



李志勇, 邓继忠, 赵高源, 等. 精准对靶喷洒背景下作业小区地理坐标的计算方法[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(3): 656–662.

LI Z Y, DENG J Z, ZHAO G Y, et al. Research on the calculation method of the geographical coordinates of the operation area under the background of precise target spraying[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(3): 656–662.

精准对靶喷洒背景下作业小区地理坐标的计算方法

李志勇^{1,2}, 邓继忠^{1,2*}, 赵高源^{1,2}, 张子超^{1,2}, 林芳源³,
刘理涵^{1,2}, 马俊杰^{1,2}, 黄 旭^{1,2}

(1. 华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642; 2. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广东 广州 510642; 3. 广东省江门市新会区农业农村局, 广东 江门 529100)

摘要:【目的】确定作业小区的地理坐标是植保无人机实施精准对靶喷洒的关键问题之一。假如需要喷洒的作业小区数量众多或者需要喷洒的作业小区为水田等类型, 可采用传统的人工在田间逐点测量的方法, 则存在着工作量大、测量步骤繁琐、测量区域不易进入等缺点。因此, 利用测量位于作业区域边界处或边界外有限数量位置点的地理坐标, 然后按照一定算法计算出各作业小区的地理坐标就将克服前述的缺点, 有着很大的实际应用价值, 将极大提高精准对靶喷洒的效率和应用。【方法】根据实施精准对靶喷洒作业小区的地理坐标的求解需求, 在测量学中找到一种地面点相对位置求取方法, 同时将该方法引入并加以改进, 分别提出了基于假定地球为正球体情况下的几何法和基于假定地球为椭球体情况下的投影法通过计算得到作业小区的地理坐标的2种算法, 并且通过试验检验和比较2种算法的精度、求解速度、求解复杂度。【结果】通过试验可知, 2种算法计算得到作业小区的地理坐标与实测值相比, 误差在厘米级范围内, 均符合实施精准对靶喷洒对精度的要求; 在求解速度方面, 几何法比投影法更加快速; 在求解复杂度方面, 几何法优于投影法。【结论】求解作业小区的地理坐标的2种算法—几何法和投影法在精度方面均可以满足实施精准对靶喷洒时对精度的需求。但是, 在使用2种算法分别求解作业小区的地理坐标的过程中发现, 在计算复杂度方面和计算速度方面, 几何法相对于投影法更优、更简便、更适合实施精准对靶喷洒时对作业小区地理坐标的求解。

关键词: 植保无人机; 作业小区; 地理信息; 坐标; 几何; 高斯-吕克投影; 精准对靶喷洒

中图分类号: S481+.9; S252+.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2024)03-0656-07



Research on the calculation method of the geographical coordinates of the operation area under the background of precise target spraying

LI Zhiyong^{1,2}, DENG Jizhong^{1,2*}, ZHAO Gaoyuan^{1,2}, ZHANG Zichao^{1,2},
LIN Fangyuan³, LIU Lihan^{1,2}, MA Junjie^{1,2}, HUANG Xu^{1,2}

收稿日期: 2023-12-10 修回日期: 2024-01-13

基金项目: 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队项目(2023KJ133)

Project supported by the Guangdong Provincial Modern Agricultural Industry Common Key Technology Research and Development Innovation Team Project(2023KJ133)

作者简介: 李志勇, 硕士生, orcid.org/0009-0000-2856-6207, lizhiyong_scau@126.com; *通信作者: 邓继忠, 教授, 博士生导师, 主要从事植保无人机精准施药技术研究, orcid.org/0009-0002-1456-5494, jz-deng@scau.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

(1.College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.National Joint International Research Center for Precision Agriculture and Aeronautical Application Technology, Guangzhou 510642, China; 3.Agricultural and Rural Bureau of Xinhui District, Jiangmen City, Guangdong Province, Jiangmen, Guangdong 529100, China)

