

地基光学望远镜对目标飞行器成像的仿真与验证

韩 意, 陈 明, 谢剑锋, 段成林

(北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

摘 要: 以目标飞行器地基光学观测与姿态监测需求为背景, 研究了地基光学望远镜成像仿真模型与方法, 通过目标建模、轨道确定和光学成像建模, 结合目标表面材质光散射特性和望远镜成像性能, 基于 OpenGL(Open Graphics Library) 仿真生成目标飞行器在轨飞行光学图像序列。根据理论分析比对、第三方仿真软件 STK(Satellite Tool Kit) 比对、实测光学图像序列比对多种途径, 验证了仿真方法和结果的正确性。可为目标飞行器观测任务制定与在轨姿态监控、空间目标姿态判别和目标识别提供参考和依据。

关键词: 仿真验证; 空间目标监视

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.1214002

Simulation & validation of ground-based optical-telescope imaging on target craft

Han Yi, Chen Ming, Xie Jianfeng, Duan Chenglin

(Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at the target craft's ground-based optical observation and attitude surveillance mission, the imaging simulation model and method of ground-based optical-telescope was studied. Based on complex target 3D modeling, orbit determination and optical imaging chain modeling, combining with the scattering characteristics of surface material properties and the imaging performance of telescope, the target craft's optical image sequences were simulated by utilizing Open Graphics Library (OpenGL). By comparing with theoretical analysis, the field of view images of Satellite Tool Kit(STK) sensor and actual observation images, the simulation method and results were proved to be effective and credible. This research can provide references for the observation mission plan of target craft, on-orbit attitude and exterior inspection, as well as the space target attitude recognition and target identification.

Key words: simulation validation; space target surveillance

收稿日期: 2019-08-11; 修订日期: 2019-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(11373013)

作者简介: 韩意(1986-), 男, 工程师, 博士, 主要从事轨道计算与目标分析方面的研究。Email: hanyuxuan.han@163.com

0 引言

随着自适应光学技术的发展和口径地基望远镜成像性能的提高,地基光学系统对空间目标的成像质量可以满足更高的跟踪监测需求^[1]。天宫一号、天宫二号等载人航天工程任务中的目标飞行器在轨飞行期间,地面测站可以根据下传遥测姿态参数判断飞行器在轨姿态,同时可以依靠地基大口径自适应光学望远镜等设备来对其进行跟踪和成像,在获得较高分辨率图像的情况下,观测舱体、太阳能帆板等部件的工作状态,基于实测光学图像反演其飞行姿态角,与下传遥测姿态参数进行比对复核,从而及时可靠地监测其在轨运行健康状况,直接为航天活动提供直观、丰富的信息支撑^[2]。此外,基于光学图像反演和判断其他非合作目标的三维姿态,也是空间目标探测与识别的重要内容之一,可广泛用于目标分类识别、任务状态评估、目标有效载荷指向判定和异常行为监测等方面。

由于地理位置、光照条件、气象条件等因素的限制,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,目标姿态判别与目标识别算法开发缺少充足的图像数据源。因此开展地基光学成像仿真模型与方法研究对于目标姿态分析与监测具有重要的应用价值,可为研究人员提供有效的分析工具和观察数据交互影响的途径,为相关关键技术验证提供必要数据源,已成为热点研究问题之一^[3]。美国在光学成像仿真领域取得了显著成果,已经形成了系统化和商业化的仿真软件,如 TASAT (Time-domain Analysis Simulation for Advanced Tracking)、SVST (Satellite Visualization and Signature Tool) 和 STK EOIR (Electro-Optical Infrared Sensor Model) 光电红外模块等,在空间目标跟踪、监视与识别中发挥了重要的预测和评估作用。国内有关单位也积极开展相关研究工作,设计和实现了光学成像仿真软件^[4]。根据实测光学图像进行比对和评估,是检验仿真正确性的有效解决途径,但由于实际条件限制,仿真方法与结果缺少必要的复核与验证。

文中以目标飞行器地基光学观测与姿态监测需求为背景,研究了地基光学成像仿真模型与方法,开

发了仿真软件,通过目标建模、精密定轨和光学成像建模,考虑飞行器姿态、位置、光学望远镜位置和性能参数、太阳入射角、大气湍流等因素的影响,仿真生成目标在轨飞行光学图像序列。根据理论分析比对、第三方仿真软件卫星仿真工具包 STK 比对、实测光学图像序列的比对等多种途径,验证了该仿真方法和结果的正确性。

