

文章编号: 2095-2163(2022)04-0010-05

中图分类号: P237; TP391.9

文献标志码: B

月球轨道器光学线阵相机成像仿真方法与实现

曾佳, 陈晨, 刘世杰

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 月球影像图获取和地貌测绘是探月任务的首要目标,是后续探测任务的重要基础。为对月球轨道器和相机参数进行验证,本文对月球轨道器光学线阵相机成像进行仿真;首先模拟卫星轨道和姿态,基于共线方程建立严密的相机几何成像模型;结合月球 DEM 和正射影像资料,研究并实现了月球轨道器相机成像仿真算法,迭代求解月面投影点坐标,用双线性内插法进行影像灰度采样。基于 OSG 建模完成三维月球卫星成像仿真场景搭建;编写了可视化界面,集成为月球轨道器线阵相机成像仿真软件,生成双线阵相机仿真影像,并对其进行精度评价,验证了仿真结果的精度。

关键词: 卫星成像仿真; 线阵相机; 成像几何模型; 三维仿真

Method and implementation of imaging simulation for optical linear array camera on lunar orbiter

ZENG Jia, CHEN Chen, LIU Shijie

(College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

[Abstract] Acquisition of lunar image and topographic mapping are primary objectives of lunar missions and important basis of subsequent exploration missions. In order to verify the parameters of lunar orbiter and camera, this paper simulates the imaging of lunar orbiter optical linear array camera: firstly, the orbit and the attitude of the satellite is simulated and a strict camera geometric imaging model based on collinear equation is established; combined with lunar DEM and DOM, the imaging simulation algorithm of lunar orbiter camera is studied and implemented; the coordinates of lunar projection points are solved iteratively, and the image gray level is sampled with bilinear interpolation method. Based on OSG, the 3D lunar satellite imaging simulation scene is built; a visual interface is programmed, integrated into the software of imaging simulation for optical array camera on lunar orbiter. The simulation images of the dual line array camera are generated, and simulation images are evaluated to verify their accuracy.

[Key words] imaging simulation of satellite; linear array camera; imaging geometric model; 3D simulation

0 引言

月球是人类探索宇宙的第一步,是中国深空探测的首站。2007年,中国“嫦娥一号”探月卫星成功发射,进行了环月综合探测,获取月表图像,制成了中国第一幅全月球影像图^[1]和全月球数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)。“嫦娥二号”卫星则在一号卫星的基础上有更高的精度,制作了国际上领先的分辨率达到7m的全月球数字影像图和全月球数字高程模型。而月球轨道器卫星相机成像仿真是月球正射影像获取的逆过程,可以对探月卫星和相机参数进行验证,优化飞行任务的设计,为后续探测任务奠定基础。

“嫦娥一号”和二号卫星搭载的线阵 CCD (Charged couple device) 相机,能产生多幅同轨的重

叠影像,时间差异小,角度不同,从而可以组成立体像对。1983年,法国地球研究所(IGN)对第一台卫星推扫式扫描仪 SPOT 进行严格的几何建模,第一个推扫式成像卫星模型诞生^[2];Ebner 等人^[3]对 MOMS-02 三线阵相机影像模拟展开研究。

同时,基于地球卫星 SPOT 在三峡地区的影像数据,江万寿等人^[4]研究了卫星三线阵 CCD 相机影像模拟,讨论了根据 DEM 数据和正射影像确定投影中心轨迹、姿态模拟以及影像生成等过程。随着信息技术的不断发展,3D 模型模拟数据源^[5]、光线追踪^[6]等技术被运用到线阵 CCD 相机成像仿真中。张晓寒^[7]则搭建了包括推扫式成像在内的多种模式半物理卫星成像仿真系统,从原图数据处理到图像质量评价整个过程进行了集成。岳庆兴等人^[8]建立了更为精细的地面模型,提出了亚 m 级卫星 TDI (Time

