

凸多边形田块下油菜联合直播机组作业路径规划

黄小毛^{1,2} 张 垒¹ 王绍帅¹ 罗承铭^{1,2}

(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: 针对无人农场场景下油菜联合直播机组自动驾驶自主作业需求,提出一套对凸多边形边界田块具有普适性的油菜联合直播作业路径规划算法。在拟定油菜直播作业对路径规划算法基本要求的基础上,将作业区域分成内部方向平行作业区与外围轮廓平行作业区,对应方向平行作业路径和轮廓平行作业路径;进一步将作业路径分为工作路径和非工作路径,对后者包括的行间转移衔接路径、区域衔接路径、拐角衔接路径、进入路径和退出路径等的生成原理进行详细阐述,通过“最小跨度法”得到方向平行路径最优作业方向,通过贪婪算法与 Google OR - Tools 对方向平行路径行调度次序进行排序优化。综合考虑作业路径总长度、算法耗时和重漏面积等指标,针对油菜联合直播机组免少耕和旋耕播种作业,以东方红-LX804 型拖拉机+2BFQ-6 型免耕直播机等机组为对象,对比测试了4个实际典型田块下不同作业参数、地头转弯策略和调度策略下的算法性能。测试结果表明,规划所得路径对应的油菜播种作业面积覆盖率大于等于95.14%,重播率小于等于2.63%,有效工作路径占比大于等于57.39%,算法耗时小于等于8 003 ms,算法稳定高效,满足油菜联合直播作业对路径规划的基本要求。

关键词: 油菜; 联合直播机; 自动驾驶; 路径规划; 无人农场

中图分类号: S252; TP399 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0033-08 OSID: 

Path Planning of Rapeseed Combine Seeder in Field of Convex Boundary

HUANG Xiaomao^{1,2} ZHANG Lei¹ WANG Shaoshuai¹ LUO Chengming^{1,2}

(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: Aiming to automatic guidance operation of the combined direct seeding unit for rapeseed in the scene of unmanned farm, a generally applicable path planning algorithm for rapeseed direct seeding operation in convex polygon boundary field was put forward. Based on the basic requirements of path planning algorithm for rapeseed direct seeding operation, the operation area was divided into internal direction parallel operation area and external contour parallel operation area, which were called direction parallel operation path and contour parallel operation path. The operation path was further divided into working path and non-working path, and the generated principles of the latter, including interline connection path, area connection path, corner connection path, entry path and exit path were introduced in detail. The optimal operation direction of the direction parallel path was obtained by minimum span method, and the operation sequence of the direction parallel path was optimized by greedy algorithm or Google OR - Tools. Considering the complete length of operation path, algorithm time consuming, repeated and missed area, aiming at the no-tillage or rotary tillage seeding operation of the combined direct seeding unit for rapeseed, taking Dongfanghong - LX804 tractor + 2BFQ - 6 no-tillage direct seeder and other units as the object, the performance of algorithm was tested in four convex polygon boundary fields with different operation parameters, ground turning strategies and scheduling strategies. The test results showed that the coverage of rapeseed was more than or equal to 95.14%, the repeat rate was less than or equal to 2.63%, and the percentage of effective working path was more than or equal to 57.39%, the algorithm took time less than or equal to 8 003 ms, which was proved stable and efficient, and satisfied the basic requirements of path planning for rape direct seeding operation.

Key words: rapeseed; combine direct seeder; automatic guidance; path planning; unmanned farming

0 引言

随着农用车辆数字化底盘技术和农机自动驾驶技术的快速发展,油菜作物种植过程的自动化和智能化也开始提上日程^[1-3]。随着无人机技术的成熟,目前油菜飞播、空中植保等作业环节发展迅速,而耕作、播栽、收获等地面机具智能化技术也随无人农场理念兴起而稳步发展。在无人农场模式下,作业机组的自动驾驶自主作业,是在 RTK 高精度定位下,根据当前位置姿态与预设值的偏差不断调整转角、速度等控制量,继而完成对预设全局路径的跟踪并同步实施农机具作业的过程。

