

吴献文. 倾斜摄影空中三角测量结果若干优化方法[J]. 华南地震, 2021, 41(1): 94–101. [WU Xianwen. Several Optimization Methods for Aerial Triangulation Results in Oblique Photography[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(1): 94–101]

倾斜摄影空中三角测量结果若干优化方法

吴献文

(广东工贸职业技术学院, 广州 510510)

摘要: 倾斜摄影测量技术作为一项新兴的测绘新技术, 在各领域中得到了普及, 其三维重建有五个关键技术流程组成, 分别是影像特征点提取与匹配、空中三角测量、密集点云匹配、三角网构建和纹理映射。其中空中三角测量是最关键技术, 如果空中三角测量不成功将导致三维重建失败。通过对影响空三结果断裂、空三结果分层交叉、空三结果弯曲、空三结果水域接壤处分层等相关因素进行分析, 提出倾斜摄影空中三角测量结果若干优化方法, 并且以实际生产项目为例, 采用 Context Capture 软件进行解算验证。结果表明: 提出的空中三角测量优化方法能够提高三维重建生产效率, 同时对倾斜摄影测量的空中三角测量算法优化有借鉴意义。

关键词: 倾斜摄影测量; 空中三角测量; 影像匹配; 三维重建; 优化方法

中图分类号: P231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2021)01-0094-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.01.13

Several Optimization Methods for Aerial Triangulation Results in Oblique Photography

WU Xianwen

(Guangdong Polytechnic of Industry and Commerce, Guangzhou 510510, China)

Abstract: As a novel surveying and mapping technology, oblique photography has been widely used in various fields, and its 3D reconstruction is composed of five key technical processes, namely image feature point extraction and matching, aerial triangulation, dense point cloud matching, triangulation network construction and texture mapping. Among them, aerial triangulation is the most important, if it is not successful, it will lead to the failure of three-dimensional reconstruction. In this paper, the relevant factors which affected fracture, overlap stratification, bending, water boundary stratification of aerial triangulation result were analyzed, furthermore, several optimization methods for aerial triangulation result of oblique photography were proposed, which are validated by using Context Capture software in practical production projects. The result shows that the proposed air triangulation optimization method can improve the efficiency of 3D reconstruction, and it can be used for reference to the optimization of aerial triangulation in oblique photography.

Keywords: Oblique photography; Aerial triangulation; Image matching; 3D reconstruction; Optimization method

收稿日期: 2020-12-10

基金项目: 广东省教育厅普通高校重点科研平台(2020CJPT023); 校级重点科研平台(2020-PT-01)

作者简介: 吴献文(1969-), 男, 高级工程师, 主要从事无人机低空摄影测量与遥感教学与研究。

E-mail: 957977080@qq.com

0 引言

倾斜摄影测量技术作为一项新兴的测绘新技术,在各领域中得到了普及^[1-2],其三维重建有五个关键技术流程组成,分别是影像特征点提取与匹配、空中三角测量^[3-4](简称空三)、密集点云匹配、三角网构建和纹理映射^[5]。参与过倾斜摄影测量项目的人都深有体会,在外业数据采集顺利的前提下,项目生产真正的痛点主要在内业数据处理。内业数据处理又以空三解算为核心^[6]。空三解算是三维重建的重中之重,但很多技术人员在实际作业生产中,只关注数据采集的硬件设备而忽视了数据处理。作业过程中航拍效率很高,但是由于数据处理速度低,庞大影像数据积压,整体效率偏低,导致项目进展极为缓慢。

空三解算存在的主要问题是:在花费大量时间运算后,结果出现断裂、分层交叉、弯曲等现象,这要花费技术人员大量精力进行人工干预。甚至人工干预不成功的,直接导致空三解算失败,浪费全部时间与精力。降低空三结果断裂、分层交叉、弯曲产生的概率,可以节约大量时间,降低生产成本。针对这个目标,可以从空三技术流程出发,对相机畸变、影像姿态与色差、像控点布设、连接点选择等方面进行分析,找出倾斜摄影空三结果的优化方法。

