

彭孝东, 兰玉彬, 胡洁, 等. 农用小型无人机转弯掉头模式及全区域覆盖下作业路径规划与优化[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(2): 111-117.
PENG Xiaodong, LAN Yubin, HU Jie, et al. Turning mode and whole region-coverage path planning and optimization of agricultural small UAV[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(2): 111-117.

农用小型无人机转弯掉头模式及全区域覆盖下 作业路径规划与优化

彭孝东^{1,2}, 兰玉彬¹, 胡洁^{1,2}, 欧阳帆¹, 肖克辉^{1,3}, 高志政²

(1 国际农业航空施药技术联合实验室/农业航空应用技术国际联合实验室/华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642;

2 广东省农情信息监测工程技术研究中心/华南农业大学 电子工程学院, 广东 广州 510642;

3 华南农业大学 数学与信息学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】具备自主飞行、航线规划与优化、精准控制与变量作业能力是农用小型无人机 (Agricultural small unmanned aerial vehicle, ASUAV) 的发展方向。本研究为 ASUAV 在全区域覆盖下自主飞行作业前的航线拐点坐标解算、飞行航向、起降点位置以及转弯掉头模式等提供优化选择。【方法】利用基于自主恒速飞行和最小转弯半径约束的无人机转弯掉头策略, 分析并设计了任意凸多边形作业区域下无人机的路径规划方法, 提出了基于幅宽微变的航线归整法路径规划方案, 并对结构化农田区域实现全区域覆盖条件下的路径进行了规划与优化选择。【结果】基于最优转弯掉头模式下的 ASUAV 全区域覆盖路径规划方法适用于任意凸多边形结构的农田区域, GUI 程序在解算地头边界航线拐点坐标的同时能优化选择出效率最高的飞行作业航线。在试验田随机规划出一个面积约为 2.7 hm² 的不规则凸六边形田块, 仿真发现当无人机沿着平行于最长边飞行作业时, 其空行行程最短, 约为 540 m, 工作效率也最高, 接近 90%。【结论】经过优化选择后的 ASUAV 掉头转弯模式、起降点位置、飞行航向以及解算后航线拐点坐标等可以实现全区域覆盖, 研究结果为 ASUAV 自主飞行作业提供了参考。

关键词: 农用无人机; 转弯掉头; 路径规划与优化; 全区域覆盖; 飞行作业
中图分类号: S252.9 文献标志码: A 文章编号: 1001-411X(2019)02-0111-07

Turning mode and whole region-coverage path planning and optimization of agricultural small UAV

PENG Xiaodong^{1,2}, LAN Yubin¹, HU Jie^{1,2}, OUYANG Fan¹, XIAO Kehui^{1,3}, GAO Zhizheng²

(1 International Laboratory of Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology/International Laboratory of Agricultural Aviation Applied Technology/College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Guangdong Engineering Research Center for Monitoring Agricultural Information/ College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3 College of Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】The development trend of agricultural small UAV (ASUAV) is having a capability with autonomous flight, working route planning and optimization, precise control and variable operation. This study provides the optimized selection of flight heading, take-off and landing location, turning mode and flight point coordinate solution for ASUAV before autonomous flight operation under the condition of whole-area

收稿日期: 2018-05-12 网络首发时间: 2019-01-30 09:10:00
网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20190129.1006.014.html>
作者简介: 彭孝东 (1980—), 男, 副教授, 博士, E-mail: pxd2005@scau.edu.cn; 通信作者: 兰玉彬 (1961—), 男, 教授, 博士, E-mail: ylan@scau.edu.cn
基金项目: 广东省自然科学基金 (2016A030310453, 2016A030313389); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0200700); 广东省科技计划项目 (2016A020210081); 广东省重大科技计划项目 (2017B010116003)

coverage. 【Method】 Turning mode strategy of ASUAV was studied based on autonomous flight at constant speed under constraint of the minimum turning radius. The path planning method under arbitrary convex polygons was analyzed and designed. An integerized route planning scheme was proposed based on the slight change of working width. Path planning and optimal selection under the condition of whole region-coverage were achieved in the structured farmland area. 【Result】 The whole-area coverage path planning method based on the optimal turning mode of ASUAV was applicable to the farmland with arbitrary convex polygon structure. GUI program could optimize flight route with the highest efficiency while calculating flight point coordinates of ground boundary. An irregular convex hexagonal field with an area of about 2.7 hm² was randomly planned in the field. The simulation results showed that when ASUAV was flying parallel to the longest side of the field, the invalid distance was the shortest with about 540 m, and the efficiency was the highest which was close to 90%. 【Conclusion】 The optimized turning mode, take-off and landing location, flight heading and route inflection point coordinates can realize the full area coverage. This result can provide a reference for ASUAV autonomous flight operation.

