

硕士学位论文

复杂表面空间目标仿真成像计算方法

**SIMULATION IMAGING CALCULATION
METHOD OF COMPLEX SURFACE SPACE
TARGET**

李淑贤

哈尔滨工业大学

2020 年 6 月

国内图书分类号： TP399

学校代码： 10213

国际图书分类号： 528.1

密级： 公开

工学硕士学位论文

复杂表面空间目标仿真成像计算方法

硕士研究生：李淑贤

导师：丛明煜 教授

申请学位：工学硕士

学科：光学工程

所在单位：航天学院

答辩日期：2020年6月

授予学位单位：哈尔滨工业大学

Classified Index: TP399

U.D.C: 52

Dissertation for the Master Degree in Engineering

**SIMULATION IMAGING CALCULATION
METHOD OF COMPLEX SURFACE SPACE
TARGET**

Candidate:	LiShuXian
Supervisor:	Prof. Cong Mingyu
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Optical Engineering
Affiliation:	School of Astronautic
Date of Defence:	June, 2020
Degree-Conferring-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘 要

在执行对空间目标跟踪, 捕获等空间任务时, 需要对空间场景中的各种目标进行成像观测。但由于一些因素的限制, 无法获得空间目标在各种姿态和光照条件下的实际成像结果, 且开展此类实际实验成本太高; 因此开展地基光学成像仿真模型与方法研究对于空间目标成像观测具有重要的应用价值。

本课题将以地基光学仿真成像仿真观测实验为背景, 具有复杂表面的空间目标为目标, 深入研究和讨论空间目标的光学特性建模和成像仿真计算方法。论文的主要研究工作包括以下三个方面:

(1) 复杂表面空间目标的几何特性和光学特性建模, 提出了针对复杂表面空间目标的几何结构建模方法, 利用有限元分析软件将模型进行网格划分, 并着重对微表面尺度较大的目标部件利用分形几何思想进行进一步几何结构模型构造, 经过实验验证这种方法能有效的表示出微表面尺寸较大的表面的特性; 并针对空间目标表面不同材质提出了适合每种材质特性的光学特性模型, 且实验验证其光学特性模型符合实际材质在光线下的性质。

(2) 仿真成像辐射特性解算, 成像仿真主要目的是求出成像场景中相机像面每个像素点的像素值, 论文中采用光线追踪算法理论探讨仿真成像计算方法, 使用投影相机模型解决物像成像变换关系, 并利用辐射传输方程解决光线传输过程中的辐射传输特性, 而蒙特卡洛方法对辐射传输方程中的积分进行求解, 最终计算出从像面发出的每根光线的辐射度作为像素值。

(3) 复杂表面空间目标仿真成像方法实现, 使用 C++ 语言对成像仿真过程进行编程模拟, 首先编写 stl 文件的读入函数导入空间目标几何结构, 赋予空间目标表面每个离散化三角面元其对应的 BRDF 值, 并利用光线追踪程序 pbrt 接口实现对复杂表面空间目标的成像仿真; 结果表面生成的仿真图像较为理想。

关键词: 光学特性; 几何建模; BRDF; 光线追踪; 辐射解算; pbrt

Abstract

When performing space tasks such as tracking and capturing space targets, various objects in the space scene need to be imaged and observed. However, due to the limitations of some factors, the actual imaging results of the space target under various postures and lighting conditions cannot be obtained, and the cost of conducting such actual experiments is too high; therefore, the research of ground-based optical imaging simulation models and methods for space object imaging observation has Important application value.

This topic will take the ground-based optical simulation imaging simulation observation experiment as the background, and the spatial target with complex surface as the goal. In-depth study and discussion of the optical characteristic modeling and imaging simulation calculation method of the spatial target. The main research work of the thesis includes the following three aspects:

(1) Modeling of geometric and optical characteristics of complex surface space targets, a geometric structure modeling method for complex surface space targets is proposed, and the model is meshed using finite element analysis software, with a focus on the larger micro surface scale The target part of the model uses the fractal geometry idea to further construct the geometric structure model. It has been experimentally verified that this method can effectively represent the characteristics of the surface with a large micro-surface size; and for the different materials of the space target surface, suitable for each material characteristic is proposed Optical characteristic model, and experiments verify that the optical characteristic model is consistent with the properties of the actual material under light.

(2) Simulation of imaging radiation characteristics. The main purpose of imaging simulation is to find the pixel value of each pixel of the camera image surface in the imaging scene. The ray tracing algorithm theory is used in the paper to discuss the simulation imaging calculation method and the projection camera model solution Image transformation relationship, and use the radiation transmission equation to solve the radiation transmission characteristics of the light transmission process, and the Monte Carlo method solves the integration in the radiation transmission equation, and finally calculates the radiance of each light emitted from the image surface as Pixel values.

(3) The realization of the imaging method of complex surface space target simulation, using C++ language to program the imaging simulation process, first write the read function of the stl file to import the spatial target geometric structure, and give the spatial target surface its corresponding discrete triangular surface element BRDF value, and use the ray tracing program pbrt interface to achieve imaging simulation of

-v-

complex surface space targets; the resulting surface simulation image is ideal.

Keywords:optical characteristics;geometric modeling;BRDF;ray tracing;radiation solution; pbrt

目 录

摘 要	IV
Abstract.....	V
目 录	VII
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题背景及研究的目的和意义	1
1.2 国内外研究发展现状	2
1.2.1 国内外物理成像仿真方法研究现状	2
1.2.2 国内外微表面光学特性建模研究现状	3
1.3 本文的主要研究内容	5
第 2 章 空间目标几何结构和光学特性建模	6
2.1 目标几何结构建模	6
2.2 微表面几何特征建模	9
2.3 目标光学特性建模	14
2.3.1 双向反射分布函数模型	15
2.3.2 隔热材料光学特性建模	16
2.3.3 金属表面光学特性建模	17
2.3.4 朗伯材质光学特性	20
2.4 本章小结	20
第 3 章 空间目标成像仿真方法	22
3.1 辐射度量定义	22
3.2 空间相机几何成像模型	23
3.3 成像仿真辐射传输方法解算	27
3.3.1 辐射传输方程	27
3.3.2 蒙特卡洛积分求解	28
3.3.3 光线追踪算法	29
3.4 本章总结	31
第 4 章 成像仿真方法理论实现	32
4.1 pbrt 程序	32
4.2 成像仿真场景构建	33
4.2.1 目标几何模型导入	33

4.2.2 三角面元材质绑定	33
4.2.3 透视投影相机和场景光源的构建	37
4.3 光线跟踪算法仿真成像方法实现	38
4.3.1 生成追迹光线	38
4.3.2 光线交叉测试	39
4.3.3 成像仿真循环和输出图像设置	39
4.3.4 加速结构	41
4.4 图像仿真与结果分析	42
结论	48
参考文献	49
攻读学位期间发表的论文及其它成果	52
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限	53
致 谢	1

第1章 绪 论

1.1 课题背景及研究的目的和意义

该课题主要以太空空间目标对象的天基监视以及空间站在实现目标交接操作时使用的光学导航、光学遥感技术使用的成像技术为研究背景，尤其是在搭载星载、机载或弹载平台上所使用的光学相机、光学导引头等光学设备都使用了光学成像技术。利用光学成像技术可以实现对空间环境中的卫星、导弹弹头等空间目标进行成像目标姿态监测，从而达到对空间目标捕获、识别与跟踪等目的。在对空间目标成像检测过程中，安装在运动平台上的光学采集设备在对目标监测时能够频繁的发出的光谱能量子，这些能量子投影到探测器焦面上后，再利用能量的转化处理技术，能够获取探测目标的运动姿态信息。

但是在对能量子的采集过程中会受到地理位置、光照条件、气象条件等环境因素的很大的影响，这样会大大降低目标运动姿态的真实成像结果，从而影响对空间运动目标姿态判断，因此对地基光学成像仿真模型与方法研究对于空间运动目标姿态分析与监测具有重要的应用价值，可为我国的航空航天技术人员提供有效的数据分析和数据交互提供有效的支持，因此也成为我国航空航天领域重要的热点研究问题之一。

根据光电探测系统的工作原理可以发现，光学成像仿真是光电探测系统能够真正的获取实际目标图像以及能否对运动目标识别、姿态分析有着举足轻重的影响。物理的成像仿真是通过利用物理测量和物理推导等方式得出的辐射传输公式来实现对模型进行仿真和计算；而在物理成像仿真中所需的环境元素，比如灯光发射器，材质，灯光等等，都可以通过仿真平台来实现，也可以通过仿真获取不同环境因素对成像效果之间的相互影响。通过物理渲染技术进行的图像仿真是近年来成像仿真研究的主要方向，因为物理渲染能够模拟出更加真实且贴近空间自然环境的图像。

在对空间目标进行地基光学成像模拟仿真时，大部分空间目标的微表面是不光滑的；主要通过划痕、凹槽等方式来反应真实空间目标成像。因为这些细微的因素存在直接影响了材质所表现的光照效果，最主要的光照变化是，由于细微结构对表面反射方向的扰动，使得成像时的镜面反射方式转换为多个方向的不规则散射方式，从而使成像时发生高光反射或者漫反射现象。所以，对具有复杂表面的空间目标进行成像仿真模型的建立有一定的重要意义。本课题将对具有复杂表面的空间目标进行重点分析，以期得到真实感更强，更加贴近物理世界的仿真观测图片，满足仿真平台对图像数据的需求。

1.2 国内外研究发展现状

1.2.1 国内外物理成像仿真方法研究现状

在图像仿真中研究最多也是最久的是光照反射模型, Flat 光照模型是最简单的光照模型, 这种模型通过利用一个面的面法线来计算该面的像素值, 并且假设该面中像素值都是一样的。因此, Flat 光照模型是块状不连续的。

1968 年, Arthur 在他的文章中提出了光线投射 (Ray Casting) 算法, 其具体思路是从摄像机出发, 连接屏幕上的一个像素构成光线, 该光线会与环境中的一条遮住物体的光线发生相交, 因此就假设它表面的颜色就为该表面的像素值。该算法并没有考虑光线接下来的反射和折射部分^[1]。

因此 1979 年, Whitte 提出了经典的光线跟踪方法在光线投射的基础上让光线与物体继续交互, 进一步产生反射, 折射以及散射等效果, 直到光线强度减弱到一定程度或光线逃逸出场景^[2]。该方法极大增强了光照真实感, 可模拟阴影、反射等现象, 但缺点就是计算量过于庞大不能很好模拟软阴影。

此后一些研究人员又陆续对光线追踪实现了更深层次的研究和优化^[3], 比较有代表性的是 1984 年 Cook 把蒙特卡洛计算方式应用到了光线跟踪领域, 从而把传统的光线跟踪方式扩展为分布式光线跟踪算法, 这样可以模拟更多的环境因素如金属光泽、软阴影等等^[6]。

1975 年 Phong 提出了著名的冯氏光照模型该模型仅考虑物体对光照的一次反射, 未能考虑到反射折射后的光线在空间再次与物体相交的情况, 因此渲染出来的效果并不够令人满意。

1986 年 Kajiya 建立了渲染方程的理论, 统一了以前所有的光照模型, 该方程表示场景中物体表面的出射辐射亮度等于其自身辐射亮度与半球上方所有方向入射辐射亮度之和^[7]。此后几乎所有渲染光照算法都是围绕渲染方程求解。

20 世纪 70 年代, 计算机图形学的研究处于初期阶段, 图像渲染最重要的是解决可见性算法和几何表示等基本问题, 无法采用物理方法渲染图像。人们普遍采用的 3D 图像渲染技术是一种光栅化的过程, 即用三角网格进行 3D 建模后直接转换成 2D 图像的像素, 最后进行着色处理。这个过程只关注当前图像中所见景色, 而没有额外的计算力对整个场景进行物理建模。

OpenGL 就是典型的光栅化图像渲染开发环境, 其渲染流程如图 1-1 所示: 随着计算机硬件设备的发展, 硬件设备的计算能力大大增强, 使物理渲染的理论可以成为实现, 研究人员开始使用增加的计算能力来呈现更复杂渲染算法的场景, 而不是渲染相同的场景。

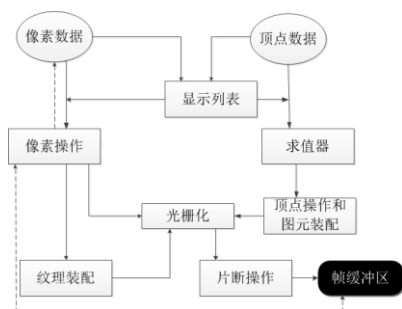


图 1-1 OpenGL 的图形渲染管线

2004 年, Matt Pharr 等人设计出了一种利用光线追踪原理的真实感较强的图像渲染仿真系统, 即 pbrt, 它为物理图像渲染提供了较为方便的设计平台^[8]。pbrt 利用的模块化设计理念, 不但提高了光线跟踪算法的计算效率, 还使产生图片的具有更强的画面感效果, 而且还有丰富的环境元素等, 并在之后进行不断优化升级。2009 年, 日本 Muranaga Kazuya 等人发布了一款名为 OpenRT 的 API, 它的设计目的是为了提高 3D 游戏的光线追踪效果, 而且建立的 OpenRT 工程软件项目具有一个高度优化的光线跟踪内核, 而且它也包含了一套类似于 OpenGL 的库文件, 开发者可以调用该库函数来实现交互式三维图形的处理与优化^[9]。2014 年, 微软公司发布了新一代 API——DirectX 12, 加入了 DirectX Raytracing(DXR) 光线追踪渲染管线, 这个 DX 12 的自然衍生物能够完全将光线追踪功能整合至 DirectX, 并可搭配运用(而非取代)来执行光栅化与运算^[10]。2018 年, Nvidia 公司发布了新一代 RTX 系列 GPU, 通过加入 RT 核的方式实现对光线追踪的优化处理, Nvidia RTX Technology 技术将兼容于微软 DirectX 12 DXR API, 并在 NVIDIA Volta 体系结构 GPU 中提供支持^[11]。

由国内外对物理渲染方法内容分析可知, 物理仿真成像方法理论已经比较成熟, 本文主要采用光线跟踪理论结合辐射传输方程、蒙特卡洛计算模型可以对空间目标实现复杂表面环境的成像仿真。而在成像渲染方法方面, 从 OpenGL 等几何光栅化渲染方法已经逐步发展成为基于物理渲染的光线跟踪方法, 随着高性能显卡支持光线跟踪计算, 光线跟踪渲染已经具备实时仿真能力。多个公司为物理渲染方法实现提供了平台, 因此我们可以直接使用其软件系统进行成像仿真。

1.2.2 国内外微表面光学特性建模研究现状

而基于微表面的反射模型最早由 Cook 和 Torrance 在 1982 年引入到计算机图形学中, 此后, 该模型被广泛的研究和应用^[12]。该模型的建立方式是首先假设每个微表面为一种光滑镜面(也有假设为理想漫反射面), 它的该面的法向面的统计分布满足一定的分布函数规律, 常见的如混合高斯分布、球面高斯分布、Berkmann 分布、GGX 分布等。

在图形处理领域, 由于早期计算机计算能力受到限制, 模拟细微环境元素所发生的高光反射或者漫反射现象一般采用简单的、单一的材质模型来代替, 比如

利用 Lambert 模型反映漫反射现象^[13], 利用 Phong 模型反映高光反射现象等。这些模型只能简单的反映光学现象, 而没有任何的现实物理意义。更为复杂的物理模型需要我们将细微的环境元素对表面的法向扰动添加进去, 并可以把这些法向扰动建立成微平面模型处理, 最后可以通过计算这些微平面的分布统计来确定该面的反射光值。常见的有 Cook-Torrance 高光反射模型、Oren-Nayar 漫反射模型、Lafortune 模型等, 这样以来建立粗糙表面的微平面模型就非常接近实际的物理环境具有很强的应用价值。

2007 年哥伦比亚大学学者 Charles Han 等人提出了一种频率域的法向图滤波方法, 提出可以使粗糙的物体表面可以利用法向图建立物理模型。由于法向和局部光照间存在着非线性的数学关系, 也就是当先进行法向滤波从而获得局部光照值与先获取局部光照再求取相应的滤波值具有不相等的关系时, 这时候法向图是存在的, 因此需要进行多尺度滤波处理^[14]。而通过进行频域的法向图滤波处理可以发现, 对于大类常见的 BRDF (双向反射分布函数), 法线图过滤可以形式化为正态分布函数 (NDF) 和 BRDF 的球形卷积。该理论结果将许多先前的过滤技术解释为特殊情况, 并导致对 BRDF 更广泛的测量和分析。

2015 年 Elham Kalantari 等人提出了提出了一种新的粗糙表面分析反射率分布模型, 其反射率分布函数取决于入射角, 表面粗糙度和反射系数, 即波长的函数, 还分析了多次散射的影响, 以及加入了阴影和掩蔽效应的影响^[15]。

2015 年南京大学过洁等人提出了一种多尺度粗糙反射表面图形的实时绘制方法, 这种方法是将材质表面环境元素根据它们的尺度划分为: 宏观结构、介观结构和微观结构三大类, 并且利用 2007 年 Charles Han 的表面法相滤波技术来对各个尺度表面进行建模和处理, 最终得到了粗糙表面的表达式, 即其法向分布函数^[16]。

2016 年 Samuel E. Freda 等人发表了一篇关于波形光学分析中等粗糙表面的 BRDF 模型的会议论文, 以前有关波光学与微小平面坐标相关的工作提出了计算繁琐复杂的 BRDF^[17]; 在这项工作中, 论文研究了在之前的无限求和, 提出了具有封闭形式的 BRDF 模型, 该模型描述了具有各种表面参数的材料的波长相关效应, 并且可用于遥感应用。

2017 年北京航空航天大学的袁艳进行了粗糙表面双向反射分布函数优化建模与验证, 通过利用五参量 BRDF 模型思想来对目标物体表面的不同材质特性建立了两类相关的简化模型(半光面材料 BRDF 模型和毛面材料 BRDF 模型)^[18]。在此基础上, 还深入研究了模型参量的拟合方法, 并对其结果进行了对比实验分析, 最后还分析了目标样片 BRDF 模型随着散射角的变化趋势, 以及与表面粗糙度的关系。

2018 年, 北京大学研究员提出了一种精确、稳定、可逆的各向同性表面的反射模型, 其引入单个变量来物理量化表面平滑度, 并通过在 0 和 1 之间单调滑

动此变量,模型实现了通用表示并可以在旋转椭圆体和朗伯反射率方程之间平滑变换^[19]。在逆域中,该模型提供了紧凑且物理上可解释的方程,通过解算器可以精确估计表面平滑度和表面形状。

2018年加州大学的 LingqiYan 博士论文中提出了利用每个像素所覆盖的实际 NDF,即 P-NDF,将法线贴图离散化为轴对齐的三角形,并对每个三角形进行分析整合,以计算其对 P-NDF 中任何给定方向的贡献^{[20]-[22]}。

通过对国内外相关领域研究内容的综述与分析可知,在对目标物体表面建模方面,国内外研究人员基于 BRDF 理论建立了多种微平面表面的光学特性,但对多种形态、不同材质的微表面还需要选择不同的 BRDF 模型,以便能更好的反应微表面的物理特性。

1.3 本文的主要研究内容

本课题的主要研究内容是针对具有复杂表面的空间目标进行物理成像仿真,以期得到更加接近现实的空间目标仿真图像;论文目标是构建复杂表面空间目标几何结构模型或者光学特性模型来表达目标微表面形态、借助光线追踪算法实现对复杂表面空间目标成像仿真并得出成像结果。

