

文章编号: 1672-8785(2017)07-0015-07

基于 OpenGL 的星载可见光相机 成像仿真系统

许兴星^{1,2,3} 丁 雷^{2,3}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

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: 介绍了一种星载可见光相机成像仿真系统, 它主要用于模拟星载可见光相机观测其他空间目标时的场景并输出仿真图像。该系统不仅可以为空间目标检测与追踪研究提供图像数据, 而且还可以为空间相机的设计及性能评估提供技术支持。采用 3ds Max 软件建立了空间目标的精准三维模型, 并给其赋予了材质属性; 使用卫星工具包 (Satellite Toolkit, STK) 预报了被观测目标和相机的轨道参数, 并利用星表提供了星空背景中恒星的位置、星等和自行等参数; 在开源图形库 (Open Graphics Library, OpenGL) 中建立了星载可见光相机观测空间目标时的场景, 并模拟了星载可见光相机的观测效果。结果表明, 本文系统具有较高的仿真度和渲染速度, 可以实现深空点目标和近距离面目标的观测成像效果图的实时渲染。

关键词: 空间目标; 散射特性; 成像仿真; OpenGL

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.07.003

Spaceborne Visible Light Camera Imaging Simulation System Based on OpenGL

XU Xing-xing^{1,2,3}, DING Lei^{1,2}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai 200083, China)

Abstract: A spaceborne Visible light camera imaging simulation system based on OpenGL is presented. It is mainly used to simulate the scenes when the spaceborne visible light camera is observing other space objects and output simulation images. The simulation system not only can provide image data for space object detection and tracking, but also can provide technical support for the design and performance evaluation of spaceborne cameras. The 3ds Max software is used to establish the precise three-dimensional model for a space object and vest it with material properties. The satellite Toolkit is used to predict the orbital parameters of both the space object and the camera. The star catalog is used to provide the parameters such as the position, magnitude and proper motion of a star against the starry background. In the Open Graphics Library, the scenes when the spaceborne visible light camera is observing a space

收稿日期: 2017-03-14

作者简介: 许兴星 (1991-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事空间目标成像仿真研究。

E-mail: cumtxxingxing@sina.com

object are established and the observing effectiveness of the spaceborne visible camera is simulated. The result shows that the simulation system has its higher simulation degree and rendering speed. It can be used to implement the rendering of the observing imaging effectiveness of both point objects in deep space and short distance area objects in real time.

Key words: space target; scattering property; imaging simulation; OpenGL

0 引言

利用计算机视景仿真技术和图像处理技术可以模拟在轨光学相机观测空间目标时的成像过程,进而生成仿真图像。仿真系统可以模拟各种环境中的观测结果,从而为空间目标探测与追踪技术研究提供充分且灵活的数据源。另外,它还可以模拟观测系统的各个参数对观测结果和观测性能的影响,从而为在轨相机的方案设计提供技术支持。这对空间目标观测、识别和追踪的相关研究具有重要意义。

针对空间目标成像仿真研究,前人已经做了大量工作。他们提出了搭建天基空间目标观测系统的可行性方案,并对系统搭建的基本原理及组成等内容进行了比较详细的描述^[1-5];分析了星空环境下成像过程中的背景离焦模糊、运动模糊和星芒等效果,并提出了具有针对性的仿真方法^[6];分析了空间目标的可见性^[7],并提出了关于星空背景的仿真方法^[8-9]。

本文根据可见光相机的成像原理,基于 OpenGL 建立天基空间目标观测仿真系统。采用 3ds Max 软件建立目标的精准三维模型,并输出便于交换和渲染的 obj 文件;利用星表和 OpenGL 透视投影快速渲染恒星背景;借助 STK 预测目标和相机的轨道参数并分析空间目标对于星载相机的可见性和观测条件,然后针对不同的观测条件模拟成像效果,产生原始的仿真图像;分析观测过程中的噪声及模糊现象,接着对原始的仿真图像进行处理并输出最终的仿真图像。

1 观测场景的建模

在观测空间目标时,星载相机的典型场景包含空间目标、观测相机、恒星背景、太阳和地

球等。若要生成空间相机观测的仿真图像,则需建立这些物体的模型,从而模拟场景中的光源、目标和成像系统。

1.1 空间目标

由于 OpenGL 本身只提供简单几何体的绘制功能,用代码实现复杂空间目标的建模是比较繁琐的。然而借助 3ds Max 软件则可方便地建立空间目标的三维模型并以 obj 和 mtl 文件格式保存。这两个文件分别包含目标的几何属性和材质属性,便于在不同的建模平台上进行交换和在 OpenGL 中加以渲染。

