

doi: 10.6046/zrzyg.2023291

引用格式: 孙鑫超, 骆奇峰, 何宗友, 等. 面向条带状航测区域的无人机曲线航线设计方法探索[J]. 自然资源遥感, 2025, 37(1): 68-75. (Sun X C, Luo Q F, He Z Y, et al. Exploration of curved UAV flight path design methods for banded aerial survey areas [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025, 37(1): 68-75.)

面向条带状航测区域的无人机曲线航线设计方法探索

孙鑫超¹, 骆奇峰², 何宗友², 张奥丽¹, 蔡国林¹

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756; 2. 广东省国土资源测绘院, 广州 510700)

摘要: 为了提高无人机航测在条带状复杂地形区域的作业效率, 该文提出了一种曲线航线设计方法, 包括针对条带状区域的水平曲线和变高曲线航线规划算法, 及基于数字高程模型(digital elevation model, DEM)的航线安全性检测算法。首先, 构建了一个无人机航测实景仿真系统, 通过仿真实验从平面航测、变高航测及安全性检测3个方面对该方法进行了测试; 然后, 进行实际航摄实验, 验证其航摄生产数据成果质量。结果表明, 水平曲线航线设计算法和变高航线设计算法能够针对条带状地形复杂区域自动规划出合理的航线, 航线安全检测算法可确保航线的安全性; 相比于常规航线, 曲线航线的航摄数据成果质量同样能满足现有规范要求。针对条带状地形复杂区域的航测, 所提方法能够自动设计出合理、安全的航线, 可有效提高无人机航摄的作业效率。

关键词: 条带状区域; 无人机航测; 曲线航线设计; 安全检测

中图分类号: TP 79; P 237 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2025)01-0068-08

0 引言

近年来, 无人机技术飞速发展, 利用该平台进行摄影测量与遥感已成为一种获取空间数据的重要手段^[1-2]。在无人机航摄作业中, 航线设计是非常重要的环节^[3]。常规航线设计时, 航摄区域一般设计为一个矩形区域, 且无人机航向与航摄区域的一边平行, 沿着航线来回航摄实现全测区覆盖^[4-5]。但在条带状及地形复杂区域, 常规航线设计往往会产生大量的航线冗余、影像重叠度不足及航线安全等问题。为了提高条带状地形复杂区域无人机航测的作业效率, 需要根据测区的地形特征设计特殊的航线。

目前, 已有诸多学者对不同场景下的无人机航测航线设计开展了研究。针对建筑区域, 盛辉等^[6]对城市复杂区域建筑物的遮挡问题, 根据侧视影像的临界点进行测区航线设计; 毕瑞等^[7]的研究显示, 对单体建筑环视航线获取数据效率更高, 模型精度更好。针对复杂地形区域, 魏铎等^[8]针对滑坡地形, 分析倾斜影像的角度及重叠度并设计航线; 王炳乾等^[9]利用目标测区已有的数字表面模型(digital surface model, DSM)生成等高线并设计航线, 其成

果能更好地刻画地物侧面细节, 同时可避免无人机飞行高度频繁变化。针对航飞安全, 李天烁等^[10]利用已有的实景三维模型辅助无人机航线设计, 通过分析航线与模型是否相交判断其航线上是否存在障碍物。另外, Torres等^[11]通过分析航线航向并对测区范围多边形分割, 实现最小转弯次数的航线设计, 减少无人机电量消耗; 徐博等^[12]研究不规则多边形区域的航线规划算法, 降低了无人机作业的多余覆盖率。上述航线设计尽管考虑了建筑、复杂地形区域及航线障碍物判断等, 但针对条带状地形复杂区域的无人机航线规划研究较少, 也没有开展有效的航线安全检测分析。

基于此, 本文针对条带状地形复杂测区的几何特征, 尝试提出一种无人机曲线航测航线设计方法, 分别在平面和高程上开展曲线航线设计, 并基于数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据对航线进行安全检测分析。为验证该曲线航线设计的有效性, 本文将利用Cesium三维框架及开源地理数据构建一个无人机航测实景仿真平台, 通过仿真平台进行曲线航线设计与航线安全检测算法的验证, 然后进行实际航摄实验, 验证航摄生产数据成果质量。

收稿日期: 2023-09-22; 修订日期: 2023-12-31

基金项目: 四川省科技厅重点研发计划项目“国土空间规划三维智能管控关键技术研究及示范应用”(编号: 2022YFS0449)资助。

第一作者: 孙鑫超(2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事无人机摄影测量与遥感研究。Email: sxc123@my.swjtu.edu.cn。

