

空间目标褶皱表面成像仿真方法研究

孙伟伟^{1,2,3}, 丁雷^{1,2,3*}¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;²上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 201210;³中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

摘要 为得到空间目标高质量仿真图像, 正确仿真目标包覆温控材料形成的褶皱表面十分重要。采用反向光线跟踪方法建立辐射传输模型, 针对常用温控材料聚酰亚胺的褶皱表面引发的二次反射和材料的菲涅耳反射现象, 采用余弦权重重要性采样对二次反射计算时的光线区间进行优化, 改进了可描述菲涅耳反射现象的双向反射分布函数(BRDF)模型。利用 3D 建模软件生成并量化褶皱平面, 在严重褶皱上重要性采样的均方根误差比均匀采样减小了 63.42%, 通过与实测 BRDF 值对比, 改进 BRDF 模型能更好地描述菲涅耳反射, 从褶皱平面仿真图像中可看到离散的强镜反亮斑。仿真的卫星图像褶皱表面细节纹理展示良好, 阴影效果逼真, 可为空间目标视觉导航算法研究提供图像数据。

关键词 成像系统; 光线跟踪; 聚酰亚胺; 褶皱; 蒙特卡罗方法; 双向反射分布函数

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230640

Imaging Simulation Method for Studying the Fold Surface of Space Targets

Sun Weiwei^{1,2,3}, Ding Lei^{1,2,3*}¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;²School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;³Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract To obtain high quality simulation images of a space target, simulating the folded surface of the target covered temperature-controlled material is important. This study employed the inverse ray tracing method to establish a radiation transfer model. The aim of this study is to calculate the secondary reflection that occurs on the folded surface of a polyimide material and the Fresnel reflection of the material. The cosine weight importance sampling method was used to optimize the ray interval during the calculation of the secondary reflection. Consequently, the bidirectional reflection distribution function (BRDF) model, which can describe the Fresnel reflection, was improved. Using a three-dimensional software program for generating and quantifying the fold plane, the root mean square error of importance sampling on severe folds was reduced by 63.42% compared with uniform sampling. Moreover, compared with the measured BRDF model, the improved BRDF model can better describe the Fresnel reflection and discrete strong mirror reflection spots were observed in the simulation image of the fold plane. Furthermore, the simulated satellite image shows the detailed texture of the folded surface effectively, and the shadow effect is realistic, which can provide image for the research of space target visual navigation algorithm.

Key words imaging system; ray tracing; polyimide; fold; Monte Carlo method; bidirectional reflection distribution function

1 引言

随着航天技术的快速发展, 空间态势感知已经成为国家空间安全的重要部分。通过卫星上搭载的光学

载荷对空间目标进行成像观测, 在目标监视、在轨服务导航任务中发挥着重要作用。由于实测图像难以获取, 因此开展空间目标成像仿真^[1]研究具有重大意义, 可以为载荷参数验证提供参考以及为相关视觉导航算

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-04-04; 录用日期: 2023-04-12; 网络首发日期: 2023-04-22

通信作者: *leiding@mail.sitp.ac.cn

法研究提供图像。

卫星表面包覆多层隔热材料是常用的控温方法,常见隔热材料有金色或银色的聚酰亚胺薄膜,具有菲涅耳反射特性。受制作过程和太空环境的影响,包覆的隔热材料会在卫星表面形成不规则的褶皱^[2],这对空间目标成像仿真方法提出了更高要求,对此国内外学者都展开了相关研究。国外有 SVST 和 SE-Workbench^[3-4] 等卫星仿真系统软件,SVST 能基于目标轨道姿态信息给出可见光仿真图像,但未考虑像元尺寸、积分时间等探测器参数。SE-Workbench 软件既可以使用 SE-FAST 模块通过 OpenGL 进行快速图像仿真,又可以使用 SE-RAY 模块采用光线跟踪方法进行高质量图像仿真。国内相关研究起步较晚,但也发展迅速,文献[5]采用了一种基于 OpenGL 的伴星可见光成像仿真方法,使用光栅化渲染^[6]完成像素着色,但成像效果真实性不高。文献[7]借助建模软件实现对空间目标褶皱表面的模拟,定量研究了不同程度的褶皱对空间目标光学散射特性的影响。文献[8]采用了一种基于光线跟踪^[9-10]的可见光相机成像仿真方法,该方法可以仿真远距离星空背景下的点目标,但对近距离的面目标成像仿真效果不佳。文献[11]提出了一种基于空间目标褶皱表面的利用宏观光学散射截面测量的双向反射分布函数生成方法。文献[12]提出了一种改进的 Phong 模型,该模型对目标表面的菲涅耳反射现象有更好的描述效果。

已有工作大部分采用光栅化渲染方法,计算过程中没有考虑场景的辐射能量传输过程,模型不具备实际物理意义。这些模型一般将空间目标模型简化为简单几何体的叠加,表面被视为理想平面,未考虑隔热材料形成的褶皱表面,且对目标光学反射特性的设定较为简单,与实际情况不符,导致目标温控材料形成的褶皱表面的成像仿真结果与实际结果偏差较大。

