

多架次作业植保无人机最小能耗航迹规划算法研究*

徐 博¹ 陈立平^{2,3} 谭 或¹ 徐 旻^{2,3}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业智能装备技术北京市重点实验室, 北京 100097;
3. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 利用栅格法对工作区域进行划分,快速得到往复遍历式植保无人机的作业路径,在以作业架次数最少为约束条件的情况下,研究了一种多架次返航路线规划算法,合理地分配了各架次的喷药量和返航点,使无人机的工作总能耗最小,降低了无人机在非作业情况下无效消耗能量,提高了作业效率。仿真结果表明,在同等作业条件下,在一块 210 m × 200 m 的矩形作业区域,采用本算法进行航迹规划,相比于仅以药液耗尽为返航依据的航迹规划,能耗节省率达到了 12.89%,而且作业面积越大,能量节省效果越明显,通过田间对比试验,进一步证明了算法的可行性。

关键词: 植保无人机 航迹规划 自主飞行 栅格法 多架次作业

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0036-07

Path Planning Based on Minimum Energy Consumption for
Plant Protection UAVs in Sorties

Xu Bo¹ Chen Liping^{2,3} Tan Yu¹ Xu Min^{2,3}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Key Laboratory of Intelligent Equipment Technology for Agriculture, Beijing 100097, China
3. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: According to back-to-back traversal of plant protection UAV, a kind of working area decomposing method based on grid method was used to extract the UAV working path. A route planning algorithm with the minimum return number was proposed in order to reduce the ineffective energy consumption in non-operate situation. The spraying amount and return points of the sorties were reasonably allocated to improve operational efficiency. The simulation results show that using this algorithm in an area of 15 600 m², compared to the return route in the liquid exhaustion situation, energy consumption of the UAV was reduced by 5.99%; while in an area of 42 000 m², energy consumption of the UAV was even reduced by 12.89%. When the operation area was larger, the energy-saving effect was more obvious, which proved the feasibility of route planning algorithm. Field tests in an area of 2 500 m² proved that there were deviations between theory and practical routes. The possible reasons were GPS positioning error, wind and center of gravity in liquid. So the GPS positioning accuracy needs to be improved, and the flight control system needs to be further improved. This flight route planning algorithm was proposed for automatic UAVs in unmanned operation, thus the flight routes were set before operation, and the energy consumption of UAVs and flight sorties can be estimated in advance. Nowadays, the unmanned operation becomes a new trend, and this flight route planning algorithm can be widely used in

收稿日期: 2015-03-13 修回日期: 2015-06-25
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA101901)、北京市科技计划资助项目(D151100001215003)和北京市农林科学院国际合作基金资助项目(GJHZ2015-7)
作者简介: 徐博, 博士生, 主要从事机电一体化研究, E-mail: xubocau@163.com
通讯作者: 谭或, 教授, 博士生导师, 主要从事机电一体化研究, E-mail: tanyu32@sina.com

precision agriculture.

Key words: Plant protection UAV Path planning Autonomous flying Grid method Multi-sortie operation

引言

作为新型农业机械设备,无人机尤其是旋翼类无人机不仅具有尺寸小、操控灵活、起降无需跑道、可悬停等特点^[1-4],还可针对不同任务携带多种任务设备,已被运用在农田信息遥感、灾害预警、施肥喷药等领域^[5-7]。植保无人机就是选用小型旋翼无人机作为载体,在其上搭载农药喷雾设备进行作业^[8]。目前大部分植保无人机都是基于遥控的,这种方式对人为因素依赖过大,实际效果并不理想。文献[9]通过 GPS 坐标采集系统得到了目视遥控情况下无人机的作业路线,指出了人为即时规划的航线与理论航线偏离严重、无人机的作业遗漏率和重复率偏高等问题;文献[10]也指出在遥控情况下,驾驶员操纵负荷较大,控制时间延迟,且对数据链性能要求较高,技术难点较多。因此在无人机作业前,如果可以根据喷施幅宽和作业区域规划出合理航线,使无人机以固定高度和速度沿此航线进行自主飞行作业,则可大大降低对操控者飞行技术的要求以及变量控制技术难度,达到精准作业的效果。