围绕以上内容,本文各章节具体内容安排如下:

第一章是主要介绍了本课题的研究背景和意义,针对国内外物理成像仿真技术、成像仿真软件开发及微表面光学特性研究发展现状进行了综述,并在此基础上介绍了本文主要研究内容。

第二章为建立空间目标几何结构模型和建立光学特性模型;几何结构建模主要内容包括为对具有复杂表面的表面空间目标建立整体几何模型,并针对空间目标不同部件的表面根据其微表面尺度不同使用不同软件对其进行三角网格划分,对尺寸较大的部件使用分形几何方法进行进一步几何结构建模。光学特性建模的主要工作为针对目标材质的 BRDF 建模工作,模型要在最大程度上符合材质物理特性,使得成像时可以展现出最真实的物体物理特征形态。

第三章为目标辐射特性方法解算;主要工作为对目标进行成像过程的解算;论文将建立投影相机几何成像模型,利用光线跟踪算法计算光线与目标相交及反射折射情况,辐射传输方程和蒙特卡洛方法进行目标辐射传输特性解算,得出目标每个像素点的辐射度值。

第四章为利用光线追踪算法软件实现对复杂表面空间目标成像仿真,主要工作为了解并熟悉 pbrt 软件,首先构建函数使得空间目标几何模型数据导入并存储相关数据,为目标表面 BRDF 函数赋值,设置空间目标成像场景中相机、光源等位置及其他参数,之后进入成像仿真循环,得出对复杂表面空间目标仿真成像结果并对结果进行分析。

第2章 空间目标几何结构和光学特性建模

在空间成像任务过程中,光学目标成像仿真系统主要获取的是目标的几何结构信息与表面光学特性信息,并依据此得出空间目标姿态及位置信息。在几何建模中最重要的是表现出其几何结构和一定程度的表面形貌特征,光学特性建模中则要更侧重真实的反应目标表面材质特性。本章我们着重介绍如何对具有复杂表面的空间目标分别进行几何建模和光学特性建模,并对其微表面尺寸较大的平面进行微平面几何结构建模。

本文研究对象针对于具有复杂表面空间目标,空间目标复杂表面材质大致分为俩类:一种为包裹隔热材料的表面,此类表面褶皱尺度较大,不能用微面元漫反射处理,且隔热材料为高反射性材质。一种为具有一定粗糙度的金属表面,这类表面微面元较小,其在某一个方向反射率较大但是在其他方向也有反射值。

2.1 目标几何结构建模

在空间目标成像仿真过程中,必须提供空间目标的三维实体造型文件。由于所有空间目标模型具体数据都为机密数据无从得知,且实际造型都非常复杂;而我们研究目标主要针对空间目标材质、形貌不同的复杂表面的成像结果,因此本论文所构建空间目标几何结构模型只构建目标大概形貌及部件相对位置结构,不需要数据精确且精细化的模型。

在空间目标结构构造中,要对参考目标进行结构简化,忽略目标结构中的细小部分和复杂的连接部分,使得最后目标等效为相对简单几何形状的组合。本论文空间目标参考模型为嫦娥四号着陆器^{[23][24]},依照空间目标构件材质的不同,在论文中将目标整体主要分割为三个部分:着陆器主体、太阳能帆板和四个支撑脚,论文中空间目标的尺寸为按照实际图片比例模拟,没有任何参考价值,仅模拟出与实际目标相似的几何形状。其部件模型如图 2-1 所示:

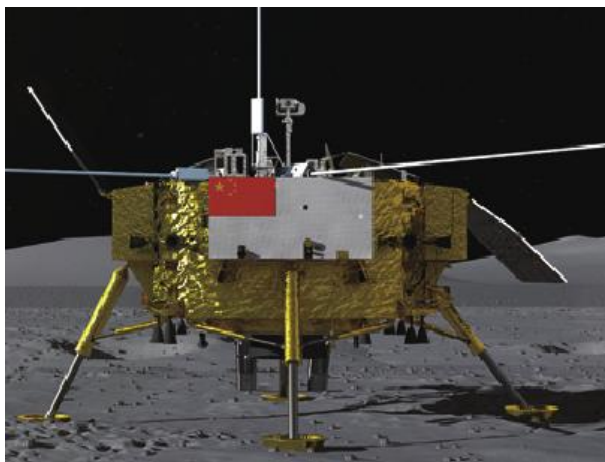


图 2-1 嫦娥四号着陆器模型

为了构建空间目标整体几何结构,需要利用 3Dmax 软件分别将目标的每一

部分分别进行几何建模，之后再行拼接组装，其具体示例如图 2-3 所示：

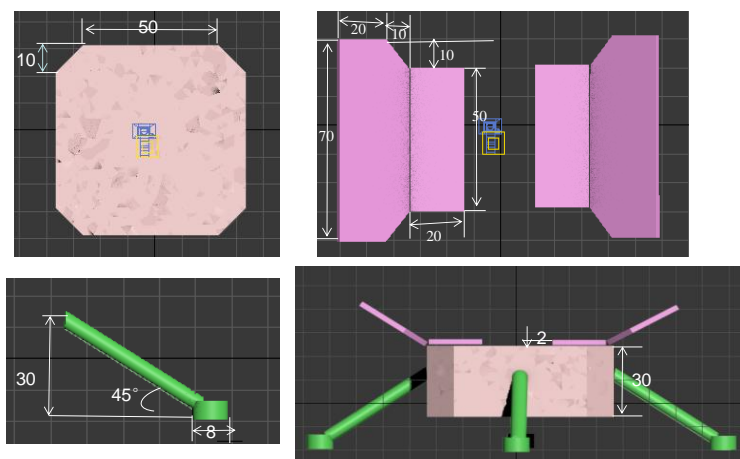


图 2-2 空间目标几何模型具体尺寸

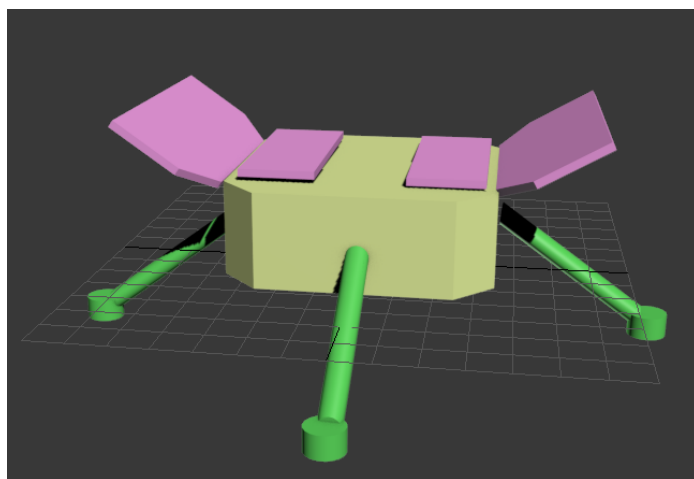


图 2-3 空间目标几何结构模型

经过对空间目标不同部件的几何建模和组装，已经实现了对空间目标三维几何结构的重构；由于每个组件几何形状差异较大，为了方便后续的目标光学特性分析和成像仿真等工作，需要将目标组件进行三角面元划分。三角面元划分是对目标三维几何结构中的表面进行离散化处理，从曲线曲面模型中采样得到目标表面采样点，即可实现目标表面的三角网格化模型^[25]。

因此，在将每部分组件模型构造完成后，需要利用 3Dmax 软件导出其 stl 文件，此文件中三维模型可以被相对分散分布地三角形面片近似表示；对于三角形面片来说，它的组成主要包括：三角形 3 个顶点的三维坐标和三角形面片的法向量。

stl 文件的二进制文件的组成是先编写模型整体信息：文件起始储存三维结构名的头文件占用 80 字节，4 个字节的整数来描述模型的三角面片个数，之后依次编写每个三角面元信息，并且每个面元的信息都是用固定字节数表示的。每个三角面片占用固定的 50 个字节，依次是 3 个 4 字节浮点数(角面片的法向量)，3 个 4 字节浮点数(1 个顶点的坐标)，3 个 4 字节浮点数(2 个顶点的坐标)，3 个 4

字节浮点数(3 个顶点的坐标), 最后 2 个字节用来描述三角面片的属性信息。

利用 3Dmax 导出的 stl 模型如图 2-4 所示:

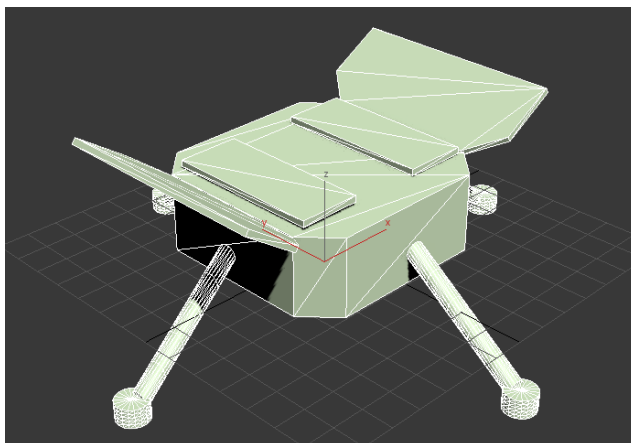


图 2-4 3Dmax 导出的 stl 模型

但是由图 2-4 可以看出, 3Dmax 直接划分包裹隔热材料的主体部分的三角网格大小不均匀且差异性较大, 因此为了方便后续操作, 我们需要对主体部分利用有限元分析软件进行更加细致的三角面元划分。

本文使用 ansys 软件对的主体部分进行网格划分。ansys 软件是由美国 ANSYS 公司开发的大规模通用有限元分析 (FEA) 软件。它是世界上增长最快的计算机辅助工程 (CAE) 软件。ansys 有限元软件包是一种多功能的有限元方法计算机设计程序, 能够用于解决结构、流体、电力、电磁场和碰撞等问题^[25]。

但是 ansys 软件并不能导入 3Dmax 导出的大部分格式, 因此我们需要利用 SolidWorks 对主体部分重新建模, 然后把重新搭建的模型导入到 ansys 软件里, 最后以四面体为网格化基本单元, 对所建模型进行网格划分, 划分基元尺寸单位为 8m, 划分结果如图 2-5 所示:

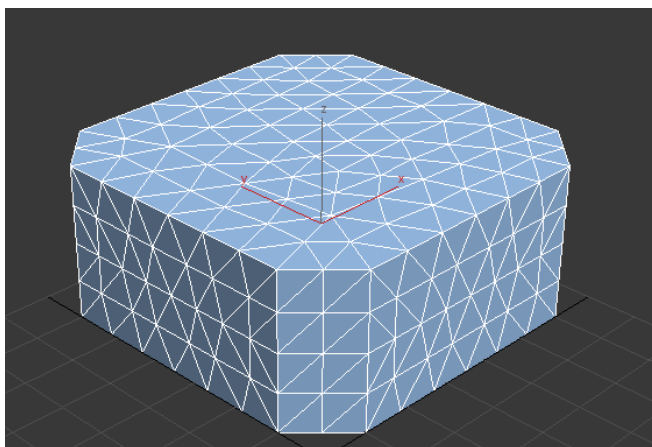


图 2-5 ansys 对主体进行网格划分

ansys 对主体部分划分结果表明, 利用有限元软件对几何模型进行三角网格划分确实比 3Dmax 直接导出的 stl 文件效果好, 其三角面元分布均匀, 大小形状差异较小, 为后续三角面元增加微表面结构提供很大的便利。

2.2 微表面几何特征建模

具有复杂表面的空间目标的微表面大致可分为两种情况，一种是空间目标包裹隔热材料，所以表面具有大尺度的褶皱，其主要体现在空间目标主体部分，一个是光滑的金属表面，这种表面用肉眼是看不到表面的划痕、凹槽、空间目标中太阳能帆板、支撑都属于这种类型，这种类型微表面粗糙度借助表面材质的光学特性模型来表达。微表面的几何建模只针对于微表面尺寸较大的情况，本论文中针对于包裹隔热材料的主体部件进行表面几何特征建模。

卫星的几何外形一般是不规则的或者具有一些棱角和曲面，这会导致隔热材料包裹在空间目标表面时，一定会出现大面积褶皱，并且这种褶皱是随机的。对于材料表面材质微表面尺度较大的情况，在本论文中采用分形几何方法来构造几何表面模型，模拟隔热材料的褶皱^[26]。

分形几何一般是用来进行各种地形的模拟，分形几何理论的基础是一个概念，即空间中除了整数的维存在，分数类维数也存在；分形几何的基本思想中认为客观事物存在自相似性，并且具有某种特定的层次结构；自相似性即事物的部分和整体存在某种意义上的相似性。这些性质阐述了分形几何的基本思想。

分型几何模型中重要的参量是分形维数，这是因为微表面的复杂程度、粗糙程度都是由分形维数决定的，一般认为，只要利用分形几何理论生成的几何结构模型分形维数与实际事物分形维数相同，那么在分形技术理论对目标判定识别中就可以认为模型与实际事物表面粗糙度，复杂程度是一样的，也就实现了对事物的良好几何模型的建立。

在 Weierstrass 函数基础上，1982 年 Mandelbrot 提出一种分形曲线的函数表达式，称为 Weierstrass-Mandelbrot（简称 W-M）函数^{[27][28]}；具有分形特征的 W-M 函数具有连续、不可微的性质。之后多人对 W-M 函数进行了形式上的改变，例如：Ausloos-Berman 函数是 Ausloos 和 Berman 通过引入多个变量来描述三维随机过程，得到的极坐标系中对三维粗糙表面描述的高度分布函数，即 Ausloos-Berman 函数。而 Yan 和 Komvopoulos 对极坐标下的 W-M 函数进行变换，最终得到直角坐标系下的三维表面高度分布函数：

$$\begin{aligned}
 & z(x, y) \\
 &= L \left(\frac{G}{L} \right)^{(D-2)} \left(\frac{\ln \gamma}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=n_1}^{n_{max}} \gamma^{(D-3)n} \left\{ \cos \phi_{m,n} \right. \\
 & \quad \left. - \cos \left[\frac{2\pi \gamma^n (\sqrt{x^2 + y^2})}{L} \cos \left(\arctan \frac{y}{x} - \frac{\pi m}{M} \right) + \phi_{m,n} \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

式中： $z(x, y)$ ——三维粗糙表面轮廓的高度；

D ——分形几何曲面的分形维数，决定微表面的粗糙程度和复杂程度；其范围为： $2 < D < 3$ ；

γ ——表面轮廓频谱密度相关的参数；其范围为： $\gamma > 1$ ；

G ——高度比例参数，其决定微表面起伏程度；

L ——取样长度；

M ——曲面褶皱的重叠数；

m, n ——随机相位，两者取值范围都为 $[0, 2\pi]$ ；但 n 最低频率序数范围为： $[0, \text{int}[\log(\frac{L}{L_s})/\log\gamma]]$ ；

L_s 为截止长度

目标网格化建模后，网格化的面元均可按照平面处理，因此只需要在网格化后的三角形面元内构建出具有一定粗糙度且符合实际起伏程度的微平面即可。我们需要在三角面元内部生成具有一定粗糙度的几何结构，并再次用三角面元对生成的几何结构进行表示。

实现具体流程为：在导入主体部件的 `stl` 文件后，读取每个三角面元数据后分别对每个三角面元进行如下处理：首先在每个三角面元内部进行均匀采样，具体做法为先将三角面元投影到 xoy 平面上，如果平面垂直于 xoy 平面，则将三角面元投影到 $yozy$ 平面或者 xoz 平面上，以 xoy 平面为例，选取三角形在 x, y 轴的最大最小值，在此范围内进行均匀采样，之后通过 x 和 y 坐标求取点在三角面元平面内的三维坐标，并剔除不在三角形面元内部的点。

其次由 **W-M** 函数 $z(x, y)$ 生成一段随机距离 Δz ；将采样点沿三角面元法线方向移动计算得出的随机距离，然后将移动后的采样点与三角面元边界的点组成一个三维点矩阵，利用 **Matlab** 的 `Delaunay` 函数进行三角网格剖分，形成具有三角网格的三维几何结构。上述程序生成的具有一定粗糙度的三角面元的几何结构结构如图 2-6 所示：

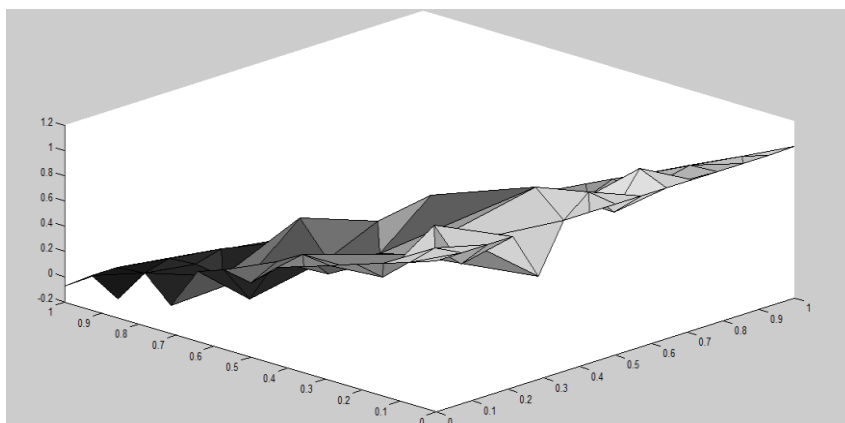


图 2-6 Matlab 生成的三角面元粗糙结构

但由 **W-M** 函数我们可知 D 、 G 的取值对三角面元生成的结构粗糙度和起伏程度有较大的影响，因此我们对其分别取不同值测试在不同取值下生成面元粗糙度数值，最后选取合适的数值应用于微表面几何结构建模。

微表面粗糙度仅仅由 **W-M** 函数中的参数决定^[29]，由于目标主体中的三角面

元的粗糙度不太容易计算，因此我们选择与三角面元粗糙结构中相同的 W-M 函数参数，在平行于 xoy 的平面生成的三维几何结构，之后在生成的三维粗糙表面截取 xoz 平面的截面，提取截面的二维轮廓，如图 2-7 所示，并由此计算出给定参数下微表面的粗糙度值。且 m, n 是随机相位，因此生成的粗糙结构粗糙度一定不是固定数值，不太容易直观进行比较，因此在测试粗糙度时我们将随机相位固定为 0。

在二维轮廓中粗糙度值的计算步骤为：先选取一条表面粗糙度轮廓中线，之后按照此公式： $R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 对表面粗糙度进行求解；本论文中粗糙度轮廓中线采用轮廓最小二乘中线，其含义为曲线顶点到这条中线的距离平方的和最小，在 matlab 程序中使用 polyfit 函数进行计算。

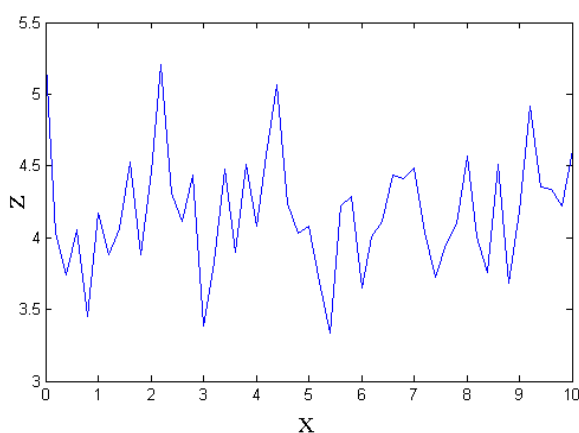


图 2-7 三维粗糙度结构在 xoz 截面的二维轮廓

由于 D 取值范围为 $2 < D < 3$ ，因此我们首先我们将使 $D=2.3$ ， G 分别取 1、2、5、10，测试生成的三角面元结构和粗糙度，其结果如图 2-8 所示：

