

异步推扫式遥感立体成像仿真系统

张召才,王向军,庞 博

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 对三线阵 CCD 推扫式遥感立体成像方式进行了讨论,研究了推扫式遥感成像模型中的光学共线方程成像模型,分析了地形地貌梯度对推扫式遥感成像过程的影响。最后,在基于不变轨和固定姿态的前提下,以高斯合成曲面模拟三维地形地貌梯度,用数学仿真的方法验证了地形地貌梯度对推扫式遥感成像精度的影响,并结合嫦娥一号数据进行了分析。实验结果表明:推扫式遥感立体成像过程中,地形地貌起伏的梯度变化在飞行方向上引入了相邻轨图像的信息重叠或遗漏,在推扫方向上引入了投影误差。

关键词: 推扫式遥感成像; 地形地貌梯度; 仿真系统; 高斯合成曲面

中图分类号: P236 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2010)05-0887-05

Emulation system of the asynchronous push-broom remote sensing stereo imaging

ZHANG Zhao-cai, WANG Xiang-jun, PANG Bo

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The 3-line array CCD push-broom remote sensing stereo imaging mode was discussed and the rigorous optical collinear imaging model of the remote sensing stereo imaging was studied in this paper. Then the effect of the topographic gradient on the push-broom remote sensing stereo imaging was analyzed. Finally, based on the premise of invariant orbit and fixed attitude, the 3D topographic gradient was simulated by using the Gauss synthesis curve and the effect of the topographic gradient on the space borne linear CCD push-broom imaging was verified with the math simulation method, which was also certificated with the CE -1 CCD image data. The experimental results show that, because of the topographic gradient, the information omission or overlap between the adjacent remote sensing images is created in the flying direction and the projection error is created in the push-broom direction during the push-broom remote sensing stereo imaging.

Key words: Remote sensing push-broom imaging; Topographic gradient; Emulation system; Gauss synthesis curve

收稿日期:2009-12-10; 修订日期:2010-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872097);天津市科技支撑计划资助项目(08ZCKFJC27900)

作者简介:张召才(1984-),男,山东济宁人,博士生,主要从事计算机视觉方面的研究。Email:zhangzhaocai@gmail.com

导师简介:王向军(1955-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,主要从事精密测试技术及仪器、光电探测技术、影像与视觉测量方面的研究。Email:xdocuxjw@vip.163.com

0 引言

异步推扫成像是获取遥感立体影像的重要方式。它主要是通过线阵 CCD(单线阵或多线阵)以推扫方式获取地面图像,结合已知的内、外方位元素得到图像与地表实际位置的对应关系,实现遥感影像的定位。现阶段用于目标定位和立体测图的高分辨率卫星遥感影像,大部分都是线阵 CCD 推扫式影像,这包括我国的嫦娥一号^[1-2],法国的 SPOT 卫星^[3],美国的 IKONOS 卫星^[3-4]等。

由于线阵 CCD 推扫成像原理不同于面阵 CCD 成像方式,具有独特的几何特性,导致推扫式遥感成像过程中,地形地貌起伏的梯度变化^[5]会对推扫影像的尺度和分辨率产生影响。基于线阵 CCD 的异步推扫式遥感立体成像仿真系统的关键是研究地形地貌梯度对推扫式遥感成像的影响。

1 异步推扫式遥感立体成像原理

1.1 三线阵 CCD 推扫遥感立体成像原理

以我国嫦娥一号卫星三线阵 CCD 立体相机为例,该相机是一台 1 024×1 024 大面阵 CCD 相机,取面阵沿垂直于飞行方向的第 11、第 512 和第 1 013 三条线阵列。卫星飞行过程中,3 条 CCD 线阵列以同步周期 T 连续对月面进行扫描,产生 3 幅重叠率近 100% 的影像。3 幅影像分别以前视、正视和后视 3 个角度成像,实现遥感推扫式立体成像,如图 1 所示。