作为农机自动驾驶驾驶作业的“使能技术”之一,全局覆盖作业路径规划,不仅是无人农场农机自主作业的先决条件之一,而且路径的好坏还很大程度上决定着机组的作业效率、作业质量和能耗^[4-6]。国外 OKSANEN 等^[7-8]基于多边形的梯形分解提出一种作业路径生成算法。HAMEED 等^[9]对作业方向及行作业的调度方法等进行了系统研究,并对作业过程中的重复面积及时间消耗进行了评估。SPEKKEN 等^[10]从操作时间角度出发提出一套最优路径规划方法。JESUS 等^[11]对有能力的车辆路径调度问题(Capacitated vehicle routing problem, CVRP)进行了相关研究,提出了 Mix-operator 路径优化方法。SEYYEDHASANI 等^[12]采用改进的 C-W 节约算法解决多机并行作业路径规划问题。AMALIA 等^[13]对矩形和非凸多边形田块提出了进化混合邻域搜索(Evolutionary hybrid neighbourhood search, EHNS)路径优化方法。国内相关研究主要集中在机具的自动驾驶跟踪控制上^[14-19],路径规划方面的研究相对较少^[20-22]。

以上路径规划方面的研究,大多以北方大田作物为主,目前还没有针对油菜作物播种作业路径规划的研究报道。本文拟针对无人农场模式下油菜联合直播机组作业过程中常见的凸多边形边界田块,提出一种对凸多边形边界田块具有普适意义的油菜联合直播机组全局覆盖作业路径规划算法。

1 作业路径规划基本原理

1.1 油菜联合直播机组作业特点及路径规划要求

常见的油菜播种机工作方式多以四轮拖拉机牵引为主。工作时,靠拖拉机提供动力,通过提升装置放下机具,牵引前进并通过动力输出轴输出的动力进行旋耕、开种沟、播种、施肥、开排水沟、覆土、镇压等多道作业工序;地头转弯或田间转移时,机具则被提升离开地面。播种机工作幅宽一般大于拖拉机机

体幅宽,但与拖拉机的最小转弯半径之间存在多种尺寸关系,因此在行间转移时存在多种转弯策略。

一条理想的农机作业路径应该能够使机具以最小的代价(机时和农资消耗)对待作业田块所有区域进行无差别覆盖,且对于播种作业来说只覆盖一次。考虑到机组作业过程中地头转弯和大范围转移等“非作业、但必须”的衔接动作和油菜种植所在区域田块的边界特点,实际规划的油菜播种作业路径应尽可能满足以下要求:①有效作业路径(边行走、边作业)按照“先内部、后外围、不重不漏”的原则对作业田块的每个区域进行尽可能无差别的全覆盖。②与机组的作业参数及特性相匹配,尤其转弯或转移等衔接路径(即非工作路径,只行走、不作业)过渡平滑且最小曲率半径大于等于最小转弯半径(静态规划时暂不考虑转弯时方向盘的动态响应问题)。③旋耕联合直播时尽量避免对已完成的排水沟的二次破坏,免耕联合直播时每一行的排水沟尽可能开到地头。④尽可能避免对已作业区域的二次碾压,即转弯等非工作衔接路径的长度越小越好,或有效工作路径在总路径中的占比越大越好。⑤算法运行稳定高效。

1.2 数据定义及算法流程

对于凸多边形边界田块,用多边形的每一条边分别对应实际田块的每一个边界,以手持 GPS 人工打点或 GIS 系统选取作业田块,按逆时针方向依次存储各边界点。用拖拉机几何中心表示机组位置,机组的有效工作路径以虚线的方式表示,衔接转移路径(非工作路径)用实线表示,作业方向与箭头指示方向一致。

以待作业田块边界、机组作业参数为输入,以作业路径为输出,整个算法的流程如图 1 所示。

该算法主要涉及油菜联合直播有效工作路径及其衔接转移路径的规划。有效工作路径包括方向平行路径和轮廓平行路径,算法生成原理涉及多边形扫描线填充算法和偏置填充算法等计算机图形学^[23]知识,本文不再赘述。衔接转移路径是所有有效工作路径之间的过渡路径,包括 6 种基本类型,是实现全过程无人干预的自动作业的必备环节。衔接转移路径在总的路径中的数量占比与有效工作路径占比是互补关系,越低越好,其生成算法是重点。

1.3 旋耕与免少耕直播路径的区别

油菜是旱地作物,开排水沟是长江中下游地区油菜田的基本要求之一。为充分排水,与方向平行路径平行的排水沟尽可能开到地头边界,同时又要兼顾避免重播和边界碰撞,因此在进行内部区域方向平行路径作业时,可通过倒车和延时转弯等方式,对

