

天基空间目标场景成像仿真研究

杨晋生, 李天骄*

天津大学微电子学院, 天津 030072

摘要 天基光学监测系统是态势感知的重要内容。通过分析星空场景下面目标的光电成像过程, 在面目标成像的基础上设计了天基空间目标场景成像仿真系统, 并提出了一种根据卫星表面所用材料的双向反射分布函数 (BRDF) 特性改进二次反射光线抽样范围的方法。根据太阳能电池材料和聚酰亚胺膜两种材料的反射分布, 确定了顶角为 10° 和 15° 的光线集中区域用于蒙特卡罗抽样。目标成像模块包含实时和高质量两种模式。当选择实时成像模式时, 所设计系统直接调用 OpenGL 管线进行渲染, 实现了 35 Hz 以上的成像频率; 当选择高质量成像模式时, 采用改进二次抽样的光线追踪方法进行成像, 成像效果逼真、阴影显示正确。在星空背景下, 使用所设计系统对空间目标的成像和监测进行了仿真, 研究结果可为天基光学相机的设计提供一定参考。

关键词 成像系统; 成像仿真; 天基光学系统; 蒙特卡罗; 实时成像; 高质量成像

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0811004

Simulation of Space-Based Space Target Scene Imaging

Yang Jinsheng, Li Tianjiao*

School of microelectronics, Tianjin University, Tianjin 030072, China

Abstract Space-based optical monitoring system is a critical component of situational awareness. By analyzing the photoelectric imaging process of the target under the starry sky scene, the space-based space target scene imaging simulation system is designed based on surface target imaging, and a method is proposed for increasing the sampling range of secondary reflected light according to the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) properties of the materials used on the satellite surface. Using the reflection distribution of solar panel material and polyimide film, the light concentration areas with vertex angles of 10° and 15° were determined for Monte Carlo sampling. The target imaging module includes two modes: real-time and high-quality. When the real-time imaging mode is selected, the designed system directly contacts the OpenGL pipeline for rendering and obtains an imaging frequency of over 35 Hz. When the high-quality imaging mode is enabled, the image is captured using the improved twice-sampled ray-tracing technique. The imaging effect is accurate, as is the shadow display. The imaging and monitoring of space targets are simulated by using the designed system against a background of stars, which can serve as a certain reference for the design of a space-based optical camera.

Key words imaging systems; imaging simulation; space-based optical system; Monte Carlo; real-time imaging; high-quality imaging

1 引言

随着各个国家之间的竞争逐渐发展到外太空,

对包含人造卫星在内的空间目标进行监视成为了态势感知的重要内容。光学成像是进行空间监视的重要手段。地基望远镜成本较低、实现容

收稿日期: 2021-03-16; 修回日期: 2021-04-21; 录用日期: 2021-04-28

基金项目: 北京市优秀人才资助计划青年拔尖项目(2016000026833ZK08)

通信作者: *294448170@qq.com

易,因此目前各国的监测系统主要为地基光学系统。受限于天气、大气和地球自转的影响,地基观测时间短、覆盖面小。而星载在轨相机存在很多优势,比如探测距离远、成像效果好、信号干扰弱等,因此天基光学观测系统^[1]具有广阔的应用前景。

相比于红外辐射成像,可见光成像^[2]具有更远的探测距离和更成熟的技术。但由于缺乏空间目标实际观测图像,空间监测系统在研制过程中缺乏真实数据验证观测技术和设计参数,且在轨相机成本高、设计难度大,因此空间目标可见光场景成像仿真^[3-5]可以为载荷参数的确定及关键技术的验证提供参考和图像来源,具有重大意义。

由于天基空间相机的重要性,各国已陆续开展自己的空间预警项目^[6]。例如哈勃望远镜和 Spitzer、日本的“光”卫星、欧洲的“盖亚”探测器等。目前许多学者和科研机构对空间目标监视仿真中的关键技术^[7-12]进行了一系列研究。文献[5]利用散射截面计算照度的方法对空间目标进行成像,但采用的目标反射模型较为简易,适用于捕获点目标的整体照度。文献[7]提出了一种解决天基空间目标图像合成问题的方法。文献[8]量化了分辨率大小对系统工作距离的影响。文献[9]采用简单反射模型,结合光度学对卫星开展状态监测。文献[10]研究了空间目标微表面几何特征和光学特性,但未涉及天基应用场景。文献[11]进行了卫星载荷的光学成像仿真,但仅采用 OpenGL 进行成像,远距离下难以观察目标几何细节。文献[12]对空间目标常用材料的双向反射分布函数(BRDF)模型进行了拟合。

