

文章编号 1004-924X(2023)14-2147-13

## 高分七号卫星立体影像精细三维重建

巩丹超<sup>1,2</sup>, 刘松林<sup>1,2</sup>, 韩轶龙<sup>3,4\*</sup>, 张威<sup>1,2</sup>

(1. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054;

3. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

4. 山东省“3S”工程技术研究中心, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 为了实现高分七号卫星亚米级影像的高精度精细三维重建, 针对高分七号卫星前后视线阵相机的成像特点, 围绕影像的定向、影像畸变消除、密集匹配方法优化等方面, 提出一套完整的精细三维重建方法和流程。利用影像间连接点几何约束关系对有理函数模型进行了二次定向消除系统误差; 其次采用一种基于物方投影面的水平纠正方法对原始影像进行纠正, 消除了立体像对之间大的倾斜误差; 在密集匹配阶段, 将全球公开数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据作为视差约束, 同时引入顾及影像灰度和特征信息的AD-Census作为匹配测度, 有效削弱重复纹理引起的匹配错误问题, 提升了数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)的质量。利用覆盖我国宁夏和新疆某地的两组高分七号的立体影像进行了试验, 结果表明本文所提出方法可将相对误差精度由平差前的0.847 pixel和0.725 pixel分别提升到平差后的0.652 pixel和0.593 pixel, 相对误差精度最大可提高23.02%, 基于物方投影面的水平纠正方法能够显著消除大倾角差异带来的几何畸变, 对高分七号卫星影像取得了较好质量的DSM产品, 尤其是对于小尺度密集建筑物区域的重复纹理取得了较好的效果。

**关键词:** 三维重建; 有理函数模型; 影像纠正; 影像匹配; 半全局匹配

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20233114.2147

## Fine 3D reconstruction methods with Gaofen-7 satellite stereo images

GONG Danchao<sup>1,2</sup>, LIU Songlin<sup>1,2</sup>, HAN Yilong<sup>3,4\*</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;

3. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

4. Research Center of Engineering and Technology for "3S"-GPS, RS and GIS, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

\* Corresponding author, E-mail: hanyl@sdust.edu.cn

**Abstract:** To achieve high-precision and fine 3D reconstruction with the Gaofen-7 satellite sub-meter-level

收稿日期: 2022-08-12; 修订日期: 2022-10-14.

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2022QD141); 国家自然科学基金资助项目(No. 62101395, No.42271273, No. 42201278)

images, this paper proposes a method that focuses on the relative error correction of stereo pairs, image horizontal plane correction, and semi-global matching optimization, forming a fine 3D reconstruction pipeline. First, concerning the relative error in the orientation model of Gaofen-7 stereo images, the geometric constraint relationship of the connection point among images is used to eliminate the systematic error of the rational function model. Second, a horizontal correction method based on the projection plane of the object is used to correct the original image; this eliminates the large inclination error difference between stereo images and provides a better data basis for subsequent processes. In the dense matching stage, global publicly available digital elevation model (DEM) data are used as the disparity constraint. AD-Census, which consider both the grayscale and feature information of the image, is employed as the matching cost metric, addressing the matching error problem caused by repeated texture and improving the digital surface model (DSM) production. The results of experiments conducted using Gaofen-7 stereo images covering areas in Ningxia and Xinjiang indicate that the proposed method can improve the relative error accuracy from 0.847 and 0.725 pixels to 0.652 and 0.593 pixels, respectively, representing up to 23.02% improvement. The horizontal correction method based on the projection plane of the object can significantly eliminate the geometric distortion caused by the difference in large inclination angle, and good-quality DSM products can be obtained, especially for the repetitive texture of small-scale dense building areas.

**Key words:** 3D reconstruction; Rational Function Model (RFM); image correction; image matching; semi-global matching

## 1 引言

由于高分辨率光学卫星具有视角高、观测范围广、生存能力强、能长期稳定运行等突出优势,在大尺度、多时相对地观测方面,有着其他传感器平台所无可比拟的优势。高分辨率光学卫星广泛应用于国土、测绘、军事等领域,具有重大的经济和军事价值<sup>[1-5]</sup>,目前世界各国都在大力发展卫星技术。随着卫星平台的不断发展,以及星载传感器摄影技术的不断进步,遥感影像的空间分辨率和时间分辨率不断提高,卫星测绘能力不断提高<sup>[6-8]</sup>,卫星应用规模快速增长<sup>[9-10]</sup>。

2019年11月4日,我国新一代高精度立体测绘卫星“高分七号”发射成功。高分七号是我国首颗民用亚米级高分辨率光学传输型立体测绘卫星。高分七号以立体测绘相机、激光测距仪等为有效载荷,一次摄影可同时获取20 km幅宽的0.8 m分辨率两线阵立体、3.2 m分辨率多光谱,主要用于实现1:10 000立体测图生产及更大比例尺基础地理信息产品更新,可以有效满足国土资源调查与监测、防灾减灾、农林水利、生态环境、城市规划与建设、交通和国防建设等领域对高精度基础测绘数据的需求<sup>[11-12]</sup>。现有的遥感数据处理技术体系基本满足2米以下分辨率卫星影

像的自动化处理和应用需求<sup>[2]</sup>。对于亚米级高分辨率影像,影像细节层次丰富,信息量大,为遥感数据处理带来新的机遇和挑战<sup>[6-8]</sup>。如何发挥高分辨率影像的特点,实现精细的三维重建是当前高分辨率卫星影像三维重建的热点问题。本文针对高分七号卫星影像的特点,从立体影像相对误差改正、影像水平纠正以及密集匹配等方面,研究立体影像精细三维重建的算法和模型,实现对兴趣区域的高精度三维重建,从而满足高分七号海量遥感数据的处理、高精度三维重建以及数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)快速获取的应用需求。

