

# 异源遥感影像的真三维模型构建方法

裴亮<sup>1</sup>, 刘阳<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000;

<sup>2</sup> 国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心, 北京 100048

**摘要** 以卫星立体影像数据和倾斜摄影数据为数据源,以资源三号卫星获取的湖南省遥感影像为例,基于瓦片金字塔模型,实现了不同分辨率的多类型数据的融合,建立了地形与纹理一体化表达的真三维模型。自主研发了 ItelliEarth 软件,以实现基于海量地形数据的三维场景下数据模型的可视化。研究结果表明,所提方法建立的真三维模型符合相关规范要求,为实现大尺度空间真三维模型的构建提供了有效途径。

**关键词** 遥感; 真三维; 资源三号; 倾斜摄影测量; 瓦片金字塔模型

中图分类号 P236

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.042802

## Construction Method of Real 3D Model of Heterogeneous Remote Sensing Images

Pei Liang<sup>1</sup>, Liu Yang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Mapping and Geographical Science, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

<sup>2</sup> Satellite Surveying and Mapping Application Center, NASG, Beijing 100048, China

**Abstract** The satellite stereoscopic images and the oblique photograph data are used as the data sources. The remote sensing images of Hunan Province obtained from ZY-3 are taken as examples. Based on the tile-pyramid model, the fusion of multiple types of data with different resolutions is realized and a real three dimensional (3D) model with an integrated expression of terrain and texture is constructed. In order to achieve the visualization of data models based on the massive terrain data in 3D scenes, a software named ItelliEarth is developed independently. The research results show that the real 3D model constructed by the proposed method can meet the requirements of relevant specifications, which provides an effective way to realize a large-scale 3D real space model.

**Key words** remote sensing; real three dimension; ZY-3; oblique photogrammetry; tile-pyramid model

**OCIS codes** 280.4788; 040.1490; 110.3000; 110.6880

## 1 引言

航空航天遥感技术是我国新兴的支柱产业。随着技术的飞速发展,其对影像产品的需求日益迫切。原有的以数字线划地图(DLG)、数字栅格地图(DRG)、数字高程模型(DEM)、数字正射影像图(DOM)为核心的 4D 产品无法描述复杂的立体结构和建筑物的侧面信息,而对于倾斜摄影数据、SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)等新型传感器获取的大量数据成果,现有的 4D 产品不能有效推

动多源传感器的数据融合和深入应用,难以开发面向统一的地理空间环境的异源数据融合的产品。因此,充分利用立体卫星数据、倾斜摄影测量数据等多源信息,构建大尺度三维场景精细化模型十分必要。

近年来,我国科研工作者在三维(3D)模型构建领域研究中取得很大的进展,立体卫星测绘以及倾斜摄影技术的出现给城市三维模型的建设带来了新的契机<sup>[1]</sup>。程宇峰等<sup>[2]</sup>提出了光学遥感卫星成像系统的高精度影像拼接方法,为实现三维模型构建提供了技术支持。吴军等<sup>[3]</sup>提出了以五方向倾斜航空

收稿日期: 2018-07-20; 修回日期: 2018-08-10; 录用日期: 2018-09-10

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究项目(L2015215)

\* E-mail: 764039378@qq.com

影像为数据源开展城市数字表面模型(UDSM)半全局匹配(SGM)的生成研究。王建强等<sup>[4]</sup>提出了一种基于多视倾斜航空影像的城市快速三维建模方法,人工交互半自动地建立建筑物的几何模型。张春森等<sup>[5]</sup>利用倾斜摄影获取的城市正射及倾斜影像,基于摄影测量计算机视觉原理,在事先处理的城市建筑物数字表面模型的基础上,利用共线方程计算物方与像方的几何投影关系,获得建筑物的三维信息与纹理信息,提出了一种三维城市模型纹理快速重建的方法。卢维欣等<sup>[6]</sup>利用点云局部几何特征聚类形成点云簇,并对其进行整体特征分析,以此来实现目标三维建筑物的重建。周晓敏等<sup>[7]</sup>利用倾斜影像联合空中三角测量技术实现了多角度倾斜影像的一体化平差,通过多视影像密集匹配和自动纹理关联,实现了高精度真实三维模型的构建。