与国内外相关仿真软件相比,文中开发的工具软件拥有自主知识产权并经过了实测数据验证,重点针对国内大型航天器,目标三维模型与材质模型的精细化程度更高,具有一定的实用价值,后续将根据实际需求进行功能扩展和升级。使用文中方法可以预先演示望远镜计划跟踪弧段内目标飞行器的成像效果,为观测任务计划安排和目标在轨姿态监控发挥辅助参考作用;并且能够开展其他类型空间目标的动态光学成像仿真试验,模拟目标飞行过程中距离、姿态以及光照对成像效果的影响,有助于姿态判别算法和目标识别算法的开发与验证。

1 建模与算法实现

在满足天光地影的条件下,地基光学望远镜系统才能观测目标,所获取的飞行器图像的关键内容或特征包括图像大小、分辨率、飞行器成像的大小、姿态、可见部位及像素灰度、图像噪声和模糊度等。成像仿真目的就是综合利用三维建模技术、计算机仿真技术和图像处理技术等,考虑目标运动、太阳光照和大气效应等因素,根据成像系统性能数学模型模拟出这些关键特征,生成高逼真度的图像^[5]。

光学成像系统的几何成像模型、目标与测站的相对几何关系,决定了图像大小、目标姿态及所占像素数目;太阳光照情况、目标表面材料的光学散射特性和望远镜成像性能,决定了图像中目标各部位像素的灰度值、噪声和模糊度等。

影响地基光学成像的环节主要有四个方面:目标、光学望远镜、大气、太阳。要因素包括目标位置姿态、表面材质反射特性、观测设备的位置、成像系统性能参数(如像元尺寸、焦距、口径等)、太阳光照角度、大气湍流等。大气对光学成像的影响主要是大气衰减效应和大气湍流效应,大气衰减导致到达光学

系统焦平面处的目标散射光能量减少;大气湍流对目标成像的影响比较复杂,会导致目标成像模糊。实际观测中大气衰减与湍流模型与测站位置、当时气象条件有关。自适应光学望远镜能够有效克服和补偿大气湍流影响,通过波前探测器实时测量成像系统入瞳面波前误差,并据此控制镜面形变,对畸变波前进行实时补偿以校正大气,生成接近于衍射极限的高分辨率图像。

地基光学成像仿真需要综合考虑目标与望远镜相对运动、目标光学特性、望远镜成像性能和跟踪性能等多种因素的影响,主要研究内容包括:

(1) 目标三维建模,建立精细、准确的目标三维几何模型、材质表面散射特性模型^[6];

(2) 轨道动力学计算,获得成像时刻目标的位置、距离和姿态信息,计算地球、太阳、飞行器和望远镜之间的相对几何关系,输出指定时刻目标飞行器的位置、速度参数;

(3) 几何成像建模,即模拟出图像的大小、分辨率以及目标在图像中的大小和姿态,以及太阳光照情况对目标可见光成像结果的影响;

(4) 模糊和噪声效果建模,即模拟出大气湍流效应、成像系统调制传递函数特性、目标相对运动等因素造成的图像模糊效果以及噪声效果。

开放式图形库 OpenGL 是开发二维和三维图形应用程序的最佳环境之一,其透视投影成像原理与光电成像系统的针孔成像模型相类似。二者都可以用矩阵表示成像变换过程,通过模型变换、透视变换和仿射变换等过程将三维物体显示为二维图像,转换矩阵在形式是一致的^[7]。根据成像相对几何关系和望远镜参数设置 OpenGL 中的有关参数,能够实现成像效果模拟,也即几何成像仿真。生成的图像中目标大小、姿态准确,能够体现不同的望远镜参数、目标姿态和距离等因素对成像结果的影响^[8],但目标像素灰度值、图像噪声和模糊度还需要根据光照条件、表面材质特性和成像性能对图像进行进一步处理,最终生成高逼真的仿真图像。

文中基于 OpenGL 的透视投影成像模型开发了成像仿真软件,建立含有材质信息的 3ds 格式三维模型,采用双向反射分布函数 BRDF(Bi-directional Reflectance Distribution Function)描述材质的光学

散射特性,通过轨道确定获得不同时刻的飞行器位置、速度参数以及太阳、望远镜位置参数,采用像素面元法分析复杂面目标对太阳光的反射特性,分析各相关环节的信号响应特性、空间频率传递特性和噪声特性,能够仿真出地基望远镜观测弧段内的光学图像序列,提高了仿真的可信度和准确度。

1.1 目标特性建模

目标特性建模主要包括三维建模、材质光学散射特性建模和运动特性建模等方面内容。

目标飞行器三维模型文件是成像仿真的前提和基础,其所表征的几何外形、结构和表面材质等信息,对于计算的准确性和计算资源需求有很大影响。需要对目标进行精细化数字建模,使用三维建模软件进行编辑和处理,分为舱体、太阳帆板、天线等多个模型文件,使用不同材质来区别目标表面不同的材料,使其满足成像仿真的需求^[9]。

