

唐灿,宗望远,黄小毛,等. 农用无人机多机多田块作业路径规划算法[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 187-194.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.05.023

农用无人机多机多田块作业路径规划算法

唐灿¹, 宗望远^{1,2}, 黄小毛^{1,2}, 罗承铭^{1,2}, 李文成^{1,2}, 王绍帅¹

1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

摘要 针对含障碍物多田块条件下的多台农用无人机路径规划问题, 研究提出一套完整的多无人机协同作业路径优化算法解决方案。以最小转移路径长度为作业优化目标, 先基于多边形扫描填充算法计算出水平航向条件的初始覆盖作业航线, 对航线间危险转移过程进行安全边界相交性测试, 每单一田块分别采用凸多边形“最小跨度法”和非凸多边形“步进旋转法”优化作业航向。然后建立航线调度及航次规划数学模型, 并基于 Google OR-Tools 开源优化软件套件进行求解。对比不同航线组合调度策略下的作业效果, 以及考虑消耗品补给时的 OR-Tools 5 种优化搜索策略算法与无人机沿航向方向等面积划分算法的作业优化效果。针对 4 组假想田块和真实田块的算例仿真试验表明, 该算法能够有效地实现多田块在满足各种约束条件下的多机协同路径规划, 算法耗时 70~552 s, 相比于等面积划分算法, 航线间转移路径总长度下降 24.86%~47.10%。

关键词 农用无人机; 路径规划; 多田块; 障碍物; 多机协同; Google OR-Tools

中图分类号 TP 18 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)05-0187-08

近年来, 无人机逐渐发展成为一种常见的农业生产机械^[1], 可以实现遥感^[2]、植保^[3]、播撒^[4]等多种农业作业任务。相较于单个无人机作业, 多机协同作业可显著提高作业效率, 减少具体田块的作业处理时间^[5-6], 是大面积多区域作业时的一项重要形式^[7]。

路径规划问题是近些年无人机领域的研究热点。由于实际作业工况多种多样, 对单机单田块区域、多田块区域、含障碍物区域、按需补给以及多机协同等都有相关研究。比如单架无人机作业路径规划方面, Valente 等^[8]提出一种基于“和谐搜索”(harmony search)的启发式搜索算法去求解单机作业情况下的遍历网格的最优次序, 王宇等^[9]提出一种基于栅格模型的路径规划算法, 黄小毛等^[10-11]提出基于多边形扫描填充线快速求解的无人机路径规划算法, 严炜等^[12]提出一种基于差分量子退火算法的农用无人机路径规划方法。

多机协同作业时, 主要考虑待作业任务的划分, 为使得任务尽可能均衡, 一般采用“等面积法”划分待作业区域后再分别规划航线^[13-14]。此外, Barri-

entos 等^[15]将待作业区域进行网格化处理, 并提出一种基于任务协商机制的作业路径规划算法, Nigam 等^[16]提出一种适用于矩形区域的区域划分与分配算法。由于载荷及续航问题, 对于多田块区域, 单航次往往无法满足作业要求, 因此, 需要考虑中途返航至补给点进行电量以及农资的补给。徐博等^[17]基于最小能耗对单一大面积矩形边界田块中的补给架次进行了研究。李继宇等^[18]基于能量利用率最大化原则, 对边界形状简单且单一的田块补给过程进行了研究。

随着电动旋翼农用无人机应用日益广泛, 对含障碍物大面积多田块区域的作业任务需求日益增多。本研究在笔者所在课题组前期工作基础上, 针对含障碍物多田块条件下, 综合考虑电量以及农资补给, 提出一套基于 Google OR-Tools^[19]的农用无人机多机协同作业路径静态规划算法, 旨在为多田块条件下的多机协同作业路径规划优化提供参考。

1 材料与方法

多台农用无人机协同作业路径规划的任务是先

收稿日期: 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31771683, 52075211); 湖北省重点研发计划项目(2020BBB062); 中央高校基本科研业务费专项(2662020GXP001)

唐灿, E-mail: 652636055@qq.com

通信作者: 黄小毛, E-mail: huangxiaomao@hzu.edu.cn

计算出完全覆盖田块多边形区域的基础作业航线,再分配给多台无人机并合理安排多次补给续航方案。本研究计算时忽略无人机在工作时可能发生的碰撞问题以及天气、风速等外部环境的影响和因作业进程而变化的实际载荷对动力的动态影响。

