

基于逆向光线跟踪与图像绘制的运动水面反射场景绘制

李 纲 罗玉军

(川北医学院基础医学院计算机教研室 南充 637007)

摘 要 提出了一种结合图像绘制和逆向光线跟踪的绘制算法来生成水面反射场景。首先,采用逆向光线跟踪方法获得视点所见水面反射场景点;然后在反射光线与场景相交点求解时,采用场景图像平面搜索,并将搜索到的图像平面象素点反向投影到观察坐标系求取光线与场景物体相交点以获取反射物颜色;最后按照 Fresnel 公式计算获得视点所见的水面上某点的颜色,通过对整个图像平面进行遍历,获得水面反射场景。使用该方法绘制的水面反射场景能够物理真实地模拟水面反射效果。对于波动水面附近或漂浮于水面上物体的反射场景,该方法较其它方法能够更好地获得物理真实的绘制结果。

关键词 水面反射,图像绘制,逆向光线跟踪

中图法分类号 TP391.7 文献标识码 A

Rendering of Moving Water Reflection Based on Backward Ray Tracing and Image Based Rendering

LI Gang LUO Yurjun

(School of Basic Medical Science, North Sichuan Medical College, Nanchong 637007, China)

Abstract A water reflection algorithm was presented based on image based rendering (IBR) and backward ray tracing. At first, backward ray tracing method was used to find the reflection point set of water surface which can be seen by eye. Then the scene image plane research was used to find out the cross point of reflected light ray and the scene objects and the cross point in the image plane was projected inversely to the view coordination system to find the color of reflected things. Finally, the point color which can be seen by eye was calculated by Fresnel equation. The algorithm can physically simulate the water reflection effect especially when there are things nearby or floating on the moving water.

Keywords Water reflection, IBR, Reverse ray tracing

1 引言

水面场景是虚拟现实场景中重要的组成部分之一,水面反射则是水面场景中最为突出的表现画面。水面反射场景研究范围宽广,包括海面、湖泊、池塘以及下雨后湿润的路面和水坑的反射等。

本文主要研究了湖泊和池塘的反射场景绘制方法。在水面反射中,广泛应用的反射场景绘制方法是 cube map^[1-5],即通过对预先生成的水面全局环境场景的 cube map 纹理进行采样,获得水面上各点反射的环境场景,以生成水面反射场面。通过 cube map 采样的方式能够较好地模拟海面上的反射场景,结合光线反射理论可以生成较真实的海面反射场景。但将其用于如湖泊和池塘等小范围水面反射时,则有其局限性, cube map 虽然能够模拟宏观水面反射场景,但无法模拟像湖泊等小范围水面四周物体及湖面上飘浮物体的局部反射。在局部反射模拟时,主要采用的方法是通过渲染水面以上物体的反射场景到纹理并扰动纹理坐标的方式来获得水面波动时的水面反射效果^[1,3,6,7]。这种方法需对水面以上的场景进行两次绘制,第一次绘制水面以上场景,第二次绘制水面

以上场景的反射场景到纹理。因此,对于几何形体较复杂的场景,会影响其绘制速度,而且这种方式无法模拟波动水面的倒影的物理真实变化,而只是通过纹理扰动来近似模拟倒影在波动水面的变化,产生的倒影波动有一定的非真实感。

本文的水面反射算法将图像绘制 (Image based rendering) 技术^[8,9]与光线跟踪技术^[10-12]相结合,通过视域逆向光线跟踪结合图像空间搜索计算运动水面反射场景,并与水面折射场景叠加,形成水面局部反射效果,由于算法基于反射定律,因此它能够真实地模拟水面运动的倒影变化,同时其时间复杂度与所绘制的图像的分辨率有关,而与场景复杂度和水面形状大小、个数无关。

由于湖面和池塘水面通常会受到环境中风和物体落入水面等因素的影响而产生起伏和波动,因此湖面和池塘的反射不能够完全等价于水平的镜面反射,对其反射的计算必须以水面的表面法线为依据。人眼所看到的湖面反射场景实际是被反射物体经由湖面反射后,与水下折射光线相结合后的光线进入人眼所形成的。当湖面平静时,可用镜面反射计算物体经由湖面反射进入眼睛的反射场景。由于水面可能会产生波动,进入眼睛中的反射场景还与水面某一时刻各点的法线