综上所述,目前真三维模型构建数据的来源仅限于同源遥感影像,近些年被深入应用研究的倾斜摄影测量技术也仅适用于大比例尺空间测图。但面对大场景时,中、小比例尺地形图的建模结果无法满足应用需求,且倾斜摄影测量技术获取的三维模型数据无法详细描述建筑物表面所有细节和特征,

难以满足近距离观察的需求。因此,本文利用资源三号卫星获取的立体卫星数据和无人机获取的倾斜摄影测量数据为数据源,基于瓦片金字塔模型,实现不同分辨率的多类型数据的融合,形成地形与纹理一体化表达的真三维模型,解决了大场景下三维建模的需求,并利用自主研发的 ItelliEarth 软件基于海量地形数据实现了三维场景下数据模型的可视化。

## 2 真三维模型构建和关键技术

### 2.1 构建技术流程

基于异源遥感影像的真三维模型的总体技术路线流程图如图 1 所示。1) 选取资源三号卫星影像数据和倾斜摄影测量数据,对影像进行预处理,剔除带有影像残缺、云覆盖量较大等问题的不合格影像,从数据源头保证产品精度;2) 利用卫星及无人机的影像数据源自身具备较高无控定位精度的特点,进行无控自由网平差;3) 生成数字地表模型(DSM)与 DOM,对基础地形和纹理数据处理得到地形和纹理的金字塔数据,将地形瓦片和纹理瓦片进行合成,生成三维金字塔模型,再基于瓦片金字塔实现数据融合,生成真三维模型。

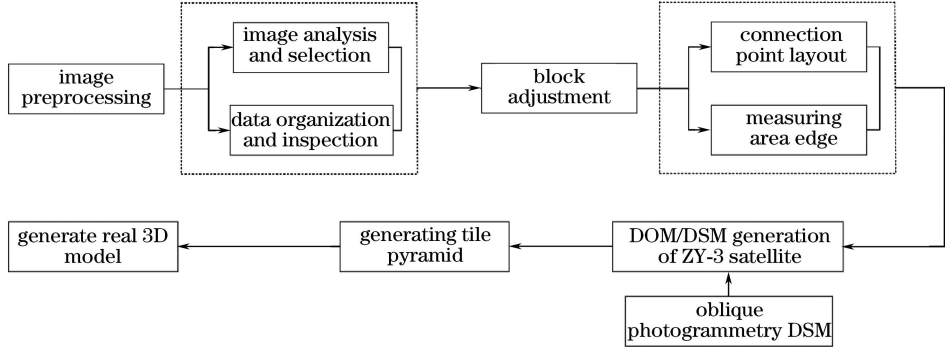


图 1 总体技术路线流程图

Fig. 1 Flow chart of overall technical route

### 2.2 数字地表模型与数字正射模型生成

DSM 的技术流程主要分 3 步进行。第 1 步,连接点自动选取和影像控制点自动匹配。连接点自动选取是通过卫星影像立体像对内部、同轨之间、不同轨之间影像匹配形成连接点;影像控制点自动匹配是以高精度 DOM 为地面参考,采用影像匹配技术查找参考影像和原始影像之间的匹配点,形成基于影像的地面控制点。第 2 步,区域网平差。利用资源三号卫星影像自身无控定位精度较高的特点,基于有理函数模型(RFM)进行无控自由网平差,实现连接点与控制点的自动筛选功能,平差结果要求最大中误差不超过 0.5 pixel。RFM 模型是将像点坐

标 $(r, c)$ 与地面点坐标 $(X, Y, Z)$ 以比值的形式关联起来,RFM 平差公式为

$$r + \alpha_0 + r\alpha_1 + c\alpha_2 = r_s \frac{P_1(X_n, Y_n, Z_n)}{P_2(X_n, Y_n, Z_n)} + r_0, \quad (1)$$

$$c + \beta_0 + r\beta_1 + c\beta_2 = c_s \frac{P_3(X_n, Y_n, Z_n)}{P_4(X_n, Y_n, Z_n)} + c_0, \quad (2)$$