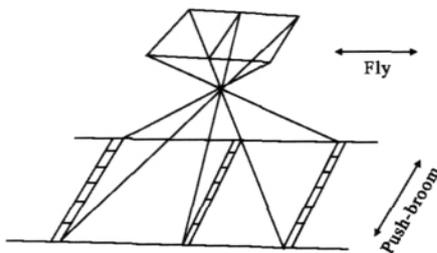


图 1 三线阵 CCD 推扫成像图

Fig.1 Three linear CCD push-broom imaging

1.2 异步推扫式遥感立体成像模型

以异步推扫方式获取的遥感影像,各扫描行分别处在各自不同的姿轨状态,但每一扫描行的影像与被摄物体之间符合中心投影关系。假设飞行方向和扫描行方向分别为像坐标 x 轴和 y 轴,若第 i 扫描行的遥感载体六自由度姿轨状态为 $X_{Si}, Y_{Si}, Z_{Si}, \phi_i, \omega_i, \kappa_i$, 则物像

的中心投影关系^[5]为:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{Si} \\ Y_{Si} \\ Z_{Si} \end{pmatrix} + \lambda M_i \begin{pmatrix} 0 \\ y_i \\ -f \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: (X, Y, Z) 为地面点的大地坐标系; (X_{Si}, Y_{Si}, Z_{Si}) 为第 i 行投影中心的像空间坐标系; λ 为投影系数; M_i 是由第 i 行外方位角元素 $\phi_i, \omega_i, \kappa_i$ 构成的旋转阵。

对线阵 CCD 推扫式成像过程,每一条扫描行影像的姿轨状态随时间变化,可以用时间的多项式来描述。假设遥感载体飞行平稳,即轨道高度保持不变, CCD 传感器姿态稳定,每一幅影像的像平面坐标原点在中央扫描行的中点,则可认为每一扫描行的姿轨参数是随 x 值变化的,描述^[6]为:

$$\begin{aligned} \phi_i &= \phi_0 + \dot{\phi} \cdot x + \ddot{\phi} \cdot x^2 + \dots \\ \omega_i &= \omega_0 + \dot{\omega} \cdot x + \ddot{\omega} \cdot x^2 + \dots \\ \kappa_i &= \kappa_0 + \dot{\kappa} \cdot x + \ddot{\kappa} \cdot x^2 + \dots \\ X_{Si} &= X_{s0} + \dot{X}_S \cdot x + \dots \\ Y_{Si} &= Y_{s0} + \dot{Y}_S \cdot x + \dots \\ Z_{Si} &= Z_{s0} + \dot{Z}_S \cdot x + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $(X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0}, \phi_0, \omega_0, \kappa_0)$ 为中央扫描行的姿轨变化参数; $(\dot{X}_S, \dot{Y}_S, \dot{Z}_S, \dot{\phi}, \dot{\omega}, \dot{\kappa})$ 为姿轨变化参数的一阶微分; $(\ddot{\phi}, \ddot{\omega}, \ddot{\kappa})$ 为相应的二阶微分。

2 地表梯度变化对异步推扫式遥感立体成像的影响

沿飞行方向,地形地貌梯度造成相邻轨道推扫影像出现不连续的现象^[7]。

如图 2 所示,当地形地貌上凸时,在相邻推扫影像带之间会引入信息遗漏;当地形地貌下凹时,在相邻推扫影像带之间会引入信息重叠。

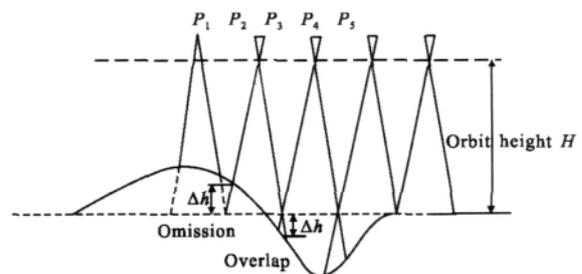


图 2 地形地貌梯度引入的影像遗漏/重叠

Fig.2 Image omission/overlap introduced by the topographic gradient

假设某凸起或下凹点与基准面的高程差为 Δh , 地表遗漏或重叠的条带宽度为 l , 线阵 CCD 在飞行方向上成像宽度为 L , 则可近似获得如下关系:

$$\frac{l}{L} \approx \frac{\Delta h}{H} \quad (3)$$

沿推扫方向, 星载线阵 CCD 为行中心投影, 在该方向上地形地貌起伏会引起像点移位, 称为投影误差^[7]。当地面高于或低于基准面时, 该凸点或凹点在 CCD 像面上的成像点与该点在基准面上的投影点在像面上的成像点之间存在直线移位, 如图 3 所示。

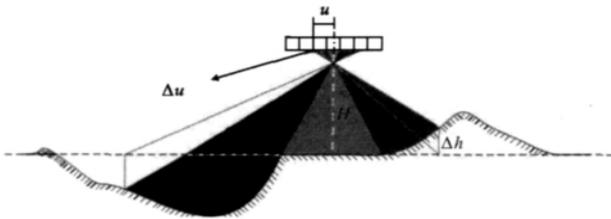


图 3 地形地貌梯度引入的投影误差

Fig.3 Imaging deviation introduced by the topographic gradient

投影误差计算^[7]如下:

$$\Delta u = \frac{\Delta h}{H} \times u \quad (4)$$

式中: Δh 为像点所对应地面点与基准面间的高程差; H 为飞行航高; u 为底点辐射距; Δu 是投影误差。

为便于数学模拟验证部分的计算, 引入投影偏移率的概念, 表示为:

$$k = \frac{\Delta u}{u} \quad (5)$$

3 仿真实验及结果分析

利用数学模拟的方法获得了起伏地表面, 验证了前文所述结论。高斯合成曲面能够在区域内实现高程起伏变化, 且在局部区域没有尖锐的噪声峰值, 能较好地模拟地形地貌梯度拟合面。高斯合成曲面公式^[8]为:

$$Z = A \left[1 - \left(\frac{x}{m} \right)^2 \right] \cdot e^{-\left(\frac{x}{m} \right)^2 - \left(\frac{y}{n+1} \right)^2} - B \left[0.2 \left(\frac{x}{m} \right) - \left(\frac{x}{m} \right)^3 - \left(\frac{y}{n} \right)^5 \right] \cdot e^{-\left(\frac{x}{m} \right)^2 - \left(\frac{y}{n} \right)^2} - C \cdot e^{-\left(\frac{x+1}{m} \right)^2 - \left(\frac{y}{n} \right)^2} \quad (6)$$

式中: A, B, C 为地势起伏参数; m, n 为范围控制参数; x, y, Z 表示地表面点的三维坐标。

计算中涉及到的部分遥感成像参数均采用我国嫦娥一号卫星的相关参数。

3.1 地形地貌梯度面模拟

选择地表二维区域 $\{x \in [-1\ 200, 1\ 200], y \in [-1\ 200, 1\ 200]\}$, 依此生成的三维曲面如图 4 所示, 其中计算得到 $Z \in [-127.250\ 2, 162.163\ 5]$ 。该三维曲面模拟地表高程起伏变化, 以 $Z=0$ 为基准面, 存在多个上凸、下凹的起伏区域。模拟地表的二维梯度场如图 5 所示。