1.1 算法总体流程

以最小转移路径长度为作业优化目标,基于多边形扫描填充算法^[10-11]计算出水平航向条件的初始覆盖作业航线,将田块边界障碍物进行安全边界相交性测试^[10-11],并分别针对各田块采用凸多边形“最小跨度法”^[10-11]以及非凸多边形“步进旋转法”^[10-11]优化作业航向。再基于 Google OR-Tools 组合优化开源软件工具包,综合考虑消耗品按需返航后的补给与续航问题,进行航线调度次序及作业航次的规划。

以田块及障碍物的边界和飞行作业参数为输入,以作业路径为输出,整个算法的流程如图 1 所示。

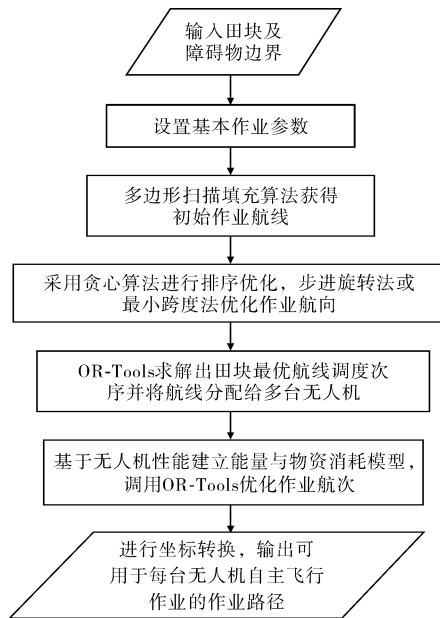


图 1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flow chart

1.2 航线调度优化

建立航线调度目标模型,参照旅行商问题(traveling salesman problem, TSP),将初始作业航线的每个端点简化为 1 个“城市”。为保证航线上每个点均可被遍历且无人机可以从航线的一端飞向另一端,在构建 TSP 距离矩阵时将位于同一航线上的 2 个城市点间的名义距离设为 0,而将实际距离均分

到该航线与其他航线间的转移路径上。假设有 m 台无人机, n 条作业航线(加上起降点,共对应 $2n+1$ 座城市),集合 $A=\{1,2,\dots,2n\}$ 、 $B=\{0,1,2,\dots,2n\}$ 、 $C=\{1,2,\dots,m\}$,每台无人机中有 r_k 次不包含补给点的危险转移过程^[10-11], s_k 次包含补给点的危险转移过程, h_0 为作业高度, h 为安全高度,则该问题的数学模型可描述如下:

$$\min Z = \sum_{i=0}^{2n} \sum_{j=0}^{2n} \sum_{k=1}^m d_{ij} x_{ijk} + \sum_{k=1}^m [2r_k(h-h_0) + s_k(2h-h_0)] \quad (1)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{若无人机 } k \text{ 从端点 } i \text{ 到端点 } j, \text{ 否则} \\ 0 & \end{cases} \quad i, j \in B, k \in C \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1, i, j \in A \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^{2n} x_{ijk} = 1, j \in A, k \in C \quad (4)$$

$$\sum_{j=0}^{2n} x_{ijk} = 1, i \in A, k \in C \quad (5)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{若 } i, j \text{ 属于同一航线,} \\ d_{ij}^{\text{transfer}} + \frac{d_i^{\text{work}} + d_j^{\text{work}}}{2} & i, j \in B, \text{ 否则} \end{cases} \quad (6)$$

式(1)为目标函数,其中 d_{ij} 表示端点 i 到端点 j 的距离;式(2)中, x_{ijk} 表示无人机 k 从端点 i 到端点 j 的函数;式(3)表示每个航线端点只有 1 台无人机飞过;式(4)、(5)表示从任意航线端点出发有且仅到达其他端点中的 1 个,到达任意航线端点的路线仅从其他端点中的 1 个出发;式(6)将同一航线上 2 个端点的名义距离设为 0,以确保航线能被执行、航线上每个点都能被遍历到,而对应实际长度均分到相邻的转移路径上,式(6)中, d_{ij}^{transfer} 为不属于同一航线的, 2 个端点之间的实际转移距离, d_i^{work} 、 d_j^{work} 为端点 i 、 j 所在实际航线的真实长度。