已有工作主要对点目标进行入瞳照度监测,对目标成像研究成果较少,且成像时对目标光学反射特性的设定较为简单,不符合实际情况。本文对

空间目标在恒星背景下的观测方法进行研究。首先,建立了目标材质光学特性模型;其次,确定了在轨平台及待观测目标的轨道信息,从而完成了星空背景的渲染;最后,通过结合光线追踪算法和光栅化渲染方法,实现了面目标的高质量成像及实时成像,分别解决了空间目标监测仿真时对成像速度和成像质量的需求。且在应用蒙特卡罗方法求解光渲染方程时,提出了一种根据材料光学特性改进二次反射计算时抽样区间的优化方法,提高了计算效率。为评估所设计系统在实时模式下的性能,仿真了在不同时间下的成像频率;为评估高质量模式下的成像效果,对比了成像图片与原目标模型。对比结果表明,成像图片清晰且细节显示正确。

2 天基空间目标场景成像仿真方法

目前,在空间面目标成像领域,常采用 OpenGL 中光栅化渲染流水线,通过简易局部光照模型进行目标成像仿真。应用局部光照模型时,对物体材质反射特性的假设仅限于给出固定方向的反射率或折射率,与真实物理世界中光线复杂的传播行为不相符。光线追踪是一种结合全局光照模型,基于物理规律对光线传输过程进行仿真的技术。此小节给出了基于光线追踪辐射传输解算的光电成像方法及一种基于材质反射特性改进蒙特卡罗抽样区间的计算方法。

2.1 空间目标光电成像方法

2.1.1 光线跟踪辐射传输解算

在高质量成像时,采用反向光线跟踪进行辐射能解算可以极大地减小计算量,此时从空间相机视线方向发出跟踪光线,每个像元视线接收的辐射能可表示为

$$L(p, \omega_0) = L_z(p, \omega_0) + L_j(p, \omega_0) = \int_{\Omega} f_r(p, \omega_0, \omega_n) dE_e(p, -\omega_n) + \int_{\Omega} f_r(p, \omega_0, \omega_m) L_r(p, \omega_m) \cos \theta_m d\omega_m, \quad (1)$$

式中: p 点为视线与场景目标交点; ω_0 为视线方向; ω_n 为积分空间内所有直接光源照射方向; ω_m 为积分空间内所有间接光线照射方向; L_z 表示光源直接照射 p 点反射出的辐射亮度; L_j 表示其他部位反射而来的间接光照照射 p 点反射出的辐射亮度; f_r 为交点处材质散射分布函数; Ω 为抽样区间; $L_r(p, \omega_m)$ 为 p 点沿 ω_m 方向的光照辐射亮度; θ_m 为 p 点法线方向与 ω_m 方向的夹角; E_e 为太阳发出的辐射照度。分别对直接光源的辐射亮度和间接照射的辐

射亮度在整个半球空间内积分,二者结合就是视线接收的辐射亮度,如图1所示,其中 n_p 为 p 点法线方向, L_p 为 p 点接收到的间接辐射, θ_m 为间接光线与法线间的夹角。由于空间目标在可见光波段可看作无自发辐射的物体,在传输方程中忽略目标自身辐射。

由图1可知,(1)式是有多个迭代过程的多重积分。在实际求解时,引入蒙特卡罗方法对入射光线辐射进行积分估计,则(1)式可简化为

$$L(p, \omega_0) = \sum_{n=1}^N f_r(p, \omega_0, \omega_n) E_c(p, -\omega_n) V(p, \omega_n) \cos \theta_n + \frac{\Omega}{M} \sum_{m=1}^M f_r(p, \omega_0, \omega_m) L_r(p, \omega_m) \cos \theta_m, \quad (2)$$

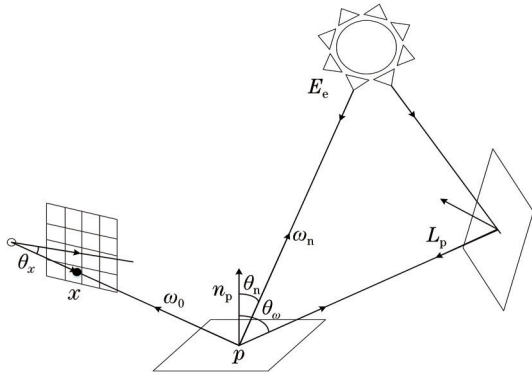


图 1 光线辐射传输路径

Fig. 1 Ray radiation transmission path

式中: V 为可视参数, 当该点对光源直接可见时为 1, 否则为 0。直接光源照射部分把所有光源对 p 点的辐射直接叠加; 间接照射部分采用蒙特卡罗方法进行抽样估计。

