

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **6**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年6月 第17卷 第6期(总第194期)

目次

综述

人脸图像的年龄估计技术研究 王先梅, 梁玲燕, 王志良, 胡四泉(603)

图像统计模型参数估计中的期望最大值算法 李旭超(619)

图像处理和编码

鲁棒的梯度驱动图像修复算法 叶学义, 王靖, 赵知劲, 陈华华(630)

快速去块效应的线性规划方法 金剑秋, 刘春晓, 王勋, 章志勇(636)

DWT-SVD 域全盲自嵌入鲁棒量化水印算法 叶天语(644)

Mean-shift 滤波和直方图增强的图像弱边缘提取 冀峰, 高新波, 谢松云(651)

图像分析和识别

梯度点对约束的结构化车道检测 王永忠, 王晓云, 文成林(657)

多水平外区抑制的轮廓检测 闫超, 张建州(664)

基于局部投影与块 LBP 特征的图像检索 邹彬, 潘志斌, 胡森(671)

图像理解和计算机视觉

视觉陌生度驱动的增量自主式视觉学习算法 瞿心昱, 姚明海, 顾勤龙(678)

霍夫空间中多足球机器人协作目标定位算法 许家铭, 解仑, 王志良, 倪善超(687)

计算机图形学

虚拟 CCD 线阵星载光学传感器内视场拼接 张过, 刘斌, 江万寿(696)

“第八届数字电视与无线多媒体通信国际论坛”会议专栏

追踪盗版者的抗共谋数字指纹 李晓强, 张煌, 赵洋洋, 汪晶晶(702)

LBP 与鉴别模式结合的热红外人脸识别 谢志华, 伍世虔, 方志军(707)

电影中复杂事件的检索与识别 杜吉祥, 郭一兰, 翟传敏(712)

方向特征和网格特征融合的离线签名鉴别 杨丹凤, 吕岳(717)

视觉关注度的立体图像质量评价 张艳, 安平, 张秋闻, 张兆杨(722)

低开销的异构数据交换 赵凯, 赵正德(726)

灵活的多视点视频编码预测结构 张艳, 蔡灿辉(730)

跨层反馈在无线视频自适应编码中的应用 王垚中, 郑世宝, 张重阳, 刘勃(736)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 6 期

2012 年 6 月 16 日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
北京 9718 信箱 邮编 100101
电子信箱:jig@irsa.ac.cn
电话:010-64807995 010-82614429
网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
(中国国际书店)
(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics

Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 6 June 2012

Contents

Review

- Age estimation by facial image: a survey Wang Xianmei, Liang Lingyan, Wang Zhiliang, Hu Siqian(603)
Expectation maximization method for parameter estimation of image statistical model Li Xuchao(619)

Image Processing and Coding

- Robust gradient driving image inpainting method Ye Xueyi, Wang Jing, Zhao Zhijing, Chen Huahua(630)
Fast image de-blocking by linear programming Jin Jianqiu, Liu Chunxiao, Wang Xun, Zhang Zhiyong(636)
Perfectly blind self-embedding robust quantization-based watermarking scheme in DWT-SVD domain Ye Tianyu(644)
Weak edge detection using Mean-shift filtering and histogram enhancement Ji Feng, Gao Xinbo, Xie Songyun(651)

Image Analysis and Recognition

- Gradient-pair constraint for structure lane detection Wang Yongzhong, Wang Xiaoyun, Wen Chenglin(657)
Contour detection based on multilevel inhibition Yan Chao, Zhang Jianzhou(664)
Image retrieval method based on local projection and block LBP feature Zou Bin, Pan Zhibin, Hu Sen(671)

Image Understanding and Computer Vision

- Visual novelty driven incremental and autonomous visual learning algorithm Qu Xinyu, Yao Minghai, Gu Qinlong(678)
Target localization algorithm for cooperative multi-soccer robots based on Hough space
..... Xu Jiaming, Xie Lun, Wang Zhiliang, Ni Shanchao(687)

Computer Graphics

- Inner FOV stitching algorithm of spaceborne optical sensor based on the virtual CCD line
..... Zhang Guo, Liu Bin, Jiang Wangshou(696)

