引文格式：祝晓坤,田辰曦,夏婧,等. 基于控制片的城市立体卫星影像高精度几何定位[J]. 地理空间信息, 2026, 24(7): 18-21. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.07.004

基于控制片的城市立体卫星影像高精度几何定位

祝晓坤[1]，田辰曦[2]，夏　婧[3,4]，徐宗霞[1]，刘亚萍[2]
（1. 北京市测绘设计研究院，北京 100038；2. 武汉中交工程勘察有限公司，湖北 武汉 430056；
3. 长江空间信息技术工程有限公司（武汉），湖北 武汉 430010；4. 长江卫星遥感应用研究中心，湖北 武汉 430010）

摘　要：受DOM、DEM产品误差影响，传统基于DOM、DEM等参考信息的“云控制”几何方法，已难以满足测绘生产单位对大比例尺城市区域亚米级立体卫星影像几何定位的需求。针对该问题，采用了一种理论更优的基于控制片的影像几何定位方法。利用已知精确几何定位信息的控制片影像数据为立体影像几何定位提供高精度控制信息，具有更强的几何约束能力与工程适用性。选取北京市区域的北京三号和WorldView-3立体卫星影像，基于CloudTubeSat软件开展实验验证。结果表明，该方法将影像平面、高程定位精度分别由2.04 m和10.93 m提升至0.42 m和0.41 m，优于采用稀疏地面控制点的传统方法，证明控制片在城市立体卫星影像几何定位中具有明显优势。

关键词：控制片；亚米级立体卫星影像；几何定位；城市测图
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）07-0018-04

High-accuracy Geometric Positioning of Urban Stereo Satellite Images Based on Digital Control Photos

ZHU Xiaokun[1], TIAN Chenxi[2], XIA Jing[3,4], XU Zongxia[1], LIU Yaping[2]
(1. Beijing Institute of Surveying and Mapping, Beijing 100038, China;
2. Wuhan Engineering Investigation and Survey Co., Ltd., CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, China;
3. Changjiang Spatial Information Technology Engineering Co., Ltd., Wuhan 430010, China;
4. Yangtze River Satellite Remote Sensing Application Research Center, Wuhan 430010, China)

Abstract: Due to the inherent errors in DOM and DEM products, traditional “cloud control” positioning methods based on such reference data are no longer sufficient to meet the high-accuracy geometric positioning requirements of sub-meter urban stereo satellite images in urban areas. To address this issue, we used a theoretically superior geometric positioning method based on digital control photos (DCPs). By leveraging image data with known precise geometric parameters, this approach provides high-accuracy control information for the geometric positioning of stereo image pairs, offering stronger geometric constraints and better engineering applicability. Using the CloudTubeSat software, we conducted experiments on Beijing-3 and WorldView-3 stereo satellite images covering urban areas of Beijing City, China. The results demonstrate that the method improves the horizontal and vertical positioning accuracies from 2.04 m and 10.93 m to 0.42 m and 0.41 m, respectively, outperforming traditional approaches based on sparse ground control points. These findings confirm the significant advantages of DCPs in achieving high-accuracy geometric positioning for urban stereo satellite images.

Key words: DCP, sub-meter stereo satellite image, geometric positioning, urban mapping

作为城市规划、智慧城市、土地资源管理等领域的重要技术，城市卫星影像几何定位的精度备受关注。目前高精度影像几何定位任务多依赖外业采集的地面控制点来提高其定位精度，需耗费大量的人力和时间成本[1]。为降低对地面控制点的依赖，武汉大学张祖勋院士提出一种“云控制”摄影测量方法[2]，即利用已有的数字正射影像（DOM）、数字高程模型（DEM）和数字线划图（DLG）等地理参考信息数据为影像几何定位提供控制信息。作为“云控制”摄影测量理论中较成熟的技术，基于DOM、DEM的影像几何定位方法已被广泛应用于卫星传感器在轨几何定标[3-8]、区域网影像几何定位[9-12]、单景卫星影像几何精度提升[13]和摄像机影像几何定位[14]等任务场景中，在保证定位精度的条件下，有效降低了对地面控制点的依赖。随着亚米级高分辨率影像时代的到来，大比例尺摄影测量数据在建筑物提取[15]、三维建模[16]等方面得到广泛应用；