式中: $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2$  为每景影像的 6 个仿射变换系数; $r_0, c_0$  为正则化的平移系数; $r_s, c_s$  为正则化的缩放系数; $(X_n, Y_n, Z_n)$  分别为地面点坐标 $(X, Y, Z)$ 经平移和缩放后的正则化坐标,取值范围为

$[-1, 1]$ ; 多项式  $P_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ , 其中  $i$  为多项式序号索引) 中每一项的坐标分量  $X_n, Y_n, Z_n$  的幂次最大不超过 3, 且每一项各个坐标分量的幂次之和也不超过 3<sup>[8]</sup>。第 3 步, 核线生成和 DSM 密集匹配生成。对 DSM 生产成果进行平面检查、立体检查, 对错误区域进行编辑, 无效区域进行剔除, 云雪漏洞区域进行补漏, 最后进行标准分幅, 形成 DSM 数据成果。

生成 DOM 的技术流程为: 以资源三号立体像对生产的 DSM 为地形控制, 以影像控制点为地面参考进行区域网平差, 平差后的结果采用修正有理多项式函数模型 (RPC) 参数方式保存, 分别对全色影像正视和多光谱影像进行正射纠正<sup>[9-12]</sup>。在正射纠正的基础上进行全色和多光谱影像融合, 在融合过程中需要进行不同场景影像之间进行匀光、匀色处理, 以保证区域内不同场景影像之间无硬接边、色调基本一致。

### 2.3 生成瓦片金字塔

针对本研究在大场景下建立的真三维模型, 采用三角网模型+纹理影像的形式进行存储。立体卫星影像生成 DSM 和 DOM, DSM 利用格网存储结

构表达地面、植被和建筑物高度; DOM 作为纹理信息, 形成真三维模型的表面表达。无人机获取的倾斜摄影数据包含建筑物的侧面几何和纹理信息, 数据内容相对复杂, 以三角型为基础图元, 采用多个面片构成对建筑物地面和侧面进行表达。关于倾斜摄影测量生成 DSM 的方法以及数据处理方法在文献<sup>[5]</sup>中已有详细介绍, 这里不再详细介绍。

首先对 DOM 和 DSM 数据进行预处理, 将 DOM 和 DSM 数据生成瓦片, 采用全球一致的四叉树地理坐标划分标准<sup>[13]</sup>, 分别建立 DSM 金字塔图层和 DOM 金字塔图层, 图层中包含两个部分内容: 图层的元数据和图层实体数据。图层的元数据包含图层数据投影、地理坐标范围, 金字塔划分坐标原点、瓦片文件扩展名、瓦片宽度和高度, 以及包含的金字塔级别、每个级别数据对应的像素分辨率。图层实体数据采用分层进行组织, 一个金字塔级别存放在一个文件目录, 一个目录下的数据按照纵向条带进行组织, 每个纵向条带数据存放在一个目录, 每个分块文件的文件名为其行号, 文件扩展名为元数据中规定的文件扩展名。多尺度影像金字塔模型结构如图 2 所示。