1 倾斜摄影空三技术流程

倾斜摄影空三技术流程主要包括:建立影像拓扑关系、影像特征点提取、影像匹配、光束法区域网平差,最后输出空三结果^[6]。

1.1 建立影像拓扑关系

倾斜摄影可以获取垂直、前视、后视、左视及右视五组影像^[7],除垂直影像外,其它四组影像都为倾斜影像,所有影像都对应有 POS(Position and Orientation System)定位数据,可提供近似的影像外方位元素^[8],从而建立影像间的相对位置关系^[9],自动重构倾斜影像航带^[10]。

1.2 影像特征点提取

由于 SIFT 算子对于倾斜影像特征提取具有较好的重复率,所以影像特征点提取一般采用 SIFT 算子。在提取计算之前,需加入相机畸变参数、影像色差等影响因素,有利于准确快速进行特征

提取。

1.3 影像匹配

影像匹配实质是如何准确快速获取多视倾斜影像的同名点坐标,从而获取地物三维特征信息,形成点云数据^[11]。倾斜影像匹配一般采用基于特征的影像匹配算法,算法的数学模型多数采用适用于倾斜影像的多视最小二乘法。

1.4 光束法区域网平差

采用 POS 辅助的方法进行平差,以像控点坐标、像点坐标、GNSS 摄站坐标和 IMU 姿态角为观测值^[9],以物点地面坐标、影像外方位元素以及各种系统误差改正参数为待定参数^[12]。按照像控点坐标、像点坐标、POS 系统提供的 GNSS 摄站坐标及 IMU 姿态角的测量精度^[12],分别给予观测值不同的权,利用最小二乘平差法求解物点的三维地面坐标和影像外方位元素的最或然值^[12-13]。

2 空三相关因素分析与优化方法

从倾斜摄影测量的空三技术流程可以得出,算法涉及相机畸变参数、影像姿态与色差、像控点布设、连接点选择等方面。在实际生产中,采用的三维重建软件众多,不同的三维重建软件采用的算法往往不太一样,但是大多数算法基本参考经典算法,或者在其基础上拓展创新。从算法原理角度分析,可以推测出空三结果出错或是无法成功的因素可能来以下几个方面。

2.1 光照变化与相机畸变影响

多数三维重建软件的空三算法都对光照变化反应灵敏。同一测区,在不同时段航拍的影像,因气象条件、光照变化等因素的影响导致影像存在色差时,会导致空三解算过程影像特征匹配不稳定,导致空三解算失败。相机畸变也可以导致空三解算过程影像匹配不准确,导致空三结果弯曲。

优化方法:在导入影像后,设置每一相机的畸变参数。根据高度不同而分开空三解算,另外也要考虑拍摄时间过长导致拍照时有阴天晴天等差别,如果色差明显必须区分开来,定义到不同的组别里。空三运算的第一步就是解算同名点,即匹配多张照片中同一物体的位置信息。像田地、海水等纹理不明显的物体来说,解算同名点比较

困难,需要在边界处人为多测设一些像控点。另外如果结果显示的模型大小形状基本匹配,而只是方向倾斜的话,可以在空三解算前另外定义几个连接点来控制方向。

2.2 影像数据分块影响

倾斜影像数据量往往比一般正射数据量大很多倍,我们常用的三维重建软件进行空三处理海量数据时,为了提高生产的效率,采用对数据进行分块、逐块空三解算、最后再合并解算的策略,但是多数软件的空三合并功能的稳定度仍有待提高,并且进行并行空三解算时,只处理影像特征点提取及匹配,未有效对自由网构建进行并行化处理,最终导致块合并后的空三结果出现问题。

优化方法:选择多次重复空三解算,反复调整参数,或者在块与块衔接处人工添加有效连接点,或者在块与块衔接处增加像控点数量等,从而得到比较合适的结果。

2.3 POS 定位数据精度影响

有些软件的空三解算区域网平差未有效利用影像的 POS 定位数据。航空摄影时,POS 定位数据中的 GNSS 位置存在航带分布的系统误差,称为航带误差。在经典的 GNSS 辅助平差时,往往需要对航带误差进行改正,如果软件没有进行此处理,故往往无法获得高精度平差结果。另外,进行航带改正的另一个优势是当控制点的坐标系和 GNSS 的坐标系不相同(如分别为 2000 国家大地坐标系和 WGS84 坐标系时),可以通过平差改正,使控制点的坐标系和 GNSS 的坐标系趋近一致。如果航带信息不能够有效利用,可能会导致空三结果出现严重的分层交叉。