通信作者: 骆奇峰(1969-), 男, 高级工程师, 主要从事工程测量、无人机遥感等方面的研究工作。Email: qifengluo2007@163.com。

1 曲线航线设计

1.1 平面曲线航线设计

设带状区域的中心线由拐点 P_0, P_1, \dots, P_k 连接组成,并由中心线向两边扩展宽度 D ,构成条带状几何多边形。为了避免航线冗余,应设计出契合条带状测区几何形状的曲线航线。首先,获取该多边形顶点的最小经度值和最小纬度值,并选择一个经度、纬度均小于最小经纬度的点作为坐标原点 O ,以正东方向为 X 轴,正北方向为 Y 轴,构建本地平面直角坐标系,如图1所示。

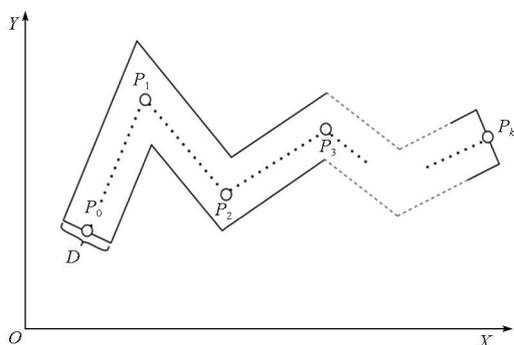


图1 构建坐标系

Fig.1 Constructing the coordinate system

其次,确定影像的分辨率并结合相机参数计算航线的相对航高^[13],即

$$H = f \cdot \frac{GSD}{a} \quad (1)$$

式中: H 为相对航高; f 为相机焦距; a 为像元尺寸(像元个数为 $m \times n$); GSD 为地面分辨率。求得 H 后,可根据旁向重叠度 E_y ,计算旁向航线间距 D_y ,并由条带状测区宽度 D 确定航线的最少条数 L_{numb} ,以保证其能够覆盖整个测区,其公式为:

$$D_y = \frac{H \cdot a \cdot m}{f} \cdot (1 - E_y) \quad (2)$$

$$L_{numb} \cdot D_y \geq D \quad (3)$$

式中: m 为相机水平方向像元个数; L_{numb} 取整数。

然后,利用中心线上的拐点计算其他航线上所有主要拐点的坐标。以奇数航线为例,第一次计算外扩航线拐点时 $t=1$,计算第一点 P_0 向左右两边外扩距离 D_y 的点坐标 P'_0 和 P''_0 。设 $P_0(x_0, y_0)$ 和 $P_1(x_1, y_1)$,向量 P_0P_1 由 P_0 点指向 P_1 ,计算 P_0P_1 的航向 α ,其值是向量与坐标系 Y 轴正半轴的夹角,即

$$\alpha = \arctan \frac{x_1 - x_0}{y_1 - y_0} \quad (4)$$

式中: α 的取值范围为 $(-\pi/2, \pi/2)$,而航向的范围为 $(0, 2\pi)$ 。因此,需按不同情况对 α 进行处理,即

$$\begin{cases} a = \alpha, & x_1 - x_0 > 0 \text{ 且 } y_1 - y_0 > 0 \\ a = \alpha + \pi, & y_1 - y_0 < 0 \\ a = \alpha + 2\pi, & x_1 - x_0 < 0 \text{ 且 } y_1 - y_0 > 0 \end{cases} \quad (5)$$

左右外扩2点 P'_0 和 P''_0 到 P_0 的方位角与 P_0P_1 航向垂直,因此位于 P_0P_1 左边的点 P'_0 到 P_0 的方位角 $\theta = \alpha - \pi/2$,右边点 P''_0 到 P_0 的方位角为 $\theta = \alpha + \pi/2$,则

$$\begin{cases} x_p = x_0 + L \cdot \sin\theta \\ y_p = y_0 + L \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (6)$$

式中: (x_p, y_p) 为待求点的坐标; L 为航线间距; θ 为待求点到 P_0 点的方位角。分别带入 P'_0 和 P''_0 方位角可得到第一点 P_0 的2个外扩点坐标。最后一个点 P_k 的两边外扩点计算方法与第一点 P_0 的外扩点计算方法一致。

P_1 点到 P_{k-1} 点的外扩点利用向量的方法计算,以 P_i 为例,如图2所示。其公式为:

$$\begin{cases} (x_p, y_p) = (x_i, y_i) + L/\sin\theta \cdot (v_1 - v_2) \\ \sin\theta = \frac{|v_1 \times v_2|}{|v_1| |v_2|} \end{cases} \quad (7)$$