目标飞行器从结构上分为舱体、太阳能电池板、天线、有效载荷等部分,表面材料主要有结构材料、热控涂层、多层隔热材料和太阳电池等,需要对这些材料的光学散射特性进行具体分析。早期研究通常将空间目标表面视为漫反射朗伯面,与实际情况相差较大,目前常采用材质的 BRDF 来表征,虽然计算比较复杂,但更为准确^[10]。通过对常用的 BRDF 模型进行变换使其能够符合 BRDF 的物理特性,从而准确描述表面材料的散射特性^[11]。实际计算时,一方面可以通过测量和处理获得不同材料的可见光波段内平均 BRDF 模型参数,另一方面可以根据实测光学图像中目标不同部位的灰度值进行参数反演^[12]。使用文中的仿真方法能够计算 BRDF 模型表达式中的各个角度变量,因此也可便捷地使用其他形式的模型进行试算,有利于开展目标材料散射特性仿真分析和验证。

光学成像的天光地影条件主要由太阳、地球、望远镜、目标飞行器之间的相对几何关系决定。文中主要使用 J2000 地心平赤道惯性坐标系、RTN 坐标系、飞行器本体坐标系来计算和描述目标的位置、速度、姿态,使用俯仰角 α 、偏航角 β 、滚动角 γ 和太阳帆板转角 θ 描述目标姿态角。如图 1 所示,目标本体坐标系 $o-xyz$ 在三轴对地飞行时与 RTN 坐标系重合。

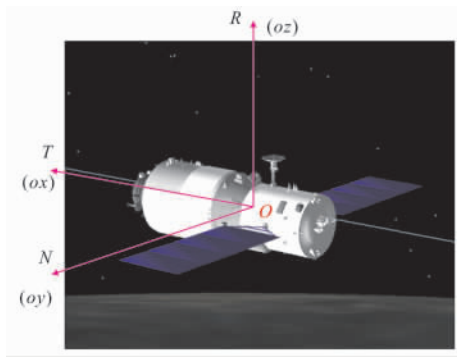


图 1 飞行器本体坐标系示意图

Fig.1 Schematic diagram of the craft body coordinate system

通过对雷达测量数据、统一 S 波段外测数据、全球导航卫星系统测量数据等各类型测轨数据进行误差修正和处理、编辑后,进行初始轨道确定和轨道改进,计算过去、当前或未来一段时间内飞行器的星历数据,结合飞行器姿态控制方案和遥测姿态参数,为成像仿真提供准确的相对几何关系参数,包括 J2000 地心惯性系下太阳、望远镜的位置坐标和飞行器的位置、速度以及姿态角等参数^[4]。

定轨过程中考虑的摄动力影响主要包括地球质点摄动、非球形引力摄动、大气阻力摄动、日月引力摄动等。测量数据较多时可使用多圈数据进行长弧段精密定轨,并同时求解出重要摄动模型参数和测量系统误差^[13]。在定轨基础上,可以建立三维可视化场景,动态演示飞行器、望远镜、太阳之间随时间变化的空间位置关系,判断是否满足几何可见条件,从而根据相关参数进行动态成像仿真,有助于理解和掌握望远镜成像效果的整体变化趋势。

1.2 光学成像建模

自适应光学望远镜系统结构比较精密、复杂,需要光学、电控、机械和软件等诸多领域的紧密配合,实际望远镜成像光路的精细计算也十分复杂。由于根据线性滤波理论,光电成像系统可认为由一系列具有一定频率特性(空间或时间)的分系统组合而成^[14]。为便于分析,文中简化望远镜的复杂成像模型,基于小孔成像模型进行仿真,研究目标可见光散射特性及成像情况,建立光学成像链数学模型,重点研究目标反射光能量在各环节的传递情况,以及光学系统、成像探测器 CCD (Charge Coupled Device)和相对运动等环节的信号响应特性、空间频

率传递特性和噪声特性,根据某一时刻的设置参数,分别显示输出目标几何图像、目标在观测方向上的辐亮度图像和最终的传感器输出图像,各类型图像说明如下。

(1) 几何图像: 根据目标和望远镜参数仿真生成,显示了目标像的大小和像素位置,目标所占像素的灰度值需进一步处理;(2) 辐亮度图像: 根据太阳光照方向、辐照度和目标表面材质,生成的目标在观测方向上的辐亮度图像;(3) 传感器图像: 根据成像的能量响应模型、空间频率响应模型和噪声模型,生成含有噪声和模糊效果的传感器输出图像。

成像链路主要包括目标反射太阳辐射、大气环境、目标运动、接收光学系统、像探测器等环节。太阳、目标飞行器与望远镜系统之间的几何关系如图 2 所示。设目标表面由大量的微小面元组成,面元 T_{mn} 经成像系统成像后对应于目标图像上单个像元 P_{mn} , 其中 m, n 分别表示图像第 m 行第 n 列。