本文受四川省教育厅科研项目(13ZA0094),川北医学院科研发展计划资助项目(CBY12-A-ZP10)资助。

李 纲(1978—),男,博士,讲师,主要研究方向为虚拟现实、计算机图形学、生物信息计算, E-mail: lswmailed@163.com; 罗玉军(1974—),男,硕士,副教授,主要研究方向为模式识别、专家系统。

方向相关,运动水面上任意一点可能反射的水面上的物体点会随着该点表面法线方向的变动而实时变化。从理论上讲,水面上某一点可能反射场景中任意一个物体点。由于物体点的数量巨大,如果通过物体到眼睛的正向反射来获得反射场景,确定一个水面点所反射的物体点需要遍历整个场景,其计算开销巨大,无法通过物体到眼睛的正向反射获得反射场景。因此本文算法采用由眼睛所在位置射出光线,依据水面法线方向,反向计算入射光线方向,并通过在已绘制的场景图像平面中搜索对应反射物体像素点的方式实现水面反射场景的绘制。

2 视点逆向光线跟踪

当反射水面为平静水面时,可将水面视为一个平面。通过渲染的场景图像中每一点与视点的相对关系,结合反射定理,得到反射水面上某点所映射的水上物体。但当水面波动时,由于水面各点的法线方向随水面波动实时改变,用前述方法计算一个水面反射点的反射颜色,需要对图像平面上所有像素点进行遍历,其计算开销巨大。

为解决此问题,本文采用逆向光线跟踪算法寻找水面反射的物体点。如图1所示,假定光线 ℓ 由视点 i 射出,与水面上任一点 ρ 相交,经反射点 ρ 反射后,形成反射光线 ℓ' ,寻找反射光线 ℓ' 与场景物体的交点,若相交可得到交点 χ ,则反射点 ρ 反射的水面上物体点颜色可取点 χ 处的物体颜色作为点 ρ 的反射颜色值。

反射光线 ℓ' 与场景物体求交,会出现两种情况:第1种情况是交点 χ 存在,如图1(a)所示,则可按上述原则获得点 ρ 的反射颜色值;第2种情况如图1(b)所示,反射光线 ℓ' 不会被场景物体所遮挡,交点 χ 不存在,则反射光线 ℓ' 可射到无穷远处去。实际上,可将天空认为是一个巨大的球状场景物体,所有未被场景物体遮挡的反射光线均会被天空球遮挡。这样两种情况可以合并为一种情况,即反射光线 ℓ' 必与场景物体相交。当反射光线 ℓ' 与天空球相交时,可认为反射点 ρ 所反射的颜色为天空球上交点 χ 的颜色。

具体实现时,可将反射光线 ℓ' 的方向矢量作为采样的纹理坐标,采样场景天空盒的 cube map 纹理,获得反射点 ρ 的反射颜色值。

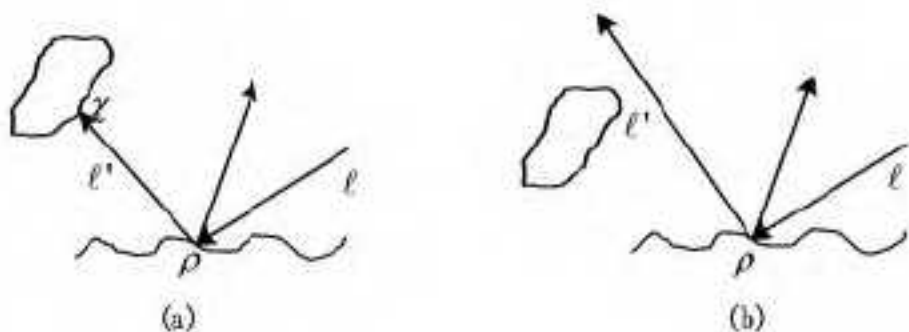


图1 逆向光线跟踪求相交点

2.1 搜索图像平面获取相交点

正确计算反射光线与场景物体相交点是获得水面反射场景的关键所在。由于反射光线与场景物体间相对位置关系没有可用先验知识,如果在世界坐标系或观察坐标系中计算反射光线与场景物体的相交点 χ ,反射光线 ℓ' 需与场景中所有物体求交,并对所有交点进行判断,取与水面反射点空间距离最近点为正确的相交点。在场景复杂的情况下,求解相交点的计算开销很大。

