邻域辅助径迹法提高射线追踪效率

黄敏杰 李 葳

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083) (厦门大学 物理与机电工程学院, 厦门 361005)

武 哲

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对面元形式的目标数据,从提高入射点求解的成功率着手,采用增加对参考路径上参考面元的相邻单元进行相交性判断的方法,并将普通径迹法的单参考路径改为双参考路径,提高了径迹法射线追踪的效率. 对邻域辅助径迹法在样条曲面格式目标文件上的应用作了探讨. 分析了该方法与其它方法的兼容性和对计算资源的占用情况,给出了该方法提高射线追踪速度的上限. 以2个典型目标为例,对该方法的效果进行了测试. 结果表明,该方法通过减少真实、遍历式追踪的次数,能将普通径迹法射线追踪过程的计算量减少到原来的1/3左右. 该方法对目标具有很强的适应性,并克服了普通径迹法对射线管的划分密度的依赖性.

关 键 词: 计算机图形学; 射线追踪; 耦合散射; 径迹法; 样条曲面; 邻域辅助径迹法

中图分类号: TP 391.41

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)03-0298-04

Neighborhood-aided trace method in improving efficiency of ray tracing

Huang Minjie

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Li Wei

(Department of Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Wu Zhe

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract In order to improve the success rate of scattering point search, the neighbors of the reference elements in reference paths were considered while the scattering points were not found on the reference elements, and the single reference path was also doubled to increase the efficiency of ray tracing. The application of this neighborhood-aided trace method in spline curve targets was also considered. The compatibility and hardware resource requirement were discussed, and the theoretical upper limit of the efficiency was given. The computing experiment on two typical targets was conducted. Results show that this method could reduce the computational cost to 1/3 of original by decreasing the true and all-over tracing times. It also proves that this method had high stability and applicability to the complexity of targets, and overcomes the disadvantage of the traditional method which is sensitive to the ray tube division.

Key words: computer graphics; ray tracing; coupling scattering method of trace; spline curve; neighborhood-aided trace method

射线追踪法(RT)是分析声、光、电磁场、热辐射和机械振动等场量的传播的一种极为有效的方法;在计算机图形学领域, RT法对于精确模拟镜面反射、透射和阴影效果也起着极为重要的作

收稿日期: 2006-04-21

作者简介: 黄敏杰(1982-),男,湖北孝感人,博士生, huangminjiebuaa@163.com.

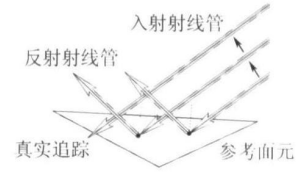
用[1-3]. 基于波长远小于目标特征尺寸时波动近似按镜面反射路径传播这一假设, RT 法将源场离散成一根根射线管, 按照几何光学的原理追踪射线管的散射路径, 进而确定源场在目标和环境中的传播情况[4]. 该方法具有原理简单, 容易实现等很多优点, 但是也存在计算量过大的问题: 为保证计算精度, 射线管尺寸必须小于波长的 1/10; 同时, 为了获得准确的散射点, 每条射线管都必须与目标表面遍历求交, 这直接导致 RT 法的计算量与射线管的数量 m 和目标的控制参数数目 n 的乘积 (mn)直接相关[1,5]. 因此, 对于大型目标或较复杂的传播环境, RT 的计算量是相当惊人的. 目前减小 RT 计算量的途径主要有空间分割法、径迹法、降维法、射线管划分口面优化以及硬件追踪技术等[4,6-10].

径迹法提高追踪效率的原理是: 对新的射线管进行追踪时, 以相邻的、已计算过的射线管的散射路径 (参考径迹) 为参考来寻找散射点和散射路径[1]. 本文将对径迹法作详细的探讨, 并提出新的改进措施.

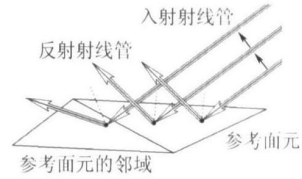
1　径迹法原理

通常目标的数据文件都是以面元或样条曲面的形式给出的. 为计算方便, 样条曲面形式的目标数据也常常再合理地离散成面元来处理, 因此考虑面元形式目标的 RT 法具有较大的实际意义.