## 2 高分七号卫星影像精细三维重建

为了实现亚米级卫星影像的高精度精细三维重建,本文针对高分七号卫星前后视线阵相机的成像特点,围绕影像的定向、影像畸变消除、密集匹配方法优化等方面,提出一套完整的精细摄影测量处理方法和流程。具体流程如图1(b)所示。该方法首先利用立体像对的同名像点通过平差的方法来改正有理多项式系数(Rational Polynomial Coefficients, RPC)的相对误差,通过一个像方空间的偏移量来描述左右影

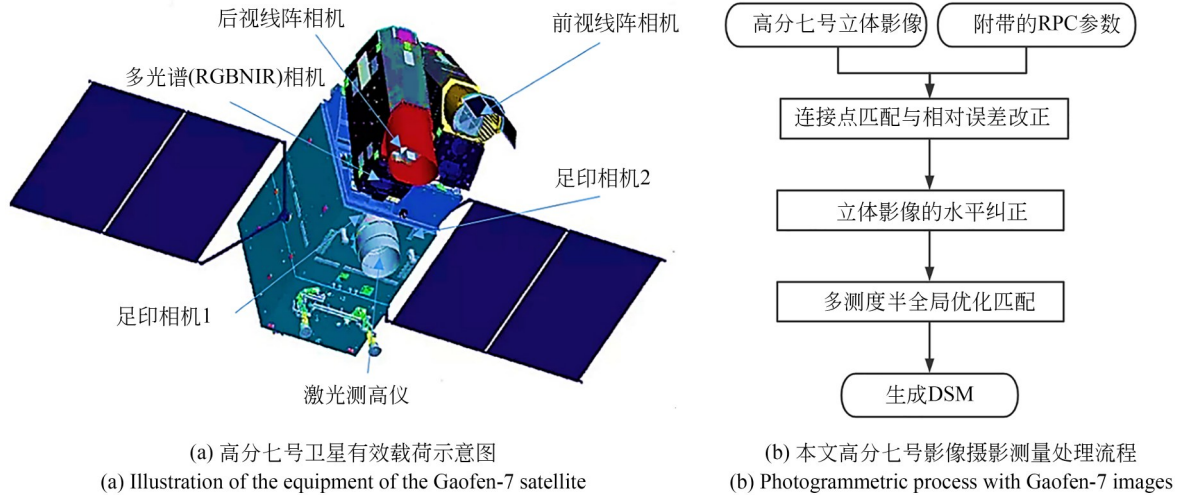


图 1 高分七号卫星有效载荷示意图与本文提出的精细三维重建流程  
Fig. 1 Payload mounted on the Gaofen-7 satellite and the proposed fine 3Dreconstructionpipeline

像之间在无控制点条件下的相对定位误差,达到精化RPC的目的;其次借鉴航空面阵影像的水平纠正理论,采用基于RPC的线阵影像水平纠正方法,对前视和后视影像进行水平纠正,消除立体影像之间的尺度和旋转等畸变问题;最后提出一种全球公开DEM(如SRTM, Shuttle Radar Topography Mission)数据约束下的多测度半全局匹配算法(AD-Census tSGM),可以在一定程度上减少弱纹理区域带来的误匹配问题。

2.1 高分七号卫星立体像对的相对误差改正

影像定向是实现三维重建的基础,定向精度直接决定后续摄影测量处理的精度。现有的卫星影像通常采用直接定位的方式,将严格传感器模型进行高精度拟合转换为RPC传感器模型,实现后续的影像处理。严格传感器模型通常会包含系统的轨道定位误差、星敏感器误差以及内定向参数误差等,这些误差也会传递到RPC中。对于高分辨率卫星遥感影像,学者们围绕RPC传感器模型的误差改正开展了大量的研究<sup>[13-17]</sup>。现有的研究大多集中在通过光束法区域网平差来改正每个影像的定位误差,实际平差后,单个立体相对之间可能会存在一定的相对误差<sup>[18]</sup>。因此针对立体影像,有必要在匹配之前,针对PRC的相对误差单独进行改正处理。

2005年Fraser和Groddecki研究发现对于IKONOS等高分辨率卫星影像,由于卫星轨道较高(一般大于500km),成像视场角较小等特点,

单景RPC模型的几何定位误差可以由通常可以用一个零阶多项式(即水平和垂直偏移)来描述<sup>[13]</sup>,具体如式(1):

$$\begin{aligned} r_n &= \frac{p_1(X_n, Y_n, Z_n)}{p_2(X_n, Y_n, Z_n)} + a_0 \\ c_n &= \frac{p_3(X_n, Y_n, Z_n)}{p_4(X_n, Y_n, Z_n)} + b_0 \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中,  $p_1, p_2, p_3, p_4$  一般取为三阶多项式,其中共包含80个有理多项式系数(Rational Polynomial Coefficient, RPC),并且有理函数模型中的RPC各参数没有实际的物理意义,  $a_0, b_0$  为单景影像RPC误差模型添加的水平和垂直偏移。对于一个立体像对来说,则存在如式(2)所示的关系:

$$\begin{aligned} r_n^l &= \frac{p_1^l(X_n^l, Y_n^l, Z_n^l)}{p_2^l(X_n^l, Y_n^l, Z_n^l)} + a_0^l \\ c_n^l &= \frac{p_3^l(X_n^l, Y_n^l, Z_n^l)}{p_4^l(X_n^l, Y_n^l, Z_n^l)} + b_0^l \\ r_n^r &= \frac{p_1^r(X_n^r, Y_n^r, Z_n^r)}{p_2^r(X_n^r, Y_n^r, Z_n^r)} + a_0^r \\ c_n^r &= \frac{p_3^r(X_n^r, Y_n^r, Z_n^r)}{p_4^r(X_n^r, Y_n^r, Z_n^r)} + b_0^r \end{aligned} \quad (2)$$