Special Issue of the IFIC' 2011

- Anti-collusion fingerprinting scheme capable of tracing pirate Li Xiaoqiang, Zhang Huang, Zhao Yangyang, Wang Jingjing(702)
Infrared face recognition using LBP and discrimination patterns Xie Zhihua, Wu Shiqian, Fang Zhijun(707)
Recognize and retrieval complex events in real movies Du Jixiang, Guo Yilan, Zhai Chuanmin(712)
Off-line signature verification based on combination of direction feature and grid feature Yang Danfeng, Lv Yue(717)
Stereo image quality assessment based on visual attention Zhang Yan, An Ping, Zhang Qiuwen, Zhang Zhaoyang(722)
Low overhead of heterogeneous data exchange Zhao Kai, Zhao Zhengde(726)
Flexible prediction structure for multi-view video coding Zhang Yan, Cai Canhui(730)
Cross-layer feedback based adaptive coding for wireless video transmission
..... Wang Yaozhong, Zheng Shibao, Zhang Chongyang, Liu Bo(736)

中图法分类号: P236 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)06-0696-06

论文引用格式: 张过, 刘斌, 江万寿. 虚拟 CCD 线阵星载光学传感器内视场拼接[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(6): 696-701.

虚拟 CCD 线阵星载光学传感器内视场拼接

张过¹, 刘斌², 江万寿¹

1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079; 2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101

摘要: 以基于虚拟 CCD 线阵的多 CCD 影像重成像算法作为内视场拼接的技术手段, 在对由地形起伏引起的多 CCD 影像的拼接误差进行理论分析和推导的基础上, 提出无需数字高程模型 (DEM) 的虚拟 CCD 线阵多 CCD 影像重成像算法; 并提出使用基于严密成像几何模型的空间前方交会的方法直接评价影像拼接对摄影测量生产的精度影响。研究表明, 在虚拟 CCD “安装” 位置与真实 CCD 位置偏差不大的情况下, 使用成像区域的平均高程进行拼接即可满足几何无缝拼接的需求; 而在虚拟 CCD “安装” 位置与真实位置的偏离超过限差的情况下, 可以用航天飞机雷达地形测绘 DEM (SRTM-DEM) 等一定精度的 DEM 数据校正地形起伏引起的拼接误差。使用先进陆地观测卫星 (ALOS) 卫星全色遥感立体测绘仪 (PRISM) 传感器三线阵影像作为实验数据, 对前视、下视和后视的多 CCD 影像分别进行拼接。对拼接线的判读结果表明, 影像拼接效果良好。另外, 分别对拼接前和拼接后的前视、后视影像选取同名点进行空间前方交会, 拼接后影像的空间前方交会精度与拼接前影像的空间前方交会精度一致。本文方法, 可以无需 DEM 进行 ALOS PRISM 的内视场拼接, 并使得拼接后影像的立体测图精度无损; 拼接误差分析方法也可以在航空相机影像拼接中推广。

关键词: 虚拟 CCD 线阵; 内视场拼接; 空间前方交会; 先进陆地观测卫星 (ALOS); 全色遥感立体测绘图 (PRISM)

Inner FOV stitching algorithm of spaceborne optical sensor based on the virtual CCD line

Zhang Guo¹, Liu Bin², Jiang Wangshou¹

1. LISMARS, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

Abstract: To obtain bigger swath width, most high-resolution linear push-broom imaging systems use a many CCD chip configuration instead of a single chip configuration. The CCD chips cannot be fixed linear in the focal plane. The question “how to stitch the images obtained by the CCD chips to a seamless single image?” becomes important in the processing of high-resolution satellite images (HRSI). In this paper, an algorithm of inner filed-of-view (FOV) stitching based on the virtual CCD line is shown. With the derivation of the infection to stitching precision caused by height precision, we found that if the virtual CCD is installed near the real CCD, the average height could be used for the stitching algorithm without a loss of precision; otherwise, precise DEM data will be needed. Data from the ALOS/PRISM sensor has been used as test data to verify the algorithm. Through the stitched forward, nadir, and backward images, no position mistakes can be found. A rigorous geometry model of the stitching images also has been made. Comparing the forward intersection results and the original images rigorous sensor model and the stitching images rigorous geometry model, the stitching images has the

收稿日期: 2011-01-26; 修回日期: 2011-06-23

基金项目: 科技部支撑项目 (2011BAB01B01); 国家自然科学基金重点项目 (40930532); 国家高技术研究发展计划 (863) 基金项目 (2008AA121203)

第一作者简介: 张过 (1976—), 男, 副教授, 2005 年于武汉大学获摄影测量与遥感专业博士学位, 主要从事航天摄影测量相关的教学和科研工作。E-mail: guozhang@whu.edu.cn

same orientation accuracy. The ALOS/PRISM images can be stitched without DEM by this method, and the precision of stereoscopic mapping is not being reduced. This method also can be used for combining images from digital aerial cameras.