式中: v_1 和 v_2 分别为 P_i 点前后方向的单位向量, (x_p, y_p) 为 P'_i 坐标。同样,对 v_1 和 v_2 向量去负方向即可求得 P''_i 坐标。

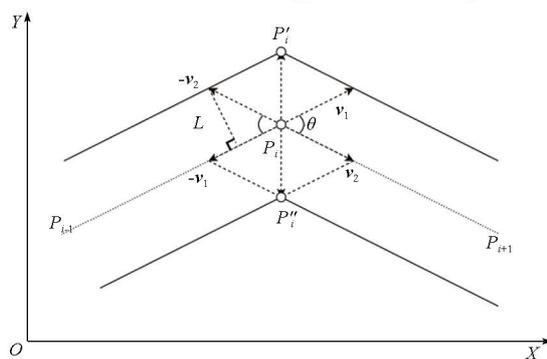


图2 P_i 点外扩计算示意

Fig.2 Diagram of P_i point outreach calculation

奇数航线中心线可作为一条航线,航线条数为 s 时(s 为奇数),需循环计算 $(s-1)/2$ 次中心线的外扩,每次外扩距离为 $t \cdot D_y$ (t 为当前计算的次数)。偶数航线则不包括中心线。偶数航线条数为 s 时,需要遍历计算中心线 $s/2$ 次,每次外扩距离为 $(t-1/2) \cdot D_y$ 。由此可得整个航线的所有拐点,按照逻辑顺序将它们串联起来构成主要航线。

最后,在前后相邻的2个航线拐点之间的航线上计算航摄点。设航向重叠度为 E_x ,相机纵向像元

个数为 n , 则每 2 张影像的摄影基线 B 为:

$$B = \frac{H \cdot a \cdot t}{f} \cdot (1 - E_x) \quad (8)$$

假设航线 2 个拐点间的距离为 S , 从后一拐点开始向前一拐点方向每次增加距离 B 记为一个航摄点, 则这段航线上航摄点的个数至少为 $t = S/B$ (t 取整) 个, 这样才能保证航向重叠度基本满足任务要求。同理, 计算每一段航线上的所有航摄点, 构成整个条带状区域的平面曲线航线。

1.2 变高航线设计

常规航线一般基于测区的平均海拔设计航线相对航高, 使无人机保持在一个水平航线进行拍摄, 如图 3(a) 所示。但在地形起伏较大的测区, 无人机以该航线航摄将导致部分区域的影像重叠度不能满足需求, 甚至可能由于设计航高不足, 造成无人机撞山等安全事故。为避免这些情况的发生, 本文将基于水平曲线航线和开源 DEM 数据, 根据测区地形起伏开展相对航高固定的变高航线设计, 如图 3(b) 所示。在确定航摄点与地面间的相对行高 H_w 后, 依据航摄点的平面坐标 $F_i(x_i, y_i)$ 获取 DEM 对应位置的高程 H_i , 则变高航线每个航摄点的三维坐标 F_i 计算公式为:

$$F_i(x_i, y_i, HE_i) = F_i(x_i, y_i, H_i + H_w) \quad (9)$$

式中: HE_i 为高航线第 i 个航摄点的高度。即与水平曲线航线相比, 每个航点平面坐标 (x_i, y_i) 不变, 将水平曲线航线航点三维坐标中的高程替换为 DEM 对应位置高程 H_i 与相对行高 H_w 之和, 这样就获得了所需要的变高航线。

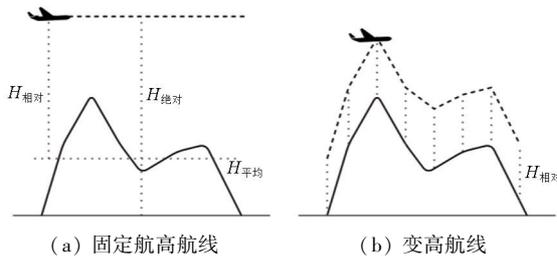


图 3 固定航高与变高航线示意图

Fig.3 Schematic diagram of fixed heading height and variable height route

1.3 航线安全检测

仿真平台没有提供三维缓冲区的构建和空间分析功能, 难以直接实现航线安全性的检测。为此, 本文借鉴缓冲区分析的思路, 提出了一种八分角航线安全检测算法。首先构建局部三维坐标系, 并将航线上所有航摄点的经纬度坐标都转换到局部三维坐标系下。其中, 局部三维坐标系为右手空间直角坐标系, 选择一个小于最小经度和纬度的点 O 作为坐