无人机的航线规划已经运用在多个领域,军事方面,主要是为躲避火力威胁、地形威胁和雷达侦测,规划出从起始点到目标点的最优路径^[11-13],文献[14]基于改进的稀疏 A* 算法,针对地形回避进行路径规划;物流方面,采用无人机进行货物配送也逐渐成为一种趋势,相关的研究主要集中在无人机遍历配送点的路线规划上^[15-16];农业方面,关于无人机的航线规划研究却相对较少,随着 GIS 与 GPS 技术的普及和传感技术的发展,具有自主作业功能的植保无人机系统势必成为发展趋势,对于植保无人机航线规划的研究也就显得尤为必要。对于植保无人机来说,其航线规划不仅要根据作物的种类、种植方式来确定其作业方向,还应考虑能量代价和作业效率使其整个工作过程能量和成本消耗最小,当单架次的作业效率提高到一定程度,作业的总架次就会减少,无人机的总能耗就会相应降低,因此本文基于能量代价和作业效率对植保无人机的路径算法展开研究。

1 无人机路径规划算法的基本思路

对于较大的作业区域来说,一架植保无人机每天需要多次往返于一个或多个地块来完成施药工

作。设无人机的续航时间为 T_u (无人机的最长飞行时间),作业时间为 T_z ,行程时间为 T_x (行程时间指的是无人机进入作业区域和返航等非作业情况下所消耗的飞行时间),最长喷雾时间为 T_p ,其中续航时间 $T_u \geq T_z + T_x$, $T_p \geq T_z$ 。例如深圳高科新农的 HY-B-15L 型号无人机,空机质量 13.20 kg,农药容器容量 16 L,电池容量 10 000m A·h,续航时间 33 min,作业速度 3~8 m/s,最大起飞质量 29.20 kg,最长喷雾时间 15 min。如果无人机单次作业便可完成整个区域的喷雾工作,则无需进行中途返航,否则需要进行中途返航蓄药,传统植保无人机执行中途返航操作的依据主要是耗药量,即 $T_z = T_p$,当药液使用完全后即刻返航,但这种方式没有从能量角度考虑返航路线的规划,仅是每架次满载、药液喷完即刻返航,没有预先对作业架次数和每架次载药喷药量进行合理安排,显得不够全面,并不适合非人操控的自主植保无人机。

实际作业中,整个作业区域的总喷药时间 T 往往并不是 T_p 的整数倍,这说明并不需要无人机每架次都要药箱满载和完全喷施,因此在整个作业工作之前,预先计算出作业的总耗药量和最小架次数,从节约能耗和保证最少架次数的角度出发,合理分配各架次载药和喷药量,并选取合适的中途返航点,最终规划出较优的返航路线,以减少无人机在非作业情况下的能耗,使整个过程能耗最小。

2 作业区域栅格化

自主作业植保无人机在工作之前,需要先确定作业区域的大小、形状和边界坐标,然后根据喷施幅宽自动生成相应的作业路线、得到作业路径总长度来安排架次数、喷药量和返航点,因此,需要先构建作业环境坐标图。常用的环境地图构建方法有拓扑地图法、栅格地图法和几何特征法。由于无人机的喷施作业属于全覆盖路径规划范畴,各条作业路线相互平行或垂直,相邻平行路线的距离均为无人机喷施幅宽,因此采用栅格法对工作区域进行划分,可快速得到无人机的作业航线。

如图 1 所示,一个矩形工作区域,长宽分别为 fd 和 hd , d 为 1/2 喷洒幅宽, O 为无人机起始工作点,同时无人机也需要中途返回此点进行药液补充和蓄能。将此作业区域按图 1a 进行栅格法划分,栅格边长为 d ,划分成 $f \times h$ 个栅格,并以 O 为原点建立直

角坐标系,其 x 轴、 y 轴分别平行于作业区域的 2 条垂直边界线,且 y 轴重合于作业区域的左边界线。由于作物种植方式和生长方式等原因,无人机始终是按照头朝前方的方向进行往复喷施,因此采用全覆盖路径规划中的往复式方法作为无人机作业时的行走方式,如图 1b 所示。通过栅格划分法可快速得到无人机的作业航线,其中红色箭头表示作业方向,绿色方向线段表示无人机作业过程的飞行路径, w_0