根据上述模型可以看出,单像RPC模型误差在像方表现为一个水平和垂直的偏移;对于一个立体像对,则表现为两个关系独立的偏移,会对后续的处理特别是匹配处理产生重要的影响。如果匹配处理采用核线影像一维匹配,这种偏移

会造成上下视差无法消除,从而影响核线精度<sup>[9-13]</sup>。如果匹配处理采用二维匹配处理,这种偏移会影响匹配的搜索范围,进而影响匹配的速度和可靠性。考虑影像匹配实际上是一个相对位置关系的搜索过程,可以根据上述模型作进一步简化,以立体像对的左像作为基准,假设左像的偏移为零,则右像的偏移为:

$$\begin{aligned} r_n^r &= \frac{p_1^r(X_n^r, Y_n^r, Z_n^r)}{p_2^l(X_n^l, Y_n^l, Z_n^l)} + \Delta a \\ c_n^r &= \frac{p_3^r(X_n^r, Y_n^r, Z_n^r)}{p_4^l(X_n^l, Y_n^l, Z_n^l)} + \Delta b, \quad (3) \\ \Delta a &= a_0^r - a_0^l \\ \Delta b &= b_0^r - b_0^l \end{aligned}$$

式(3)即为本文立体像对 RPC 相对误差改正模型。

## 2.2 基于物方投影面的水平纠正方法

高分七号测绘相机采用双线阵立体成像模式,前视倾角 $26^\circ$ ,后视影像倾角 $-5^\circ$ 。大的摄影倾角会造成影像的几何畸变,特别是在高大建筑物密集的城市区域尤为明显,为后续的影像处理带来不便。目前主流的匹配方法均是基于像素和灰度的整体匹配方法,立体像对之间的畸变会显著影响匹配的精度和可靠性。为了实现精确和可靠的匹配,必须消除这种畸变。本文设计了一种大摄影倾角卫星影像的纠正方法,具体原理如图2所示。

图2具体描述并展示了对于线阵 CCD 遥感影像如何生成水平影像的几何过程。对一景线

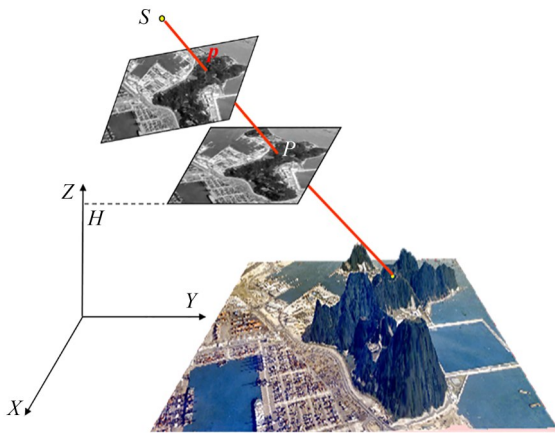


图2 线阵 CCD 影像倾斜像片和水平像片的几何关系

Fig.2 Geometric relationship between a linear array CCD oblique image and a horizontal rectified image

阵 CCD 遥感影像,如果已有影像附带的有理函数模型和影像上的一个像点 $p(S, L)$ ,按照经典单片的定位理论,可以确定一条通过该像点和其对应的投影中心的空间光线,如果有一个水平面,其高程为 $H$ ,那么这个平面和光线的交点就是 $P(X, Y, Z)$ 。如果将所有的像点都投影到这个物方的水平面上,就可以得到一个与传统框幅式遥感影像类似的水平像片。这就是基于有理函数模型的水平影像生成的基本思想<sup>[19-23]</sup>。当所有的点都投影到物方平面上后,在该平面上根据原始倾斜像片的分辨率进行影像的重采样就可以得到水平影像。物方水平面的高程确定可以取摄影区域的平均高程,而卫星影像 RPC 参数的 height\_offset 参数表示测区的地形高程平均值。

## 2.3 多测度半全局密集匹配优化算法

德国宇航局的 Heiko Hirschmüller 在 2005 年提出了经典的半全局密集匹配算法 (Semi Global Matching, SGM)<sup>[24-25]</sup>。SGM 算法根据密集匹配问题,建立一个全局的能量函数,通过 8~16 个方向的一维动态规划,如式(4)所示,并将各个方向的动态规划结果累加,得到全局能量函数的近似最优解,作为密集匹配最终结果。

$$\begin{aligned} L_r(p, d) &= C(p, d) + \\ \min & \left\{ \begin{array}{l} L_r(p-1, d) \\ L_r(p-1, d-1) + P_1 \\ L_r(p-1, d+1) + P_1 \\ \min_k L_r(p-1, k) + P_2 \end{array} \right\} - \min_i L_r(p-1, i), \quad (4) \end{aligned}$$

其中: $L(p, d)$ 表示像素 $p$ 在当前路径对应视差 $d$ 的累积代价; $r$ 表示路径的方向; $C(p, d)$ 表示当前像素 $p$ 对应视差 $d$ 的代价; $p-1$ 表示在当前路径上,像素 $p$ 的前一个像素。