空间相机任意像元 y 对应的投影区域的辐射亮度 $L(y)$ 可用此像元全部采样方向辐射亮度的均值来表示。

$$L(y) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J L(p_j, \omega_{0j}), \quad (3)$$

式中: J 为像元内采样点数量; p_j 为第 j 条视线与场景中的交点。求得像元 y 辐射亮度后, 根据辐射度学公式, 可求得像元 y 接收的辐射照度 $E(y)$ 。

$$E(y) = \frac{L(y) A_y}{R^2} \cdot \cos \theta_y = \frac{L(y) \alpha_y^2 R^2}{R^2} \cdot \cos \theta_y = L(y) \alpha_y^2 \cos \theta_y, \quad (4)$$

式中: A_y 为该像素对应的目标区域投影面积; R 为观察点和目标间的距离; θ_y 为成像平面指向与该像元探测方向的夹角; α_y 为该像元的角分辨率。

2.1.2 相机光电成像模型

依据光电效应, 相机被辐射时, 会逸出光电子。

到达相机平面经光电效应激发的电子数为

$$N_s = \frac{A t_{\text{int}}}{hc} \int E(\lambda) \cdot \lambda \eta \cdot \tau_0 d\lambda, \quad (5)$$

式中: A 为空间相机入瞳面积; t_{int} 为相机工作时间; τ_0 为相机光学透过率; η 为量子效率; h 为普朗克常数。

则对应像元的灰度值为

$$G = \frac{q}{C_{\text{int}}} N_s \cdot f_{\text{ADA}}, \quad (6)$$

式中: q 为电子电荷量; f_{ADA} 为模数因子; C_{int} 为电感电容。

2.2 空间目标材料光学特性模型

目标材料光学特性是影响成像速度和成像质量的重要因素, 在光传输方程中表现为 BRDF—— $f_r(\omega_0, \omega_n)$ 的形式。本实验组所用反射分布函数有两种。

2.2.1 改进的 Phong 模型

Phong 模型^[13]是计算机图形学中一种常用的简易光照模型, 该模型只考虑物体对来自光源的直接光照的反射作用, 计算速度快、适用于实时渲染, 本实验组对 Phong 模型进行了一些改进, 改进后模型的表达式为

$$f_r = \rho_d \cos \theta_i + \rho_s \frac{\cos^a \beta}{\cos^a \theta_i} \exp \left[-b(1 - \cos \beta)^{1/a} \right], \quad (7)$$

式中: ρ_d 和 ρ_s 分别为漫反射率和镜面反射率; a 和 b 为调节系数, 取值大于 0, 参照文献[14]; α 和 β 分别为镜向指数和反射矢量偏离镜面反射矢量的角度。

2.2.2 普通粗糙面五参量半经验统计模型

五参量模型^[15]基于物理测量和拟合, 对空间目标材质的特征具有出色的表现效果, 是空间目标成像中常用的辐射反射模型, 表达式为

$$f_r = k_b \left[\frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} \cdot \exp \left[b(1 - \cos \gamma)^a \right] \cdot \frac{1}{\cos \theta_i \cos \theta_0} \right] + \frac{k_d}{\cos \theta_i}, \quad (8)$$

式中: k_b, k_r, k_d 为模型参数。

2.3 基于材料反射特性改进抽样区间的二次散射计算方法

用蒙特卡罗方法计算多次反射的间接光照部分时, 不同材料的 BRDF 特性反映了该材料反射光

线的空间分布特点。采用(1)式和(2)式计算时, 间接光照部分积分项为 $f_r(p, \omega_0, \omega_m) L_r(p, \omega_m) \cos \theta_m$ 。光线碰撞物体后的反射^[16]既不是完全镜向反射, 也不是均匀的漫散射。对于实际的普通粗糙面材料, 反射光线分布的区域主要集中在以镜面反射方向

为中心的一定的角度内,在积分项中由材料的反射特性 $f_r(\rho, \omega_o, \omega_m) \cos \theta_m$ 体现。在(2)式中对光线进行抽样时,在整个半球空间计算会在几乎没有光线的地方消耗大量的时间。据此,本实验组提出如下解决方案:根据不同材料的反射分布特性曲线确定反射集中区域,缩小计算范围,将抽样区域控制在反射光线大量集中的区域,确保每次抽样都是对二次散射贡献较大的光线进行采样,从而减小无用计算量,提高计算效率。