本文算法在投影后的图像平面中求解反射光线与场景物

体的相交点 χ 。由于在图像平面中处理相交性问题,所需要处理的是图像平面上的像素点集,其时间复杂度与图像分辨率有关,而与物体复杂程度和场景物体数量无关。

如图2所示,对水面上任一点 ρ ,将其投影到图像平面 P 上,对应图像平面上一点 ρ_{prj} ;同时,视点 i 射出的光线 ℓ 经点 ρ 反射后,形成反射光线 ℓ' 。将 ℓ' 投影到图像平面 P 上,形成以 ρ_{prj} 为起始点的图像平面射线 $\rho_{prj}m'$ 。

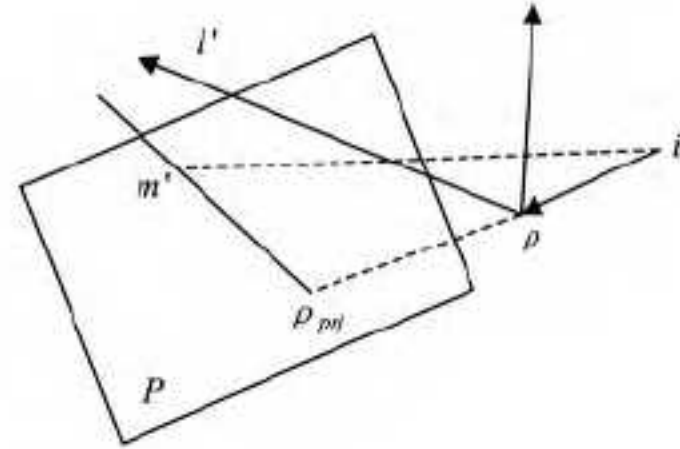


图2 反射光线在图像平面上的投影

在图像平面 P 上,以 ρ_{prj} 为搜索起始点,沿方向 $\rho_{prj}m'$ 为搜索方向进行图像平面搜索,直到找到相交点或搜索到图像平面边界为止,搜索的方法可用顺序查找或二分查找方法。

对每个水面点 ρ ,求其反射的场景物体点颜色的通常想法是:以水面点 ρ 在图像平面 P 上的投影像素点 ρ_{prj} 为搜索起始点,沿投影到图像平面上的射线 $\rho_{prj}m'$ 的方向进行搜索,将该方向上的每个像素点的深度值(以下简称 Z_p)与反射光线 ℓ' 的深度值 Z_f 进行比较,如果 $Z_p \leq Z_f$,则认为反射光线与场景中某物体相交,那么水面上该像素点应该映射此交点处的颜色值;如果 $Z_p > Z_f$,则继续沿此方向搜索下一像素点,如果搜索到图像平面的边界处,则停止搜索。

但图像平面上的像素点是对连续场景空间的离散采样,像素点反投影到观察坐标系下,与视点共同确定的射线并不一定与反射光线有相交点。如图2所示,点 m' 为反射光线在图像平面上的投影射线上的一点,由于图像平面上的投影射线是直的,在大多数情况下,图像平面上的像素点 m' 并不恰好位于平面上,而是在方向的上方或下方,因此交点 m 不一定存在。所以,反射光线 ℓ' 与视点 i 到 m' 的连线的交点无法以此方法获得,则深度值比较也就无法进行,那么 ℓ 与场景物体的相交性就无法判断。