项目来源：北京市科技计划资助项目（Z241100009124013）；实验室自主科研资助项目（CX2023Z31）。
第一作者简介：祝晓坤（1981—），博士，正高级工程师，从事摄影测量与遥感智能化生产及大数据应用分析工作，E-mail：67690323@qq.com。

而基于DEM、DOM的“云控制”模式精度有限，难以满足大比例摄影测量产品生产的需求。其主要原因包括：①误差累积，在摄影测量产品生产过程中，DOM、DEM等产品不可避免地存在偶然和系统误差，这些误差在基于DEM、DOM的影像几何定向方法中会被传递，从而影响后续影像的定位精度；②高程信息不足，DEM仅表示地形高程，不包括地物（建筑物、树木等）的高度，因此在地表覆盖区域，控制信息的高程值显著低于真实值。上述问题在大比例尺城市立体卫星影像几何定位场景中尤为明显，主要是由于用于“转刺”的影像匹配算法多以影像的角点特征（建筑物、树木等地表覆盖）为同名点，从而导致控制信息中存在显著的高程误差。针对该问题，张祖勋院士提出了一种理论更优的基于控制片的“云控制”方法，即充分利用精确几何定位参数和空三加密过程数据等重要控制资源为摄影测量几何定位提供可靠的控制信息，在一定程度上克服了传统“云控制”方法的不足，进一步保障了影像几何定位的精度和可靠性。本文采用基于控制片的“云控制”方法，在武汉大学自主研制的多源卫星影像“云控制”摄影测量系统CloudTubeSat上实现了大比例尺城市立体卫星影像的高精度几何定位，以应对亚米级高分辨率影像时代带来的新挑战。

1　基于控制片的立体卫星影像几何定位方法

1.1　控制片的概念

控制片是指借助精准的地面控制点和空中三角测量获取的具有精确几何定位参数的影像数据和空三加密点信息。其基本组件包括原始影像、几何定向参数和空三加密点。构建控制片的过程可简述为通过稀疏的地面控制点和影像成像几何关系生成密集数字控制点的过程。控制片中包含的空三加密点信息和具有几何定位参数的影像数据可为同一测区的其他影像提供大量均匀分布的控制点信息。控制片依托影像携带的地物信息，将该区域内的空三加密点信息“转刺”至待几何定向的影像，形成新影像的可靠控制点。作为控制信息，空三加密点信息具有多种优势：首先作为影像匹配算法自动检测的连接点，空三加密点的分布与数量可通过相关匹配策略自主调控；其次空三加密点坐标由区域网平差解算得到，在区域网平差过程中有效剔除了观测误差；最后得益于海量遥感影像数据的支持，控制片在采集效率方面显著优于地面控制点。综上所述，基于控制片的影像几何定位方法不仅具有接近于地面控制点的高精度，还具备控制信息分布密集、较高的采集和应用效率等优点，有望成为目前影像高精度几何定位的一种有力的新兴技术手段。

1.2　控制片的制作

控制片是后续摄影测量几何定位的重要控制资源，其携带的控制信息在精度、数量和分布方面均影响后续几何定位产品的精度。本文从工程实践和理论层面，详细描述了控制片的制作流程和注意事项，以尽可能提高控制片的精度。控制片的制作流程包括：①确定测区范围，根据任务确定所需控制信息的地面范围，选择符合要求的大区域、无缝覆盖的影像集作为控制片，且影像的分辨率、拍摄视角和光线等还应符合后续任务要求；②获取地面控制点，为保障控制片精度，需采集符合任务精度和空中三角测量标准的地面控制点，用于控制片的几何定向；③确定几何定向模型，几何定向模型应与影像成像模型契合，因此根据控制片的成像模型确定几何定向参数，如卫星影像多采用有理多项式系数，航空框幅式影像则采用内外方位元素等几何定位参数；④空中三角测量，将上述地面控制点分为控制点和检查点，控制点用于后续的区域网平差，检查点用于精度检查，首先采用影像匹配技术获取影像间的连接点，并将其作为空三加密点，然后采用空中三角测量方法求解影像间的几何定向参数和空三加密点坐标；⑤构建控制片，将空中三角测量阶段求解的几何定向参数和空三加密点保存至影像文件中，便于后续提取控制信息。

