

# 基于光线投射算法实现与三维场景的交互功能<sup>①</sup>

涂超, 颜辉武, 王新生

(武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430070)

**摘要** 详细地介绍了采用光线投射算法实现与三维场景的交互功能的基本原理与过程, 并针对效率的提高介绍了采用层次包围盒技术来加速计算的方法.

**关键词:** 光线投射法; 拾取; 层次包围盒技术

**中图分类号:** P208    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-855X(2001)06-001-04

## 1 光线投射算法的基本原理

“光线投射”算法是目前国际上广泛采用的真实感三维渲染算法“光线跟踪”算法的前身. 光线投射的基本原理很简单, 假设从视点  $V$  通过屏幕象素  $e$  向场景投射一光线与场景中的景物相交于  $P_1, P_2, \dots, P_m$  点(如图 1 所示), 那么离视点  $V$  最近的  $P_1$  点就是画面的象素  $e$  处的可见点, 象素  $e$  的光亮度应由  $P_1$  点向  $P_1V$  方向辐射的光亮度决定. 如果通过  $V$  点向屏幕上的每一象素都投射光线以求得每一投射光线与场景得第一个交点(可见点), 并置相应的象素得光亮度为交点处的光亮度那么就得到一幅完整的真实感画面.

## 2 基于光线投射法的拾取功能原理

在基于空间信息的虚拟现实应用中, 空间信息的查询与分析功能是十分重要的, 这也是它区别于其他虚拟现实应用的关键. 要实现对与空间信息相关实体的查询和分析, 交互功能的实现尤为重要. 与其他虚拟现实应用不同的是, 基于空间信息的虚拟现实应用不但要求实现对实体的整个选取, 而且为了实现对地形的分析功能, 还应实现对地形模型上的点或面的精确拾取. 通过对光线投射法的改造可有效地实现这种精确拾取功能.

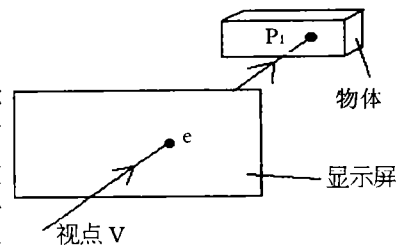


图 1 光线投射法原理

当与虚拟场景交互时, 常通过对屏幕象素的点击来实现. 取该屏幕象素点为  $e$ , 从视点  $V$  通过屏幕象素  $e$  向场景投射一光线, 那么该光线会与虚拟场景中的景物相交于多个点, 而离视点最近的点就是所拾取的点. 通过此方法即可实现对虚拟场景的拾取功能.

## 3 求交的运算

基于光线投射法的拾取算法与求交计算和场景的复杂程度有着密切的关系. 当场景仅由为数不多的平面和二次曲面片组成时, 计算耗费不大. 但较为复杂的场景, 常含有成千上万个景物表面, 不仅数量多, 而且还可能具有复杂的形状与解析表示. 若求取光线与场景交点需与场景中所有景物表面一一进行求交测试, 则计算耗费将大大增加.

实际上一根光线只与场景中极少数景物表面相交, 该光线与场景中所有表面做求交运算显然是无意义的. 为此, 可采用场景的分层次表示和包围盒技术. 所谓场景得分层次表示, 是指将场景中得所有表面按景物组成和景物间的相对位置分层次组织成一棵景物树. 树的根结点表示整个场景, 而以下的子结点则表示由若干个景物表面组成的一个个局部场景. 常用的场景分层算法是 BSP 算法. 包围盒技术是指用几何形状相对简单的闭合表面(如长方形、球等)将一复杂景物包裹起来, 若被跟踪的光线与包围盒不相交, 则它与包围盒内的所有景物都不相交. 由于判断光线与包围盒有交或无交较为容易, 从而避免了许多不必要

<sup>①</sup> 收稿日期: 2001-02-23;    基金项目: 武汉大学科技发展基金资助项目;  
第一作者简介: 涂超, 男, 1966 年生, 博士, 讲师; 研究方向: 地理信息系统, 虚拟现实等.