标系原点, X 轴指向正东, Y 轴指向正北, Z 轴竖直向上。然后设定航线安全缓冲范围 L , 并将每 2 个相邻的航摄点作为一个计算组, 获取空间中的检测点。以 P_0P_1 为例, 先求取第一个检测点 C_0 的坐标, C_0 点需要满足以下条件: ①空间向量 P_0C_0 垂直于 P_0P_1 ; ② OC_0, OP_0, OP_1 3 个向量位于同一平面; ③ P_0C_0 的距离为 L 。

这样就可以获得空间中满足条件的 2 个点, 取其中一点作为 $C_0(x, y, z)$ 。已知 $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 和 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$, 由 P_0C_0 垂直于 P_0P_1 可得:

$$(X_1 - X_0) \cdot (x - X_0) + (Y_1 - Y_0) \cdot (y - Y_0) + (Z_1 - Z_0) \cdot (z - Z_0) = 0 \quad (10)$$

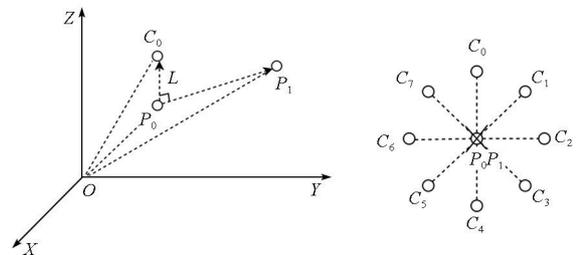
再由 OC_0, OP_0 和 OP_1 这 3 个向量共面可得:

$$(OP_0 \times OP_1) \cdot OC_0 = 0 \quad (11)$$

设 $OP_0 \times OP_1$ 的结果为 (X_f, Y_f, Z_f) , 则对式 (10) 和式 (11) 化简联立为:

$$\begin{cases} (X_1 - X_0)x + (Y_1 - Y_0)y + (Z_1 - Z_0)z = \\ (X_1 - X_0)X_0 + (Y_1 - Y_0)Y_0 + (Z_1 - Z_0)Z_0, \\ X_f \cdot x + Y_f \cdot y + Z_f \cdot z = 0 \end{cases} \quad (12)$$

求解该方程组可得一个特解 $x_0 = A^+B$, 其中 $A^+ = A^H(AA^H)^{-1}$ 为系数矩阵的广义逆。由此, 对 P_0x_0 向量单位化并乘以距离 L , 即可得 C_0 点的坐标。其他检测点坐标位置关系如图 4 所示, P_0C_2 垂直于 P_0P_1 , 且垂直于 P_0C_0 , C_1 点位于 C_0C_2 的中点, C_4 点位于 P_0C_0 反方向, C_3 点同样位于 C_2C_4 中点, C_5, C_6 和 C_7 点分别在向量 P_0C_1, P_0C_2 和 P_0C_3 的反方向。求取 P_0 点到各检测点方向向量, 单位化并乘距离 L 便可得到各点坐标。至此, 计算得到均匀分布于 P_0 点周围, 距离为 L 的 8 个检测点。



(a) C_0 点位置关系示意 (b) 所有检测点示意

图 4 缓冲距离检测点示意

Fig.4 Buffer distance detection point schematic

最后, 在每个检测点上沿 P_0P_1 方向做射线检测, 得到与三维地形的交点, 若有其中任何一个检测点到地形交点的距离小于航摄点 P_0 和 P_1 之间的距离, 则判定该段航线间安全范围内有障碍物, 即航线

存在安全隐患。

2 实验与结果分析

为了更好地进行条带状航测区域曲线航线设计、变高航线设计及航线安全检测的实验,本文利用 Cesium 框架构建了一个无人机航摄仿真平台,如图 5 所示。通过航摄仿真平台进行航摄方案航线的设

计与评估,验证航线安全检测算法的有效性,然后利用设计的航线进行实际航摄实验,并分析航摄成果质量。为了提高实景仿真的效果,本文利用已有四川省某山区高分辨率无人机影像及高精度 LiDAR DEM 数据(精度为 10 cm)作为参考底图数据进行实验。选择一个山谷区域作为实验区,该山谷底部区域呈曲线带状,长约 944 m,中间部分宽度约为 300 m,两侧坡度约 32°,最大高差约 381.7 m。



