

文章编号:1007-2780(2020)11-1177-08

空间光学相机成像仿真系统设计与实现

樊金鹏^{1,2}, 姬 琪^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:目前相机成像仿真研究存在成像模型少、覆盖不全的问题,难以满足相机在复杂观测条件下的仿真需求。因此提出一种基于卫星工具包(Satellite Tool Kit, STK)与开源场景图形(Open Scene Graph, OSG)相结合的空间光学相机成像仿真方案。使用 STK 建立被观测目标与相机的轨道参数,通过数据导入,创建被观测目标表面二维、三维景物信息;通过对多种影响模型分析研究,在 OSG 中创建影响模型,实现相机在复杂观测条件下的成像过程仿真;利用分布式技术设计系统结构,分模块完成整个仿真系统的开发。实验结果表明,该系统能为空间光学相机在复杂条件影响下的成像过程提供一个良好的仿真环境,为空间光学相机的设计、优化提供有力的数据支持。

关键词:空间光学相机;成像仿真;影响模型;数字建模;分布式系统

中图分类号:TP394.1;TH691.9 文献标识码:A doi:10.37188/YJYXS20203511.1177

Design and implementation of imaging simulation system for space optical camera

FAN Jin-peng^{1,2}, JI Qi^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: At present, the research of camera imaging simulation mostly has the problems of less imaging models and incomplete coverage, which is difficult to meet the simulation requirements of camera in complex observation conditions. Therefore, an imaging simulation scheme of space optical camera based on the combination of satellite tool kit and open scene graph was proposed. Satellite Tool Kit (STK) was used to establish the orbit parameters of the observed object and the camera, and through data import, 2D and 3D scene information of the observed object surface is created. Through the analysis and research of many influence models, the influence model is created in Open Scene Graph (OSG) to realize the camera imaging process simulation under complex observation conditions. The distributed technology was used to design the system structure and complete the development of the

收稿日期:2020-04-25;修订日期:2020-05-28.

基金项目:国家自然科学基金(No.61875190)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61875190)

* 通信联系人, E-mail: jiqi@ciomp.ac.cn

whole simulation system in modules. The experimental results show that the system can provide a good simulation environment for the imaging process of space optical camera under the influence of complex conditions, and provide powerful data support for the design and optimization of space optical camera.

Key words: space optical camera; imaging simulation; influence model; digital modeling; distributed system

1 引言

空间光学相机是一种搭载在卫星上来获取地面目标信息的相机,使用空间光学相机观测地物目标是空间观测的主要手段之一^[1-4]。提高空间光学相机的设计水平以扩展其在空间目标探索中的作用,需要做大量的仿真验证,提供数据支持。

针对特定需求,研发人员设计实现相关的仿真软件^[5-9]。已有研究提出的仿真方案有很多,如中科院空间应用研究中心设计的基于 HLA 的空间光学探测仿真系统^[10],中国科学院大学许兴星、丁雷设计的基于 OpenGL 的星载可见光相机成像仿真系统^[11],解放军信息工程大学提出的航天光学遥感成像半实物仿真系统^[12],中科院长春光机所提出的星载相机成像仿真系统^[13-14]等。上述仿真方案都实现了空间光学相机的成像过程仿真,但是由于 STK 库非开源的特性,无法通过 STK 直接添加影响模型,导致部分方案中所包含的影响模型较少,缺少像移影响、传输链路影响等影响模型,无法满足空间光学相机日益复杂的仿真需求,可扩展性较差;部分方案采用的集中式系统,面对不同需求时需要重新修改整个系统,可复用性较差。

为解决上述问题,本文设计并实现了一款基于 STK 与 OSG、包含多种成像影响模型的分布式空间光学相机成像仿真系统。系统拥有 STK 强大的环境和数据支撑。OSG 是一款开源且具有良好的跨平台兼容性的视景仿真技术。通过 OSG 可以创建偏流角、平台颤振等 STK 所不具备的影响模型,将模型加入系统之中,使系统满足空间光学相机日益复杂的成像仿真需求。由于 OSG 开源的特性,可以不断更新模型,提高系统的可扩展性。采用分布式技术使系统在面临不同需求时只需修改局部模块,提高了开发效率,使系