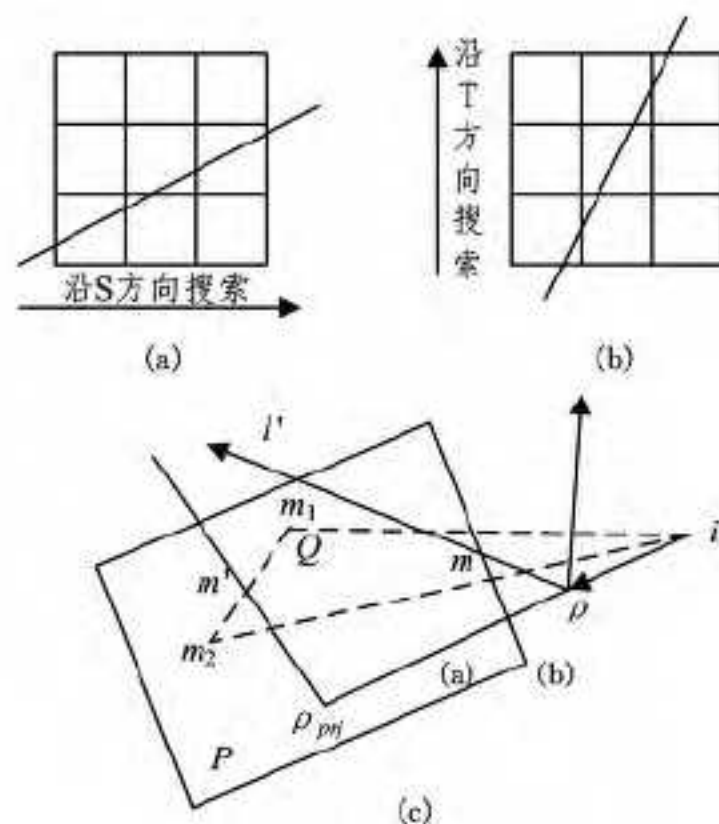


图3 图像搜索获取相交点

为解决此问题,在图像平面 P 上,取搜索方向上搜索射线当前搜索点最邻近的两个像素点(当沿 S 方向搜索时,取 S 坐标相同的两相邻像素点;当沿 T 方向搜索时,取 T 坐标相同的两相邻像素点,如图3(a)、(b)所示),并将两像素点

反投影到观察坐标系中。设两像素点反投影到观察坐标系后对应的两个空间点为 m_1, m_2 , 其与视点 i 共 3 点决定一个平面 Q , 如图 3(c) 所示。平面 Q 必与反射光线 ℓ' 相交, 获得相交点 m 后, 求 m 与视点 i 的空间距离, 并与两像素点中最接近投影射线的像素点深度值 D 进行比较。如果 $D_{me} \geq D$, 则反射光线 ℓ' 与场景物体相交, 找到相交点, 搜索结束; 如果 $D_{me} < D$, 则沿搜索方向搜索下一像素点, 继续重复寻找相交点, 直到图像平面的边界为止。

2.2 水面反射场景的渲染

水面场景与观察水面的角度有很大的关系。当与水面垂直向水面看去时, 看到的是水面以下的物体; 而当与水面平行的视角向水面看去时, 看到的是水面以上的物体场景。水面上的景象与观察水面的角度的关系由 Fresnel 公式^[13] 决定, 即水面上实际看到的场景既有水面反射的水上物体场景又有水面折射的水下物体场景, 两者共同决定水面上看到的实际场景。如果水面上某点的折射颜色为 $Cr_{refract}$, 水面以上反射场景的颜色为 $Cr_{reflect}$, 由 Fresnel 公式计算得到的 Fresnel 系数为 F , 则水面上此点的颜色 Cr 为:

$$Cr = Cr_{refract} \times (1 - F) + Cr_{reflect} \times F \quad (1)$$

由于本文主要研究水面反射场景的生成算法, 因此对水面以下折射场景选择固定的颜色值 $Cr_{refract}$, 并与计算所得的水面反射像素点的颜色值 $Cr_{reflect}$ 按式(1)进行混合, 并以此公式计算得到的颜色值作为水面反射场景的最终颜色。

3 实验结果及分析

实验软件环境底层使用 OpenGL 为图形引擎, 实验平台配置为: Windows XP 操作系统, 采用 OpenSceneGraph(简称 OSG) 作为渲染软件(使用 OpenGL 为底层图形引擎, 着色语言使用 GLSL); 硬件配置为 CPU(AMD Athlon™ 64 X2 Dual, 2.21GHZ), 内存大小 2GB, PCI Express, 显卡为 NVIDIA Geforce 8800GTX。

当场景图像分辨率在 $640 \times 480 \sim 1400 \times 1050$ 间变化时, 选取相同视点位置和角度, 实验测得场景渲染帧率随场景图像分辨率变化的数据, 如表 1 所列。