按照上述模型,可在基础航线数据上建立该问题的距离矩阵,并通过算法进行求解。穷举搜索所有航线调度方式可得到最小转移路径,但计算效率较低。本研究采用 Google OR-Tools 开源工具包中的智能算法,在规定时间内找出尽可能最优的解。解决路径问题时,OR-Tools 提供 2 种解算器,本研究采用其中最常用的解算器 CP-SAT。OR-Tools 使用最先进的算法缩小搜索集范围,以便找到最佳(或接近最佳)的解决方案^[19],解算器包含了 14 种初始解构造策略算法(first solution strategy)和 5

种优化搜索策略算法(local search options)。前者负责构造初始解,包括节约算法(savings)、扫描算法(sweep)、最近插入法(best insertion)、克里斯托菲德斯算法(Christofides)等经典求解算法;后者对初始解进一步优化,包含改良贪心算法(greedy descent)、引导式本地搜索算法(guided local search)、模拟退火算法(simulated annealing)、禁忌搜索算法(tabu search)与目标禁忌搜索算法(objective tabu search)。二者组合起来将形成 70 种组合策略算法,因篇幅有限,列举其中 4 种组合策略如表 1 所示。

表 1 4 种航线调度组合策略

Table 1 Four combined strategies for route scheduling

优化搜索策略算法 Local search options	初始解构造策略算法 First solution strategy	
	C	S
G	C×G	S×G
T	C×T	S×T

注 Note: G: 引导式本地搜索算法 Guided local search; T: 禁忌搜索算法 Tabu search; C: 克里斯托菲德斯算法 Christofides; S: 扫描算法 Sweep. 下同 The same as below.

1.3 按需多次补给

无人机具有最大起飞质量限制,作业时携带的种肥药液等农业物资也会消耗大量的动力,而电池或燃油容量与其质量成正比。因此,每个航次携带农资的最大质量和电池的容量会受到限制,一般会有一个经济值。本研究暂不考虑农资消耗过程对续航能力的动态影响,设每台无人机最大农资载荷为 Q ,每个航次的最大续航里程为 $L_{\max}$ 。航线作业时会消耗一定量的农资,消耗量与航线对应的单位距离或覆盖面积成正比。求解时,将每条航线需要消耗的农资量均摊到 2 个航线端点“城市”上。设每个航线端点的农资需求量为 q_i ($i=1,2,\dots,2n$), y_{ki} 为无人机 k 到访端点 i ,本航次已完成其中 u 条航线的遍历任务, D 为对应的端点序号集合,则农资消耗约束条件为:

$$\sum_{j \in E} \sum_{i \in E} d_{ij} + [2r'_k(h - h_0) + (2h - h_0)] \leq L_{\max} \quad (7)$$

若本航次已完成 u 条航线的遍历任务, E 为包括补给点和对应端点的序号集合,经历 $\sum_{j \in E} \sum_{i \in E} d_{ij} + [2r'_k(h - h_0) + (2h - h_0)] \leq L_{\max}$ 次不包含补给点的危险转移过程,则动力消耗约束条件为:

$$\sum_{j \in E} \sum_{i \in E} d_{ij} + [2r'_k(h - h_0) + (2h - h_0)] \leq L_{\max} \quad (8)$$

当动力与农资的累积消耗量其中任意一种超过限

制时,执行补给操作,即返回至补给点将动力与农资完全重置。补给完成后,将剩余航线进行重新排序,直至找到新的返航点或完成所有航线的遍历作业^[11]。

采用 OR-Tools 中的 CVRP(capacitated vehicle routing problem,具有能力约束的车辆路径问题)求解算法,进行航线任务分配及补给方案的求解。

2 结果与分析

前述算法过程基于 Python 3.8 语言在 PyCharm 平台上编码实现,在 AMD Ryzen 7 4800,1.8 GHz CPU、16 GB 1 600 MHz 内存、Windows 10 操作系统环境下,分别对 4 组人工假想和实际多田块边界在多组不同工作参数条件下进行 2 次试验,以测试算法稳定性、计算效率和优化效果。

田块边界用蓝色多边形表示,每台无人机航线分别用红色、蓝色、黑色等不同颜色线段表示,转移路径用绿色虚线段表示,无人机的补给返航点用与航线颜色相同的圆圈标记,每个航次起始处加数字标记,其中危险转移过程对应航点处加黑色三角形标记。