统具有良好的复用性。

2 仿真模块设计

2.1 仿真模拟系统设计原理

空间光学相机成像仿真系统主要通过地面软、硬件相结合的模拟方式,仿真空间光学相机在轨工作状态,包括在轨的运控过程、外部成像条件、光学成像效果、对外电子学接口、图像数据格式以及在轨的图像处理。以火星探测为例进行设计,仿真系统主要可以分为 3 个模块:(1)地物环境创建模块;(2)主控模拟模块;(3)相机光学仿真图像生成模块。整个仿真系统使用分布式结构,分模块地进行设计与实现,在提高开发效率的同时,也提升了整个系统的复用性。相比集中式系统,在后续开发过程中,只需要对某个模块单独修改就可以实现整个系统功能的修改,维护也更方便。

2.2 地物环境创建模块

地物环境创建模块的主要作用是生成火星表面三维景物信息。为实现卫星对火星表面视景的仿真模拟,将收集的火星影像与地形数据导入 STK,使用 STK 仿真的相关功能迅速准确地确定卫星在轨运行任意时刻的位置,根据相机的视场显示卫星星下点成像覆盖区域,确定光学相机成像可视区域的经纬度范围,并显示可视区域内的三维景物。图 1 所示为视景仿真流程图。

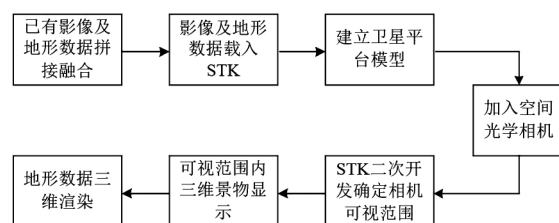


图 1 视景仿真流程图

Fig.1 Visual simulation flow chart

2.3 主控模拟模块

该主控模拟模块通过 1553B 总线接收地面任务指令,通过 RS422 总线接收卫星制导、导航与控制系统(Guidance, Navigation and Control System, GNC)广播的平台参数,进行实时的像移补偿计算,并将偏流角计算结果反馈给 GNC 平台,使其调整姿态;主控模拟模块还可以根据像移补偿计算结果,将拍摄行频、级数、增益等参数实时传递给相机光学仿真图像生成模块,通过 RS422 接口传递给相机光学仿真图像生成模块,使其根据参数输入对生成图像进行调整。

2.4 相机光学仿真图像生成模块

相机光学仿真图像生成模块的主要作用是模拟光学相机的在轨成像,将三维景物信息映射到二维的成像表面。随着 GNC 参数的变化,地物环境创建模块的场景管理驱动单元不断更新三维地景信息,模块也将实时地生成二维的虚拟光学影像。

相机光学仿真图像生成模块通过调用 STK 生成星体二维和三维图像;仿真卫星在轨运行位置及该时刻下探测器扫描区域接收主控模拟模块发送的数据。根据不同的参数,通过调用 OSG 生成实时的星体表面细节仿真图像。模块还可以调用 OSG 中不同的成像影响模型,仿真多种影响条件对相机成像效果的影响。

3 成像影响模型分析与创建

模拟的火星地表景物经过一系列的链路环节投影至探测器成像焦面。这一过程中,会受到光学、电子学、信息传输与几何成像等综合影响。如图 2 所示,对这一系列影响因素按照性质分类,分为 3 大类,将其进行仿真建模。影响模型的创建