表 1 给出了空间目标表面所用硅太阳能电池板材质和聚酰亚胺薄膜的 BRDF 模型参数取值,两种材料的反射分布特性曲线如图 2 和图 3 所示。根据空间目标常用材料的反射分布曲线可知,散射光线集中在以镜面反射方向为中心的一个立体角内,因此在进行采样时,应使采样光线集中在这个以镜面反

表 1 卫星包裹材料双向反射分布函数取值

Table 1 Values of bidirectional reflectance distribution function of satellite packaging materials

Texture of material	a	b	k_b	k_d	k_r
Silicon solar panel	0.557	-261.6	15.42	0.047	0.717
Polyimide	0.458	-51.90	28.38	0.077	1.865

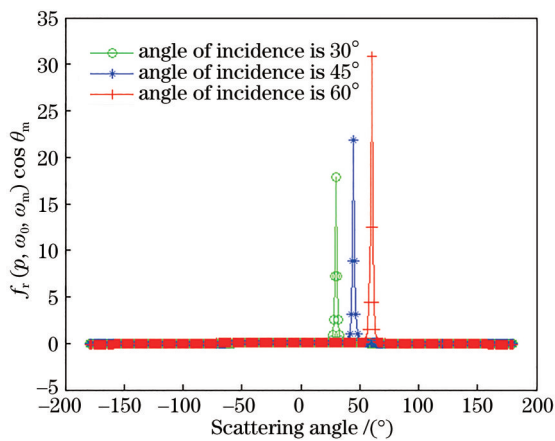


图 2 硅太阳能电池板的反射分布特性。

Fig. 2 Reflection characteristics of silicon solar panel

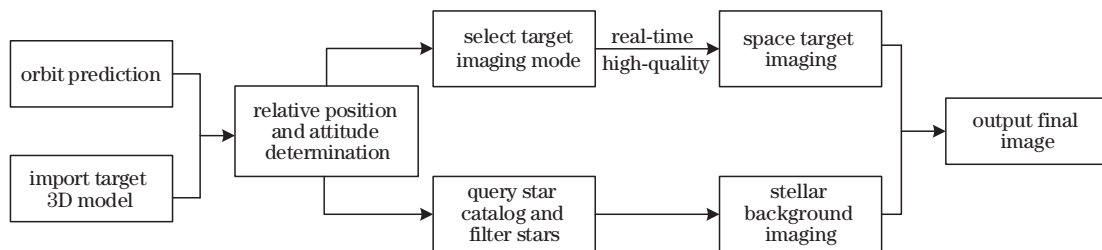


图 4 成像仿真工作流程

Fig. 4 Imaging simulation workflow

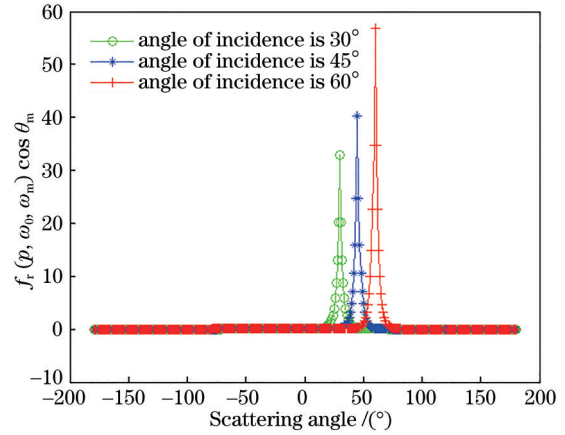


图 3 聚酰亚胺薄膜的反射分布特性。

Fig. 3 Reflection characteristics of Polyimide

射方向为中心轴的圆锥球冠内。在此空间内均匀采样,在同样的采样数量下,能得到更佳的成像质量。具体而言,硅太阳能电池板的反射特性曲线在以镜面反射方向为中心 10° 的范围内,BRDF 值衰减到了中心顶点的 5% 以下。因此在对硅太阳能电池板材料进行二次散射抽样时,以镜反方向为中心,确定 $\theta=10^\circ$ 的抽样区间。聚酰亚胺薄膜的反射特性曲线在以镜面反射方向为中心 15° 的范围内,BRDF 值衰减到了中心顶点的 5% 以下。在对聚酰亚胺膜进行二次散射抽样时,以镜反方向为中心,确定 $\theta=15^\circ$ 的抽样区间。

