), d_{21} = e_0 - e_1 = (1, -1)$ 。 计算方向导数

$$\frac{\partial Q}{\partial d_{01}} = \text{grad}(Q(0, 0)) \cdot d_{01} = d$$

$$\frac{\partial Q}{\partial d_{02}} = \text{grad}(Q(0, 0)) \cdot d_{02} = e$$

$$\frac{\partial Q}{\partial d_{10}} = \text{grad}(Q(1, 0)) \cdot d_{10} = -(a+d)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial d_{12}} = \text{grad}(Q(1, 0)) \cdot d_{12} = (b+e) - (a+d)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial d_{20}} = \text{grad}(Q(0, 1)) \cdot d_{20} = -(c+e)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial d_{21}} = \text{grad}(Q(0, 1)) \cdot d_{21} = (b+d) - (c+e)$$

根据式(9), 计算 \bar{s}, \bar{t} , 若 $(\bar{s}, \bar{t}) \in D, P'$ 在区域零内; 若 $(\bar{s}, \bar{t}) \notin D$, 则 P' 属于1~6中的某个区域, 对应的判定条件列于表1。

表1 P' 在三角形外部各区域的判定依据

区域	1	2	3	4	5	6
条件	$\bar{s} + \bar{t} > 1$	$\bar{s} < 0$	$\bar{t} < 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{12}} < 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{01}} < 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{10}} > 0$
	$\frac{\partial Q}{\partial d_{20}} \geq 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{02}} < 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{10}} \geq 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{01}} \geq 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{10}} < 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{12}} > 0$
	$\frac{\partial Q}{\partial d_{21}} < 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{20}} \geq 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{20}} < 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{01}} \geq 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{10}} < 0$	$\frac{\partial Q}{\partial d_{12}} > 0$

在区域0~6中, $Q(s, t)$ 在 D 上的最小值点的仿射坐标分别为 $\left(\frac{be - cd}{ac - b^2}, \frac{bd - ae}{ac - b^2} \right), \left(\frac{c + e - b - d}{a - 2b + c}, \frac{a + d - b - e}{a - 2b + c} \right), (0, 1), \left(0, -\frac{e}{c} \right), (0, 0), \left(-\frac{d}{a}, 0 \right), (1, 0)$ 。 根据不同的区域, 预先做成一个距离查找表, 根据极值点所在区域编号查表计算距离。

设置距离判断阈值为 $(\sqrt{3} \omega / 2) \cdot \cos \alpha$, 其中 ω 为单个体素的棱长, α 为三角形法向与体素体对角线的夹角。 对于到三角形的距离小于或等于该阈值的体素, 赋值为1, 否则为0, 这样可获得26-邻接的体素模型。 计算距离之前先判断体素值是否为1, 若为1, 表示该体素被多个三角形共享且已被其他三角形占有, 不需要再重复计算与当前三角形的距

离。体素化算法用伪代码描述为:

```
for(网格模型的每个三角形面片){
    求取三角形的最小包围盒
    for(最小包围盒的每个体素){
        if(体素值不为1){
            判断P'所在区域并计算体素到三角形的距离
            if(距离<判断阈值)体素赋值为1
            else 体素赋值为0}
        else 结束本次循环}}
```

体素化完成后,将值为1的体素顺序保存到一段内存空间,然后根据实际显示空间的尺寸,通过一个简单的缩放和平移变换将体素坐标映射到实际的成像空间内。

2.2 切片图像渲染

通过体素化得到的原始体素集不能直接用于显示,而是要转化为支持特定成像方式的格式。体三维显示器的成像空间是经螺旋屏幕旋转扫描而成的一个圆柱体,在一个周期内的 N 个等间隔瞬间,匀速旋转的螺旋面将成像空间均匀分割成 N 层子空间(切片),投影系统依次将模型对应的 N 个快速变换的轮廓切片同步投影到旋转的屏幕上从而“堆积”成完整的三维图像。因此,原始体数据集需要被划分到各层子空间得到对应的空间轮廓切片,然后将各个子空间内的体素子集分别渲染成可供投影显示的切片图像帧。

为了保持数据分布的均匀性,对成像空间做栅格化处理。在成像空间 x - y 平面设置分辨率为 $W \times H$ 的矩形栅格,如图5所示,其尺寸与栅格点物理坐标取决于对实际显示空间的设置。利用全空间显示时,栅格充满成像空间的底面;利用半空间显示时,栅格仅位于转轴的一侧。为了避开屏幕中心的旋转死区,需要将栅格与转轴保持一定的间隙。在这里,以半空间显示为例。栅格等间隔分布,根据显示空间的长宽尺寸设置栅格点的平面位置。在 z 方向上,按螺旋面上升的顺序依次将各层切片编号为 $0, 1, \dots, N-1$ 。设 h 为螺旋屏的高度,在等间隔时间内上升的高度为 d_z ,则 $d_z = h/N$ 。根据螺旋面的几何特征,为每个栅格点维护一个高度值 z ,这样才能匹配屏幕的位置和形状,抵消投影时在螺