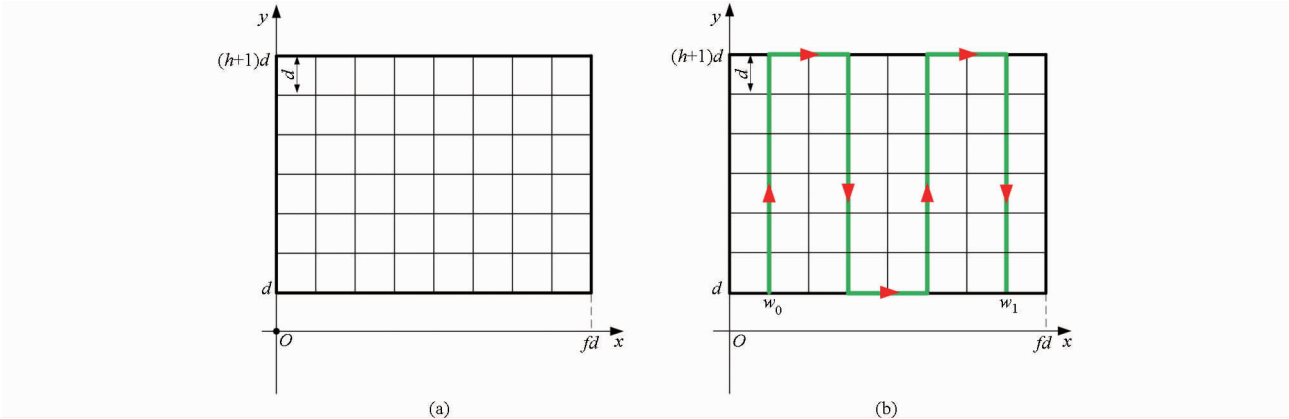


图 1 作业区域栅格示意图
Fig.1 Grid diagram of working area

3 无人机路径规划算法的确立

3.1 作业路线的获取

当自主植保无人机作业区域确定后,通过边界坐标的提取可得到整个作业区域的坐标图,再运用栅格法快速得到其作业路径,因此对于植保无人机的路径规划研究主要集中在对其中途返航路线的规划上。如图 2 所示,绿色方向线段表示作业路径,红色箭头表示作业方向, l_1 为无人机从起始点第 1 次进入作业区域的飞行航线, l_2 为无人机完成作业后的返航航线, s_1 、 s_2 为可能的中途返航点,返航点与原点 O 的连线称为中途返航路线。

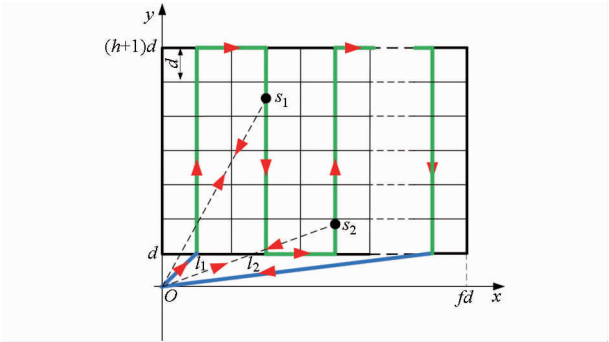


图 2 无人机作业路线示意图
Fig.2 Schematic diagram of operating route

设无人机作业飞行速度为 v ,最长喷雾时间为 t_m , G 为作业路径的总长度,单架次作业的最长路径长度为 $G_m = vt_m$ 。为便于算法的研究,本文假定无

为无人机进入地块的初始点, w_1 为无人机完成整个地块工作后的返航点,长度为 hd 的纵向绿线段称作一个作业单元,当无人机作业到地块边界时需掉头转弯并进入下一个作业单元,其中转弯过程并不喷药,但由于转弯时所行驶的长度与一个作业单元相比可忽略不计,为方便计算,本研究将转弯长度也记作作业长度。

人机飞行距离与能耗成正比,即通过距离来反映无人机的能耗情况。

3.2 作业路线坐标点与作业距离的关系

将整个作业路径表示为点集 W ,如图 3 所示, W 由多个子点集组成,分别为 W_{4k-3} 、 W_{4k-2} 、 W_{4k-1} 、 W_{4k} 4 个子点集, W 表示为

$$W = \sum_{i=1}^m (W_{4k-3} + W_{4k-2} + W_{4k-1}) + \sum_{i=1}^{m-1} W_{4k} \quad (1)$$

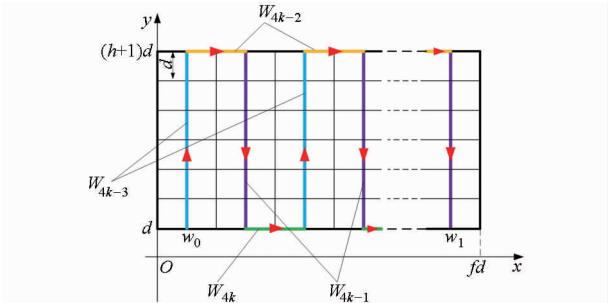


图 3 作业路径各子点集分布示意图
Fig.3 Distribution of working route point groups

中途返航点的选择不仅要考虑尽可能少的返航次数,而且往返途中的路径也要尽可能地达到最短。图 3 中点集 W 上的每一个点都包含着相应的信息,包括无人机到达此点时已完成的作业路径长度、无人机的剩余能量和与起始点的距离。无人机在任何时刻都要判断所剩能量是否足够返航所需能量,而且任何一点都是潜在的返航点,因此,判断一个点是否为所需的返航点,就是判断其所携带的信息。