1.2 恒星背景

用于建立恒星背景的坐标、星等和自行改正等参数可由史密森星表提供。由于现有星表中给出了每颗可观测恒星在惯性天球坐标系中的角位置——赤经 α 和赤纬 δ , 恒星方向矢量在 J2000 坐标系中可表示为 $(\cos \delta \cdot \cos \alpha, \cos \delta \cdot \sin \alpha, \sin \delta)^T$ ^[2]。

星表是用视星等来描述星体亮度的。规定两颗星的星等相差五等时,两者的亮度之比为 100。也就是说,当两颗星的星等相差一等时,两者的亮度之比为 $100^{1/5} = 2.512$ 。若用 m 表示视星等,用 E 表示照度,则对于不同的两颗星:

$$\frac{E_2}{E_1} = 2.512^{m_1 - m_2} \quad (1)$$

已知太阳在可见光波段的视星等为 -26.74 , 太阳在大气层外的照度为 E_s , 根据式 (1) 可以确定空间目标的入瞳照度 E 与视星等 m 之间的关系:

$$E = E_s \times 2.512^{-26.74 - m} \quad (2)$$

对于恒星背景的成像仿真,有两个重要假设^[9]: (1) 位于地球轨道空间中任意一点上的观察者,在同一方向上所看到的星空背景相同; (2) 星空背景中的所有星体在视觉上与观察者的距离相等。基于这两个假设可以实现恒星背景

的快速渲染, 并可在固定半径的天球上绘制恒星: 设定观测方向和相机参数, 实现矩阵堆栈; 将天球中心移至视点位置, 然后根据前面算得的坐标和星等绘制恒星, 并实现矩阵出栈; 最后对背景的高焦模糊效果进行处理。

1.3 光源

可见光相机观测中的光源主要是太阳光和地球反射光。太阳辐射可以看作是温度为 5900 K 的黑体辐射。根据普朗克定律, 黑体的光谱辐射出射度与温度及波长的关系可以表示为

$$M(\lambda, T_0) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1} \quad (3)$$

式中, $M(\lambda, T_0)$ 为太阳的光谱辐射出射度 (W/m^3); h 为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$; c 为光速, $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m}/\text{s}$; λ 为辐射波长 (m); T_0 为太阳热力学温度, $T_0 = 5900 \text{ K}$ 。

根据能量守恒定律, 目标处的光谱辐照度为

$$E_s(\lambda) = M(\lambda, T_0) R_s^2 / R_{os}^2 \quad (4)$$

式中, $E_s(\lambda)$ 为空间目标处的光谱辐照度 (W/m^3); R_s 为太阳半径 (m); R_{os} 为太阳到目标的距离 (m), 可近似为日地距离。

地球本身并不发光, 主要依靠反射太阳光而产生亮度。因此可假设地球是一个对太阳光的反射遵守朗伯特定律且反射光谱与太阳光谱相同的漫反射体。其反射率可用地球的平均反射率 $\rho = 0.35$ 表示^[7]。

2 空间目标的可视条件

在对空间目标的成像进行仿真时, 还需考虑拍照时刻是否满足成像条件。下面从几何可见、光学可见和设备可见三个方面来讨论可视条件^[7]。

2.1 几何可见

几何可见是指空间目标与观测平台之间能够通视, 即两者之间没有任何遮挡。地球的遮挡情况可由图 1 表示。其中, r_o 为观测目标的地心

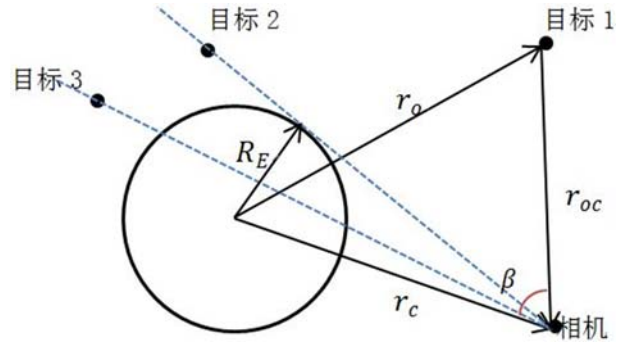


图 1 地球的遮挡情况

矢量, r_c 为相机的地心矢量, r_{oc} 为目标到相机的矢量, R_E 为地球半径, β 为相机对目标和地心的夹角。可以明显看出, 目标 1 可视, 目标 2 处于临界条件, 目标 3 不可见。若要满足通视条件, 则要求

