

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.S.004

立体像对的交会角和等分仰角选择原则

景 泉, 郭倩蕊, 高洪涛, 刘希刚

(中国空间技术研究院遥感卫星总体部, 北京 100094)

摘要: 目前已有相关研究从遥感影像数据处理反向出发, 研究了交会角和等分仰角对图像定位精度影响的经验关系。本文从遥感卫星设计正向出发, 基于立体像对空间前方交会原理, 设计定位精度模型。定量描述立体像对的交会角和等分仰角(包含不对称角和滚动角)到定位精度的计算方法。本文研究表明使用该选择原则, 可以选出最优的多角度立体观测, 为城市三维建模获取更高定位精度。

关键词: 立体像对; 交会角; 等分仰角; 定位精度; 城市三维建模

中图分类号: V448.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)S-0019-06

Selection Principles of Convergence and Bisector Elevation for Stereo Images

JING Quan, GUO Qianrui, GAO Hongtao, LIU Xigang

(Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Many studies have been conducted on the empirical relationship between the positioning accuracy and the convergence and bisector elevation through reversely analyzing remote images. This paper proposes a positioning accuracy model based on the spatial forward intersection from the perspective of remote satellite designing. This work quantitatively calculates the positioning accuracy from stereo images with different convergence and bisector elevations, including the asymmetry and roll angles. Our study demonstrates that using this selection principle, the best multi-view stereo image can be identified, and the accurate ground coordinate for three dimensional modeling of cities can be achieved.

Key words: stereo image; convergence; bisector elevation; positioning accuracy; three dimensional modeling of cities

利用光学遥感卫星获取的立体影像对并开展空中三角测量, 是快速测制全球大比例尺地图产品^[1]、建模城市三维结构^[2]的主流方法。立体影像对的核心指标包括影像分辨率、指向确定精度以及像对交会角和等分仰角等, 是空中三角定位的重要影响因素。而由于事后定轨精度较高, 摄站位置对立体定位精度影响较小。这些核心指标也直接决定了卫星的测绘体制。

例如中国的资源三号 1:50 000 比例尺测绘卫星^[3], 像对交会角选择了约 48°(前后视相机夹角 44°), 像对等分仰角根据卫星侧摆角不同选择在

75°~90°之间。中国的高分七号 1:10 000 比例尺测绘卫星^[4], 像对交会角选择了约 34°(前后视相机夹角 31°), 像对等分仰角根据卫星侧摆角不同选择在 70°~80°之间。中国的高分多模敏捷多视角成像卫星^[5], 可通过卫星姿态机动灵活选择交会角和等分仰角构建立体像对。相同的影像分辨率和指向确定精度条件下, 交会角和等分仰角的选择直接决定更高定位精度。很多研究从图像数据处理反向出发, 利用已经获取的在轨影像数据组成立体像对, 分析不同像对组合下定位精度结果^[6]。本文从卫星设计正向出发, 利用空中三角定位的前方交会方

收稿日期: 2022-06-19; **修订日期:** 2022-09-01

通信作者: 景泉, 男, 硕士研究生, 高级工程师, E-mail: springf6@hotmail.com。

引用格式: 景泉, 郭倩蕊, 高洪涛, 等. 立体像对的交会角和等分仰角选择原则[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(S): 19-24. JING Quan, GUO Qianrui, GAO Hongtao, et al. Selection principles of convergence and bisector elevation for stereo images[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S): 19-24.