Key words: agricultural UAV; turn; path planning and optimization; whole region-coverage; flight operation

对机器人来讲, 路径规划一是要实现最基本的“点到点”路线规划功能, 二是要实现作业区域的全覆盖, 在避开障碍物的同时要求行程尽可能短、遗漏和重复的路径尽可能少^[1-3]。农用小型无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV) 属于农业机器人范畴, 但其航迹规划与机器人路径规划有所区别: 主要表现在无人机飞行过程中不会出现直角转弯, 无人机转弯时有最小转弯半径约束, 且受无人机高度、俯仰角、偏航角的影响^[4]。考虑到农用小型 UAV 续航时间有限且作业场所相对简单和固定, 对其进行路径规划时避障和回避威胁往往不是首要考虑的问题, 重点考虑的应是如何提高作业效率、实现无遗漏无重复地全区域覆盖^[5-7]。UAV 在作业(喷施、播种、喷撒、辅助授粉等)时的行程可分为工作行程和空行行程 2 个部分。工作行程是无人机在作业区域上作业时所经过的路径, 此外皆为空行行程。空行行程主要出现在 3 个地方: 一是从起降点飞行至起始作业点; 二是在航线更替需要转弯掉头时候所必需的路程; 最后是从作业结束点回到起降点这段距离。其中, 航线更替转弯掉头时所产生的空驶路程是产生空行行程的主要原因。空行行程会产生额外的时间消耗及能量消耗, 这种消耗是影响作业效率的重要因素, 合理的路径规划及无人机转弯掉头策略能有效降低空行行程距离^[8]。本文以农用小型 UAV 为对象, 通过坐标转换、数值解算、变幅宽航线归整等方法, 研究农用小型 UAV 在恒速自主飞行条件下的最优转弯掉头策略, 以及任意凸多边形作业区域下的路径全覆盖规划方法。为农用小型 UAV 在自主飞行作业前航线拐点坐标解算、

起降点位置和飞行航向选择以及掉头转弯模式选择等提供航线规划与优化依据。

1 农用小型 UAV 转弯掉头模式

地面农业机械的轮间距通常是固定的, 因此其对应的最小转弯半径 (R) 也是固定的, 农业机械的掉头转弯模式取决于 R 与作业幅宽 (w) 的关系。常见的转弯掉头策略主要有半圆形转弯、弓形转弯、梨形转弯以及鱼尾形转弯等几种^[9-12]。对 UAV 而言, 在遥控、自主飞行中都可通过侧向平移倒飞来实现航线更替, 但在遥控模式下难以实现恒速飞行作业^[13]。自主作业虽然在直线飞行时能实现恒速飞行, 但在接近田间地头时也要降低速度来实现转弯和航线变更^[14]。本文探讨农用小型 UAV 在自主飞行模式下以恒速飞行实现作业航线更替的最优转弯掉头策略。

不同于地面农业机械, 农用小型 UAV 的 R 不是固定的, 其大小与飞机的姿态、速率有关, 为简化分析, 本文假定 R 为理想的常数。UAV 采用哪种转弯方式也取决于 R 与 w 的关系, 这与地面农业机械相似。本文设 θ 为 UAV 飞行航线同地头边界的夹角, 取值范围为 $0 < \theta \leq \pi/2$, 令 $\theta = \theta_0 = \arcsin\left(\frac{w}{2R}\right)$ 为特征夹角。根据 R 、 w 、 θ 与 θ_0 的大小关系, 有如下几种理想转弯模式。