Abstract: [Objective] Determining the geographic coordinates of the operation area is one of the key problems for the implementation of precision target spraying by UAV.If there are many operation areas to be sprayed or the operation areas to be sprayed are paddy fields, etc., the traditional manual point-by-point measurement method in the field has the disadvantages of large workload, cumbersome measurement steps, and difficult access to the measurement area.Therefore, the geographic coordinates of a limited number of locations located at the boundary or outside the boundary of the operation area are measured, and then the geographic coordinates of each operation area are calculated according to a certain algorithm, which will overcome the above disadvantages and have great practical application value, and will greatly improve the efficiency and application of precision target spraying. [Method] According to the solving requirements of the geographic coordinates of the operation area for precision target spraying, a method for obtaining the relative position of ground points is found in surveying.At the same time, this method is introduced and improved.Two algorithms for calculating the geographic coordinates of the operation area are proposed, which are based on the geometry method assuming that the earth is a sphere and the projection method assuming that the earth is an ellipsoid. [Result] The experiments show that the errors of the two algorithms are in the range of centimeters compared with the measured value, which meets the requirements of precision spraying on the target.In terms of solving speed, the geometric method is faster than the projection method.In terms of solving complexity, the geometric method is better than the projection method. [Conclusion] The two algorithms proposed in this paper to solve the geographic coordinates of the operating cell—the geometric method and the projection method can meet the requirements of precision spraying on the target in terms of precision. However, in the process of solving the geographic coordinates of the operating cell using the two algorithms respectively, it is found that in terms of calculation complexity and calculation speed, the geometric method is better, simpler and more suitable for solving the geographic coordinates of the operating cell when implementing precision spraying on the target.

Keywords: plant protection UAV, operation plot, geographic information, coordinate, geometry, Gaussian-Lambert projection; precise target spraying

【研究意义】未来植保无人机技术的发展方向之一是精准对靶喷洒。2020年12月,中国工程院发布的《全球工程前沿2020》报告中,将“植保无人机病虫害智能识别与精准对靶喷洒”列为农业类9项工程开发前沿的第7项。精准对靶喷洒是指将需要喷洒的地块视为作业区域,由于农作物发生病害、草害的特点呈现“点”或“片状”,因此进一步将作业区域划分成若干作业小区,发生病害、草害的作业小区则喷洒农药,没有发生病害、草害的作业小区则不喷洒农药。精准对靶喷洒既可以减少农药的使用,降本增效,又可以降低农药对于人的伤害和对于环境的污染。因此,作业小区的地理坐标是实施精准对靶喷洒的关键问题之一,它将确定植保无人机搭载的喷洒装置打开和关闭喷头的时机。假定植保无人机的喷幅为5 m,小区长度设定为10 m,每个小区的喷洒面积为50 m²,则每单位面积(667 m²)的小区数量至少13组,对应的小区地理坐标为13组,对于成百甚至上千个单位面积的作业小区坐标数量非常庞大,若采用人工方式逐点测量来获得,则存在工作量大,步骤繁琐等问题;若作业区域为水田等类型,则存在不易进入等问题。因此,有必要找到一种方法通过测量位于作业区域边界处或边界外有限数量的位置点的地理坐标进而推算出各作业小区的地理坐标。【前人研究进展】随着无人机技术的不断发展,植保无人机已成为防治病虫害的主要手段,其发展前景受到农业植保领域的高度重视^[1]。植保无人机作业具有效率高、漂移少、对环境污染低、喷洒均匀、作业成本低等优点,被广泛应用于中耕作业及病虫害防治中^[2-4]。

目前虽然国内的植保无人机施药已经基本做到了变量喷洒,可以根据无人机飞行速度调节施药系统喷头的流量,做到单位面积用药量基本不变。但这还不是真正意义上的“精准喷洒”,期望通过今后的研究,“精准喷洒”能够做到:一是对于不连续作物,能够根据作物的位置,在喷施农药时,有作物的地方就喷,没有作物的地方不喷;二是根据作物所受病虫害的程度进行变量喷洒,虫害严重的地方多喷,虫害不严重的地方少喷,精准喷洒可提高农药的利用率,减少对环境的污染^[5]。近年来,数字化、自动化、智能化技术在农业领域应用步伐加快,机械化生产与信息化技术深度融合,智慧农业概念应运而生。精准施药技术是智慧农业的重要技术组成部分。精准施药技术是通过传感探测技术获取喷雾靶标即农作物与病虫害的信息,利用计算决策系统制订精准喷雾策略,驱动变量执行系统或机构实现实时、非均一、非连续的精准喷雾作业,最终实现按需施药^[6]。