$$\cos \beta < \sqrt{r_c^2 - R_E^2} / |r_c| \quad (5)$$

即

$$r_c \cdot r_{oc} < |r_{oc}| \sqrt{r_c^2 - R_E^2} \quad (6)$$

2.2 光学可见

光学可见包括两个方面: (1) 观测时避免太阳直射; (2) 空间目标不在地影区域内。若太阳光直射镜头, 不仅会使视场处在高亮背景之中, 而且还会对探测器造成损坏。当可见光相机探测空间目标时, 其探测的是由目标反射的太阳光, 因此要避免目标处于地影区域。如图 2 所示^[3], 若要消除阳光直射, 则需避免空间目标出现在太阳的视圆面上。其中, r_{co} 为相机到目标的矢量, r_{cs} 为相机到太阳质心的矢量, α_0 为太阳的视半径。若要使相机不受太阳光直射, 则需满足

$$\cos \alpha_0 > \frac{r_{co} \cdot r_{cs}}{|r_{co}| |r_{cs}|} \quad (7)$$

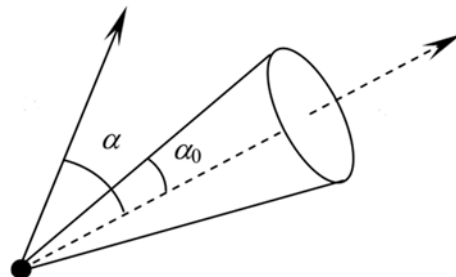


图 2 避免阳光直射的示意图

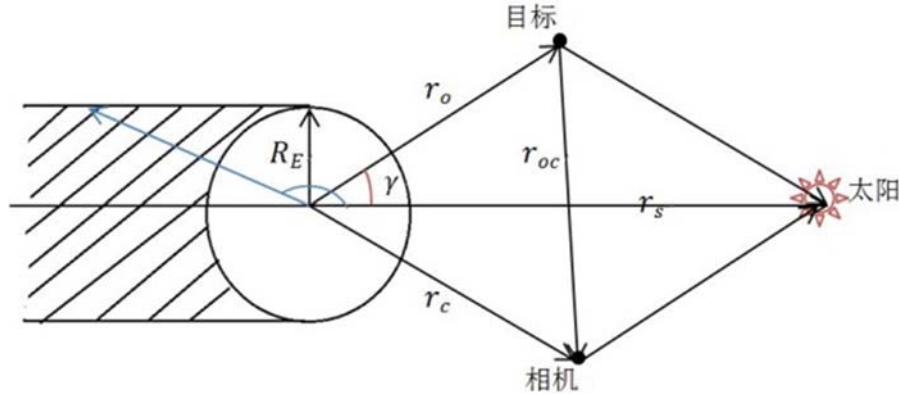


图 3 地影条件

另外, 光学可见还包括地影条件, 即目标处在地影之外。由于太阳到地球的距离很远, 太阳光可近似看作平行光, 且地影区域呈圆筒状(见图 3) [7]。其中, γ 为目标地心矢量与太阳地心矢量的夹角; 左上侧斜线表示目标进入地影区域的临界位置矢量和临界角度。若要使目标处在地影之外, 则需满足 [7]

$$\mathbf{r}_o \cdot \mathbf{r}_s > -|\mathbf{r}_s| \sqrt{r_o^2 - R_E^2} \quad (8)$$

2.3 设备可见

设备可见是指在进行远距离观测时, 空间目标的辐射亮度超过相机的探测极限。通过分析相机的信噪比, 可以确定相机所能探测的最小信号强度。相机的噪声主要包括光子噪声、暗电流噪声和读出噪声 [2]。