法,建立影像对立体定位模型。利用模型仿真计算,探讨多视角敏捷立体测绘条件下,保证定位精度的关键要素选择原则,为城市三维建模中多视角立体影像对选择提供参考。

1 交会角和等分仰角

为方便开展交会角和等分仰角对定位精度影响分析,首先介绍核线几何的基本概念。如图1所示。

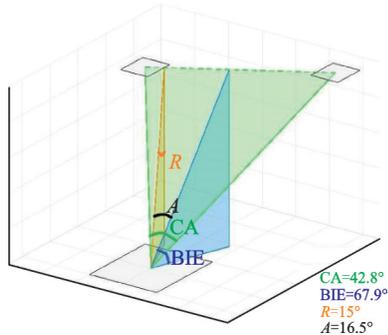


图1 交会角和等分仰角概念图

Fig.1 Schematic diagram of CA and BIE

立体像对:从空间两个不同的观测位置,分别向地面同一目标进行拍摄,获取不同视角的两景影像,即构成立体像对(Stereo image)。

核线平面:从地面目标分别到观测位置的两条直线,构成一个平面,即为核线平面(Epipolar plane)。如图1中绿色三角形所在的平面。两个观测位置所确定的直线称为核线(Epipolar line)。

交会角——在核线平面内,从地面目标到观测位置的两条线端的夹角,称为交会角。如图1中绿色角CA(Convergence angle)。

等分线:在核线平面内,从地面目标出发等分交会角的线段即等分线(Bisector),在图1中为蓝色。

本地垂线投影线:地面目标的本地垂线在核线平面内的投影,即本地垂线投影线(Vertical projection),图1中为橙色线。

滚动角:本地垂线投影线与本地垂线的夹角为滚动角。图1中橙色角R(Roll)。

不对称角:本地垂线投影线与等分线的夹角为不对称角。图1中黑色角A(Asymmetry)。

等分仰角:等分线在地面的仰角,即等分线与等分线在地面投影的夹角,称为等分仰角。如图1中蓝色角BIE(Bisector elevation)。由几何关系容易得知, $BIE = \arcsin(\cos A \cos R)$,表明BIE是A和R的组合。

2 定位精度仿真建模

在影像外方位元素未知或者不够准确时,可以利用4个及以上的地面控制点,最小二乘平差求解影像的外方位元素,称为空间后方交会^[7]。当在无控定位条件下,就需要直接利用立体像对中两张像片的内、外方位元素和像点坐标来确定相应地面目标点坐标,称为空间前方交会^[8]。如图1中,已知两个观测位置和两条光线指向,在三维空间中可以求解光线交点,即地面目标点的位置坐标。

根据空间前方交会的数学原理,利用Matlab建立仿真计算模型。模型中交点按照两条光线最短距离线段的中心点计算。在光线指向方面,高精度光学遥感卫星可以做到角秒量级指向测量精度。所以在仿真中按照指向确定模型给出含1弧度秒随机误差的指向确定结果。在仿真中根据待分析的交会角和等分仰角给出观测位置,不考虑位置测量误差。

在两个摄站的光线指向确定建模中,考虑到实际应用中会对系统差进行定期标定,仅考虑瞬时高频误差和周期低频误差。其中瞬时高频误差占比比较大。第3、4节的分析中,两个摄站的光线指向确定数据均使用该方法独立仿真。

此外,如果是同星同轨两次相邻的摄影,那么充分利用陀螺所具有的短期高精度相对姿态确定能力,摄站二的光线指向可以在摄站一指基础上通过陀螺外推获得。第5节使用了该方法。

3 交会角CA的影响

在BIE=90°的条件下,根据上述定位精度模型,计算不同CA条件下平面X、Y和高程Z定位精度,如表1和图2所示。其中3种典型CA条件下立体像对空间关系如图3所示。

表1 BIE=90°时不同CA角的立体定位精度

Table 1 Stereo positioning accuracy with different CAs when BIE=90°

定位精度	CA						
	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
X/m	1.32	1.27	1.31	1.37	1.41	1.42	1.43
Y/m	1.26	1.23	1.21	1.24	1.27	1.26	1.34
Z/m	7.07	5.66	4.84	4.21	3.71	3.47	3.18

从表1和图2可以看出,如选择CA=50°,可以在平面X和Y精度较高的同时,获取更高的高程Z精度;但前后视夹角较大,需要配置单独的正视相机获取正摄影像,即类似中国资源三号的三线阵方