Key words: virtual CCD line; inner FOV stitching; forward Intersection; advanced land observing satellite (ALOS); panchromatic remote-sensing instrument for stereo mapping (PRISM)

0 引言

在高分辨光学线阵推扫式卫星相机的设计中,为获取较大的幅宽,将多个 CCD(多电荷耦合元件)在焦面上交错安装,通过分光等模式形成近似直线的一条连续 CCD 阵列。但是由于多个 CCD 线阵的安装精度和 TDI-CCD 沿着轨道方向宽度等因素的限制,多 CCD 在焦平面不可能形成一条严格意义上的 CCD 线阵。在摄影测量数据生产中,均使用卫星影像供应商提供的按照成像几何特性和辐射特性拼接后的影像(如 IKONOS^[1]、QuickBird^[2]和 WorldView-2^[3]等)。而影像的拼接精度会直接影响后续摄影测量生产的精度,如在利用 IKONOS 立体像对匹配生产 DEM 时,拼接精度不高会导致 DEM 精度有损失^[4]。亚像素级的多个 CCD 拼接精度是保证 DEM 生产精度的前提^[5]。如何对交错安装的多个 CCD 成像的影像进行高精度的拼接,并对拼接精度进行评价成为了高分辨率遥感卫星应用中亟待解决的问题。

目前,由于对卫星设计参数的保密和卫星应用技术的封锁,关于多 CCD 影像拼接的技术文档和文献较少。对于由印度 IRS-1C 卫星上的全色相机的 3 个交错排列 CCD 成像的多幅影像, Jacobsen 采取简单的影像像面间平移的方式拼接^[6],并利用 17~63 个像面连接点作为检查点,计算像面间平移拼接模型的精度,其模型精度为 0.2~0.5 像素。基于同一原理, Jacobsen 尝试用像面间的仿射变换模型进行拼接,但其精度并不能继续提高^[7]。这是因为, Jacobsen 所使用的方法虽能使拼接后的影像目视无缝,但是拼接后各个扫描行不再是线中心投影,失去了摄影测量线中心投影的特性;此外,其计算的拼接精度为平移模型或者仿射变换模型的精度,并非摄影测量中数据生产的精度,因此不能直接地反映出影像拼接的实际精度。针对国产 CBERS02B HR 卫星 3 个交错排列 TDI-CCD 成像的影像的拼接问题,胡芬^[8]分析了该卫星多个 CCD 成像影像的拼接误差来源,总结出了基于像方和基于物方的两种拼接方案:在基于像方拼接方案中,采用像面平移模型、像面间整体仿射变换模

型和分段仿射变换模型分别对 CBERS02B HR 相机成像影像进行拼接,通过比较发现,分段仿射变换模型拼接算法较优,模型精度可达到 0.180~0.788 像素;在基于物方拼接方案中,利用仿真数据进行基于虚拟 CCD 的物方拼接方案实验,拼接精度为 0.138~1.302 像素。胡芬的基于像方方案的拼接算法与 Jacobsen 的拼接算法中所存在的问题类似;而基于物方方案的拼接算法只用了仿真数据进行实验,且拼接过程中需要使用 SRTM-DEM 作为物方拼接中介;两种方案在对拼接精度的评价上与 Jacobsen 存在相同问题。可见,拼接后的影像不仅要实现目视无缝,而且在线中心投影几何上也应具有无缝特性。此外,针对多 CCD 影像拼接精度评价方法的研究也有待深入。

在航空数码相机中也存在类似星载光学的 CCD 内视场拼接问题^[9]。赵世湖利用航空摄影测量中的二次成像理论进行了面阵航空影像的拼接及误差分析^[10],其误差分析是基于像面的,无法对拼接所引起的物方定位精度进行直接分析。王慧等在面阵 CCD 数字航测相机影像几何拼接误差方面的研究也存在相似的问题^[11]。