当电荷耦合器件 (Charge-Coupled Device, CCD) 相机曝光时, 目标在焦平面上产生信号的同时还会引入光子噪声。光子噪声与信号强度之间的关系为

$$N_p = \sqrt{N_s} \quad (9)$$

式中, N_p 为光子噪声的电子数 (e^- rms/pixel); N_s 为单个像元上的信号电子数 (e^- /pixel)。

在脉冲驱动的作用下, 半导体内部由于热运动产生的载流子填充势阱被转移, 并在输出端形成电流。该电流即使在无光条件下也存在, 因而被称为暗电流。暗电流噪声的大小主要受温度的影响。当温度降到一定程度时, 暗电流噪声

可以忽略不计。厂商一般都会给出暗电流的参考值。暗电流噪声可以表示为

$$N_d = \sqrt{I_d t_{int}} \quad (10)$$

式中, N_d 为暗电流噪声的电子数 (e^- rms); I_d 为暗电流 (A); t_{int} 为积分时间 (s)。

在 CCD 相机中, 读出电路也会引入电子噪声。该噪声一般在几个电子到几十个电子的水平上, 其参考值由厂商给出, 记为 N_r (单位为 e^- rms)。

基于以上分析, 可以将相机的信噪比定义为

$$SNR = \frac{N_s}{\sqrt{N_p^2 + N_d^2 + N_r^2}} \quad (11)$$

为了保证系统的探测概率大于 0.99, 信噪比必须大于 5.0 [7]。

3 空间目标反射特性的建模

空间目标的可见光反射特性在仿真系统中非常重要。利用空间目标的反射特性参数可以计算目标反射的太阳光在相机入瞳处的照度。

3.1 目标反射模型

用经验散射模型描述空间目标的反射特性。综合考虑漫反射和镜面反射两个因素, 将反射率定义为视线方向上的光强与入射光强之比 [3]:

$$\rho = \frac{I_M}{I_S} = K_M \cos \theta + K_J \cos^n \alpha, \quad K_M + K_J \leq 1 \quad (12)$$

式中, I_S 和 I_M 分别为入射光强和出射光强; K_M 和 K_J 分别为漫反射系数和镜面反射系数; n 为

镜面反射指数; θ 为目标到光源的指向单位向量与目标表面法线向量的夹角; α 为视线方向与镜面反射方向的夹角。经验反射模型通过用 K_M 、 K_J 和 n 三个参数描述目标的表面散射特性, 可以取得接近双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 的效果。但该模型在仿真系统中容易实现, 且计算速度更快。

3.2 人瞳照度计算

整个空间目标在与入射光线垂直的截面上的平行投影可以看成是空间目标的入射截面。但是并非所有照射到目标表面的光线都能反射到处在某一观测方向上的观测设备中。因此, 将入射截面中能把光线反射到观测方向上的部分定义为有效入射截面。采用基于 OpenGL 平行投影和深度缓存求取入射截面的方法, 可以快速求取有效入射截面。在相机坐标系中, 假设目标指向光源的矢量为 $n_{os} = (x_{os}, y_{os}, z_{os})^T$, 计算两个旋转角:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x_{os}}{z_{os}}\right) \quad (13)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{z_{os}}{\sqrt{x_{os}^2 + y_{os}^2}}\right) \quad (14)$$

初始时, 将模型平移至世界坐标系的原点上, 然后绕 y 轴旋转 α , 再绕 x 轴旋转 β 。此时, 目标指向光源的矢量与平行投影 z 轴的正方向保持一致。设定光源方向为原来的视线方向并进行平行投影, 即可获得有效入射截面 S_e 。那么, 空间目标在入瞳处的整体光谱照度为

$$E(\lambda) = \frac{E_s(\lambda)}{R_{oc}^2} \cdot \rho \cdot S_e \quad (15)$$

4 光电转换模型

假设星载相机光学系统的有效口径为 D , 光谱透过率为 $\tau(\lambda)$, 则透过光学系统的光谱通量为^[5]

$$\Phi(\lambda) = E(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot S_D \quad (16)$$

式中, $\Phi(\lambda)$ 为透过光学系统的光谱通量 (W/m); S_D 为入瞳面积 (m^2)。

假设辐射通量在积分时间 t_{int} 内保持不变, 则透过光学系统的辐射能为

$$Q(\lambda) = \Phi(\lambda) \cdot t_{int} \quad (17)$$

式中, $Q(\lambda)$ 为透过光学系统的光谱辐射能 (J/m); t_{int} 为相机的积分时间 (s)。

透过能量所对应的光子数为

$$N_p(\lambda) = Q(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{hc} \quad (18)$$