表 2 测试算例田块参数

Table 2 Field parameters for case studies

田块序号 Field serial number	面积/m ² Area	田块数 Number of fields	边界数 Number of boundaries	顶点数 Number of vertices
1	36 480.81	5	5	21
2	59 711.70	11	16	255
3	41 887.53	6	6	317
4	76 066.98	4	5	211

设无人机台数为 3。实际田块边界利用 Omap 获取并以 KML 文件格式导出;假想田块边界利用 CAD 绘制并以 DXF 格式导入。计算过程中,先基于多边形扫描填充算法计算出水平航向条件的初始覆盖作业航线,再采用凸多边形“最小跨度法”与非凸多边形“步进旋转法”(取步距角 $\Delta\theta=0.5^\circ$)优化作业航向;后基于 OR-Tools 求解出田块最优航线调度次序并将航线分配给 3 台无人机,最后按照无人机性能建立能量与物资消耗模型,调用 OR-Tools 优化作业航次,计算过程中对每个潜在转移过程均进行安全判断并对危险转移过程进行处理。

算法中统一设定作业高度 2 m(实际作业中,为保证绝对安全,要求航线间转移时不同飞机必须采用不同的转移高度,此处作简化处理),安全转移高

度 6 m,安全边界距离 1 m。参考文献[11]中作业参数,设定无人机速度为 3 m/s,电力或燃油续航能力 4 000 m,单次航行所需农资为 12 L,变量喷播模式下单位面积喷播量为 18 L/hm²。同时为避免 OR-Tools 出现因过分追求最优解使得求解时间过长的情况,设置该环节最大求解时长为 30 s。

首先尝试通过初步试验,对比测试 70 种不同组合策略对不考虑补给时的调度优化算法效果。因篇幅有限,而测试结果表明进一步优化搜索策略算法中引导式本地搜索算法优化效果最好,禁忌搜索算法优化效果最差;同时克里斯托菲德斯算法(Christofides)是旅行商问题中近似比最好的结果,扫描算法(sweep)也是车辆路径问题中较为常用的方法,因此只截取由以上 4 种算法所组成的 4 种组合策略优化结果,如表 3 所示。

表 3 多机作业 4 种不同航线调度组合策略算法下初始路径规划(不考虑补给)测试结果

Table 3 Results of initial path planning under four different route scheduling combination strategies
algorithm for multi UAVs operation without replenishment

FN	WB	EN	C×G			C×T			S×G			S×T		
			I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	4	1	8 940.00	2 590.64	91 253	8 940.00	2 785.91	91 299	8 940.00	2 590.64	91 262	8 940.00	2 785.91	91 372
	5	2	7 091.05	2 680.67	9 089	7 091.05	2 649.07	90 905	7 091.05	2 680.67	90 874	7 091.05	2 649.07	7 091
2	5	3	11 036.04	4 152.11	112 443	11 036.04	4 426.52	112 827	11 036.04	4 144.09	113 242	11 036.04	4 426.52	112 667
	6	4	9 142.65	4 006.28	11 053	9 142.65	4 263.77	110 478	9 142.65	4 006.28	111 095	9 142.65	4 263.77	110 830
3	3	5	13 832.83	3 183.96	112 086	13 832.83	3 357.03	111 645	13 832.83	3 183.96	111 103	13 832.83	3 357.03	111 364
	4	6	10 325.07	3 097.56	108 015	10 325.07	3 384.79	108 168	10 325.07	3 097.56	108 083	10 325.07	3 384.79	108 641
4	6	7	12 099.34	2 934.87	105 240	12 099.34	3 206.82	105 227	12 099.34	2 934.87	105 428	12 099.34	3 206.82	105 282
	7	8	10 360.34	2 895.00	105 044	10 360.34	3 064.20	105 227	10 360.34	2 935.04	105 016	10 360.34	3 064.20	104 630

注 Note; FN:田块序号 Field serial number; WB:工作幅宽/m Working breadth; EN:算例序号 Example number; I :有效工作路径总长度/m Total effective working path length; II :转移路径总长度/m Total length of transfer path; III :算法耗时/ms Algorithm time consuming.下同 The same as below.