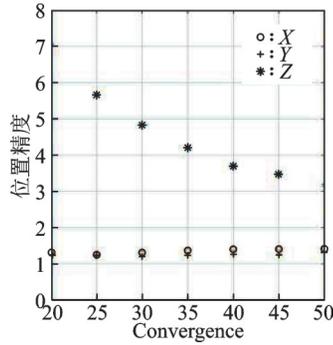


图2 BIE=90°时不同CA角的立体定位精度图
Fig.2 Stereo positioning accuracy with different CAs when BIE=90°

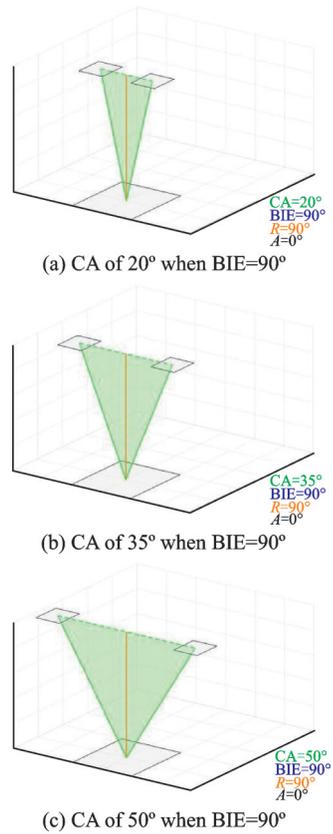


图3 BIE=90°时CA为20°、35°和50°的立体像对关系图
Fig.3 Schematic diagram of stereo images with CAs of 20°, 35° and 50° when BIE=90°

案;同时前后视夹角较大,也增加了地面图像匹配的难度。如选择CA=35°,可以兼顾正摄影像获取和地面图像匹配。另配置激光测高仪,整体实现更高的平面和高程精度,即两线阵+激光方案。如果进一步选择CA=20°,即小基高比,高程Z精度退化较快。本文将基于CA=35°开展进一步分析。

为了获取更好的正摄影像,常设计一定的不对称角A。而为了提高图像获取效率,卫星在轨工作中常需要侧摆(滚动)一定角度R。这两个角度对定位精度也会产生一定的影响。

4 等分仰角BIE的影响

4.1 不同A的影响

在CA=35°、R=0°的条件下,根据上述定位精度模型,计算不同A条件下平面X、Y和高程Z定位精度如表2和图4所示。其中3种典型A条件下立体像对空间关系如图5所示。

从表2和图4中可以看出,同样在CA=35°、R=0°的条件下,与A=0°/BIE=90°的对称观测模型相比,不对称角A越大,定位精度退化越大,特别是平面X的定位精度退化较快。因此不宜选择过大的不对称角A。如中国的高分七号和印度制图卫星一号均选择了约A=10°。

表2 CA=35°时不同A角的立体定位精度

Table 2 Stereo positioning accuracy with different A when CA=35°

定位精度	A/BIE				
	0°/90°	10°/80°	20°/70°	30°/60°	40°/50°
X/m	1.37	1.48	1.83	2.53	3.59
Y/m	1.24	1.24	1.36	1.48	1.82
Z/m	4.21	4.20	4.41	5.06	5.52

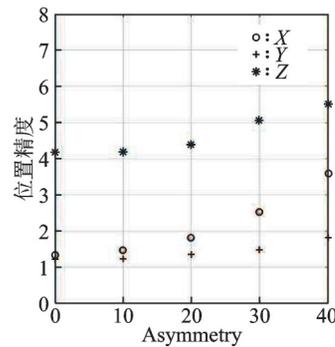


图4 CA=35°时不同A角的立体定位精度图
Fig.4 Stereo positioning accuracy with different A when CA=35°

对于使用多视角敏捷的WorldView-3、IKONOS等影像用于测绘时,也应尽量选择不对称角A较小的影像构建立体像对,便于获取较高定位精度。或者说,在多视角敏捷成像任务制定之初,应当选择较小的不对称角A。

4.2 不同R的影响

在CA=35°、A=0°的条件下,根据上述定位精度模型,计算不同R条件下平面X、Y和高程Z定位精度如表3和图6所示。其中3种典型R条件下立体像对空间关系如图7所示。