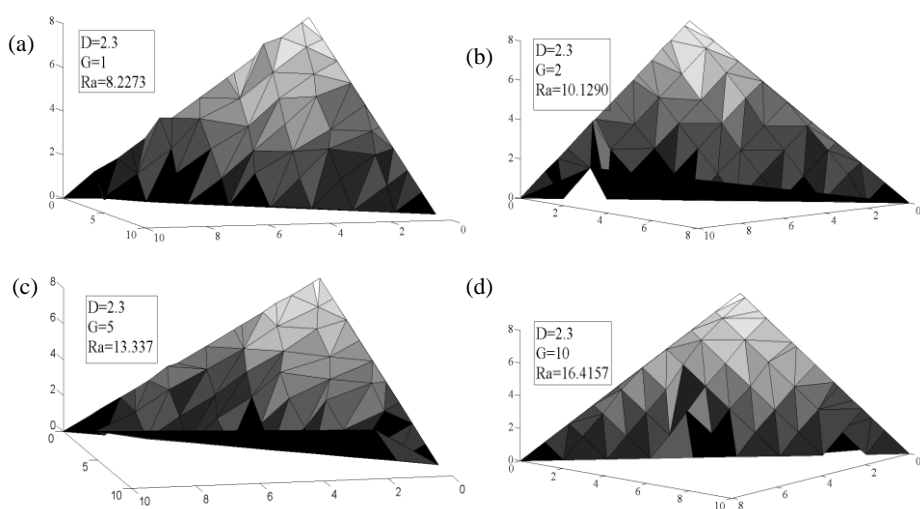


图 2-8 D 值不变不同 G 值生成的粗糙度不同的三维结构

图 2-8 结果表明 D 值不变， G 值越起伏程度越大。

之后将 G 取 1.5，测试 D 在 2.1、2.3、2.5、2.7、2.9 时在三角面元内生成

的图像和其对应的粗糙度，结果如图 2-9 所示

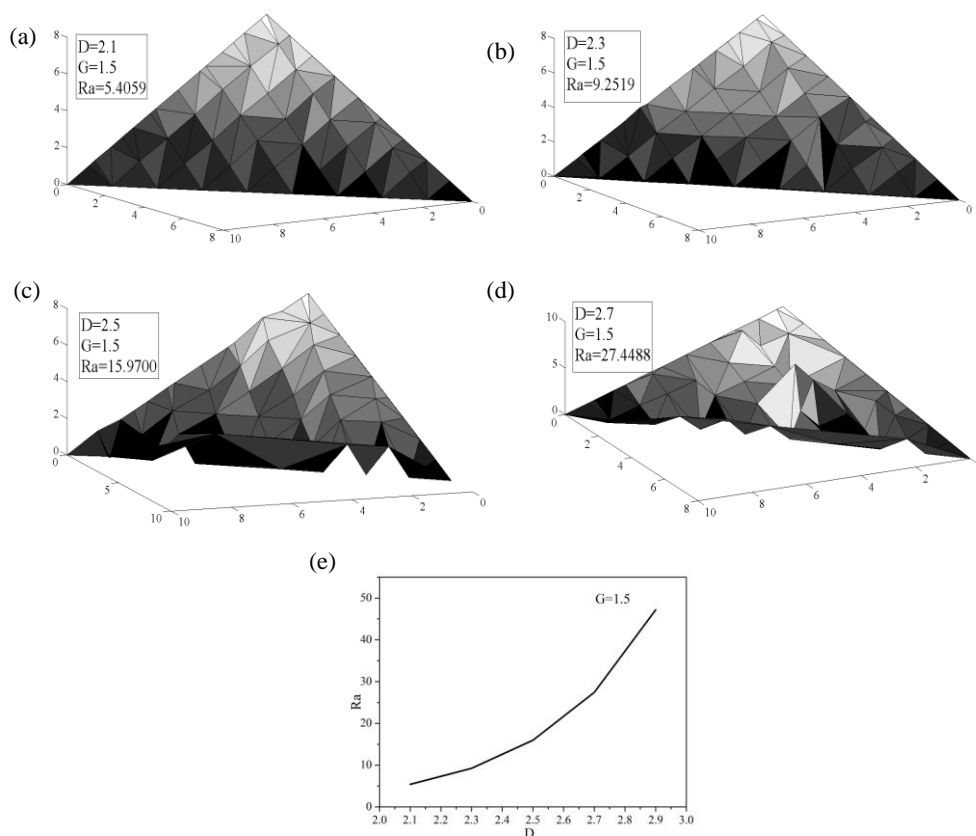


图 2-9 G 值不变不同 D 值生成的粗糙度不同的三维结构

由以上述可知， D 值主要确定生成几何结构的粗糙度，而 G 值确定三维结构的起伏程度，且由以上信息我们确定在实际应用中我们选取参数为： $G=10$ ； $M=5$ ； $gma=1.5$ ； $L=1 \times 10^{-1}$ ； $D=2.3$ ； $L_s=5 \times 10^{-3}$ 。

我们将 ansys 生成的目标主体的 stl 文件读入 Matlab 程序^[30]，读出目标结构中的每个三角面元的顶点和法线，对每个三角面元执行上述程序，导出生成的三维点矩阵，利用 DelaunayTriangulation 函数将三维点进行三角剖分并重新三角面元信息重新进行整理。

由于 matlab 比较容易读写二进制 stl 文件，因此在 matlab 中我们使用的 stl 文件都是二进制，我们按照 stl 文件所需要的信息将形成的三角面元顶点、法线信息重新排列组合生成新的 stl 文件，此 stl 文件将是主体部分的几何结构模型，利用 3Dmax 软件打开此文件进行验证，结果如图 2-10 所示；结果证明空间目标主体表面利用分形几何理论生成的具有一定粗糙度的几何结构符合预期。

最后将生成的主体的 stl 与之前太阳能帆板及支撑的几何模型 stl 文件在 3Dmax 软件中组装合成，导出 stl 文件为空间目标整体的几何结构模型，其结果如图 2-11 所示：

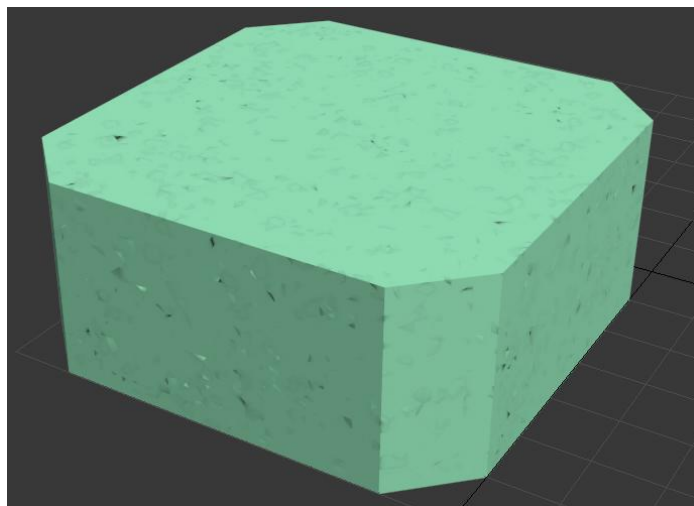


图 2-10 空间目标主体微表面结构模型

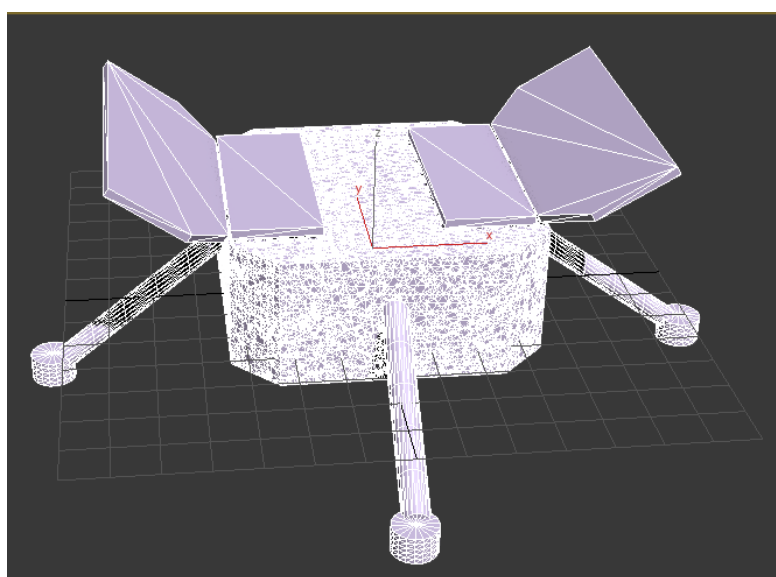


图 2-11 复杂表面空间目标几何结构模型

之后在成像仿真中要判断光线是否与空间目标发生碰撞，由于我们的目标几何结构模型以离散化三角面元表示，其面元信息仅以三个顶点坐标和平面法线显示；因此光线与目标碰撞检测或称为交叉检测就是判断光线与三个点确定的三角面元交点是否在三角形内部。

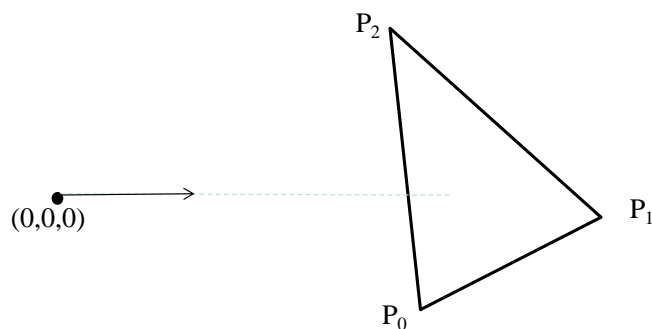


图 2-12 光线三角形相交测试坐标系转化

在实际中三角形相交测试首先进行仿射变换，该仿射变换使光线转换为其原

点在处于 (0,0,0) 并且使得其方向沿着+z 轴的光线。在执行相交测试之前, 三角面元的三个顶点和法线也会转换为此坐标系, 此坐标系转换会简化了交叉测试逻辑。

将三角形顶点转换为此坐标系之后, 我们的任务是查找从原点开始并沿+z 轴行进的光线是否与变换后的三角形相交。由于坐标系的构造方式, 这个问题等同于确定光线的 x 、 y 坐标(0,0)是否在三角形的 xoy 平面投影内的 2D 问题。

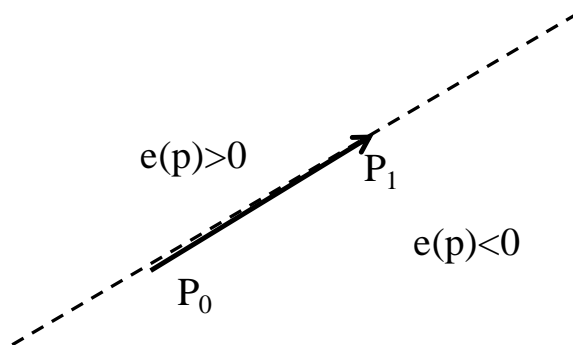


图 2-13 边函数示意图

我们将使用三角形区域的表达式来定义一个带符号的边函数: 给定两个三角形顶点 p_0 和 p_1 , 然后我们可以定义有向边函数 e 作为给出由 p_0 , p_1 和 p 给出的三角形区域的函数。给定的第三点 p :

$$e(p) = (p_{1x} - p_{0x})(p_y - p_{0y}) - (p_x - p_{0x})(p_{1y} - p_{0y}) \quad (2-2)$$

如图 2-13 所示, 边函数为线, 左边的点 $e(p)$ 为正值, 右边的点给边函数出负值。因此, 如果一个点对于三角形的所有三个边都具有相同符号的边缘函数值, 则它必须位于所有三个边的同一侧, 因此必须在三角形内。

由于坐标系转换, 我们测试 p 的点是(0,0)。这简化了边函数表达式。例如, 对于从 p_1 到 p_2 的边 e_0 , 我们有:

$$\begin{aligned} e_0(p) &= (p_{2x} - p_{1x})(p_y - p_{1y}) \\ &\quad - (p_x - p_{1x})(p_{2y} - p_{1y}) \\ &= (p_{2x} - p_{1x})(-p_{1y}) - p_{1x}(p_{2y} \\ &\quad - p_{1y}) = p_{1x}p_{2y} - p_{2x}p_{1y} \end{aligned} \quad (2-3)$$

给定三个边缘函数的值, 我们有两个机会来确定没有交集。首先, 如果边函数值的符号不同, 则点 (0,0) 不在所有三个边的同一侧, 因此在三角形之外。其次, 如果三个边缘函数值的总和为零, 则光线接近三角形边缘, 并且我们不报告交叉点。

2.3 目标光学特性建模

目标几何模型中不可能详细的描述出物体表面材质的物理特性, 如空间目标太阳能帆板等部件其微表面尺寸太小, 几何特性建模描述不出来其表面的闪光、粗糙度等问题; 鉴于此, 对微表面光学特性建模是用以描述目标表面材质的物理

特性；其任务主要是导出一个封闭形式的表达式，给出描述表面材质散射的 BRDF。

在完成目标几何模型三角面元划分之后，复杂的目标三维几何结构光学特性计算问题可以转化成离散的三角面元光学特性计算问题。三角面元的光学特性主要取决于目标表面材料的光学特性。

在工程实际中，对于不同目标材料表面的各种物理参数也都是大不一样的。比如：粗糙度、偏振度、吸收系数、折射率等，这也造成了 BRDF 模型的多样性。因此为了准确表达材料表面的光学特性，十分有必要采用与其表现光学特性相近似的 BRDF 模型^[31]。

2.3.1 双向反射分布函数模型

材料以不同的方式与光相互作用，并且在相同的照明条件下材料的外观不同；有些材料看起来像镜子，有些材料则为漫反射表面。表面的反射特性很大程度上会影响目标的外观。

当光线辐射入射至材质表面上，光线与表面产生交互作用，发生散射现象，并有某些光线反射回当前环境。当对辐射反射现象进行建模时，需要考虑两种现象：反射光的光谱分布及其方向分布状态。为了使得描述方法更加精准一些，本文引用到了 BRDF，双向反射分布函数；它是定义入射和反射辐射之间关系的函数^[31]。

在论文中我们假设入射到表面的光以相同的波长和相同的时间出射；我们忽略了荧光和磷光等效应。并且，我们假设在某一点入射的光在同一点出射，忽略下表面光线传输效果；因此，我们不讨论会导致光在物体表面上的不同点处射出的次表面散射。

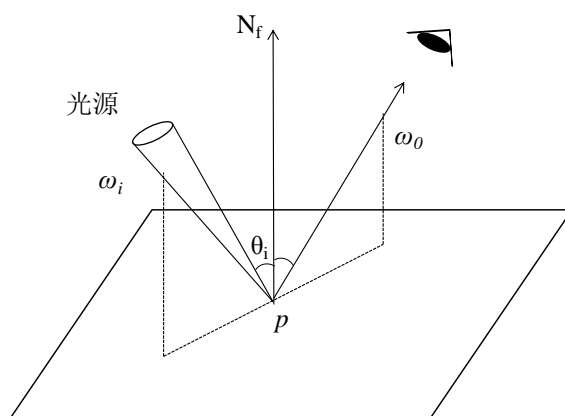


图 2-14 双向反射分布函数

BRDF 定义了方向为 ω_o 的离开点 p 处的反射辐亮度分布，即 $dL(p, \omega_o)$ 。入射辐照度和反射辐照度的关系为：

$$f_r(p, \omega_i, \omega_o) = \frac{dL(p, \omega_o)}{dE(p, \omega_i)} = \frac{dL(p, \omega_o)}{L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (2-4)$$

其中 $\cos\theta_i$ 是法线矢量 N_f 在点 p ，和入射方向矢量 ω_i 形成的角度的余弦。严格来说，BRDF 是在围绕表面点的整个方向球（ 4π 球面度）上定义的。

BRDF 双向反射分布函数有如下性质：

范围：BRDF 可以取任何正值，并且可以随波长变化。

尺寸：BRDF 是在表面上的每个点处定义的四维函数；两个维度对应于传入方向，两个维度对应于传出方向。通常，BRDF 是各向异性的，如果表面围绕表面法线旋转，则 f_r 的值将改变。然而，存在许多各向同性材料其 f_r 值不依赖于特定取向。

互异性：如果入射和反射方向互换，BRDF 的价值保持不变。直观地说，这意味着反转光的方向不会改变被反射的光量。

论文中通常使用经验模型来表征 BRDF，我们必须确保这些经验模型是良好的可接受的 BRDF。更具体地说，必须满足能量守恒和亥姆霍兹互易性，以使经验模型在物理上合理。

2.3.2 隔热材料光学特性建模

我们熟悉的隔热材料的材质是聚酰亚胺^[33]，其可以作为隔热材料主要是因为它具有热固性，没有熔点，即使温度再高它依然可以保持基本形状；空间目标主体部分包裹的大都是金色或银色聚酰亚胺，其在成像方面具有较强的镜反特性^[34]；这种材质在仅在一个方向上有反射光，且其反射系数较大，反射光辐射度较大。

而且，在几何特性建模中已经构建出其褶皱的微表面几何特性，因此对于主体部分的三角面元光学特性模型采用简单的镜反模型^[31]即可，其表达式为：

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) = \frac{p(n, \kappa, \theta_i)}{\cos\theta_o} \delta(\theta_o - \theta_i) \delta(\varphi_o - (\varphi_i + \pi)) \quad (2-5)$$

式中 θ_o ——光线入射方向；

θ_i ——光线反射方向；

$p(n, \kappa, \theta_i)$ ——光滑表面反射率函数。

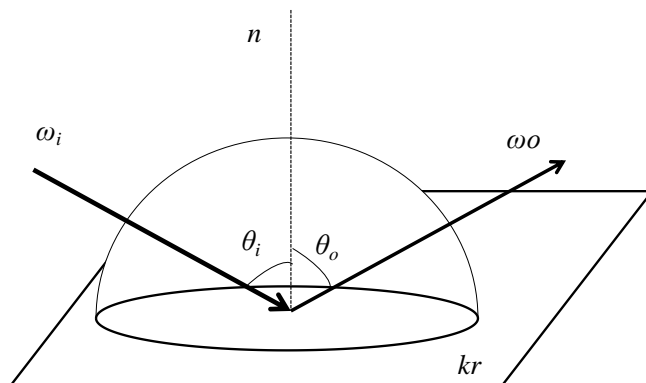


图 2-15 镜面模型 BRDF 反射模型

其 BRDF 反射模型如图 2-15 所示；由表达式可知，在镜面材质中，入射辐射度和出射辐射度仅仅与平面反射率有关。我们创建反射系数 kr 不同的平面，

当入射角度为 45° 时，入射辐射度为 $5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 的入射光线照在平面时，对应的反射光线辐射度值如图 2-16 所示；

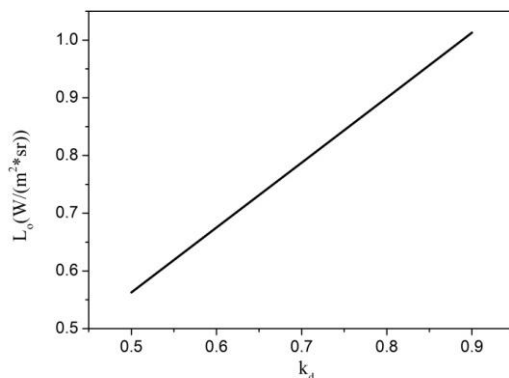


图 2-16 相同入射光线不同反射率表面的出射光线辐亮度值

2.3.3 金属表面光学特性建模

空间目标表面材质大多都为金属，为了更好的表达金属这类微表面尺度较小材质在光线下的特质，需要采用 Torrance-Sparrow 模型^[35]求解其 BRDF 数值。