1.1 当 $R \leq w/2$ 时

农用小型 UAV 的转弯半径 (R) 小于或等于作业半幅宽 ($w/2$) 时的理想转弯掉头路径见图 1。UAV 从 A 点离开作业田块完成上一次航线作业,

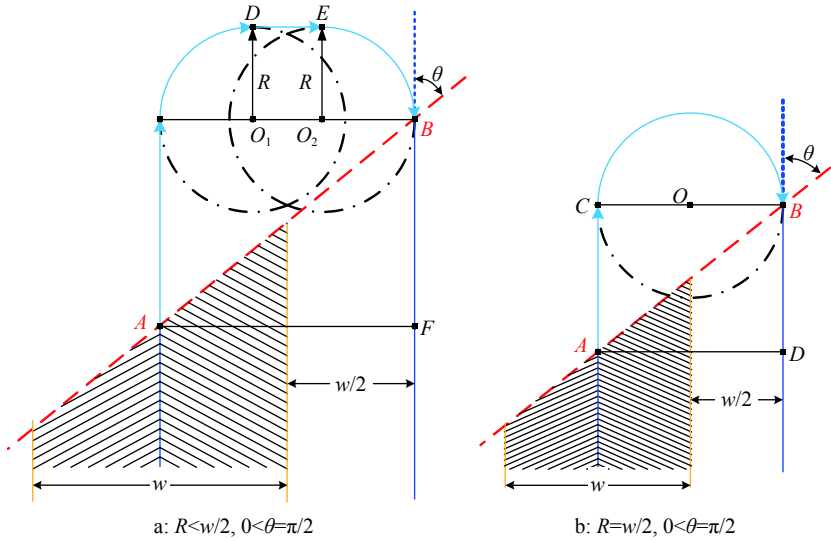


图 1 农用小型 UAV 转弯掉头策略 I

Fig. 1 Turning mode strategy I of agricultural small UAV

经过转弯掉头后重新从 B 点进入作业田块, 实现航线更替。浅蓝色实线表示理论上飞机完成转弯掉头所走过的最短行程, 即是空行行程。

UAV 的 w 、 R 和夹角 (θ) 在飞行作业前都是已知量, 由图 1a 可计算出空行行程距离 (l_1) 为:

$$l_1 = w \left(1 + \frac{1}{\tan \theta} \right) + (\pi - 2)R, \quad (1)$$

由图 1b 可计算出空行行程距离 (l_2) 为:

$$l_2 = \frac{w}{\tan \theta} + \pi R. \quad (2)$$

1.2 当 $R > w/2$ 时

当 UAV 的转弯半径 R 大于作业半幅宽 $w/2$ 时, 情况稍复杂, 可根据航线与地头边界直线夹角 (θ) 的临界值 (θ_0) 的关系分为如下 3 种情况:

1) 当 $\theta = \theta_0$ 时, 只有 1 种转弯掉头情况, 如图 2

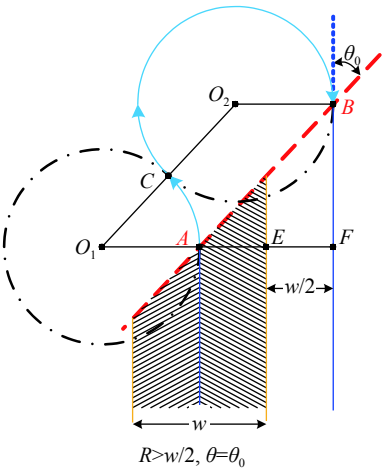


图 2 农用小型 UAV 转弯掉头策略 II

Fig. 2 Turning mode strategy II of agricultural small UAV

所示。可解出空行行程距离 (l_3) 为:

$$l_3 = 2R(\pi - \theta_0). \quad (3)$$

2) $0 < \theta \leq \theta_0$ 时, 有 2 种转弯掉头情况, 如图 3 所示。由图 3a 和 3b 可计算出空行行程距离 (l_4) 和 (l_5) 分别为:

$$l_4 = w \left(\frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \theta_0} \right) + 2R(\pi - \theta_0), \quad (4)$$

$$l_5 = 2R \left(\pi - \theta - \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{\sin^2 \theta_0}{\sin^2 \theta} - 1} \right) \right) + 2 \sqrt{\frac{w^2}{4 \sin^2 \theta} - R^2}. \quad (5)$$

3) $\theta_0 < \theta \leq \pi/2$ 时, 有 2 种转弯掉头情况, 如图 4 所示。

由图 4a 和 4b 可计算出空行行程距离 (l_6) 和 (l_7) 分别为:

$$l_6 = w \left(\frac{1}{\tan \theta} + \frac{1}{\tan \theta_0} \right) + 2R(\pi - \theta_0), \quad (6)$$

$$l_7 = w \left(\frac{1}{\tan \theta_0} - \frac{1}{\tan \theta} \right) + 2R(\pi - \theta_0). \quad (7)$$