优化方法:选择相关软件的空三解算功能,解算初始空三结果,将空三结果作为 POS 初值导入三维重建软件中,再次进行空三解算,有效提高空三成功率,得到合适空三结果。

3 实例验证

本验证实例为某大学粤东校区规划实景三维模型与 1:500 地形图生产项目,面积约 12 km²,该区域相对平坦,但水域分布较多,交通不便,航飞时间跨越两天,采用五拼倾斜相机,共飞 5 架次,获取影像 26 万多张。三维重建采用 Context Capture 软件解算。为了验证需要,解算数据分为

整体解算、按架次分别解算再合并、人为分区解算再合并等方式,并且对相机畸变参数、像控点、连接点等因素根据解算需要进行调整。经过解算,出现断裂、分层交叉、弯曲等空三结果,经过调整参数、人工干预等优化方法,空三结果表现正常。

3.1 空三结果断裂优化处理

空三结果出现断裂的情况,如图 1 所示。这种情况一般是光照变化影响,通过对不同时间段拍摄的影像进行分组,并且人工干预增加连接点,在进一步空三解算,结果成功,连接点空三解算情况见表 1,结果如图 2 所示。最佳的优化方法是采用具有消除色差的倾斜相机,精心规划飞行时间,减少光照变化。

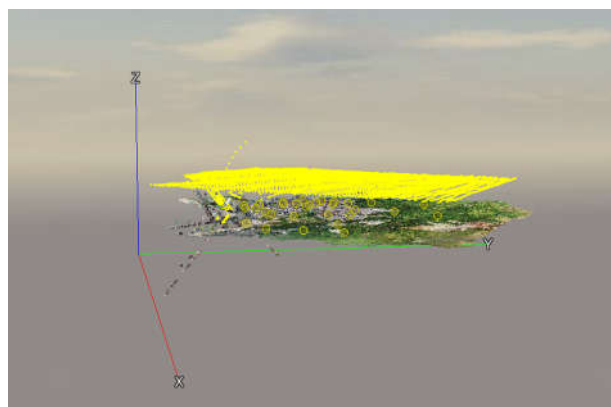


图 1 空三结果断裂示意图

Fig.1 Fracture diagram of aerial triangulation result



图 2 断裂经过优化处理后结果示意图

Fig.2 Diagram of fracture after optimization

3.2 空三结果分层交叉优化处理

空三结果出现分层交叉情况,如图 3 所示。出现这种情况一般是任意模式、不加入约束条件下的空三解算结果,优化处理的办法是加入 POS 数据、像控点并量测,再次进行空三解算,如果还不理想,人工干预加入连接点,再一次空三解算,一般可以取得合适结果,人工连接点空三解算情况见表 2,结果如图 4 所示。

表 1 空三结果出现断裂人工加入连接点后数据处理情况

Table 1 Data processing status after manually joining connection points when fracture appeared in aerial triangulation result