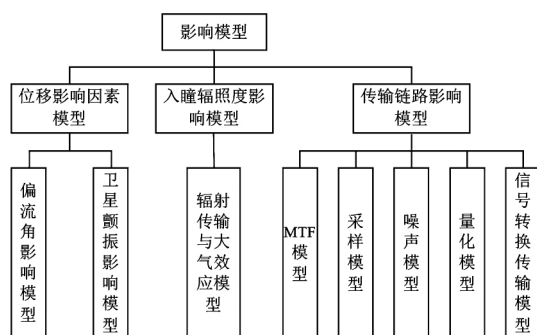


图 2 成像影响模型

Fig.2 Imaging impact model

在 OSG 中实现。利用 OSG 开源库的特性,可以自己添加不同的影响模型,使影响模型包含的面更广。后续模型的优化也可以单独在 OSG 中实现而不需要大量修改系统代码,极大地增加了系统的扩展性。

3.1 像移影响模型

卫星在宇宙空间中所受到各种复杂的力以及本身姿态调整等会造成卫星颤振^[15],同时卫星与地面存在相对运动,这些都会对卫星上的相机成像产生像移影响,需要对其影响进行建模和补偿。

3.1.1 偏流角影响模型

星球自转是偏流角产生的主要因素,设星下点的移动线速度为 v_n ,星下点地物相对卫星的移动线速度为 v_n' ,则 v_n 和 v_n' 的方向相反。考虑火星自转,令星下点地物在纬线上的线速度为 v_e 。根据矢量加法的平行四边形法则,星下点地物相对卫星线速度是 v_n' 与 v_e 的合成速度 v_{sum} 。卫星偏流角 $\beta_{p1} = \arctan(V_{acby}/V_{acbx})$,其中 $\beta_{p1} \in (-\pi/2, \pi/2)$, β_{p1} 升轨为负,降轨为正。 V_{acby} 与 V_{acbx} 是 v_{sum} 在卫星轨道坐标系上 x 轴与 y 轴的两个分量。考虑卫星偏流角 β_{p1} 造成的像移,如式(1)所示:

$$\delta_{\beta} = \frac{f}{H} v_{sum} \cdot \delta t, \quad (1)$$

式中: f 为等效焦距; H 为卫星相机距离地面目标的高度; δt 为一次成像的时间。

3.1.2 平台颤振影响模型

平台颤振影响姿态的稳定性,导致与时间相关的相对姿态误差。在轨运行时,造成平台颤振的成因很复杂,包括外部空间环境和内部机械运作两部分。

假设卫星平台颤振在 3 个姿态角方向都按一定的正弦函数变化,即在 t 时刻,平台偏航角 $\psi(\text{yaw})$ 、翻滚角 $\varphi(\text{roll})$ 、俯仰角 $\theta(\text{pitch})$ 符合公式(2)~(4):

$$\psi = A_{\psi} \sin(\omega_{\psi} t + \alpha), \quad (2)$$

$$\varphi = A_{\varphi} \sin(\omega_{\varphi} t + \gamma), \quad (3)$$

$$\theta = A_{\theta} \sin(\omega_{\theta} t + \beta). \quad (4)$$

则在 3 个方向的像移,如式(5)~(7)所示:

$$\delta_{\text{yaw}} = \Delta s \cdot \psi, \quad (5)$$

$$\delta_{\text{roll}} = f' \cdot \varphi, \quad (6)$$

$$\delta_{\text{pitch}} = f' \cdot \theta, \quad (7)$$

式中: Δs 为像点到像主点的距离; f' 为等效焦距。

3.2 入瞳辐照度影响模型

空间光学相机对火星地表景物成像的过程实际是景物反射的太阳辐射经过大气和光学系统作用后到达探测器并被接收、处理以及量化的辐射传输和光电转换的过程。而从入瞳辐亮度到数字 (Digital Number, DN) 值, 需要对大气效应、辐射传输等入瞳辐亮度影响过程进行建模。