将式 (1)~(7) 分别对 R 求导, 可得:

$$\left. \frac{dl_i}{dR} \right|_{i=1 \sim 7} > 0. \quad (8)$$

因此, 无论采用何种转弯模式, 当 UAV 以最小转弯半径飞行时, 空行行程最短, 同时, 经解算^[8]可得, 当 $R > w/2$ 时: 若 $0 < \theta \leq \theta_0$, 则 $l_5 < l_4$; 若 $\theta_0 < \theta \leq \pi/2$, 则 $l_7 < l_6$ 。

2 区域全覆盖作业路径规划

2.1 任意凸多边形作业区域

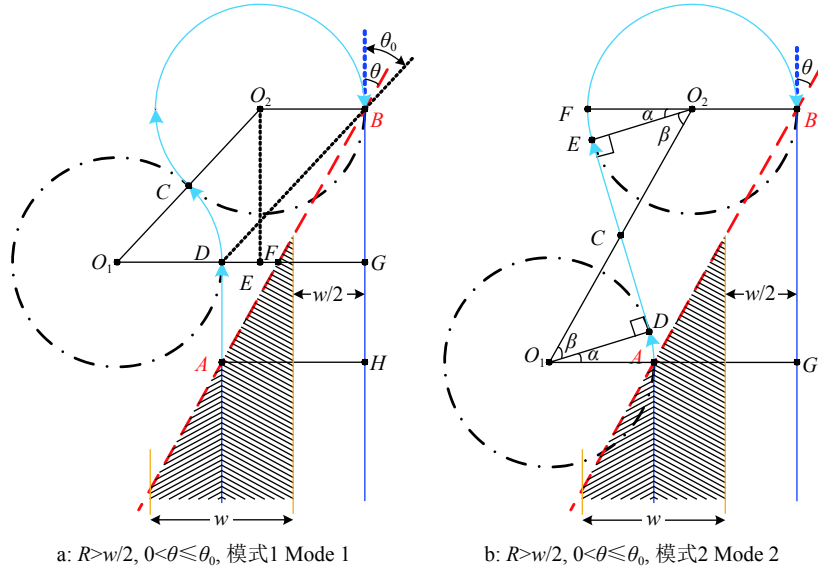


图 3 农用小型 UAV 转弯掉头策略Ⅲ

Fig. 3 Turning mode strategy III of agricultural small UAV

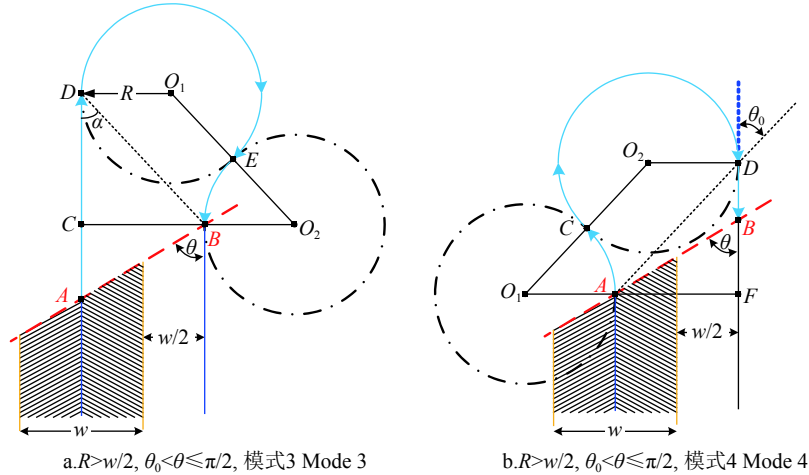


图 4 农用小型 UAV 转弯掉头策略Ⅳ

Fig. 4 Turning mode strategy IV of agricultural small UAV

不失一般性假设作业区域是一个结构化凸多边形田块, 有 n 条边、 n 个角点, 角点坐标分别为 $A(x_i, y_i)_{i=1 \sim n}$, 如图 5 所示。为便于处理, 可将实际田块的各角点 GPS 坐标通过高斯-克吕格转换成平面坐标, 并进行坐标平移^[15], 使其位于直角坐标系的