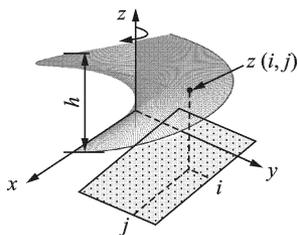


图5 成像空间的栅格化

旋曲面上的空间扭曲。对于具有相同平面坐标 (x_i, y_j) 的栅格点, z 值在各层切片上是等量递增的,可以表示为

$$\begin{cases} z_0(i, j) = \frac{h}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{y_j}{x_i}\right) \right) \\ z_k(i, j) = z_0(i, j) + k \cdot d_z \end{cases} \quad (10)$$

式中: $i=0, 1, \dots, W-1; j=0, 1, \dots, H-1; k=1, 2, \dots, N-1$ 。

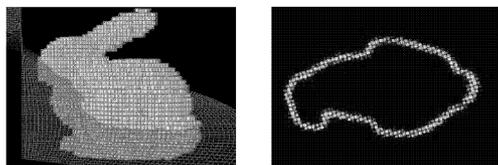
体素集合的子空间划分在实际的成像空间进行,假设模型的体数据集和各层螺旋切片的栅格点均已映射到实际的物理空间内。遍历模型的非零体素,依次沿3个坐标轴方向进行最邻近栅格点的线性搜索,找到与当前体素最邻近的一层切片。具体步骤如下:

- (1) 沿 x 方向搜索,找出在 x 方向上距离体素最近的一列栅格点并将列索引记为 i ;
- (2) 沿 y 方向搜索,找出在 y 方向上距离体素最近的一行栅格点并将行索引记为 j ;
- (3) 由步骤(1,2)的结果,在 x - y 平面上确定唯一的栅格点 (i, j) ,将其物理坐标代入式(10)计算该点在每层螺旋面上对应的高度值 $z(i, j)$,然后沿 z 方向搜索与该体素距离最近的一层螺旋面,最后将该体素划分到这个子空间内。

这种方法保证了模型的每个非零体素都能被匹配到最合适的一层螺旋切片上,切片之间相互平行,十分适合在垂直方向上布置光路;同一层切片上的体素之间不存在交叉重叠,最大程度上避免了由于数据处理而造成的投影扭曲变形。针对每个非零体素进行的搜索次数为 $(W+H+N)$,并且仅需要在坐标轴方向上计算距离,运算简单。考虑到 x, y, z 的值都是有序排列的,因此可以采用二分法进一步实现快速查找。以 z 方向上的搜索为例:设置3个位置索引Low, High和Mid分别指向当前搜索范围内螺旋面最低层、最高层和中间层,其中 $\text{Mid} = (\text{Low} + \text{High})/2$;数组 $z(i, j)$ 中保存各层螺旋面上的高度值,当前体素的高度值为 z_{vox} 。在初始化阶段,令 $\text{Low} = 0, \text{High} = N-1$,当搜索进行到Low与High相邻即 $\text{High} - \text{Low} = 1$ 时终止,说明体素位于第Low层与第High层螺旋面之间。最后通过比较 $|z_{\text{vox}} - z(i, j)[\text{Low}]|$ 与 $|z_{\text{vox}} - z(i, j)[\text{High}]|$ 值的大小可得最邻近的螺旋面。

物体体素划分到各个子空间后,采用一种分层次的抛雪球算法来渲染切片图像。抛雪球算法定义体素投影在像平面上影响范围为一个溅点,利用其扩散效应来减轻边界锯齿走样以生成较高质量的图像^[21]。分层绘制时,每次只需处理一层子空间内的物体体素,利用平行投影将体素沿 z 轴负方向投

影到像平面,每个体素的贡献值通过溅点融合到切片图像中。溅点的强度分布利用高斯函数定义,每个溅点均为一个圆形区域,可以保存为位图形式,而不必对每个体素都进行投影。图6展示了一幅切片图像的生成过程,数据集为Stanford 兔子在 $48 \times 48 \times 48$ 空间分辨率下的表面体素集,图6(a)为某一位置的螺旋面与体素模型相交得到一层子空间内的体数据,图6(b)为对该层体数据渲染得到的一幅切片图像。



(a) 螺旋面与体素模型相交 (b) 一幅切片图像

图6 切片图像渲染的示意图

2.3 同步投影

投影显示单元是一个以DMD为核心的光机平台,集成了光路系统和DMD控制模块。控制模块由DMD Discovery™3000(TI Inc.)控制板及其高速驱动子板ALP-3(ViALUX Inc.)组成,通过USB2.0接口与主机通信,接收切片图像帧序列并缓存到板载的1G RAM上,然后经过高速FPGA通道传输到DMD芯片显示,在显示1位位图的情况下,最高可实现13 333帧/秒的帧率。