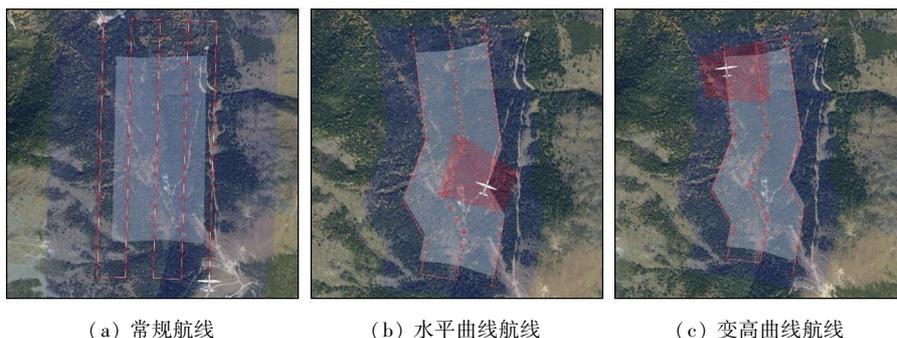
图 5 无人机航摄仿真系统界面

Fig.5 UAV aerial camera simulation system interface

2.1 曲线航线设计仿真实验

在仿真平台中导入参考底图数据,分别采用常规航线方法、水平曲线航线方法和变高曲线航线方法,对测区进行单镜头垂直仿真航拍和五镜头倾斜仿真航拍。其中,仿真相机参数为:焦距 50 mm,视

场角 56.2°,范围大小为 6 000 像素×4 000 像素;航线设计参数为:相对航高为 300 m,航向重叠度为 80%,旁向重叠度为 60%。生成的航线如图 6—7 所示,航线相关参数见表 1。



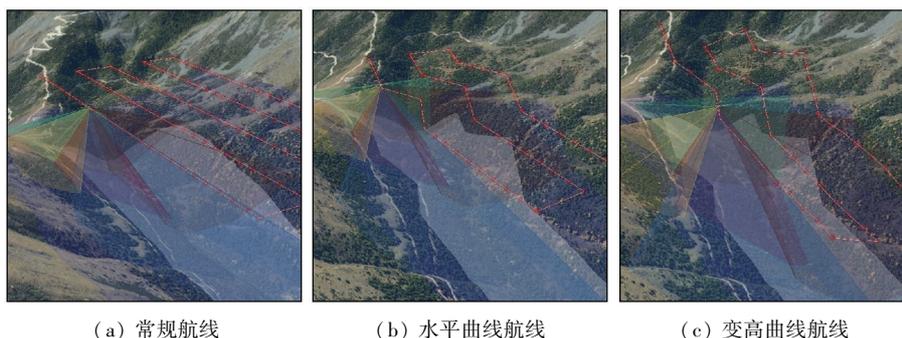
(a) 常规航线

(b) 水平曲线航线

(c) 变高曲线航线

图 6 不同航线单镜头航拍仿真

Fig.6 Simulation of single lens aerial photography of different routes



(a) 常规航线

(b) 水平曲线航线

(c) 变高曲线航线

图 7 不同航线五镜头倾斜航拍仿真

Fig.7 Simulation of five-shot tilt aerial photography of different routes

表 1 生成不同航线参数

Tab.1 Generating different route parameters

镜头	航线类型	航程/m	影像数量/张
单镜头	常规航线	6 452.60	130
	水平曲线航线	3 062.15	70
	变高曲线航线	3 153.34	70
五镜头	常规航线	6 453.30	650
	水平曲线航线	3 062.10	350
	变高曲线航线	3 151.50	350

通过仿真实验生成航线并获取影像数据后,使用 Context Capture 软件中按相同的参数和步骤制作正射影像,其结果与测区范围如图 8 所示。从表 1 及图 8 可知,无论是正射航拍还是倾斜航摄,使用曲线航线的航线范围都更加契合带状测区,在满足测区生产需求的同时,所需航程和获取影像数量上远少于常规航线,避免了大量数据的冗余,提高了数据采集和处理的效率。