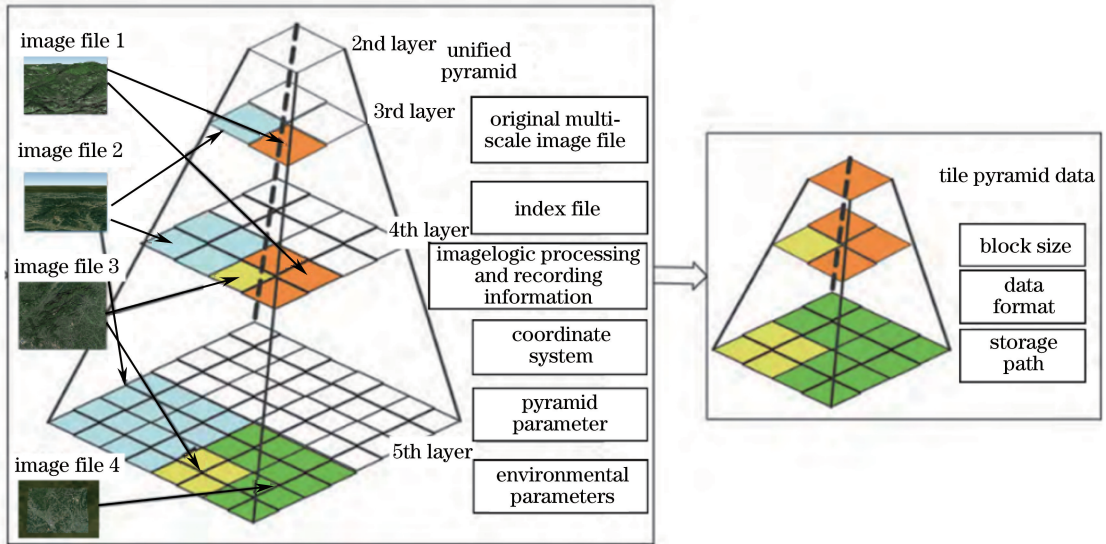


图 2 多尺度影像金字塔模型结构

Fig. 2 Structural diagram of pyramid model for multi-scale images

处理后的 DSM 和 DOM 金字塔数据与 DSM 地形骨架瓦片、DOM 纹理瓦片进行合成形成三维地形影像产品, 以 IVE 或 OSGB 格式进行存储, 生成三维影像金字塔产品。在生成金字塔模型时, 按照不同金字塔级别的瓦片, 设置瓦片显示的最近和最远距离, 将 DSM 三角化并计算每个定点法线方向, 建立纹理影像和 DSM 格网顶点之间的坐标映

射关系, 实现多层次细节 (LOD) 瓦片调用链接, 形成标准的真三维影像产品。

基于以上瓦片金字塔模型, 可实现不同分辨率的多类型数据融合, 生成地形与纹理一体化表达的真三维模型, 实现基于海量地形数据的三维场景下倾斜摄影数据模型的可视化。其实现思路是: 1) 提取不同分辨率下的倾斜影像数据模型的边界信息,

对应不同分辨率下的地形数据中的区域,删除该区域;2) 将同一分辨率的两种类型的数据融合,生成一套多类型数据统一的三维模型,实现面向全球到局部的多层次细节快速可视化。融合步骤包括以下两点。1) 边界提取。在建立三维地形模型的过程中,采用 TIN(Triangulated Irregular Network)地形模型的数据结构进行表达,通过提取 TIN 地形模型的边界点提取倾斜摄影数据模型的边界。在处理 TIN 模型数据时,多以分块存储,每块包含点的坐

标、点的索引和三角网的索引。建立结构体存储边,通过判断某条边的邻接三角形是否为 1 判断该边是否为边界边,是 1 则为边界边,不是 1 则不是边界边,将 TIN 模型边界提取出来。2) 逐层融合。通过 TIN 模型将倾斜摄影表面模型的边界提取出来,得到倾斜摄影表面模型的边界点,基于瓦片金字塔模型,将倾斜摄影表面模型的边界点移动到数字表面模型的顶点,实现不同分辨率的多类型数据的融合。图 3 为不同分辨率的多类型数据影像图。

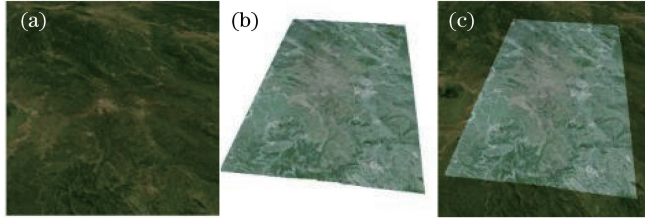


图 3 不同分辨率的多类型数据影像图。(a)倾斜摄影测量数据影像;(b)卫星数据影像;(c)倾斜摄影测量、卫星融合影像

Fig. 3 Multiple types of images with different resolutions. (a) Image by oblique photogrammetric data; (b) image by satellite data; (c) image by oblique photogrammetry and satellite fusion

