无人机航测像控点布设方案对测绘成果精度的影响研究

尚天龙

山西地山规划设计咨询有限公司　山西　太原　030006

摘　要：无人机航测由于其便捷性、经济性和时效性的优点而在大比例尺地形图测绘、国土资源调查以及工程项目建设等方面被大量使用。而像控点是用于将空中摄影测量所获得的信息转换到实地的一个桥梁，它的好坏直接影响到后期空三加密的质量以及最后成图的质量。因此，本文从像控点的数量、位置、标志和精度等方面研究它们对于无人机航测的影响，并针对不同的地貌情况提出优化像控点布置的方法。结果表明，像控点的布置要满足“均匀分布、靠近边界、重要部位加强”的原则，在保证质量的基础上兼顾经济效益和工作效率。该文可为无人机航测工程中像控点的选择起到一定的借鉴作用。

关键词：无人机航测；像控点布设；空中三角测量；测绘精度；精度影响

引言

近年来，由于低空无人机平台以及轻小型航空相机的发展成熟，无人机航测成为一种有效的获取地理空间信息方式。相比于传统的有人机航空摄影测量，无人机航测有起降场地需求低、成图速度快、照片清晰等优点，特别适合于小范围、大比例尺的地形测绘工作。但是，由于无人机自身载重能力有限，所挂载的相机感光面小、镜头畸变严重，而且飞行过程中姿态不稳定，所以无人机航测对外业像控点的需求更大。像控点布置是无人机航测外业工作中重要环节，合理选择像控点的数量、位置、标志、精度以及地形条件等都会影响到后续空中三角测量的质量，从而影响到最终生成 DEM、DOM 和地形图的精度。目前，在像控点布置上存在着很大分歧，有些单位照搬传统航测的规定进行像控点布置，导致外业工作量巨大；也有一部分单位过于减少像控点的数量，造成成果精度不足的情况发生。因此，对像控点布置方案的研究就十分必要，它对于提高测绘产品质量有着重要意义。本文将介绍像控点布置的基本概念，然后从数量、位置、标志、精度以及地形条件等方面对它们之间的作用关系进行探讨，并提出一些改善建议。

1 无人机航测像控点布设的基本原理

1.1 像控点的定义与作用

像控点是航空摄影测量工作中，在地面上布置一些有精确平面位置及高程标志点，用于把像片上像素坐标转换成地面测量坐标。主要目的是给空中三角测量提供初始已知条件，限制区域性网平差过程中误差发散，保证计算结果与大地坐标系一致，在无人机航测中像控点还可以用于纠正相机畸变以及修正 POS 系统漂移造成的误差[1]。从误差传递角度讲，空中三角测量就是一种带有基准约束的最小二乘法平差方法，如果没有地面控制点，虽然可以通过连接点建立空间关系，但是整个区域网缺少一个固定的参照物，不能确定它的绝对位置和姿态，而像控点加入后可以给平差方程添加一个必要的基准约束，从而使未知量求解并且误差较小。所以像控点的质量以及分布情况就决定了该区域网能否得到较好的几何精度以及可靠性。

1.2 像控点布设的基本准则

像控点布设是摄影测量空三加密与区域网平差的基础环节，其位置、数量和精度直接影响成果的几何可靠性。布设应遵循以下准则：一是代表性。像控点应能反映测区地形、地物和影像质量，兼顾山地、平地、水域、居民地等不同区域，避免地貌信息单一。二是均匀性。像控点应在测区内合理均匀分布，既不过于集中，也不过于稀疏，以增强区域网几何约束和误差分配能力。三是边缘控制。测区边界应布设一定数量像控点，形成外围约束，防止区域网边缘扭曲、漂移或变形。四是可靠性。点位应目标清晰、易于识别量测，刺点准确，精度符合规范要求。此外，还应结合航摄比例尺、成图精度、地形条件和重叠度综合确定。只有坚持代表性、均匀性、边缘控制与可靠性统一，才能为后续空三加密和测绘产品生产提供保障。