1.3　基于控制片的影像几何定位

基于控制片的影像几何定位是指将控制片中的空三加密点信息“转刺”到新影像上，并作为控制信息辅助其完成几何定位的过程。空三加密点信息由像点和物方坐标构成；“转刺”则是利用影像匹配技术和控制片的影像信息来获取空三加密点在新影像上的连接点的过程。基于控制片的影像几何定位的具体步骤包括：①查询控制片，为使用于影像定向的控制信息尽可能分布均匀，控制片应覆盖影像，因此借助影像携带的地理编码信息，获取其对应的地面覆盖范围，并查询相应的控制片；②“转刺”空三加密点，通过影像匹配技术建立控制片中像点与新影像中对应同名点的关系，赋予其物方坐标；③影像几何定位，将“转刺”得到的空三加密点作为控制信息，采用空中三角测量求解影像的几何定位参数。该方法利用已有的精准地理参考信息，通过“转刺”将控制片中的控制点信息应用到新影像中，从而实现高效、精确的几何定位，兼具高精度、密集分布和高效处理的优势，

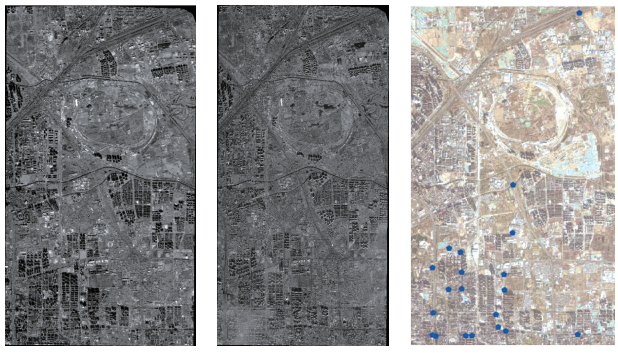
为摄影测量提供了可靠的技术支持。

2 北京三号立体卫星影像几何定位实验

2.1 实验数据

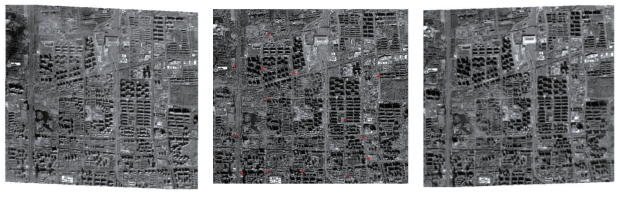
本文选取北京市朝阳区作为实验区。实验区地势西北高、东南低，地形较为平坦，海拔为31~42 m，包含大量的低矮房屋、高层建筑物、绿化景观等地物；北部多为城市绿化景观，南部树木较稀疏，多为低矮房屋，西部多为高层建筑物。实验数据包括原始卫星影像、地面控制点和参考DOM、DEM，参考DOM与DEM用于对比实验，地面控制点用于精度评定。