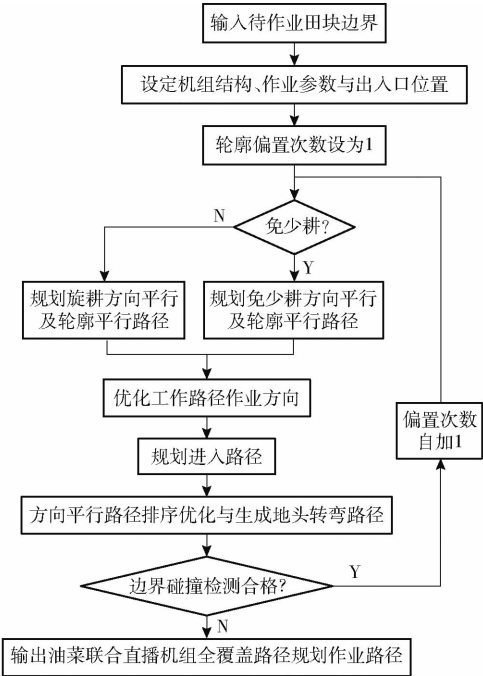


图 1 算法流程图
Fig. 1 Algorithm flowchart

地头转弯区域先只开沟不播种,而在外围区域轮廓平行路径作业时再进行一次交错方向上的开排水沟。

相对于免少耕对土壤破坏较小,旋耕对土壤破坏较大,外围区域轮廓平行路径作业时若采用旋耕会毁掉先前开好的排水沟。因此油菜旋耕直播与免少耕直播工作路径的主要区别体现在开排水沟路径的规划上:旋耕直播机组在进行内部方向平行路径作业时排水沟不超出该区域,免少耕直播时则会尽可能地排水沟开到地头边界处。二者的工作路径如图 2a、2b 所示。对于油菜免少耕联合直播有效工作路径,分为联合直播工作路径和只开排水沟工作路径,而旋耕联合直播作业工作路径只包括联合直播工作路径。机组在联合直播工作路径上作业时同时完成开种沟、播种、施肥、开排水沟等多道工序,而在只开排水沟工作路径上只完成开排水沟作业。

1.4 衔接路径生成原理

1.4.1 行间转移衔接路径

行间转移衔接路径,即地头转弯路径,是指机组

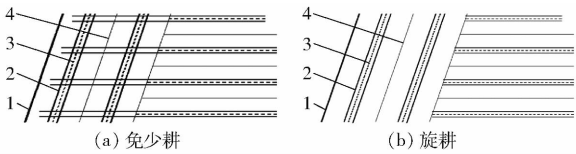


图 2 两种不同耕作方式下工作路径的差异
Fig. 2 Difference of working path between two different tillage methods

1. 田块边界 2. 排水沟 3. 播种路径 4. 作业行分界线

从方向平行路径某一作业行转移到下一方向平行路径作业行时的衔接路径,包含机组的 2~3 次换向过程,累计完成 180°调头转弯。

四轮拖拉机行走装置主要由前桥、导向轮、驱动轮、转向器、转向传动机构、差速器等组成,多为后轮驱动、前轮转向,采用阿克曼转向原理,如图 3 所示。

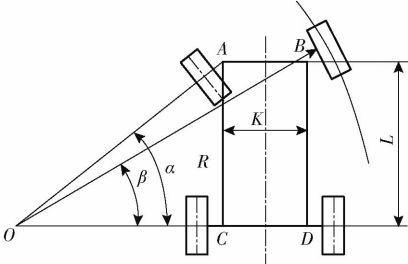


图 3 阿克曼转向原理示意图
Fig. 3 Schematic of Ackerman steering principle

转向过程时,前内轮与前外轮的转角应满足^[24]

$$\cot\beta - \cot\alpha = \frac{K}{L} \tag{1}$$

式中 β ——拖拉机前外轮转角, (°)
 α ——拖拉机前内轮转角, (°)
 K ——内外侧车轮轴距, m
 L ——车辆前后主轴间距, m

在不考虑轮胎打滑的情况下,转向过程中全部车轮绕瞬时中心 O 做圆周滚动,车辆整体相对于瞬时中心做圆周运动。考虑不同行间距离、首次转向方向和倒车形式,存在如图 4 所示 5 种具体转弯策略。