图 8 不同航线采集正射影像成果

Fig.8 Results of orthophoto acquisition on different routes

2.2 航线安全检测仿真实验

为了确保航飞的安全性,航线规划完成后需要对航线进行安全检测。测试区域位于某河谷地带,

河谷两边是较陡的山坡,生成航线后,设置航线的安全缓冲范围并进行安全检测,结果如图 9 所示。航线上绿色部分判定为安全航线,红色部分则为存在

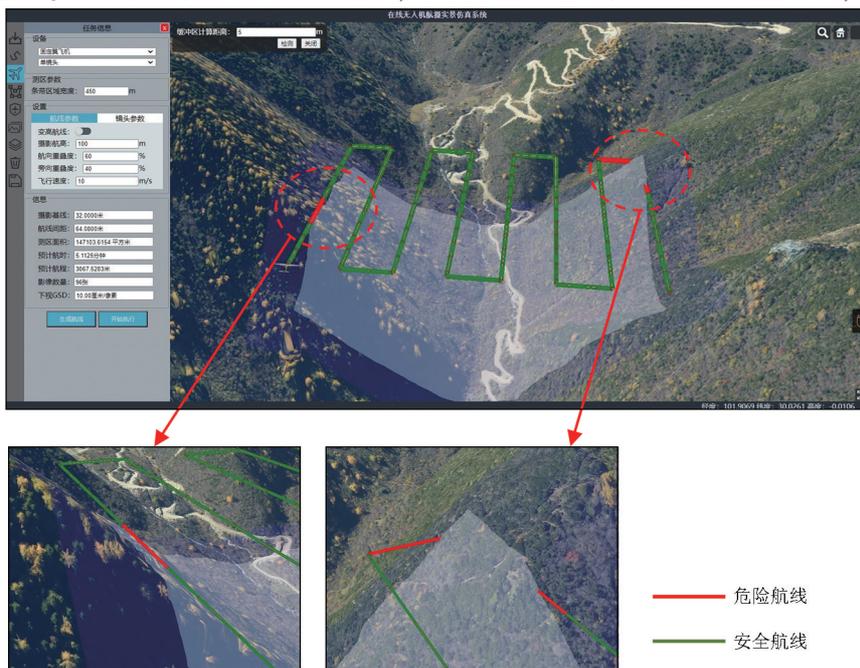


图 9 航线安全检测实验

Fig.9 Route safety detection experiment

安全隐患的航线。经多次航飞仿真测试,结果显示:航线的安全检测方法能对航线的安全性、可行性给出反馈分析结果。

2.3 曲线航线航摄实测

使用大疆 M350 无人机分别搭载高清数码相机和睿铂 DG4M 倾斜航摄相机,进行单镜头正射航拍和五镜头倾斜航拍实验。其中,高清数码相机为 1 英寸 2 000 万像素 CMOS 传感器相机,倾斜相传感器尺寸为 35.9 mm×24 mm,像元尺寸为 4.5 μm。将仿真实验中设计的航线导入无人机,使用与仿真实验相同的参数进行航摄任务。不同航线数据采集如图 10 所示,数据采集完成后,使用 Context Capture

软件,分别将单镜头航拍数据和五镜头倾斜航拍数据,制作成数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM)和 DEM,如图 11(a)–(b)所示。在航测范围内选取检查点以验证 DOM 成果精度,检查点分布如 11(a)所示,以参考底图数据上检查点坐标为基准,对 3 组航线采集生成 DOM 上的检查点坐标进行精度比较,结果如表 2 所示。同时,对不同航线生成的 DEM 进行预处理,将生成 DEM 经裁剪、重采样至与参考底图 DEM 数据相同的范围和分辨率,以参考底图 DEM 数据为基准,分别对不同航线生成 DEM 数据整体进行误差统计分析,结果见表 3。