本文对空间目标褶皱表面成像仿真方法进行探究。采用反向光线跟踪方法建立辐射传输模型,针对聚酰亚胺褶皱表面引发多次反射以及强镜反现象的特点,用蒙特卡罗方法求解辐射积分时,采用余弦权重重要性采样对二次反射计算时的光线区间进行优化;引入并改进了可描述菲涅耳反射现象的双向反射分布函数(BRDF)模型,用来定义褶皱表面光学反射特性。基于 3D 建模软件生成褶皱平面,并用三角面元法线偏离均值量化褶皱程度,在不同褶皱程度的平面上对比了余弦权重采样和均匀采样的方差,应用改进的 BRDF 模型仿真了聚酰亚胺褶皱平面,并对实际带有褶皱表面的 Jason 卫星进行了成像仿真。

2 空间目标褶皱表面成像仿真方法

采用光线跟踪方法进行成像仿真,对辐射传输中的所有物理效应进行仿真计算^[13],保证辐射能量的正确性,能够有效仿真出物理环境的反射、折射及散射现象,具有极高的真实性。针对聚酰亚胺褶皱表面可能

引发的多次反射以及材质的菲涅耳反射现象,对反射光线采样方法和 BRDF 模型进行了适应性优化,仿真图像为入瞳辐射亮度图像,暂不考虑实际相机成像过程的退化影响。

2.1 光线跟踪辐射传输模型

根据辐射传输的互易性,在成像仿真时采用反向光线跟踪的方式,从相机面元发射光线,沿着视线方向寻找目标反射位置并递归生成次级入射光线,最终回溯到光源来完成仿真计算^[1],从而提高计算速度。像面上任意点接受到的辐射能量 $L(\mathbf{p}, \boldsymbol{\omega}_o)$ 可以表示为

$$L(\mathbf{p}, \boldsymbol{\omega}_o) = L_{\text{rd}}(\mathbf{p}, \boldsymbol{\omega}_o) + L_{\text{ri}}(\mathbf{p}, \boldsymbol{\omega}_o) = \int_{\Omega} f_{\text{r}}(\mathbf{p}, \boldsymbol{\omega}_o, \boldsymbol{\omega}_n) dE(\mathbf{p}, -\boldsymbol{\omega}_n) + \int_{\Omega} f_{\text{r}}(\mathbf{p}, \boldsymbol{\omega}_o, \boldsymbol{\omega}_m) L(\mathbf{p}, -\boldsymbol{\omega}_m) \cos \theta_m d\boldsymbol{\omega}_m, \quad (1)$$

式中: \mathbf{p} 为探测器像面上的任意点; $\boldsymbol{\omega}_o$ 为视线方向; $\boldsymbol{\omega}_n$ 为半球空间内直接光源照射方向; $\boldsymbol{\omega}_m$ 为半球空间内间接光线照射方向; Ω 为光线方向的半球空间; $L_{\text{rd}}(\mathbf{p}, \boldsymbol{\omega}_o)$ 为直接光照辐射亮度,需要对半球空间 Ω 内所有 $-\boldsymbol{\omega}_n$ 方向的光源照度 $E(\mathbf{p}, -\boldsymbol{\omega}_n)$ 进行积分; $L_{\text{ri}}(\mathbf{p}, \boldsymbol{\omega}_o)$ 为间接光照辐射亮度,需要对半球空间 Ω 内所有间接光线 $-\boldsymbol{\omega}_m$ 方向的辐射亮度 $L(\mathbf{p}, -\boldsymbol{\omega}_m)$ 进行积分。光线辐射传输路径如图 1 所示。

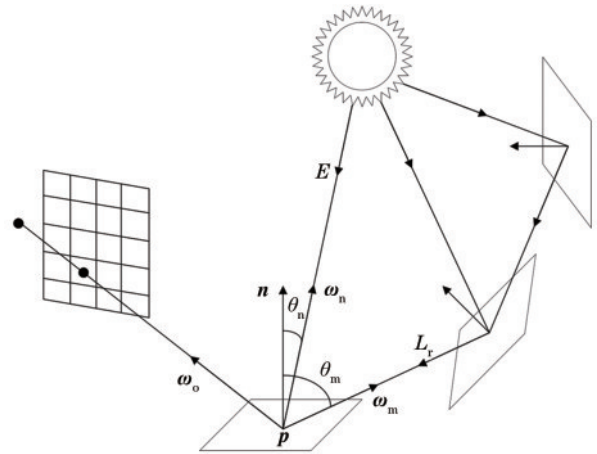


图 1 光线辐射传输路径

Fig. 1 Ray radiation transmission path

反向光线跟踪辐射成像仿真的流程如图 2 所示,主要包含 4 个步骤:1)从相机面元出发在仿真像元的面积内进行随机位置采样,将对应的视线方向作为光线跟踪的第一级光线路径;2)如果光线不与目标区域相交则光线逃逸,累加光源辐射和背景辐射的亮度值;3)如果光线与目标区域相交,首先累加相交位置的自发辐射亮度值,若能发生反射,则在反射范围内对入射光线进行随机采样并计算相应的反射函数,反之结束递归计算;4)根据步骤 3)中采样的反射方向生成下一级光线跟踪路径,重复步骤 2)和步骤 3),进行反向光线跟踪计算,直至光线逃逸为止。