辐射传输与大气效应模型中, 地面辐亮度由地物接受的辐照度确定。在获取地面辐亮度信号场的条件下, 入瞳辐亮度信号场主要由观测几何条件 (高度角、方位角、观测目标经纬度) 和大气条件以及大气后向散射强度共同确定。

假设地表面的反射率为 ρ_λ , 相机接收到的光谱辐射亮度如式 (8) 所示:

$$L_{\lambda, \text{sensor}} = \frac{1}{\pi} \rho_\lambda \tau_{\lambda, \text{Atm}} (F_s E_{\lambda, \text{Direct}} \cos \theta_{\text{salor}} + V_s E_{\lambda, \text{Diffuse}}), \quad (8)$$

式 (8) 中: F_s 是投射阴影系数, 坡面为阴影则 F_s 为 0, 否则为 1; V_s 为一点所接收的天空漫反射与未被遮挡的水平面而所接受的漫反射之比, 介于 0 和 1 之间; $\tau_{\lambda, \text{Atm}}$ 为上行大气透过率; $E_{\lambda, \text{Direct}}$ 为太阳光谱辐照度; $E_{\lambda, \text{Diffuse}}$ 是天空漫射光到地面的光谱辐照度。

3.3 传输链路影响模型

通过卫星传感器获取的地表景物入瞳辐照度, 在传感器内部由光子转换为二进制电子脉冲, 在电子脉冲信息传输过程中, 会面临电子学、信息学因素的影响, 对这些因素进行分析和建模^[16]。

3.3.1 MTF 模型

调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 衡量了系统对于正弦波输入的振幅响应, 主要用来分析一些特定的成像系统, 调制传递函数确定了成像系统对于目标细节的分辨本领。

MTF 本质上就是各个空间频率的正弦波影像经过成像系统后调制损失的百分比。由于实际中衍射、像差等作用的影响, 实际像的对比度会降低。遥感图像的 MTF 模拟可以看作是对成像系统介质的模拟。

由于一般的遥感系统都是空间不变线性系统, 于是系统总的 MTF 就可以通过这些子单元的 MTF 相乘得到, 表达公式如式 (9) 所示:

$$\text{MTF}_{\text{总}} = \prod_{i=1}^n \text{MTF}_i = \text{MTF}_{\text{光学}} \cdot \text{MTF}_{\text{CCD}} \cdot \text{MTF}_{\text{变焦}} \cdot \text{MTF}_{\text{电子学}}. \quad (9)$$

3.3.2 采样模型

由于使用三维数字模型模拟地面进行遥感仿真, 可采用均匀采样模型这一最基本的模型作为影像仿真中的采样模型, 均匀采样是指将一副二维连续图像 $f(x, y)$ 的图像平面在 x 方向和 y 方向进行等间距划分, 从而把二维图像平面划分成 $M \times N$ 个网格, 取网格中心点的位置作为采样结果的过程。

3.3.3 噪声模型

噪声在图像上常表现为一些引起较强视觉效果像素点或像素块。在电子网络中, 通信信道可能受到来自许多自然源的宽带高斯噪声的影响, 例如导体中原子的热噪声、散粒噪声、起伏噪声、来自太阳等天体的宇宙噪声等, 这些噪声对于影响仿真的影响, 在概率上符合高斯分布, 所以使用高斯噪声对这些扰动进行模拟。以 z 作为噪声值, 则噪声在模拟图像上的分布符合公式 (10):

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2\sigma^2}. \quad (10)$$

3.3.4 量化模型

实际地物根据地物的物理特性拥有不同的辐照度, 在传感器内部的辐射强度是一条连续的曲线。模拟图像经过采样后, 在时间和空间上离散化为像素。但采样所得的像素值仍是连续量。量化模型把现实空间场景数据的灰度数据进行了离散化操作。