进一步固定初始解构造策略为常用的 Christofides,对比测试 5 种优化搜索策略算法对考虑补给情况下的路径优化效果,并且与文献[13-14]中等面积划分算法进行对比,结果如表 4 所示。表 4 中,5 种优化搜索策略算法的转移路径总长度的数据,相同条件下相比较最好的结果用 * * 注释,最差的结果用 * 注释;优化结果分别对比等面积划分算法结果,计算出优化提升效果。

从表 4 可知,5 种进一步的优化搜索策略算法的效果各不相同。从优化结果上看,对转移路径总长度的优化效果,引导式本地搜索算法(G)最好,8 个算例中有 7 个是最优的,禁忌搜索算法(T)和目标禁忌搜索算法(OTS)最差,各获得 3 个算例的最差结果,其次是模拟退火算法(SA)和改良贪心算法

从表 3 可以看出,“Christofides 算法×引导式本地搜索算法(C×G)”组合下的计算结果,无论在路径总长度还是算法耗时上,都与“sweep 算法×引导式本地搜索算法(S×G)”大致相当;“Christofides 算法×禁忌搜索算法(C×T)”组合下的计算结果与“sweep 算法×禁忌搜索算法(S×T)”也是基本一致。而当比较“Christofides 算法×引导式本地搜索算法(C×G)”和“Christofides 算法×禁忌搜索算法(C×T)”组合下的计算结果时,出现了相对较大的差异,同样的趋势出现在“sweep 算法×引导式本地搜索算法(S×G)”和“sweep 算法×禁忌搜索算法(S×T)”组合下的计算结果。这说明,不同的初始解构造策略对结果影响不大,结果上的差异主要由进一步的优化搜索策略算法的不同而引起并决定。

(GD)获得 1 个算例的最差结果。造成这种差异的主要原因除了算法本身的设计差异外,可能还在于设置了 30 s 求解时间的限制。也就是说部分算法能够在该时长内快速逼近最优解,而其他算法可能需要更多的寻优时间。

将各算例的 OR-Tools 优化结果,与等面积划分法的算法结果进行对比时,发现最优结果对转移路径总长度的优化效果为 30.92%~47.10%,而最差优化效果也能够达到 24.86%~43.96%。这说明,基于 OR-Tools 优化效果显著,非常有必要。同时,从算法耗时上看,改良贪心算法的耗时最短,其他算法的耗时相当,为 70~552 s,但基本在路径离线规划优化操作的可接受范围之内。

表4 多机作业5种优化搜索策略算法对考虑补给情况下的优化结果

Table 4 Results of five optimizing search strategy algorithms for multi-UAVs considering replenishment

算法 Algorithm		田块 1 Field 1		田块 2 Field 2		田块 3 Field 3		田块 4 Field 4	
		4 m WB	5 m WB	5 m WB	4 m WB	3 m WB	4 m WB	6 m WB	7 m WB
		EN1	EN2	EN3	EN4	EN5	EN6	EN7	EN8
GD	I	8 940.00	7 091.05	11 036.48	9 134.45	13 832.83	10 325.07	12 099.34	10 360.34
	II	3 882.31	3 819.37 *	7 587.96	7 225.31	5 567.53	5 299.98	7 547.90	8 717.73
	III	75 151	70 169	378 107	347 129	221 376	182 997	509 434	548 208
G	I	8 940.00	7 091.05	11 036.48	9 134.45	13 832.83	10 325.07	12 099.34	10 360.34
	II	3 624.23 **	3 663.29 **	6 792.35 **	7 006.41 **	5 376.67 **	5 007.31 **	7 308.48	8 251.99 **
	III	133 539	128 736	460 895	434 436	308 803	269 211	514 466	551 508
SA	I	8 940.00	7 091.05	11 036.48	9 134.45	13 832.83	10 325.07	12 099.34	10 360.34
	II	3 882.31	3 819.37	7 426.43	7 139.92	5 726.20	5 516.48 *	7 269.16 **	8 522.53
	III	13 3709	128 565	453 689	435 505	306 244	269 700	521 196	521 414
T	I	8 940.00	7 091.05	11 036.48	9 134.45	13 832.83	10 325.07	12 099.34	10 360.34
	II	3 839.92	3 745.46	7 596.86 *	7 240.94	5 848.23 *	5 280.68	7 561.49	8 785.84 *
	III	133 619	128 721	455 638	435 959	303 946	275 340	503 696	552 336
OTS	I	8 940.00	7 091.05	11 036.48	9 134.45	13 832.83	10 325.07	12 099.34	10 360.34
	II	3 979.59 *	3 814.58	7 596.86	7 380.50 *	5 848.23	5 280.68	7 893.30 *	8 616.74
	III	13 3715	128 697	456 094	434 495.	303 389	272 280	526 936	546 155
EAPA	I	8 940.00	7 091.05	11 036.48	9 134.45	13 832.83	10 325.07	12 099.34	10 360.34
	II	6 851.16	6 816.55	11 173.57	12 781.40	7 783.85	7 574.94	13 481.32	14 655.60
	III	196 257	203 870	344 370	405 288	236 913	234 736	556 448	542 998
OE	OEB/%	47.10	46.26	39.21	45.18	30.92	33.89	46.07	43.69
	OEW/%	41.91	43.96	32.01	42.25	24.86	27.17	41.45	40.05