进一步,顶角为 θ 的圆锥对应的立体角的表达式为

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta). \quad (9)$$

从而可确定(2)式中进行蒙特卡罗抽样时的抽样区间。

3 仿真设计与结果分析

3.1 天基场景成像仿真流程

所设计的双模式仿真系统工作过程如图 4 所示。空间场景主要包括太阳光源、待观测目标、在轨观测平台及载荷、地球。成像过程主要包括空

间目标与恒星成像。预处理阶段,首先通过对目标进行三维建模确定目标的几何外观,并导入仿真系统。通过 satellite tool kit (STK)设置并输出目标与观测平台的轨道参数,得到任意时刻场景中各目标坐标及相对位置关系,确认相机视场方向和目标姿态。在目标成像模块,将传统的 OpenGL 管线式渲染方法与所提光线追踪方法在成像模块中分别设计,以实现不同模式的成像仿真。对目标进行成像时,手动选择光线跟踪高质量模式或光栅化实时模式进行面目标成像。对星空背景进行成像时,根据星表读取坐标和星等,对出现在视场中的恒星直接进行照度计算。

3.1.1 目标建模和轨道仿真

对目标进行成像前,首先建立空间目标的三维模型并将其几何信息和材质信息导入仿真系统。本实验所用空间目标三维模型可通过商业软件 solid works 手动建模获得或从美国国家航空航天局 (NASA)模型库官网中直接下载。选择实时模式时,目标材质特性采用第 2.2 节给出的 Phong 模型描述;选择高质量模式时,目标材质特性采用第 2.2 节中的普通粗糙面表示。

在 STK 中设置场景参数时,设置在轨平台轨道半长轴为 6778 km,被观测目标轨道半长轴为 6878 km。光学相机所处轨道较低,便于监视位于较高轨道的空间卫星、导出场景中成像平台和被观测目标的实时位置。图 5 为空间观测场景。表 2 给出了具体轨

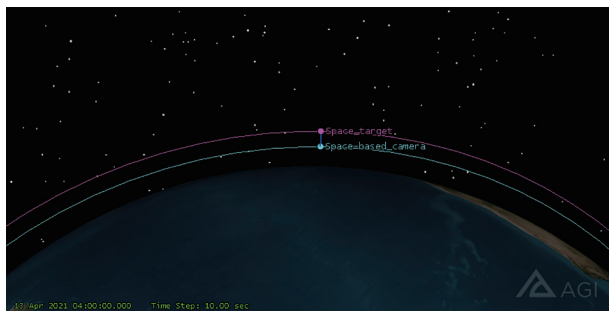


图 5 空间目标成像场景

Fig. 5 Schematic diagram of space observation

表 2 在轨相机与目标卫星轨道参数

Table 2 Orbit parameters of on orbit camera and target satellite

Orbital element	a /km	e	i	ω	Ω	M
Camera	6778	0	28.5	0	68	196
Satellite	6878	0	28.5	0	68	196

道参数。

3.1.2 光源辐射和空间目标成像

空间在轨相机的辐射来源主要是空间目标反射的可见光,在可见光波段,太阳对地球外空间目标的辐照度^[17]为 593.1 W/m²。同时,地球对太阳光的反射是场景中辐射能的又一重要来源。设地球是平均反射率为 0.3 的反射体^[8],因此地球反射的太阳光辐照度为 177.9 W/m²。由于距离较远,太阳光与地球反射光均可看作平行光,方向由光源中心指向空间目标。

对目标进行成像时,设计了两种模式以供选择。当对图像生成速率有一定要求时,选择实时模式,系统调用 OpenGL 渲染管线,采用局部光照 Phong 模型对目标进行快速渲染。当要求较高的成像质量时,选择高质量模式,系统调用所设计的光线追踪模块,基于复杂材料的光学反射特性完成图像渲染。

3.1.3 星空背景成像

在进行场景成像仿真时,主要观察对象为人工卫星等空间目标。星空背景可视作无穷远,且由于相机视场较小,场景中能够拍摄到的恒星数量很少,此时图像中恒星表现为无具体特征的像素点。因为背景恒星可视作无限远的点目标,所以可认为背景中所有恒星在视觉上与观察者距离相等^[18]。