1.4.2 区域衔接路径

机组完成田块内部方向平行区域的联合作业后,继续转入外围轮廓平行区域作业。由方向平行

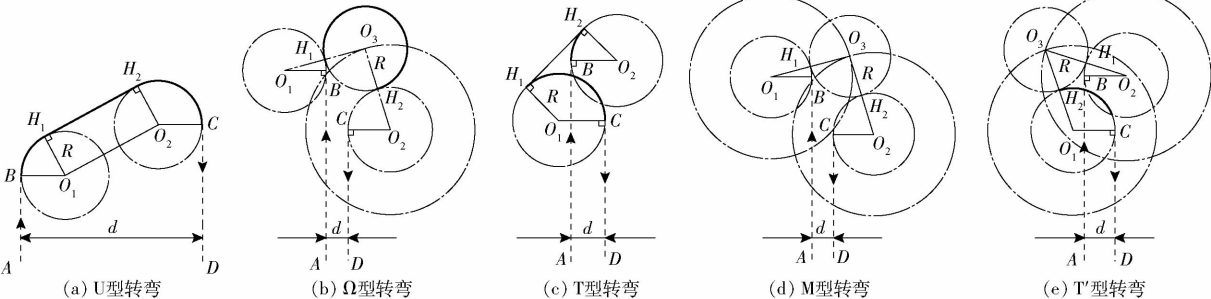


图 4 各种转弯策略及其路径生成原理示意图
Fig. 4 Schematics of different turning strategies and their generation principle

路径过渡到轮廓平行路径的转移路径称为区域衔接路径。机组从方向平行路径上的点 A 转移到轮廓平行路径点 B 的区域转移路径如图 5 所示。以最小转弯半径 R 为半径作圆与方向平行路径、轮廓平行路径分别相切于 H_1 、 H_2 ，可得到劣弧 H_1H_2 。机组先从点 A 直线倒车到点 H_1 ，到达点 H_1 后，机组沿劣弧 H_1H_2 从点 H_1 转移到点 H_2 ，接着从点 H_2 直线倒车到点 B ，完成机组从方向平行路径向轮廓平行路径转移。

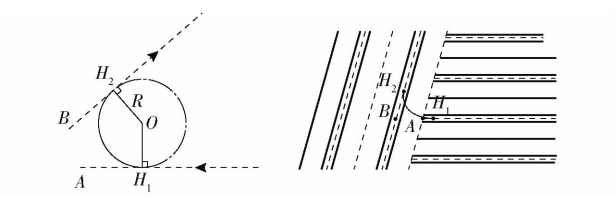


图 5 区域转移路径
Fig. 5 Region transferring path

1.4.3 跨行衔接路径

根据机组作业幅宽将轮廓平行区域划分成若干作业行，对于油菜播种作业来说，为尽可能避免对已作业区域的二次碾压，一般采取由内向外遍历方式完成轮廓平行区域播种作业，这一过程的衔接路径称为跨行衔接路径。

油菜联合直播机组从最内侧轮廓平行路径上点 B 转移到其相邻轮廓平行路径作业行上点 C 的跨行衔接路径如图 6 所示，过点 B 机组作所在轮廓平行路径 l_1 与之距离为最小转弯半径 R 的垂线段 BO_1 ，过点 O_1 做半径为最小转弯半径 R 的圆与直线 l_2 相交于 H_3 ，延长 O_1H_3 到点 O_2 ，使 H_3O_2 等于 R ，过点 O_2 作半径为最小转弯半径 R 的圆，与直线 l_3 相切于点 H_4 ，得到跨行衔接路径。机组首先从点 B 依次沿劣弧 BH_3 、 H_3H_4 前进到点 H_4 ，当机组到达点 H_4 时，机组接着以直线倒车的方式运动到点 C ，完成轮廓平行路径跨行衔接。

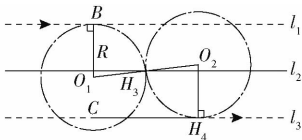


图 6 跨行衔接路径
Fig. 6 Swath crossing connection path

1.4.4 拐角衔接路径

轮廓平行路径呈螺旋式分布，对于相同偏置次数的轮廓平行路径，从轮廓平行路径拐角的一侧以直线运动的方式运动到相邻拐角的一侧，到达拐角后通过一定衔接方式转移到另一条轮廓平行路径，这一衔接过程的路径称为拐角衔接路径。

油菜联合直播机组的拐角衔接过程如图 7 所

示，过点 H_1 作与直线 AH_1 距离为 R 的线段 OH_1 ，过点 O 作圆与直线 AH_1 、 BH_2 分别交于点 H_1 、 H_2 ，得到劣弧 H_1H_2 。机组从点 A 沿线段 AH_1 从点 A 运动到点 H_1 ，接着沿劣弧 H_1H_2 从点 H_1 运动点 H_2 ，到达点 H_2 后沿线段 H_2B ，从点 H_2 运动到点 B ，完成拐角衔接过程。