点名	北坐标 <i>X</i> /m	东坐标 <i>Y</i> /m	高程 <i>Z</i> /m	所在像片数	重投影 误差/pixels	距离投影误差/m
User Tie Point 1	560 255.5939	2 490 302.946	106.376 177 6	16	0.75	0.016 68
User Tie Point 2	559 901.0291	2 490 462.486	102.823 022 3	19	0.59	0.013 78
User Tie Point 3	559 745.320 7	2 490 446.399	103.441 816 4	15	0.83	0.014 86
User Tie Point 4	560 244.454 7	2 490 325.686	106.367 190 3	18	0.83	0.014 73
User Tie Point 5	559 905.763 3	2 490 433.226	102.704 720 0	16	0.71	0.018 53
User Tie Point 6	559 867.005 0	2 490 865.058	102.589 355 0	15	0.83	0.016 06
User Tie Point 7	559 977.394 2	2 490 724.810	105.935 633 4	15	0.78	0.014 02
User Tie Point 8	560 027.284 6	2 490 659.769	104.752 575 6	15	0.84	0.015 74
User Tie Point 9	559 895.594 5	2 490 691.228	106.078 377 7	15	1.16	0.017 44
User Tie Point 10	560 181.122 1	2 490 630.734	107.4497979	16	0.54	0.007 19
User Tie Point 11	560 352.968 4	2 490 342.665	106.803 780 4	19	0.63	0.012 51
User Tie Point 12	560 248.798 3	2 490 462.979	107.559 985 6	15	0.83	0.0137
User Tie Point 13	560 064.457 3	2 490 415.502	105.775 201 0	15	0.89	0.015 33
User Tie Point 14	560 120.233 7	2 490 511.103	106.103 306 6	14	0.67	0.011 94
User Tie Point 15	559 837.216 2	2 490 628.154	104.649 873 7	15	0.82	0.013 18
User Tie Point 16	559 820.859 3	2 490 416.240	102.802 627 0	15	0.58	0.009 11
User Tie Point 17	560 077.292 1	2 490 261.089	99.291 557 7	13	0.71	0.020 29
User Tie Point 18	560 181.000 6	2 490 405.861	106.3334618	15	0.64	0.02165
全中误差					0.77	0.015 21
平均误差					0.78	0.014 86

表 2 空三结果出现分层交叉人工加入连接点后数据处理情况

Table 2 Data processing status after manually joining connection points when overlap stratification appeared in aerial triangulation result

点名	北坐标 <i>X</i> /m	东坐标 <i>Y</i> /m	高程 <i>Z</i> /m	所在像片数	重投影 误差/pixels	距离投影误差/m
User Tie Point 1	560 672.206 7	249 023 4.886	109.920 565 2	15	0.87	0.015 17
User Tie Point 2	560 578.200 8	249 041 7.134	106.674 647 4	16	1.04	0.015 92
User Tie Point 3	560 711.961 4	249 030 7.657	110.460 421 5	16	1.13	0.019 21
User Tie Point 4	560 717.128 6	249 036 7.676	112.378 057 5	15	0.65	0.013 85
User Tie Point 5	560 729.847 7	249 050 4.539	111.594 496 3	15	1.05	0.014 95
User Tie Point 6	560 601.083 9	249 048 0.155	107.914 195 0	15	0.47	0.014 94
User Tie Point 7	560 708.651 4	249 047 8.138	109.533 741 3	17	0.86	0.013 42
User Tie Point 8	560 625.053 4	249 033 6.249	106.869 153 0	15	0.9	0.011 97
User Tie Point 9	560 599.876 3	249 044 9.589	108.311 598 9	15	1.08	0.015 63
User Tie Point 10	560 544.472 1	249 044 3.689	109.027 930 0	17	0.88	0.015 22
User Tie Point 11	560 624.566 8	249 041 1.227	108.816 102 6	15	0.84	0.021 51
User Tie Point 12	560 655.421 5	249 034 5.645	108.767 225 3	15	0.98	0.014 81

(转下表)

(接表 2)

点名	北坐标 X/m	东坐标 Y/m	高程 Z/m	所在像片数	重投影 误差/pixels	距离投影误差/m
User Tie Point 13	560 603.690 2	249 037 3.445	106.071 535 8	15	0.86	0.016 53
User Tie Point 14	560 664.502 8	249 042 6.702	108.408 312 6	15	1.2	0.020 51
User Tie Point 15	560 726.481 9	249 043 3.407	112.383 863 3	16	0.63	0.013 47
全中误差					0.92	0.016 02
平均中误差					0.88	0.015 17