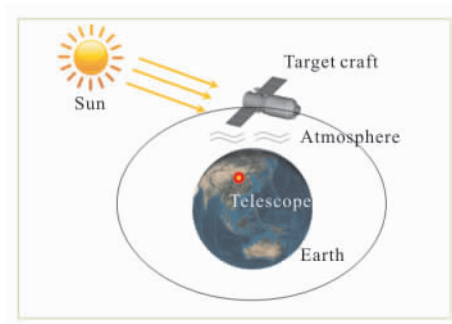


图 2 太阳、目标与望远镜间的光照几何关系

Fig.2 Lighting geometric relationship between the sun, target and telescope

目标表面某一面元 T_{mn} 的光照几何关系如图 3 所示。设 S_{mn} 对可见光波段太阳辐射的平均 BRDF 为 f_{rmn} , 单位法矢为 \vec{n} , T_{mn} 至太阳的单位矢量为 \vec{L} , 至

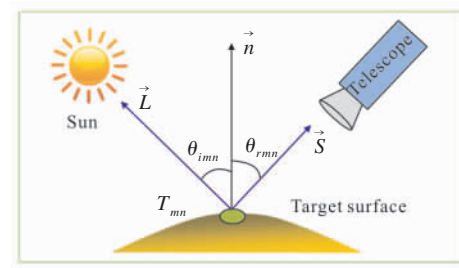


图 3 目标面元 T_{mn} 的光照几何关系

Fig.3 Lighting geometric relationship of target surface T_{mn}

望远镜的单位矢量为 \vec{S} 。 \vec{n} 与 \vec{L} 的夹角为 θ_{imn} ，与 \vec{S} 的夹角为 θ_{rmn} 。

复杂目标表面无法用解析的数学表达式来描述。文中通过采用目标像元法将目标表面的面元与系统所成的目标图像上的像元对应起来，从目标的几何成像结果出发，以目标像元为基本计算单元，分别计算像元 P_{mn} 对应的目标面元 T_{mn} 的辐射亮度 L_{mn} 、对应的 CCD 像元接收到的可见光辐射照度 E_{mn} 、产生的信号电子数到最后量化后的灰度值 I 。

根据 BRDF 的定义式，可知 T_{mn} 在 \vec{S} 方向上可见光波段范围内的辐射亮度 L_{mn} 为：

$$L_{mn} = M_{sun} R_s^2 f_{rmn}(\theta_{imn}, \theta_{rmn}) \cos \theta_{imn} / R_0^2 \quad (1)$$

式中： M_{sun} 为太阳在可见光波段内的辐射出射度； R_s 为太阳半径； R_0 为目标距太阳的距离。计算每个可见面元的 L_{mn} ，即可生成目标的辐射亮度图像。

经接收光学系统到达 CCD 像元 P_{mn} 处的为 E_{mn} ：

$$E_{mn} = \frac{\pi \tau_o \tau_a D^2}{4f^2 + D^2} \cdot L_{mn} \quad (2)$$

式中： f 为光学系统焦距； D 为入射光瞳直径； τ_o 为光学系统透过率； τ_a 为大气透过率，与气象条件有关。

CCD 通过光电转换效应将曝光时间 t 内的入射光辐射信号 E_{mn} 转换为电信号。设满阱电荷对应的图像灰度值为 255，则像元 P_{mn} 的灰度值 I_{mn} 的表达式为：

$$I_{mn} = \text{INT} \left[\frac{AE_{mn}t}{e} \cdot \eta_c \cdot G_c \cdot \frac{255}{n_f} \right] \quad (3)$$

式中： INT 表示取整函数； e 为单个电子能量； η_c 为 CCD 量子效率； G_c 为 CCD 增益； n_f 为 CCD 满阱电荷数； A 为 CCD 像元面积。

文中采用调制传递函数 MTF (Modulation Transfer Function) 分析空间频率响应特性。整个成像链路的 MTF 为大气湍流效应的 MTF_a 、接收光学系统的 MTF_o 、像探测器 MTF_c 和相对运动的 MTF_m 的乘积^[15]，如公式(4)所示：

$$\text{MTF}_s = \text{MTF}_a \cdot \text{MTF}_o \cdot \text{MTF}_c \cdot \text{MTF}_m \quad (4)$$