### 3 实验及精度分析

#### 3.1 研究区域概述

湖南省位于我国中部地区,地理坐标为东经  $108.47^{\circ} \sim 114.15^{\circ}$ ,北纬  $24.97^{\circ} \sim 29.65^{\circ}$ ,大部分地区海拔高度在  $100 \sim 800 \text{ m}$  之间,省内东面、西面、南面三面被山地环绕,地形起伏逐步向中部及东北部倾斜。湖南省研究区域地形图如图 4 所示,这里选取湖南省具有平原、山地、高山地、丘陵等典型地形特征的区域作为研究区域。在进行数据源资料选择时,要求以资源三号卫星获取的前后正三视影像中的云雪覆盖率均小于  $20\%$ 。

#### 3.2 实验验证

为了验证上述基于异源多分辨率真三维影像模型构建方法的准确性,针对真三维产品的海量地形数据在三维场景下数据模型的可视化问题,自主开发了

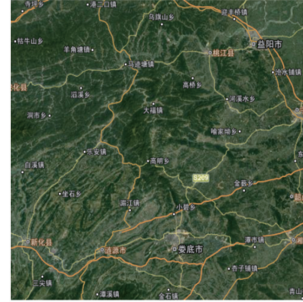


图 4 湖南省研究区域地形图

ItelliEarth 软件系统,该软件以 C++ 为平台进行开发,运用 OpenGL 作为底层图形引擎。采用以地理信息组织为基础的框架,实现全球整体从宏观的低分辨率地理数据到局部重点地区加载高分辨率影像纹理数据精细建模的丰富展示。软件展示的影像融合图及真三维影像效果图如图 5、图 6 所示。

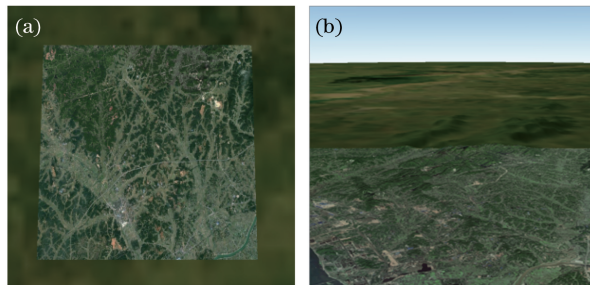


图 5 影像融合图。(a)正视图;(b)侧视图

Fig. 5 Fused images. (a) Orthographic view; (b) side view

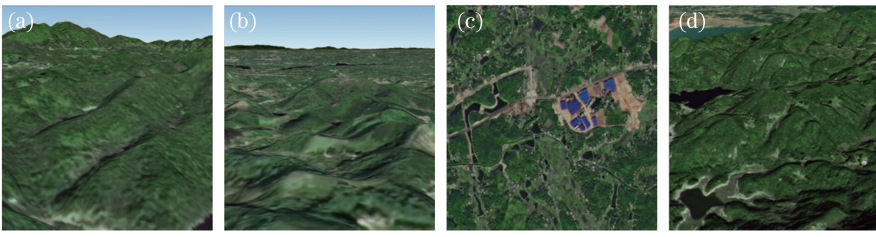


图6 真三维影像效果图。(a)效果图1;(b)效果图2;(c)效果图3;(d)效果图4

Fig. 6 Effect maps of real 3D image. (a) Effect map 1; (b) effect map 2; (c) effect map 3; (d) effect map 4

### 3.3 精度评价分析

真三维模型的精度评价<sup>[14]</sup>采用国家测绘与地理信息局卫星测绘应用中心建立的全国影像控制点库作为参考,选取的精度评价指标包括平面误差、高程误差、最小误差、最大误差、平均误差、中误差等作为精度评价指标。

利用区域内均匀布设的20个外业检查点对三维模型成果的精度进行评定。比较外业实测的三维坐标与三维模型上读取的三维坐标,得到真三维模型成果的X方向误差、Y方向误差、平面误差、高程误差值如图7所示。