针对上述问题,利用基于虚拟 CCD 线阵的内视场的拼接方案,在焦平面上构造出无畸变的 CCD 阵列,对原始多个 CCD 成像影像按照线中心投影成像方式进行重成像,以实现多个 CCD 成像影像的线中心投影无缝拼接。在此基础上,提出采用严密几何模型空间前方交会的方法对拼接精度进行评价,即通过对空间前方交会的高程精度进行检查,从而检验影像拼接对于后续摄影测量生产精度的影响,达到保证拼接影像的高程精度无损失目的。

首先概述基于虚拟 CCD 线阵内拼接算法;然后对虚拟 CCD 与真实 CCD 沿轨排列位置距离进行理论分析,重点讨论存在偏差时,拼接中使用的 DEM 的高程精度或使用该区域平均高程所引起的影像拼接误差。本文使用 ALOS 卫星 PRISM 传感器三线阵影像作为实验数据,对前视、下视和后视的多 CCD 影像分别进行拼接。实验结果表明,影像不但目视拼接无缝,且拼接后的影像进行摄影测量的 3 维重建精度无损。

1 基于虚拟 CCD 线阵的拼接方案及误差分析

以多个 CCD 沿轨道方向安装的位置为基准,将虚拟 CCD“安装”在多个 CCD 沿轨道方向的中心线上,虚拟 CCD 的宽度为真实多个 CCD 垂直轨道方向的整体宽度。如图 1 所示,其中实线表示实际的多个 CCD 线阵,虚线表示虚拟 CCD 线阵, d_1 、 d_2 分别表示虚拟 CCD 与实际 CCD 沿着轨道方向的最大距离。

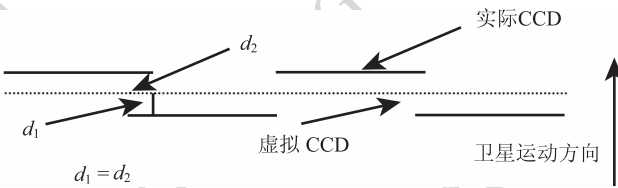


图 1 虚拟 CCD 和实际安装 CCD 在焦面位置相对关系示意图
Fig. 1 Position relationship between the real CCD and the virtual CCD in focal plane

经过虚拟 CCD 重成像的影像有如下特性:

- 1) 垂直轨道方向成像为理想的无畸变的线中心投影成像;
- 2) 沿轨道方向的虚拟线阵的积分时间一致,无积分时间跳变;
- 3) 虚拟 CCD 探元间无辐射差异。

1.1 基于虚拟 CCD 重成像的拼接算法

在各 CCD 经过内检校后,以每个 CCD 探元在相机坐标系或者本体坐标系下的指向角(ψ_x, ψ_y)表示每个探元摄影光束在像方的几何关系^[12]。同样,根据虚拟 CCD 的“安装”位置,按照线中心投影成像原理,计算虚拟 CCD 每个探元在相机坐标系或本体坐标系的指向角。在此基础上,按照如下步骤进行基于虚拟 CCD 的影像拼接:

- 1) 对虚拟 CCD 影像上任意一个像点 P ,利用像点 P 所对应探元的指向角、实际轨道参数和姿态参数,建立虚拟 CCD 影像严密成像几何模型^[13-14],利用该模型将 P 投影到 SRTM-DEM 或该成像区域平均高程面上,得到该点对应的大地坐标;
- 2) 根据实际 CCD 影像的严密成像几何模型,将步骤 1) 中求得的大地坐标投影到实际 CCD 影像上;
- 3) 将实际 CCD 成像影像上的灰度赋予虚拟探元 P 重成像对应的像素;
- 4) 对 CCD 影像所有像点重复以上 3 步获取整