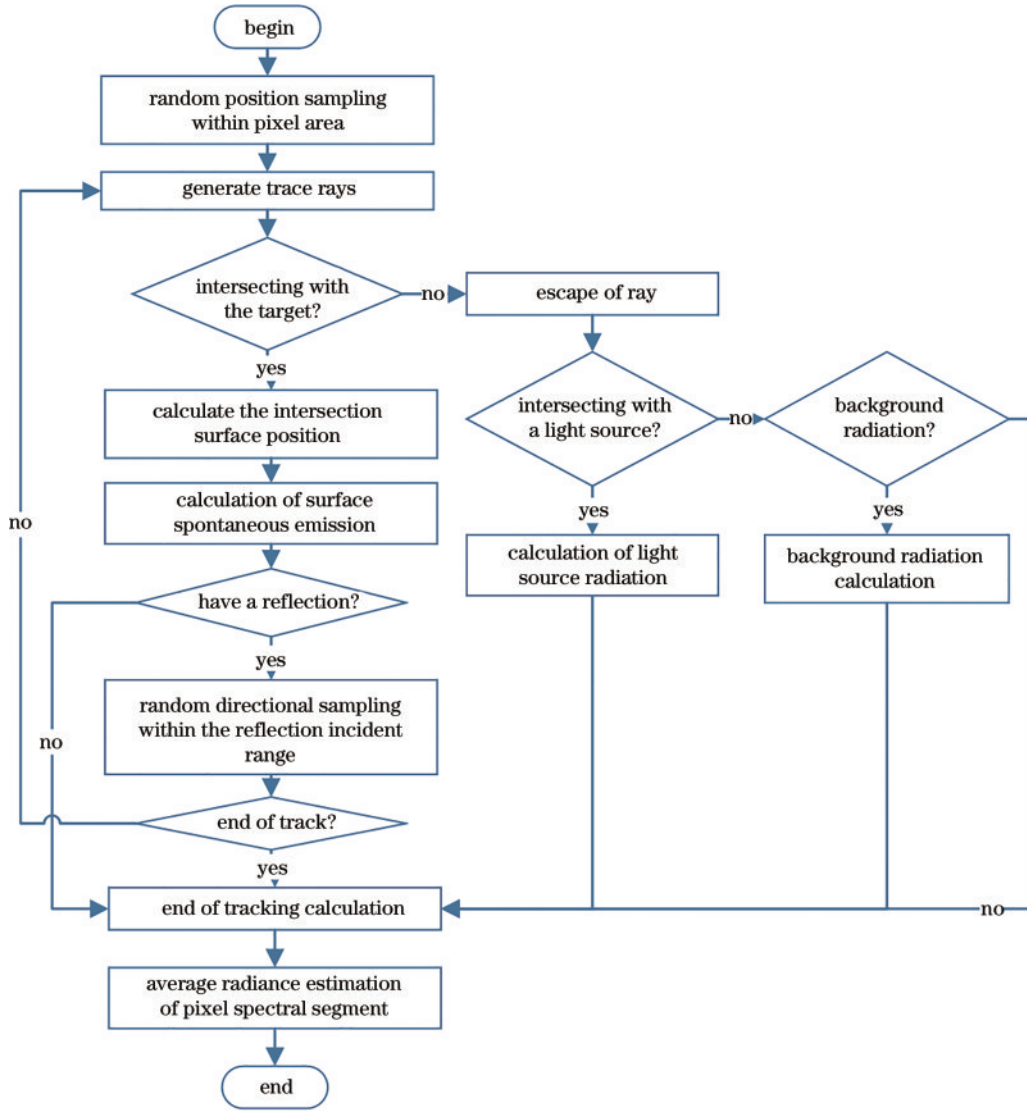


图 2 反向光线跟踪辐射成像仿真的流程

Fig. 2 Flow chart of inverse ray tracing radiation imaging simulation

2.2 针对聚酰亚胺褶皱表面的模型优化

2.2.1 二次反射采样方法优化

对于式(1)的辐射亮度多重积分问题,采用蒙特卡罗数值积分方法^[14]对积分结果进行估计,沿 ω_o 方向的辐射亮度表达式改写为

$$L(\mathbf{p}, \omega_o) = \sum_{n=1}^N f_r(\mathbf{p}, \omega_o, \omega_n) \times E(\mathbf{p}, -\omega_n) V(\mathbf{p}, \omega_n) \cos \theta_n + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{f_r(\mathbf{p}, \omega_o, \omega_m) L(\mathbf{p}, -\omega_m) \cos \theta_m}{P(\omega_m)}, \quad (2)$$

式中: N 为场景中的光源数量; $V(\mathbf{p}, \omega_n)$ 为 \mathbf{p} 位置在 ω_n 方向上对光源的可视函数,直接光照辐射亮度为场景中所有光源在 \mathbf{p} 位置的贡献值的累加和; $P(\omega_m)$ 为间接光照在 ω_m 方向上的概率密度函数^[15],间接光照辐射亮度通过蒙特卡罗方法得到采样估计; M 为间接光照的采样数量。

由于褶皱表面法线分布随机,可能会发生二次或

多次反射,因此对二次反射计算时的光线采样区间进行优化就显得十分重要。为得到更准确的数值解和更快的收敛速度,需要使概率密度函数 $P(\omega_m)$ 尽量正比于被积函数,被积函数形式如式(2)第二部分所示,直接用整个被积函数设计概率密度函数是很困难的,针对 \cos 项设计 $P(\omega_m)$ 函数,采用余弦权重(cos-weighted)重要性采样对光线反射计算时的采样区间进行优化, $P(\omega_m)$ 表达式为

$$P(\omega_m) = \frac{\cos \theta_m}{\pi}. \quad (3)$$

2.2.2 BRDF 模型优化

对于空间目标常用温控材料聚酰亚胺,其具有明显的菲涅耳反射现象。可以描述菲涅耳反射的BRDF模型有Cook-Torrance模型^[16]、Phong模型^[12]以及Blinn-Phong模型等。对Blinn-Phong模型的镜面反射部分添加相关修正项,使其能更好地描述菲涅耳反射。聚酰亚胺褶皱平面模型是由若干具有不同方向的三角微