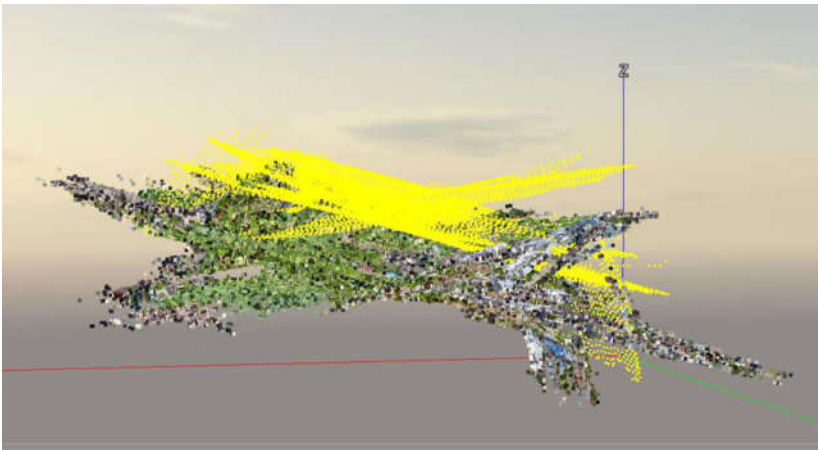


图 3 空三结果分层交叉示意图

Fig.3 Diagram of overlap stratification of aerial triangulation result

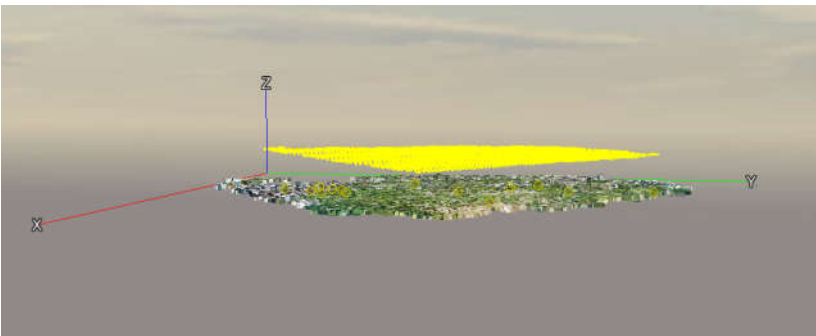


图 4 分层交叉经过优化处理结果示意图

Fig.4 Diagram of overlap stratification after optimization

3.3 空三结果弯曲优化处理

在空三解算前加入像控点、POS 数据、相机畸变参数等要素，但还是出现空三结果弯曲情况，如图 5 所示。一般出现这种情况下主要存在影像重叠率不够大、边缘像控点数量不够、关键点密度低等因素，解决这些因素并人工干预加入连接点，增加连接点之后空三结果都能得到基本优化，得到正确结果，人工连接点空三解算情况见表 3，结果如图 6 所示。

3.4 空三结果水域接壤处分层优化处理

如图 7 所示，空三解算如果遇到了大面积水域情况，将不能自动匹配同名点，这时候需要人工干预加入数量较多的正确连接点，确保水域两边有足够多的同名点。人工连接点空三解算情况见表 4，结果优化处理如图 8 所示。如果测区水域面积比较大，或许水域分布较多，要从航飞摄影上解决一些问题，例如，精心规划航线，避开大面积水域，加大影像重叠率等。