个成像范围的重成像影像。

基于虚拟 CCD 重成像的拼接算法流程如图 2 所示。

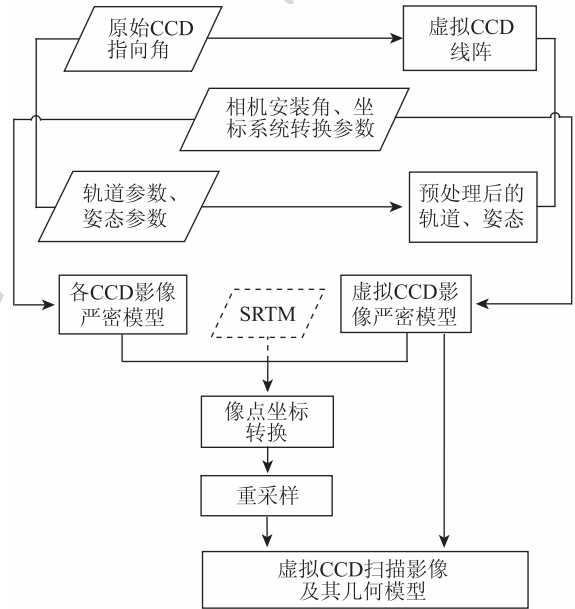


图 2 基于虚拟 CCD 重成像的拼接算法流程
Fig. 2 Workflow of Inner FOV stitching algorithm based on the virtual CCD line

1.2 虚拟 CCD 和实际 CCD 沿轨方向像差理论分析

虚拟 CCD 的“安装”位置和原始 CCD 的安装位置在沿轨方向上存在偏差,该偏差将导致同轨立体或二/三线阵同轨立体成像处理的高程精度的损失。图 3 为推扫式成像过程中垂直于 CCD 线阵的截面图。假设成像区域地形为平地,图中虚拟 CCD 与实际 CCD 与截面的交点(图中黑点所示)成像光线指向存在 $\delta\theta$ 的角度差, θ 为 $\delta\theta$ 的角平分线与垂线的交角。

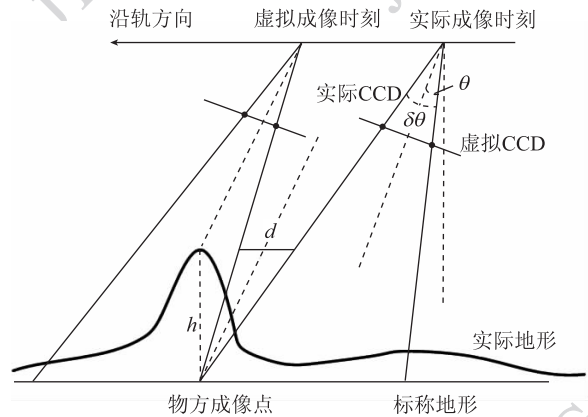


图 3 高程误差对拼接的影响
Fig. 3 Infection to stitching precision caused by height precision

当虚拟 CCD 探元光线的物方投影点的高程(图 3 中为标称地形高程)与该点真实高程的差值为 h 时(如图 3 所示),该地形起伏在像面产生的像差 d 为:

$$d = h[\tan(\theta + \delta\theta/2) - \tan(\theta - \delta\theta/2)] \quad (1)$$

根据三角函数性质,将式(1)展开得

$$d = 2h \tan(\delta\theta/2) [(1 + \tan^2\theta)/(1 - \tan^2\theta \tan^2(\delta\theta/2))] \quad (2)$$

由于虚拟 CCD 和实际 CCD 安装相对于投影中心的角度为 $\delta\theta \approx 0$, 因此 $\tan(\delta\theta/2) \approx \tan(\delta\theta)/2$ 。在实际形成同轨立体中, $\theta < 45^\circ$ (如 ALOS PRISM 为 23.8° , IRS P5 为 26° , IKONOS 为 $30^\circ \sim 45^\circ$, ZY3 为 23°), 因此 $\tan\delta\theta \approx 0, \tan\theta < 1$, 则有 $1 - \tan^2\theta \tan^2(\delta\theta/2) \approx 1$ 。式(2)可以近似为

$$d \approx h \tan(\delta\theta) (1 + \tan^2\theta) \quad (3)$$

在摄影测量中,有

$$\delta_h = \frac{H}{B} \delta_p (m) \quad (4)$$

式中, H 为航高, B 为基线, δ_p 为左右视差的标准差,按像片比例尺换算到以米为单位。 δ_h 为高程误差。

影像上点位误差为 $d(m)$ 时有

$$\delta_p = \sqrt{2}d \quad (5)$$

在航天摄影测量中,高基比 H/B 可以由立体像对的交会角求得

$$H/B = 1/(2 \tan(\varphi/2)) \quad (6)$$

式中, φ 为立体像对的交会角,在 ALOS PRISM 前、后视形成的立体像对中,根据卫星的设计参数可知,交会角为 $23.8^\circ + 23.8^\circ$ (前视、后视的测摆角度相加)。