根据 STK 生成待观测目标及在轨相机轨道信息,根据 Smithsonian Astrophysical Observatory 导入此时恒星背景的坐标和星等,根据 J2000 坐标系下恒星的坐标可确定最终成像时恒星所在位置,根据星表中视星等 m 确定恒星入瞳照度 E 。

$$E = E_s \times 2.512^{-26.74 - m}, \quad (10)$$

式中: E_s 为太阳在大气层外的照度。

3.2 实时模式成像仿真

首先对实时成像模式进行了仿真,目标三维模型^[19]采用 NASA 提供的全球探测器模型。图 6 为某时刻的成像结果,其中焦距分别为 6000, 2500, 1500, 800 mm。从图中可以看出,当观测平台与目标距离不变时,焦距越小,视场越大,目标在视场中所占尺寸越小,符合光学相机成像规律。为加快图像仿真速率,此模式下未仿真背景恒星。

为检验系统实时成像能力,进行了 3 次计时计数成像实验。成像时间分别设置为 2, 4, 6 s。设置卫星按轨迹运行,自动保存 3 次实验所生成照片并计算每次实验图像生成频率,结果如表 3 所示。

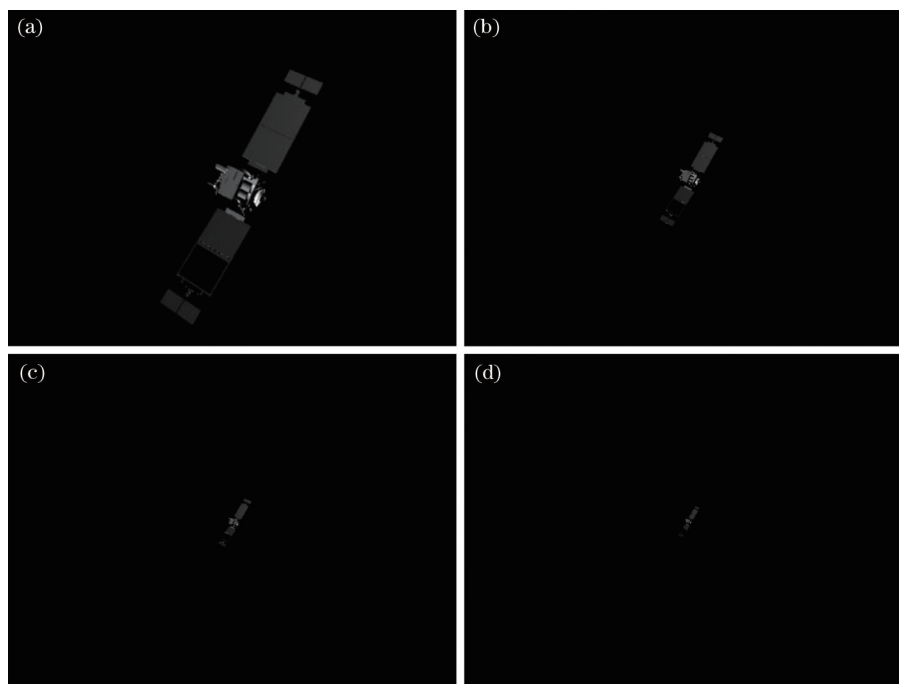


图 6 不同焦距时的成像效果。(a) 6000 mm;(b) 2500 mm;(c) 1500 mm;(d) 800 mm

Fig. 6 Imaging effects of different focal lengths. (a) 6000 mm; (b) 2500 mm; (c) 1500 mm; (d) 800 mm

表 3 系统实时成像能力

Table 3 Real-time imaging capability of system

Simulation duration /s	Number of photos	Average frequency /Hz
2	73	36.5
4	148	37.0
6	211	35.2

由计时计数成像实验结果可以看出,设置仿真模式为实时成像模式时,仿真成像频率可达到 35 Hz 以上,可以满足当下实时成像仿真的需求。在实时模式下,所设计系统可稳定高效地输出仿真图像数据。

3.3 高质量模式成像仿真

将仿真系统设置为光线追踪高质量成像模式。仿真系统适用广泛,可加载商业化 CAD 软件中构建的模型。通过手动建模获得一颗通信卫星模型,并将模型文件导入仿真系统,表 4 给出了此时成像仿真系统的参数。图 7 为所用目标模型。

在高质量成像模式下,主要观察空间相机成像仿真效果真实度,且观测平台^[11]可通过机动变轨,对目标进行抵近观察。因此选择太空中距离 10 km 的两点分别作为观测平台和空间目标的仿真位置,其中空间目标的轨道参数保持不变。读取 STK 生成报表中背景恒星在 J2000 坐标系中的方向矢量以及视星等,同时假设背景中所有恒星在视觉上与观察者距离相等,根据视星等进行背景恒星入瞳照度