对于面元形式的目标, 径迹法简化为: 射线管先在相邻的、已计算的射线管发生反射的面元 (参考面元) 上寻找反射点 (射线管与面元求交点, 简称求交). 通常的方法是仅仅参考已计算的射线管发生反射的面元, 如果新射线管在这些面元上找不到反射点, 则进行一般的遍历追踪计算[1]. 这种方法的缺陷是, 当面元的尺寸与射线管尺寸接近时, 在参考面元上成功找到反射点的概率大大降低, 于是整个径迹法将频繁地陷入遍历追踪计算, 如图 1a所示. 如果能设法充分利用参考路径和参考面元提供的信息, 则可提高径迹法的效率. 本文按照这一思想, 设计了一种利用面元的相邻单元 (或邻近区域, 简称邻域) 来辅助径迹法找到反射点的方法, 以提高径迹法的效率. 该方法的原理可以用图 1b来表示: 事先存储面元相邻单元的信息; 径迹法追踪时, 如果在参考面元上找不到反射点, 就在参考面元附近的面元上搜索; 在附近面元上搜索仍然失败后, 再转入遍历追踪计算.



a　普通径迹法



b　邻域辅助径迹法

图 1　邻域辅助径迹法的设计思想

2　邻域辅助径迹法

2 1　邻域的提取

邻域辅助径迹法需要在射线追踪之前增加邻域提取的过程. 如果目标文件是以样条曲面的形式给出的, 则可以在离散成面元的过程中顺便记录每个面元的相邻面元信息. 如果目标文件已经是离散的面元格式, 则需要专门进行提取操作, 可以很容易根据造型工具中棱边显示的原理来设计效率很高的邻域提取算法.

2 2　径迹追踪

采用邻域辅助改进之后, 径迹追踪过程也需要做适当的调整, 其流程如图 2 图中, 虚线框内的部分是邻域辅助径迹追踪法, 虚线以外的部分是普通径迹法追踪[1,4].

邻域辅助追踪安排在参考路径中的面元与当

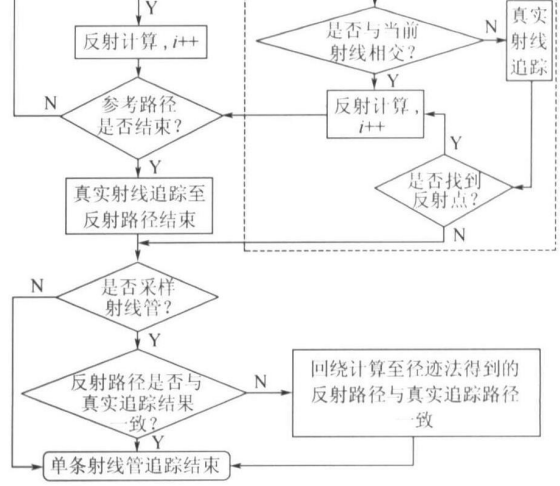


图 2　邻域辅助法的流程图

前射线管求交失败之后进行. 实际上编程时常常将每个面元的相邻单元的信息存储在该面元信息中, 计算时, 求交的优先顺序如下:

参考面元→参考面元的“近邻”→参考面元的“远邻”→参考面元的相邻单元的“近邻”、“远邻”→…

邻域的存储也按照这个顺序, 以减小优先级判断的计算量. 这样安排求解散射点的顺序在提高径迹法成功找到反射点的概率的同时, 也减小了与面元盲目求交的可能性.

如果进一步采用下面介绍的二维递推法, 则可以将 2条径迹上的相参考面元和参考面元的邻域按照由近到远的顺序存储. 这时, 径迹法找到反射点的成功率将进一步提高.

2.3 双参考路径措施

通常, 射线管出发点按位置排列是一个二维矩阵的形式. 射线反射路径通常是逐行或逐列计算的. 利用这一特点, 为了进一步提高由参考路径找到与目标的交点的成功率, 新射线管追踪时可以用 2条已计算的射线管的反射路径作为参考. 如图 3, 如果射线管是按从上到下、从左到右逐行计算的, 则计算第 $j+1$行、$i+1$列的射线管 (以下记为射线管 $(j+1, i+1)$), 对应的路径为 $P_{j+1,i+1}$) 时, 可以将该射线管左侧和上方相邻的 2条已计算过的射线管的反射路径作为参考, 即递推过程由一维递推

$$P_{j+1,i+1} = f(P_{j+1,i}) \qquad i \geqslant 0 \qquad (1)$$

或

$$P_{j+1,i+1} = f(P_{j,i+1}) \qquad j \geqslant 0 \qquad (2)$$

改为二维递推

$$P_{j+1,i+1} = f(P_{j,i+1}, P_{j+1,i}) \qquad i, j \geqslant 0 \qquad (3)$$

这时射线管 (0, 0)仍然需要真实计算, 第 1行和第 1列的其它射线管均只有一条径迹可供参考.