将式(5)(6)代入式(4)中有

$$\delta_h = \sqrt{2}d/(2 \tan(\varphi/2)) \quad (7)$$

由式(3)可知,虚拟成像过程中,当 $\delta\theta$ 趋近 0 时,即虚拟 CCD 安装位置与真实 CCD 位置偏差很小时,因采用平均高程面引起的像差 d 也趋近为 0,由此引起的高程误差 δ_h 可以忽略。在该情况,可采用该成像区域平均高程,而不需要精确的 DEM。

当 $\delta\theta$ 取值不能被忽略,即虚拟 CCD 安装位置与真实 CCD 位置偏差较大时,需要根据 $\delta\theta$ 和对高程精度 δ_h 的要求,来选取合适精度的 DEM 用于拼接;此时, h 便体现为 DEM 的精度。当 DEM 精度足够高时, d 的取值也趋近为 0,同上推理可知 δ_h 可以忽略,从而满足高程精度。

2 实验验证和分析

ALOS PRISM 传感器的 Level 1B1 级影像为各 CCD 分开存储,并提供各个 CCD 在焦面的精确位置参数,可形成三线阵同轨立体,适合对本文拼接算法的验证。为此,选取 ALOS PRISM 传感器前、中、后视三线阵 Level 1B1 级数据进行基于虚拟 CCD 重成像拼接算法的理论分析和实际拼接误差估计。为了验证前文的理论推导的正确性,实验将在拼接前后影像上选择均匀分布的同名点,进行空间前方交会并计算其高程精度。

2.1 ALOS 卫星 PRISM 传感器介绍

ALOS 卫星的 PRISM 传感器是一个全色波段的传感器,共有前视、下视和后视 3 个相机,能用于立体测量和正射影像的制作^[15]。以下视相机为例,相机用 6 个 CCD 线阵交错排列成一个 CCD 线阵列,每个 CCD 线阵列间有 32 个像素的重叠,如图 4 所示。

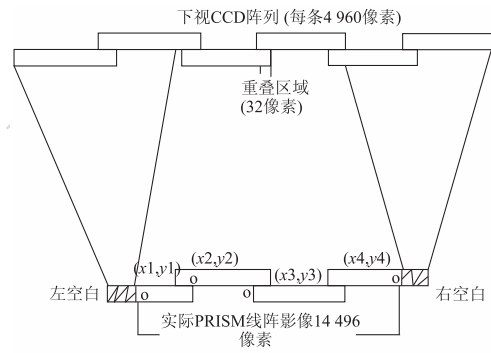


图 4 ALOS PRISM 下视相机的多片 CCD 视场安装位置示意图

Fig. 4 Linear array CCD structure of the PRISM nadir viewing camera

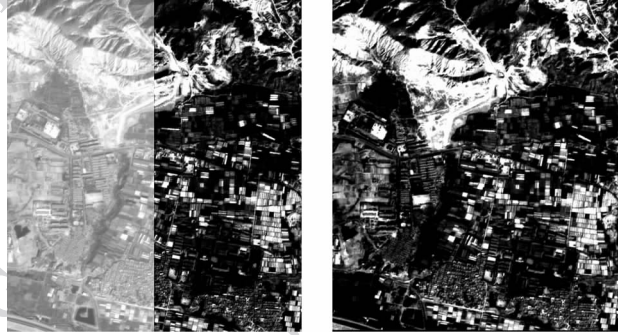
2.2 实验数据

为了说明算法性能与地形起伏的无关性,实验中分别选取了平原地形区域和山地地形区域的 ALOS 三线阵数据进行实验。平原区域的 ALOS 数据为武汉地区 2008 年 2 月 15 日所获取,山地区域的 ALOS 数据为兰州地区 2008 年 4 月 7 日所获取。根据 SRTM-DEM 计算得到武汉影像覆盖地区的平均高程为 100 m,地形起伏高差(最高高程与最低高程的差值,下同)为 200 m;兰州影像覆盖地区的平均高程为 1 857 m,地形起伏高差为 400 m。