【本研究切入点】以测量作业区域边界处或边界外有限数量位置点的地理坐标为基础,计算出作业区域内若干作业小区的地理坐标,据此,在测量学中找到一种地面点相对位置求取方法,结合精准对靶喷洒的实际情况做了简要分析认为可以将测量学中的直角坐标法引入,同时分别利用几何分析和坐标投影的方法结合精准对靶喷洒的实际情况将直角坐标法加以改进,使的该方法适用精准对靶喷洒时作业小区的地理坐标的求解,并且通过试验将2种方法从精度(计算值与实测值之间的误差值)、求解速度、求解复杂度方面进行了验证。【拟解决的关键问题】本研究拟探索一种精度在厘米级,求解速度快,求解复杂度低的计算方法实现根据采集得到的位于作业区域边界处或边界外的有限数量的位置点的地理坐标求解出作业区域内任意作业小区的地理坐标,用以解决采用人工测量方法时遇到的测量工作量大、测量步骤繁琐、测量区域不易进入等问题。

1 作业小区精确地理坐标的求解方法

1.1 测量学中求解坐标的方法

在测量学中,确定目标点相对位置的方法有2种,分别是极坐标法和直角坐标法。由于极坐标法需要测量已知点和目标点之间的角度和距离,田间测量不便,因此极坐标法不适用于本研究。

直角坐标法根据直角坐标原理,利用纵横坐标之差,求解目标点的平面位置。如图1所示,已知A点坐标计算目标点B的坐标可用公式(1)计算^[7]:

$$\begin{cases} x_B = x_A + \Delta x_{AB} \\ y_B = y_A + \Delta y_{AB} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 Δx_{AB} 、 Δy_{AB} 为坐标增量。

对于作业小区地理坐标计算,增量 Δx_{AB} 可设定为小区网格长度, Δy_{AB} 则是植保无人机喷幅。

公式(1)仅适用于作业区域的方位角 $\deg$ (作业区域边界与正北方向的夹角)为0的情况。实际中,绝大部分的作业区域的方位角不为0(可假定作业区域为矩形),此时需要进行坐标旋转,可按公式(2)将作业区域的地理坐标利用坐标旋转的方法映射到直角坐标系中,然后进行求解,待求解完成再次使用坐标旋转进行反向旋转,此时得到的求解结果即为最终求解结果。

$$\begin{cases} x' = (x - t_x)\cos(\deg) - (y - t_y)\sin(\deg) + t_x \\ y' = (x - t_x)\sin(\deg) + (y - t_y)\cos(\deg) + t_y \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 x' 、 y' 为坐标旋转后的新坐标, x 、 y 为坐标旋转前的坐标, $\deg$ 为坐标旋转的角度(逆时针旋转为 $\deg$,顺时针旋转为 $-\deg$), t_x 、 t_y 为坐标旋转的中心点坐标。

1.2 几何法与投影法求解作业小区地理坐标

本文基于直角坐标法提出了几何法与投影法2种求解作业小区地理坐标的方法。

如图2所示,矩形ABCD所围为农田作业区域,点A、B、C、D为4个边界点,这4点的精确地理坐标可

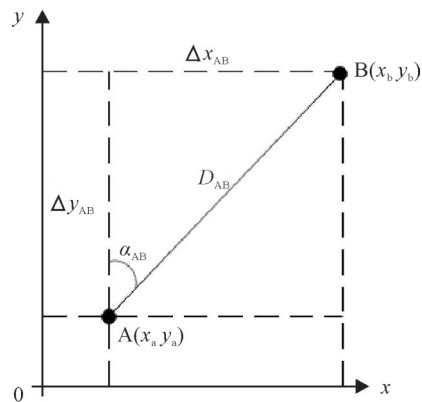


图1 地面点的相对位置

Fig.1 Relative position of ground points

通过RTK(real-time kinematic,实时动态)一种载波相位差分技术)测量装备测量获得。图中虚线所围网格为划分的对靶喷洒作业小区,边界AB被点 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 等分,相邻点间距为小区宽度,也是植保无人机喷幅;边界AD为点 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 等分,相邻点间距为小区长度,假定P点为某个作业小区的的中心点,也是待求的目标点。