各子点集的表达式为

$$\begin{cases} W_{4k-3} = \{(x_n, y_n) | x_n = (4k-3)d, d < y_n < (h+1)d\} \\ W_{4k-2} = \{(x_n, y_n) | (4k-3)d \leq x_n \leq (4k-1)d, \\ y_n = (h+1)d\} \\ W_{4k-1} = \{(x_n, y_n) | x_n = (4k-1)d, d < y_n < (h+1)d\} \\ W_{4k} = \{(x_n, y_n) | (4k-1)d \leq x_n \leq (4k+1)d, y_n = d\} \end{cases} \quad (2)$$

对于点集 W 上的一点 (x_n, y_n) , 无人机到达此点时已完成的作业路径长度 G_n 的计算公式为

$$G_n = \begin{cases} y_n + [2(k-1)(h+2) - 1]d & ((x_n, y_n) \in W_{4k-3}) \\ x_n + [(2k-1)h - 1]d & ((x_n, y_n) \in W_{4k-2}) \\ [2k(h+2) - 1]d - y_n & ((x_n, y_n) \in W_{4k-1}) \\ (2kh - 1)d + x_n & ((x_n, y_n) \in W_{4k}) \end{cases} \quad (3)$$

3.3 各架次喷药量的分配与最优返航点的选取

当 $G_m \geq G$ 时, 表明无人机无需中途返航就能完成整个区域工作, 否则将需要至少一次中途返航, 具体分为以下 2 种情况:

(1) G_m 可以被 G 整除, 即 $G/G_m = n$, n 为整数, 说明经过 n 次满载喷施恰好可完成整个区域的作业, 在最小返航次数 $n-1$ 次的约束下, 每架次植保无人机在药液耗尽时即刻返航, 因此无需预先规划返航路线。

(2) G_m 不能被 G 整除, 即 $n-1 < G/G_m < n$, n 为整数且 $n \geq 2$, 说明经过 n 次施药可完成整个区域的作业, 所需中途返航次数为 $n-1$ 次, 如果不经航线规划、单以药液耗尽为中途返航依据, 当无人机到达第 i 个中途返航点 (x'_i, y'_i) 时, 已完成的作业路径长度 $G'_i = iG_m$, $i = 1, 2, \dots, n-1$ 。如式(3)所示, 由于 G'_i 的计算公式为分段函数, 对于不同子点集的表达式并不相同, 因此先假设 (x'_i, y'_i) 为子点集 W_{4k-3} 的元素, 即 $G'_i = y'_i + [2(k-1)(h+2) - 1]d$, 且 $x'_i = (4k-3)d$, 求 y'_i 的实数解, 并验证 (x'_i, y'_i) 是否符合假设, 如果符合, 得到有效解, 否则在其他子点集中继续求解判断, 最终得到第 i 个返航点 (x'_i, y'_i) 的值, 进而可得到 $n-1$ 个返航点的坐标。

在保证最小架次数的情况下, 以药液耗尽为返航依据得到的返航路径未必就是能耗最优或次优解, 因为在满足最少返航次数 $n-1$ 的条件下, 返航点的选取并不唯一, 有

$$\begin{cases} 0 < G_{k+1} - G_k \leq G_m \\ 0 < G - G_{n-1} \leq G_m \\ G_1 > 0 \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, n-2) \quad (4)$$

式中 G_k ——无人机在执行第 k 次返航操作时已完

成的总作业距离

$G_{k+1} - G_k$ ——无人机经过第 k 次中途返航后到下一次返航前所作业的距离

因此在返航次数不变的条件下, 单架次作业所喷施的药量是一个区间值。因此可通过调整各架次的喷药量来选择合适的中途返航点。利用式(3)与式(4)得到返航点的选取区间, 再由 $L = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ 得到中途返航路线总长度 L 的区间值, 进而得到最小值 $L_{\min}$, 其中 (x_k, y_k) 表示第 k 个返航点的可选值, $L_{\min}$ 对应的 $n-1$ 个返航点即为返航路线规划的能耗最优解。