表 4 空间目标成像仿真参数

Table 4 Simulation parameters of space target imaging

Simulation parameter	Parameter value
Focal length /m	1.8
Number of pixels	2000×2000
Simulation band /nm	450-750
Trace depth	4
Pixel size / μm^2	5×5
Caliber /m	0.4

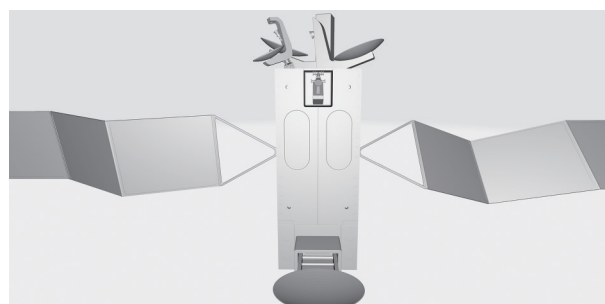


图 7 空间目标模型

Fig. 7 Space object model

计算,完成星空背景成像;采用改进二次抽样的光线追踪模块完成空间目标成像,随后与背景图像进行融合。最终结果如图 8 所示。

对成像结果进行局部放大,观察成像效果。空间相机视场较小,背景中恒星个数较少,图像中主要为被观测卫星。对比图 8 与图 7 可以看出,仿

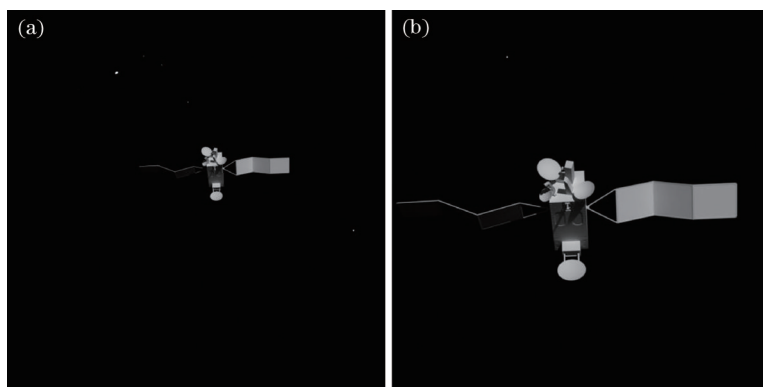


图 8 空间目标仿真图像。(a)仿真图像;(b)放大结果

Fig. 8 Simulation images of space target. (a) Simulation image; (b) amplification result

真图像卫星细节展示良好,阴影效果逼真。仿真结果正确,所设计系统可满足高质量成像需求。

4 结 论

设计并实现了一个包含实时成像和高质量成像双模式的天基空间目标成像仿真系统。分析了空间目标场景成像仿真过程,重点介绍了光线追踪真实性渲染在面目标成像中的应用。求解辐射传输时,提出了一种根据卫星表面所用材料的反射分布函数特性改进二次反射光线抽样范围的方法。并采用所提改进二次抽样的光线追踪方法和 OpenGL 中传统光栅化渲染方法开发了仿真系统中的成像模块。仿真结果表明,在选择实时成像模式时,仿真成像频率可达 35 Hz 以上,能够较好地满足实时成像的需求;在选择高质量成像模式时,成像效果良好,阴影效果逼真,同时加入了星空背景的渲染,能更好地贴近对真实情形的仿真需求。与文献[2]中针对点目标的成像相比,所提方法能够对面目标实现较好的成像效果,便于观察空间目标部件特征及实时姿态。与文献[5]相比,所提方法利用光电效应模型计算能量传输进行灰度成像,与相机实际工作过程更接近。相比于文献[20]中设计的地基望远镜,本实验组开发的天基相机不受大气影响,目标与平台间距离较小,可得到更加清晰的成像效果。

综上所述,所设计的天基空间目标场景成像仿真系统能够为今后空间在轨光学观测平台的研制提供具备较高真实度的参考图像数据,为高成本天基观测平台的设计提供一定参考。

参 考 文 献

[1] Wang X T, Zheng J H, Li M T. Study on

observation simulation for space-based potentially hazardous asteroids warning mission on Earth trailing heliocentric orbit[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(11): 2563-2571.

王新涛,郑建华,李明涛.地球公转轨道危地小行星天基光学监测仿真研究[J].光学精密工程,2020,28(11):2563-2571.

[2] Yang Q, Song R, Ma Y X, et al. Design and implement of space-based target imaging simulation system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 111101.

杨琴,宋锐,马燕新,等.天基空间目标成像仿真系统设计及实现[J].激光与光电子学进展,2015,52(11):111101.