从表3和图6中可以看出,同样在CA=35°、A=0°的条件下,与R=0°、BIE=90°的观测模型相比,滚动角R越大,定位精度退化越大,特别是平面

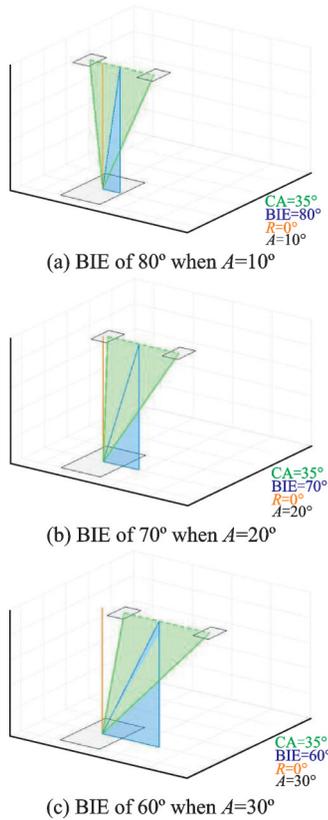


图5 CA=35°、R=0°时，BIE为80°、70°和60°的立体像对关系图

Fig.5 Schematic diagram of stereo images with BIEs of 80°, 70° and 60° when CA=35°/R=0°

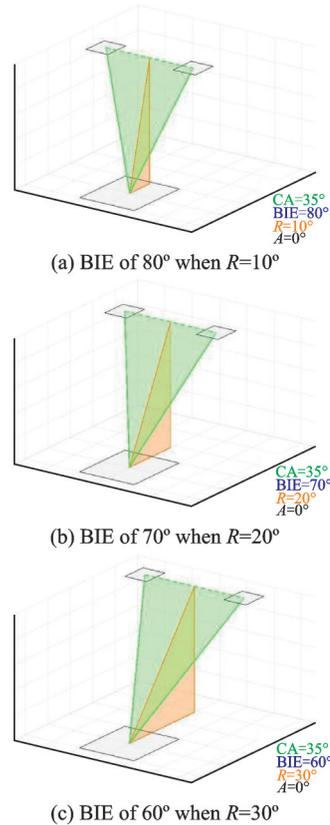


图7 在CA=35°、A=0°时，BIE为80°、70°和60°的立体像对关系图

Fig.7 Schematic diagram of stereo images with BIEs of 80°, 70° and 60° when CA=35° and A=0°

Y的定位精度退化较快。因此不宜选择过大的滚动角R。如中国的高分七号和印度制图卫星一号一般选择了约 $R \leq 15^\circ$ 。

表3 CA=35°时不同R角的立体定位精度表

Table 3 Stereo positioning accuracy with different R when CA=35°

定位精度	R/BIE				
	0°/90°	10°/80°	20°/70°	30°/60°	40°/50°
X/m	1.37	1.36	1.36	1.39	1.38
Y/m	1.24	1.40	1.88	2.41	3.00
Z/m	4.21	4.06	3.95	3.76	3.49

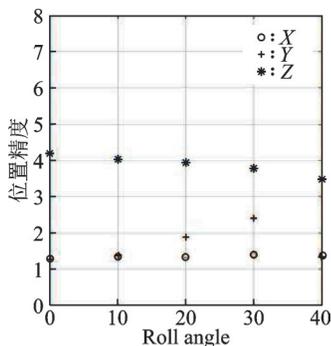


图6 CA=35°时不同R角的立体定位精度图

Fig.6 Stereo positioning accuracy with different R when CA=35°

对于使用多视角敏捷的WorldView-3、IKONOS等影像用于测绘时，也应尽量选择滚动角R较小的影像构建立体像对，便于获取较高定位精度。或者说，在多视角敏捷成像任务制定之初，应当选择较小的滚动角R。