根据经典的 SGM 方法,一般可采用式(5),对整张影像进行 8~16 个方向的代价累积,最后对各个方向的累积结果相加,得到最终的代价积聚结果:

$$S(p, d) = \sum_r L_r(p, d), \quad (5)$$

其中: $S$ 表示对各个方向代价积聚结果相加后,得到的总体代价积聚结果。根据代价积聚结果进

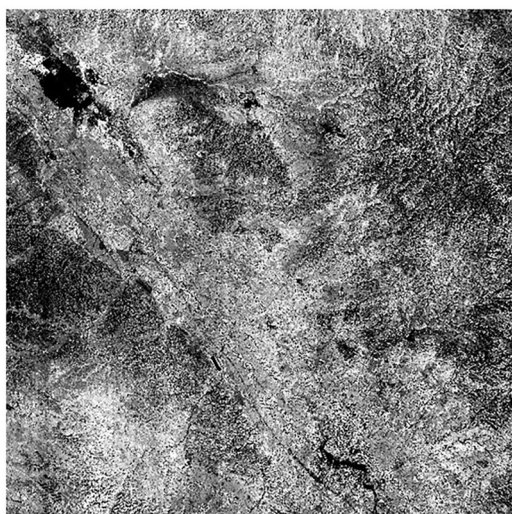


### 3 实验数据与方法

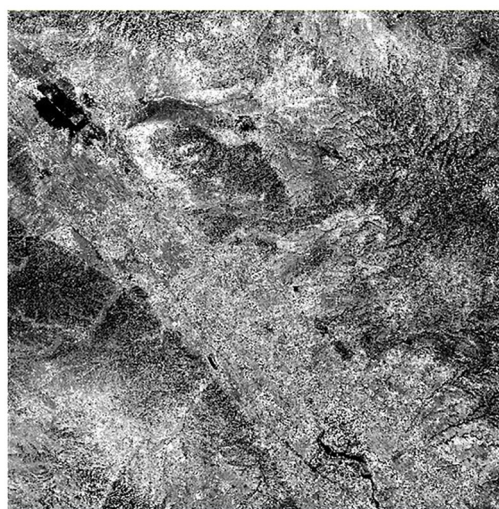
#### 3.1 实验数据及覆盖区域

为了检验本文三维重建方法的效果,实验选择了两组高分七号立体影像,其中数据1为2021年3月的覆盖宁夏某地区的一对立体影像,如图4(a)和图4(b)所示;数据2为2021年9月的新疆某

地区的一对立体影像,如图4(c)和图4(d)所示。两组数据影像质量均良好,几乎无云层覆盖,数据1高差1500 m左右,影像覆盖区域的地表既有山区也有城镇区域,数据2高差500 m左右,影像覆盖区域主要为城市区域,为本次试验提供了较好的数据基础。本文实验所选用的两组数据均包含影像数据以及对应的RPC定向参数文件。



(a) 宁夏某区域高分七号前视影像  
(a) Gaofen-7 forward image in test area in Ningxia



(b) 宁夏某区域高分七号后视影像  
(b) Gaofen-7 backward image in test area in Ningxia



(c) 新疆某区域高分七号前视影像  
(c) Gaofen-7 forward image in test area in Xinjiang



(d) 新疆某区域高分七号后视影像  
(d) Gaofen-7 backward image in test area in Xinjiang

图4 覆盖宁夏某地和新疆某地的两组高分七号立体影像

Fig. 4 Gaofen-7 image pair in a test area in Ningxia and Xinjiang, China

#### 3.2 实验方法

本文选用覆盖宁夏某地和新疆某地的两组高分七号立体影像数据,对提出的精细摄影测量

处理各步骤进行详细验证和精度对比分析。因缺少对应的LiDAR真值,故最终DSM结果依靠本文方法和经典的tSGM方法,结合生成的正射

影像,重点针对弱纹理和重复纹理区域进行目视评价。具体实验方案如图 5 所示。

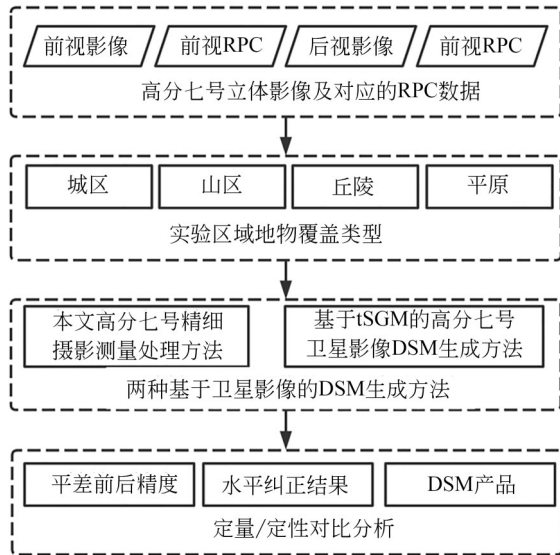


图 5 高分七号立体影像三维重建实验方案

Fig. 5 Gaofen-7 image pair 3D reconstruction experiment

本项目选用的高分七号高分分辨率卫星影像数据含前后视影像,如图 4 所示,以及附带的 RPC 文件,影像覆盖区域地物类型丰富,包含平原,城市,山区,丘陵等地形,对比分析本文所提出的方法以及 tSGM 方法的三维重建效果,测试评估两种在平原、山区、城市等区域的三维重建质量,实现高分七号卫星立体影像精细摄影测量处理的目的。重点关注处理流程中的三个关键步骤,设计了三种质量分析的测度,包括:(1)平差前后精度;(2)水平纠正结果对比;(3)DSM 产品质量定性评价。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 高分七号卫星立体像对相对误差改正结果

按照本文 3.2 节的实验方案,首先对所提出的高分七号卫星立体像对相对误差改正进行实验分析。对单景立体影像的前后视影像进行基于连接点的二次定向,最后利用像点反投影误差的中误差来评价定向精度。表 1 给出影像相对误差改正前的结果。由表 1 可以看出,相对误差改正前,行列方向均存在子像素级的偏移。

表 1 相对误差改正结果

Tab. 1 Relative error correction result (pixel)