的求交运算.当包围盒技术与场景的分层次表示结合使用时可大大减少求交计算量.

#### 4 层次包围盒技术

采用形状比较简单的包围盒(如球面、长方体等)将复杂景物包裹起来,求交时光线首先与包围盒进行求交测试,若它们相交,则光线再与包围盒中所含景物进行求交计算.否则,光线与包围盒内含的景物不相交.由于光线与包围盒的求交相对简单,因此可以用较小的代价快速地剔除那些与光线不相交的景物.此种方法称为包围盒技术.但对于与光线相交的景物来说,光线与其包围盒的求交运算则是一种额外的代价,为此包围盒应采用相对简单形状以尽可能降低这一代价.另一方面,简单的包围盒又可能包裹景物不紧,与包围盒相交的光线并不一定与其中所含景物相交,从而导致算法求交测试的可靠性下降.因此所采用的包围盒尽可能紧地包裹其中所含景物.包围盒技术实施时应在包围盒形状的简单性盒对其中所含景物包裹得紧密程度之间做一折衷.

为了正确选择包围盒的形状,Weghorst等提出了包围盒的无效面积的概念.若将景物及其包围盒垂直投影在过光线起点且垂直于光线的平面上,则包围盒的无效面积定义为包围盒及其所含景物在上述平面上的投影面积差(如下页图2所示).包围盒的无效面积是景物、包围盒及光线方向的函数,且光线与景物求交测试的开销函数为:

$$T = bB + iI$$

其中  $T$  为总开销,  $b$  为光线与包围盒的求交测试次数,  $B$  为光线与包围盒的求交测试开销,  $I$  为光线与景物求交测试开销.一般来说,  $b$  和  $B$ ,  $i$  和  $I$  是相互依赖的.降低  $B$ , 亦即降低了包围盒的复杂性,这势必会增加  $I$ .这种基于无效面积的概念来定量选取球、长方体和圆柱中的一种作为景物得包围盒的方法并不能降低光线与包围盒求交测试的次数,但减少了求交计算的总的开销.

在针对空间信息的应用中,主要需对地形的交互给出精确坐标以利于分析,而地形模型是基于具有高程值的平面网格而产生的,对地形模型得区域分块后,所得的仍是一系列基于矩形平面的网格体.因此,可使用长方体包围盒作为地形模型的包围盒,无需动态选择包围盒.

简单包围盒技术的效率并不十分高,其原因在于被跟踪的光线与场景中每一景物的包围盒都必须进行求交测试以决定是否需与其中所含景物进行求交计算,算法的复杂性为  $O(N)$ ,这里  $N$  为场景中景物的数目.包围盒技术的一个重要改进是引入了层次结构.其基本原理是根据景物的分布情况,将相距较近的景物组成一组局部场景,各相邻组又可组成更大的组,这样,整个场景就被组织成树状层次结构.算法同时建立起各结点局部场景的包围盒,其根结点即为整个场景及其包围盒.

被跟踪的光线首先进入该层次结构的根结点,并从根结点开始从上至下与各相关结点的包围盒进行求交测试.若某一结点的包围盒与光线有交,则光线将递归地与其子结点进行求交测试;反之,则该结点所含的所有景物必不与光线相交,因而对该结点及其子树无须继续作任何测试.层次包围盒技术通过减少光线与景物(包围盒)的求交测试次数来提高算法的效率.设  $N$  为场景中的景物个数,则采用层次包围盒技术后,光线与景物求交测试的计算复杂度将为  $O(\log N)$ .光线首先跟踪进入场景根结点,与其子结点作求交测试,若发现它仅与某一景物所对应的结点有交.由于该结点为一叶结点,因而,光线直接与景物进行求交计算.若光线与包含多个景物的结点无交.则结点中所含的景物肯定不与光线相交,故无需对它们的下属结点继续进行搜索.若光线与多个景物所对应结点有交,上述步骤逐层递归地进行下去,直至树的最底层.此时,若光线与某一叶结点的包围盒有交,则光线必须与该叶结点所对应的景物进行求交计算.