大气湍流效应的传递函数为^[16]：

$$\text{MTF} = \exp[-57.53 \rho^{5/3} C_n^2 \lambda^{-1/3} R] \quad (5)$$

式中： ρ 为空间频率； C_n^2 为大气折射率常数，通常采用经验模型计算； λ 为波长； R 为目标距离。

光学系统传递函数的主要影响因素是衍射和像差，设 MTF_1 、 MTF_2 、 MTF_3 分别为衍射限系统、非衍射限系统和装配制造误差的传递函数，则有：

$$\text{MTF}_o = \text{MTF}_1 \cdot \text{MTF}_2 \cdot \text{MTF}_3 \quad (6)$$

由于像探测器积分时间较短，目标相对于望远镜的运动可视为匀线性直线运动，基于几何比例关系，在积分时间 t 内目标相对运动产生的像移量为 $\sigma_m = fvt/R$ ，其中 v 为相对运动速度。相对运动产生的 MTF 如下所示：

$$\text{MTF}_m(\rho) = \text{sinc}(\pi \rho \sigma_m) \quad (7)$$

像探测器的传递函数与像元的几何尺寸有关，设单个像元边长为 a ，则 MTF_c 为：

$$\text{MTF}_c = \frac{\sin^2(\frac{\pi \rho a}{2})}{\pi^2 \rho^2 a^2} \quad (8)$$

望远镜成像过程中的有多种噪声，随着工艺水平不断提高以及通过信号处理手段，可以忽略大部分噪声的影响，需要考虑的探测器噪声主要有光子噪声 n_o 、暗电流噪声 n_d 、读出噪声 n_r 和量化噪声 n_a 四类，噪声的表达式如下：

$$\text{Noise} = \sqrt{n_o^2 + n_d^2 + n_r^2 + n_a^2} \quad (9)$$

成像视场内的恒星辐照会造成图像的深空背景噪声，采用恒星星等数据库进行恒星光能量传递的计算。视场内星等为 s 恒星的在接收光学系统入瞳处产生的辐照度如下所示：

$$E_s = 2.512^{-s} \tau_a \tau_o E_0 \quad (10)$$

式中： E_0 为 0 等星的辐照度。

2 仿真流程

完成目标三维建模并通过轨道确定获得目标星历后，目标飞行器的成像仿真流程如图 4 所示。

(1) 读取含有材质信息的目标飞行器 3ds 模型文件，根据目标位置和姿态、成像系统参数，在 OpenGL 采用透视投影模式确定视点和目标位置，根据目标姿态角依次绘制舱体、太阳电池板和通信天线，根据太阳位置设置场景中光源的位置，光源类型为平行光，生成目标的几何图像。由于目标三

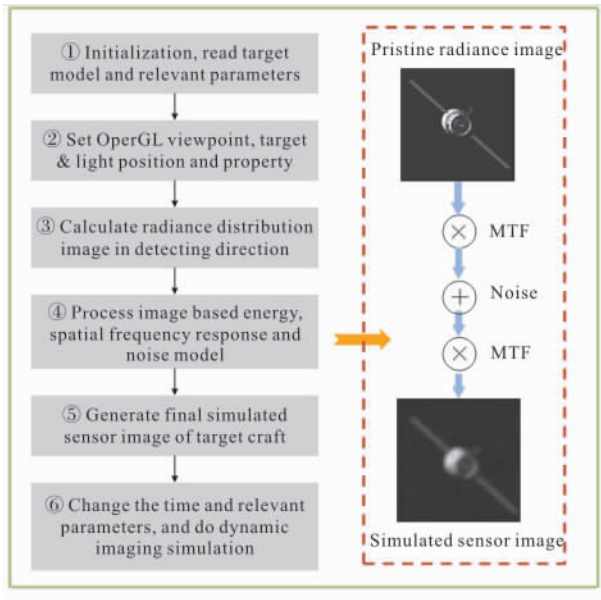


图 4 可见光成像仿真流程图

Fig.4 Schematic diagram of visible light imaging simulation process

建模时是在目标本体坐标系下进行的,因此绘制和显示三维模型的过程中需要正确处理观测坐标系、目标本体坐标系和图像坐标系之间的变换关系,如图 5 所示,需要根据望远镜位置、目标位置和姿态调用函数 `glTranslate` 产生平移矩阵 T 、调用函数 `glRotate` 产生旋转矩阵 P ,从而确定图像坐标系相对于地心坐标系的方位;然后调用函数 `glFrustum` 确定投影成像范围,最后使用函数 `glViewport` 设置屏幕显示区域的大小,建立投影变换后的坐标与屏幕像素之间的对应关系。