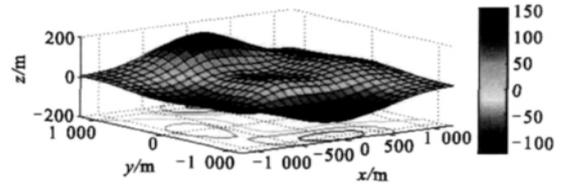


图 4 模拟地形地貌

Fig.4 Simulation of the topography

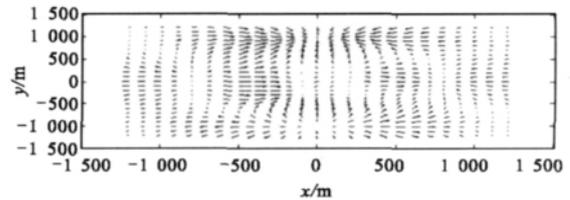


图 5 模拟地表的二维梯度场

Fig.5 Simulation of the 2D gradient of the terrain

由图 4 和图 5 可以得到: 在 $x=0$ 区域附近沿 y 轴的横断面具有显著的地形因子, 即高程和梯度变化都较为明显, 因此, 选择 $\{x=0, y \in [-1\ 200, 1\ 200]\}$ 横断面作为验证区域。

3.2 横断面对推扫式遥感成像的影响

选定的横断面在 $y \in [-1\ 200, 1\ 200]$ 区域内高程变化较大, 即具有显著的地形地貌梯度特征。但对表征地表局部特征的坡度因子进行研究, 得到图 6, 可以发现: 坡度变化较小, 即下面的验证工作是基于大范围高程变化显著、局部范围平坦的区域进行的。

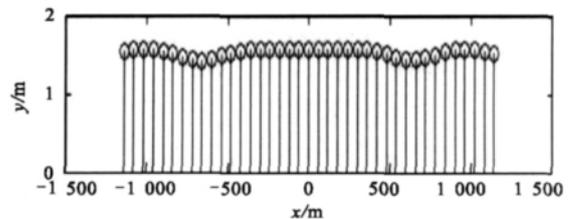


图 6 选定横断面坡度

Fig.6 Slope of the selected lateral section

3.2.1 地形地貌梯度引入影像遗漏/重叠

异步推扫式遥感立体成像过程中, 地形地貌梯度

会导致沿飞行方向相邻影像带不连续。在 y 方向,以 $\Delta y=120$ 选取离散点,根据公式(3)、(6)可以计算出对应离散点的高程变化量 Δh 及其引入的地表推扫影像信息重叠/遗漏量 l ,如图 7 所示。

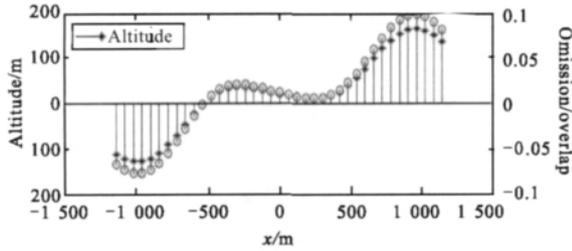


图 7 地表梯度与推扫影像带重叠/遗漏
Fig.7 Terrene gradient and push-broom image overlap/omission

3.2.2 地形地貌梯度引入的投影误差

异步推扫式遥感立体成像过程中,地形地貌梯度变化会对推扫影像引入投影误差,即投影点相对基准成像点发生偏移。同样以 $\Delta y=120$ 选取离散点,根据公式(4)、(5)、(6)可以计算出对应离散点的高程变化量 Δh 及其引入的推扫成像方向投影偏移率 k ,如图 8 所示。由图可知,在轨道高度远大于地表高程变化时,投影偏移率接近于 0。