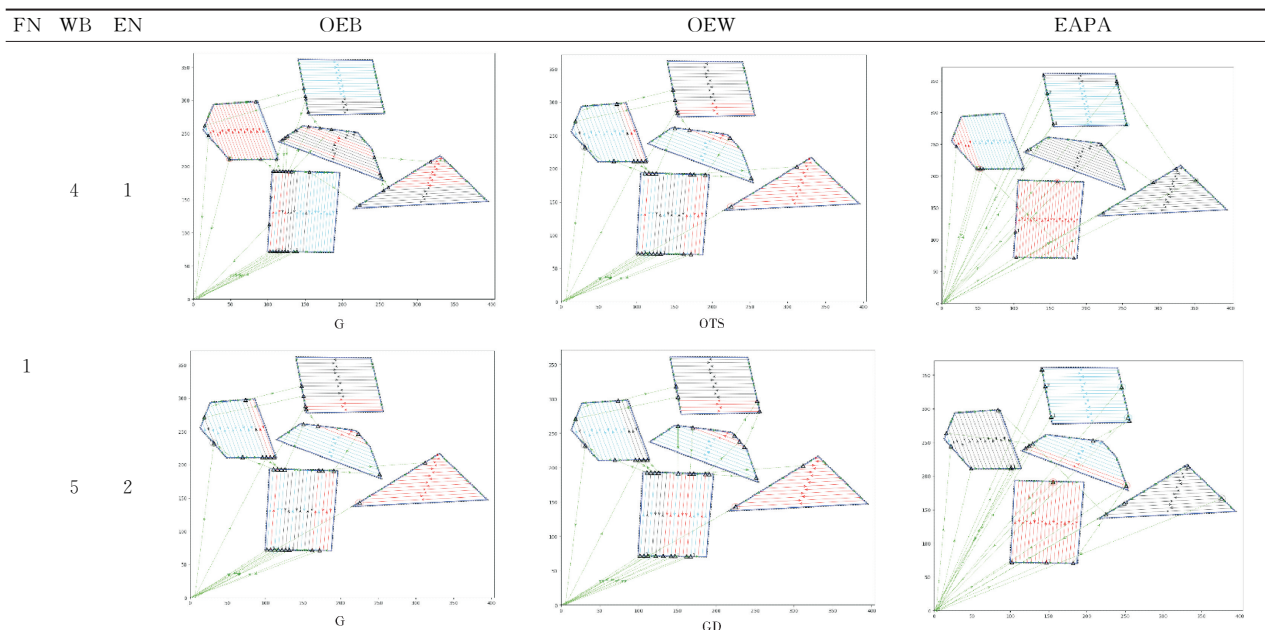
注 Note: EN1~EN8 表示算例序号 EN1-EN8 are the serial numbers of examples; WB:工作幅宽/m Working breadth; G:引导式本地搜索算法 Guided local search; T:禁忌搜索算法 Tabu search; GD:改良贪心算法 Greedy descent; SA:模拟退火算法 Simulated annealing; OTS:目标禁忌搜索算法 Objective tabu search; EAPA:等面积划分算法 Equal area partition algorithm; OE:优化效果 Optimization effect; OEB:最好优化效果 The best optimization effect; OEW:最差优化效果 The worst optimization effect.下同 The same as below.