基金项目: 国家自然科学基金(42171432);上海市科技计划项目(21511103800)。

作者简介: 曾佳(1999-),女,硕士研究生,主要研究方向:深空探测摄影测量;陈晨(1996-),女,博士研究生,主要研究方向:深空探测摄影测量;刘世杰(1982-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:航天测绘遥感与深空探测。

通讯作者: 刘世杰 Email: liusjtj@tongji.edu.cn

收稿日期: 2021-11-26

delay and integration) CCD 相机立体影像仿真理论。三维仿真方面,汪志良^[9]以 OpenSceneGraph 渲染引擎和 osgEarth 为工具,搭建了三维地球卫星成像仿真系统。

探月任务相较于常规的地球探测任务更加复杂,成本更高。李巧枝等人^[10]以共线方程为基础,考虑了双向反射效应,对月球线阵相机进行影像模拟。在可视化方面,左维等人^[11]根据嫦娥一号影像资料和激光测距数据,构建了基于 OpenGL 的月球三维可视化系统,但其功能主要在于月球漫游和数据存储。月球轨道器线阵相机成像模拟资料较少,且大多止步于生成静态图片,未能与三维仿真和可视化系统结合起来。

本文在探月卫星轨道和姿态模拟基础上,结合月球 DEM 数据和月球正射影像资料,采用严密的方法,基于共线方程建立了月球轨道器相机几何成像模型;迁移数字微分纠正正解法的思想,研究并实现了月球轨道器相机成像仿真算法,基于 OSO 建模完成三维月球卫星场景仿真,最后生成了双线阵相机前视和下视仿真图像,并对其进行影像质量评价。

1 成像仿真方法

月球轨道器相机成像模型旨在构建仿真影像和月面之间的几何关系,成像算法在成像模型的基础上进行月面投影点求解和灰度值采样,由此得到仿真影像,此后进行仿真影像的精度分析。仿真实验流程图见图 1。

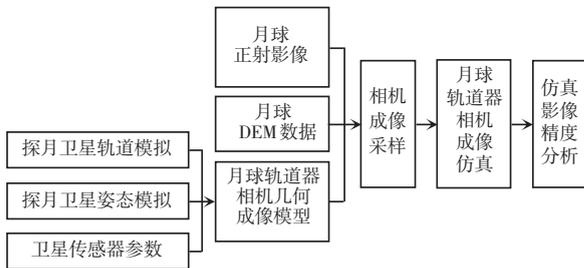


图 1 仿真实验流程图

Fig. 1 Flow chart of simulation experiment

1.1 卫星轨道姿态模拟

探月卫星轨道参数包括半长轴、偏心率、轨道倾角、升交点赤经、近月点角距、平近月点角一共 6 个基本参数,卫星轨道可以由这 6 个参数唯一确定。

假设线阵 CCD 相机中心指向月心,根据传感器位置计算姿态矩阵,将卫星某时刻在月固坐标系下的位置 P 和速度 V 表示为:

$$P = (X_L, Y_L, Z_L)$$

$$V = (V_{XL}, V_{YL}, V_{ZL})$$

其中,位置 P 和速度 V 都是随时间 t 变化的,从卫星轨道坐标系到月固坐标系的姿态矩阵(转换矩阵)为:

$$R_0^L = [b_1 \quad b_2 \quad b_3] \quad (1)$$

其中, $b_3 = P/|P|$, $b_2 = b_3 \times V/|b_3 \times V|$, $b_1 = b_2 \times b_3$ 。

1.2 相机成像模型

根据共线方程构建影像坐标和月面投影点坐标的几何关系。 t 时刻前视和下视立体相机成像的共线方程可以写为:

$$\begin{pmatrix} \hat{e}X\hat{u} \\ \hat{e}Y\hat{u} \\ \hat{e}Z\hat{u}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{e}X_s(t) \\ \hat{e}Y_s(t) \\ \hat{e}Z_s(t) \end{pmatrix} \hat{u} + \lambda \mathbf{R}_{TLs}^L(t) \begin{pmatrix} \hat{e}x \\ \hat{e}y \\ \hat{e}-f \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, $(x, y, -f)$ 为像点在像空间的坐标; f 为相机焦距; (X, Y, Z) 为月面点的月固定坐标; (X_s, Y_s, Z_s) 为投影中心的月固坐标; λ 为投影系数(比例因子); \mathbf{R}_{TLs}^L 为立体相机像空间坐标系相对月球固定坐标系旋转矩阵,即卫星姿态矩阵。