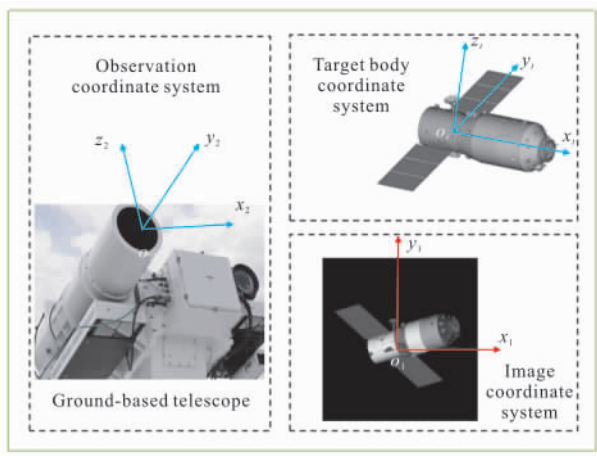


图 5 三类坐标系示意图

Fig.5 Three types of coordinate system diagram

(2) 生成目标辐射亮度图像。由于目标飞行器结构的复杂性,计算时不仅要考虑目标面元能否被太阳光照射到,还要判断面元之间是否被遮挡,过程比较复杂。由于在 OpenGL 的深度缓存中存储了每个像素与视点之间的深度值,因此在旋转和平移变换绘制目标后,启用深度缓冲区进行深度测试和处理,从而完成目标的消隐和可见部位的快速计算与显示。通过设置合适的光源模型参数,读取光照渲染处理后的帧缓存中的像素面元颜色值,计算各面元所代表材质的种类、面元法向矢量以及各有关角度参数,进而生成目标辐射亮度图像 L 。

(3) 根据光学系统和 CCD 的整体能量传递特性和空间频率传递特性(各环节的调制传递函数 MTF)以及噪声模型,对目标辐射亮度图像进行处理和变换,生成最终的传感器输出图像。

(4) 完成上述某一时刻的成像仿真后,通过改变目标飞行器位置、姿态、太阳位置和望远镜位置及指向等随时间变化的参数值,即可进行动态光学成像仿真试验,生成指定时间间隔的目标图像序列,用于后续处理和分析。

3 仿真比对验证

为验证文中成像仿真方法的正确性与有效性,开展了理论分析比对、第三方软件比对和实测图像比对,分析中均假设目标位于望远镜视场中心。

3.1 理论分析比对

通过理论计算不同形状和尺寸的简单目标(长方体、球体、圆柱体等)所占的像素数目,然后与仿真的几何图像中目标所占像素数进行比对,验证了基于 OpenGL 的几何成像仿真方法的准确性。

设成像系统探测器 CCD 为正方形,单个像元尺寸为 d ,像元数目为 $N_1 \times N_1$,光学系统焦距为 f ,目标在垂直于视轴方向平面上的投影面积为 S ,距离为 R ,根据光学成像几何关系,可得目标在焦平面的上所像素个数的理论值 N_t 近似为:

$$N_t = \text{Int}[(sf^2)/(d^2 R^2)] \quad (11)$$

式中: $\text{Int}[\cdot]$ 表示取整函数。使用文中方法生成的几何仿真图像中目标所占像素数目为 N_s ,则二者间的绝对误差 $\delta = |N_t - N_s|$,相对误差 $\epsilon = |N_t - N_s|/N_t$ 。

在像元尺寸 d 为 $10\ \mu\text{m}$ 、焦距 f 为 $1.8\ \text{m}$ 、像元数目 $1\ 000 \times 1\ 000$ 、 R 取值 $20 \sim 200\ \text{km}$ 的情况下,对于半径为 $5\ \text{m}$ 的球体目标, N_t 和 N_s 随距离变化曲线如图 6(a) 所示, 相对误差 δ 和绝对误差 ε 如图 6(b) 所示。

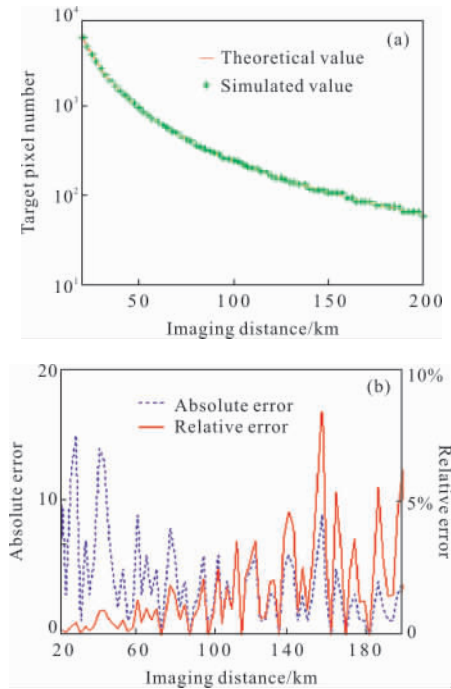


图 6 球体成像像素数目的理论值与仿真值对比

Fig.6 Comparisons between theoretical number and simulated number of the sphere target's imaging pixels

从图 6 可以看出, 目标像素数的绝对误差最大值约为 15 个像素 (此时目标像约占 2 000 个像素), 相对误差小于 10%; 目标距离越远, 绝对误差越小。改变目标形状与尺寸参数, 可得到类似的对比结果。仿真值 N_s 与理论值 N_t 存在偏差的原因, 一方面是由于 OpenGL 显示三维物体时存在着把连续的曲面进行离散化显示的问题; 另一方面因为 CCD 是离散器件, N_t 与实际值也存在差异。总体而言, 经过对比, 表明使用文中仿真方法生成的几何图像中目标的大小是准确、合理的。