由于地形模型的特点以及长方体更适合于层次结构表示,因而,在层次包围盒技术中,往往采用长方体包围盒.建立场景的层次结构时,上层结点的长方体包围盒可由下一层各结点的长方体包围盒经简单的比较运算而得到.对场景中的景物进行合理的分组,是建立场景层次结构的重要步骤.一个理想的层次结构是基于景物间相距的远近来实现景物的分组.层次结构的形状则依赖于场景中景物的空间分布,一般来说,愈靠近下层的结点,其包围盒应愈小.建立层次结构常用的方法是“中分面”(median-cut)技术,该技术采用二叉剖分技术对场景进行从上至下的递归分组.在每一结点处,算法首先将它所含的所有景物按其  $x$  坐标的大小进行排序,并取该结点包围盒的  $x$  方向中分面为分割面将所含景物分为两组从而产生两个子结点,然后对这两个子结点分别依次沿  $y, z$  两方向进行分组.上述步骤依次递归进行,直至当前结点只

包含一个景物为止. 以下是一条光线与层次包围盒树的求交算法:

```

intersection(ray, NODE)
{
  if(ray 与 NODE 的包围盒有交)
  {
    if(NODE 为叶结点)
    {
      ray 与 NODE 所含的景物求交;
      若有交, 将它记录到交点表中;
      返回;
    }
  }
  else
  {
    for(NODE 的所有子结点 NODE(i))
      intersection(ray, NODE(i));
  }
}

```

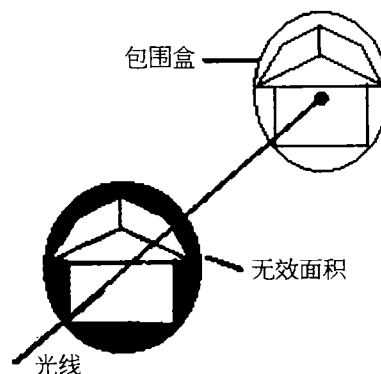


图2 无效面积的几何说明

尽管层次包围盒技术降低了光线与景物的求交测试的计算复杂度, 但其计算量仍可能很大, 这是由于包围盒在空间分布的无序性, 而光线仅需找到离光线起始点最近的交点, 光线与位于其后的景物的求交计算实际上是没有意义的.

## 5 求光线与三角形的相交

由于在虚拟场景的模型中三角形是组成其他多边形的基本形状, 为了计算和处理, 一般需将其它多边形三角形化, 然后进行优化处理. 因此, 光线对场景中实体模型的求交, 其基本算法应是光线对该模型的三角形多边形的求交. 光线与三角形求交算法的效率决定了虚拟场景拾取功能的效率, 其算法的选择十分重要. 在此介绍一种高效的光线/三角形求交算法. 设一条光线  $R(t)$ , 其起点为  $O$ , 其发射方向为  $D$ , 则该光线可定义为:

$$R(t) = O + tD$$

一个三角形的三个顶点为  $V_0, V_1, V_2$ . 要求光线与三角形的交点先要确定光线是否与三角形相交, 一般的方法是先求光线与三角形所在的平面的交点, 再测试该交点是否位于三角形内部.

在此介绍的算法所需存储量最小(仅需保存三角形的顶点), 且无须任何预处理. 对于三角形网格, 通常其内存的占用是巨大的, 大约 25%~50%, 这取决于顶点的数目. 本算法生成了一个包含距离的矢量  $t$  和交点坐标  $(u, v)$ , 避免了光线/平面的求交.

设  $T(u, v)$  为三角形上的一点, 定义为:

$$T(u, v) = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2$$

$(u, v)$  为三角形重心的坐标, 需满足  $u \geq 0, v \geq 0$  且  $u + v \leq 1$ .  $(u, v)$  也可用于纹理贴图、法向量插值、颜色插值等. 计算光线  $R(t)$  与三角形  $T(u, v)$  的相交的公式是  $R(t) = T(u, v)$ , 即:

$$O + tD = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2$$

推导出下式:

$$(-D, V_1 - V_0, V_2 - V_0) \begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = O - V_0$$

这意味着重心坐标  $(u, v)$  和从起点到交点的距离  $t$  能通过上式的线性方程得到. 上式可认为是三角形到

起点的几何变换,将其变换为  $y\text{-}z$  平面上沿以光线方向为  $x$  方向排列的一个三角形.见图(图3)(其中  $M = [-D, V_1 - V_0, V_2 - V_0]$  是矩阵).