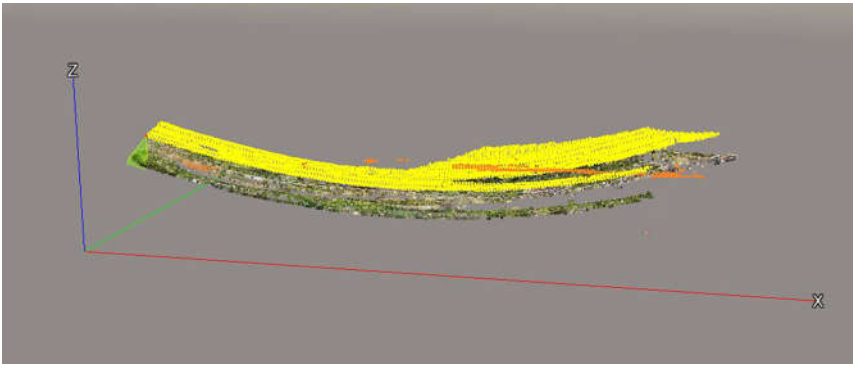


图 5 空三结果弯曲示意图

Fig.5 Diagram of aerial triangulation result bending

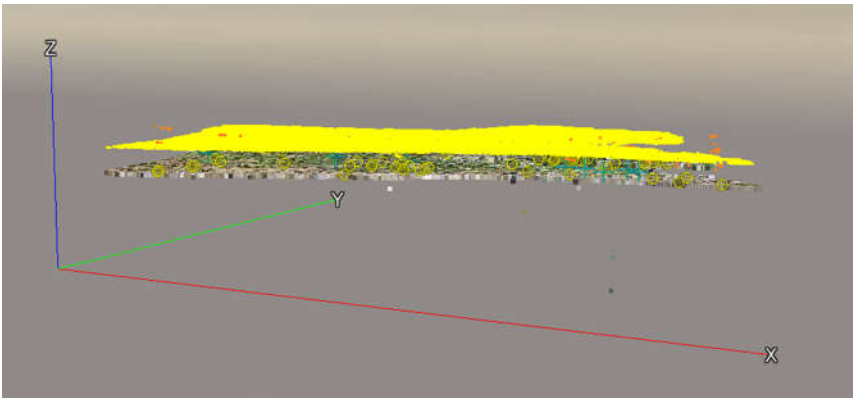


图 6 弯曲经过优化处理结果示意图

Fig.6 Diagram of bending after optimization

表 3 空三结果出现弯曲人工加入连接点后数据处理情况

Table 3 Data processing status after manually joining connection points when bending appeared in aerial triangulation result

点名	北坐标 X/m	东坐标 Y/m	高程 Z/m	所在像片数	重投影 误差/pixels	距离投影误差/m
User_Tie_Point_1	560 618.688 0	249 102 3.45	100.986 430 4	15	0.79	0.021 32
User_Tie_Point_2	560 644.018 3	249 093 0.878	108.469 395 7	15	0.86	0.022 27
User_Tie_Point_3	560 670.671 8	249 101 1.590	101.218 578 5	15	1.3	0.022 01
User_Tie_Point_4	560 575.463 0	249 106 7.342	103.071 400 8	15	0.97	0.020 06
User_Tie_Point_5	560 694.000 1	249 090 7.891	109.268 283 3	15	1	0.021 59
User_Tie_Point_6	560 658.098 1	249 091 0.552	108.247 771 9	15	1.19	0.027 17
User_Tie_Point_7	560 349.911 2	249 114 5.785	105.473 736 2	15	0.93	0.016 64
User_Tie_Point_8	560 473.622 6	249 100 7.177	107.428 736 3	15	1.13	0.017 59
User_Tie_Point_9	560 752.886 3	249 101 8.147	105.953 021 1	15	0.94	0.020 72
User_Tie_Point_10	560 467.276 8	249 104 7.271	107.628 179 9	15	1.84	0.023 12
User_Tie_Point_11	560 362.366 5	249 107 9.115	118.202 114 9	15	0.94	0.021 49
User_Tie_Point_12	560 321.403 4	249 113 1.000	120.162 763 7	15	1.42	0.023 25
User_Tie_Point_13	560 720.918 1	249 101 3.268	103.601 781 9	15	1.08	0.047 92
User_Tie_Point_14	560 637.351 3	249 108 0.101	109.4013990	15	0.96	0.022 85

(转下表)

(接表 3)

点名	北坐标 X/m	东坐标 Y/m	高程 Z/m	所在像片数	重投影 误差/pixels	距离投影误差/m
User_Tie_Point_17	560384.5090	249 104 1.706	117.886 342 2	15	0.86	0.016 46
User_Tie_Point_18	560 587.117 6	249 104 1.73	100.987 698 4	15	1.23	0.027 77
User_Tie_Point_19	560 715.693 0	249 103 5.385	103.230 827 3	15	0.93	0.016 04
User_Tie_Point_20	560 703.263 7	249 086 2.117	120.0320294	15	0.73	0.016 44
User_Tie_Point_16	560 466.834 2	249 098 7.272	111.232 677 0	15	0.68	0.014 69
全中误差					1.06	0.022 79
平均误差					0.96	0.021 49