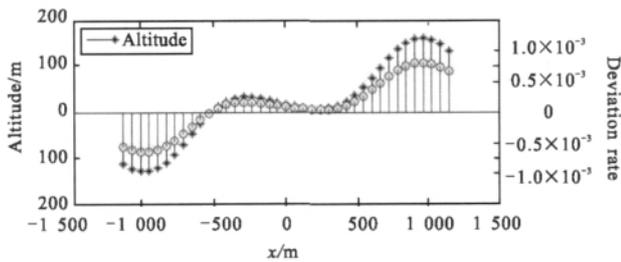


图 8 地形地貌梯度与投影点偏移率
Fig.8 Topographic gradient and subpoint deviation rate

3.3 嫦娥一号 CCD 科学数据分析

前文采用数学仿真的方法研究了地形地貌梯度变化对异步推扫式遥感成像的影响。下面基于嫦娥一号 CCD 科学探测 2C 级数据,对仿真结果进行验证。

选取月表某高地的前视和后视图像,生成等高线轮廓图,如图 9 所示。可以看出:因前视、后视成像视角不同,生成的推扫影像具有明显差异。右下侧区域月坑的后视图与前视图存在尺度压缩;对比高地左上侧区域的前视图与后视图,较好地表现出了月海和高地接壤处具有明显的梯度变化。

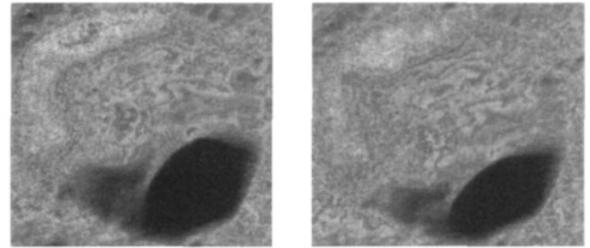


图 9 同一地区前视、后视影像等高线图
Fig.9 Front and back image contour map of the same terrain

在实际遥感推扫成像过程中,为实现影像完全覆盖,会在设计卫星飞行轨道时,人为引入相邻轨图像间的重叠。选择月表相邻两轨下视影像,如图 10 所示,某一特征点在两幅图像上的横向坐标分别为 320 和 180,两轨图像存在重叠区域,能有效避免月表遥感立体影像的信息遗漏。

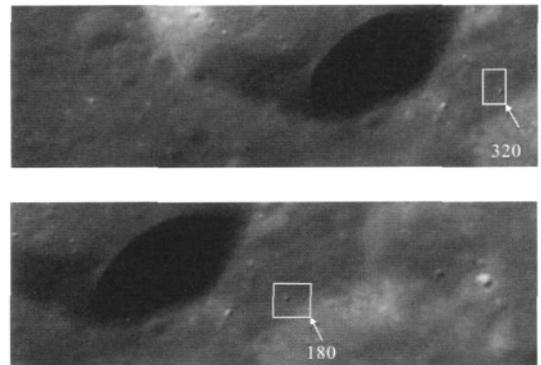


图 10 同一点在相邻轨下视影像上的重叠
Fig.10 Nadir image overlap of the adjacent track

4 结论

以高斯合成曲面模拟地形地貌梯度拟合面,根据等高线和梯度变化选择具有明显起伏特征的横断面进行验证,得到如下结论。

- (1) 地表高程变化 h 和相邻轨影像带的重叠/遗漏量 l 、投影点偏移率 k ,在整个横断面上保持趋势一致,即 Δh 和 l 、 Δh 和 k 分别具有正相关性;
- (2) 沿飞行方向,地表下凹会引起相邻推扫影像带的影像重叠,地表上凸会引起推扫影像对地表覆盖的不连续,即影像遗漏。
- (3) 沿推扫方向,地表下凹使投影点靠近像底点,地表上凸使投影点远离像底点。

参考文献:

- [1] ZHENG Yong -chun, OUYANG Zi -yuan. Chang'E -1 lunar orbiter: China's first step into deep space exploration[J]. **Science & Technology Review** (郑永春, 欧阳自远. 嫦娥1号绕月探测——中国航天迈向深空. 科技导报), 2007(5): 47-52.
- [2] TANG Wei, YE Dong. 3D computer vision measurement systems[J]. **Infrared and Laser Engineering**(唐巍, 叶东. 三维视觉测量系统. 红外与激光工程), 2008, **37**(S1): 328-332.
- [3] SOUDANI K, FRANCOIS C, LE MAIRE G, et al. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands[J]. **Remote Sensing of Environment**, 2006, **102** (1-2): 161-175.
- [4] GUO Hai -tao, ZHANG Bao -ming, XU Qing, et al. Analysis on the properties of the projection error in the linear array ccd push-broom image[J]. **Hydrographic Surveying and Charting** (郭海涛, 张保明, 徐青, 等. 线阵 CCD 推扫式影像的投影误差特性分析. 海洋测绘), 2007, **27**(2): 18-22.
- [5] YU Tao, MA Jie, GONG Jun -bin, et al. New approach of terrain matching with feature vector based on imaging laser radar[J]. **Infrared and Laser Engineering**(余涛, 马杰, 龚俊斌, 等. 一种基于激光成像雷达的特征矢量匹配方法. 红外与激光工程), 2007, **36**(5): 742-746.
- [6] WANG Tao, ZHANG Yan, XU Qing, et al. A new method for linear push-broom imagery exterior orientation [J]. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica** (王涛, 张艳, 徐青, 等. 线阵推扫式影像外定向的一种新算法. 测绘学报), 2005, **34**(1): 35-39.
- [7] HU Zhu -zhi, WANG Hui -lin, CHEN Qin -luan, et al. **Technology and Application of Space-aerial Remote Sensing** [M]. Nanjing: Nanjing University Press (胡著智, 王慧麟, 陈钦峦, 等. 航天航空遥感技术与应用. 南京: 南京大学出版社), 2007.
- [8] ZHOU Q M, LIU X J. The accuracy assessment on algorithms that derive slope and aspect from DEM [C]//**Proceedings of the 2nd International Symposium on Spatial Data Quality**, 2003: 275-285.
-
- (上接第 886 页)
- and optical constants deduction [J]. **Infrared and Laser Engineering** (王明军, 董雁冰, 吴振森, 等. 粗糙表面光散射特性研究与光学常数反演. 红外与激光工程), 2004, **33**(5): 549-552.
- [4] ROSS B, QI J G, SUSAN M M, et al. Comparison of BRDF models with a fuzzy inference system for correction of bidirectional effects [J]. **Remote Sensing of Environment**, 2003, **88**(3): 221-232.
- [5] SUN Cheng -ming, ZHANG Wei, WANG Zhi -le. Application of BRDF for modeling on the visible reflection characteristics of spatial targets[J]. **Optical Technique**(孙成明, 张伟, 王治乐. 双向反射分布函数在空间目标可见光反射特性建模中的应用. 光学技术), 2008, **34**(5): 750-757.
- [6] TORRANCE K, SPARROW E. Theory of off-specular reflection from roughened surfaces [J]. **J Opt Soc America**, 1967, **57**(9): 1105-1115.
- [7] FENG Wei -wei, WEI Qing -nong, WANG Shi -mei, et al. Optimized modeling of polarized BRDF based on hybrid genetic algorithm [J]. **Infrared and Laser Engineering** (冯巍巍, 魏庆农, 汪世美, 等. 基于混合遗传算法的偏振双向反射分布函数优化建模. 红外与激光工程), 2008, **37**(4): 743-747.
- [8] WU Zhen -sen, XIE Dong -hui, XIE Pin -hua, et al. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. **Acta Optica Sinica** (吴振森, 谢东辉, 谢品华, 等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法. 光学学报), 2002, **22**(8): 897-901.
- [9] WANG Hong, PAN Xiao -lu, LI Yi -min, et al. A method for objective assessing image quality based on gradient magnitude [J]. **Optics & Optoelectronic Technology** (王虹, 潘晓露, 李一民, 等. 一种基于梯度幅度值的图像质量客观评价方法. 光学与光电技术), 2004, **2**(6): 23-25, 58.
- [10] LI Tie, WANG Hang -yu, WANG Hong -jun. Application of simulated annealing algorithm in BRDF statistical modeling[J]. **Chinese Journal of Quantum Electronics** (李铁, 王航宇, 王宏军. 目标表面 BRDF 统计建模中的遗传模拟退火算法. 量子电子学报), 2008, **25**(4): 489-492.