4 仿真

(1) 仿真中, 设无人机作业区域为一块 $130 \text{ m} \times 120 \text{ m}$ 的矩形区域, 选用的植保无人机单次最长作业距离 $G_m = 2500 \text{ m}$, 喷洒幅宽 $d = 5 \text{ m}$ 。作业路径总长度 $G = 3245 \text{ m}$, 整个工作过程是在假设无人机恒定质量的情况下进行计算的。首先利用栅格法快速提取到无人机的作业路径, 如图 4 所示, 将工作区域划分成 52×48 个小格, 每个小格的边长为 $d/2 = 2.5 \text{ m}$, 蓝色线路即为无人机的作业路径, 其中作业起始点的坐标为 $(2.5 \text{ m}, 2.5 \text{ m})$, 终止点坐标为 $(127.5 \text{ m}, 2.5 \text{ m})$ 。

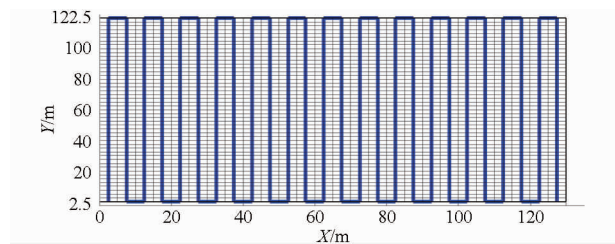


图 4 由栅格法确定的作业路径图

Fig. 4 Working route map obtained by grid method

能量节省率计算式为

$$\varepsilon = \frac{2 \left(\sum_{i=1}^n (\sqrt{x_i'^2 + y_i'^2} - \sqrt{x_i^2 + y_i^2}) \right)}{G_m} \times 100\% \quad (5)$$

利用第 4 节中的算法逐步进行仿真, 如图 5 所示, 黑色点集表示的是可执行中途返航操作的区域, 绿色点表示的是返航能量消耗最小点, 坐标为 $(27.5 \text{ m}, 2.5 \text{ m})$, 黄色点为仅以药液耗尽为返航依据情况下对应的返航点, 坐标为 $(102.5 \text{ m}, 2.5 \text{ m})$, 红色线段为对应的返航路线。仿真结果如表 1 所示, 本次作业只需 1 次返航蓄能, 通过式(5)计算出的能量节省率 ε 为 5.99%, 式(5)表示的是本算法所规划的飞行总航线与未经算法规划、仅基于药液

耗尽进行返航的情况相比,所节省的距离占无人机单架次最大作业距离 G_m 的比重。

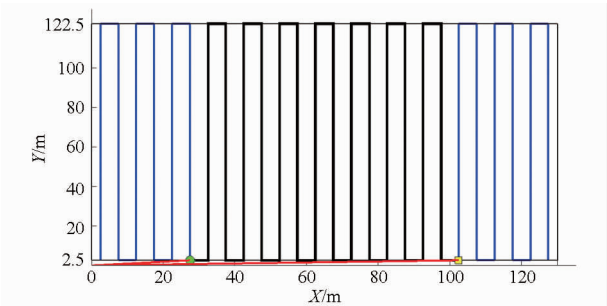


图 5 第 1 次仿真航线规划结果

Fig.5 Route planning results of the first simulation

表 1 第 1 次仿真结果

Tab.1 The first simulation results

参数	取值
作业路径总长度 G/m	3 245
单次最大作业距离 G_m/m	2 500
最少返航次数 $n/次$	1
未经本算法规划的返航点坐标/ m	(102.5, 2.5)
返航能量消耗最小点坐标/ m	(27.5, 2.5)
能量节省率 $\varepsilon/\%$	5.99

(2)选取一块 210 m×200 m 的矩形区域作为无人机的作业区域,最长作业距离 $G = 8\,605\text{ m}$,航线规划结果如图 6 所示,至少需要 3 次返航才能完成整个区域的作业,3 组黑色点集分别代表 3 个返航点可选取的区域,3 个绿点为通过规划算法选取的 3 个返航点,即返航总能耗最小时所对应的返航点,3 点与原点的连线分别表示 3 次中途返航的返航路线,而 3 个红点则表示并未预先进行航线规划、采取喷完即返航方式所对应的 3 个中途返航点。

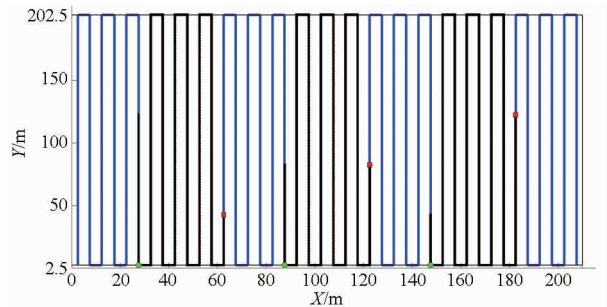


图 6 第 2 次仿真航线规划结果

Fig.6 Route planning results of the second simulation

仿真结果如表 2 所示,本次作业至少需要 3 次返航蓄能才能完成整个工作,采取喷完即返航方式的 3 个返航点坐标为 (62.5 m, 42.5 m), (122.5 m, 82.5 m) 和 (182.5 m, 122.5 m),由算法得到的 3 个返航点坐标为 (27.5 m, 2.5 m), (87.5 m, 2.5 m) 和 (147.5 m, 2.5 m),通过式(5)计算出的能量节省率 ε 为 12.89%。