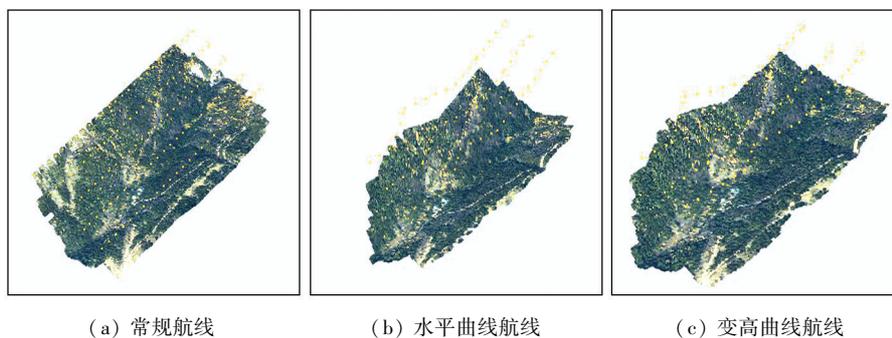


图 10 不同航线航拍数据

Fig.10 Aerial data of different routes

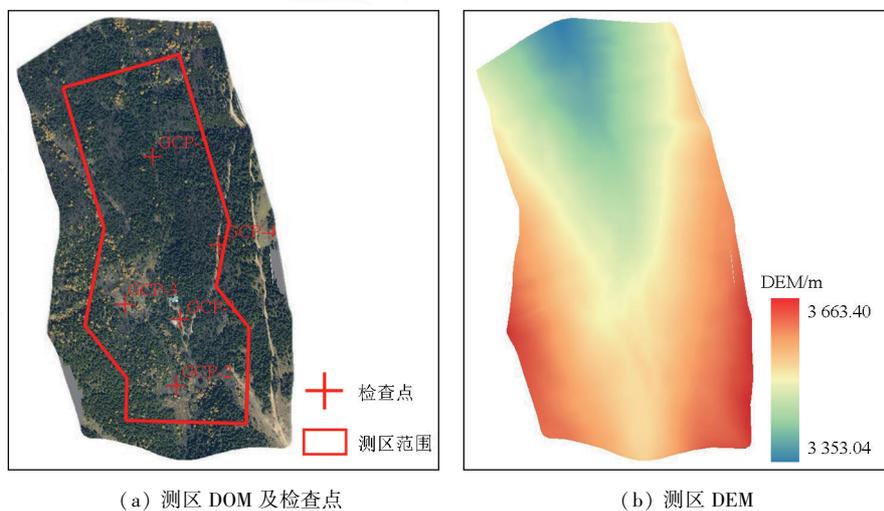


图 11 航摄成果及检查点

Fig.11 Aerial photography results and checkpoints

表 2 不同航线 DOM 数据检查点误差

Tab.2 Error of DOM data control points of different routes

(m)

检查点	常规航线		水平曲线航线		变高曲线航线	
	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
GCP-1	-0.002 1	0.001 3	0.001 2	-0.003 0	0.001 8	0.000 0
GCP-2	-0.002 2	0.001 8	-0.004 2	0.001 5	0.004 3	-0.002 2
GCP-3	0.004 2	0.003 9	0.004 1	0.002 4	0.005 2	0.003 8
GCP-4	0.005 9	0.001 8	-0.004 4	-0.004 4	0.003 4	0.003 6
GCP-5	-0.002 3	-0.001 8	0.001 9	0.003 3	-0.002 1	0.001 6

表3 不同航线 DEM 数据误差对比

Tab.3 Error comparison of DEM data of different routes

航线类型	DEM 平均误差	DEM 中误差
常规航线	0.465 9	0.711 6
水平曲线航线	0.486 5	0.717 0
变高曲线航线	0.326 4	0.422 7

通过表2数据分析可得,不同航线成果 DOM 数据检查点精度相差不大,精度均在 1 cm 之内。由表3分析可知,相比固定航高航线,变高曲线航线生成的 DEM 质量较好。不同航线成果 DOM 和 DEM 数据的精度相差不大,相比于常规航线,曲线航线生产的航测数字成果质量同样能满足基础地理信息数字成果的质量要求。

3 结论

在分析常规航线设计方法在条带状复杂地形区域航测中存在不足的基础上,提出了一个无人机曲线航线设计方法。该方法包括水平曲线航线设计算法、变高航线设计算法及基于 DEM 的航线安全检测算法。通过在无人机航摄仿真平台进行航线设计仿真实验和实际的航摄实验,得到的主要结论如下:

1) 在条带状航测区域,相比于传统方法设计出的航线,使用曲线航线设计方法设计出的航线范围更加契合条带状测区,并且在航程和获取的影像数量上都更少,避免了航线及数据的冗余,提高了航测数据采集和处理的效率。

2) 基于 DEM 的航线安全检测方法,能够有效地对已设计航线的安全性和可行性进行检测,并反馈分析结果。

3) 相比于常规航线,使用本文曲线航线设计方法设计出的航线进行数据采集,其生成的 DOM 和 DEM 数字成果质量同样能满足基础地理信息数字成果的质量要求。

参考文献 (References):

- [1] 毕凯,李英成,丁晓波,等.轻小型无人机航摄技术现状及发展趋势[J].测绘通报,2015(3):27-31,48.
Bi K, Li Y C, Ding X B, et al. Aerial photogrammetric technology of light small UAV: Status and trend of development[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(3): 27-31, 48.
- [2] Nesbit P R, Hugenholtz C H. Enhancing UAV-SfM 3D model accuracy in high-relief landscapes by incorporating oblique images[J]. Remote Sensing, 2019, 11(3): 239.
- [3] 顾广杰,张坤鹏,刘志超,等.浅谈无人机倾斜摄影测量技术标

准[J].测绘通报,2017(s1):210-213.