右像偏移	$\Delta a$	$\Delta b$
数据 1 偏移量	0.952	0.016
数据 2 偏移量	0.857	0.035

表 2 给出了相对误差改正后的对比结果,由表 2 可知,通过基于连接点的二次定向后,能够有效提高立体像对的平差精度。

表 2 对误差改正精度对比结果

Tab. 2 Accuracy comparison of error correction results (pixel)

统计项	连接点数目	平差前精度	平差后精度
数据 1 精度结果	9 758	0.847	0.652
数据 2 精度结果	8 246	0.725	0.593

综合上述两个表格的统计结果进行分析,首先从表 1 定向结果来看,两个模型之间确实存在水平和垂直方向的偏移,从表 2 的测试结果可以看出,通过二次定向能够提高立体像对内部符合精度,其中数据 1 精度提升 23.02%,数据 2 精度提升 18.21%。

### 4.2 基于物方投影面的水平纠正方法结果

完成相对误差改正后,利用本文基于物方投影面的水平纠正方法,对左右影像进行纠正,新生成两景水平影像。由于前视影像侧摆角度  $26^\circ$ ,后视是  $-5^\circ$ ,两者之间几何差异显著。水平纠正后几何差异改善非常明显,两组数据水平纠正后效果接近,受篇幅所限,图 6 给出了数据 1 的两处局部区域纠正前后的对比结果。从图 6(a)和图 6(b)可以看出,前后视影像的差异非常明显,具体表现为分辨率差异,前视影像由于大角度侧摆,分辨率也降低,因此对应同一地面区域,前视影像块像幅也减小了。通过纠正后的图 6(c)和图 6(d)可以看出,前视与后视影像的几何形状能够大致保持相似,没有分辨率的显著差异。从图 6 的对比结果可以看出,通过水平纠正,能够显著消除大倾角差异带来的几何畸变。



(a) 原始影像 (数据1前视局部)  
(a) Original Image (data-1 forward)



(b) 原始影像 (数据1后视局部)  
(b) Original Image (data-1 backward)



(c) 水平纠正影像 (数据1前视局部)  
(c) Horizontal Corrected Image (data-1 forward)



(d) 水平纠正影像 (数据1后视局部)  
(d) Horizontal Corrected Image (data-1 backward)

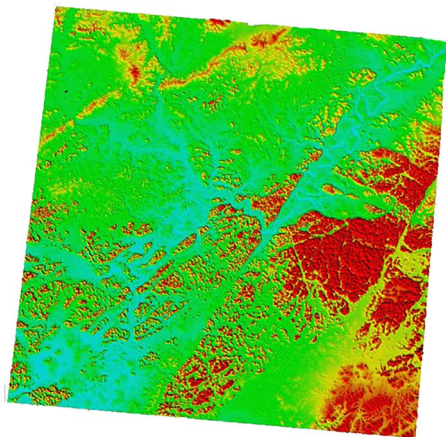
图 6 影像水平纠正后局部结果对比

Fig. 6 Comparison of horizontal correction on enlarged Gaofen-7 satellite stereo image

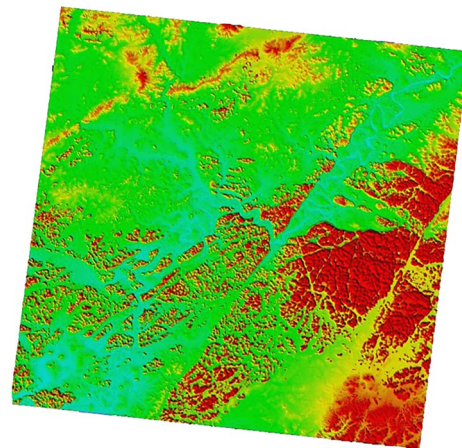
4.3 多测度分层半全局密集匹配结果

利用整景影像采用本文提出的方法和 tSGM

方法生产 DSM。对比了 tSGM 算法和本文算法的差异,整体 DSM 生成结果如图 7 所示,由图 7



(a) tSGM方法生成的DSM(数据1)  
(a) DSM generated by the tSGM method (data-1)



(b) 本文方法生成的DSM(数据1)  
(b) DSM generated by the tSGM method (data-1)