1.3 月面点求解算法

月球轨道器相机成像仿真的任务在于求解原始影像和月面之间的几何关系。正解法为从仿真图的像点坐标出发求解投影光线与月面相交点的坐标,反解法要从月球 DEM 上取格网点计算对应焦平面像素坐标,计算较为复杂,故选用正解法。

由于初始时月面点三维坐标 (X, Y, Z) 都为未知量,故要预先计算 Z_0 作为近似值先求解 X_0, Y_0 , 再读取月面数字高程模型数据计算得到 Z_1 , 再将 Z_1 代入公式进行迭代,直到把 Z 值近似值和月面真实值之差控制在一定范围内。

由前文建立的月球轨道器相机几何成像模型,结合数字微分纠正中正解法,月面点求解算法如下^[10]:

(1) 根据相机参数和像素坐标行列值,构建探月卫星相机成像模型中像素矢量模型,完成像素坐标到像空间坐标的转换。

(2) 根据采样时刻 t 的位置和速度计算姿态矩阵,完成像空间坐标到月固坐标转换。

(3) 由于正解法月面点坐标 (X, Y, Z) 都为未知,要先根据月球标准半径,计算近似值 Z_0 , 将像点像空间坐标代入共线方程,求得月球参考椭圆面上的月面点月固坐标近似值;再在月球数字高程模型 DEM 上找到真实月面点;计算共线方程求得的近似

点和真实月面点之间距离,若不符合拟定条件,则继续迭代求解。

1.4 仿真影像生成

将所得月面点月固坐标转换为经纬度坐标,再根据月球正射影像格式转换到对应的像素行列值。成像采样时采用双线性内插算法,并不直接将坐标取整,而是保留小数,以像素坐标为中心,读取月球正射影像灰度值进行模拟影像灰度采样。

2 成像仿真软件实现

2.1 实验数据与环境

实验所用的月球数字高程模型 DEM 是由美国国家航空航天局(NASA)月球勘测轨道器(LRO)上的激光高度计(LOLA)获得的数据^[12],像素分辨率为每像素 118 m。月球正射影像数据是由 LRO 上的侦察轨道器摄像机(LROC)广角摄像机(WAC)采集组成的全月球镶嵌图^[13],像元分辨率为 100 m。

使用的系统环境为 Windows 10,开发平台为 Visual Studio 2019,编程语言为 C++,所用库为 Eigen 3.4.0、OpenCV 4.5.4、GDAL 2.3.2、OSG 3.6.5。实验中仿真的卫星轨道为正圆形极轨,高度为 200 km,偏心率为 0,轨道倾角为 90°,月球标准半径为 1 737.4 km。线阵 CCD 相机参数见表 1。

表 1 相机参数

Tab. 1 Camera parameters

参数名称	参数值
焦距/mm	24
像素大小/ μm	12
相机安置角度/ $(^\circ)$	前视:+15 下视:0
每行像素数	512

2.2 成像仿真软件

编写基于 C# 的 WinForm 界面,将算法实现成月球轨道器线阵相机成像仿真软件,输入为相机立体角、相机焦距等相机参数、卫星轨道模拟数据、月球 DEM、月球正射影像数据和生成仿真影像行数,输出为前视、下视仿真图。输入参数并点击“生成仿真图”按钮后,开始生成仿真影像,同时显示生成进度条。仿真软件界面如图 2 所示。

2.3 基于 OSG 的三维场景建模

OpenSceneGraph(OSG)是一个高层次的开源 3D 计算机图形工具包,完全由标准 C++ 和 OpenGL 编写而成^[14]。OSG 的场景管理方式为包围体层次(BVH),即采用树状结构将场景节点封装进包围空