1.2.1 几何法

本方法假定地球为正球体,将已知某点地理坐标求解目标点的地理坐标转换为求球面中两点间的几何关系。以图3为例,以已知点A为相对坐标原点建立东北天坐标系(其中A点所在的纬线为坐标系中的 x 轴,以正东方为坐标轴的正方向,A点所在的经线为坐标系中的 y 轴,以正北方向为坐标轴的正方向)。由于在本文中地球上的点的坐标采用经度、纬度表示,因此坐标增量需要换算为球面上从已知点到目标点的弧长对应的圆心角表示,则坐标增量 Δx_{AT} 、 Δy_{AT} 可用公式(3)表示,其中图3中,A、T为球面上两点,假定A为地理坐标已知的点,T为地理坐标未知的目标点,T点投影到 y 轴的交点为 $T'_y(T_w, A_j)$,T点投影到 x 轴的交点为 $T'_x(A_w, T_j)$ 。

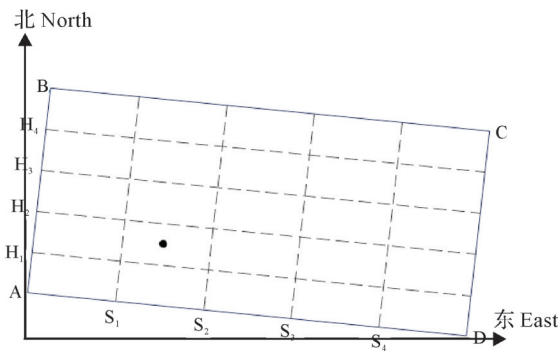


图2 作业区域和小区划分示意

Fig.2 Schematic diagram of operation area and cell division

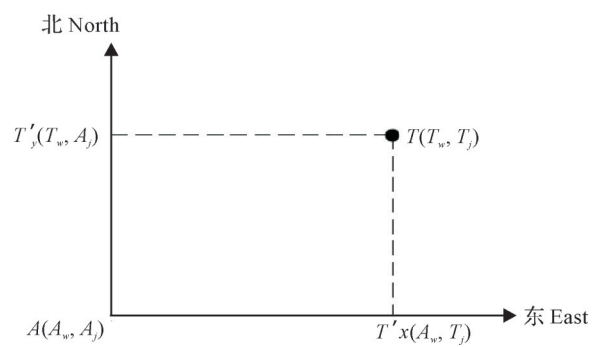


图3 A、T两点位置示意

Fig.3 Schematic diagram of the position of points A and T

$$\begin{cases} \Delta x_{AT} = S_{A-T'_x} / (\text{ARC} \times \cos \varphi \times \pi / 180) \\ \Delta y_{AT} = S_{A-T'_y} / (\text{ARC} \times \pi / 180) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,ARC是地球半径(6371393m), φ 是已知点A的纬度,ARC $\times$ cos φ 是点A的纬度切面的半径, $S_{A-T'_x}$ 为A点到 T'_x 点的长度(即作业小区的长度), $S_{A-T'_y}$ 为A点到 T'_y 点的长度(无人机的喷幅)。

以图2为例,若已知点A的经度、纬度的地理坐标分别表示为 A_j 、 A_w ,目标点P点的经度坐标为 P_w ,纬度坐标 P_j ,则依据公式(1)、(2),P点的地理坐标求解公式如下:

$$\begin{cases} P_w = (A_w + (\frac{3}{2} \text{AH1} / (\text{ARC} \times \pi / 180) - A_w) \times \cos(\text{deg}) - (A_j + (\frac{3}{2} \text{AS1} / (\text{ARC} \times \cos((A_w) \times \pi / 180) - A_j) \times \sin(\text{deg}) + A_w \\ P_j = (A_w + (\frac{3}{2} \text{AH1} / (\text{ARC} \times \pi / 180) - A_w) \times \sin(\text{deg}) + (A_j + (\frac{3}{2} \text{AS1} / (\text{ARC} \times \cos((A_w) \times \pi / 180) - A_j) \times \cos(\text{deg}) + A_j \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中AH1是作业小区的宽度,AS1是作业小区的长度。deg表示作业区域ABCD的方位角,其中+deg表示逆时针旋转,-deg表示顺时针旋转;以图2为例方位角的计算公式为($0^\circ \leq \text{方位角}(\text{deg}) \leq 90^\circ$):

$$\text{deg} = \arctan \left| \frac{x_B - x_A}{y_B - y_A} \right| \quad (5)$$

1.2.2 投影法

本方法基于测量学中的直角坐标系法视地球为椭球体,将椭球面上的元素投影到平面上计算平面坐标(称之为正算),然后再将结果投影到椭球面上得到实际地理坐标(称之为反算)。本文在投影法中选用国内测量常用的高斯-吕克投影^[8]。