[3] Yang L, Niu Y X, Zhang Y, et al. Research on detection and recognition of space targets based on satellite photoelectric imaging system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 121102.

杨露,牛燕雄,张颖,等.星载光电成像系统空间目标的检测与识别技术研究[J].激光与光电子学进展,2014,51(12):121102.

[4] Shao X P, Liu F, Li W, et al. Latest progress in computational imaging technology and application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 020001.

邵晓鹏,刘飞,李伟,等.计算成像技术及应用最新进展[J].激光与光电子学进展,2020,57(2):020001.

[5] Li J, Gao Y, An W, et al. Study on simulation of space-based optical surveillance images[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(15): 3951-3954, 3961. 李骏,高源,安玮,等.天基光学空间目标监视图像仿真研究[J].系统仿真学报,2008,20(15):3951-3954,3961.

[6] Gong Z Z, Li M, Chen C, et al. The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early

- warning, security defense and resource utilization[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(5): 346-372.
- 龚自正, 李明, 陈川, 等. 小行星监测预警、安全防御和资源利用的前沿科学问题及关键技术[J]. 科学通报, 2020, 65(5): 346-372.
- [7] Zeng H R, Sun H Y, Du L, et al. High dynamic range image synthesis for space target observation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 041002.
- 曾海瑞, 孙华燕, 都琳, 等. 面向空间目标观测的高动态范围图像合成[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 041002.
- [8] Zhang Y, Niu Y X, Lü J M, et al. Modeling and performance evaluation on satellite-borne photoelectric imaging system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 021101.
- 张颖, 牛燕雄, 吕建明, 等. 星载光电成像系统建模与性能评估[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 021101.
- [9] Wang X, Xu C, Zhang F, et al. Anomaly detection method for working status of low-orbit space objects based on photometric data[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304005.
- 汪夏, 徐灿, 张峰, 等. 基于光度数据的低轨空间目标工作状态异常检测方法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304005.
- [10] Li S X. Simulation imaging calculation method of complex surface space target[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- 李淑贤. 复杂表面空间目标仿真成像计算方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [11] Zhang Y, Gan Q B, Yuan H, et al. Design of space-based surveillance distributed simulation system for space targets[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 620-626.
- 张杨, 甘庆波, 袁洪, 等. 空间目标天基监视分布式仿真系统设计[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(4): 620-626.
- [12] Yu K, Cong M Y, Duan J J, et al. Design and realization of digital imaging simulator for space target navigation camera[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9): 41-49.
- 于鲲, 丛明煜, 段佳佳, 等. 空间目标导航相机数字成像模拟源设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 41-49.
- [13] Liu C H, Li Z, Xu C. A modified Phong model for Fresnel reflection phenomenon of commonly used materials for space targets[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 102901.
- 刘程浩, 李智, 徐灿. 针对空间目标常用材质菲涅耳反射现象的改进 Phong 模型[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 102901.
- [14] Zhang F, Li Y, Xu C, et al. Multivariate models of satellite optical-scattering characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1729001.
- 张峰, 李悦, 徐灿, 等. 卫星光学散射特性多元模型[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1729001.
- [15] Zhang H L, Wu Z S, Cao Y H, et al. Measurement and statistical modeling of BRDF of various samples[J]. Optica Applicata, 2010, 40(1): 197-208.
- [16] Sun C M, Yuan Y, Lü Q B. Modeling and verification of space-based optical scattering characteristics of space objects[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1129001.
- 孙成明, 袁艳, 吕群波. 天基空间目标光学散射特性建模与验证[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1129001.
- [17] Lü J M, Niu Y X, Liu H X, et al. Research on dispersion and striation characteristic of satellite photoelectric imaging system for space point target imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 091101.
- 吕建明, 牛燕雄, 刘海霞, 等. 星载光电成像系统对空间点目标成像的弥散与拖尾特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 091101.
- [18] Xu Q, Zhao C H, Li X. Stellar radiation modeling and image simulation for airborne daytime star sensor [C]//2016 IEEE International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), August 13-15, 2016, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2016: 630-635.
- [19] NASA Jet Propulsion Laboratory. Mars global surveyor MOI[EB/OL]. (2009-02-19) [2021-02-01]. <https://nasa3d.arc.nasa.gov/detail/mgs-moi>.
- [20] Han Y, Chen M, Xie J F, et al. Simulation & validation of ground-based optical-telescope imaging on target craft[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(12): 1214002.
- 韩意, 陈明, 谢剑锋, 等. 地基光学望远镜对目标飞行器成像的仿真与验证[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(12): 1214002.