在逐层扫描的显示过程中,切片图像需要和屏幕在空间位置上一一对应,为了还原出完整、正确的三维影像,需要准确设置图像序列的时序,设每幅图像的显示时间为 T_{pic} ,根据屏幕转速 r 和图像数量 N 计算出 $T_{pic} = 1/(r \cdot N)$, T_{pic} 一般为毫秒级。通过ALP-3的SDK函数对控制模块编程使图像序列按照设定的时序循环显示,数据加载与显示可同时进行。屏幕每旋转一周,伺服系统的旋转编码器发出一个零位信号,主机采集该信号作为每次循环投影的起始信号,对投影时序做一次同步校准,如图7所示。

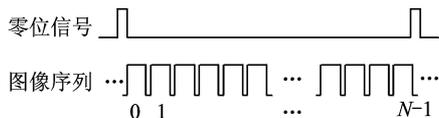


图7 投影时序

3 实验验证

原理验证样机如图8所示,双螺旋屏幕半径250 mm,高250 mm,壁厚约3 mm,采用富士FALFIC-W系列直流伺服系统驱动。投影单元吊装于显示空间上方,高度和角度可调,校准光路使投影与成像空间匹配,必要时可使用菲涅耳透镜调

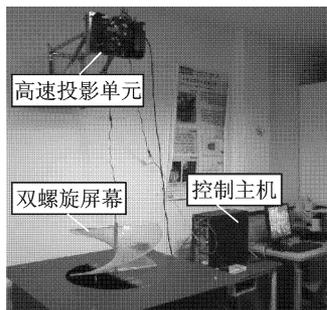
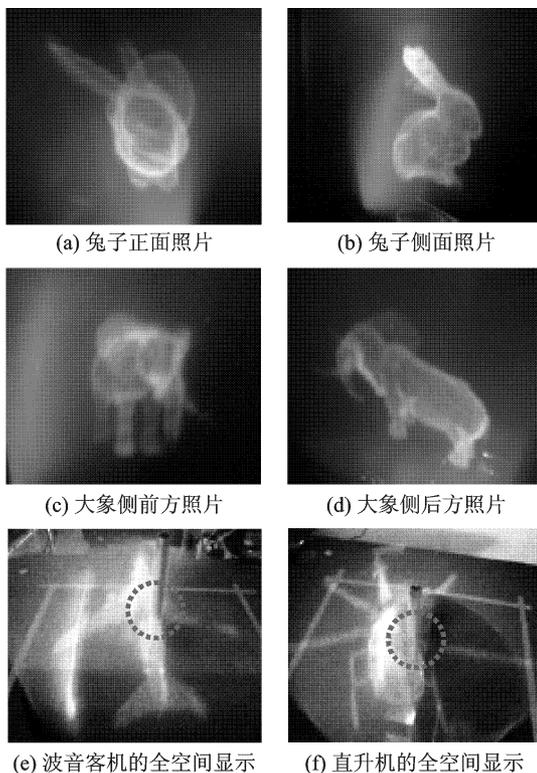


图8 原理验证机

理光路以获得准直光束。主机利用ICP DAS PIO-DA16型板卡采集屏幕旋转的零位信号触发投影时序。实验在环境光较暗的条件下进行,有利于减弱人眼对光闪烁的敏感度,获得清晰稳定的显示效果。设置体素空间分辨率为 $256 \times 256 \times 256$,切片图像数量为132,分辨率为 $1\ 024 \times 768$,8位位图,屏幕转速600 r/min,即体刷新率为10 Hz,对应帧刷新率1 320帧/秒。目前投影单元采用单色光源,尚不具备显示彩色图像的功能。

生成的立体影像悬浮在真实空间内,符合人眼自由立体观察要求,具备运动视差,环绕显示器可以自由选择视点裸眼观察影像体的不同侧面。显示效果如图9所示,其中Stanford 兔子与大象模型采用半空间显示,图9(a~d)分别为从不同角度拍摄的立体影像的照片。波音客机与直升机模型采用全空间配置进行显示,图9(e,f)分别为从显示器斜上方拍摄的照片。由图9(e,f)可见,在采用全空间配



(e) 波音客机的全空间显示 (f) 直升机的全空间显示

图9 体三维显示效果

置显示时,三维影像充满整个圆柱状成像空间,具有水平 360° 、垂直 180° 的观察范围,但是在影像穿越转轴的部分存在明显的成像死区(图中虚线圈内部位)。采用半空间显示可以将影像偏移至转轴的一侧,但降低了空间利用率,由于转轴的阻塞,观察视角也会受到一定的限制,水平观察范围一般约在 $0\sim 270^\circ$ 。因此,后续需要通过进一步优化屏幕结构设计来改善成像效果。