4.3 A=R的影响

在CA=35°、A=R的条件下，根据上述定位精度模型，计算不同BIE条件下平面X、Y和高程Z定位精度，如表4和图8所示。其中三种典型BIE条件下立体像对空间关系如图9所示。

表4 在CA=35°、A=R时，不同BIE的立体定位精度

Table 4 Stereo positioning accuracy with different BIEs when CA=35° and A=R

定位精度	A/BIE				
	0°/90°	10°/80°	20°/70°	30°/60°	40°/50°
X/m	1.37	1.41	1.56	1.87	2.43
Y/m	1.24	1.38	1.67	2.14	2.83
Z/m	4.21	4.21	4.18	4.38	4.62

从表4和图8中可以看出，同样在CA=35°、A=R的条件下，与A=R=0°、BIE=90°的观测模型相比，等分仰角BIE越小，定位精度退化越大，平面X、Y的定位精度退化情况相当。因此不宜选择过小的等分仰角BIE。

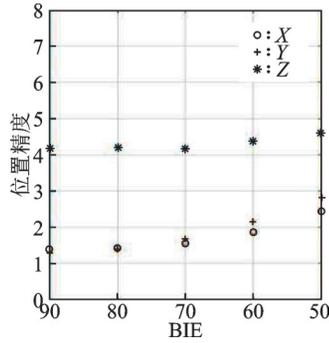


图8 CA=35°、A=R时不同BIE的立体定位精度图
Fig.8 Stereo positioning accuracy with different BIEs when CA=35° and A=R

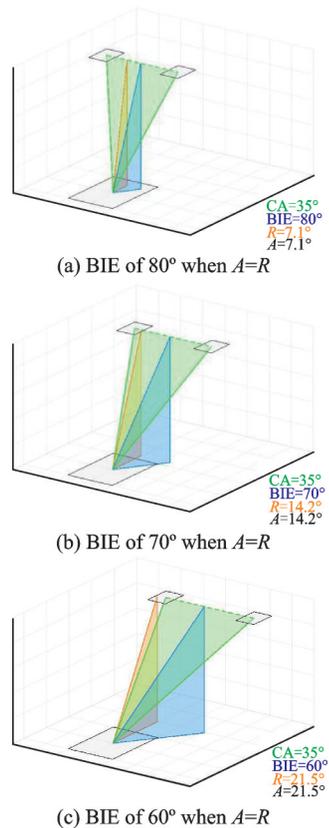


图9 CA=35°、A=R时,BIE=80°、70°和60°的立体像对关系图
Fig.9 Schematic diagram of stereo images with BIEs of 80°, 70° and 60° when CA=35° and A=R

根据表2~4中的分析结果,汇总BIE=60°时的定位精度如表5所示。BIE=60°时仍可以获取不超过两倍BIE=90°的平面定位精度,高程精度

表5 CA=35°,不同A、R组合成BIE=60°的立体定位精度表
Table 5 Stereo positioning accuracy with different combination of A/R when CA=35°

定位精度	A/R/BIE			
	0°/0°/90°	30°/0°/60°	0°/30°/60°	21.5°/21.5°/60°
X/m	1.37	2.53	1.39	1.87
Y/m	1.24	1.48	2.41	2.14
Z/m	4.21	5.06	3.76	4.38

相当,所以本文建议在多视角敏捷成像任务制定时,应选择BIE≥60°。

5 高程精度提升

当利用同星同轨两次相邻摄影测量,则不再假设两个摄站指向确定精度均为独立数据,而是假设摄站二的指向在摄站一的指向基础上通过陀螺外推获得。同样在CA=35°、A=R的条件下,根据上述定位精度模型,综合考虑现有高精度陀螺安装偏差标定精度、常值漂移标定精度和随机漂移指标,在摄站一指向误差基础上叠加0.3弧度秒随机误差作为摄站二指向误差,则计算不同BIE条件下平面X、Y和高程Z定位精度如表6所示。

表6 使用陀螺且CA=35°、A=R时,不同BIE的立体定位精度

Table 6 Stereo positioning accuracy with different BIEs when CA=35° and A=R with a gyro