间体中。一棵场景树 BVH 包含一个根节点。

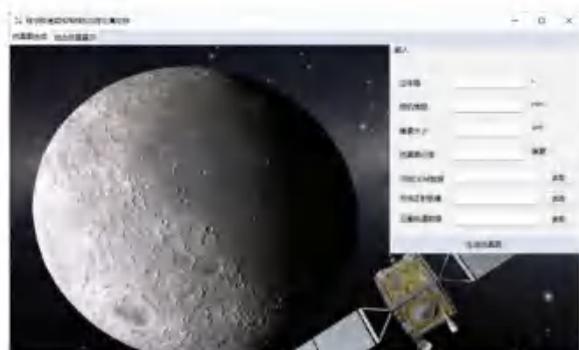


图 2 成像仿真软件界面

Fig. 2 Software interface of imaging simulation

本文基于 OSG 进行月球卫星三维建模,背景几何节点、月球节点、卫星模型节点、投影线节点、文字节点都为叶节点,包含对应可绘制体的信息;根节点、相机节点和卫星空间变换节点都为组节点,被赋予一些功能或是负责渲染层次。相机节点主要用来设置投影矩阵、观察矩阵、参考系、渲染顺序等;空间变换节点用来设置卫星的位置、姿态,使卫星严格按照模拟的轨道和姿态数据飞行。生成仿真数据后,动态显示月面点经纬度信息,连接卫星的实时位置和投影点三维坐标形成前视、下视投影线,绘制成 2 个三角形,使得前阶段模型生成的月面投影点数据得到了验证,仿真过程更加生动形象。最终实现效果如图 3 所示,左下角为下视扫描点实时经纬度,三角形为模拟的卫星投影线。



图 3 三维仿真最终效果(局部放大图)

Fig. 3 The final effect of 3D simulation (local enlarged view)