表5中给出了相同初始解构造策略算法下5种基础航线对田块区域的覆盖效果良好,基本看不出进一步优化搜索策略算法的最优和最差结果与等面积划分算法的结果的相关图例,可见算法所得

进一步优化搜索策略算法的最优和最差结果与等面积划分算法的结果的相关图例,可见算法所得

表5 5种优化搜索策略算法中最好及最差优化结果和等面积划分算法结果截图

Table 5 Screenshots of the optimal and worst results in 5 optimizing search strategy algorithms



续表 5 Continued Table 5



注:表 5 中 O 点为每个算例的补给点位置,坐标轴表示算例的平面坐标位置,单位/m。Note:Point O in Table 5 is the location of the replenishment point of each example,and the coordinate axis represents the plane coordinate position of each example,unit m.

3 讨论

本研究针对含障碍物多田块条件下的农用无人机路径规划问题,研究了多机协同全覆盖路径规划优化算法。同时考虑消耗品按需返航后的补给与续作问题,基于 Google OR-Tools 组合优化开源软件工具包,对不同的调度搜索策略进行了对比试验研究。利用 4 组假想与实际含障碍物多田块进行仿真试验测试,首先测试了 Google OR-Tools 组合策略算法在不考虑补给时的优化效果和计算效率,结果表明 OR-Tools 初始解构造策略对最终结果影响不大,结果上的差异主要由进一步的优化搜索策略算法的不同而引起并决定。然后将本研究设计的算法与无人机沿航向方向等面积划分算法相比较,结果表明算法运行稳定可靠,优化效果明显,相比于等面积划分算法,航线间转移路径总长度下降了 24.86%~47.10%,算法耗时 70~552 s,在路径离线规划优化操作的可接受范围之内,满足无人机路径离线规划优化的算法耗时要求和优化目标。

参考文献 References

- [1] 薛新宇,顾伟,徐阳,等.农用无人飞机法规与标准制定现状分析[J].农业机械学报,2020,51(10):1-10.XUE X Y, GU W, XU Y, et al. Review on current state of agricultural UAS regulations and standards[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(10):1-10(in Chinese with English abstract).
- [2] 赵必权,丁幼春,蔡晓斌,等.基于低空无人机遥感技术的油菜机械直播苗株数识别[J].农业工程学报,2017,33(19):115-123.ZHAO B Q, DING Y C, CAI X B, et al. Seedlings number identification of rape planter based on low altitude unmanned aerial vehicles remote sensing technology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19):115-123(in Chinese with English abstract).
- [3] 曹光乔,李亦白,南风,等.植保无人机飞控系统航线规划研究进展分析[J].农业机械学报,2020,51(8):1-16.CAO G Q, LI Y B, NAN F, et al. Analysis of research progress on flight control system and route planning of plant protection UAV[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(8):1-16(in Chinese with English abstract).
- [4] 黄小毛,徐胡伟,张顺,等.油菜成条飞播装置设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(5):78-87.HUANG X M, XU H W, ZHANG S, et al. Design and experiment of a device for rape-seed strip aerial seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5):78-87(in Chinese with English abstract).
- [5] BABEL L. Coordinated target assignment and UAV path planning with timing constraints[J]. Journal of intelligent & robotic systems, 2019, 94(3/4):857-869.
- [6] BALAMPANIS F, MAZA I, OLLERO A. Coastal areas division and coverage with multiple UAVs for remote sensing[J/OL]. Sensors, 2017, 17(4):808[2021-04-12]. <http://doi.org/10.3390/s17040808>.
- [7] CHANDLER P, RASMUSSEN S, PACHTER M. UAV cooperative path planning[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 14 August 2000 - 17 August 2000, Dever, CO, Reston, Virginia: AIAA, 2000.
- [8] VALENTE J, DEL CERRO J, BARRIENTOS A, et al. Aerial coverage optimization in precision agriculture management: a musical harmony inspired approach[J]. Computers and electronics in agriculture, 2013, 99:153-159.
- [9] 王宇,陈海涛,李海川.基于引力搜索算法的植保无人机三维路径规划方法[J].农业机械学报,2018,49(2):28-33,21.WANG Y, CHEN H T, LI H C. 3D path planning approach based on gravitational search algorithm for sprayer UAV[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(2):28-33, 21(in Chinese with English abstract).
- [10] 黄小毛,张垒, TANG Lie, 等.复杂边界田块旋翼无人机自主作业路径规划[J].农业机械学报,2020,51(3):34-42.HUANG X M, ZHANG L, TANG L, et al. Path planning for autonomous operation of drone in fields with complex boundaries[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(3):34-42(in Chinese with English abstract).
- [11] 黄小毛,唐灿, TANG Lie, 等.含障碍物多田块下旋翼无人机作业返航补给规划研究[J].农业机械学报,2020,51(7):82-90,71.HUANG X M, TANG C, TANG L, et al. Refill and recharge planning for rotor UAV in multiple fields with obstacles[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(7):82-90, 71(in Chinese with English abstract).
- [12] 严炜,龙长江,李善军.基于差分量子退火算法的农用无人机路径规划方法[J].华中农业大学学报,2020,39(1):180-186.YANG W, LONG C J, LI S J. A path planning method for agricultural UAV based on DEQA algorithm[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(1):180-186(in Chinese with English abstract).
- [13] 戴健,许菲,陈琪峰.多无人机协同搜索区域划分与路径规划[J].航空学报,2020,41(z1):146-153.DAI J, XU F, CHEN Q F. Multi-UAV cooperative search on region division and path planning[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2020, 41(z1):146-153(in Chinese with English abstract).
- [14] 阚平,姜兆亮,刘玉浩,等.多植保无人机协同路径规划[J].航空学报,2020,41(4):255-265.KAN P, JIANG Z L, LIU Y H, et al. Cooperative path planning for multi-sprayer-UAVs[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2020, 41(4):255-265(in Chinese with English abstract).