第 1 象限中。采用扫描线方式遍历整个区域, UAV 沿直线飞行, 遇到区域边界后转向掉头, 沿反方向直线飞行, 如此反复, 直到覆盖全部区域^[16]。

航线总次数取决于初始航线方向的选取, 如当选择地头边界线 l_n (即 $A_n A_1$) 作为初始航向时, 采用的“点边式”算法^[16]遍历所有角点到直线 l_n 的距离, 假设 A_i 到 l_n 的距离最远, 设此距离为 L ; 则航线次数 $n = L/w$, 通常 n 不是整数, 若舍弃小数部分航线次数 N 取整数, $N = \text{fix}(n)$ 时, 将出现作业遗漏现象; 若取 $N = \text{fix}(n) + 1$ 时, 虽实现了全区域覆盖, 但会出现区域外作业现象。按预定幅宽解算航线次数, 对新的航线次数 N 做如下处理:

$$N = \begin{cases} n, & L - wn \leq 0.5w \\ n + 1, & L - wn > 0.5w \end{cases} \quad (9)$$

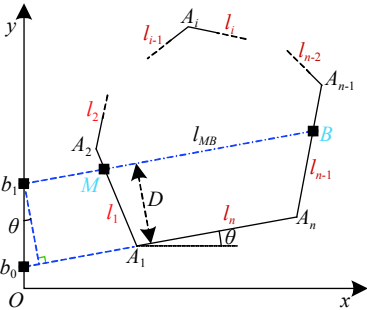


图 5 任意凸 n 边形作业区域

Fig. 5 Arbitrary n convex polygon working area

此时, 作业幅宽将被微调成 $w_0=L/N$, 若 L 远大于预定作业幅宽 (w) 时, 幅宽被改变的绝对变化量不超过 $0.5w/N$, 相对变化量不到 5%, 在诸如喷施、辅助授粉、撒播类飞行作业中, 这种小幅度变化可以忽略不计。

2.2 航线与地头边界交汇点坐标解算

图 5 中, 选择 l_n 方向为初始飞行方向, 由 l_n 斜率 k_n 可得到 l_n 与 x 轴正方向夹角 θ 为:

$$\theta = \begin{cases} \arctan(k_n), k_n \geq 0 \\ \pi + \arctan(k_n), k_n < 0 \end{cases} \quad (10)$$

由于凸多边形是位于第 1 象限, 且选择的起始点 A_1 最接近坐标原点, 因此直线 l_n 不会与 x 轴垂直, 即有 $\theta \neq \pi/2$ 。由上式得 l_n 在 y 轴上的截距 b_0 可表示为:

$$b_0 = y_n - k_n x_n. \quad (11)$$

在图 5 中, 平行且与直线 l_n 间距离为 D 的直线 l_{MN} 可表示为 $y = k_n x + b_1$, 线段 $b_1 b_0$ 的长度为 $\frac{D}{\cos \theta}$, 可得直线 l_{MN} 方程为:

$$(y - y_n) = k_n (x - x_n) + \frac{D}{\cos \theta}. \quad (12)$$

幅宽变更为 w_0 , 第 1 条航线与边界直线 l_n 的距离为半个作业幅宽 $w_0/2$, 第 k 条航线与边界直线 l_n 的距离为 $w_0/2 + (k-1)w_0$, 令 $\Delta b = \frac{w_0}{\cos \theta}$, 则可得按 l_n 方向规划的航线簇轨迹方程 $l_{n(k)}$ 为:

$$(y - y_n) - k_n (x - x_n) = (k - 0.5) \Delta b. \quad (13)$$

由于 n 凸边形田块的 n 个角点坐标均是已知的, 因此田块边界的各直线 $l_i (i=1 \sim n)$ 的方程为:

$$(y - y_i) - \frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} \cdot (x - x_i) = 0. \quad (14)$$

联立式 (13) 和 (14) 即可求出作业航线与各地头边界直线的交点坐标, 即航线拐点坐标。

2.3 地头边界直线变更算法

从图 5 中可以看出, 以 l_n 方向为初始作业航向, 当经过 $j-1$ 次航线更替后, 若角点 A_2 离该条航线的距离已小于 w_0 时, 则第 j 条航线将与左侧另一条地头边界直线 l_2 相交于某一点, 否则仍与 l_1 相交。同理, 右侧地头边界直线 l_{n-1} 何时变更为 l_{n-2} 也取决于角点 A_{n-1} 与该条航线的距离。可总结如下: 若角点与航线间距离小于 w_0 时, 在航线更替的同时变更边界地头直线; 若该距离大于 w_0 时, 只变更航线。