面元组成的,在成像中只有表面法线朝着光线方向和视线方向的中线方向的微面元起作用,其他微面元对反射没有作用。图 3 是 BRDF 模型的几何关系。

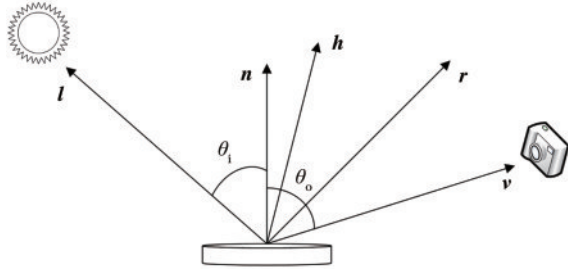


图 3 BRDF 模型几何关系

Fig. 3 Geometric relationship of BRDF model

图 3 中, l 为入射光线方向向量; v 为视线方向向量; n 为入射表面光线的法线向量; r 为入射光线的反射方向向量; h 为入射光线和视线方向的半角向量; θ_i 为入射光线与法线向量的夹角; θ_o 为视线方向与法线向量的夹角。Blinn-Phong 模型是在 Phong 模型的基础上修改得到的,在 Phong 模型中反射向量 r 的计算公式为 $r = l + 2 \times n \times (-n \cdot l)$ 。Blinn-Phong 模型用半角向量 h 来代替反射向量 r ,对半角向量 h 仅进行一次加法运算 $h = l + v$,计算时间更短,效率更高。Blinn-Phong 模型的表达式为

$$f_r = \rho_d + \rho_s \frac{(n \cdot h)^a}{n \cdot l}, \quad (4)$$

式中: ρ_d 和 ρ_s 分别为材质的漫反射率和镜面反射率; a 为镜向指数,用于调节镜面反射的强度。将反射项分

母 $n \cdot l$ 改为 $(n \cdot h)^a$ 来调节不同入射角的峰值增加速度,添加指数项 $\exp[-b(1 - n \cdot h)^{1/\pi}]$ 来加强 $(n \cdot h)^a$ 的作用^[12],通过调整参数可以改变镜面反射随角度的升降速度,改进后的 Blinn-Phong 模型的表达式为

$$f_r = \rho_d + \rho_s \frac{(n \cdot h)^a}{(n \cdot l)^a} \exp[-b(1 - n \cdot h)^{1/\pi}], \quad (5)$$

式中: a 用于调节菲涅耳反射现象的强度, b 用于调节镜面反射分量的升降速度, a 和 b 都大于零。

3 仿真设计与结果分析

3.1 平面褶皱模型构建与量化描述方法

用 3D MAX 建模软件^[17]生成褶皱平面。在 YZ 平面上建立半径为 1 m 的圆形平面,为得到更多的褶皱细节,对圆形平面进行分段,平面共计 13022 个顶点,26040 个三角面元,13012 个微面元法线。利用 Polycloth 插件在圆形平面上添加几何褶皱,并对平面的褶皱程度进行量化分析,计算圆形褶皱平面所有三角面元的法线向量与平面整体的法线向量(即 X 轴的单位向量)的余弦均值和方差,用变量 E_{PLANE} 和 V_{ar} 表示,它们描述了三角微面元相对于 YZ 平面的平均偏离程度,可以用来表示平面的褶皱程度。 E_{PLANE} 越接近于 1,表示法线之间夹角越接近于 0° ,即三角面元对 YZ 平面的偏离程度越小,即褶皱越少, V_{ar} 越大表示褶皱起伏越大。褶皱模型如图 4 所示,图 4(a)~(c) 分别是 E_{PLANE} 为 0.9803、0.9680、0.9435, V_{ar} 为 0.0046、0.0077、0.0124 的平面褶皱模型,分别定义为轻微褶皱、中等褶皱、严重褶皱。

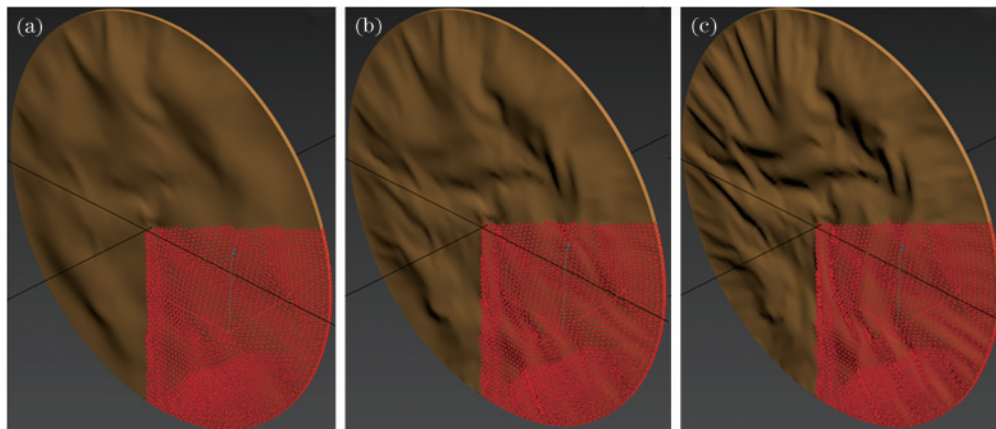


图 4 平面褶皱模型。(a)轻微褶皱模型;(b)中等褶皱模型;(c)严重褶皱模型

Fig. 4 Plane fold models. (a) Slight fold model; (b) medium fold model; (c) severe fold model