3 仿真结果与分析

3.1 成像仿真影像结果

仿真影像及对应的正射影像区域如图 4 所示。

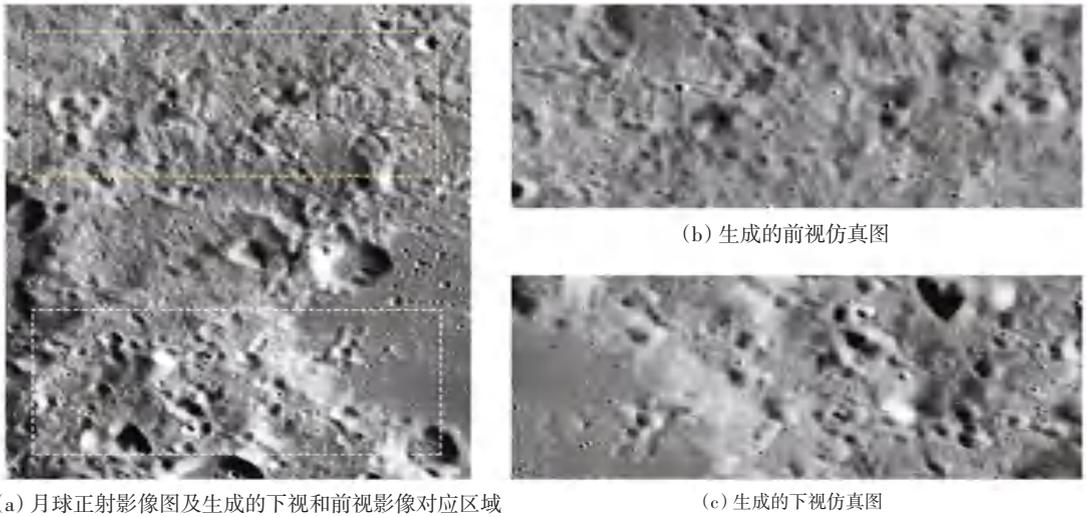


图 4 月球线阵相机成像仿真结果示例

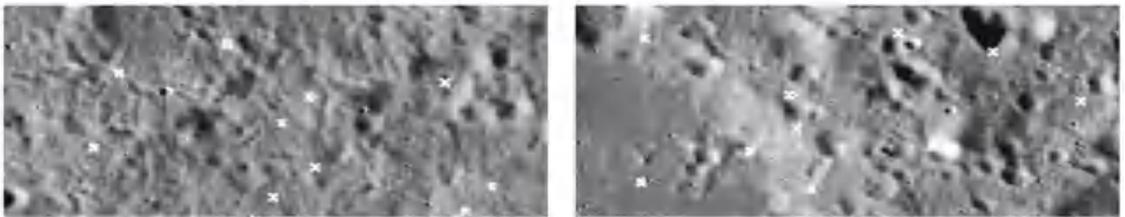
Fig. 4 Examples of imaging simulation results of lunar linear array camera

仿真初始时,卫星在月球约南纬 45° 西经 168° 处从南往北飞行,故生成的前视、下视仿真图与月球正射影像图上下相反。生成的前视和下视仿真示例图行高为 200 像素,像元的空间分辨率约为 100 m。

3.2 仿真影像精度分析

为检查模型的正确性,对生成的仿真影像做精度分析:在原始正射影像数据上选取 20 个明显的检

查点,对应到前视和下视仿真图上各 10 个同名像点,读取前视和下视仿真图像点像素行列坐标值,代入模型,迭代后求出模拟经纬度坐标,与实际的原始正射影像点经纬度坐标作比较,计算模拟值和真实值之间的残差和标准差。前视和下视仿真图上对应的检查点分布如图 5 所示。



(a) 前视仿真影像检查点分布

(b) 下视仿真影像检查点分布

图 5 前视和下视仿真图上对应的检查点分布

Fig. 5 The distribution of forward-looking and down-looking simulation image checkpoints

根据所得数据计算的检查点数据残差的标准差:前视仿真影像在经度(扫描方向)上为 0.00341° ,纬度(飞行方向)为 0.00431° ;下视仿真影像在经度上为 0.00415° ,纬度为 0.00228° 。

总体上,本次仿真影像检查点经纬度标准差在 0.005° 以内,约 0.5 至 0.9 个像素,标准差较小,模型能较好地模拟月球轨道器相机图像的生成。

4 结束语

本文基于共线方程构建了严密的月球轨道器相机几何成像模型,实现了月球轨道器相机成像仿真算法,使用双线性内插法进行成像采样;基于 OSG 进行了三维月球卫星仿真建模,设计了友好的用户

交互界面,使用 C# 完善成探月卫星成像仿真软件对仿真工作进行整合,使得仿真工作工程化、可视化程度高;生成了前视和下视探月卫星成像仿真图像,仿真影像精度评价的结果显示模型模拟效果良好。

参考文献

- [1] 李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 40(03): 294-306.
- [2] POLI D, TOUTIN T. Review of developments in geometric modelling for high resolution satellite pushbroom sensors[J]. The Photogrammetric Record, 2012, 27(137): 58-73.
- [3] EBNER H, KOMUS W, STRUNZ G. A simulation study on point determination using MOMS-02/D2 imagery[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1991(7): 11-16.
- [4] 江万寿, 张剑清, 张祖勋. 三线阵 CCD 卫星影像的模拟研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002(04): 414-419.

- [5] 罗胜, 张锐, 姜挺, 等. 城市区域高分辨率线阵 CCD 卫星影像模拟[J]. 测绘科学技术学报, 2011, 28(02): 125-128.
- [6] 谢金华, 刘美娟, 邱振戈, 等. 集群环境下星载线阵相机成像光线追踪模拟[J]. 测绘科学, 2015, 40(11): 150-154.
- [7] 张晓寒. 多模式卫星成像仿真系统研究与设计[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [8] 岳庆兴, 唐新明, 高小明. 亚 m 级卫星 TDI CCD 立体测绘相机成像仿真[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(03): 327-332.
- [9] 汪志良. 基于数字地球的遥感卫星对地成像仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [10] 李巧枝, 张吴明, 阎广建, 等. 月球卫星三线阵 CCD 影像模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2007(03): 298-302.
- [11] 左维, 刘阳, 任鑫, 等. 基于嫦娥一号 CCD 相机和激光测距数据的月球三维可视化系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(01): 29-37.
- [12] SMITH D E, ZUBER M T, NEUMANN G A. Results from the lunar orbiter laser altimeter (LOLA): Global, high resolution topographic mapping of the moon [C]//42nd Annual Lunar and Planetary Science Conference. Texas: ADS, 2011: 2350.
- [13] SPEYERER E J, ROBINSON M S, DENEVI B W. Lunar reconnaissance orbiter camera global morphological map of the moon [C]// 42nd Annual Lunar and Planetary Science Conference. Texas: ADS, 2011: 2387.
- [14] 王锐, 钱学磊. OpenSceneGraph 三维渲染引擎设计与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