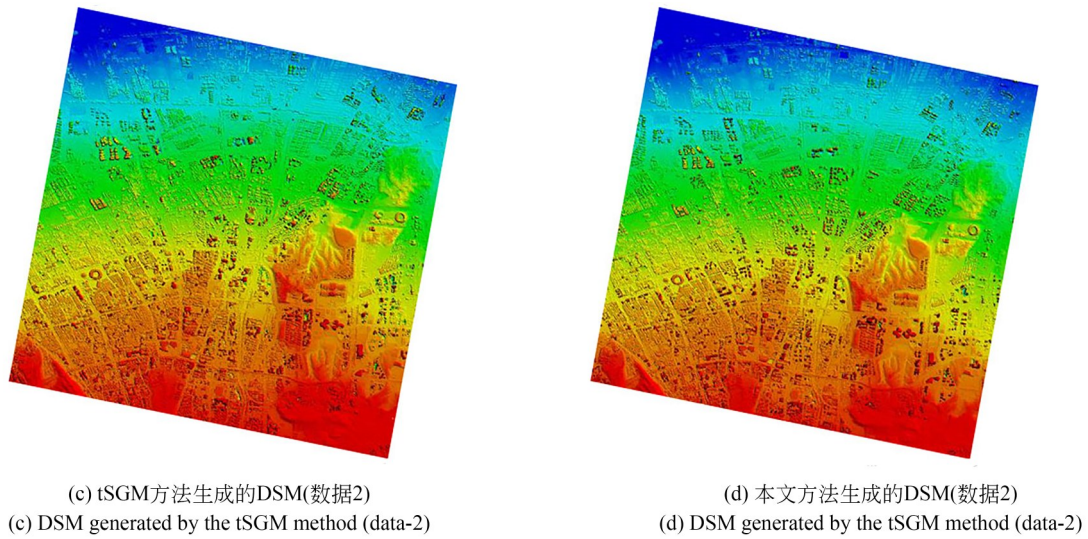


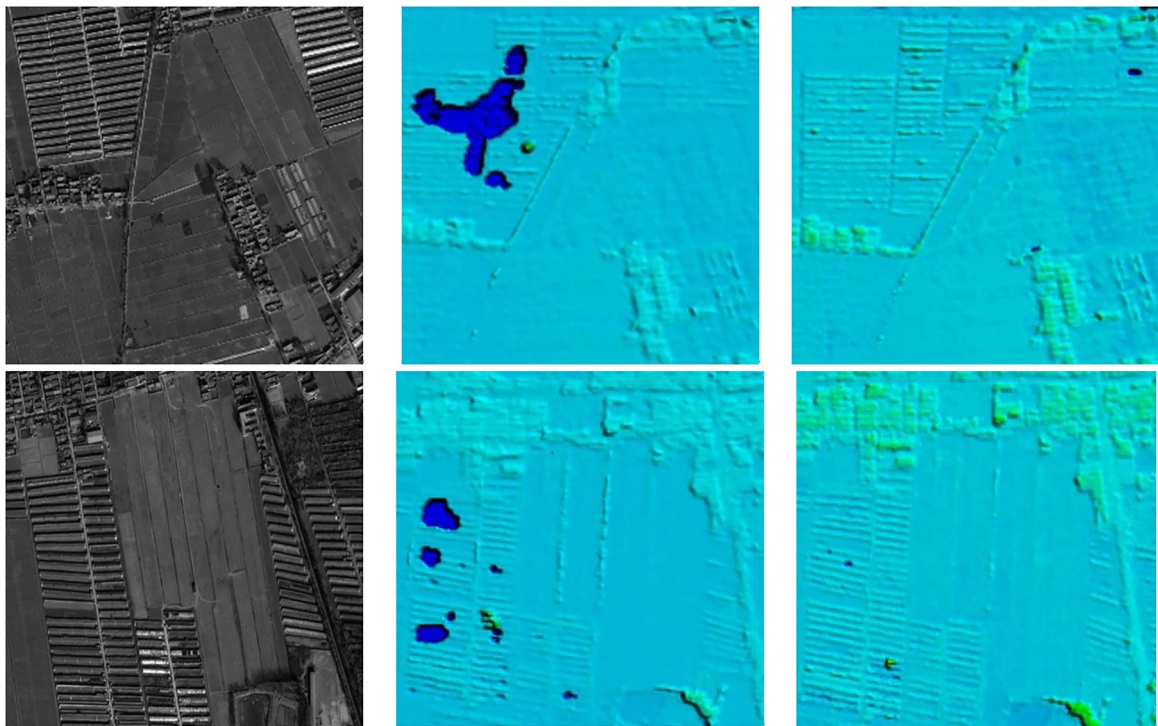
图 7 整景影像 DSM 结果对比

Fig. 7 Comparison of DSM results for whole images view

可知,两种半全局匹配方法均能较好的恢复立体像对覆盖区域内的地形地貌。为了更好地定性对比两种密集匹配算法结果的细节,本文另外从整景 DSM 中选取两组不同局部区域的 DSM 数据,放大对比结果如图 8 所示(彩图见期刊电子版)。图 8(a)和图 8(d)两列为两组数据对应区域的局部正射影像,图 8(b)和图 8(e)两列为两组数据的采用 tSGM 匹配方法得到的局部 DSM 结

果,图 8(c)和图 8(f)两列为两组数据采用本文方法得到的局部 DSM 结果。

图 8(b)、图 8(c)以及图 8(e)、图 8(f)两列对比来看,对于密集建筑物区域,重复纹理的特性非常明显,对匹配的影响也是非常显著的。与 tSGM 方法相比,本文提出的方法可以较好的抑制这种显著的匹配错误,得到的 DSM 中建筑物轮廓更为清晰精确,图 8(e)、图 8(f)两列中红色