假设 UAV 以微调后的作业幅宽 w_0 平行于 l_n 方向飞行作业, 且 A_i 点为距离 l_n 最远的角点, 将田

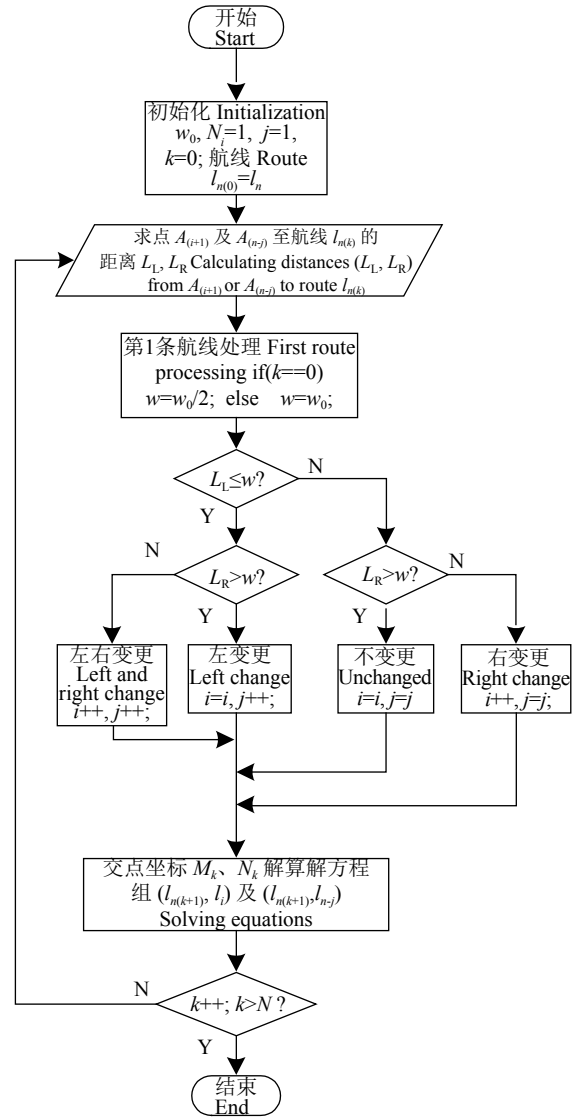


图 6 地头边界直线变更算法流程图
Fig. 6 Flow diagram of the algorithm for field border change

块边界直线 $l_0 \sim l_{i-1}$ 、 $l_i \sim l_{n-1}$ 分别称为左、右部分地头边界, 左、右边界直线变更与否以及航迹拐点坐标解算过程如图 6 所示。

3 仿真分析

在深圳大鹏某试验基地随意规划出一个凸六边形作业区域, 测量 6 个角点经纬度坐标并经过坐标转换、去偏移值后得到一个面积约为 $27\,253\text{ m}^2$ 的凸六边形作业区域, 如图 7 所示。

若 A_1 点附近是无人机开始作业起飞时的位置, 面向 A_1 点则可沿着左手边方向 (平行于 $A_1 A_2$ 方向) 也可沿着右手边方向 (平行于 $A_1 A_6$ 方向) 飞行作业, 根据各角点坐标及初始作业幅宽, 通过前面的航线规划算法编制程序, 分别解算 2 种情况下