式中, $N_p(\lambda)$ 为光谱产生的光子数 (photons/m)。

相机的量子效率为 $\eta(\lambda)$, 则经过光电转换产生的电子数为

$$N_e(\lambda) = N_p(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \quad (19)$$

式中, $N_e(\lambda)$ 为光谱电子数 (e^-/m)。

有效波段光谱产生的总电子数为

$$N_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_e(\lambda) d\lambda \quad (20)$$

式中, N_e 为相机接收到的整个有效谱段辐射能量在焦平面上所产生的电子数 (e^-)。

假设电子在光斑上均匀分布, 则每个像元上所对应的电子数为

$$N_p = N_e \cdot \frac{a^2}{\pi d^2/4} \quad (21)$$

式中, N_p 为单个像元上的目标辐射能量在焦平面上产生的电子数 (e^-/pixel); a 为像元尺寸 (m); d 为光斑直径 (m)。那么相应的像元灰度为

$$g = \frac{N_p}{N_f} \times 2^{GRD} \quad (22)$$

式中, g 为像元灰度值; N_f 为饱和电子数; GRD 为量化位数。

5 仿真系统的实现

5.1 仿真流程

整个仿真系统主要包括模型和轨道数据的读入、目标的可见性分析、目标照度计算、恒星



图 4 仿真流程的示意图

背景和目标的渲染等几部分。在进行仿真图像渲染之前，载入空间目标的三维模型及轨道参数，然后对目标的可见性进行分析。如果目标可见并且在像平面上所占的像素个数小于 4，则将其视为点目标。接着计算目标的整体辐照度，并通过光电转换和 AD 转换计算点目标的像素值。如果目标在像平面上所占的像素个数大于 4，那么直接按照 Blinn-Phong 光照模型进行渲染。图 4 所示为仿真系统的工作流程。

5.2 仿真实验

首先，通过用 STK 进行轨道预报，不仅可以获得任意时刻下目标和探测器在 J2000 坐标系中的位置与速度信息，而且还可以获得太阳矢量和月球指向矢量等信息。仿真系统读取由 STK 导出的报告数据，从而为观测场景建模提供基本的几何信息。然后在 3ds Max 软件中建立一颗通信卫星的模型并将其作为被观测的目标（见图 5）。该卫星主要包括星体、太阳能帆板、天线和相机载荷等几部分。其中，星体是一个边长为 1.4 m 的立方体；两块展开的太阳能帆板的尺寸为 10 m×1 m；天线是一个直径为 2 m 的抛物面。

表 1 列出了观测相机的具体参数。由于相机的视场角小，进入视场内的恒星较少，所以图像

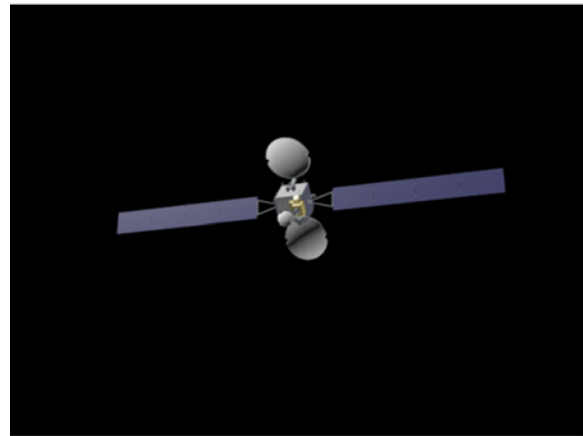


图 5 卫星模型的示意图

表 1 相机参数

项目	参数值
焦距 (m)	1.8
光学系统口径 (m)	1
像元数目	1000×1000
工作谱段 (μm)	0.3 ~ 0.9
像元尺寸 (μm)	12×12

中主要是关于空间目标的成像。当观测距离较远时，目标在焦平面上的投影小于 4 个像素，于是将其视为点目标。通过计算目标的入瞳照度可以量化像素值。当观测距离较近时，将其视为面目标，于是直接通过 Blinn-Phong 光照模型渲染。图 6 为不同观测距离下的仿真图像。