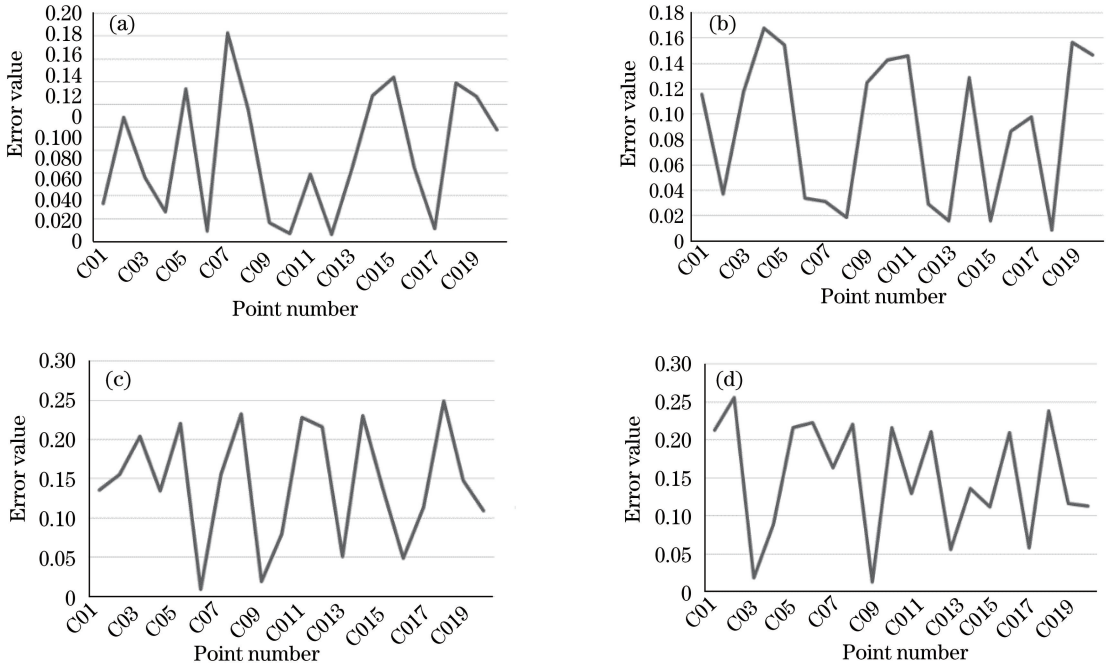


图7 真三维模型误差统计图。(a) X方向误差;(b) Y方向误差;(c)平面误差;(d)高程误差

Fig. 7 Error statistics of real 3D model. (a) Error in X direction; (b) error in Y direction; (c) plane error; (d) elevation error

由图7可知,选定的20个外业检查点的误差值均在合格范围内上下浮动。真三维模型误差精度统计表如表1所示。由表1可见,利用所提的技术方法生成的真三维模型成果,平面最大误差为0.249 m,中误差为0.077 m,高程方向最大误差为0.256 m,中误差为0.133 m,完全可以满足《三维地理信息模型数据产品规范》中I级成果平面位置中误差不超过0.2 m,高度中误差不超过0.2 m的要求<sup>[15]</sup>。

表1 真三维模型误差精度统计表

Table 1 Error precision statistics of real 3D model

Error	Plane	Altitude
Minimum error	0.007	0.013
Maximum error	0.249	0.256
Average error	0.144	0.112
Middle error	0.077	0.133

## 4 结 论

利用立体卫星数据、倾斜摄影测量数据两种数

据源结合生成真三维影像产品,基于瓦片金字塔模型,实现了不同分辨率的多类型数据的融合,形成了地形与纹理一体化表达的真三维模型。利用自主研发的 ItelliEarth 软件实现了基于海量地形数据的三维场景下数据模型的可视化展示,成像效果良好。真三维影像产品具有真实性、完整性、高效性以及高精度等优点,其高度创新的数据展示方式将带动整个智慧城市空间信息服务平台数据升级换代,在以后的测绘生产和空间信息服务中扮演非常重要的角色。