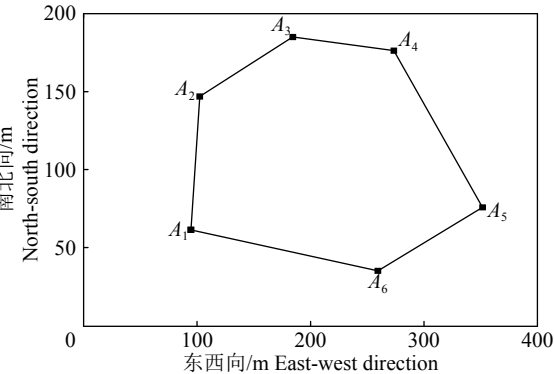


图 7 凸六边形作业区域

Fig. 7 Convex hexagon working area

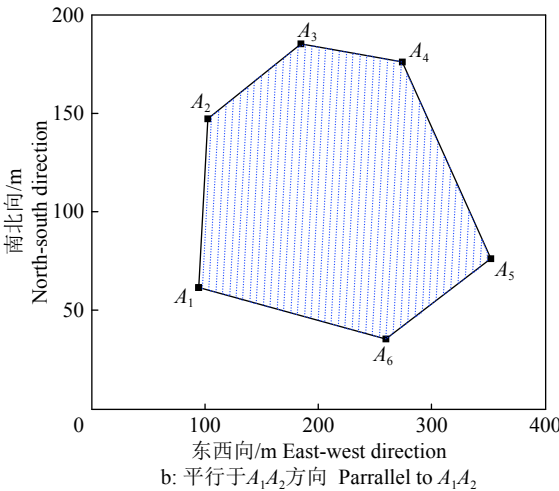
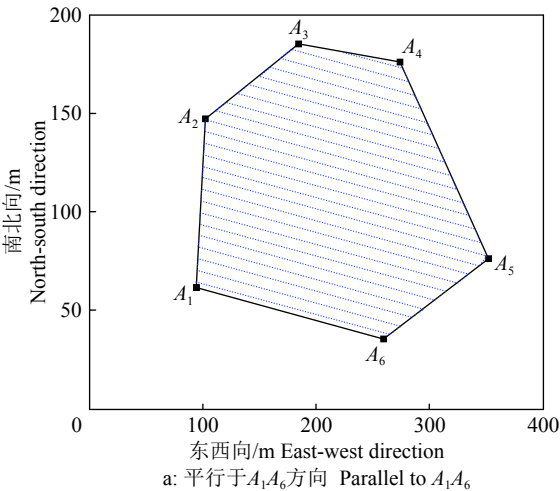


图 8 农用小型 UAV 以 A_1 点为起落点的 2 种典型航线

Fig. 8 Two typical routes of agricultural small UAV with A_1 as the landing point

表 1 农用小型 UAV 在 2 种航线下的相关参数比较

Table 1 Comparisons of relevant parameters based on two typical routes of agricultural small UAV

飞行作业航向 Flight heading	总航线次数 Number of routes	预设幅宽/m Preset width	微调后幅宽/m Fine-tuning width	特征夹角/(°) Characteristic angle	空行行程/m Invalid distance	工作行程/m Valid distance	工作效率% Working efficiency
A_1A_2 方向 Direction A_1A_2	42	6	6.07	44.6	997.2	4 774.3	82.72
A_1A_6 方向 Direction A_1A_2	24	6	5.88	42.9	538.5	4 832.2	89.97

宽、空行行程、工作行程以及工作效率，其中工作效率定义为工作行程与总行程的比值，结果如表 1 所示。由表 1 可以看出，就 A_1 点而言，沿 A_1A_6 方向飞行作业时的总航线次数少、空行行程短、效率高。

同样的处理方法，遍历剩余 5 个角点 $A_2\sim A_6$ ，计算每个角点沿左手、右手航向下的空行行程、工作效率，统计结果如表 2 所示。可以看出无论是从 A_1 点出发还是从 A_6 点出发，无人机沿平行于边 A_1A_6 飞行作业时的空行行程短、工作效率高，

飞行航线与作业田块区域每条边界相交的拐点坐标。相关飞行参数以深圳高科新农公司生产的某型号 15 kg 电动无人直升机为例，飞行作业时的速率为 3~8 m/s，喷幅为 6~7 m，飞行速率取最小值 3 m/s，初始作业幅宽取最小值 6 m，假设无人机在掉头转弯时的最小转弯半径为 4.3 m，特征夹角 θ_0 为 44.1°，规划出的 2 种全区域覆盖条件下的飞行作业航线如图 8 所示。

统计 2 种模式下 UAV 在每条边界处的转弯掉头次数，同时根据航线与每条边界的夹角选择一个最优转弯掉头模式，计算总航线次数、微调后的幅

而且数值都非常接近。因此，可将无人机的起降点设置在 A_1 点，沿着 A_1A_6 方向飞行作业，或者将起降点设置在 A_6 点，沿着 A_6A_1 方向飞行作业。同时仿真发现当沿着凸多边形作业区域的最长边飞行时，总航线次数最少，需要往返掉头转弯的次数也最少。

在 MATLAB 中编制基于最优转弯掉头策略的 UAV 全区域覆盖作业路径规划系统，其 GUI 界面如图 9 所示。在界面输入每个角点的平面坐标、作

表 2 不同起降点下的空行行程与工作效率比较

角点 Corner	左手方向 Left-hand direction		右手方向 Right-hand direction	
	空行行程/m	工作效率/%	空行行程/m	工作效率/%
	Invalid distance	Working efficiency	Invalid distance	Working efficiency
A ₁	997.2	82.72	538.5	89.97
A ₂	648.2	87.99	1 003.3	82.63
A ₃	552.8	89.75	646.0	88.03
A ₄	770.6	86.07	645.0	88.43
A ₅	653.0	88.02	770.8	86.07
A ₆	542.0	89.98	655.0	88.00