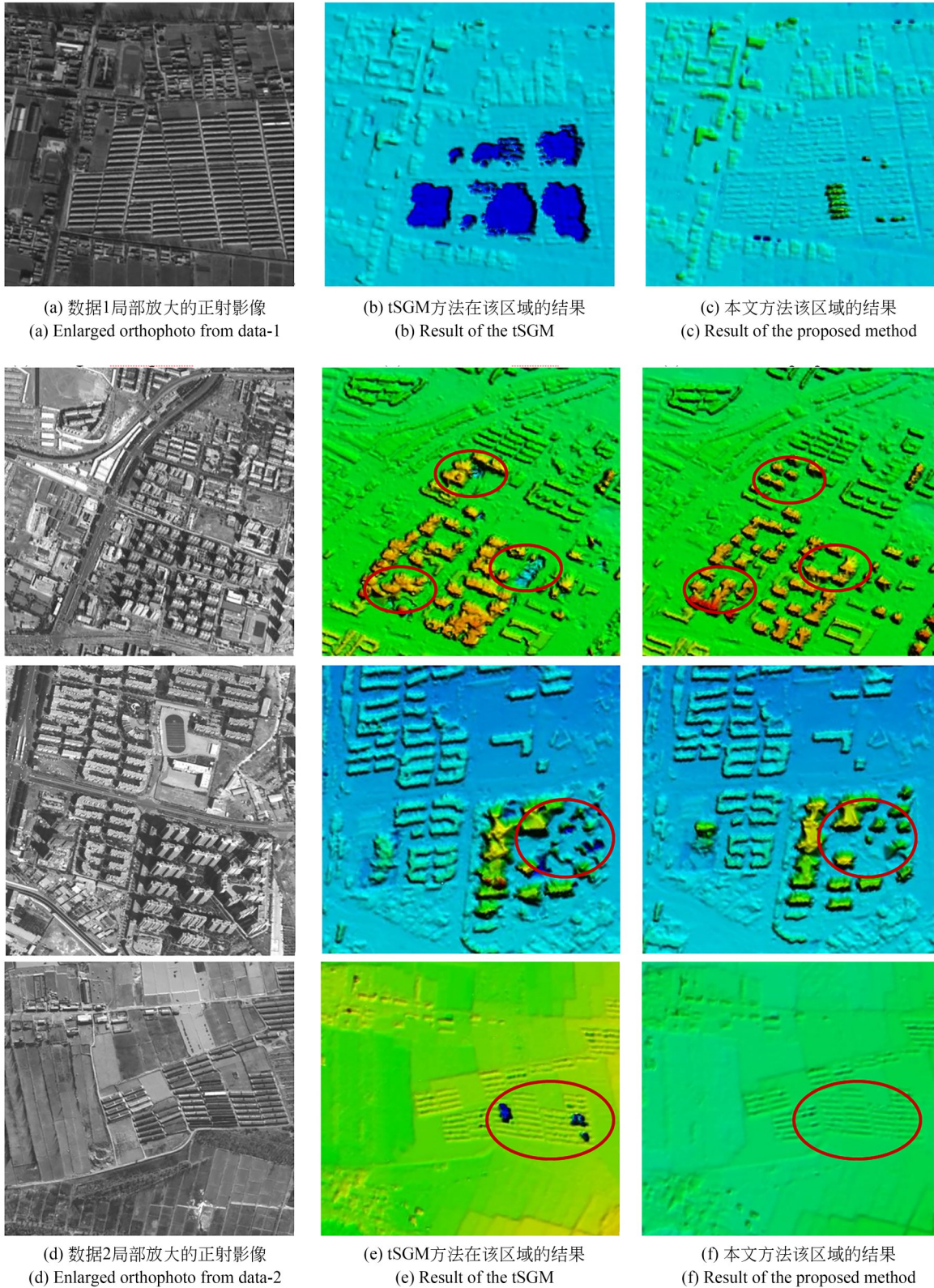


图8 本文方法和tSGM方法在两组数据局部区域的DSM结果对比

Fig. 8 Comparison on the enlarged DSM results of the proposed method and the tSGM method

椭圆形标示区域,可以非常明显的观察到这一改进。从图8(c)可以看出对于一些大的匹配粗差

有着较好的抑制,但仍然有一些深蓝色的斑点区域,在这些区域重复纹理的影响依然存在,存在

匹配错误问题。重复纹理的类型是非常复杂的,不同的纹理模式对匹配的影响是不同的,这是摄影测量和计算机视觉领域一直关注,但至今没有得到很好解决的问题。本文所提出的精细摄影测量处理方法对于密集建筑物区域的重复纹理问题,并取得了初步的效果。

## 5 结 论

本文针对高分七号立体影像定向模型中存在的相对误差,利用影像间连接点几何约束关系对有理函数模型进行了二次定向消除系统误差;其次采用一种基于物方投影面的水平纠正方法对原始影像进行纠正,消除了立体像对之间大的倾斜误差差异,为后续的影像匹配提供了比较好的数据基础;最后在密集匹配阶段,将外部DEM数据作为视差约束,同时引入顾及影像灰度和特征信息的 AD-Census 作为匹配测度,削弱了重复

纹理引起的匹配错误问题,提升了 DSM 的生成效果。利用高分七号的立体影像进行了试验,结果表明本文所提出的精细摄影测量处理方法对高分辨率卫星影像的三维重建具有较好的效果。本文所提出方法将相对误差精度由平差前的 0.847 pixels 和 0.725 pixels 分别提升到平差后的 0.652 pixels 和 0.593 pixels,相对误差精度最大可提高 23.02%,基于物方投影面的水平纠正方法能够显著消除大倾角差异带来的几何畸变,对高分七号卫星影像取得了较好质量的 DSM 产品,尤其是对于小尺度密集建筑物区域的重复纹理取得了较好的效果。本文所提出的方法相较于目前行业常用的 tSGM 方法能够生成质量更好且匹配完整度的 DSM 产品,为合理充分利用高分七号立体测绘卫星影像进行全球测图等应用提供了方法参考。如何更好地消除大区域的重复纹理问题对匹配的影响,这是本文后续进一步研究的重点。