2.3 基于虚拟 CCD 影像的拼接目视效果

根据本文算法,对兰州地区的前视、下视和后视数据,及武汉地区的前视、下视和后视数据分别进行

基于虚拟 CCD 线阵的拼接实验。图 5 为拼接处的局部细节图。该细节图显示,拼接处目视完好,没有拼接错位现象,满足目视拼接无缝的要求。



(a) 拼接前

(b) 拼接后

图 5 ALOS PRISM 拼接影像局部细节图

Fig. 5 Details of ALOS PRISM stitching image

2.4 地形起伏对重成像拼接精度的影响分析

以 ALOS PRISM 前视相机为研究对象,分析重成像过程引起的像差,进而分析该像差对高程精度的影响。根据 ALOS 提供的元数据可知,前视相机的多片 CCD 沿着轨道向的安装范围为 $0.001^\circ \sim 0.006^\circ$,虚拟 CCD 安装在 0.0035° 的位置,因此虚拟 CCD 与原始各 CCD 沿轨道向的指向角 $\delta\theta < 0.0025^\circ$,前视 $\theta = \pm 23.8^\circ$ 。根据式(3),对于兰州地区,地形起伏所引起的像差为

$$d_{\max}/m < 400/2 \times \tan(0.0025^\circ) \times (1 + \tan^2(23.8^\circ)) = 0.0104 \quad (8)$$

根据式(7),把像差换算为高程精度,则对于兰州地区有

$$\delta_h/m < \sqrt{2}d_{\max}/(2\tan(\varphi/2)) = \sqrt{2} \times 0.0104/(2\tan(23.8^\circ)) = 0.0167 \quad (9)$$

同理,对于武汉地区,地形起伏引起的像差为

$$d_{\max}/m < 200/2 \times \tan(0.0025^\circ) \times (1 + \tan^2(23.8^\circ)) = 0.0052 \quad (10)$$

换算为高程精度,有

$$\delta_h/m < \sqrt{2}d_{\max}/(2\tan(\varphi/2)) = \sqrt{2} \times 0.0052/(2\tan(23.8^\circ)) = 0.0083 \quad (11)$$

考虑到摄影测量过程中的选点误差,该高程精度损失相对较小。因此,在实际算法应用中使用平均高程带来的精度损失可以忽略不计。

2.5 虚拟成像拼接误差对立体交会精度的影响

为了计算拼接后的影像高程精度损失程度,在拼接前后的前后视影像上选取一定数量的同名点对,利用严密几何模型进行直接空间前方交会^[16],结果如表 1 所示。对于武汉地区和兰州地区的 ALOS PRISM 影像,拼接前后同名点的平面坐标差最大不超过 0.008 m,高程差值不超过 0.017 m;相对于的 2.5 m 的影像分辨率,损失精度在 0.68%。基于虚拟 CCD 且采用该区域的平均高程面为拼接的中介面,对几何定位精度无损。

表 1 拼接前后空间前方交会损失精度

Table 1 Precision loss of Forward Intersection after stitching

实验数据	同名点数	平面坐标差值/m		高程坐标差值/m	
		MAX	RMS	MAX	RMS
武汉前、后视	33	0.008 093	0.002 674	0.010 37	0.003 985
兰州前、后视	15	0.006 91	0.002 68	0.016 56	0.008 992

利用式(6)(8)分别计算兰州地区和武汉地区影像拼接因地形起伏产生的高程损失程度。其中,

兰州地区高程精度损失的理论最大值为 0.0167 m,实验中最大(MAX)高程损失在 0.01656 m,高程损

失的中误差(RMS)为0.008 992 m;武汉地区高程精度损失的理论最大值为0.008 3 m,实验中最大高程损失为0.010 37 m。考虑到计算过程中同名点选取误差等因素的影响,实验结果与理论推导值可以相当,从而验证了理论推导与实验结果的正确性。

3 结 论

针对目前高分辨率遥感卫星利用多 CCD 拼接成像所带来的影像内视场拼接问题,本文对基于虚拟 CCD 线阵重成像的影像拼接算法进行研究,并采用严密模型的空间前方交会方式对拼接精度进行评价。利用 ALOS 卫星 PRISM 传感器的 Level1 B1 数据对本文提出的无需 DEM 的基于虚拟 CCD 线阵重成像算法进行了验证,实验结果表明,该拼接算法生成的拼接影像不仅在目视上无缝,而且空间前方交会精度无损失,是一种较好的拼接算法。