(1) 正态分布函数

由微平面组成的表面通常被建模为高度场，其中小平面的分布用统计描述。微平面表面模型通常由一个函数 NDF (normal distribution function 微平面正态分布函数) 描述，该函数给出了相对于曲面法线 \mathbf{n} 的微平面法线 \mathbf{n}_f 的分布。微平面法线的变化越大，表面越粗糙。

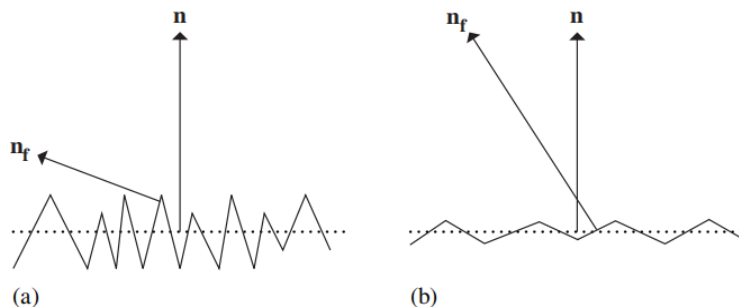


图 2-17 微表面模型 (a) 粗糙表面法线变化 (b) 较为光滑表面法线变化

微平面表面的分布函数用 $D(\omega_h)$ 表示，其给出微平面差分面积内的表面法线 ω_h 。一般来说：分布函数 $D(\omega_h)$ 要归一化，即给定微表面的差分面积 dA ，那么微平面面向该面积上方的投影面积必须等于 dA 。在数学上，这符合以下要求：

$$\int_{H^2(\mathbf{n})} D(\omega_h) \cos\theta_h d\omega_h = 1 \quad (2-6)$$

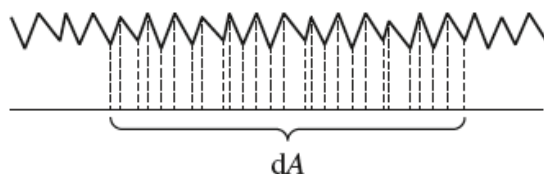


图 2-18 分布函数归一化

(2) Torrance-Sparrow 模型

Torrance 和 Sparrow (1967) 开发了一种早期的微平面模型来模拟金属表面。他们将表面建模为完美平滑的镜像微平面的集合。Torrance-Sparrow^{[36],[37]}模型的一个好处是，不依赖于所使用的特定微平面分布；此外，它不依赖于特定的菲涅耳功能，因此它可以用于导体和电介质。除了法线等于半角矢量的方向，微平面是完全镜面的。

由此理论推导出：

$$f_r(\omega_o, \omega_i) = \frac{D(\omega_h)G(\omega_o, \omega_i)F_r(\omega_o)}{4|\cos \theta_o \cos \theta_i|} \quad (2-7)$$

其中， ω_h ——方向为 ω_i 和 ω_o 的半角；

n ——未映射的表面法线；

F ——菲涅耳项；

G ——几何衰减项。

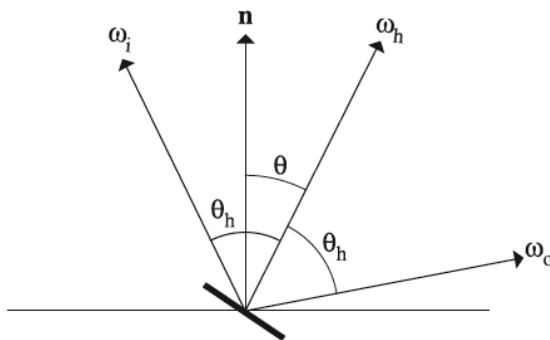


图 2-19 Torrance-Sparrow 模型

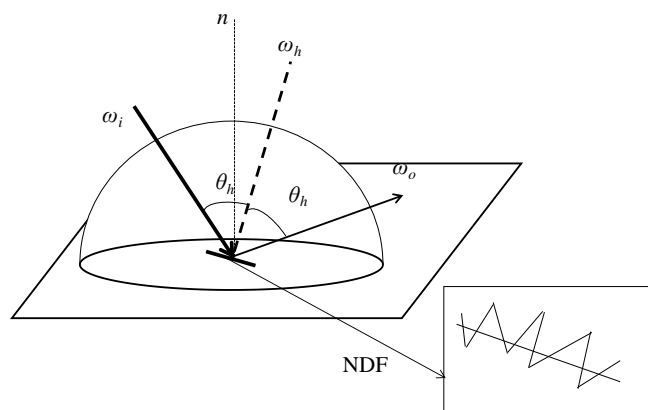


图 2-20 Torrance-Sparrow 模型 BRDF 反射示意图，右下角为入射微平面示意图

菲涅尔项的计算来源于菲涅尔方程^[38]，它指定了从完全光滑的表面反射和折射的光能量。当光射到光滑的表面上时，反射的光能取决于光的波长，表面的几何形状以及光的入射方向。菲涅耳方程式指定了被反射的光能的分数。这个方程式重点研究光的偏振，此时偏振光有两个分量 r_p 和 r_s ，分别表示平行分量和垂直分量，具体表达式如下所示：

$$\begin{aligned} r_p &= \frac{\eta_2 \cos \theta_1 - \eta_1 \cos \theta_2}{\eta_2 \cos \theta_1 + \eta_1 \cos \theta_2} \\ r_s &= \frac{\eta_1 \cos \theta_1 - \eta_2 \cos \theta_2}{\eta_1 \cos \theta_1 + \eta_2 \cos \theta_2} \end{aligned} \quad (2-8)$$

其中 η_1 和 η_2 是界面处两个表面的折射率。对于非偏振光， $F = \frac{|r_p|^2 + |r_s|^2}{2}$ ，这个方程式适用于金属和非金属，对于金属来说，金属的折射率表示为复变量： $n + ik$ ， n 是金属材质的折射率， k 代表金属材质的吸收系数。菲涅耳方程式假设光在纯镜面反射或折射。由于没有吸收光能，因此反射系数和折射系数的总和为 1。

对于给定的金属材质其折射率与吸收系数是固定的，因此 F 的数值是固定的，因此对材质 BRDF 的求解主要是表达微表面分布函数 $D(\omega_h)$ 。论文中使用的是 Trowbridge-Reitz 提出的基于高斯分布斜率的微观分布函数：

$$D(\omega_h) = \frac{1}{\pi \alpha_x \alpha_y \cos^4 \theta_h (1 + \tan^2 \theta_h (\frac{\cos^2 \theta_h}{\alpha_x^2} + \frac{\sin^2 \theta_h}{\alpha_y^2}))^2} \quad (2-9)$$

由于部分金属属于各向异性材质，因此需要给定 α_x 和 α_y 来确定不同方向的粗糙度，但是 α_x 和 α_y 本身并不代表粗糙度，如果给定材料为各向同性材料只需要使 $\alpha_x = \alpha_y$ 。

确定的材质折射率与吸收率决定的菲涅尔数是个常数，因此我们假设 F 为 1，忽略几何衰减项，入射光线条件为：入射辐射度为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 和入射角度为 30° 的入射光线，表面材料粗糙度表示为在 $\alpha_x = 0.1$ 和 $\alpha_y = 0.2$ 的条件，我们求出不同出射角度下的光线，其出射辐射度的值如图 2-21 所示：

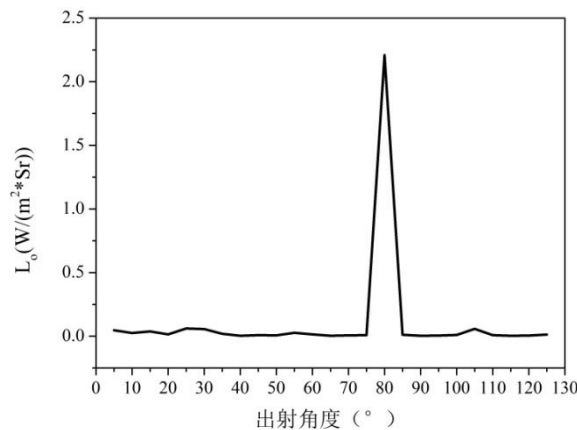


图 2-21 不同出射角度的反射光的辐亮度

图 2-21 结果显示，金属反射率在某一个方向会比较高，出射光在某个方向上的辐亮度明显高于其他方向，其他方向反射辐射度差异性较小。

2.3.4 朗伯材质光学特性

在空间目标表面，大部分金属都在表面会涂上一层白漆防止生锈，能更好适应空间复杂多变的环境，因此，这类金属表面其表现的是白漆的光学性质，在论文中这类表面使用朗伯模型^[31]进行建模，这种材质的特性为在平面 180° 内都有反射光线，且每个方向反射率一致。因此其 BRDF 值为：

$$f_r = \frac{k_d}{\pi} \quad (2-10)$$

k_d 为表面物质的反射系数。

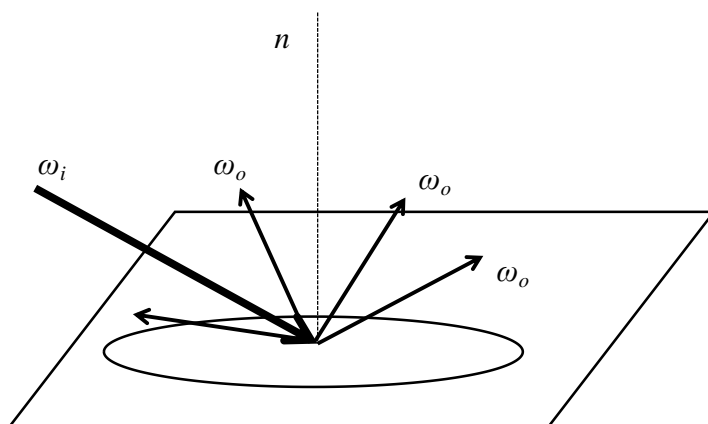


图 2-22 朗伯模型 BRDF 函数示意图

这类型材料表面反射为漫反射，光线在每个方向反射的概率相同，模拟其中随机一个方向的反射光线，求入射辐射度 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 和入射角度为 45° 方向的入射光线，在不同反射率情况下反射出射度的值如图 2-23：

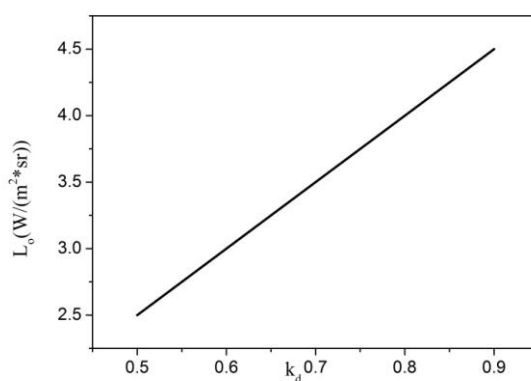


图 2-23 相同入射光在不同反射率平面朗伯模型的反射出射度值

图 2-23 结果显示，漫反射表面某一出射方向的辐射度仅与表面反射率有关。

2.4 本章小结

本章主要介绍了成像仿真模型中的建模过程，对目标进行成像我们需要对空

间目标提取其几何结构特征和其光学特性，复杂表面空间目标需要使用 3Dmax 软件对其简化结构进行建模，并利用 ansys 软件对其主体部分进行三角网格划分，并对于表面包裹隔热材料的主体部件，其微表面结构尺寸较大，需要采用分形几何理论对其 stl 中每个三角面元内部进行模型结构重建，并结合之前的模型最终生成具有复杂表面的空间目标的几何结构模型。对于表面材质不同的部件需要对其分别进行光学特性建模，对于表面包裹隔热材料的主体部件采用镜反模型，对于金属表面部件如太阳能帆板采用 Torrance-Sparrow 模型进行光学特性建模，而金属支撑外表涂有白漆，一般使用朗伯模型，并画出了每种 BRDF 模型的示意图。

第3章 空间目标成像仿真方法

复杂表面空间目标仿真成像场景中，对目标进行成像的过程，实际上是物像之间坐标变换的过程。论文中采用透视投影相机的中心投影成像模型求解成像过程中物像之间坐标的变换过程；并利用反向光线追迹思想来求解从像面发出的光经过物体反射、折射后达到光源的过程，之后利用辐射传输方程计算光线传输过程中从像面发出的光线的辐射度值，进一步求解出像面每个像素点的辐射度值。

3.1 辐射度量定义

成像仿真计算过程中，我们关心的是从图像到眼睛的光线量；辐射度学的相关概念在后续描述光线与物体相交和传播时提供了相关的概念和数学工具，其有利于成像仿真算法推导过程的描述^[39]；辐射度量是用能量单位描述辐射能的客观物理量。

立体角（ Ω ）是辐射度量中定义的最基础的概念，其描述了辐射能向空间发射、传播或被某一表面接受时的发散或会聚的角度。定义为以锥体的基点为球心做一球表面，椎体在球表面上所截取部分的表面积 dS 和球半径 r 平方之比，计算公式为： $\Omega = S/r^2$ ；单位为球表面度（sr）。

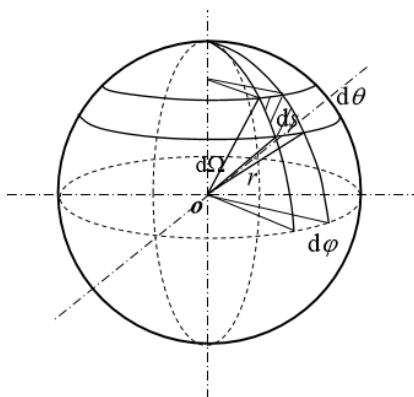


图 3-1 立体角示意图

本论文中所利用的辐射度量定义如下表所示：

表 3-1 辐射度量定义

名称	符号	定义	单位
辐射通量	Φ	以辐射的形式发射、传播或传播的功率，描述辐能的时间特性。	W 或 J/s
辐亮度	L	光源在垂直其辐射传输方向上单位表面积单位立体角内发出的辐射通量。	W/(m ² · sr)
辐照度	E	被辐射的单位表面积里入射或获得的辐射通量的多少	W/m ²

3.2 空间相机几何成像模型

成像仿真模型中常使用针孔相机模型，虽然这个模型很容易描述和模拟，但它忽略了光线穿过真实相机镜头发生的影响，例如：使用针孔相机成像的所有内容都处于清晰的焦点，实际镜头系统不可能实现这一点；离开镜头系统的辐射分布与进入镜头系统的分布完全不同；对镜头的这种效果进行建模对于精确模拟图像形成的辐射测量很重要。

在论文中，利用投影相机模型来实现相机对目标的理想几何成像，投影相机的简化模型是简单的成像几何关系的中心投影模型^[40]，其不考虑复杂的光学系统如渐晕、像差、镜片损耗等现象；投影模型示意图如图 3-3 所示。物像变换关系过程中涉及到的坐标系定义如下：

图像坐标系：以焦平面为面，焦平面角点为原心， x 轴与焦平面长边重合， y 轴与焦平面短边重合。如果用矩阵对图像像素进行描述，则 x 轴沿矩阵行方向，轴 y 沿矩阵列方向。图像坐标系的坐标尺寸不仅可以以实际物理尺寸作为坐标单位也可以以像素为坐标单位，两者可以通过图像分辨率与像素尺寸进行转化。

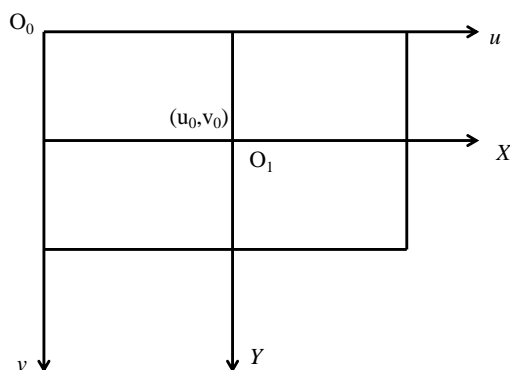


图 3-2 图像坐标系与像素坐标系的关系图

以像素为单位的图像坐标系坐标用 (u, v) 表示，此时 (u, v) 只表示像素位于矩阵中的列数和行数，并没有实际数据表示其在图像中的具体位置。因此，还需要在建立以实际物理尺寸为单位表示的图像坐标系，也就是图 3-2 表示的 XOY 坐标系。在 XOY 坐标系中，原点 O 通常定义为相机主光轴与图像平面的交点，该点一般就位于图像中心处。 (u, v) 坐标系到 XOY 坐标系的变换可以用下面的矩阵进行转化：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 1 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

相机本体坐标系：以相机中心为原点，以焦平面法线作为 Z 轴，与相机中心相交平行于焦平面的面为 XOY 面。

物空间坐标系：用于描述空间目标三维几何结构的坐标系，其原点在目标几

何结构中心位置，右手坐标系。

世界坐标系：固定的坐标系，用于描述空间目标、光源和相机的相对位置。

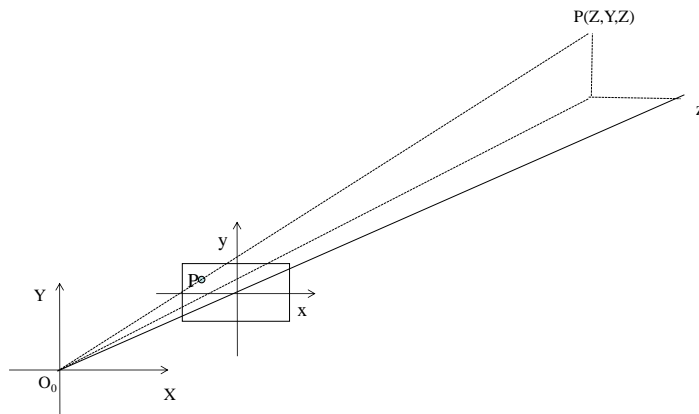


图 3-3 中心投影成像几何关系

在成像变化中设计到不同坐标系之间的变化，其主要变化有平移和旋转，这两类变换又名欧式变换，其变换模型的计算如下^[42]：

(1) 平移变化模型：

平移是坐标系变化中最基础的变化，其变换矩阵为：

$$T(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 旋转变换模型

沿着 x, y, z 轴进行旋转其变换矩阵各不相同，沿着 x 轴旋转 α 角度时，变换矩阵为：

$$R_1(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

沿着 y 轴旋转 β 角度时，变换矩阵为：

$$R_2(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

沿着 z 轴旋转 γ 角度时，变换矩阵为：

$$R_3(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3) 左手坐标系与右手坐标系的转化

在实际应用中，有时候会涉及到左右手坐标系之间的转换，其转换方程为：

$$\mathbf{S}_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

若坐标系 $OXYZ$ 经向 x 、 y 、 z 轴分别平移 Δx 、 Δy 、 Δz 距离后，再绕 x 轴旋转 α 角度，绕 y 轴旋转 β 角度，绕 z 轴旋转 γ 角度变换为 $oxyz$ 坐标系，那么这两个坐标系之间的变换矩阵 \mathbf{R}_T 为：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_1(\alpha) * \mathbf{R}_2(\beta) * \mathbf{R}_3(\gamma) * \mathbf{T}(\Delta x, \Delta y, \Delta z) * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_T = \mathbf{R}_1(\alpha) * \mathbf{R}_2(\beta) * \mathbf{R}_3(\gamma) * \mathbf{T}(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$$