表 2 第 2 次仿真结果

Tab.2 The second simulation results

参数	取值
作业路径总长度 G/m	8 605
最少返航次数 $n/次$	3
第 1 次满载满喷返航点坐标/ m	(62.5, 42.5)
第 2 次满载满喷返航点坐标/ m	(122.5, 82.5)
第 3 次满载满喷返航点坐标/ m	(182.5, 122.5)
由算法得到的第 1 个返航点/ m	(27.5, 2.5)
由算法得到的第 2 个返航点/ m	(87.5, 2.5)
由算法得到的第 3 个返航点/ m	(147.5, 2.5)
能量节省率 $\varepsilon/\%$	12.89

5 田间试验

试验在一块 50 m×50 m 的方形田块进行,通过手持 GPS 测得了田块 4 个顶点 A 、 B 、 C 、 D 的经纬度坐标,初始点 O 位于 D 点正南方向 2.5 m 处,设无人机的作业幅宽为 5 m,单架次最长作业距离 G_m 为 400 m。根据 4 个顶点的 GPS 坐标,通过栅格法快速获取到沿 AD 方向的往复作业路线,作业路线总长度 G 为 545 m,以 O 点为原点建立直角坐标系,其中 X 轴与 Y 轴分别平行于 CD 与 AD 。利用本航线规划算法对无人机的返航路线进行规划,得到最少返航次数 n 为 1,返航点在 OXY 坐标系的坐标为 (17.5 m, 2.5 m)。

分别进行 2 次飞行试验,使用机载 GPS 实时记录无人机的飞行航线轨迹,第 1 次是未经航线规划算法规划,当药液耗尽立即返航,待补充完药液和能量后返回返航点继续作业。如图 7a 所示,将无人机飞行轨迹的经纬度信息转换成 OXY 坐标系对应的坐标,其中蓝色实线为理论作业航线,红色曲线为实际作业与飞行航线,紫色点 P 为实际中途返航点,绿线为其对应的返航路线。试验结果如表 3 所示,实际作业路线总长度 G_x 和实际飞行路线总长度 G_f 分别为 533.4 m 和 690.7 m。

第 2 次试验是经过路径规划算法规划航线的喷药作业,如图 7b 所示,蓝色实线为理论作业航线,红色曲线为实际作业与飞行航线,黄色点 P_1 为实际中途返航点,绿线为其对应的返航路线,试验结果如表 4 所示,实际作业路线总长度 G_x 和实际飞行路线总长度 G_f 分别为 532.6 m 和 619.3 m,实际返航点坐标为 (17.4 m, 3.7 m)。与第 1 次未经算法规划的作业相比,第 2 次节省了 71.4 m 的飞行距离,再次证明了本算法的可行性。