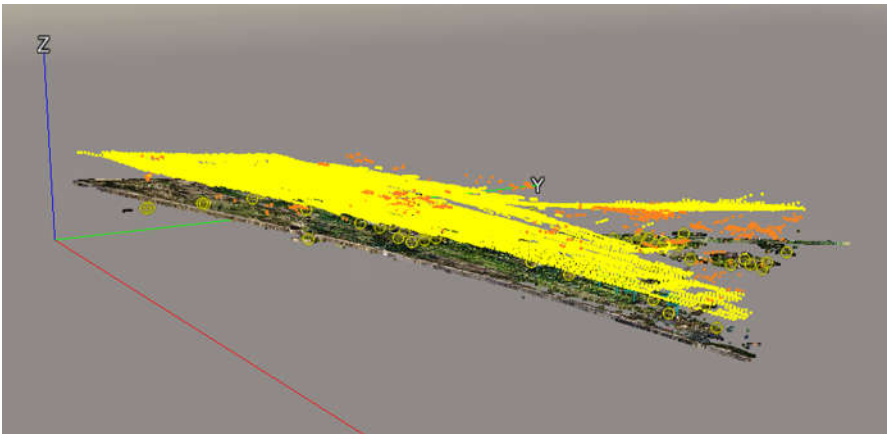


图 7 空三结果水域接壤处交叉示意图

Fig.7 Diagram of intersection at the intersection of water boundary of aerial triangulation result

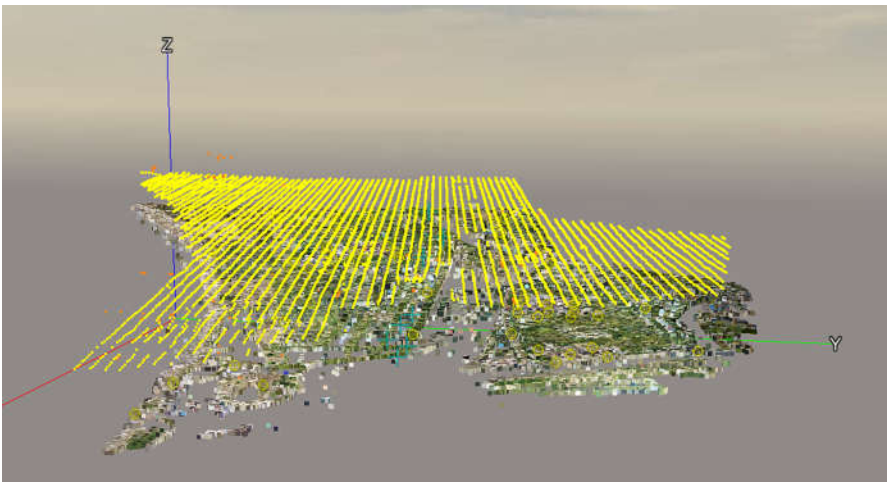


图 8 水域接壤处交叉经过优化处理结果示意图

Fig.8 Diagram of optimization result at the intersection of water boundary

4 结论

在倾斜摄影测量中空三解算非常复杂，经常出现意想不到的问题，通过以上的若干优化操作。一定程度提高空三解算成功率，减少失败的次数，对能够提高三维重建生产效率有积极意义。

为了让数据生产更加优化，达到更好更快的效果，必须配备精良的硬件设备，精心规划航线，

提高像控点精度与密度，同时需要多种不同类型软件搭配使用，找到最优的生产技术路线。随着倾斜摄影的普及，出现越来越多的与处理倾斜影像相关的软件，但是，三维重建软件要注重优化倾斜摄影测量空三算法，才能从根本上解决空三解算复杂问题，希望上述若干优化方法对优化空三算法具有借鉴意义。

表 4 空三结果出现水域接壤处分层人工加入连接点后数据处理情况

Table 4 Data processing status after manually joining connection points when stratification appeared at water boundary in aerial triangulation result