2 像控点布设方案的关键影响因素

2.1 像控点数量对精度的影响

像控点的数量对空三加密精度的影响最大。一般而言，像控点越多，区域网平差所受到几何约束越大，其解算精度也越高。但并不是成比例提高。当像控点数量超过一定量之后，精度提高就缓慢下来，但是外业测量工作量仍然在增加。有研究认为，在一般情况下，对于普通的无人机航测工程，每平方千米布置 4 到 9 个像控点就可以满足从 1:500 到 1：2000 的比例尺的需求。数量过少会造成区域网的整体变形不能得到有效控制，过多则会造成资源浪费。从几何强度的角度来说，像控点相当于结构力学中的约束点。如果像控点数量不足，则区域网在薄弱的方向上发生变形不能得到有效控制，即产生全局性的位移或者扭曲现象；如果像控点足够多，则各个方向上的变形都被良好控制，精度达到一个比较平稳的状态[2]。而在实际生产中，像控点的数量应该根据成图比例尺、飞行重叠度、POS 精度以及地形情况等进行合理安排，而不是盲目地照搬一个固定的数目。

2.2 像控点空间分布对精度的影响

空间分布对精度的影响甚至大于数量方面的影响。理想的分布方式是使像控点在整个测区内形成一个比较均匀的网格，相邻像控点距离相近。如果像控点多集中在测区中心而在边角稀少，则会造成区域网边角部分产生较大变形；如果像控点沿着航向成线状分布，则会造成垂直于航向方向上精度降低。另外，高程像控点和平面像控点要结合起来使用，两者结合可以提高三维坐标求解精度。从误差传播的角度来看，区域网平差精度由法方程系数矩阵条件数决定。像控点分布较均匀的情况下，系数矩阵条件数较小，容易求解；反之条件数较大，容易造成解不稳定。所以，在进行像控点布置时首先要考虑的是空间分布是否足够好，在此基础上再考虑增加或者减少一些像控点。

2.3 像控点标志设计与测量精度的影响

像控点标志几何形状、大小以及颜色反差对像控点在影像上识别精度有影响，在实际工作中一般使用 L 字形、十字形或者圆形标志，标志大小需根据航高及相机分辨率确定，以保证像控点在影像上占有一定数目像素，标志测量精度取决于所用设备及方法，利用 GNSSRTK 或静态测量可以得到厘米级精度，而全站仪交会测量在通视条件下也可以达到同样精度[3]。测量误差会传递到空三加密过程中，所以像控点本身精度要远远大于预期成果精度，通常情况下像控点测量中误差应在成图精度要求的五分之一到三分之一之间，如果像控点本身误差较大，即使布设方案在数量和位置上都是合理的，仍然不能满足成图精度要求，所以在外业工作中像控点布设质量管理和布设方案设计一样重要。

2.4 飞行参数与像控点布设的耦合关系

无人机飞行高度、重叠度、航带数等参数与像控点布设方案之间相互关联。飞行高度决定地面分辨率从而影响像控点标志可见性；航向重叠度与旁向重叠度影响连接点数量及其分布情况进而影响对像控点需求量，在大重叠度下连接点约束较强可以适当减少像控点数目而在小重叠度下由于连接点约束较弱需要增加像控点来弥补这种不足。同时相机内方位元素稳定性、镜头畸变模型选取及 POS 数据准确性也会与像控点布设相关联。当 POS 精度较高时像控点主要起到基准约束和系统误差补偿作用所需像控点数量较少而当 POS 精度较差时像控点还要起到姿态约束作用因此需要更多像控点。

3 不同地形条件下的像控点布设策略

3.1 平坦地区的布设策略

平坦地区地形起伏不大，影像纹理较为单调，连接点匹配较困难，在这种情况下应适当加密像控点，呈规则网格布置，网格大小依据成图比例尺以及精度要求而定；边缘部分需有足够的像控点以防整个区域网发生平移；平坦地区还可以用道路交叉口或者田埂交点等天然目标作为像控点来减少外业工作量；而在平坦地区，高程精度往往是一个问题，因为地形起伏很小，所以两张影像之间高程交会角度较小，从而使得高程求解更依赖于像控点，所以在平坦地区应该适当增加高程像控点的比例并且尽量使这些点均匀分布在各个地方以便加强在高程方向上的几何限制。

3.2 丘陵山地的布设策略

丘陵山地地形复杂，高差较大，影像投影差大，对于高程精度要求较高。像控点应沿山脊线、山谷线以及坡面分布，在不同高程带上都要有一定数量限制条件。高程像控点应适当增加比例，而且应主要选择在地形显著位置。另外，由于山地通视较差，像控点测站点测量最好用 GNSS 进行，尽量不用全站仪交会因为容易受到障碍物影响[4]。另外，山地地区还需要考虑像控点标志明显程度，由于地形遮挡以及阴影等影响，标志应选在面向阳光并且视线良好地方设置，不应设置在山谷或者悬崖阴影中。同时，飞行航带也