(上接第9页)

法;最后,通过 Matlab 仿真对比实验,不仅证明了利用非线性变换的惯性权重和学习因子能够提高粒子群算法的收敛速度和优化能力,还证明了基于改进 PSO 的 4-3-4 多项式插值法能够大大缩短机械手的运行时间,同时也确保了各个关节运动的位置、速度、加速度更加连续、平滑,从而提高了乒乓球发球机械手末端运动的精度以及机械手的使用寿命。

参考文献

- [1] 宁学涛, 潘玉田, 杨亚威, 等. 基于运动学和动力学的关节空间轨迹规划[J]. 计算机仿真, 2015, 32(2): 409-413.
- [2] PIAZZI A, VISIONLI A. Global minimum - jerk trajectory planning of robot manipulators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(1): 140-149.
- [3] 朱世强, 刘松国, 王宣银. 机械手时间最优脉动连续轨迹规划算法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(03): 47-52.
- [4] 孙亮, 马江, 阮晓钢. 六自由度机械臂轨迹规划与仿真研究[J]. 控制工程, 2010, 17(03): 388-392.
- [5] 李白雅, 姜柏庄, 龚明, 等. 基于 PSO 算法优化的机械臂轨迹规划研究[J]. 信息技术, 2014(09): 20-23, 32.
- [6] 王学琨, 李刚, 周东凯, 等. 基于 DE 的时间最优 6-DOF 机械臂轨迹规划算法[J]. 计算机仿真, 2015, 32(08): 332-337.
- [7] 曾关平. 面向乒乓球运动的七自由度机械臂运动控制系统设计[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [8] 王学武, 严益鑫, 顾幸生. 基于莱维飞行粒子群算法的焊接机器人路径规划[J]. 控制与决策, 2017, 32(02): 373-377.
- [9] SUN Rongting, LIU Mingding, ZHAO Li. Research on logistics distribute on path optimization based on PSO and IoT [J]. International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, 2019, 17(6): 1950051.
- [10] 康玉祥, 姜春英, 秦运海, 等. 基于改进 PSO 算法的机器人路径规划及实验[J]. 机器人, 2020, 42(01): 71-78.
- [11] 唐越, 郑金辉, 门正兴, 等. 工业机器人 D-H 建模与运动仿真[J]. 中国重型装备, 2020(01): 31-32, 40.
- [12] TAHERKANI M, SAFABAKHSH R. A novel stability - based adaptive inertia weight for particle swarm optimization [J]. Applied Soft Computing, 2016, 38: 281-295.
- [13] LI Wei, CHAO Xiuqin. Improved particle swarm optimization method for feature selection [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2019, 13(6): 990-1004.
- [14] 王智杰, 杜宇凡, 杨沫, 等. 基于 MATLAB Robotics Toolbox 的 Dobot 机械臂运动规划[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(02): 49-51.
- [15] 印峰, 王耀南, 余洪山. 基于蒙特卡罗方法的除冰机器人作业空间边界提取[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(07): 891-896.
- [16] 王东风, 孟丽. 粒子群优化算法的性能分析和参数选择[J]. 自动化学报, 2016, 42(10): 1552-1561.
- [17] RATNAWEERA A, HALGAMUGE S K, WATSON H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 240-255.