3.3.5 信号转换传输模型

空间光学相机获得的地面地物几何与辐射信息, 在相机内部被编码成二进制数值, 以电子脉冲的形式进行传输和保存, 因此就会不可避免地面信号转换与传输中的误码率问题。假定误码的分布服从高斯分布, 对于影像仿真中的二进制数据流, 为添加高斯白噪声进行误码的模拟, 建立信号转换的传输模型, 如式 (11) 所示:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\bar{x})^2/2\sigma^2}. \quad (11)$$

4 仿真结果与分析

4.1 软件实现及调试

基于仿真系统需要良好的人机交互界面、好的扩展性和复用性、仿真卫星实时运行状态以及

火星表面具体细节仿真的要求,仿真系统采用分布式技术,分为 3 个模块独立进行开发。通过 Visual Studio 2017 实现系统的人机交互界面以及系统各模块间的通讯功能;使用 STK 实现地物环境创建模块中二维与三维图像信息的更新功能;使用 STK 与 OSG 实现相机光学图像仿真生成模块中对火星二维三维影像生成、卫星运行轨迹展示、火星表面具体细节生成以及仿真图像进行退化影响的功能。软件的整体实现框图以及功能如图 3 所示。

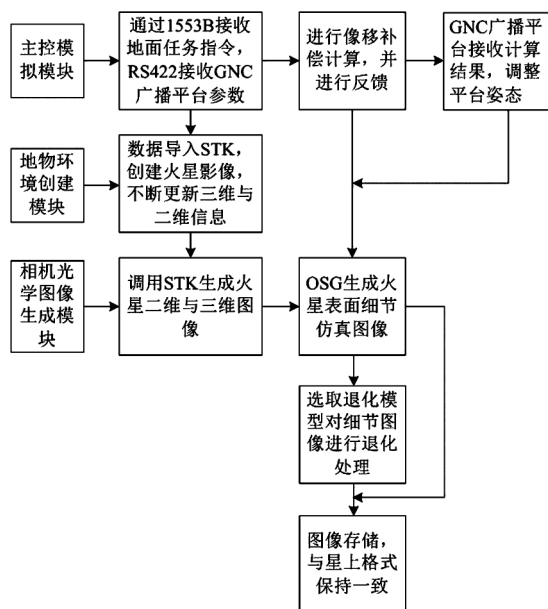


图 3 软件实现框图

Fig.3 Block diagram of software realization

软件的系统调试使用 3 台设备进行仿真验证。如图 4 所示,最左边的是地检设备,用于发送指令;中间是主控模拟模块,用于接收地检平台发

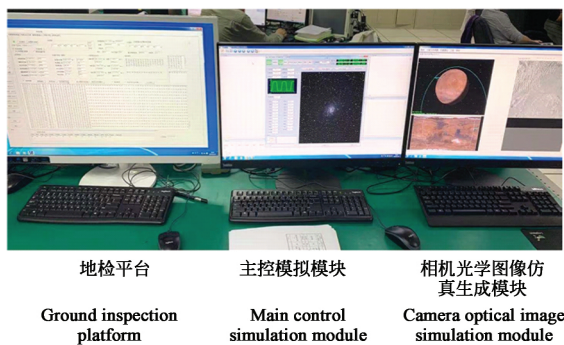


图 4 仿真软件系统调试

Fig.4 Debugging of simulation software system

送的指令,并转发数据给相机光学仿真图像生成模块;最右侧是相机光学仿真图像生成模块,模块接收轨道参数及控制命令后,根据接收到的信息实时生成星下点对应的图像,在模块中进行展示。

4.2 仿真实验结果

图 5 是主控模拟模块,可以控制 1553B、RS422 总线以及网络通讯的开关状态。通过 1553B 接收地检平台发送的指令,通过 RS422 总线接收 GNC 平台广播的参数,进行实时像移补偿计算,并将偏流角的计算结果反馈给 GNC 平台,使其调整参数。主控模拟模块还可以将像移补偿参数(如行频、级数、增益等调光参数)通过 RS422 总线传递给相机光学仿真图像生成模块,使其调整生成的图像。