### 参 考 文 献

- [1] Wang W, Huang W W, Zhen J. Pictometry oblique photography technique and its application in 3D city modeling [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2011, 34(3): 181-183.  
王伟, 黄雯雯, 镇姣. Pictometry 倾斜摄影技术及其在 3 维城市建模中的应用[J]. *测绘与空间地理信息*, 2011, 34(3): 181-183.
- [2] Cheng Y F, Jin S Y, Wang M, *et al.* A high accuracy image mosaicking approach of optical remote sensing satellite for multi-camera system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0828003.  
程宇峰, 金淑英, 王密, 等. 一种光学遥感卫星多相机成像系统的高精度影像拼接方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0828003.
- [3] Wu J, Cheng M M, Yao Z X, *et al.* Automatic generation of high-quality urban DSM with airborne oblique images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, 20(6): 845-856.  
吴军, 程门门, 姚泽鑫, 等. 倾斜航空影像的城区 DSM 生成[J]. *中国图象图形学报*, 2015, 20(6): 845-856.
- [4] Wang J Q, Zhong C X, Jiang L J, *et al.* 3D city modeling construction based on multi-view aerial images [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(3): 70-74.  
王建强, 钟春惺, 江丽钧, 等. 基于多视航空影像的城市三维建模方法[J]. *测绘科学*, 2014, 39(3): 70-74.
- [5] Zhang C S, Zhang W L, Guo B X, *et al.* Rapidly 3D texture reconstruction based on oblique photography [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(7): 782-790.  
张春森, 张卫龙, 郭丙轩, 等. 倾斜影像的三维纹理快速重建[J]. *测绘学报*, 2015, 44(7): 782-790.
- [6] Lu W X, Wan Y C, He P P, *et al.* Extracting and plane segmenting buildings from large scene point cloud [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0914004.  
卢维欣, 万幼川, 何培培, 等. 大场景内建筑物点云提取及平面分割算法[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0914004.
- [7] Zhou X M, Meng X L, Zhang X P, *et al.* A method for urban real 3D model building based on oblique photogrammetry [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(9): 159-163.  
周晓敏, 孟晓林, 张雪萍, 等. 倾斜摄影测量的城市真三维模型构建方法[J]. *测绘科学*, 2016, 41(9): 159-163.
- [8] Tian S Q, Han L. Study of stereoscopic location based on RFM and the separation of plane and elevation control [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(5): 76-85.  
田世强, 韩玲. 基于 RFM 与平面高程控制分离的立体定位研究[J]. *航天返回与遥感*, 2017, 38(5): 76-85.
- [9] Yin P F, Yin Q, Chen X F, *et al.* Unmanned aerial vehicle aerial remote sensing techniques and its application on post-earthquake disaster investigation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(11): 112802.  
尹鹏飞, 尹球, 陈兴峰, 等. 无人机航空遥感技术在震后灾情调查中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(11): 112802.
- [10] Guenko G A. Geometric accuracy of Ikonos: zoom in [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(1): 209-214.
- [11] Chen C J, Li D R, Zhu Q. Practical research of IKONOS-2 geopositioning and its accuracy in Tibet of China [J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2005, 8(1): 33-38.
- [12] Zhang G. Rectification for high resolution remote sensing image under lack of ground control points [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005: 32-38.  
张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正[D]. 武汉: 武汉大学, 2005: 32-38.
- [13] Li D R, Xiao Z F, Zhu X Y, *et al.* Research on grid division and encoding of spatial information multi-grids [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(1): 52-56, 70.  
李德仁, 肖志峰, 朱欣焰, 等. 空间信息多级网格的划分方法及编码研究[J]. *测绘学报*, 2006, 35(1): 52-56, 70.
- [14] Qiao C, Ding Y L, Xu Y S, *et al.* Image registration

method based on geo-location information and precision analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37 (8): 0828001.

乔川, 丁亚林, 许永森, 等. 基于地理位置信息的图像配准方法及精度分析[J]. 光学学报, 2017, 37 (8): 0828001.

[15] 3D geographic information model data product

specification. National surveying and Mapping Information Bureau: CH/T 9015-2012 [S]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2012.

三维地理信息模型数据产品规范. 国家测绘地理信息局: CH/T 9015-2012 [S]. 北京: 测绘出版社, 2012.