3.2 褶皱平面重要性采样仿真

仿真场景中入射光为平行光,辐射亮度为 $100 \text{ W} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,光线方向和平面法线之间的夹角 θ_i 设置为 10° ,视线方向与平面法线的夹角 θ_o 设置为 0° ,三种不同褶皱程度的圆形平面的反射率设为 0.3717。采用余弦权重重要性采样和均匀采样的褶皱平面仿真图如图 5 所示,图 5(a)~(c) 分别是轻微

褶皱、中等褶皱、严重褶皱平面的仿真图像,第一行为均匀采样的仿真图像,第二行为余弦权重重要性采样的仿真图像,从左到右,采样光线数量依次为 1、10、100、500、1000,光线追踪深度都为 4。由图 5 可以看出,在相同采样光线数量下,使用余弦权重重要性采样的仿真图像的噪点大大减少。

表 1 给出了不同褶皱程度的平面在均匀采样和余

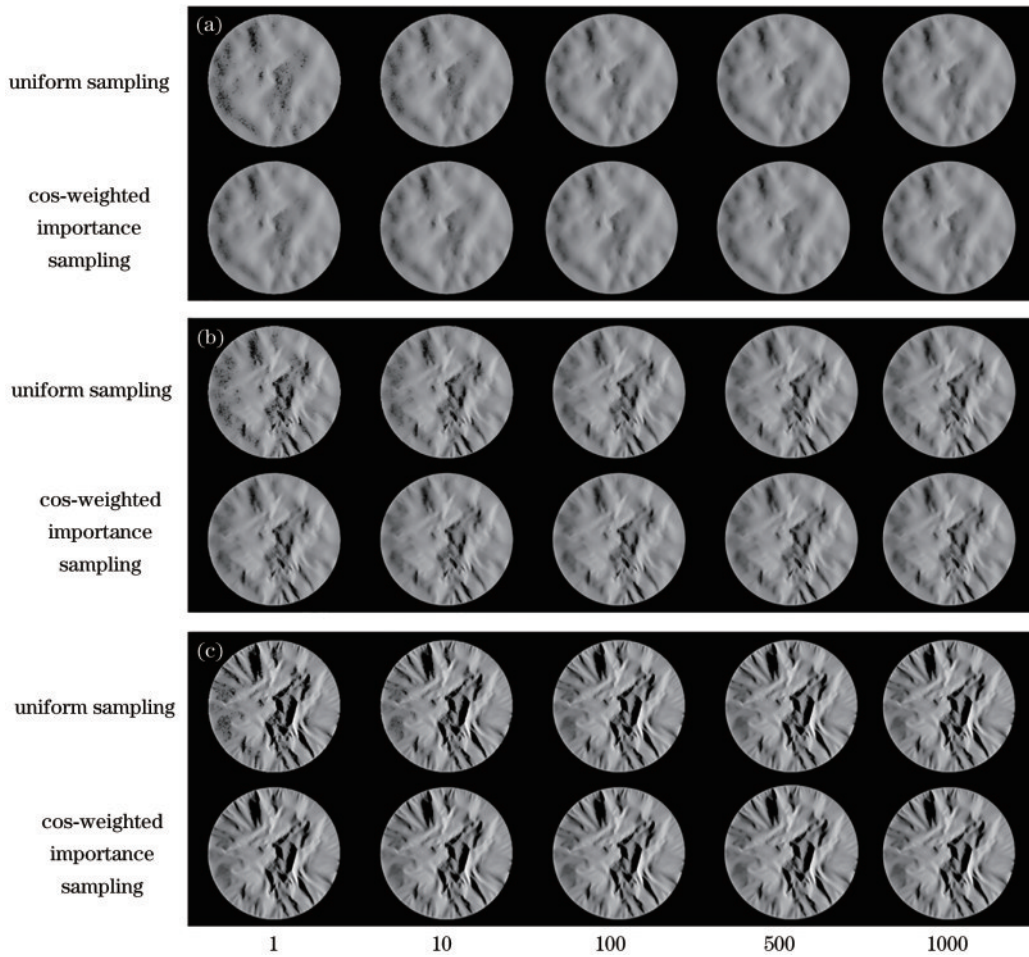


图 5 褶皱平面仿真。(a)轻微褶皱仿真图;(b)中等褶皱仿真图;(c)严重褶皱仿真图

Fig. 5 Plane simulation of fold. (a) Simulation of slight fold; (b) simulation of medium fold; (c) simulation of severe fold