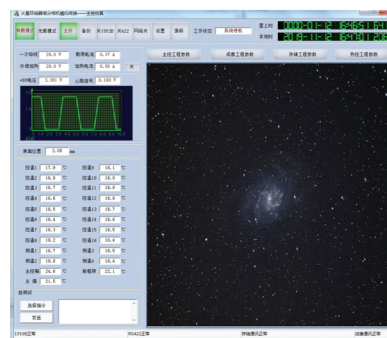


图 5 主控模拟模块

Fig.5 Master simulation module

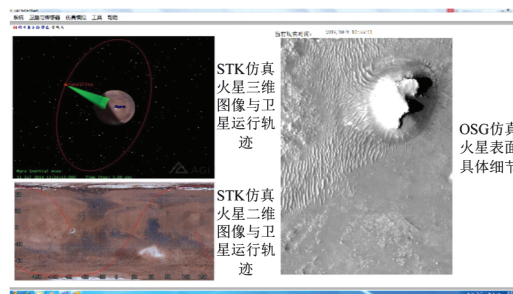


图 6 仿真成像软件效果

Fig.6 Simulation imaging software effect

图 6 是相机光学仿真图像生成模块效果图。STK 使系统具有仿真火星表面二维、三维图形、卫星实时运行轨迹以及传感器推扫区域的功能。图中左上角位置是火星表面三维图形,红线是卫星的绕火星运行轨道,绿色区域是该时刻卫星传感器推扫到的地点;左下角是火星表面二维图形,图中的红线是卫星在火星轨道的运行轨迹。右侧

图像是 OSG 中进行建模渲染的火星表面具体细节,使用 OSG 预先创建丰富的成像影响模型,仿真复杂的影响因素对成像过程的影响。随着左侧二维、三维图像中卫星的运动,右侧 OSG 生成的火星表面细节也会发生变化,生成新的仿真图像,实现了空间光学相机在轨运行工作状态的仿真。图 7 是不同时刻仿真产生的图像结果。

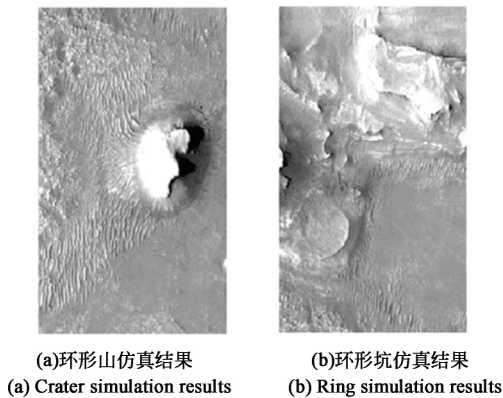


图 7 不同时刻仿真生成结果

Fig.7 Simulation results at different moments

4.3 部分成像影响模型效果

相机光学仿真图像生成模块中可以对仿真生成的图像选择添加退化模型。通过在软件中选取影响模型,调用 OSG 中封装的相对应的成像影响模型,对生成的图像添加相对应的退化模型。图 8 左图是未添加退化模型的原图,右图是添加退化模型之后的仿真结果。图 9 左侧是添加偏流角为 30° 的像移影响模型之后的仿真结果,添加像移影响之后出现了一个运动的模糊,右侧是像

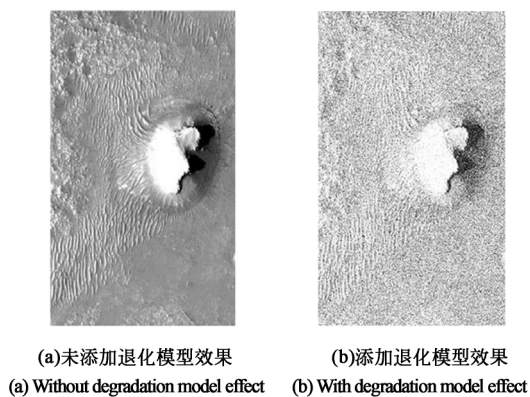


图 8 原图与添加退化模型效果对比

Fig.8 Comparison of the original image and the image adding a degradation model

移补偿之后的结果。图 10 是不同太阳高度角对成像效果的影响结果,左图是太阳高度角为 30° 时的影响效果,右图是太阳高度角为 50° 时的影响效果,太阳高度角低时,图像更暗,高度角高时图像较亮。多种仿真影响模型可以满足空间光学相机实际在轨工作所遇到的复杂情况。