3.2 第三方软件比对

美国的卫星仿真工具包 STK 是航空航天领域常用的分析和仿真软件, 虽然不具备对用户自主建模的空间目标的光学成像仿真功能, 但在 STK 中可以为地面测站添加 Sensor 传感器对象, 使其指向目

标, 通过手动设置和控制三维场景的观察视角及目标姿态参数, 可以在三维显示区域显示出传感器视场中的目标姿态, 该姿态与地面测站望远镜所“看到”的目标姿态一致。因此, 通过比对某一时刻 Sensor 传感器视场中的目标姿态与仿真图像中的目标姿态是否一致, 可以验证成像仿真的正确性。

如图 7 所示, 显示了望远镜位置、某成像弧段目标飞行器的起点和末点位置以及飞行轨迹。

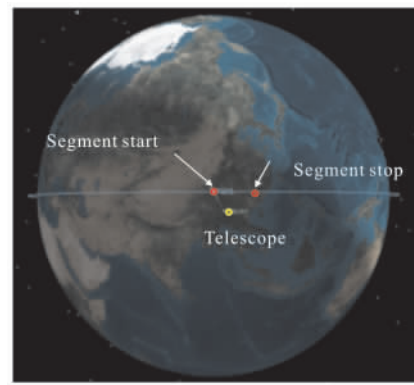


图 7 目标、望远镜与地球之间的相对几何关系

Fig.7 Geometric relationship between the target, telescope and earth

飞行器为三轴对地正飞姿态, 在弧段起点 STK Sensor 视场中的目标姿态与仿真软件生成的图像分别如图 8(a)、(b) 所示, 弧段末点 STK 目标姿态与仿真图像分别如图 8(c)、(d) 所示。

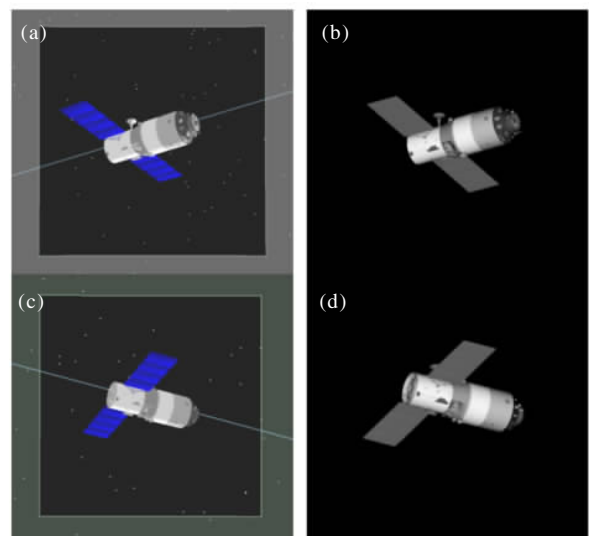


图 8 STK Sensor 视场中的目标姿态与仿真图像比对

Fig.8 Comparisons between target attitudes in STK Sensor and simulated images

从图 8 可以看出,STK Sensor 视场中目标姿态与仿真图像中的目标姿态一致,表明文中仿真生成图像中的目标姿态的正确性。

3.3 实测图像比对

根据某测站自适应光学望远镜获取的目标飞行器多圈次在轨飞行高分辨率图像序列,基于测量数据、定轨结果和望远镜参数开展成像仿真,生成了观测弧段内各个对应时刻的目标图像序列,通过对比,表明仿真图像与实测图像中目标飞行器的大小、两舱体和太阳帆板姿态、飞行器表面光照可见部位和阴影等方面的特征十分一致,吻合程度好,验证了文中仿真方法的有效性。由于目标位置速度存在计算误差,表面材料光学散射特性、望远镜成像性能目前还难以精确建模,因此仿真图像中飞行器各部位的亮度以及图像模糊度与实际图像还存在一定差异。但总体而言,仿真图像已经能够满足目标飞行器在轨姿态判别和状态监控的需求。

图 9 给出了部分仿真图像示例,分别为不同成像距离、目标姿态和太阳入射方向的目标辐亮度图像和传感器图像。其中图 9(a)、(b)对应的观测相位角约为 103° ,图 9(c)、(d)的观测相位角约为 92° 。