设  $E_1 = V_1 - V_0, E_2 = V_2 - V_0, T = O - V_0$ , 则

$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{|-D, E_1, E_2|} \begin{bmatrix} |T, E_1, E_2| \\ |-D, T, E_2| \\ |-D, E_1, T| \end{bmatrix}$$

根据线性代数,可知  $|A, B, C| = -(A \times C) \cdot B = -(C \times B) \cdot A$ . 因此

$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{(D \times E_2) \cdot E_1} \begin{bmatrix} (T \times E_1) \cdot E_2 \\ (D \times E_2) \cdot T \\ (T \times E_1) \cdot D \end{bmatrix} = \frac{1}{P \cdot E_1} \begin{bmatrix} Q \cdot E_2 \\ P \cdot T \\ Q \cdot D \end{bmatrix}$$

其中  $P = (D \times E_2)$  且  $Q = T \times E_1$ . 在算法实施时,可利用这些要素来加速求交运算.

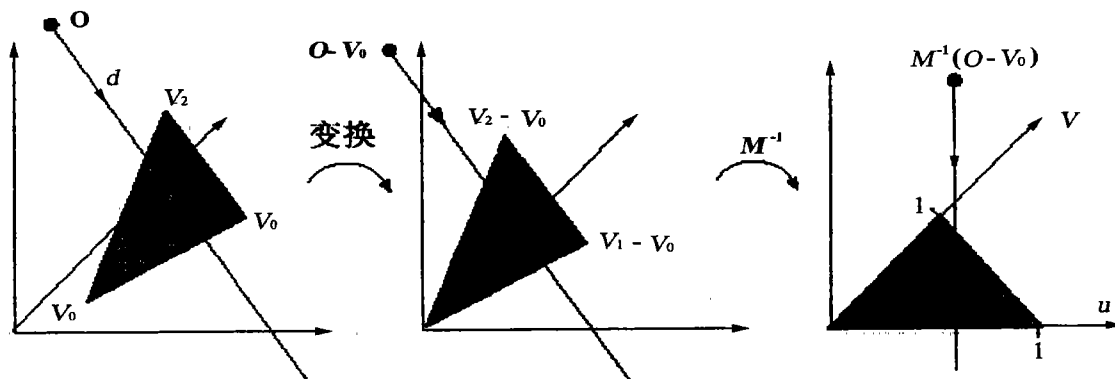


图3 光线起点的变换

## 6 结论

拾取功能的实现是在三维场景中实现查询功能的关键技术,其效率直接影响到与场景的交互的实时性,是有效地实现虚拟现实系统的关键.在对三维地形进行分析时,更强调交互的精确性,因为需取得精确的三维坐标来进行计算,此时对拾取功能的精度和效率提出了更高的要求,而基于光线投射算法实现交互功能却能较好地满足这一要求.

### 参考文献:

- [1] 彭群生等. 计算机真实感图形的算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 122~220.
- [2] 侯阳, 迪克. 三维图形、动画编程实例[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 263~468.
- [3] Donald Hearn, M. Pauline Baker. 计算机图形学[M], 北京: 清华大学出版社, 1998. 527~544.

## Realizing interaction with three - dimension scene using Ray - Casting method

TU Chao, YAN Hui - wu, WANG Xin - sheng

(Institute of Resource and Environment Science, Wuhan University 430070, China)

**Abstract** The paper introduces in detail the principle and implementation of realizing interaction with three - dimension scene using Ray - Casting method. Aiming to improve efficiency, the paper introduces the accelerative method using level of bounding - box technology.

**Key words:** ray - Casting; pickup; level of bounding - box technology