如果涉及坐标系 $OXYZ$ 与坐标系 $oxyz$ 之间的转换还涉及到左右手坐标系的转换，则变换矩阵为：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{S}_T * \mathbf{R}_T * \mathbf{S}_T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

但在后续实现中，我们涉及到仿射变换，其除了包括欧式变换的平移、旋转外，还包括放缩、剪切、反射。本论文中主要是用的平移，旋转和放缩，对于放缩其具体变化矩阵如下：

(4) 放缩

如果放缩中心在 $(0,0,0)$ 点，则放缩变换矩阵为：

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

如果 $S_x, S_y, S_z > 1$ ，则表示在 x 、 y 、 z 轴上进行放大；如果 $S_x, S_y, S_z < 1$ ，则表示在 x 、 y 、 z 轴上进行缩小。如果放缩中心不在原点，则将原点平移至放缩中心，进行放缩然后再平移回原点。

投影相机模型有两种，正投影相机模型和透视投影相机模型^[41]，本文主要采用后一种。

正交投影相机模型(Orthographic Camera)：正交变换采用场景的矩形区域并将其投影到定义该区域的框的正面。他的缺点是不会有透视物体的效果；即因为目标越来越远在图像平面上变得越来越小，但它确实使平行线保持平行，并且它保持了物体之间的相对距离。其示意图如图 3-4 所示：

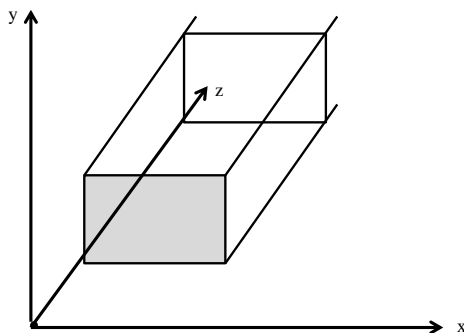


图 3-4 正交投影相机示意图

透射投影相机 (PerspectiveCamera): 透射投影相机是所有投影相机中最复杂的, 透视投影类似于正投影, 因为它将一定体积的空间投射到 2D 像面上。然而, 它包括透视效果, 远处的物体被投射得比相距更近的物体小。与正投影不同, 透视投影不能保持距离不变, 并且平行线不再保持平行。透视投影与眼睛或相机镜头如何生成 3D 世界的图像相当接近, 其思想为中心投影模型。

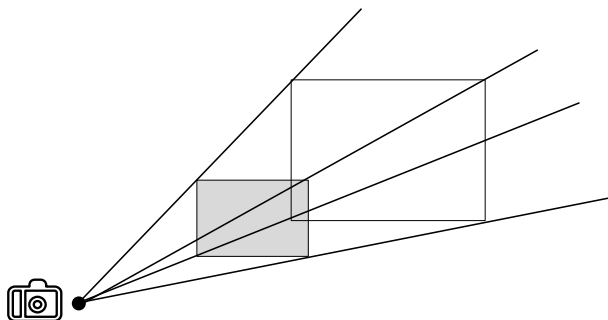


图 3-5 透视投影相机模型示意图

视锥体是一个三维体, 他的位置和摄像机相关, 透视投影使用棱锥作为视锥体, 摄像机位于棱锥的椎顶。

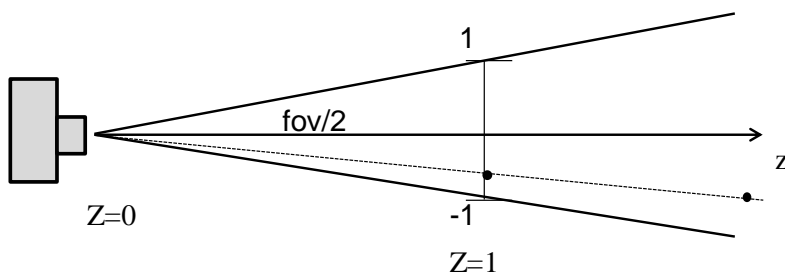


图 3-6 透视投影物像变换

透视投影描述了场景的透视观察, 场景中的点投影到垂直于 z 轴的视平面上, 如图 3-6 所示。它需要视场角 fov 和到近 z 平面、远 z 平面的距离。在映射前, 用 n 和 f 分别是近远两个剪裁平面到原点的距离, 则 z 的范围是 $[n, f]$, 在映射后, z' 的范围是 $[0, 1]$, 透视投影成像后, 使得近 z 平面上的点被映射为 $z = 0$, 远平面上的点为 $z = 1$ 。通过两个步骤最容易理解透视投影转换:

(1) 相机空间中的点 p 投影到观察平面上。一些空间计算表明, 可以通过将 x 和 y 除以点的 z 坐标值来计算观察平面上的投影 x 和 y 坐标。重新映射投影

的 z 深度,使得近平面的 z 值为 0,远平面的 z 值为 1,我们想要做的计算是:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x}{z} \\y' &= \frac{y}{z} \\z' &= \frac{f(z-n)}{z(f-n)}\end{aligned}$$

这些计算用 4×4 矩阵编码:

$$\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0 \\0 & 1 & 0 & 0 \\0 & 0 & \frac{f}{f-n} & -\frac{fn}{f-n} \\0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}$$

(2) 用户指定的视角 (fov) 通过缩放投影平面上的 (x,y) 值来计算,以便视野内的点投影到 $[-1,1]$ 之间的坐标上。对于方形图像, x 和 y 都位于屏幕空间中的 $[-1,1]$ 之间。否则,图像较窄的方向映射到 $[-1,1]$,而较宽的方向映射到比例较大的屏幕空间值的范围。这里相邻侧的长度为 1,因此相对侧的长度为 $\tan(fov/2)$ 。通过该长度的倒数进行缩放将视野映射到 $[-1,1]$ 的范围。

3.3 成像仿真辐射传输方法解算

3.3.1 辐射传输方程

辐射传输方程是成像仿真中最重要的概念之一,在成像仿真过程中,计算像素辐射度需要借助于辐射传输方程^[43];渲染方程用于描述成像场景中的辐射度的平衡分布,最初由 Kajiya 引入计算机图形学领域;其使用递归积分方程描述了所有光传输机制,其内核包含各种材料属性和可见度函数。

在辐射传输方程计算中,我们假设没有媒介且光线都是瞬间传播,因此稳态分布瞬时实现。可以根据材料表面自发辐射、入射辐亮度及材质表面 BRDF 计算碰撞点处的全部反射辐射度。

我们假设在物体表面点 p 处能量守恒来推导辐射传输方程, $L_e(p, \omega_0)$ 表示在表面点 p 处和出射方向 ω_0 上发出的辐射,而 $L_i(p, \omega_i)$ 表示在 p 处在该方向 ω_0 上反射的辐射;通过能量守恒,某一点和在特定的出射方向上的总输出辐射,是发射辐射与该表面点在该方向上反射的辐射之和,传出辐射度 $L_0(p, \omega_0)$ 用 $L_e(p, \omega_0)$ 和 $L_i(p, \omega_i)$ 表示如下:

$$L_0(p, \omega_0) = L_e(p, \omega_0) + L_i(p, \omega_0) \quad (3-1)$$

由 BRDF 的定义我们可知:

$$f_r(p, \omega_i, \omega_0) = \frac{dL(p, \omega_0)}{dE(p, \omega_i)} = \frac{dL(p, \omega_0)}{L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (3-2)$$

$$L_o(p, \omega_0) = \int_{H^2} f_r(p, \omega_i, \omega_0) L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \quad (3-3)$$

论文中的光源为可见光，并没有自发辐射能量，因此(3-3)即为辐射传输方程。在求解出射辐射度时，我们只需要明确入射辐亮度，物体表面 BRDF 函数及入射角度等之后进行积分。

仿真成像的理想解决方案是找到所有可能（表面）点和相对于这些点的所有方向的辐射函数的所有值；很容易看出，这是不可能实现的。因此，大多数仿真成像算法是通过一些选定的点和方向集来计算平均辐射亮度。计算一组上的平均辐亮度值的一种可能方式是计算该组上的辐射通量或者将该组的辐亮度总和与光线数相除。

3.3.2 蒙特卡洛积分求解

通常情况下，辐射传输方程中的积分求解不出其解析解，我们必须转向求解数值解。采用蒙特卡洛积分解决上述问题；蒙特卡罗方法是定义一个随机变量，使得该随机变量的期望值成为问题的解决方案，其收敛速度与被积函数的维数无关。然后绘制该随机变量的样本并对其求平均以计算随机变量的预期值的估计。这个估计的预期值是我们最初想要解决的问题的解决方案的近似值；这个估计的预期值是我们最初想要解决的问题的解决方案的近似值。

蒙特卡罗方法的主要优势在于其概念简单性^{[44],[45]}；一旦找到合适的随机变量，计算包括对随机变量进行采样并对从样本中获得的估计求平均值。但蒙特卡罗技术的一个缺点是它们的收敛速度相对较慢，尽管对其进行了优化，但是其收敛速度依旧很慢。

我们在 $x \in [a, b]$ 上定义了函数 $f(x)$ ，蒙特卡洛对积分式 $I = \int_a^b f(x) dx$ 的评估为：

$$\langle I \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(x_i)}{p(x_i)} \quad (3-4)$$

$P(x_i)$ ——概率密度函数，其限制条件为：针对全部 x ， $p(x_i)$ 非 0，且 $\int_a^b p(x) dx = 1$ ， $P(x)$ 用于采样。

理论上， $E(\langle I \rangle)$ 的值等于积分的值：

$$\begin{aligned} E[\langle I \rangle] &= E \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(X_i)}{p(X_i)} \right] \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_a^b \frac{f(x)}{p(x)} p(x) dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_a^b f(x) dx \\
 &= \int_a^b f(x) dx
 \end{aligned}$$

本论文采用的反向光线追踪算法中，光线是从视点发出后与物体表面相交，因此辐射传输方程中光线辐射出射方向 ω_o 是已知的，将蒙特卡洛方法应用于辐射传输方程中，方程中积分项的求解可表示为：

$$\begin{aligned}
 L_o(p, \omega_o) &= \int_{H^2} f_r(p, \omega_i, \omega_o) L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \\
 &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{f_r(\omega_{im}) L_i(\omega_{im}) \cos(\theta_{im})}{p(\omega_{im})}
 \end{aligned} \quad (3-5)$$

式中 $p(\omega_{im})$ 为光线入射方向 ω_{im} 的概率密度函数，论文中采用的是随机采样方法，因此 $p(\omega_{im}) = 1/N$ ， N 为像素采样个数。

在成像仿真中，每个样本通常要求在计算被积函数的值的过程中跟踪一条或多条射线，这在使用蒙特卡罗进行图像合成时是一项计算上昂贵的成本。在图像中，来自蒙特卡罗采样的伪像表现为噪声像素随机太亮或太暗。蒙特卡洛目前用于计算机图形学的大多数研究都是尽可能地减少这个误差，同时尽可能减少必须采集的额外样本的数量。

3.3.3 光线追踪算法

光线跟踪算法理论是假设光线从相机焦面发出到场景的反向光线追迹法；如果我们用像素组成的平面代替我们的眼睛，我们的目标是计算每个像素点的辐射度值，光线追踪算法是从像面像素点发射光线，反向追迹光线撞击物体表面后，确定随机方向反射出的光线是否在光源范围内，如果在计算这条光线的辐射度，并将该值赋予像素亮度，重复此步骤直到所有的像素被赋予辐亮度，我们就将场景中的成像目标在相机中的图像仿真出来了。

光线追踪算法主要有以下几个步骤：

(1) 光线追踪算法的目的是求出对焦面图像中的每个像素值，它将追踪从相机到像素中心线获得的主光线投射到场景中。确定了主射线的方向后，遍历场景中的目标，与主光线进行交叉检测，看光线是否与目标物体中的任何一个平面相交。但按照实际情况，当发生主射线与多个平面或者物体相交的情况时，我们选择交点离眼睛最近的物体。

(2) 如果物体表面材质发生散射或者反射，我们从与物体的相交处向光源投射射线。射线方向由物体表面性质决定，如果这条特定的光线在通往光源的路上没有其他障碍，那么这个点就被照亮了。

(3) 如果这条光线与另外表面相交，通过目标表面物理特性我们可以获得

反射或者折射、散射的方向，我们就朝这个方向发射新的光线，生成次级光线。如果次级光线与另一个物体相交，那么开始计算次级光线与物体表面相交情况，直至达到光线最大追迹深度或者光线在通往光源的路上不与某个物体相交，计算此时光线的辐射度。

(4) 如果我们对每个像素重复这一操作，就可以获得三维场景中目标在给定光源、相机下像素面中所成的像。

主要的追迹光线有三种：

(1) 主光线：由相机发出的光线；

(2) 次级光线：物体与主光线相交交点发出的反射、散射、折射光线，并且将继续对此光线进行追迹与计算其他物体相交情况；

(3) 阴影光线：从物体与主光线或者次级光线交点发出的光线，指向光源。如果这条光线在指向光源之前与其他物体相交，则该交点位于该光源的阴影处。

因为本论文空间目标表面材料反射率较大，因此材料光学特性中一般忽略折射光线。

利用反向光线追踪算法进行像素辐射度求解的算法大致流程如图 3-7 所示：

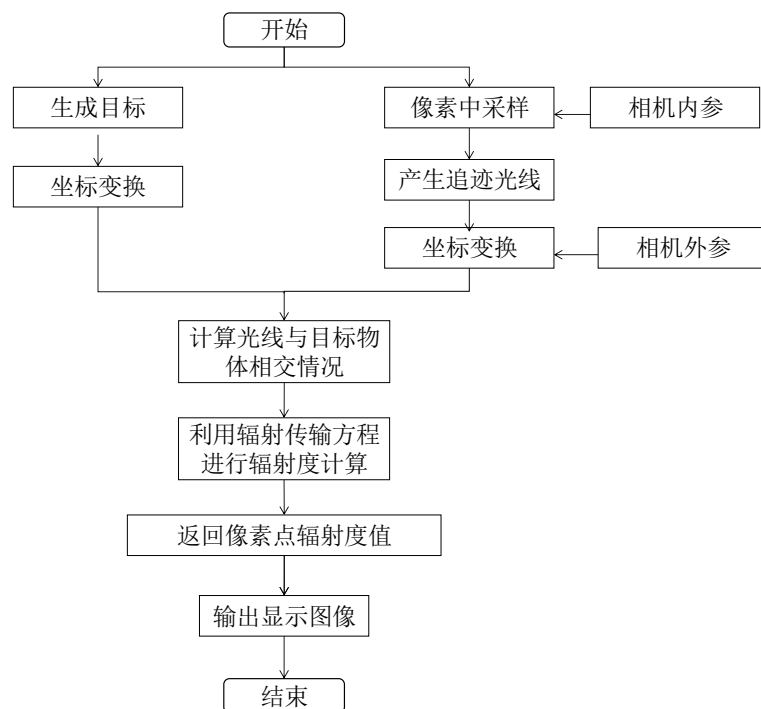


图 3-7 辐射传输方法解算流程图

首先必须描述空间目标成像仿真具体场景，其需要导入目标模型、选定相机类型与光源类型，并对其对应参数进行设置。因为成像仿真计算需要分别将目标，相机，光源坐标系转化到世界坐标系内，因此还需要给出每个坐标系转化到世界坐标系的变换矩阵。

成像仿真计算首先需要从相机像素平面发出追迹光线，利用转换矩阵将其转化到世界坐标系，并与在世界坐标系下的目标进行碰撞检测，计算光线与目标的

相交情况，依据给定的追迹深度，进行光线跟踪，之后根据给出的目标表面的 **BRDF** 函数，利用辐射传输方程与蒙特卡洛方法计算出每条光线的辐射度值，最后将每条光线的辐射度值返回对应像素点，求出像素值生成图像，最后将图像输出显示。因此最后输出的图像为不考虑成像系统的入瞳辐射度图像。

3.4 本章总结

本章主要介绍了成像仿真模型辐射传输算法的解算；首先介绍了算法基础理论辐通量，辐亮度和辐照度的概念，其次介绍了空间相机成像模型，本文主要采用中心投影理论的透射投影相机；并描述了在成像仿真中涉及到的不同坐标系及其之间的转换方程。最后重点介绍了光线追踪算法理论，成像仿真模型的最终目的是求解出相机像面上像素点的辐亮度值，因此我们需要建立辐射传输方程，其通过入射辐亮度、入射角度和表面 **BRDF** 值计算出反射光线辐亮度；而由于辐射方程中的积分不太容易求解，我们还需要借助蒙特卡洛方程进行积分运算的解算。

第4章 成像仿真方法理论实现

论文中在 Visual Studio 2017 中, 使用 C++语言, 借助 Matt Pharr 和 Greg Humphreys 在 2005 年完成的经典的光线跟踪程序 pbrt(Physically Based Ray Toolkit)^[46]进行对复杂表面空间目标成像仿真算法的实现, 其程序需要实现将复杂表面空间目标导入程序后, 导出其在特定场景下所成的像。

4.1 pbrt 程序

pbrt 软件相比与其他光线跟踪软件来讲具备, 其优点在于设计结构简单, 易懂, 核心框架可扩展。直到现在, 开发者还在对其进行不断的改进, 修补了一些缺陷, 也能更加方便快捷地进行成像仿真程序的实现。

在模拟实现过程中, 需要完成的任务主要分为 2 个部分: 首先是对用户提供的场景描述文件进行解析。其内容包含有: 指定构成场景的几何形状, 它们的材质特征, 场景中的灯光, 在场景中虚拟摄像机的位置, 以及整个系统中使用的所有单个算法的参数。指定场景后, 第二个执行阶段开始, 成像循环执行。在论文中, 导入的场景主要为空间目标几何结构模型, 因此需要利用软件接口分别描述光源、相机的位置属性及其坐标系与世界坐标系直接的转化关系; 再利用特定接口对目标表面材质属性进行描述, 最后对每根追迹光线进行辐射传输方程的求解。

本论文仿真成像使用功能大部分是基于 pbrt 中下面 10 个关键抽象基类实现的。可以轻松地将每个实现添加到系统中以扩展其功能, Shape 类主要为存储调用空间目标三角面元的信息方便后续对面元进行材质赋值与光线交叉检测; Camera 类提供成像相机参数设置和像面发出的光线设置; Material 类为空间目标表面光学特性提供接口; Light 主要为场景提供光源参数设置而 Integrator 类对应成像仿真中渲染方程积分求解, 对每条光线进行循环处理得到最终图像像素值。

表 4-1pbrt 主要抽象基类

抽象基类	类名
Shape	shapes/
Aggregate	accelerators/
Camera	cameras/
Sample	samplers/
Filter	filters/
Material	materials/
Texture	textures/
Medium	media/
Light	lights/
Integrator	integrators/

程序首先对 `pbrt` 初始化, 主要有 `pbrtInit()` 函数和 `pbrtCleanup()` 函数。前者执行系统范围的初始化, 它初始化 `Options` 结构中的值; 然后 `pbrt` 的 `main()` 函数解析给定的场景描述, 从而创建一个 `Scene` 和一个 `Integrator`。完成成像仿真后, `pbrtCleanup()` 会在系统退出之前进行最终清理。

4.2 成像仿真场景构建

如图所示, 要进行针对复杂表面空间目标成像仿真实验, 首先要进行成像仿真场景构建, 其最主要有导入目标几何模型、为几何结构模型中的三角面元的绑定材质, 即建立三角面元对应的 `BRDF` 模型、描述场景中相机光源的位置及其具体的参数设置。