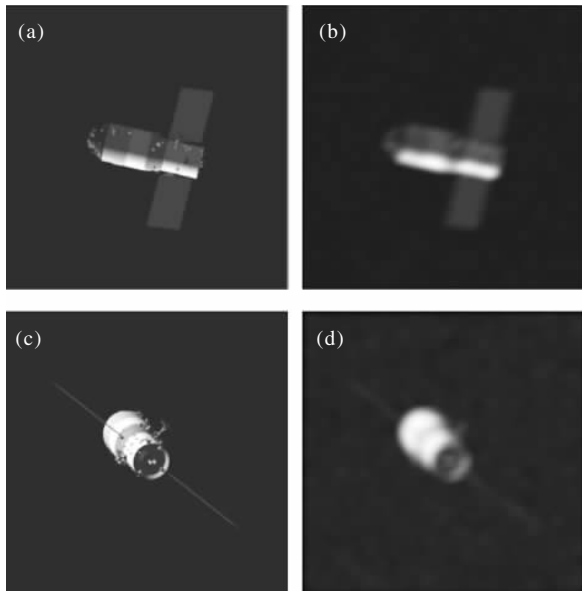


图 9 目标飞行器地基光学仿真图像

Fig.9 Target aircraft ground optical simulation image

4 结论

以图像为主要研究对象的空间目标光学成像

探测与识别技术,是获得重点合作目标与非合作空间目标特征信息的重要技术途径之一。利用大口径光学望远镜在合适条件下对目标高分辨率成像,可以获取目标的几何形态特征,提供目标认知依据。光学成像仿真模型与方法研究对于目标姿态分析及识别具有重要的应用价值,不仅可以对合作目标的下传遥测姿态进行复核,而且可以反演和判断非合作目标的在轨姿态,及时监测其姿态变化情况。

文中主要研究了交会对接任务中目标飞行器地基光学成像仿真模型与方法,并进行了比对验证,初步解决了复杂面目标可见光散射特性和成像特性难以准确建模的问题,提高了仿真图像的准确度和可信度。文中的仿真方法具有普遍适用性,有利于开展虚拟仿真试验和验证工作,可用于非合作目标的成像仿真与姿态识别,满足仿真计算的多种需求,提升太空态势感知能力。

后续可开展的研究工作包括:(1) 基于大量仿真和实测图像开展目标光学散射特性反演分析工作,研究不同材质在不同光照情况下的散射特性;(2) 研究仿真图像逼真度、相似度的客观评价指标,选取合适的评价方法对仿真与真实图像之间的相似度进行定量评估和分析。

参考文献:

- [1] Wang Jiangli. Development of technologies for detection and identification of space objects with ground-based E-O systems[J]. *Journal of Space TT&C Technology*, 2015, 34(6): 489-499. (in Chinese)
- [2] Chen Hongyu, Zhu Zhencai, Fu Bihong, et al. Design of companion microsat for observing the space target [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31 (2): 329-334. (in Chinese)
- [3] Han Yi, Sun Huayan. Advances in space target space-based optical imaging simulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3372-3378. (in Chinese)
- [4] Han Yi, Chen Ming, Sun Huayan, et al. Imaging simulation method of TG-02 accompanying satellite's visible camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1218002. (in Chinese)
- [5] Cody S, Francis C. Simulating complex satellite and a space-based surveillance sensor simulation[C]//Advanced

- Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2009: 1–10.
- [6] Han Y, Sun H Y, Feng J G, et al. Analysis on different types of space targets' optical scattering characteristic [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(7): 0752031.
- [7] Zhang Zuxun, Su Guozhong, Zheng Shunyi, et al. Relating OpenGL imaging process with exterior and interior parameters of photogrammetry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(7): 570–574. (in Chinese)
- [8] Han Yi, Sun Huayan, Li Yingchun, et al. Method of space object imaging simulation based on OpenGL [J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(6): 267–270. (in Chinese)
- [9] Han Yi, Sun Huayan, Li Yingchun, et al. Fast calculation method of complex space targets' optical cross section [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(17), 4013–4019.
- [10] Han Yi, Sun Huayan. Advances in space target optical scattering character research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 758–766. (in Chinese)
- [11] Phong B T. Illumination for computer generated pictures [J]. *Communications of ACM*, 1975, 18(6): 311–317.
- [12] David W, David B. Laboratory imaging of satellites and orbital appearance estimation [C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2007: 1–12.
- [13] Zhang Yu, Duan Jianfeng, Chen Ming, et al. A method for improving the accuracy of space laboratory orbit determination [J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(9): 1056–1062. (in Chinese)
- [14] Robert D F. Modeling the Imaging Chain of Digital Cameras [M]. Bellingham: SPIE Press, 2010: 2–6.
- [15] Ma Xiaoshan, Meng Xin, Yang Zhen, et al. Analysis and modeling of atmosphere influence on space-based optical remote sensing imaging simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 226–231. (in Chinese)
- [16] Zhang Faqiang, Zhang Yufa, Deng Qiang, et al. Model construction and simulation of electro-optical imaging system based on MTF [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(5): 549–554. (in Chinese)