表 1 仿真图像的均方根误差

Table 1 Root mean square error of simulated images

E_{PLANE}	Number of sampled rays	RMSE of uniform sampling	RMSE of cos-weighted importance sampling	Percentage reduction of RMSE	Average percentage reduction of RMSE
0.9803	1	9.0000	3.8693	57.01%	54.68%
	10	5.1428	2.5147	51.10%	
	100	1.8237	0.8058	55.82%	
	500	0.5844	0.2480	57.56%	
	1000	0.3355	0.1613	51.92%	
0.9680	1	14.3115	4.5239	68.39%	60.07%
	10	8.1629	3.4490	57.75%	
	100	3.2246	1.2805	60.29%	
	500	0.8869	0.3524	60.27%	
	1000	0.4855	0.2250	53.66%	
0.9435	1	17.0678	4.6397	72.82%	63.42%
	10	10.1596	3.8251	62.35%	
	100	4.0665	1.4949	63.24%	
	500	1.1018	0.4154	62.30%	
	1000	0.5842	0.2548	56.38%	

弦权重重要性采样两种方式下的仿真图像的均方根误差(RMSE)以及RMSE的减少百分比。由表1可知,在

同一褶皱程度的平面上,在相同的采样光线数量下余弦权重重要性采样的RMSE更小,并且随着平面褶皱

程度的增加,仿真图像的 RMSE 的减少百分比在增加,轻微褶皱平面的 RMSE 的减少百分比为 54.68%,中等褶皱平面的 RMSE 的减少百分比增加至 60.07%,严重褶皱平面的 RMSE 的减少百分比为 63.42%。由此可得,针对空间目标温控材料形成的褶皱表面,采用余弦权重重要性采样对二次反射计算的采样区间进行优化时能提高计算效率,加速图像收敛,使仿真图像更为精细,并且随着模型褶皱程度的增加,重要性采样的 RMSE 的减少百分比也会增加,优化更加明显。

3.3 BRDF 模型验证及聚酰亚胺褶皱平面仿真

用常见温控材料金色聚酰亚胺的实测数据和 BRDF 模型的拟合结果进行对比来验证模型的有效

性。图 6 为金色聚酰亚胺的实验数据与 Blinn-Phong 模型、改进的 Blinn-Phong 模型及 Cook-Torrance 模型的拟合结果对比。其中,改进的 Blinn-Phong 模型的参数为 $\rho_d=0.3717$, $\rho_s=283.9$, $\alpha=3865.7$, $a=0.9665$, $b=1.3965$ 。图 6(a) 为 $\theta_i=30^\circ$ 时的拟合结果,图 6(b) 为 $\theta_i=60^\circ$ 时的拟合结果。由图 6 可知,金色聚酰亚胺材料具有明显的菲涅耳反射现象,改进的 Blinn-Phong 模型拟合效果优于原模型,改进模型的峰值更接近于实测数据,且镜面反射强度的上升和下降速率更快,使得拟合曲线在横轴上更加契合,能够更好地描述菲涅耳反射现象,同时也可看出改进的 Blinn-Phong 模型的拟合效果略优于 Cook-Torrance 模型。

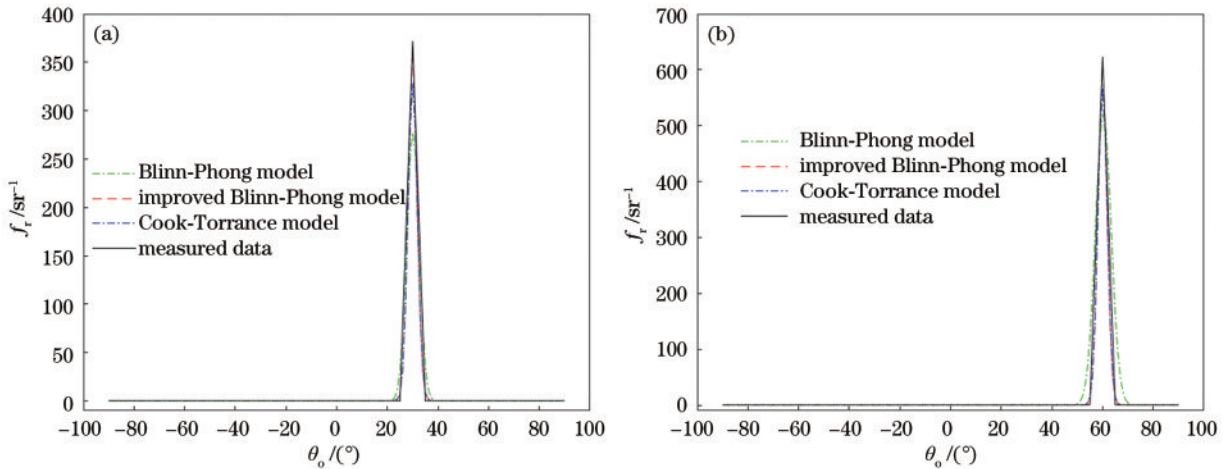


图 6 BRDF 曲线图。(a) $\theta_i=30^\circ$; (b) $\theta_i=60^\circ$
Fig. 6 BRDF curve images. (a) $\theta_i=30^\circ$; (b) $\theta_i=60^\circ$

表 2 给出了三种 BRDF 反射模型的均方根误差。由表 2 可知,改进的 Blinn-Phong 模型的 RMSE 小于原

模型,也小于 Cook-Torrance 模型,并且当 θ_i 为 30° 时模型的 RMSE 要小于 θ_i 为 60° 时的 RMSE。

表 2 三种 BRDF 模型的均方根误差
Table 2 RMSE of three BRDF models

Angle of incidence / ($^\circ$)	RMSE of Blinn-Phong model	RMSE of improved Blinn-Phong model	RMSE of Cook-Torrance model
30	17.3433	2.3129	7.4633
60	35.3959	3.1782	9.5400