当射线管 $(j+1, i+1)$计算完成后, 用射线管 $(j+1, i+1)$的反射路径信息及时覆盖射线管 $(j, i+1)$的反射路径信息, 供射线管 $(j+1, i+2)$计算需要. 这样可以始终只记录一行或一列射线管的反射路径, 以节省内存开销. 还有多种其它的二维递推方式可供选择, 存储反射路径的内存开销还可以进一步压缩到图 3所示方法的 1/2

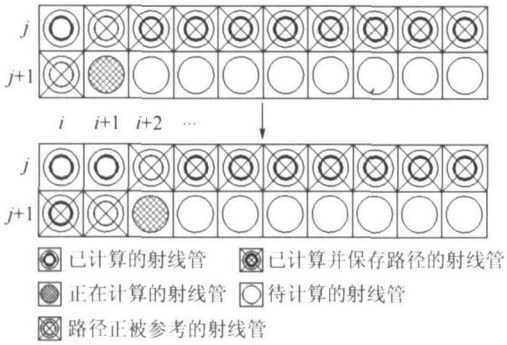


图 3 双参考路径措施

2.4 在曲面形式目标上的应用

对于样条曲面形式的目标数据, 反射点的求解通常归结为线性方程组的求解. 按照径迹法思想, 可以用参考路径上反射点的参数作为初始向量, 用迭代法求解新射线管与目标的交点. 如果迭代不收敛, 则可以取参考路径上反射点的邻近点作为新的迭代初始点来试探求解, 这样也可以起到邻域辅助径迹追踪的作用. 同样, 也可以用邻近的 2条参考径迹中的反射点的参数增加可选择的迭代初始点数目. 采用这种方法也需要提前准备曲面控制点的邻近点的信息.

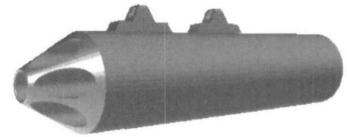
2.5 兼容性及对计算资源的要求

本文提出的邻域辅助径迹法仅仅对径迹追踪部分作了改进, 因此能适用于径迹法应用的所有领域, 且兼容性和局限性也只受径迹法使用的限制. 至于对硬件资源的占用, 径迹法只在单一的射线追踪法的基础上增加一个径迹存储单元; 本方法需要在径迹法的基础上增加如下存储内容: 面元的邻域信息 (约 $n \times 12$个整型数), 1行或 1列射线管的径迹 (约 $m^{1/2}$条径迹). 邻域提取需要存储与 n相同量级的整型数.

3 邻域辅助径迹法的效果

为了充分考察邻域辅助径迹法对射线追踪算法的改进效果, 本文分别用双参考路径改进、邻域辅助法改进和邻域辅助径迹法 (双参考路径 + 邻域辅助) 3种级别的改进措施对图 4所示的 2个目标进行了平行光散射计算, 并与普通径迹法进行了对比.

对于目标 1, 在特定入射角下计算了射线管截面边长由 0.0005m增大到 0.01m时的散射情



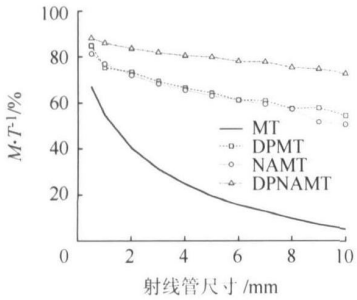
a 目标 1(特征尺寸: 1.4m × 0.33m × 0.42m)



b 目标 2(网格显示模式, 特征尺寸 21.3m × 14.7m × 4.798m)

图 4 计算目标

况, 径迹法找到的反射点在所有反射点中所占的比例统计结果如图 5 结果表明, 当射线管划分较密时, 如果采用邻域辅助径迹法, 则近 90% 的反射点可以由径迹追踪找到; 对于普通径迹法, 这一比例在 70% 以下. 当射线管尺寸增大时, 普通径迹法的径迹追踪找到反射点的比例迅速下降到 10% 以下, 而采用邻域辅助径迹法之后, 这一比例仍然维持在 70% 以上. 这充分证明了该方法对于减少射线追踪法计算量的效果, 同时也反映了改进方法对射线管划分的稳定性. 从图 5中还可以看出, 即使仅采用一种改进措施, 改进效果也是非常明显的. 另一方面, 射线管尺寸为 0. 0005m 时, 普通径迹法与 3种级别改进措施的真实追踪找到反射点次数之比分别为 2. 17, 1. 76和 2. 78; 当射线管尺寸增大为 0. 01 m 时, 这个比例分别变为 2. 09, 1. 93和 3. 51. 这说明在射线管划分较粗时, 邻域辅助径迹法的改进效果更加明显. 因为真实追踪的次数决定整个算法的计算量, 以上比例也就是改进后射线追踪法计算速度提高的上限.