- Gu G J, Zhang K P, Liu Z C, et al. Introduction to the standard of technology of tilt photogrammetry for UAV[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(s1): 210-213.
- [4] 于广瑞,王欣滔,黄兴明.无人机测绘任务方案设计与应用[J].测绘通报,2017(s1):216-219.
Yu G R, Wang X T, Huang X M. Design and application of UAV surveying and mapping mission[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(s1): 216-219.
- [5] Apostolidis S D, Kapoutsis P C, Kapoutsis A C, et al. Cooperative multi-UAV coverage mission planning platform for remote sensing applications[J]. Autonomous Robots, 2022, 46(2): 373-400.
- [6] 盛辉,李凌昊,刘树生,等.面向城市复杂区域的无人机倾斜摄影航线规划方法[J].测绘通报,2021(1):47-52.
Sheng H, Li L H, Liu S S, et al. Route planning method for UAV inclined photography in complex urban areas[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(1): 47-52.
- [7] 毕瑞,甘淑,袁希平,等.不同地形环境下无人机航线规划及三维建模分析[J].测绘通报,2022(4):83-89,129.
Bi R, Gan S, Yuan X P, et al. UAV route planning and 3D modeling analysis in different terrain environment[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(4): 83-89, 129.
- [8] 魏铎,胡卓玮,陈天博,等.单机倾斜摄影方式的无人机航线设计[J].测绘科学,2018,43(6):147-155.
Wei L, Hu Z W, Chen T B, et al. Route planning of oblique photography with single camera[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(6): 147-155.
- [9] 王炳乾,陈超,王华军,等.基于等高线构建无人机航线的新型仿地飞行策略[J].测绘通报,2020(11):104-107,115.
Wang B Q, Chen C, Wang H J, et al. A new ground-like flight method based on contours to construct drone routes[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(11): 104-107, 115.
- [10] 李天烁,邓非,万方.实景三维模型辅助下小型多旋翼无人机航线设计[J].遥感信息,2017,32(1):40-43.
Li T S, Deng F, Wan F. Air route design method of multi-rotor unmanned aerial vehicles assisted by real 3D model[J]. Remote Sensing Information, 2017, 32(1): 40-43.
- [11] Torres M, Pelta D A, Verdegay J L, et al. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction[J]. Expert Systems With Applications, 2016, 55: 441-451.
- [12] 徐博,陈立平,谭彧,等.基于无人机航向的不规则区域作业航线规划算法与验证[J].农业工程学报,2015,31(23):173-178.
Xu B, Chen L P, Tan Y, et al. Route planning algorithm and verification based on UAV operation path angle in irregular area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(23): 173-178.
- [13] 李秀丽.基于 Google 地图数据的可视化无人机航线规划研究[J].测绘通报,2014(1):74-76.
Li X L. Study of visual UAV trajectory planning based on google map data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(1): 74-76.

Exploration of curved UAV flight path design methods for banded aerial survey areas

SUN Xinchao¹, LUO Qifeng², HE Zongyou², ZHANG Aoli¹, CAI Guolin¹

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Institute of Land and Resource Surveying and Mapping of Guangdong Province, Guangzhou 510700, China)

Abstract: To improve the efficiency of UAV aerial surveys in complex banded areas, this study explored and proposed a design method for curved flight paths. This method included planning algorithms for both horizontal and variable-altitude curved flight paths for banded areas, as well as a detection algorithm for flight path safety based on a digital elevation model (DEM). First, a simulation system for UAV aerial surveys was constructed, and the method was tested for planar aerial surveys, variable altitude aerial surveys, and safety detection through simulation experiments. Then, the quality of the aerial photography production data was verified using actual aerial photography experiments. The results indicate that design algorithms for horizontal and variable-altitude flight paths can automatically generate reasonable flight paths for complex banded areas and that the detection algorithm for flight path safety can ensure route safety. Compared to conventional flight paths, the quality of aerial photography data from curved flight paths can also meet the requirements of existing regulations. In other words, for aerial surveys in complex banded areas, the method presented in this study allows for the automatic design of reasonable, safe flight paths and, thus, can effectively improve the operational efficiency of UAV aerial photography.

Keywords: banded areas; UAV aerial survey; design of curved flight paths; safety detection

(责任编辑: 陈昊旻)