将轻微褶皱平面的 BRDF 模型设置为改进 Blinn-Phong 模型,以模拟金色聚酰亚胺薄膜上出现褶皱的

情况,将 θ_o 设置为 0° ,为了能看到褶皱平面的菲涅耳反射现象,将 θ_i 分别设置为 3° 和 6° ,仿真图像如图 7 所

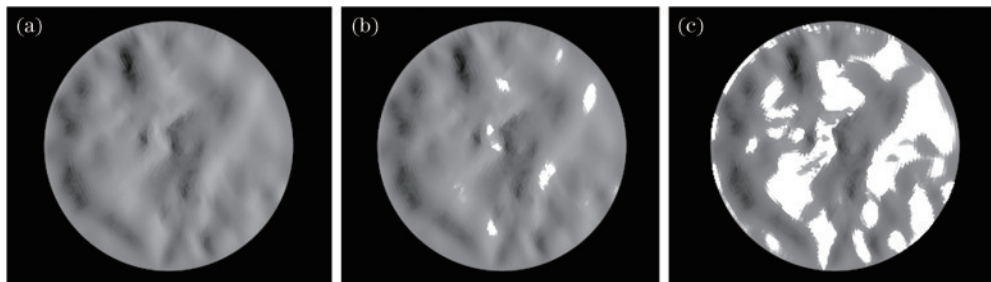


图 7 褶皱平面仿真图。(a) 朗伯模型; (b) 改进 Blinn-Phong 模型, $\theta_i=6^\circ$; (c) 改进 Blinn-Phong 模型, $\theta_i=3^\circ$

Fig. 7 Plane simulation of a fold. (a) Lambert model; (b) improved Blinn-Phong model, $\theta_i=6^\circ$; (c) improved Blinn-Phong model, $\theta_i=3^\circ$

示。图 7(a)为褶皱平面的朗伯模型仿真图,由图可知图像无法表现出聚酰亚胺材料的菲涅耳反射现象。图 7(b)为 $\theta_i=6^\circ$ 时的褶皱平面的改进 Blinn-Phong 模型仿真图,由图可知改进 Blinn-Phong 模型处理的图像可以表现出聚酰亚胺材料的菲涅耳反射现象,并且当 $\theta_i=6^\circ$ 时,材质的镜面反射强度已经下降了很多,镜反现象不是很明显,符合图 6 曲线规律。图 7(c)为当 $\theta_i=3^\circ$ 时的改进 Blinn-Phong 模型仿真图,由图可知此时材质的镜反强度增大,高光现象明显,符合聚酰亚胺的实际情况。综上,改进的 Blinn-Phong 模型在带有物理褶皱的平面上同样具备描述菲涅耳反射现象的能力,随着 θ_i 越接近 θ_o ,材质的镜面反射强度随之增加,褶皱平面上根据凸起位置而呈现出大小不一的亮斑。

3.4 空间目标成像仿真

本实验选用法国空间研究中心和 NASA 联合研制的海洋地形卫星 Jason 的模型^[18]进行成像仿真实验。空间光学相机接收到的辐射来源主要是空间目标对可见光的反射,在可见光波段,太阳对地球外空间目标的辐照度^[19]为 593.1 W/m^2 ,由于距离很远,将其看作平

行光。相机仿真参数如表 3 所示。

表 3 相机仿真参数

Table 3 Camera simulation parameter	
Simulation parameter	Value
Number of pixels	9000×9000
Pixel size / μm	16×16
Focal length /mm	6000
Simulation band / μm	0.45–0.75
Pixel sampling number	100
Trace depth	4

Jason 卫星的主体部分由金色聚酰亚胺薄膜包裹着,用改进 Blinn-Phong 模型来描述其光学反射特性,模型参数为 $\rho_d=0.3717$, $\rho_s=283.9$, $\alpha=3865.7$, $a=0.9665$, $b=1.3965$,卫星表面喷涂消光白漆的部分采用朗伯模型,反射率为 0.522。图 8 为空间目标的仿真图像,图 8(a)为 Jason 卫星仿真图像,图 8(b)为卫星主体褶皱表面放大图。由图可知,卫星仿真图像阴影效果正确,包覆着聚酰亚胺薄膜的主体部分的褶皱也能清晰展现,说明所提空间目标褶皱平面仿真方法是有效的。

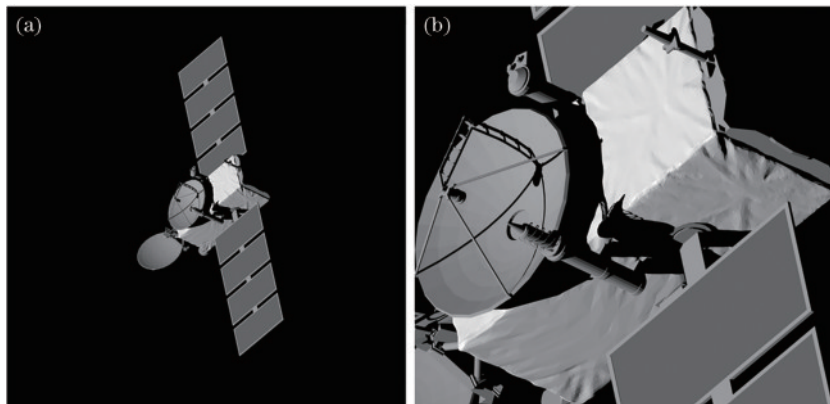


图 8 空间目标仿真图像。(a) Jason 卫星仿真图;(b) Jason 卫星主体放大结果

Fig. 8 Space target simulation image. (a) Jason satellite simulation diagram; (b) Jason main body amplification result