- [15] BARRIENTOS A, COLORADO J, CERRO J D, et al. Aerial remote sensing in agriculture: a practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots[J]. *Journal of field robotics*, 2011, 28(5): 667-689.
- [16] NIGAM N, KROO I. Persistent surveillance using multiple unmanned air vehicles[C]//2008 IEEE Aerospace Conference. March 1-8, 2008, Big Sky, MT, USA. IEEE, 2008: 1-14.
- [17] 徐博, 陈立平, 徐旻, 等. 多作业区域植保无人机航线规划算法[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 75-81. XU B, CHEN L P, XU M, et al. Path planning algorithm for plant protection UAVs in multiple operation areas[J]. *Transactions of the CSAM*, 2017, 48(2): 75-81 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李继宇, 罗慧莹, 朱长威, 等. 基于能量优化的无人机喷施规划组合算法研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 106-115. LI J Y, LUO H Y, ZHU C W, et al. Research and implementation of combination algorithms about UAV spraying planning based on energy optimization[J]. *Transactions of the CSAM*, 2019, 50(10): 106-115 (in Chinese with English abstract).
- [19] PERRON L. Google OR-Tools[CP/OL]. [2021-06-24]. <https://developers.google.com/optimization>.

Path planning algorithm for cooperative operation of multiple agricultural UAVs in multiple fields

TANG Can¹, ZONG Wangyuan^{1,2}, HUANG Xiaomao^{1,2},
LUO Chengming^{1,2}, LI Wencheng^{1,2}, WANG Shaoshuai¹

1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China*

Abstract A complete set of path optimization algorithm solution for cooperative operation of multiple UAVs is proposed to figure out the path planning problem of multiple agricultural UAVs under the condition of multiple fields with obstacles. Taking the minimum transfer path length as the goal of operation optimization, the initial coverage operation route with horizontal heading conditions was calculated based on the polygon scanning and filling algorithm, and the safety boundary intersection test of the dangerous transfer process between routes was carried out. The course of operations of each single field was optimized with “minimum span method” of convex polygon and “step rotation method” of non-convex polygon. The mathematical models for route scheduling and voyage planning were established, and the solution was obtained based on the open source optimization software suite of Google OR-Tools. The operation effects of different route combination scheduling strategies and the effects of operation optimization of the five optimized searching strategy algorithms of Google OR-Tools and the equal area partition algorithm of UAV along the heading direction were compared. The simulation results of four sets of hypothetical and real fields showed that the algorithm effectively achieved multiple cooperative UAVs path planning under various constraints and took 70-552 s. Compared with the equal area partition algorithm, the optimal results for the total length of the transfer path decreased 24.86%-47.10%.

Keywords agricultural UAV; path planning; multiple field; obstacle; multiple machine collaboration; Google OR-Tools

(责任编辑: 陆文昌)