要考虑地形高低起伏情况，必要时可采取不同高度进行飞行以便获得合适重叠度。

3.3 城镇与密集建筑区的布设策略

城镇地区建筑物密集，遮挡严重，影像中人工地物较多但是有大量阴影存在。像控点宜选在空旷地方或者学校操场等地易于发现位置，不宜选取在高层建筑阴影区内。标志颜色要突出以便与复杂背景区分。另外由于城镇地区飞行高度一般不高，像控点间隔可以较小来满足高分辨率影像要求。另外还需注意城镇地区因高层建筑物造成投影差现象。投影差会使地物在图像中发生位移从而给像控点定位带来困难。所以像控点最好选在较低且平坦并且周围没有较高物体阻挡处设置以降低投影差影响。

4 像控点布设方案的优化与精度验证

4.1 布设方案的优化原则

像控点布设方案优化是在精度、效率以及成本之间进行折中。优化的原则是：以精度为目标确定最小像控点数；以误差传播规律为基础确定最佳的空间位置；以地形等为主要限制因素适当改变局部密度；以技术条件为基础选取适当的标志及测量手段。优化应当从技术设计到外业工作再到内业计算始终进行。而在实际工作中又可以采取分步优化的方法来进行：先按照成图比例尺和精度要求确定精度标准；然后根据区域网几何强度来确定像控点的数量及其基本布置方式；再根据当地的地形地貌等情况作出相应的修改；最后用检查点来进行检查评价所提出方案的效果，如果有必要还可以进一步优化。

4.2 精度验证方法与评价指标

精度检验一般用检查点法，就是在测区内布置一定数量的检查点，不参加空三加密计算，只用来检验成果精度，有平面中误差、高程中误差和最大残差等。检查点要均匀分布在测区各个位置上，特别是边沿地区以及地形起伏较大的地方都要有。检查点应独立选取，避免与像控点重合或相距过近，并保证其坐标精度高于待检成果，以使检验结果更客观可靠。通过对不同的像控点布置方式下检查点精度进行比较，可以知道哪种布置方式好一些，在以后工作中可以参考[5]。除了检查点法还可以用交叉验证法，就是把一部分像控点交换着作为检查点来进行检验，从而得出该种像控点布置方法的好坏。而残差分析能反映整个区域网内的误差情况，对方案的选择更有针对性。

4.3 像控点布设的发展趋势

随着 GNSS 辅助空中三角测量技术的发展，无人机航测对于地面像控点的需求逐渐减少。差分 GNSS 与 IMU 组合导航系统可以提供较高精度 POS 信息，大大减少需要布置像控点的数量。将来利用人工智能进行影像匹配及自动识别技术可以实现像控点的自动生成以及精度检验等工作，从而使得像控点布置更加简单便捷。另外，多种类型的数据联合应用也给像控点的布局带来新的可能。例如，激光雷达点云、倾斜摄影多视角影像以及卫片都可以起到一定像控点的作用，在一定程度上减轻外业工作量。但是不管怎样发展变化，像控点作为绝对参考的重要性在未来一段时间内不能被取代。

结束语

像控点布设方案是无人机航测精度控制体系中的关键环节，其合理性直接关系到测绘成果的可靠性与经济性。本文从像控点数量、空间分布、标志设计、测量精度及地形条件等多个维度，系统分析了布设方案对测绘成果精度的影响机理，并提出了不同条件下的优化策略。研究表明，像控点布设应坚持“均匀分布、边缘控制、重点加密”的原则，在满足精度要求的前提下尽量减少外业工作量。随着 GNSS 辅助空三与智能识别技术的发展，像控点布设方案将朝着少控制点、高自动化方向演进，但像控点作为精度基准的核心地位在短期内仍不可替代。测绘工作者应根据具体项目需求，科学设计像控点布设方案，实现精度与效率的统一。

参考文献

[1] 李德仁, 王密, 沈欣. 从数字摄影测量到智能摄影测量 [J]. 测绘学报,2021,50(9):1153-1162.

[2] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学 [M]. 武汉: 武汉大学出版社,2020.

[3] 袁修孝, 朱武, 武军郦.GPS 辅助空中三角测量及其质量控制 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版),2022,47(3):341-349.

[4] 王建超, 赵俊三, 李永平. 无人机低空摄影测量像控点布设方案优化研究 [J]. 测绘通报,2021(6):88-92.

[5] 刘凤英, 陈天恩, 张永军. 顾及地形特征的无人机航测像控点布设方法 [J]. 测绘科学,2023,48(2):156-163.