4 结 论

对空间目标褶皱表面成像仿真方法进行研究,针对空间目标常用温控材料聚酰亚胺的褶皱表面可能引发的二次反射以及材料的菲涅耳反射现象,对仿真方法进行优化。用蒙特卡罗方法求解辐射积分时,采用余弦权重重要性采样对二次反射计算时的光线区间进行优化,在相同的采样光线数量下,通过与均匀采样相比,余弦权重重要性采样后的轻微褶皱平面的 RMSE 减小了 54.68%,严重褶皱平面的 RMSE 减小了 63.42%,结果表明,对于目标褶皱表面,重要性采样的精确度更高,且随着褶皱程度的增加优化更加明显。对 Blinn-Phong 模型添加修正项,提高其描述菲涅耳反射现象的能力,通过与实测 BRDF 值对比可得,改进模

型的 RMSE 更小,描述效果更佳,在轻微褶皱平面上进行仿真时可以看到明显的菲涅耳反射现象,验证了模型的正确性。仿真了特定参数下的 Jason 卫星图像,仿真图像褶皱表面细节纹理展示清晰,阴影效果正确且逼真,可为空间目标视觉导航相关算法研究提供图像数据。

参 考 文 献

- [1] 于鲲. 空间目标光电探测场景仿真与视觉导航关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Yu K. Research on key technologies of scene simulation and visual navigation for photoelectric detection of space targets[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [2] 杨玉峰. 不规则褶皱表面目标的光谱散射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.

- Yang Y F. Study on spectral scattering characteristics of irregular folded surface targets[D]. Xi'an: Xidian University, 2015.
- [3] Crockett G A, Brunson R L. Visualization tool for advanced laser system development[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4724: 69-77.
- [4] Cathala T, Douchin N, Latger J, et al. The coupling of MATISSE and the SE-WORKBENCH: a new solution for simulating efficiently the atmospheric radiative transfer and the sea surface radiation[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7300: 73000K.
- [5] 韩意, 陈明, 孙华燕, 等. 天宫二号伴星可见光相机成像仿真方法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 1218002.
- Han Y, Chen M, Sun H Y, et al. Imaging simulation method of TG-02 accompanying satellite's visible camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(12): 1218002.
- [6] 许兴星, 丁雷. 基于 OpenGL 的星载可见光相机成像仿真系统[J]. 红外, 2017, 38(7): 15-21.
- Xu X X, Ding L. Spaceborne visible light camera imaging simulation system based on OpenGL[J]. Infrared, 2017, 38(7): 15-21.
- [7] 张峰, 张雅声, 徐灿. 卫星褶皱表面的光学散射特性[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 052401.
- Zhang F, Zhang Y S, Xu C. Optical scattering characteristics of satellite with fold surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 052401.
- [8] 彭晓东, 刘波, 孟新, 等. 星载可见光相机成像仿真建模研究[J]. 光子学报, 2011, 40(7): 1106-1111.
- Peng X D, Liu B, Meng X, et al. Research on remote sensing image generation modeling in the visible regions[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(7): 1106-1111.
- [9] 李崇远. 基于光线追踪的空间面目标可见光成像仿真技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- Li C Y. Research on visible light imaging simulation technology of space surface target based on ray tracing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [10] 杨晋生, 李天骄. 天基空间目标场景成像仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(8): 0811004.
- Yang J S, Li T J. Simulation of space-based space target scene imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(8): 0811004.
- [11] 汪夏, 张雅声, 徐灿, 等. 空间目标褶皱材质 BRDF 建模方法[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1024001.
- Wang X, Zhang Y S, Xu C, et al. Bidirectional reflectance distribution function modeling approach of space objects' fold material[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1024001.
- [12] 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.
- 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.
- [13] 于鲲, 段雨晗, 丛明煜, 等. 飞行器红外物理成像仿真优化计算方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(4): 20200355.
- Yu K, Duan Y H, Cong M Y, et al. Optimal calculation method of aircraft infrared physical imaging simulation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(4): 20200355.
- [14] 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.
- 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.
- [15] 伦旭磊, 朱丹, 高志山, 等. 基于拒绝采样法的 BRDF 模型散射光线追迹方法[J]. 光学学报, 2023, 43(6): 0612002.
- Lun X L, Zhu D, Gao Z S, et al. Scattered ray tracing method based on brdf model by rejection sampling method[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 0612002.
- [16] 王霄, 高思莉, 李范鸣. 基于 BRDF 的空中目标红外成像建模与仿真[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(2): 182-187.
- Wang X, Gao S L, Li F M. Infrared imaging modeling and simulation of aerial target based on BRDF[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(2): 182-187.
- [17] 薛媛媛. 仿真褶皱材质在 3D MAX 虚拟现实中的应用[J]. 山西科技, 2009, 24(2): 41-42.
- Xue Y Y. Study of the application of simulated folding material in 3D MAX virtual reality[J]. Shanxi Science and Technology, 2009, 24(2): 41-42.
- [18] NASA Jet Propulsion Laboratory. Mars global surveyor MOI[EB/OL]. (2009-02-19)[2021-02-01]. <https://nasa3d.arc.nasa.gov/detail/mgs-moi>.
- [19] 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.
- 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.