由于成像空间是半透明的,光线与屏幕相交形成的体素点向空间各方向均匀散射,因此三维图像也是半透明的,难以产生遮挡效果,这有望在后续工作中使用具有各向异性反射特性的屏幕来解决。另一方面,半透明的显示效果在某些应用领域内是有益的,如在医学诊断和计算机辅助设计中可以完整呈现人体或零件的内部构造,提供完备的空间信息。

4 结束语

本文针对一种采用双螺旋屏幕逐层扫描技术的体三维显示器,给出了一种三维图像绘制方法,通过模型的体素化获取表面体数据,然后依据空间扫描顺序逐层渲染成切片图像序列供高速投影显示。算法在体三维显示器中进行了验证,实现了三维物体在真实三维空间内的立体显示。

作为一种新型的信息显示终端和人机交互接口,体三维显示系统打破了平面显示的限制,将三维显示拓展到真实的自然空间,预计在医学影像、科学计算可视化、CAD、空中交通管制、飞行器/舰艇导航以及商业娱乐等领域有良好的应用前景。在未来的研究中,将着重提高算法的实时性,开发基于可编程图形硬件GPU的显示算法以及实时数据传输接口,实现真实三维空间内的自然人机交互并开展在相关领域内的应用研究。

参考文献:

- [1] Marc L, Wijnand I. Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2009, 53(3):1-14.
- [2] Blundell B. Enhanced visualization: making space for 3-D images [M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [3] Clifton III T E, Wefer F L. Direct volume display devices [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1993, 13(3): 57-65.
- [4] Soltan P, Lasher M, Dahlke W, et al. Improved second-generation 3-D volumetric display system [R]. ADA358303. San Diego: Space and Naval Warfare Systems Center, 1998:3-24.
- [5] Langhans K, brzecny D, Homann D, et al. New portable FELIX 3D display [C]//Proc SPIE: Projection Displays IV. USA: SPIE, 1998: 204-216.
- [6] Favallora G E, Napoli J, Deirdre M Hall, et al. 100 million-voxel volumetric display [C]//Proc SPIE, Cockpit Displays IX. USA: SPIE, 2002: 300-312.
- [7] Geng J. Volumetric 3D display for radiation therapy planning [J]. *Journal of Display Technology*, 2008, 4(4): 437-449.
- [8] Yucesoy V, Tunaoglu D, Kovachev M, et al. Design and implementation of a DMD based volumetric 3D display [C]//Proc 3DTV Conf. Piscataway, USA: Inst of Elec and Elec Eng Computer Society, 2008:29-31.
- [9] Dudley D, Duncan W, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications [C]//Proc SPIE, MOEMS Display and Imaging Systems. USA: SPIE, 2003: 14-25.
- [10] Li Li, Gong Huajun, Shen Chunlin, et al. Novel volumetric three-dimensional display system [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2008, 25(3):32-36.
- [11] 李莉,李玉峰,沈春林,等.基于数字微镜的旋转体三维装置研究[J].*仪器仪表学报*,2008,29(1):67-72.
- [12] 邢建芳,龚华军,沈春林,等.基于数字微镜和旋转扫描技术的体三维显示器[J].*光电子·激光*,2008,19(8):1011-1015.
- [13] 樊琼剑,李莉,沈春林,等.体三维成像的螺旋扫描系统设计[J].*光学精密工程*,2010,18(1):183-188.
- [14] Kaufman A, Cohen D, Yagel R. Volume graphics [J]. *IEEE Computer*, 1993, 26(7): 51-64.
- [15] Fang Shiaofen, Chen Hongsheng. Hardware accelerated voxelization [J]. *Computers & Graphics*, 2000, 24(3): 433-442.
- [16] Dong Zhao, Chen Wei, Bao Hujun, et al. Real-time voxelization for complex polygonal models [C]//Proc 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Los Alamitos, USA: IEEE Comput Soc, 2004:43-50.
- [17] Dachille F, Kaufman A E. Incremental triangle voxelization [C]//Proc Graphics Interface 2000. Waterloo, Canada: Human-Comput Comun Soc, 2000: 205-212.
- [18] Jones M W. The production of volume data from triangular meshes using voxelization [J]. *Computer Graphics Forum*, 1996,15(5):311-318.
- [19] Huang J, Yagel R, Filippov V, et al. An accurate method for voxelizing polygon meshes [C]//Proc IEEE Symposium on Volume Visualization. New York: IEEE Press, 1998:119-126.
- [20] Schneider P J, Eberly D H. Geometric tools for computer graphics [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2003: 376-382.
- [21] Westover L. Footprint evaluation for volumetric rendering [J]. *Computer Graphics*, 1990, 24(4): 367-376.