4.2.1 目标几何模型导入

对复杂表面空间目标进行成像仿真计算中需要先将目标模型导入, 我们需要一个函数可以读取空间目标几何模型 `stl` 文件中的数据, 之后将从 `stl` 中读入的几何模型中三角面元的顶点、法线数据存储, `pbrt` 中有存储三角面元数据的接口 `Shape` 类, 其提供对图元的原始几何属性的访问, 例如其表面区域和边界框, 并提供光线交叉例程, 而 `pbrt` 中 `Primitive` 类封装有关基元的其他非几何信息, 例如其材质属性。

利用从 `stl` 文件中读取的三角面元信息将 `pbrt` 中 `Shape` 类实例化, 方便后续成像仿真的实现。由于本论文导出的为三角面元化几何模型, 因此 `Shape` 几何形状定义为三角形, 程序中使用 `Triangle` 类实现 `Shape` 接口, `Shape` 类中最重要的几个成员说明如下:

- (1) `vertexIndices`: 指向顶点索引数组的指针, 对于第 i 个三角形, 三个顶点位置分别是 `P[vertexIndices[3 * i]]`, `P[vertexIndices[3 * i + 1]]` 和 `P[vertexIndices[3 * i + 2]]`。
- (2) `nVertices`: 网格中顶点的总数。
- (3) `P`: `nVertices` 顶点位置的数组。

三角形 `Triangle` 类只存储指向第一个顶点索引的指针, 而不是存储指向顶点本身的三个指针, 这减少了每个三角形所需的存储量。

`Shape` 类的构造函数中还存储了将空间目标模型转化到世界目标的转换矩阵, 转换矩阵主要由平移矩阵和旋转矩阵组成。我们可以通过设置矩阵参数来确定目标在世界坐标系的位置。

4.2.2 三角面元材质绑定

在将目标几何结构模型导入场景后, 我们需要为每个三角面元进行材质绑定, 在成像仿真模型中其材质光学特性主要由三角面元 `BRDF` 值表达。 `pbrt` 中是由

Material 接口类的实例表示三角面元的材质，该接口类具有一个方法，该方法在表面上获取一个点并创建表示该点处散射反射的 **BRDF** 对象。因此构建目标表面材质在另一种意义上是就是赋予该表面其 **BRDF** 函数的值。

在 **Material** 类中为材质表面赋予 **BRDF** 值的方法称为 **Compute Scattering Functions()**，此方法被赋予一个 **SurfaceInteraction** 对象，该对象包含形状表面上交叉点处的几何属性；该方法的实现负责确定该点的反射属性，并使用相应的 **BRDF** 类实例初始化 **SurfaceInteraction :: brdf** 成员变量。

对于与场景中的几何体相交的每条光线，积分器将在计算沿光线传播的辐射的过程中创建一个或多个 **BRDF** 对象。（考虑到光的多次相互反射的积分器通常会在此过程中产生许多 **BRDF**）。

对于不同的材质需要调用其所对应的材料类别来实例化，每种材料所需要的参数有所不同，以下介绍几种我们成像仿真过程中所用到的材质，实验中的 **BRDF** 数据来源并非为实际测试数据，其数据展示材质的基本属性。

朗伯材质：主要利用在表面涂有白漆的空间目标支撑部分，为漫反射材质，**BRDF** 模型为朗伯模型，我们调用 **pbrt** 中的 **Matte** 类进行实例化，该材料类的参数有光谱漫反射值 **Kd** 和标量粗糙度值 **sigma**；如果 **sigma** 在表面上的点处的值为零，则 **MatteMaterial** 会创建一个 **Lambertian Reflection BRDF**；否则，使用 **Oren Nayar** 模型。因此我们需要将 **sigma** 设为 0，并提供面元漫反射值 **Kd** 来对材质进行模拟。对漫反射值不同的朗伯平面进行成像仿真其结果如图 4-1 所示：

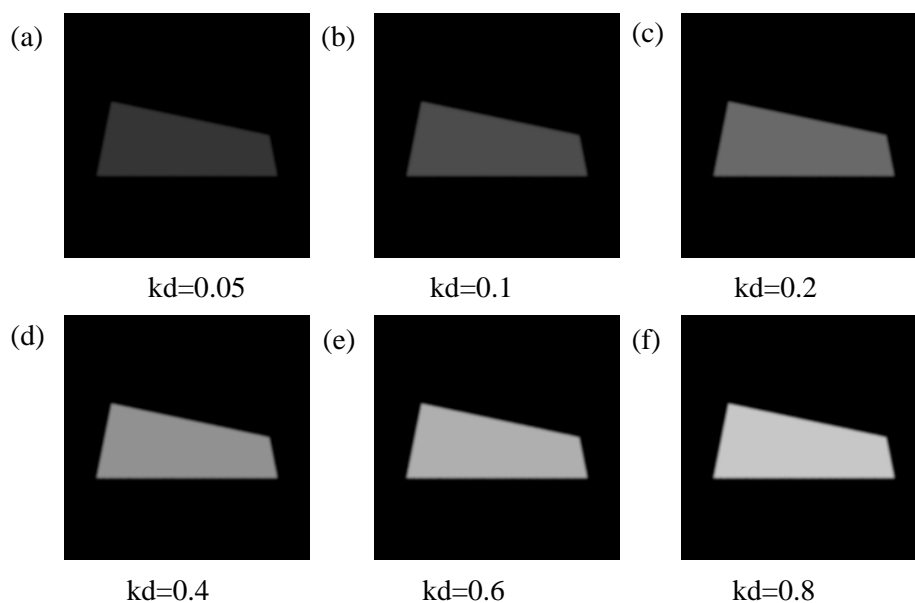


图 4-1 朗伯材质仿真成像结果

由以上图像结合材料性质，我们使用 **Kd** 值为 0.2 的朗伯材质作为复杂表面空间目标支撑的表面材质，对其进行成像仿真得到的结果如图 4-2 所示：

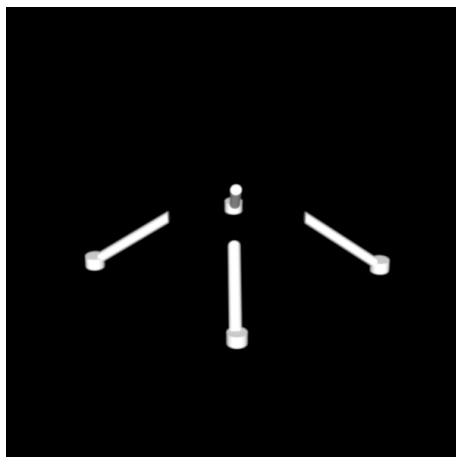


图 4-2 空间目标支撑仿真成像结果

镜面材质：空间目标的主体部分的表面材质，其材质主要体现简单的镜面模型，但是 pbrt 中的 Mirror 类为完全镜面反射，该材料类参数只有反射率，反射光线只有一个方向，因此一个平面所成的像不太容易显示出来，我们直接选择高反射率的金属材质模拟镜面材质对主体部分进行光学特性建模，其折射率为 0.18，吸收率为 0.01，其成像结果如图 4-3 所示：

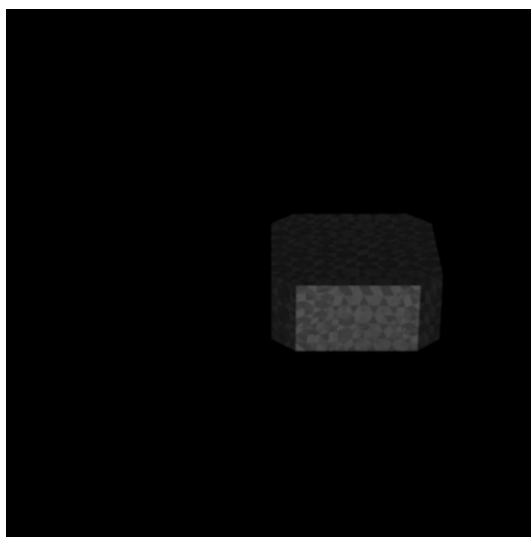


图 4-3 主体部分仿真成像结果

金属材质：空间目标的太阳能帆板部件表面材质，选用 pbrt 的 Metal 类进行实例化。其实例化的重要参数有：金属的折射率和吸收率，粗糙度参数 α_x ， α_y 。而确定了表面金属类型就可以确定金属的折射率和吸收率。

因为本文所涉及到的光是可见光，我们利用 pbrt 附表查找不同波长下对应金属的折射率和吸收率，光源为可见光，波长主要范围将在 380-780nm，太阳能帆板的金属主要为 SiO_2 ，因此估计其折射率为 2.05，反射率为 0.055，我们设置金属为各向异性，对 α_x ， α_y 取不同值时的 SiO_2 金属平面成像仿真的结果如图 4-4、图 4-5 所示：

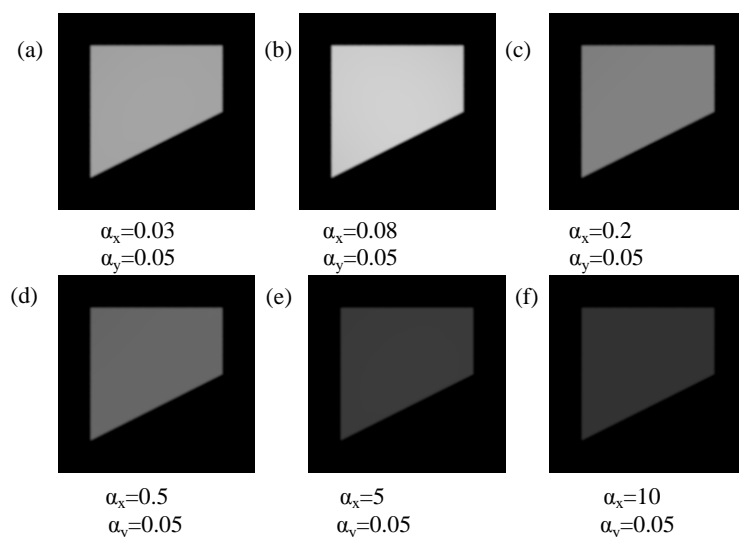


图 4-4 α_y 不变 α_x 取不同值时金属材料所成的像

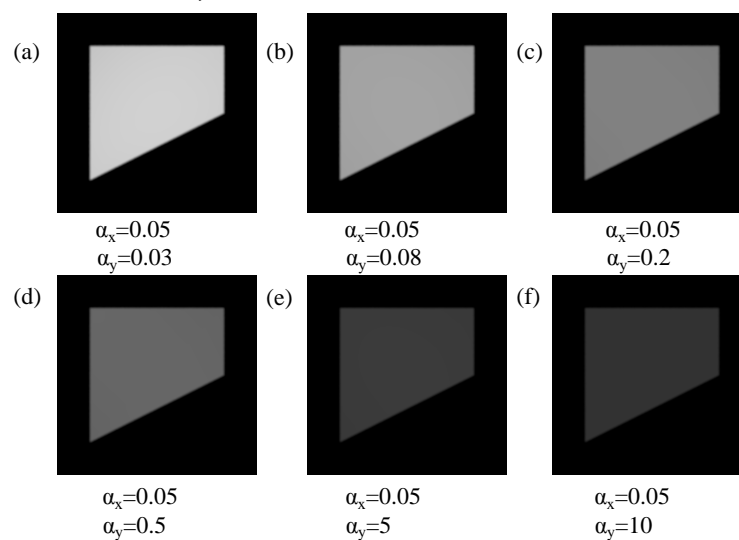


图 4-5 α_x 不变 α_y 取不同值时金属材料所成的像

对比图 4-4(a)、图 4-5(a)的图像可以看出， α_x 、 α_y 分别代表的不同方向的粗糙度，即使俩值互换得到的金属平面物理特性也不一样。

在 $\alpha_x=0.08$ ， $\alpha_y=0.05$ 值下 SiO_2 的太阳能帆板成像仿真结果如图 4-6 所示：



图 4-6 空间目标太阳能帆板成像仿真结果

最后将 Shape 中每个三角面元绑定其材质，stl 中三角面元的顺序依次为太阳能帆板，支撑和主体，我们按顺序绑定材质即可。

4.2.3 透视投影相机和场景光源的构建

相机是构建场景中最重要的一部分，相机在 pbrt 中的接口为 Camera 类，而本论文中采用的是透视投影相机模型，因此使用的是 pbrt 中相机子类 PerspectiveCamera，相机中最重要的构造参数为将相机放置在场景中的转换矩阵，该转换矩阵存储在 CameraToWorld 成员变量中。其作用是提供相机坐标系转化到世界坐标系的矩阵，变量中平移矩阵和旋转矩阵分开表示；相机中还有一个指向 Medium 实例的指针，用于表示相机所在的散射介质，本论文主要研究空间目标成像仿真，成像环境是太空，因此散射介质为真空，Medium 设置其指向空指针即可，在后续中将不再多进行赘述。

为了进一步模拟现实中的相机，pbrt 还提供了一系列其他参数，例如快门开关时间，真实世界的相机具有可在短时间内打开的快门，以使胶片曝光。运动模糊作为这种非零曝光时间的一个最终结果是：对于相机运动的物体是相对不清晰的。因此，所有摄像机都需要存储快门打开和快门关闭时间，并且负责生成具有相关时间的光线以对场景进行采样。给定快门打开时间和快门关闭时间之间的光线时间的适当分布，可以计算表现出运动模糊的图像。本论文程序中并不需要运动模糊，因此只设置开关时间分别为 0.0s、1.0s、1s 时间足够生成静态仿真图像。相机的实现是设定这些值的参数后传递给 Camera 构造函数。

为了使场景中的物体可见，场景中必须有一个照明源，以便一些光从它们反射到相机传感器。pbrt 中有许多定义好的光源接口，我们只需要选择适当的光源进行利用即可。本论文中场景处于真空环境中，因此模拟使用的光源是远距光源也就是平行光。

远距光源描述了以相同方向照亮区域中每个点的光源。由于它是一个无限模型，因此这种类型的光源也叫做“无穷远”处点光源。需要注意的是，DistantLight 构造函数不接受 MediumInterface 参数；因为远距光线唯一合理的介质是真空，如果它本身处于可以吸收任何光线的介质中，那么它的所有发射都会被吸收。

pbrt 中 DistantLight 类有几个比较重要的参数：定义光源的坐标系相对于世界空间的变换矩阵，具体的坐标系对描述光源通常是很方便的（例如，聚光灯总是假设位于其光空间的原点，向下照射+z 轴）。光到世界的变换使得可以将这种光放置在场景中的任意位置和方向上。MediumInterface，描述光源内部和外部的参与介质。对于本身没有“内部”和“外部”的灯（例如，点光源），两侧都具有相同的介质。内部外部两个指针的值都为 nullptr 表示真空。

4.3 光线跟踪算法仿真成像方法实现

成像仿真过程中,首先要从像面生成追踪光线,其次进行光线与目标的碰撞检测,确定发出光线与目标那个表面相交,并继续追踪次级光线,直到最后光线到达光源且路径没有障碍,通过辐射传输方程计算出每根光线的辐射度值传递给像面。

4.3.1 生成追迹光线

追迹光线是从像面发出的光线,此功能的实现首先需要调用 `pbrt` 中的 `Film` 类, `Film` 类为模拟相机中的传感设备建模。`Film` 的构造函数需要一些值:图像的整体分辨率(以像素为单位);裁剪窗口,可指定要渲染的图像的子集;像面物理区域的对角线长度,以毫米为单位指定给构造函数,但在此处转换为米;过滤器接口;输出图像的文件名和控制图像像素值如何存储在文件中的参数。

在本论文成像仿真程序中,由于电脑配置限制,图像分辨率太高会导致运行时间过长,不易得出结果,因此最终图像分辨率为: 600×600 。

之后采样器负责选择像面上发射追迹光线的点,因此我们需要选择采样器类型,在 `pbrt` 中, `Sampler` 基类不仅定义了采样器的接口, `Sampler` 基类还具有一些常规功能,例如负责实现上述功能,而用到积分器会估计光传输积分值的样本位置,这也是 `Sampler` 基类负责提供。比如,一些积分器需要在光源上选择随机点来计算来自区域光的照明。生成这些样本的良好分布是图像仿真过程的一个重要部分,可以显著影响整体效率。所有 `Sampler` 实现必须为构造函数提供将为最终图像中的每个像素生成的样本数;本论文中像素采样数为 20。

最后靠 `pbrt` 中的相机抽象基类 `Camera` 中的方法来实现追迹光线的生成。`Camera` 类生成光线有两个最关键的方法: `Camera :: GenerateRay()` 和 `Camera :: GenerateRayDifferential()`。第一种方法计算对应于像平面上的样本位置的世界坐标系空间射线,基于不同的图像形成模型要以不同方式生成这些光线。第二种方法不仅生成此光线,还计算有关光线采样的图像区域的信息。

相机子类需要实现的第一种方法是 `Camera :: GenerateRay()`,它应该计算与给定样本相对应的光线,重要的是将返回光线的方向分量标准化,此结果将会在后系统的许多其他部分进行利用。`GenerateRay()` 还返回一个浮点值,该值会影响沿着生成的光线到达胶片平面的辐射量对最终图像的贡献程度。

`GenerateRayDifferential()` 方法不仅计算像 `GenerateRay()` 这样的主光线,也计算在胶片平面上沿 x 和 y 方向移动一个像素的像素的相应光线,即光线的差分计算。

4.3.2 光线交叉测试

生成追迹光线之后，需要构建光线交叉测试方法，也就是检测光线与目标三角面元相交情况。pbrt 中此功能由 Shape 类负责。Shape 实现必须提供测试光线交叉及其形状的方法。我们使用 `Shape::Intersect()`，返回与沿着光线的 $(0, tMax)$ 参数范围中的第一个交叉点（如果有）对应的单个光线形状交叉点的几何信息。在进行光线交叉测试中需要注意以下几点：

- (1) Ray 光线结构包含一个 `Ray::tMax` 成员，用于定义光线的端点，交叉测试必须忽略此点之后出现的任何交叉点。
- (2) 如果找到交叉点，则存储在传递到交叉测试中的 `tHit` 指针中的是随光线的参数距离。假设随着光线有多个交叉点，则应报告离得最近的交叉点。
- (3) 传递到交叉例程的光线位于世界空间中，因此如果交叉点测试需要，形状负责将它们转换为物像空间。返回的交叉点信息应该在世界空间中。

三角形的 `Intersect()` 方法的结构遵循早期交叉测试方法的形式：应用几何测试来确定是否存在交叉点，如果存在，则计算关于在给定的返回交集的进一步信息。

4.3.3 成像仿真循环和输出图像设置

当成像场景构建完成，生成追迹光线且对光线和场景进行光线交叉检测之后，开始进入 pbrt 的第二个阶段，成像仿真循环。由辐射传输方程得知，计算出射光线辐射度值所需要的参数有：入射光线角度和辐射度值，出射光线角度，光线入射平面 BRDF 值。

入射光源角度与入射辐射度是由光源决定，光源实现所需要的关键方法是 `Sample_Li()`，调用者传递一个交互，该交互提供场景中参考点的世界空间位置以及与之相关的方向，并且假设光与物体之间没有遮挡，光返回由于该光在那时到达该点的辐射度。`Sample_Li()` 方法的大部分实现都很简单；对于远距光源入射方向和辐射度始终相同。