高斯投影^[8]的正算公式可用式(6)表示如下:

$$\begin{cases} x = X + \frac{N}{2\rho^{n2}} \sin B \cos B \times l^{n2} + \frac{N}{24\rho^{n4}} \sin B \cos^3 B (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) l^{n4} + \frac{N}{720\rho^{n6}} \sin B \cos^5 B (61 - 58t^2 + t^4) l^{n6} \\ y = \frac{N}{\rho^n} \cos B \times l^n + \frac{N}{6\rho^{n3}} \cos^3 B (1 - t^2 + \eta^2) l^{n3} + \frac{N}{120\rho^{n5}} \cos^5 B (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58\eta^2 t^2) \times l^{n5} \end{cases} \quad (6)$$

高斯投影^[8]的反算公式可用式(7)、式(8)表示如下:

$$\begin{cases} B = B_f - \frac{t_f}{2M_f N_f} y^2 + \frac{t_f}{24M_f N_f^3} (5 + 3t_f^2 + \eta_f^2 - 9\eta_f^2 t_f^2) y^4 - \frac{t_f}{720M_f N_f^5} y(61 + 90t_f^2 + 45t_f^4) y^6 \\ l = \frac{y}{\cos B_f N_f} - \frac{y^3}{6\cos B_f N_f^3} (1 + 2t_f^2 + \eta_f^2) + \frac{y^5}{120\cos B_f N_f^5} (5 + 28t_f^2 + 24t_f^4 + 6\eta_f^2 + 8\eta_f^2 t_f^2) \end{cases} \quad (7)$$

$$L = l + L_0 \quad (8)$$

式(6)(7)(8)中, $\rho''=206\,264.806$, $t=\tan B$, $\eta^2=e'^2\cos^2 B$, B 为地理坐标中的纬度, L_0 为中央子午线, L 为地理坐标中的经度, N 为卯酉圈曲率半径, X 为自赤道至纬度 B 的子午线弧长。

以图2为例, 本研究提出目标点 P 的地理坐标的求解方法如下:

1) 依据公式(1), 平面直角坐标系中 P 点的坐标可表示为:

$$\begin{cases} x_p = x_A + \frac{3}{2} AH1 \\ y_p = y_A + \frac{3}{2} AS1 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, x_A, y_A 为 A 点使用公式(6)换算出的平面坐标, $AH1, AS1$ 含义同上。

2) 使用公式(7)和公式(8)将 x_p 转换为 P'_w , y_p 转换为 P'_j , 依据公式(2) P 点的地理坐标可表示为:

$$\begin{cases} P_w = (P'_w - A_w) \times \cos(-\deg) - (P'_j - A_j) \times \sin(-\deg) + A_w \\ P_j = (P'_w - A_w) \times \sin(-\deg) + (P'_j - A_j) \times \cos(-\deg) + A_j \end{cases} \quad (10)$$

2 试验与分析

试验主要是验证几何法和投影法计算作业小区地理坐标的精度。主要工具为手持式 RTK (G-RTK) 测量地理坐标, 其定位精度为: 平面 $1\text{ cm} \pm 1\text{ ppm}$, 高程 $1.5\text{ cm} \pm 1\text{ ppm}$, 通信协议: NMEA-0183 协议, 以及皮卷尺 (得力 No.8219), 最大测量距离为 50 m。

选择一块地势平坦、空旷、无遮挡、无干扰的区域作为测试用场地, 场地中心坐标北纬 $23.162\,616^\circ$, 东经 $113.339\,493^\circ$ (图4)。场地中白色线条围成的 ABCD 矩形封闭区域为试验区域, 图5为测试场地示意图, 点 $H_1 \sim H_7$ 为小区宽度 (设定喷幅 5 m) 的等分点、点 $S_1 \sim S_3$ 是小区长度 (10 m) 的等分点, 点 $n_1 \sim n_{12}$ 为作业小区的点, 也是目标点。