1）原始卫星影像。本文采用2019年11月采集的1景0.3 m分辨率的WorldView-3全色立体像对（图1）和1景北京三号三线阵全色和多光谱影像（图2），总覆盖面积为16.082 km^2。WorldView-3影像用于制作控制片，北京三号影像作为待定位影像，两类影像的地理覆盖关系见图3。



a 左视影像 b 右视影像 c 地面控制点分布

图1 实验区WorldView-3立体像对与控制点分布



a 前视影像 b 下视影像 c 后视影像

图2 实验区北京三号三线阵全色影像

注：下视影像中红色三角形为控制点。

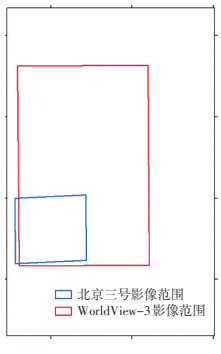
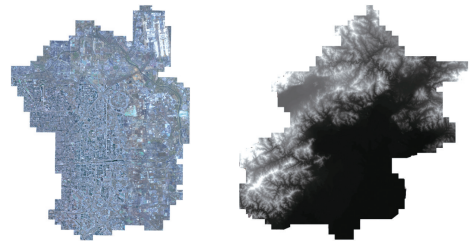


图3 实验区WorldView-3与北京三号影像地理覆盖关系图

2）地面控制点。外业采集了20个地面控制点（图1c），平面和高程精度均优于0.1 m，其中11个地面控制点用于WorldView-3卫星影像的几何定向，以制作控制片；9个地面控制点作为检查点，用于精度评定。

3）DOM和DEM。为验证采用控制片进行几何定位的优势，利用该区域内具有较高精度的DOM和DEM（图4）进行对比实验，比较两种控制源条件下卫星影像的几何定位精度差异。DOM、DEM的地面分辨率分别为0.2、2 m，生产时间分别为2022年和2007年。



a DOM b DEM晕渲图

图4 实验区参考DOM与DEM

2.2 实验方案

本文采用武汉大学研制的多源卫星影像“云控制”摄影测量系统CloudTubeSat进行实验。为验证基于控制片的“云控制”方案在处理城市区域卫星影像中的优越性，本文设计了无控制点、地面控制点、DOM/DEM以及控制片4种约束方案下北京三号卫星影像的几何定位实验。基于WorldView-3控制片的北京三号立体卫星影像几何定向流程可分为控制片制作和影像几何定向两个部分。

1）控制片制作。首先利用控制点对WorldView-3卫星影像进行空中三角测量，得到定向控制点的平面和高程均方根中误差分别为0.36 m和0.24 m，8 850个空三加密点的单位权中误差为0.36像素；然后将具有精准几何定向参数的WorldView-3影像和空三加密点信息分别保存至独立文件，制作控制片。

2）影像几何定向。首先将WorldView-3控制片作为参考信息输入；再利用影像匹配算法将控制片中约238个空三加密点信息自动匹配至北京三号卫星影像中，作为定向控制点；然后通过空三转点得到影像连接点；最后利用定向控制点对北京三号卫星影像间连接点坐标和几何定向参数进行平差计算，剔除限差以上的控制点、连接点，直至所有控制点与连接点均满足精度要求为止。