由于 ALOS PRISM 传感器的内方位元素等参数经过了严格的实验室校正与在轨检校,且各 CCD 沿着轨道向的距离较近,使得该拼接算法能简单高效地获得较好的结果。这对国产高分辨率卫星 CCD 器件焦面安装位置的设计以及卫星影像应用水平的提高具有借鉴意义。

此外,由于航空摄影测量中二次成像理论影像拼接及误差分析方法与本文的拼接及误差分析方法具有相似性^[9-11],因此该结论还可以推广到航空相机影像拼接技术中。

参考文献(References)

[1] Dial G F, Bowen H, Gerlach B, et al. IKONOS satellite, sensor, imagery, and products [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 88(1-2): 23-36.

[2] Eisenbeiss H, Baltsavias E, Pateraki M, et al. Potential of IKONOS and QuickBird imagery for accurate 3D-point positioning, orthoimage and DSM Generation [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 35(Part B3): 522-528.

[3] Kurt J V, Fidel P J, A. Stewart W. Rigorous Sensor Modeling and Trangulation for Orbview-3 [EB/OL]. (2006-5-5) [2011-6-20]. <http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/reno2006/0030.pdf>.

[4] Zhang L, Gruen A. Multi-image matching for DSM generation from IKONOS imagery [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(3): 195-211.

[5] Zhang L, Gruen A. Automatic DSM generation from linear array imagery data [C] // Proceedings of IAPRS Congress. Turkey: IAPRS 2004; 128-133.

[6] Jacobsen K, Hannover Univ. Geometric and information potential of IRS-1C PAN-images [J]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999, (1): 428-430.

[7] Jacobsen K. Calibration of IRS-1C PAN-camera [C] // ISPRS Workshop on Sensors and Mapping from Space. Hannover, Germany: German Society for Photogrammetry and Remote Sensing ISPRS, 1997: 163-170.

[8] Hu F. Research on inner FOV stitching theories and algorithms for sub-images of three non-collinear TDI CCD chips [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. [胡芬. 三片非共线 TDI CCD 成像数据内视场拼接理论与算法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2010.]

[9] Zhang Z X. Aspects on aerial digital cameras [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2004, 13(4): 1-5. [张祖勋. 航空数码相机及其相关问题 [J]. 测绘工程, 2004, 13(4): 1-5.]

[10] Zhao S H. Digital aerial camera's geometric radiative modeling and its validation in twice imaging prototype system [D]. Beijing: Peking University, 2010. [赵世湖. 数字航摄影机几何辐射传输模型的建立及二次成像原型系统验证 [D]. 北京: 北京大学, 2010.]

[11] Wang H, Wu Y D, Zhang Y S. Modeling and analyzing of geometric joint error for CCD matrix images of digital aerial camera [J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2003, 20(4): 257-262. [王慧, 吴云东, 张永生. 面阵 CCD 数字航摄影机影像几何拼接误差模型与分析 [J]. 测绘学院学报, 2003, 20(4): 257-262.]

[12] JAXA. ALOS PRISM Level 1 Product Format Descriptions [EB/OL]. (2009-6-23) [2011-6-20]. <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/doc/format.htm>.

[13] Zhang G. Rectification for high resolution remote sensing image under lack of ground control points [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. [张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像的几何纠正 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005.]

[14] Zhu X Y, Zhang G, Tang X M, et al. Research and application of CBRS02B image geometric exterior calibration [J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(3): 16-18. [祝小勇, 张过, 唐新明, 等. 资源一号 02B 卫星影像几何外检校研究及应用 [J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(3): 16-18.]

[15] Kocaman S, Gruen A. Orientation and self-calibration of ALOS PRISM imagery [J]. The Photogrammetric Record, 2008, 23(123): 323-340.

[16] Wang R X. Comparison of the height accuracy obtained from EFP bundle adjustment and forward intersection using simulation space photogrammetric data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(6): 487-490. [王任享. 利用模拟卫星摄影测量数据按 EFP 法光束法平差与直接前方交会计算高程的精度比较 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, 26(6): 487-490.]