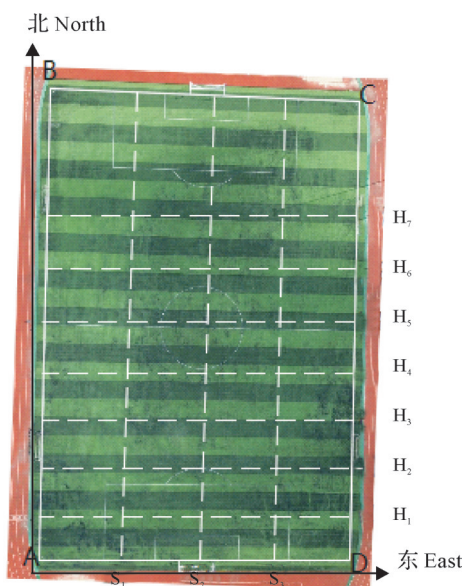


图4 试验场地

Fig.4 Map of the test field

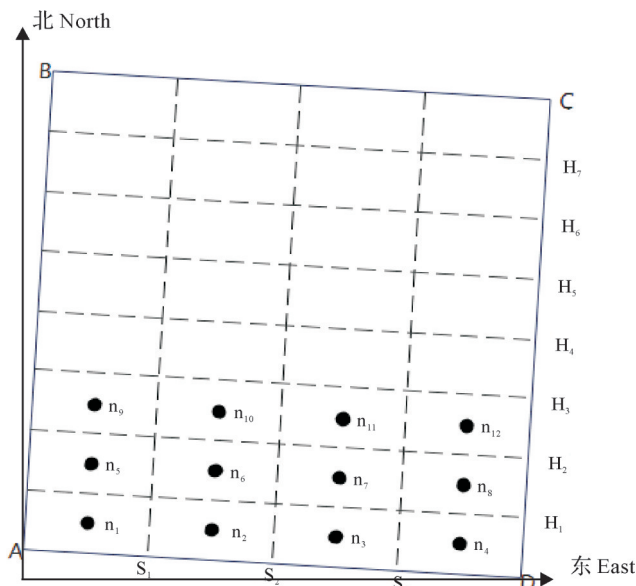


图5 试验场地示意

Fig.5 Schematic diagram of the test site

试验方法:使用RTK分别测量A、B、C、D共4点作为已知点;测量 $n_1 \sim n_{12}$ 点的地理坐标和海拔高度以及 $n_1 \sim n_{12}$ 各点垂直投影到边AD和边AB上的交点的海拔高度(每个点的数据取3次测量的平均值),使用测距仪分别测量 $n_1 \sim n_{12}$ 点到边AD和边AB的距离(取3次测量的平均值),这些数据将作为验证数据。将测量坐标值和采用几何法和投影法计算的坐标值记录如表1所示。

试验数据:A点(已知点)的地理坐标为北纬23.16 217 978°,东经113.33 914 874°,方位角4.8°。

表1 作业小区的地理坐标和误差
Tab.1 Geographic coordinates and errors of the operation area

序号 No.	位置号 SN	几何法计算值 (纬度,经度) G cal.value (lat,lng)	投影法计算值 (纬度,经度) P cal.value (lat,lng)	测量值 (纬度,经度) Measure value (lat,lng)	几何法 误差/m G error	投影法 误差/m P error
1	n_1	23.162 198 09,113.339 199 36	23.162 198 14,113.339 199 31	23.162 197 74,113.339 199 96	0.073	0.008
2	n_2	23.162 189 90,113.339 296 83	23.162 189 87,113.339 296 61	23.162 189 53,113.339 297 71	0.099	0.023
3	n_3	23.162 181 72,113.339 394 29	23.162 181 60,113.339 393 92	23.162 181 39,113.339 394 60	0.048	0.040
4	n_4	23.162 173 53,113.339 491 76	23.162 173 33,113.339 491 22	23.162 173 23,113.339 491 83	0.034	0.060
5	n_5	23.162 242 89,113.339 203 12	23.162 243 12,113.339 203 14	23.162 243 47,113.339 203 80	0.095	0.026
6	n_6	23.162 234 71,113.339 300 59	23.162 234 85,113.339 300 44	23.162 235 26,113.339 301 55	0.116	0.022
7	n_7	23.162 226 52,113.339 398 06	23.162 226 58,113.339 397 75	23.162 227 12,113.339 398 44	0.077	0.032
8	n_8	23.162 218 34,113.339 495 52	23.162 218 31,113.339 495 06	23.162 218 96,113.339 495 67	0.071	0.047
9	n_9	23.162 287 70,113.339 206 88	23.162 288 11,113.339 206 97	23.162 288 27,113.339 207 56	0.094	0.047
10	n_{10}	23.162 279 52,113.339 304 35	23.162 279 84,113.339 304 28	23.162 280 06,113.339 305 31	0.115	0.036
11	n_{11}	23.162 271 33,113.339 401 82	23.162 271 57,113.339 401 58	23.162 271 92,113.339 402 20	0.076	0.036
12	n_{12}	23.162 263 15,113.339 499 29	23.162 263 30,113.339 498 89	23.162 263 76,113.339 499 43	0.069	0.044