点名	北坐标 X/m	东坐标 Y/m	高程 Z/m	所在像片数	重投影 误差/pixels	距离投影误差/m
User_Tie_Point_1	558 155.652 3	248 372 3.929	178.425 803	15	0.85	0.036 69
User_Tie_Point_3	558 256.786 9	248 373 9.244	176.982 510 6	15	1.07	0.029 71
User_Tie_Point_2	558 258.028 1	248 359 8.749	169.577 145 0	15	0.59	0.023 9
User_Tie_Point_4	558 083.350 4	248 324 7.399	191.759 031 6	15	0.67	0.023 67
User_Tie_Point_5	557 727.63	248 263 3.767	229.190 503 5	15	0.73	0.019 44
User_Tie_Point_6	557 621.779 4	248 292 3.898	203.583 555 9	15	0.83	0.026 7
User_Tie_Point_7	558 066.204 9	248 343 8.619	174.107 217 0	15	0.72	0.035 9
User_Tie_Point_8	558 241.540 6	248 351 4.489	169.319 623 6	15	0.71	0.025 64
User_Tie_Point_9	557 810.973 2	248 310 1.121	194.679 360 4	15	0.72	0.017 68
User_Tie_Point_10	557 753.838 9	248 281 1.508	208.838 647 7	15	0.8	0.017 07
User_Tie_Point_11	557 846.640 3	248 283 5.316	223.642 681 4	15	1.23	0.032 54
User_Tie_Point_12	557 927.298 3	248 323 0.484	189.931 499 0	15	0.59	0.034 95
User_Tie_Point_13	557 968.010 9	248 310 7.253	206.864 196 9	15	0.72	0.035 39
User_Tie_Point_14	557 729.274	248 303 8.084	197.035 542 3	15	0.86	0.018 51
User_Tie_Point_15	557 561.194 3	248 285 0.964	218.211 016 8	15	0.74	0.029 81
User_Tie_Point_16	558 086.968 7	248 324 4.616	191.325 219 3	15	0.71	0.032 51
User_Tie_Point_17	557 716.865 3	2482739.974	214.328 040 6	15	0.6	0.017 41
User_Tie_Point_18	557 933.207 3	248 318 6.711	191.218 131 6	15	0.81	0.029 15
User_Tie_Point_19	558018.2578	248 340 3.458	178.435 460 2	15	0.66	0.023 23
User_Tie_Point_20	557889.1783	248 280 0.834	236.6407255	15	1.03	0.018 7
User_Tie_Point_21	557 676.710 2	248 294 2.897	203.014 978 1	15	0.96	0.034 32
User_Tie_Point_22	558 028.182 4	248 314 2.497	203.597 078 6	15	1.28	0.034 47
User_Tie_Point_23	557 932.201	248 339 2.409	190.558 993 7	15	0.64	0.040 97
User_Tie_Point_24	558 059.375 5	248 355 1.388	183.6036615	15	1.35	0.039 38
User_Tie_Point_25	558 074.702 3	248 350 1.486	174.659 983 6	15	0.66	0.026 75
全中误差					0.85	0.0291
平均误差					0.73	0.029 15

参考文献:

[1] 吴献文,张鹏,曾琳. 基于消费级无人机倾斜影像的三维测图技术探讨[J]. 测绘通报,2019,(7):92-95.

[2] 黄娜婷. 解析测绘新技术在测绘工程测量中的应用[J]. 低碳地产,2016(13):66-66.

[3] 包丹丹. 倾斜摄影测量的空三精度和三维模型精度的评估方法研究[D]. 天津:天津师范大学,2017.

[4] 雍昭君. 无人机倾斜摄影测量三维建模精度多层次模糊综合评价研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.

[5] 胡亚东. 葫芦岛市高精度 GPS 控制网建立与数据处理 [D]. 沈阳:辽宁工程技术大学,2015.

[6] 王平论. 基于低空摄影测量的三维虚拟场景研究与实现 [D]. 徐州:中国矿业大学,2014.

[7] 王双亭, 程锬锬, 刘晓龙. 一种基于多视倾斜影像的

PMVS 改进算法[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015,34(1):59-63.

[8] 丁剑,肖金城,吴玉华. 把美丽真实地球搬回家[J]. 中国测绘,2013,(5):12-17.

[9] 魏祖帅. 倾斜摄影空中三角测量若干关键技术研究[D]. 焦作:河南理工大学,2015.

[10] 何敬. 基于点线特征匹配的无人机影像拼接技术[D]. 成都:西南交通大学,2013.

[11] 李军伟. 倾斜摄影测量技术的应用及展望[J]. 建筑工程技术与设计,2017,(11):653-653.

[12] 魏祖帅,李英成,陈海燕等. 倾斜多视影像空中三角测量的精度分析[J]. 遥感信息,2017,(4):6-10.

[13] 徐柳华. 无人飞行器影像处理研究及其实现[D]. 长沙:中南大学,2009.