由图 7 可以发现,2 次作业均与理论航线存在一定偏差,第 2 次作业的实际返航点 P_1 也与理论返航点发生了偏移,而且无人机经常出现提前或滞

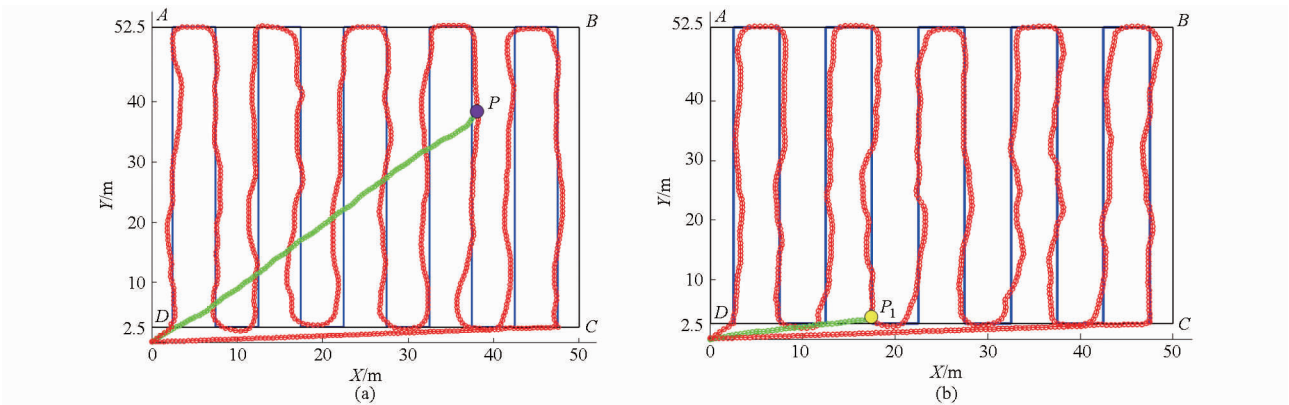


图 7 实验结果坐标图
Fig. 7 Graph of test results

表 3 第 1 次试验结果
Tab.3 The first test results

参数	取值
实际作业路径总长度 G_z/m	533.4
最少返航次数 $n/次$	1
实际返航点坐标/ m	(38.2, 37.9)
实际飞行路线总长度 G_f/m	690.7
风速/ $(m \cdot s^{-1})$	1.2

表 4 第 2 次试验结果
Tab.4 The second test results

参数	取值
实际作业路径总长度 G_z/m	532.6
最少返航次数 $n/次$	1
实际返航点坐标/ m	(17.4, 3.7)
实际飞行路线总长度 G_f/m	619.3
风速/ $(m \cdot s^{-1})$	1.5

后转弯的现象,这主要由于 GPS 定位存在一定的误差,同时液体药液会使无人机整体重心不稳,再加上风的作用,使飞行线路发生偏移,这些都会影响无人机的作业品质,造成作业遗漏和重复作业。因此在提高 GPS 精度的同时,也须加强对无人机飞控系统的改进,使得无人机飞行更加稳定。

6 结论

(1)论证了自主植保无人机航线规划研究的必

要性,选择全覆盖路径规划方法中的往复遍历法作为无人机的基本作业方式,采用栅格地图构建法对工作区域进行划分,建立工作区域坐标图,快速得到无人机的作业线路。

(2)在作业线路得到确定以后,无人机的线路规划主要是对中途返航路线的规划,因此从总能耗和作业效率等约束条件出发,合理分配各架次的载药和喷药量,并进一步研究了自主植保无人机的航线规划算法,使返航线路得到了较优的规划。仿真结果表明,在一块 210 m × 200 m 的矩形作业区域,采用本算法规划的航线相比于以能量耗尽为返航依据的航线规划,能耗节省率达到了 12.89%,而且作业面积越大,能量节省效果越明显,证明了研究方法的可行性。

(3)本研究主要是在无人机作业前对其飞行航线进行预先的规划,具有一定的局限性,试验表明,在实际作业时,由于风等环境因素和 GPS 定位误差的影响,自主飞行无人机的实际航线往往很难与理论航线相吻合,即出现航迹偏差,而且对于有电线杆等障碍物的田块来说,无人机的航线规划还需要将“避障”考虑在内,这些都是自主植保无人机所面临的问题,因此在后续的研究过程中,需逐步加入对上述影响因素的分析,并再次进行田间试验,通过对理论与实践的分析,不断地改进与完善航线规划方法。

参 考 文 献

1 刘峰,刘素红,向阳. 园地植被覆盖度的无人机遥感监测研究[J]. 农业机械学报,2014,45(11):250-257.
Liu Feng, Liu Suhong, Xiang Yang. Study on monitoring fractional vegetation cover of garden plots by unmanned aerial vehicles [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 250-257. (in Chinese)

2 薛新宇,兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2013,44(5):194-201.
Xue Xinyu, Lan Yubin. Agricultural aviation applications in USA [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 194-201. (in Chinese)

3 Hunt E R, Hively W D, Fujikawa S J, et al. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring[J]. Remote Sensing, 2010, 2(1): 290-305.

4 李冰,刘镛源,刘素红,等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报,2012,28(13):160-165.
Li Bing, Liu Rongyuan, Liu Suhong, et al. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote

- sensing system[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 160–165. (in Chinese)
- 5 薛新宇, 梁建, 傅锡敏. 我国航空植保技术的发展前景[J]. 中国农机化, 2008(5): 72–74.
Xue Xinyu, Liang Jian, Fu Ximin. Prospect of aviation plant protection in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2008(5): 72–74. (in Chinese)
- 6 周志艳, 臧英, 罗锡文, 等. 中国农业航空植保产业技术创新发展战略[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 1–10.
Zhou Zhiyan, Zang Ying, Luo Xiwen, et al. Technology innovation development strategy on agricultural aviation industry for plant protection in China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 1–10. (in Chinese)
- 7 Jacopo P, Salvatore Filippo D G, Edoardo F, et al. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture[J]. Precision Agriculture, 2012, 13(4): 517–523.
- 8 茹煜, 贾志成, 范庆妮, 等. 无人直升机远程控制喷雾系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 47–52.
Ru Yu, Jia Zhicheng, Fan Qingni, et al. Remote control spraying system based on unmanned helicopter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 47–52. (in Chinese)
- 9 彭孝东, 张铁民, 李继宇, 等. 基于目视遥控的无人机直线飞行与航线作业试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 258–263.
Peng Xiaodong, Zhang Tiemin, Li Jiyu, et al. Experiment of straight and airline flight operation for farmland based on UAV in visual remote mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 258–263. (in Chinese)
- 10 丁团结, 方威, 王锋. 无人机遥控驾驶关键技术研究及飞行品质分析[J]. 飞行力学, 2011, 29(2): 17–24.
Ding Tuanjie, Fang Wei, Wang Feng. Development of UAV remote-piloted key technology and flight qualities[J]. Flight Dynamics, 2011, 29(2): 17–24. (in Chinese)
- 11 花德隆. 基于概率 A 星和智能体的无人机路径规划[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 1–60.
- 12 张斌, 钱正祥. 基于蚁群算法的无人机航迹规划技术及研究现状[J]. 战术导弹技术, 2012(4): 58–62.
Zhang Bin, Qian Zhengxiang. Research status of route planning of UAV based on ant colony algorithm [J]. Tactical Missile Technology, 2012(4): 58–62. (in Chinese)
- 13 王光磊, 张昕. 基于地形回避技术的无人机航路规划[J]. 指挥信息系统与技术, 2014, 5(5): 49–52.
Wang Guanglei, Zhang Xin. Flight path planning for UAV based on terrain avoidance technology[J]. Command Information System and Technology, 2014, 5(5): 49–52. (in Chinese)
- 14 董晓璋, 许莺. 基于云理论的无人机航路规划算法[J]. 指挥信息系统与技术, 2014, 5(5): 44–48.
Dong Xiaozhang, Xu Ying. Route planning algorithm for UAV based on cloud theory[J]. Command Information System and Technology, 2014, 5(5): 44–48. (in Chinese)
- 15 周路茵. 无人机物流时代渐行渐近[J]. 新经济导刊, 2014(4): 51–54.
- 16 翁丹宁. 无人机物流配送的主要影响因素分析[J]. 企业改革与管理, 2015, 4(2): 170.

(上接第 21 页)

- 12 黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney–Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业, 2008, 50(8): 467–471.
Huang Jianlong, Xie Guangjuan, Liu Zhengwei. FEA of hyperelastic rubber material based on Mooney–Rivlin model and Yeoh model[J]. China Rubber Industry, 2008, 50(8): 467–471. (in Chinese)
- 13 Wu Chih-Hung, Tzeng Gwo-Hshiung, Lin Rong-Ho. A novel hybrid genetic algorithm for kernel function and parameter optimization in support vector regression[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 4725–4735.
- 14 邓乃扬, 田英杰. 支持向量机: 理论、算法与拓展[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 15 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 2–10.
Ding Shifei, Qi Bingjuan, Tan Hongyan. An overview on theory and algorithm of support vector machines [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology, 2011, 40(1): 2–10. (in Chinese)
- 16 Chang C, Lin C. LIBSVM: a library for support vector machines[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011, 2(3): 27–65.
- 17 刘琰. 支持向量机核函数的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- 18 Smola A J, Schölkopf B. A tutorial on support vector regression[J]. Statistics and Computing, 2004, 14(3): 199–222.
- 19 奉国和. SVM 分类核函数及参数选择比较[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(3): 123–124.
Feng Guohe. Parameter optimizing for support vector machines classification[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(3): 123–124. (in Chinese)
- 20 周俊, 朱树平. 农业机器人果蔬抓取中滑觉检测研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 171–176.
Zhou Jun, Zhu Shuping. Slippage detection in gripping fruits and vegetables for agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 171–176. (in Chinese)
- 21 傅隆生, 张发年, 槐岛芳德, 等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 1–8.
Fu Longsheng, Zhang Fanian, Gejima Yoshinori, et al. Development and experiment of end-effector for kiwifruit harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 1–8. (in Chinese)
- 22 王粮局, 张铁中, 褚佳, 等. 大容差高效草莓采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 252–258.
Wang Liangju, Zhang Tiezhong, Chu Jia, et al. An efficient strawberry harvesting end-effector with large misalignment tolerance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 252–258. (in Chinese)