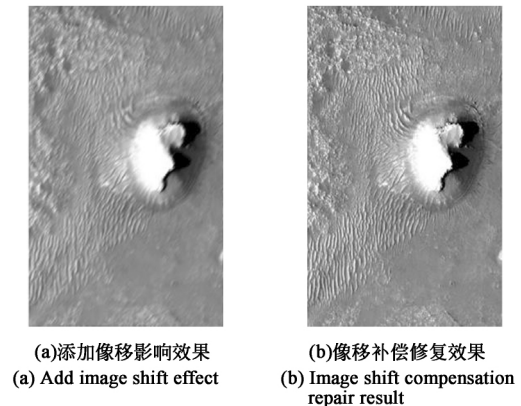


图 9 像移对图像像质的影响

Fig.9 Influence of image shift on image quality

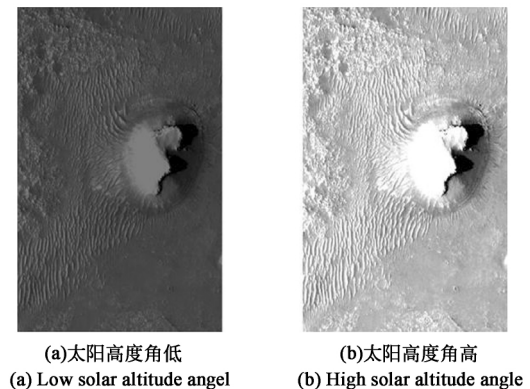


图 10 不同太阳高度角对成像效果影响

Fig.10 Influence of different solar altitude angle on imaging effect

5 结 论

本文针对空间光学相机日益复杂的地面仿真测试需求,对多种成像影响模型进行了研究,开发了基于 STK 与 OSG 的分布式空间光学相机成像仿真系统。多种图像退化模型可以满足复杂条件下相机的成像效果仿真;OSG 开源库的使用使得系统拥有良好的可扩展性;分布式技术的采用使系统拥有良好的复用性。通过实际火星探测项目

应用,证明了该系统可以为空间光学相机地面验证提供一个良好的仿真环境,为空间光学相机的设计优化提供一定的参考。下一步将结合光学仿

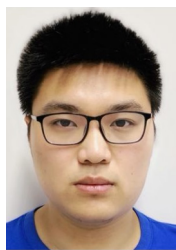
真软件,更准确地分析整个光学系统的调制传递函数,建立更加精确的影响模型。

参 考 文 献:

- [1] 胡君,王栋,孙天宇.现代航天光学成像传感器的应用与发展[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(6):519-533.
HU J, WANG D, SUN T Y. Application and development of recent space optical imaging remote sensors [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(6): 519-533. (in Chinese)
- [2] 贾平,张葆.航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. 光学精密工程,2003,11(1):82-88.
JIA P, ZHANG B. Critical technologies and their development for airborne opto-electronic reconnaissance platforms [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 82-88. (in Chinese)
- [3] 王慧,刘薇,于建冬,等.航天光学相机几何参数星上监测技术[J]. 光子学报,2018,47(10):1012001.
WANG H, LIU W, YU J D, et al. Geometric parameters monitoring technology for space optical camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(10): 1012001. (in Chinese)
- [4] 杨永彬.空间光学相机调焦技术研究[J]. 航天器工程,2011,20(2):20-24.
YANG Y B. Study on focusing technique for space optical camera [J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(2): 20-24. (in Chinese)
- [5] 王战,韩诚山,黄良,等.航天相机 1553B 总线仿真测试软件设计[J]. 计算机应用,2015,35(S1):199-202.
WANG Z, HAN C S, HUANG L, et al. Design of simulation software for 1553 B bus of aerospace camera [J]. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(S1): 199-202. (in Chinese)
- [6] 许志涛,龙科慧,刘金国,等.空间相机调焦机构精度检测系统设计[J]. 液晶与显示,2013,28(6):943-947.
XU Z T, LONG K H, LIU J G, et al. Design of focusing mechanism accuracy detection system of space camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(6): 943-947. (in Chinese)
- [7] 张敏,金龙旭,李国宁,等.基于 TDICCD 空间相机图像模拟源系统设计[J]. 液晶与显示,2016,31(2):208-214.
ZHANG M, JIN L X, LI G N, et al. Design of image simulation system of TDICCD space camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(2): 208-214. (in Chinese)
- [8] 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.
CHENG J, ZHANG W, BAO W Z, et al. Design and implementation of digital simulation system for detecting image of orbiting optical camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(9): 2136-2144. (in Chinese)
- [9] 曹小涛,徐抒岩,赵运隆.空间相机连续调焦地面仿真测试系统设计[J]. 液晶与显示,2011,26(3):409-412.
CAO X T, XU S Y, ZHAO Y L. Design of simulation and detection system for space camera continuous focus adjustment system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 409-412. (in Chinese)
- [10] 冯蕊,孟新,潘忠石,等.基于 HLA 的空间光学探测仿真系统设计[J]. 计算机工程与设计,2010,31(6):1335-1338.
FENG R, MENG X, PAN Z S, et al. Development of space optical detection simulation system based on HLA [J]. *Computer Engineering and Design*, 2010, 31(6): 1335-1338. (in Chinese)
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] 张欣光,刘芸,唐硕,等.基于 STK 的卫星视景仿真软件的设计与实现[J]. 飞行器测控学报,2011,30(4):73-76.
ZHANG X G, LIU Y, TANG S, et al. Design and realization of STK-Based visualization simulation software for satellites [J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2011, 30(4): 73-76. (in Chinese)
- [13] 李明譔,江刚武,张锐,等.航天光学遥感成像半实物仿真系统研究[J]. 激光与红外,2017,47(5):617-623.
LI M Y, JIANG G W, ZHANG R, et al. Research on HIL simulation system for space optical remote sensing imaging [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(5): 617-623. (in Chinese)
- [14] 张刘,孙秋香,金光.星载 TDI CCD 相机成像仿真系统的实现[J]. 空间科学学报,2010,30(1):91-96.

- ZHANG L, SUN Q X, JIN G. Development of TDI CCD camera image simulator [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2010, 30(1): 91-96. (in Chinese)
- [15] 王战. 颤振对星载 TDICCD 相机成像质量的影响分析 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- WANG Z. Platform jitter effect on image quality of spaceborne TDICCD camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [16] 阮宁娟, 庄绪霞, 李妥妥, 等. 空间光学遥感系统全链路仿真与分析 [J]. *航天返回与遥感*, 2013, 34(6): 36-43.
- RUAN N J, ZHUANG X X, LI T T, *et al.* End to end simulation and analysis of space optical remote sensing system [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(6): 36-43. (in Chinese)

作者简介:



樊金鹏(1993—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,2016年于天津大学获得学士学位,主要从事计算机仿真技术方面的研究。E-mail: 1224840587@qq.com



姬 琪(1978—),男,山西太原人,硕士,副研究员,2007年于中国科学院研究生院获得硕士学位,主要从事计算机仿真技术、光电设备精密检测及仿真技术方面的研究。E-mail: jiqi@ciomp.ac.cn