在仿真成像中，如果反射光线与光源光线有重合，此时我们需要注意在此路径上是否有遮挡物，因此我们使用了一个可见度函数 V 来表达， $V=1$ 代表路径上没有遮挡， $V=0$ 表示路径上有遮挡，反射光线此时辐射度为 0。此时辐射方程表达为：

$$L_0(p, \omega_0) = \int_{H^2} V * f_r(p, \omega_i, \omega_0) L_i(p, \omega_i) \cos\theta_i d\omega_i \quad (4-1)$$

Light 的使用还负责启动光源 ω_i 的入射方向并初始化 `VisibilityTester` 对象，收集有关必须跟踪的阴影辐射的数据以验证光和参考点之间没有遮挡对象。

当参数全部计算出来后，场景仿真成像的图像的实现 `Integrator` 接口的类的

实例处理。Integrator 是一个抽象基类，使用 Integrator 的子类 SamplerIntegrator 构造函数在成员变量中存储指向渲染方程所需要的对象的指针。成像仿真可以在具有多个处理核心的系统上并行进行，图像被分解成小的像素区块。每个图块可以独立并行地处理。SamplerIntegrator 的方法实现追迹光线辐射度计算，采样器提供一系列样本值，相机将样本转换为来自像素平面的相应光线，并且 $L_i()$ 方法实现计算沿着该光线到达像素面的辐射。样本及其辐射被给予 Film，其存储它们在图像中的贡献。重复此过程，直到采样器提供了生成最终图像所需的尽可能多的样本。一旦计算出图块中所有样本的辐亮度值，就将 FilmTile 传递给 Film 的 MergeFilmTile() 方法，该方法处理将图块的像素贡献添加到最终图像。

相机类包含的一个指向 Film 类实例的指针用于表示最终图像，在 pbrt 中，Film 类存储指向 Filter 的指针，并在将它们累积到最终图像时使用它来过滤图像样本贡献。因此我们先设置 Filter 的参数再对 Film 进行设置。

在图像显示中，我们需要将样本及其计算的辐射值转换为像素值以供显示或存储。为了重建像素值，我们将考虑在特定像素附近内插样本的问题；为了计算像素 $I(x, y)$ 的最终值，插值导致计算加权平均值：

$$I(x, y) = \frac{\sum_i f(x - x_i, y - y_i) \omega(x_i, y_i) L(x_i, y_i)}{\sum_i f(x - x_i, y - y_i)} \quad (4-2)$$

其中： $L(x_i, y_i)$ ——位于 (x_i, y_i) 的第 i 个样本的辐射值；

$\omega(x_i, y_i)$ ——相机返回的样本贡献权重；

f ——过滤功能,由过滤器决定。

从一个抽象的 Filter 类派生用来完成 pbrt 中的所有过滤器任务，Filter 类派生为过滤中使用的 $f(x, y)$ 函数提供了相应的接口；我们首先要给出滤波器 x, y 方向上的范围，所有过滤器都以原点(0,0)为中心，并定义一个半径超过该半径它们的值为 0；该宽度在 x 和 y 方向上可以不同。

Filter 实现需要提供的唯一方法是 Evaluate()，它将 2D 点作为参数，该点提供采样点相对于滤波器中心的位置，返回该点的过滤器值。系统中其他地方的代码永远不会使用超出过滤器范围的点调用过滤器函数，因此过滤器实现不需要检查这种情况。

pbrt 程序中提供了四种滤波器，分别是盒式滤波器，三角滤波器，高斯滤波器和 Mitchell 滤波器；如图显示盒式滤波器和三角滤波器的图形,论文中使用的是三角形滤波器。

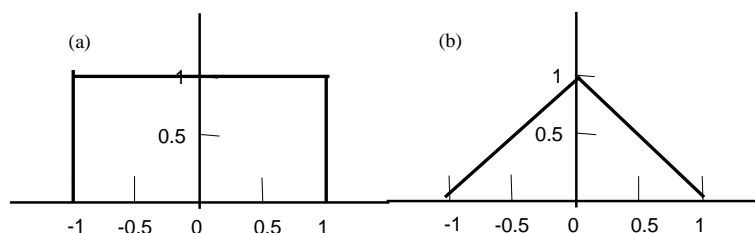


图 4-7 (a) 盒型滤波器 (b)三角滤波器

在找到每个相机光线的辐射亮度后, **Film** 实现确定样本对像素平面上相机光线开始处的点周围像素的贡献, 并更新其对图像的表示。所有循环迭代完成后, **SamplerIntegrator** 的 **Render()**方法调用 **Film** 的 **WriteImage()**方法将图像写入文件; 因此 **Film** 构造函数中还要包括输出图像路径和格式。

4.3.4 加速结构

加速结构是任何光线跟踪器核心的组成部分之一。没有算法来减少不必要的光线交叉测试的数量, 通过场景跟踪单个光线将花费时间线性的场景中的基元数量, 因为光线需要针对每个基元进行测试, 以找到最近的交叉点。然而, 在大多数场景中这样做是非常浪费的, 因为光线在绝大多数基元附近都没有通过。加速结构的目标是允许快速、同时拒绝基元组并对搜索过程进行排序, 以便可能首先找到附近的交叉点, 以便可以忽略更远的交叉点。

尽管 **Shape** 类为几何操作(如交叉和边界)提供了方便的抽象, 但它不足以完全描述场景中对象的信息。例如, 必须将材料属性绑定到每个形状以指定其外观。为了实现这些目标, **pbrt** 提供了 **Primitive** 抽象基元提供了许多实现。抽象 **Primitive** 基元是 **pbrt** 的几何处理和着色子系统之间的桥梁。

Primitive 接口中有许多几何例程, 所有几何例程都与相应的 **Shape** 方法类似。其中最重要的其中一个 **Primitive :: WorldBound()**, 它将原始几何体包含在世界空间中。这种范围有很多用途, 其中一个最重要的是将 **Primitive** 置于加速数据结构中。

本论程序采用的是 **BVH (Bounding Volume Hierarchy)** 加速方法, 边界体积层次结构 (**BVH**) 是基于原始细分的光线交叉加速的方法, 其中基元被划分为不相交集的层次结构。从概念上讲, **BVH** 相对简单, 它并不是检测每个多边形以判断是否与光线相交, 而是检测场景的一部分以查看是否与光线相交。如果场景某部分与光线相交, 则将其细分为较小的部分并再次检测, 依次继续下去直至单个多边形, 此时光线检测得到解决。

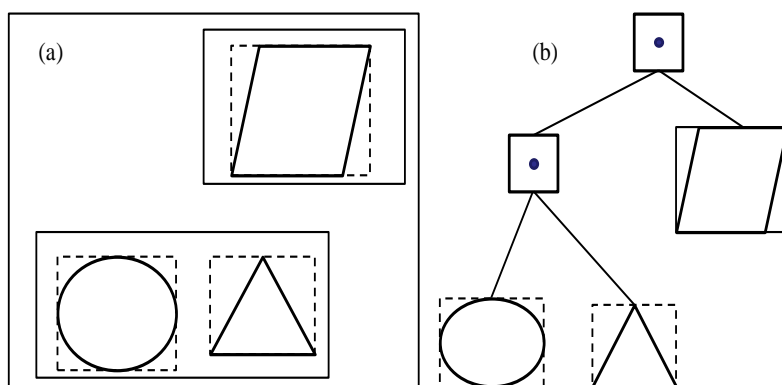


图 4-8 简单场景的边界体积层次结构

原始细分的一个属性是每个基元只出现在层次结构中一次。相比之下，基元可以通过空间细分与多个空间区域重叠，因此可以在光线通过它们时多次测试交叉。这个属性的另一个含义是表示原始细分层次结构所需的存储量是有界的。对于在每个叶子中存储单个基元的二进制 BVH，节点的总数是 $2n-1$ ，其中 n 是基元的数量。将有 n 个叶节点和 $n-1$ 个内部节点。如果叶存储多个基元，则需要更少的节点。

4.4 图像仿真与结果分析

为了验证本论文提出的使用 `pbrt` 用于复杂表面物体成像仿真的优劣性与正确性，本文基于复杂表面空间目标几何与光学特性模型以及辐射传输解算方法开展了相关成像仿真实验。论文程序中涉及到的部分其他详细参数如表 4-2 所示：

表 4-2 成像仿真具体参数

参数	数值	单位
像素分辨率	600*600	-
像素尺寸	4	mm
每个像素采样点数	20	-
追迹深度	2	-
缩放系数	1	-
相机位置变换矩阵	[0.0,0.0,70.0]	m
相机姿态变换矩阵	[0.0,0.0,0.0]	deg
相机焦距	7000	mm
镜头口径	10	mm
目标位置变换矩阵	[0.0,0.0,0.0]	m
目标姿态变换矩阵	[90.0,0.0,0.0]	deg
光源亮度	5	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$
光源方向	[0.0,0.0,-1.0]	-

空间目标仿真成像的场景中目标、相机光源相对位置的示意图如图 4-9 所示，图中蓝色的物体为相机位置示意，光源为平行光；

需要注意的是论文中成像仿真没有具体的实际应用场景，只考虑目标本体系为参考的不同光照方向和观测视线方向所成的像，最后所成图像不考虑探测链路，没有考虑实际光学系统调制采样噪声，仅为入瞳辐射亮度图像；且仿真成像过程中不考虑噪声，平台抖动等因素为理想成像。

将程序调试好后，导入第二章中生成好的 `stl` 模型，根据以上数据进行成像仿真试验，结果如图 4-10 所示：

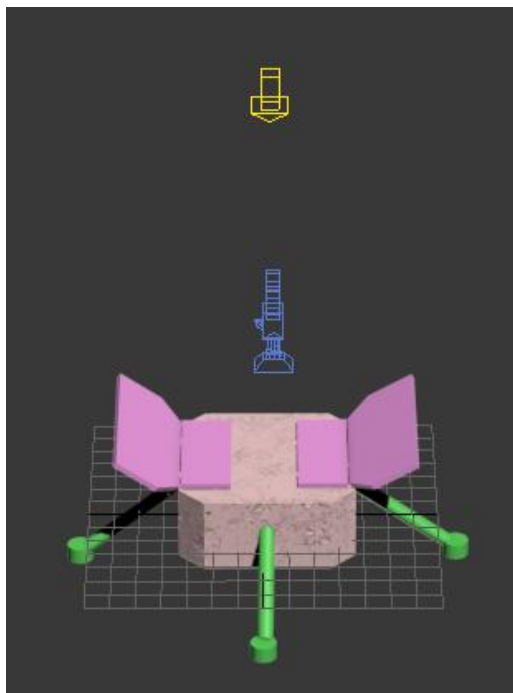


图 4-9 仿真成像程序中构建的场景

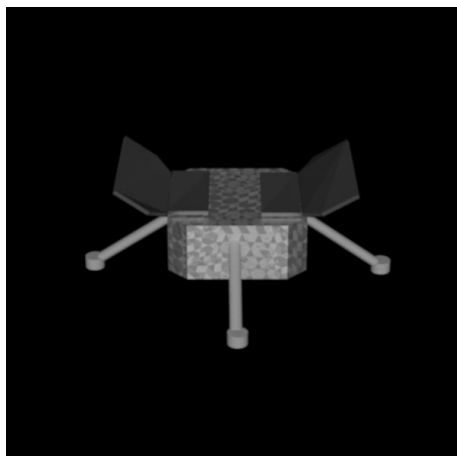


图 4-10 复杂表面空间目标成像仿真结果

从图中空间目标不同部分的明暗变化关系可以判断出,目标光学特性模型和目标几何特性很好描述出表面材质的物理特性,对主体部分成像结果显示模拟出了其褶皱的随机起伏变换,验证了针对微表面尺寸较大的部分几何结构模型的正确性,同时清晰的卫星结构模型与阴影效果表明了像点视线计算模型、光线碰撞检测等方法的正确性。

改变复杂表面空间目标的旋转变化矩阵,使目标旋转不同角度,多方向进行成像仿真,其结果如图 4-11 所示:

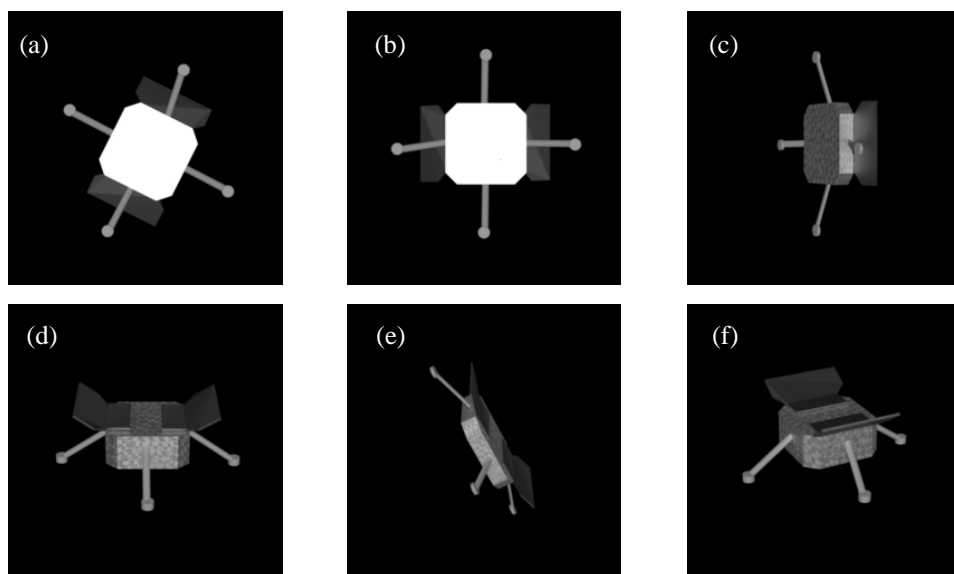


图 4-11 复杂表面空间目标旋转不同角度时成像仿真结果：图(a)旋转矩阵为 $[0.0,0.0,90.0]$ 、图(b)旋转矩阵为 $[0.0,0.0,0.0]$ 、图(c)旋转矩阵为 $[0.0,90.0,0.0]$ 、图(d)旋转矩阵为 $[90.0,0.0,0.0]$ 、图(e)旋转矩阵为 $[0.0,90.0,90.0]$ 、图(f)旋转矩阵为 $[90.0,0.0,90.0]$

结果显示目标在每个角度明暗变化明显。且由图 4-11(a)-(f)对比可知，主体上表面垂直于光线的情况下表现出强反射性，在其它方向其反射性较差，金属的太阳能帆板应该也具有类似的性质，但由于其旋转角度不能检测太细致，因此并没有找到其强反射性的角度，而支撑部件的漫反射物理特性也表达良好，其在每个方向反射辐射度一致，因此证明复杂表面空间目标在多个不同角度下都有良好的成像结果，

改变追踪深度分别取 2、3、4、5 生成的仿真图像如图 4-12、图 4-13 所示：

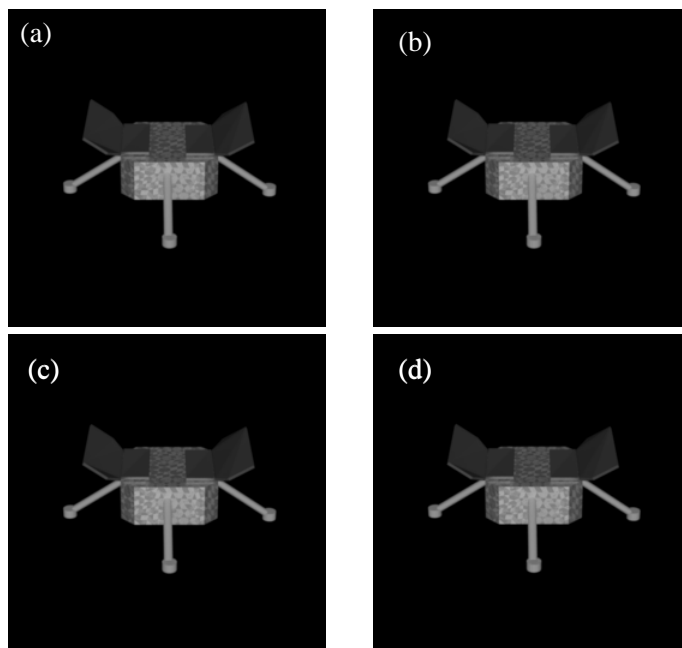


图 4-12 不同追踪深度下复杂表面空间目标正面成像结果

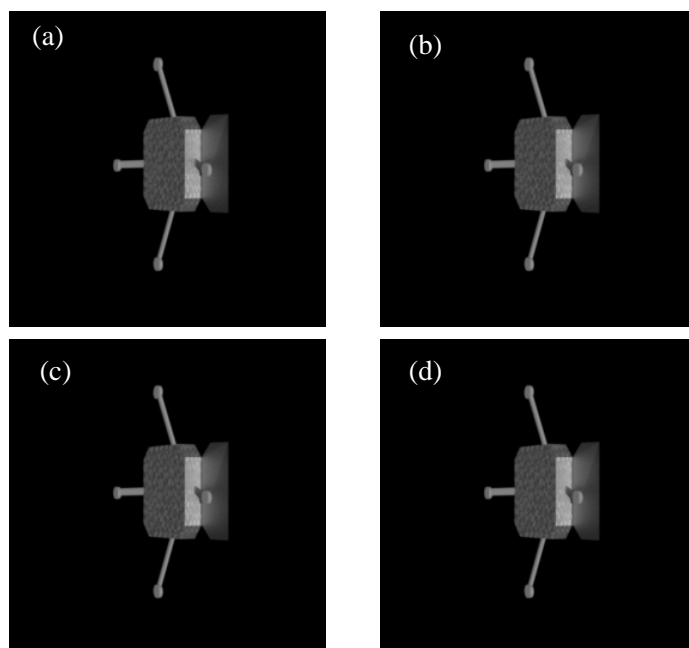


图 4-13 不同追迹深度下复杂表面空间目标侧面成像结果

由图 4-13(a)、(d)对比可知，追迹深度更大程度影响的是光线追迹程序中的次级光线，图像结果表面其改变了物体表面阴影光线数量，进而影响阴影部分的大小。追迹深度越大，其阴影光线数量越多，阴影部分越大，场景越真实贴近现实。但由于场景中只有一个空间目标，因此在某些角度改变追迹深度并不会很大程度上影响仿真图像结果，但是会由于追迹深度增加会导致光线数量增加、辐射度计算量增加、运行时间过长因此我们选择追迹深度为 2 即可。

改变远距光源的入射辐照度，使 L 分别取：0.1、0.5、1、5、10 等值，其成像仿真的结果如图 4-14 所示：

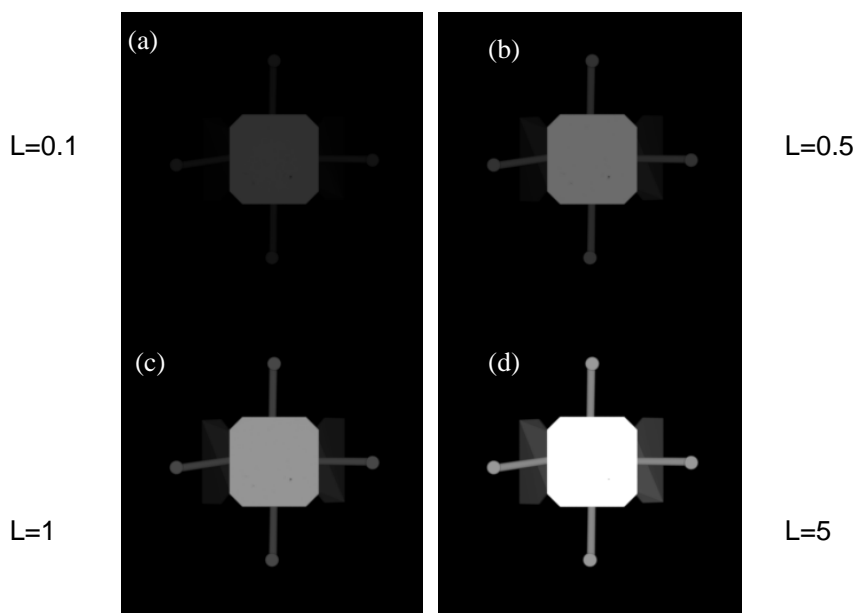


图 4-14 在不同入射辐射度光源照射下复杂表面空间目标成像结果

结果显示，由于主体部分表面是高反射率材质，入射辐照度太高会导致像面

曝光严重，细节全部消失，辐照度如果太低，会使像面太暗，结果证明辐射传输方程对光线辐射度计算的正确性，同时也证明了使用高反射率金属代替镜面材质成像具有良好的成像效果。