## 参考文献:

- [1] 赵杰,陈小梅,侯玮旻,等. 基于城市遥感卫星影像对的立体匹配[J]. 光学精密工程, 2022, 30(7):830-839.  
ZHAO J, CHEN X M, HOU W M, *et al.* Stereo matching based on urban satellite remote sensing image pair[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(7): 830-839. (in Chinese)
- [2] 简剑锋,胡燕,李新涛. 基于天绘一号卫星影像的大范围高精度数字高程模型[J]. 光学精密工程, 2017,25(12z): 152-159.  
JIAN J F, HU Y, LI X T. Digital elevation model with large scale and high precision based on image of TH-01 mapping satellite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,25(12z): 152-159. (in Chinese)
- [3] 张永军,张祖勋,龚健雅. 天空地多源遥感数据的广义摄影测量学[J]. 测绘学报, 2021, 50(1)1-11  
ZHANG Y J, ZHANG Z X, GONG J Y. Generalized photogrammetry of spaceborne, airborne and terrestrial multi-source remote sensing datasets[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(1)1-11(in Chinese)
- [4] 王任享,王建荣. 我国卫星摄影测量发展及其进步[J]. 测绘学报, 2022, 51(6)804-810  
WANG R X, WANG J R. Development and progress of satellite photogrammetry in China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6) 804-810(in Chinese)
- [5] 张永军,万一,史文中,等. 多源卫星影像的摄影测量遥感智能处理技术框架与初步实践[J]. 测绘学报, 2021, 50(8)1068-1083  
ZHANG Y J, WAN Y, SHI W Z, *et al.* Technical framework and preliminary practices of photogrammetric remote sensing intelligent processing of multi-source satellite images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8)1068-1083 (in Chinese)
- [6] 巩丹超,韩轶龙,黄旭. 线特征约束的建筑物密集匹配边缘全局优化方法[J]. 测绘学报, 2021, 50(6):833-846.  
GONG D C, HAN Y L, HUANG X. Global refinement of building boundary with line feature constraints for stereo dense image matching[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(6): 833-846. (in Chinese)
- [7] WANG Y, GONG D, HU H, *et al.* State of the art in dense image matching cost computation for high-resolution satellite stereo[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2021, 43:

- 109-114.
- [8] HAN Y, WANG S, GONG D, *et al.* State of the art in digital surface modelling from multi-view high-resolution satellite images[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, 2: 351-356.
- [9] 唐新明, 王鸿燕. 我国民用光学卫星测绘产品体系的建立与应用[J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1386-1397.
- TANG X M, WANG H Y. Establishment and application of China civil optical satellite surveying and mapping products [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1386-1397. (in Chinese)
- [10] WANG Y, HAN Y L, PU L J, *et al.* A novel model for detecting urban fringe and its expanding patterns: an application in Harbin city, China[J]. *Land*, 2021, 10(8): 876.
- [11] 唐新明, 谢俊峰, 付兴科, 等. 资源三号 02 星激光测高仪在轨几何检校与试验验证[J]. *测绘学报*, 2017, 46(6): 384-395.
- TANG X M, XIE J F, FU X K, *et al.* ZY3-02 laser altimeter on-orbit geometrical calibration and test[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(6): 384-395. (in Chinese)
- [12] 李国元, 唐新明, 周晓青, 等. 高分七号卫星激光测高仪无场几何定标法[J]. *测绘学报*, 2022, 51(3): 401-412.
- LI G Y, TANG X M, ZHOU X Q, *et al.* The method of GF-7 satellite laser altimeter on-orbit geometric calibration without field site [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(3): 401-412. (in Chinese)
- [13] FRASER C S, HANLEY H B. Bias compensation in rational functions for ikonos satellite imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(1): 53-57.
- [14] FRASER C S, HANLEY H B. Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, 71(8): 909-915.
- [15] FRASER C S, DIAL G, GRODECKI J. Sensor orientation via RPCs[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(3): 182-194.
- [16] GRODECKI J, DIAL G. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(1): 59-68.
- [17] NOH MJ, HOWAT IM. Automatic relative RPC image model bias compensation through hierarchical image matching for improving DEM quality [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 136: 120-133.
- [18] TONG X H, LIU S J, WENG Q H. Bias-corrected rational polynomial coefficients for high accuracy geo-positioning of QuickBird stereo imagery [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(2): 218-226.
- [19] KIM T. A study on the epipolarity of linear pushbroom images [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, 66(8): 961-966.
- [20] HABIB A F, MORGAN M, JEONG S, *et al.* Analysis of epipolar geometry in linear array scanner scenes [J]. *The Photogrammetric Record*, 2005, 20(109): 27-47.
- [21] MORGAN MICHEL KIM KYUNG-OK JEONG SOO HABIB AYMAN. Epipolar resampling of space-borne linear array scanner scenes using parallel projection[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2006, 72(11): 1255-1263.
- [22] 张永生, 巩丹超. 高分辨率遥感卫星应用: 成像模型、处理算法及应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- ZHANG Y SH, GONG D CH. *Application of High Resolution Remote Sensing Satellite: Imaging Model, Processing Algorithm And Application Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [23] 胡芬, 王密, 李德仁, 等. 基于投影基准面的线阵推扫式卫星立体像对近似核线影像生成方法[J]. *测绘学报*, 2009, 38(5): 428-436.
- HU F, WANG M, LI D R, *et al.* Generation of approximate epipolar images from linear pushbroom satellite stereo-imagery based on projection reference plane [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(5): 428-436. (in Chinese)
- [24] HIRSCHMULLER H. Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information[C]. 2005 *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. 20-25, 2005, San Diego,

- CA, USA. IEEE, 2005: 807-814.
- [25] HIRSCHMULLER H. Stereo processing by semi-global matching and mutual information[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(2): 328-341.
- [26] ROTHERMEL M, WENZEL K, FRITSCH D, et al. SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery[C]. *In Proceedings LC3D Workshop, Berlin*, 2013, 8(2).
- [27] ZHANG K, LU J B, LAFRUIT G. Cross-based local stereo matching using orthogonal integral images[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(7): 1073-1079.

**作者简介:**

巩丹超(1975—),男,陕西丹凤人,博士,研究员,博士生导师,2003年毕业于原解放军信息工程大学,获摄影测量与遥感专业博士学位,主要从事卫星摄影测量及遥感影像处理与分析方面的研究。E-mail: sx\_gdch@sina.com

**通讯作者:**

韩轶龙(1988—),男,河北深泽人,博士,讲师,2020年毕业于武汉大学,获摄影测量与遥感专业博士学位,主要从事数字摄影测量与计算机视觉等方面的研究。E-mail:hanyl@sdust.edu.cn