由表1的数据可知,几何法和投影法都具有较高的地理坐标计算精度。与实际测量的地理坐标值相比,几何法的最大误差为0.116 m,最小误差为0.034 m,平均误差为0.08 m;投影法的最大误差为0.06 m,最小误差为0.08 m,平均误差为0.03 m。2种方法的误差基本都在厘米级,这一精度符合实施精准对靶喷洒的作业要求。

从试验数据可知,无论几何法还是投影法计算出的结果与实际的地理坐标相比均存在误差,误差的来源一是因为地球为不规则球体,2种方法均选择了近似模型进行表示和计算;二是在测量中人为因素带来了误差。

从计算的复杂度和计算速度来看,几何法优于投影法。几何法的计算过程更加快速、简便、易用,更适合精准对靶喷洒时作业小区的地理坐标的计算。

3 结 论

为解决精准对靶喷洒时作业小区地理坐标计算问题,本研究以测量学中的直角坐标系法为基础,分别提出了几何法和投影法来计算作业小区的地理坐标,并借助试验进行了验证和对比。试验结果表明,几何法的误差略高于投影法,但两种方法的误差基本都控制在厘米级,符合精准对靶喷洒的作业要求。由于投影法存在计算复杂度高、参数众多以及计算过程繁琐等缺点,相比而言,几何法则计算更为简便、快速。因此,在需要计算大量作业小区地理坐标的情况下,几何法具有更高的实用价值,可适用于实际作业场景。

实现精准对靶喷洒的前提之一是准确、快速计算作业小区的地理坐标。本研究提出的方法对精准对靶喷洒的实践具有参考作用。后续还将考虑引入墨卡托投影等方法进行进一步的研究和对比,并将结果应用在精准对靶作业实践中。

参考文献 References:

- [1] 娄尚易,薛新宇,顾伟,等.农用植保无人机的研究现状及趋势[J].农机化研究,2017,39(12):1-6.
LOU S Y, XUE X Y, GU W, et al. Current research status and trends of agricultural plant protection UAV[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2017, 39(12): 1-6.
- [2] 杨泽,郑立华,李民赞,等.基于R树空间索引的植保无人机与植保作业匹配算法[J].农业工程学报,2017,33(S1):92-98.
YANG Z, ZHENG L H, LI M Z, et al. Matching algorithm for plant protecting unmanned aerial vehicles and plant protecting jobs based on R-tree spatial index[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(z1): 92-98.
- [3] 王宇,陈海涛,李煜,等.基于Grid-GSA算法的植保无人机路径规划方法[J].农业机械学报,2017,48(7):29-37.
WANG Y, CHEN H T, LI Y, et al. Path planning method based on Grid-GSA for plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48(7): 29-37.
- [4] 袁玉敏.农业植保无人机高精度定位系统研究与设计:基于GPS和GPRS[J].农机化研究,2016,38(12):227-231.
YUAN Y M. Research and design of high precision positioning system for agricultural plant protection UAV: based on GPS and GPRS[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2016, 38(12): 227-231.
- [5] 吴阿敏,姜宽舒,赵梦龙,等.浅谈植保无人机的精准喷洒[J].科技视界,2018,(29):105-106.
WU A M, JIANG K S, ZHAO M L, et al. Analysis of precision spraying of plant protection UAV[J]. Science & technology vision, 2018, (29): 105-106.
- [6] 黄胜,朱瑞祥,王艳芳,等.2011.变量施药机的恒压变量控制系统设计及算法[J].农机化研究,2011,33(2):19-22.
HUANG S, ZHU R X, WANG Y F, et al. Design and algorithm of constant pressure and variable flow control system of variable pesticide application machine[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2011, 33(2): 19-22.
- [7] 李天文.现代测量学[M].3版.北京:科学出版社,2021.
LI T W. Modern surveying technology[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2021.
- [8] 孔详元,郭际明.控制测量学(下册)[M].3版.武汉:武汉大学出版社,2015.
KONG X Y, GUO J M. Control surveying (Volume 2)[M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2015.