改变远距光源入射方向，成像结果如图 4-15 所示：

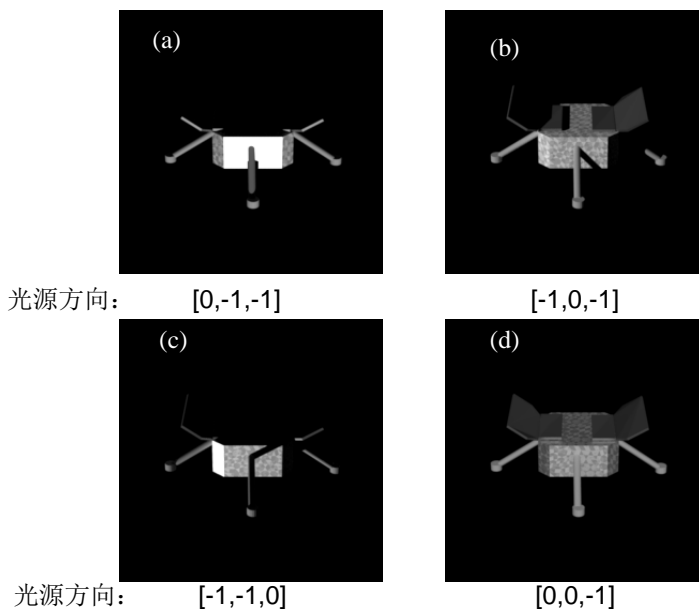


图 4-15 不同方向平行光照射下复杂表面空间目标成像结果

结果显示，每个方向中的平行光照射在目标表面，都有清晰的的明暗变换和与现实一致的阴影区域，因此结果证明光线交叉检测和光线追踪算法理论实现的正确性。

改变相机位置，改变相机平移转换矩阵，使得向 z 轴平移距离分别为 50、60m、70m、80m、90m 等，成像仿真结果如图 4-16 所示：

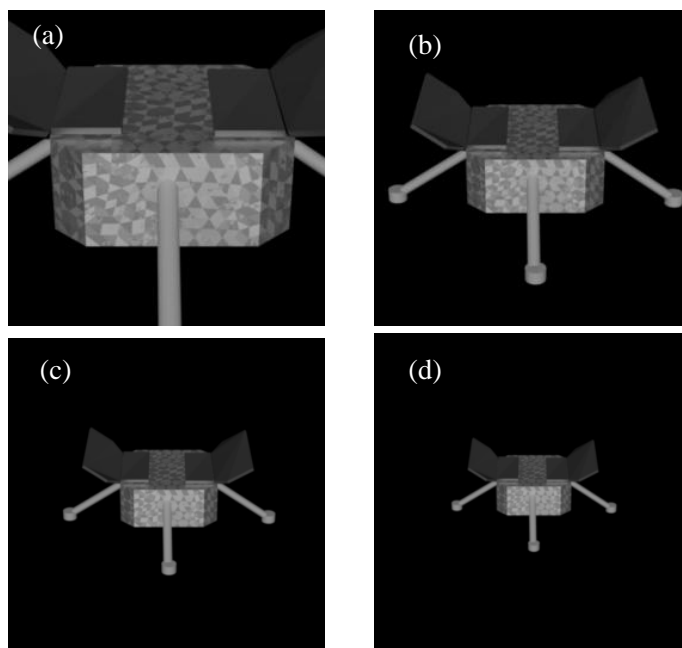


图 4-16 相机在 z 轴平移不同距离对复杂表面空间目标仿真成像结果

而其他参数不变,使相机焦距分别为 3000mm、5000mm、7000mm、9000mm,成像仿真得到结果如图 4-17 所示:

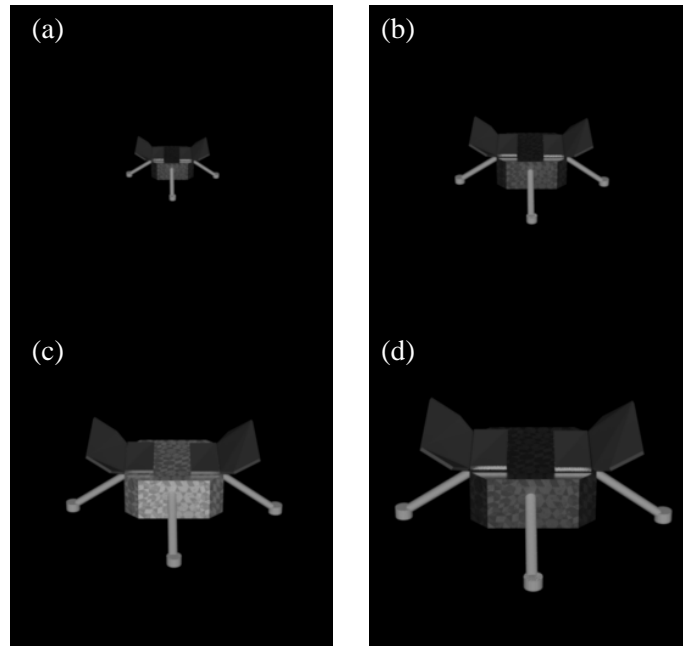


图 4-17 改变相机焦距对复杂表面空间目标仿真成像结果

图 4-16、图 4-17 结果显示,相机平移和焦距改变在一定范围内都系统都能对目标清晰成像,但成像距离远近有很大差异,其证明了透射相机远小近大的特点,证明物像关系的正确性。且由图 4-16(d), 图 4-17(a)显示在较远的地方主体部分表现为漫反射特性,其表面起伏并不明显,符合实际情况,进一步证明对微表面几何模型的正确性。

由以上图片结果可知,论文中采用的基于光线追踪算法的辐射传输解算模型是正确的;成像结果也能比较好的显示不同材质物理特性;针对微表面尺寸较大的部分,结果也能明显表现出其表面的起伏情况;也验证了投影相机模型的正确性。综上所述,本论文中提出的针对于复杂表面空间目标的仿真成像理论方法是可行的,且成像结果较为理想。

结论

本文以开展地基光学成像仿真模型与方法研究为目标,建立了复杂表面空间目标仿真成像计算方法;提出了利用分形几何理论对空间目标微表面尺寸较大的部分进行几何结构建模,并开展了对生成的几何结构粗糙度计算的实验;建立了针对金属,镜面,磨砂等材质的光学特性模型,利用光线追踪算法和辐射传输方程,蒙特卡洛积分求解开展了成像仿真辐射传输解算工作,最后在 `pbrt` 程序基础上设计了对复杂表面空间目标仿真成像的实现程序。成像结果表明测试结果表明,本文提出的空间目标场景光学特性与辐射解算模型的成像仿真结果较为理想。

论文取得的主要研究成果如下:

(1) 建立了空间目标的几何结构模型和表面材质光学特性模型。针对复杂表面的空间目标首先建立了其简化的几何结构模型,并利用 `3Dmax` 和 `ansys` 软件对目标不同部分进行三角网格划分,针对微表面较大的结构主体部分利用分形几何思想生成一定粗糙度的随机几何结构。针对目标表面不同材质提出了不同的光学特性建模方案模拟材质表面的物理特性,并用图像描述不同光学特性模型和开展材质相关参数对模型的影响的实验。

(2) 使用了基于光线追踪算法理论的辐射解算模型,论文中利用透视投影相机模型进行物像关系解算,结合光线反向追踪算法,利用辐射传输方程和蒙特卡洛方程进行光线路径上辐射解算,求解出像平面发出光线经过目标、光源后得出光线的辐射度值,依据此辐射度值求解像面像素点灰度值。设计了基于空间目标的成像仿真模型流程。

(3) 利用 `C++` 语言结合 `pbrt` 程序实现了对复杂表面空间目标仿真成像过程,实现过程中首先创建了函数读取空间目标几何结构模型的 `stl` 文件,将三角面元信息读入程序内,之后空间目标表面材质 `BRDF` 值赋值给对应的三角面元,最后利用程序实现辐射传输解算模型,完成光线追踪全过程,求解出像平面像素值。结果表明目标几何结构模型和光学特性模型很好的展示了空间目标表面的物理特性,成像结果也证明了光线追踪算法和辐射传输解算的正确性,进而证明本论文中提出的针对于复杂表面空间目标的仿真成像理论方法是可行的。

论文在取得一定成果的同时仍还有许多问题需要解决,下一步的研究工作可以从以下几个方面着手:

(1) 利用 `pbrt` 程序对成像仿真进行进一步的优化,结合光谱功率分布图为成像图像添加颜色,还可以为目标表面添加纹理使得图像更加贴近现实。

(2) 进一步完善分形几何对微表面几何平面的模拟,使的模型更加真实,例如包裹隔热材料的表面其褶皱虽然是随机的但是在某些地方如棱角转折地方其褶皱会比较明显,平面内部其褶皱比较小。

参考文献

- [1] Appel A . Some Techniques for Shading Machine Renderings of Solids[C]//Proc Afips Joint Computer Conference. 1968.
- [2] Whitted J D F T. An Improved Illumination Model for Shaded Display[J]. Acm Siggraph Computer Graphics, 1979, 13(2):14.
- [3] Christensen P H , Batali D . An Irradiance Atlas for Global Illumination in Complex Production Scenes.[J]. 2004.
- [4] Wang R , Wang R , Zhou K , et al. An efficient GPU-based approach for interactive global illumination[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(3):1.
- [5] Lee W J , Hwang S J , Shin Y , et al. Fast stereoscopic rendering on mobile ray tracing GPU for virtual reality applications[C]// IEEE International Conference on Consumer Electronics. IEEE, 2017.
- [6] Phong B T . Illumination for Computer Generated Pictures[J]. Communications of the ACM, 1998, 18(6):311-317.
- [7] Kajiya J T. The rendering equation[J]. Acm Computer Graphics, 1986, 20(4):143-150.
- [8] Pharr M., Humphreys G.. Physically based rendering from theory to implementation (Third edition)[M]. Burlington: Morgan Kaufmann Publishers, 2016
- [9] MURANAGA K, TAKAHASHI K, SATO H, NAKAMOTO H, NAGASE M. OpenRT Platform/RT-Component Debugger (3rd Report)[J]. The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec), 2010, 2010(0).
- [10] Hruska, J. Microsoft hints that DirectX 12 will imitate Mantle, but AMD insists its API has a bright future[J]. ExtremeTech.com, 2014
- [11] Pietrzak Jakub, Kacperski Krzysztof, Cieřlar Marek. NVIDIA OptiX ray-tracing engine as a new tool for modelling medical imaging systems.[J]. Proceedings of SPIE--the International Society for Optical Engineering, 2015, 9412.
- [12] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics[J]. ACM Trans. Graph., 1982, 1(1):7-24.
- [13] Oren M, Nayar S K. Generalization of Lambert's Reflectance Model[C]// Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques. 1994.
- [14] Han C , Sun B , Ramamoorthi R , et al. Frequency domain normal map filtering[J]. Acm Transactions on Graphics, 2008, 26(3):28.
- [15] Kalantari E , Molan Y E . Analytical BRDF model for rough surfaces[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(3):1049-1055.
- [16] 过洁, 潘金贵. 多尺度粗糙表面的实时绘制方法[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(4):559-567.

- [17] Hanssen L M , Freda S E , Butler S D , et al. Analysis of wave optics BRDF model elements for a moderately rough surface[J]. SPIE Proceedings ,2016, 9961:99610G.
- [18] 袁艳, 金鼎, 苏丽娟. 粗糙表面双向反射分布函数优化建模与验证[J]. 激光与光电子学进展, 2018, v.55; No.628(05):402-408.
- [19] Chen L , Zheng Y , Shi B , et al. A Microfacet-Based Reflectance Model for Photometric Stereo with Highly Specular Surfaces[C]// 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). IEEE, 2017.
- [20] Yan L Q. Physically-based Modeling and Rendering of Complex Visual Appearance[D], A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.2018
- [21] Yan L Q , Hasan M , Jakob W , et al. Rendering Glints on High-Resolution Normal-Mapped Specular Surfaces[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4CD):116.1-116.9.
- [22] Yan L Q , Miloš Hašan, Marschner S , et al. Position-Normal Distributions for Efficient Rendering of Specular Microstructure[J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4):56.1-56.9.
- [23] 代振莹. "嫦娥"四号着陆器和月球车外观设计构型首次公开亮相[J]. 中国航天, 2018(8).
- [24] 郁凡本刊记者. 嫦娥四号月球车模型首发[J]. 中外玩具制造, 2018, 000(011):P.66-66.
- [25] Mary Kathryn Thompson, John M. Thompson. Chapter 6 - Meshing. 2017.
- [26] 冯桂莲. 分形与分形的计算机模拟[J]. 青海民族大学学报(教育科学版), 2005, 025(004):90-94.
- [27] 陆涛,曹伟. 基于分形特征的表面微观形貌模拟和分析[J]. 华中理工大学学报(7 期):22-24.
- [28] Yan W , Komvopoulos K . Contact analysis of elastic-plastic fractal surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(7):3617.
- [29] 张楠, 王立华, 何雨松,等. 分形粗糙表面的计算机模拟[J]. 新技术新工艺, 2013(06):88-90.
- [30] 丁华锋, 王卓, 刘婧芳,等. 一种基于 MATLAB 的 STL 文件分层切片算法[J]. 机床与液压, 2018, 046(005):102-105.
- [31] Dutre P , Bekaert P , Bala K . Advanced Global Illumination, Second Edition || Strategies for Computing Light Transport[J]. Crc Press, 2006, 10.1201/b10632:81-106.
- [32] Han Y , Sun H Y , Li Y C , et al. Simulation of space object laser radar cross section[J]. infrared and laser engineering, 2010.
- [33] 张雯, 张露, 李家利,等. 国外聚酰亚胺薄膜概况及其应用进展[J]. 绝缘材料, 2001, 034(002):21-23.

- [34] 汪夏,张雅声,徐灿,李鹏,张峰. 空间目标褶皱材质 BRDF 建模方法[J]. 光学学报. 2019(10):282-290.
- [35] 黄冰峰. 物体表面反射特性测定方法的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 10-12.
- [36] Nayar S K , Ikeuchi K . Surface reflection: physical and geometrical perspectives[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1991, 13(7):P.611-634.
- [37] Liu CH , Li Z , Xu C , et al. A BRDF Statistical Model Applying to Space Target Materials Modeling[C]. AOPC 2017: SPACE OPTICS AND EARTH IMAGING AND SPACE NAVIGATION.Beijing: Proceedings of SPIE,2017:10463.
- [38] 魏立宏. 菲涅尔反射系数 S 分量和 P 分量与入射角的关系[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 1988, 000(003):74-75.
- [39] 车念曾. 辐射度学和光度学[M]. 北京理工大学出版社, 1990.
- [40] 孙久运, 高井祥, 许长辉. 基于中心投影构像关系的模型试验变形测量[J]. 采矿与安全工程学报, 2008(02):126-130.
- [41] Ramalingam, Mritha ; Mat Isa, Nor Ashidi ; Puviarasi, R.A secured data hiding using affine transformation in video steganography[J].Procedia computer science, 2020, Vol.171, pp.1147-1156.
- [42] Haralick R M . Determining camera parameters from the perspective projection of a rectangle[J]. Pattern Recognition the Journal of the Pattern Recognition Society, 1989, 22(3):225-230.
- [43] 马文娟. 基于辐射传输方程高阶球谐近似模型的时域 DOT/FDOT 成像方法研究[D]. 天津: 天津大学学位论文, 2012:15-16.
- [44] Keller A . Quasi-Monte Carlo Methods in Computer Graphics[J]. ZAMM Journal of applied mathematics and mechanics: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, 2002, 76.
- [45] Chachamis G , Vera A S . Solution of the Bartels-Kwieceński-Praszałowicz equation via Monte Carlo integration[J]. Physical Review D, 2016, 94(3).
- [46] Heasly B S , Cottaris N P , Lichtman D P , et al. RenderToolbox3: MATLAB tools that facilitate physically based stimulus rendering for vision research[J]. Journal of Vision, 2014, 14(2):6-6.

攻读学位期间发表的论文及其它成果

哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限

学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的学位论文《复杂表面空间目标仿真成像计算方法》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读学位期间独立进行研究工作所取得的成果，且学位论文中除已标注引用文献的部分外不包含他人完成或已发表的研究成果。对本学位论文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。

作者签名：李淑贤 日期：2020年06月23日

学位论文使用权限

学位论文是研究生在哈尔滨工业大学攻读学位期间完成的成果，知识产权归属哈尔滨工业大学。学位论文的使用权限如下：

(1) 学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，并向国家图书馆报送学位论文；(2) 学校可以将学位论文部分或全部内容编入有关数据库进行检索和提供相应阅览服务；(3) 研究生毕业后发表与此学位论文研究成果相关的学术论文和其他成果时，应征得导师同意，且第一署名单位为哈尔滨工业大学。

保密论文在保密期内遵守有关保密规定，解密后适用于此使用权限规定。

本人知悉学位论文的使用权限，并将遵守有关规定。

作者签名：李淑贤 日期：2020年06月23日

导师签名：丛 012 14¹² 日期：2020年6月23日

致 谢

从 2018 年来到哈尔滨这座城市的场景还仿佛在昨天,而我在哈尔滨工业大学就读研究生的两年学习阶段即将结束。在校期间,我学到的不仅仅是专业性的科研能力,而且也学会了如何发现问题和解决问题的思维,最重要的是在老师和师兄的悉心教诲下,学会了很多课本上学不到的为人处世之道,让我成长了许多,为我的生活增添了许多乐趣。

首先,我要衷心的感谢我的导师丛明煜老师,这两年来对我学业以及生活上提供了极大地帮助,感谢相遇,感谢老师严谨认真的工作态度以及积极向上的生活状态对我的生活和学习提供了极大的鼓励的帮助。其次,我要感谢我的师兄于鲲,他是除了导师对我帮助最大的人,感谢师兄对我这个科研小白的孜孜不倦的教诲并对我毕业论文的认真负责指导,对我的学业提供极大的推导作用,使我在学术道路上没有那么坎坷。还有就是我要感谢我的室友张艺蓝、赵蔚和王宇彤,认识了一群志同道合的好朋友,为我学业之外的生活增光异彩,使我的研究生生活充满诸多快乐。最后,我要感谢的是我的家人,在并不富裕的家庭背景之下,依旧坚持鼓励我读研究生,给予我极大的精神上的鼓舞以及经济上的支持,让我可以顺利攻读研究生,感谢你们对我这几十年来教育。

再此最后,诚恳的感谢在校期间一路上关心和帮助我的老师和同学们,希望未来大家都可以万事顺利,幸福安康,未来可期!