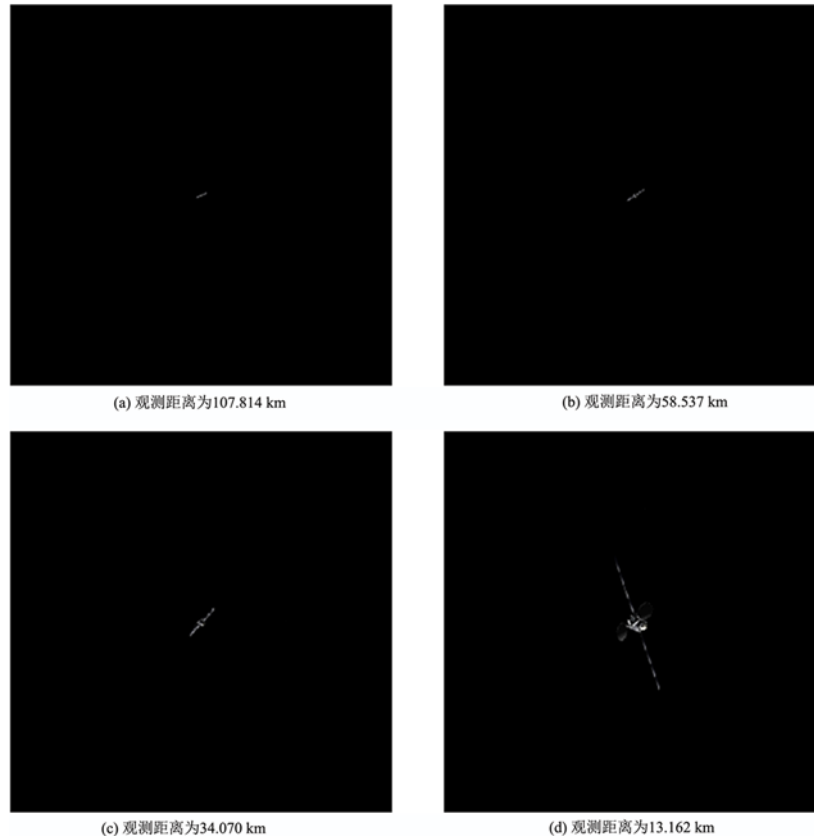


图 6 不同观测距离下的仿真图像

6 结束语

通过读取基于 STK 高精度轨道预报生成的报告, 为星载可见光相机成像仿真系统提供了基本的方位信息; 借助 3ds Max 软件建立了观测目标的精准几何模型, 并生成了便于在不同平台之间交换和导入的 obj 文件; 通过分析空间目标成像过程中的辐射能量传递和光电转换, 计算了目标的灰度信息。结果表明, 本文能够模拟星载可见光相机观测空间目标时的场景。分析了空间目标的可见性和成像条件, 并针对不同的观测距离, 分别采用照度计算和图形学光照模型的方法渲染了仿真图像。本文可为空间目标识别与追踪算法研究提供灵活、多样的数据源。以后我们需要改进面目标仿真方法, 使灰度量化值更接近于真实值; 同时, 还需要添加更多的空间目标材质信息, 以建立更加精确的目标反射模型。

参考文献

- [1] 韩意, 孙华燕, 李迎春, 等. 空间目标天基光学观测的序列图像仿真方法 [J]. *光学技术*, 2010, **36**(1): 93-97.
- [2] 程军, 张伟, 鲍文卓, 等. 在轨光学相机探测图像数字仿真系统的设计与实现 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(9): 2136-2144.
- [3] 蓝朝桢. 空间目标天基光学观测系统建模与探测能力分析 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009.
- [4] 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.
- [5] Cong M, Bao W, Yu H, et al. Modeling and Simulation for Optical Sensor Imaging in Space Rendezvous and Docking [C]. Yantai: 3rd International Congress on Image and Signal Processing (CISP), 2010.
- [6] 袁麟, 吕品, 郑昌文, 等. 星空环境成像效果的仿真研究 [J]. *系统仿真学报*, 2009, **21**(8): 2174-2178.
- [7] 何武灿, 廖守亿, 张作宇, 等. 空间目标可视条件与可见光特性分析 [J]. *电光与控制*, 2015, **31**(5): 97-102.
- [8] Shi Q S, Lan C Z, Xu Q, et al. Rapid Star Map Simulation Based on GPU [C]. Shanghai: International Conference on Audio Language and Image Processing (ICALIP), 2010.
- [9] 马志昊. 航天任务视景仿真中基于 OpenGL 的星空背景绘制 [C]. 长春: 第 12 届系统仿真技术及其应用学术会议, 2010.