MT: 普通径迹法; DPMT: 双参考路径改进;
NAMT: 邻域辅助法改进; DPNAMT: 邻域辅助径迹法

图 5　目标 1径迹法找到的反射点占所有反射点的比例

目标 2比目标 1更具代表性. 表 1给出的计算结果表明, 邻域辅助径迹法中, 径迹追踪找到反射点的比例高达 87. 79%, 单独采用其中的一种改进措施, 这一比例也都在 84% 左右.

表 1　目标 2对平行光散射的各种计算级别结果对比 (射线管尺寸: 0. 001m)

计算级别	PTFRPC	MTFRPC	$M \cdot T^{-1}$ /%	计算耗时
MT	13. 655	30. 960	69. 39	9 h29 min
DDMT	7. 176	37. 461	83. 92	8 h54 min
NAMT	7. 247	38. 213	84. 06	6 h18 min
DPNAMT	5. 461	39. 279	87. 79	5 h47 min

注: RTFRPC为真实追踪找到反射点次数; MTFRPC为径迹法找到反射点次数; $M \cdot T^{-1}$为径迹追踪找到反射点次数与总数之比.

普通径迹法与 3种级别改进措施的真实追踪找到反射点次数之比分别为 1. 9, 1. 88和 2. 5. 这说明邻域辅助径迹法对目标本身也有很强的稳定性和适应性. 从计算耗时来看, 由于双参考路径改进的程序代码执行效率稍差, 所以采用双参考路径改进之后计算速度仅仅略有改善. 同时采用 2种改进措施的邻域辅助径迹法的计算速度比普通径迹法提高了约 1. 64倍, 低于理论上限 2. 5.

4　结 束 语

通过算例可以看出, 采用本文提出的邻域辅助径迹法对径迹射线追踪进行改进后, 真实、遍历射线追踪的次数可以减少到改进前的 1/3左右. 这种改进方法对目标具有良好的适应性, 并且克服了径迹法对射线管划分要求过高的缺点.

参考文献 (References)

[1] 黄沛霖. 大型、复杂耦合散射目标的 RCS 计算方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 2003: 7-8
Huang Peilin. Research on RCS computing technique of large-scale and complicated coupling scattering object[D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2003: 7-8 (in Chinese)

[2] Kudoh Y, Aoki Y, Aoki N. Investigation of acoustical ray tracing method for measurement reflective structure in acoustical archaeology[J]. Int Conf Signal Process Proc, 1998, 2: 1399-1402

[3] Anastassiu H T. A review of electromagnetic scattering analysis for inlets, cavities and open ducts[J]. IEEE Antennas Propag Mag, 2003, 45(6): 27-40

[4] Zhao Huaxia, Reader A J. Fast ray-tracing technique calculate line integral path in voxel arrays[C]//IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Piscataway, NJ: IEEE, 2004, 4: 2808-2812

[5] Glassner A S. An introduction to ray tracing[M]. San Diego: Academic Press, 1989

[6] Xu Zhiyuan, Tang Zesheng, Tang long. An efficiency rejection test for ray/triangle mesh intersection[J]. Journal of Software, 2003(10): 1787-1794

[7] Bhalla R, Ling Hao. Fast inverse synthetic aperture radar image simulation of complex targets using ray shooting[J]. IEEE Int Conf Image Process, 1994, 1: 461-465

[8] Giampaolo E D, Bardati F, Sabbadini M. Recent improvement in beam tracing[J]. IEEE Topical Conference on Wireless communication Technology, 2003: 255-256

[9] Catedra M F, Perez J, Saez de A F, et al. Fast ray-tracing method for calculating the propagation in indoor environment[C]//IEEE Antennas Propag Soc AP S Int Symp. Piscataway, NJ: IEEE, 1998, 3: 1656-1659

[10] Norman R J, Cannon P S. Two-dimensional analytic ray tracing technique accommodating horizontal gradients[J]. Radio Science, 1997, 32(2): 387-396

(责任编辑: 文丽芳)