表 1 不同图像分辨率下的场景渲染帧率

场景图像大小	帧率(帧·秒 ⁻¹)
640 × 480	62.5
800 × 600	31.25
1024 × 768	15.87
1400 × 1050	6.41

从表 1 可知, 场景渲染帧率与场景图像分辨率大小反向相关。由于算法需要在每个搜索像素点处进行求交运算, 因此, 随着场景图像分辨率增大, 算法所需搜索的图像平面像素点数和求交运算数量增加, 使得场景渲染帧率随场景图像的分辨率变高而降低。

从水面反射场景的绘制效果来看, 与使用倒影纹理映射的水面局部反射相比, 使用逆向光线跟踪结合图像平面搜索绘制的水面倒影能够物理真实地模拟水面的局部倒影场景, 其展现的水面倒影场景与真实世界中的水面倒影的位置一致。当水面波动时, 其也能较真实地反映水面对水面以上物体真实的反射情形。平静水面的水面倒影如图 4 所示, 波动水面的水面倒影如图 5 所示。与前述的通过纹理扰动的方法在水面波动时产生反射倒影的绘制方法相比, 本文的绘制方

法在绘制局部水面附近的物体和运动水面反射上更具有物理真实性, 也更能展现较强的场景真实感。



图 4 平静水面的水面倒影



图 5 波动水面的水面倒影

与其它的图像绘制算法一样, 只有当能获得水面反射所需要的所有图像信息时, 所绘制出来的水面反射倒影才是完整的, 随着相机角度和位置的变化, 当有部分水面倒影绘制所需要的图像信息不完全时, 在本应该出现场景物体倒影的地方会出现空洞。由于本文算法在没有找到相交点时采用天空盒的对应点颜色值为倒影的颜色值, 因此如图 5 所示, 图中左右边界处水面倒影有一定的不真实感, 在本应是楼房倒影的地方出现天空的倒影。如何通过自适应的方法获得既不显著增加算法搜索开销又能够满足水面倒影所需的图像信息也是进一步研究的方向之一。与图像绘制基于真实照片图像重构场景不同, 本文的图像由三维绘制生成, 不仅含有图像颜色信息, 也含有空间信息(位置、深度值), 因此, 在相机位置发生变化时, 能够及时获取当前相机位置处的场景信息, 其绘制所依据的图像信息量比单纯图像绘制要多, 也使其绘制效果优于单纯的图像绘制。

参考文献

- [1] Johanson C. Real-time water rendering [D]. Master of Science thesis, 2004
- [2] 李起成, 等. 动态天空环境下的实时海洋渲染[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(2): 172-177
- [3] Natterlund M. Water Surface Rendering [D]. Master's Thesis in Computing Science, Umea University, 2008
- [4] 任鸿翔, 等. 大规模海浪场景的真实感绘制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(12): 1617-1622
- [5] 李一兵, 等. 基于 Irrlicht 引擎的实时浅水效果模拟[J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(8): 102-105
- [6] 谭同德, 等. 应用折射反射纹理的实时水面仿真技术[J]. 郑州大学学报, 工学版, 2011, 32(2): 88-92
- [7] 张文辉, 等. 实时水面渲染[J]. 计算机与数字工程, 2011, 39(3): 114-117
- [8] McMillan L. An Image Based Approach to Three Dimensional Computer Graphics [D]. University of North Carolina, Chapel Hill, NC, USA, 1997
- [9] Popescu V, et al. The WarpEngine: An architecture for the post-polygonal [C] // Proc the SIGGRAPH' 2000. New Orleans, La, 2000: 433-442
- [10] Arvo J. Backward Ray Tracing [C] // SIGGRAPH' 86 Course Note, Developments in Ray Tracing. 1986: 259-263
- [11] Christen M. Ray Tracing on GPU [D]. Master's thesis, University of Applied Sciences Basel, 2005
- [12] Karlsson F, Ljungstedt C J. Ray Tracing Fully Implemented on Programmable Graphics Hardware [D]. Master's thesis, Chalmers University of Technology, 2004
- [13] Wikipedia. Fresnel equations [EB/OL]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel-equations>