定位精度	A=R/BIE				
	0°/90°	7.1°/80°	14.2°/70°	21.5°/60°	28.9°/50°
X/m	1.93	1.95	1.78	1.77	1.65
Y/m	1.846	1.84	1.98	2.22	2.55
Z/m	1.26	1.23	1.43	1.72	2.35

对比表6和表4可以看出,利用高精度陀螺短时间相对姿态确定精度更高的特点,可以大幅度提高高程精度,该仿真结果也与GF-7等在轨实际应用中,仅通过两线阵立体测绘即可获得较高高程精度的趋势一致^[4]。这个结果也进一步表明了双线阵摄影测量在高精度完成测绘任务上面的体制优势。

6 结 论

如引言中所述,若使用在轨影像数据组成立体像对,分析不同像对组合下定位精度结果,给出的经验公式是当BIE-CA≥20°时可以获得较好的融合精度^[9-10]。这与本文建议的CA=35°、BIE≥60°相当,且本文独立给出了CA、A、R各角度对平面和高程的影响分析和精度预估。所以在多视角敏捷成像任务制定时,可以使用本文所用仿真模型,构建具有最优交会角CA和等分仰角BIE的立体像对,预估图像定位精度,满足测图要求。

上述结果假设了影像分辨率均一致,而在大视角成像条件下,分辨率常退化到约1.5倍。在假设了指向确定精度均为1弧度秒情况下,高程精度较低。而在组合使用星敏和陀螺的测量特性后,两个摄站的指向确定相对精度会提高数倍,即如双线阵

或者单线阵同轨立体的指向确定相对精度将高于异轨立体的数倍以上,所以也能获得更好的高程精度,达到与平面精度相当或者更高的水平。此外,在城市三维建模中,还需要兼顾建筑物立面影像的获取。综合考虑上述所有因素后,利用文中所述基于前方交会的仿真模型,开展定位精度的计算和预估,可以为城市三维建模中多视角立体影像的选择、卫星工作模式的制定等提供参考。

参考文献:

- [1] 王任享. 三线阵 CCD 影像卫星摄影测量原理[M]. 北京:测绘出版社,2006.
WANG Renxiang. Satellite photogrammetric principle for three-line-array CCD imagery[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006.
- [2] 祝晓坤. 基于 WorldView-3 卫星多视角数据的三维实景建模技术研究[J]. 城市勘测, 2017(5): 6-11.
ZHU Xiaokun. Study on the 3D modeling technology based on multiview worldview-3 satellite data[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2017 (5): 6-11.
- [3] 唐新明. 资源三号卫星测绘技术与应用[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1482-1491.
TANG Xinming. Technology and applications of surveying and mapping for ZY-3 satellites[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1482-1491.
- [4] 曹海翊. 高分辨率立体测绘卫星技术研究[J]. 遥感学报, 2021, 25(7):1400-1410.
CAO Haiyi. The study of high resolution stereo mapping satellite[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(7):1400-1410.
- [5] 范立佳. 高分多模卫星工作模式设计与在轨验证[J]. 航天器工程, 2021, 30(3): 36-42.
FAN Lijia. Operating mode design and on-orbit verification of GFDM-1 satellite [J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(3): 36-42.
- [6] JEONG J. Comparison of position accuracy of a rigorous sensor model and two rational function models for weak stereo geometry [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 108: 172-182.
- [7] 宁津生. 测绘学概论[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2004: 73-78.
NING Jinsheng. Introduction to geomatics [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004: 73-78.
- [8] 王树根. 摄影测量原理与应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2009: 86-89.
WANG Shugen. The principles and application of photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009: 86-89.
- [9] CAIN J. Stereomodel acquisition geometry[D]. Berkeley, USA: U.C.Berkeley, 1989.
- [10] CHOI S Y. A comparison of accuracies of the RPC models: Homo- and hetero- type stereo pairs of geoeye and worldview images [C]//Proceedings of ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Melbourne, Australia: ISPRS, 2012.

(编辑:张蓓)