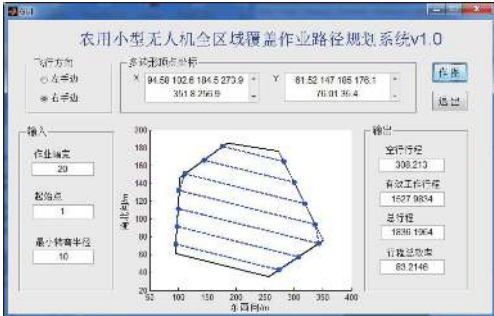


图 9 农田全区域覆盖路径规划 GUI 界面

Fig. 9 GUI interface of complete coverage path planning for farmland

业幅宽、最小转弯半径、起始点编号以及选择飞行方向后,该程序能对任意凸多边形作业区域进行全区域作业路径规划,自动微调作业幅宽,进行相关作业参数及性能指标的计算和统计。

4 结论

本文基于无人机最小转弯半径(R)、飞行作业幅宽(w)、航线与地头边界的夹角(θ)以及特征夹角(θ_0),研究了自主飞行模式下的农用小型 UAV 转弯掉头策略,并对农用小型 UAV 在地头转弯路径优化选择进行了定量和定性分析。分析了任意凸多边形作业区域下的农用小型 UAV 沿任意边界为起始航向的作业路径规划方法,提出基于幅宽(w)微变的总航线数归整法,给出了航线与地头边界交点的航线拐点坐标解算的通用算法,且能实现全作业区域覆盖。在试验田随机规划出一个面积约为 2.7hm²的不规则凸六边形田块,仿真发现当无人机沿着平行于最长边飞行作业时,其空行行程最短,约为 540 m,工作效率也最高,接近 90%。通过编制的 GUI 程序可以模拟计算农用小型 UAV 在不同起降点、不同航向条件下的总航线次数、空行行程、工作行程和工作效率等,可以为农用小型 UAV 自主飞行、航线规划与最优作业行为实施的起降点选择与航向选择提供参考。

参考文献:

[1] 戴博, 蔡自兴, 崔益安. 移动机器人路径规划技术的研究现状与展望[J]. 控制与决策, 2005, 12(3): 198-202.

[2] 席裕庚, 张纯刚. 一类动态不确定环境下机器人的滚动路径规划[J]. 自动化学报, 2002, 28(2): 161-175.

[3] 李爱萍, 李元宗. 机器人路径规划方法的研究[J]. 机械工程与自动化, 2009(5): 194-196.

[4] JONES P, TANG L, VACHTSEVANOS G. Multi-unmanned aerial vehicle coverage planner for area surveillance missions[C]//AIAA. Guidance, navigation and control conference and exhibit. South Carolina: Hilton Head, 2007: 6453-6464.

[5] 柳煌, 夏学知. 无人机航线规划[J]. 船舶电子工程, 2008, 28(5): 47-51.

[6] 胡中华, 赵敏, 姚敏, 等. 无人机航迹规划技术研究及发展趋势[J]. 航空电子技术, 2009, 40(2): 24-36.

[7] 蔡自兴, 崔益安. 多种机器人覆盖技术研究进展[J]. 控制与决策, 2008, 23(5): 481-486.

[8] 彭孝东. 农用小型无人机遥控作业位姿估计与路径规划[D]. 广州: 华南农业大学, 2015.

[9] 孟志军, 刘卉, 王华, 等. 农田作业机械路径优化方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 147-152.

[10] OKSANEN T, VISALA A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines[J]. J Field Robot, 2009, 26(8): 651-668.

[11] 刘向锋. 面向 GPS 导航拖拉机的最优全局覆盖路径规划研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010.

[12] 苗玉彬, 王明军. 农业车辆导航系统中路径规划策略的研究进展[J]. 农机化研究, 2011, 33(5): 12-15.

[13] 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.

[14] 韩宾, 吴开华, 王文杰. 全自动植保无人机弯道姿态控制算法[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(4): 142-144.

[15] 陈海, 王新民, 焦裕松, 等. 一种凸多边形区域的无人机覆盖航迹规划算法[J]. 航空学报, 2010, 31(9): 1802-1808.

[16] 张智刚, 罗锡文, 胡炼, 等. 4 种 DGPS 模块动态定位精度测试与分析[J]. 华南农业大学学报, 2010, 31(1): 102-107.