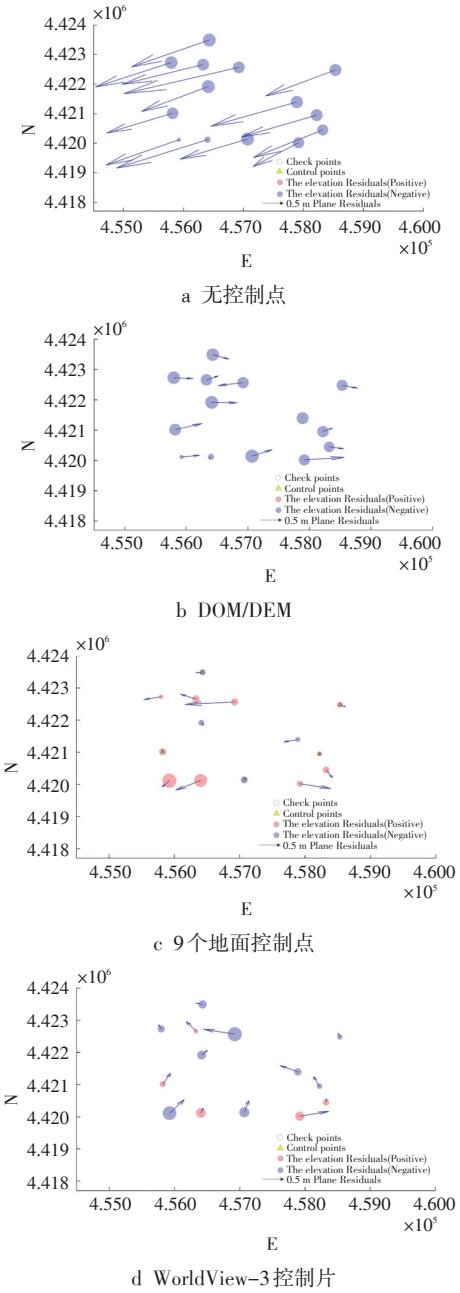
2.3 实验结果与分析

在无控制点、DOM/DEM、WorldView-3控制片、

地面控制点4种不同控制信息的约束下，北京三号立体卫星影像的绝对几何定位精度见表1，地面控制点与检查点的物方残差分布见图5，图中 X、Y 轴分别表示东坐标与北坐标，误差矢量代表平面残差，圆形气泡代表高程残差（半径表示残差大小，红色和蓝色表示残差方向）。

表1　不同控制条件下北京三号卫星影像几何定位精度

控制资料	检查点	中误差/m				平均误差/m		
		ΔX	ΔY	ΔXY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
无控制点	14	1.71	1.10	2.04	10.93	−1.68	−1.10	−10.92
DOM/DEM	14	0.43	0.15	0.46	2.68	0.30	0.30	−2.63
9个地面控制点	9	0.47	0.23	0.52	0.78	−0.20	−0.16	0.45
WorldView-3控制片	14	0.28	0.31	0.42	0.41	−0.01	0.27	−0.17



a 无控制点

b DOM/DEM

c 9个地面控制点

d WorldView-3控制片

图5　不同约束方案下地面点的平面与高程残差分布图

1）在无控制点条件下，北京三号卫星影像在平面上存在显著的系统性误差，平面与高程的中误差分别为2.04、10.93 m，说明该影像在无控制点时难以满足高精度的几何定位需求。

2）引入控制信息后，北京三号卫星影像的平面定位精度显著提高，在DOM/DEM约束下，平面中误差降至0.46 m；在地面控制点约束下，平面中误差降至0.52 m；在WorldView-3控制片约束下，平面中误差为0.42 m，说明控制片和高精度DOM、DEM能提供接近地面控制点平面精度的控制信息，适用于高精度定位任务。

3）在高程精度方面，基于DOM、DEM控制的北京三号卫星影像高程精度为2.68 m，表明DOM、DEM控制信息在高程上存在较大的系统误差，主要原因为DEM产品表达的是地面高程，而并非建筑物等地物的高程；利用地面控制点控制时，平差后的高程精度达到0.78 m；基于WorldView-3控制片的高程精度为0.41 m，甚至优于利用地面控制点的高程定位精度，体现了控制片在高程精度上的优势，尤其适用于城市场景的高精度摄影测量任务。

3　结　语

本文针对测绘生产单位对大比例尺城市区域亚米级立体卫星影像几何定位的需求，采用了一种理论更优的基于控制片的影像几何定位方法，利用已知精确几何定位信息的控制片影像数据，为立体影像几何定向提供高精度控制信息；并选取北京市区域的北京三号和WorldView-3立体卫星影像，基于CloudTubeSat软件开展了方法实验验证，证明了控制片在城市立体卫星影像几何定位中的显著优势。考虑到控制片作为重要控制资源的工程适用性，建议作为标准数据成果，未来进一步统一其生产和应用规范。

参考文献

[1]　李欣，蒋博洋，汪韬阳，等. 面向高分三号全球正射影像生成的无控定位精度提升方法[J]. 测绘学报，2023，52(11)：1929-1940

（下转第100页）