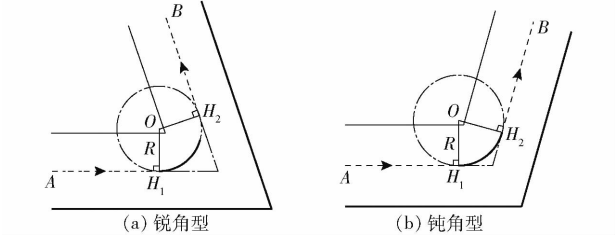


图 7 拐角衔接路径
Fig. 7 Corner connection paths

1.4.5 进入和退出路径

(1) 进入路径

机组从入口位置转移到田块的初始播种位置这一过程的路径称为进入路径，进入路径主要受田块边界形状、入口位置与初始播种位置之间距离等因素的影响。本文提出 3 种不同的进入路径方案，以机组作业安全性为前提，根据路径长短做出相应选择。

直线内切圆式进入路径的原理如图 8a 所示，机组从点 A 先直线前进到点 B ，机组完全进入待作业田块区域，到达点 B 后，根据机组位置与初始播种位置的几何关系得到劣弧 CD ，机组先从点 B 直线前进到点 C ，到达点 C 后沿劣弧 CD 从点 C 运动到点 D ，最后机组从点 D 运动到初始播种位置 E 。

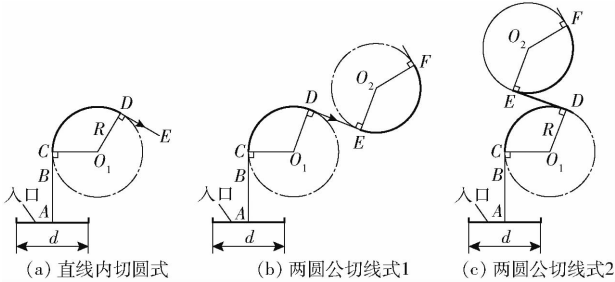


图 8 进入路径
Fig. 8 Entry paths

两圆公切线式进入路径的原理主要基于两圆公切线原理生成，如图 8b、8c 所示。其中两圆公切线式进入路径 1 的运动过程为机组从点 A 直线运动到点 B ，机组完全进入田块，根据机组与初始播种位置的几何关系得到劣弧 CD 、劣弧 EF 。机组先从点 B 直线到点 C ，接着沿劣弧 CD 运动到点 D ，然后从点 D 直线运动到点 E ，最后沿劣弧 EF 运动到初始播种位置，完成机组从入口位置转移到初始播种位置。两圆公切圆式进入路径 2 与两圆公切圆式进入

路径 1 的区别是前者路径 DE 采用直线倒车行驶从点 D 运动到点 E 。

(2)退出路径

当机组作业完田块所有区域时,需要离开田块,从作业完成位置转移到出口位置这一过程的路径称为退出路径。退出路径的生成原理为两圆公切线式进入路径 1、两圆公切线式进入路径 2 原理逆过程,不再赘述。

1.4.6 轮廓平行路径偏置次数求解与边界碰撞检测

轮廓平行路径偏置次数决定了地头转弯空间的大小,足够的地头空间是作业安全的保障,求解时需要保证转弯过程中机具的极限位置始终处于田块内部。对生成的路径进行边界碰撞检测,若越界,则逐渐增大偏置次数再求解,直到出现确保安全的最小偏置次数。若用 l_a 表示拖拉机的长度, l_b 表示拖拉机的工作幅宽,拖拉机斜对角长度 $l_c = \sqrt{l_a^2 + l_b^2}$ 。 m 为田块多边形的边数, n 为地头转弯路径上所有点的个数, i 为地头转弯路径点序号, j 为田块边界序号, l_{ij} 表示地头转弯路径上第 i 个点到第 j 个田块边界的距离,则存在一个最小偏置次数 t 满足: $\forall i \in \{0, 1, \dots, n - 1\}, j \in \{0, 1, \dots, m - 1\}, \exists t: l_{ij}(t) \leq l_c$ 。

表 1 机组信息

Tab.1 Unit information

机组编号	机具	外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	幅宽/mm	最小转弯半径/mm
A	东方红 LX804 型拖拉机	4 350 × 2 170 × 2 740	2 000	4 700
	2BFQ-6 型免耕播种机	2 168 × 2 204 × 1 527		
B	东方红 LX954 型拖拉机	4 315 × 2 100 × 2 900	3 600	5 600
	2BFQ-18 型免耕播种机	2 246 × 4 000 × 1 401		
C	雷沃欧豹 M804-B 型拖拉机	4 130 × 1 795 × 2 675	2 000	4 300
	豪丰 2BFXGF-6 型旋耕播种机	2 100 × 2 360 × 1 340		
D	雷沃欧豹 M1204-X 型拖拉机	4 590 × 2 050 × 2 990	2 500	4 600
	农哈哈 2BFG-18 型旋耕播种机	2 380 × 2 800 × 1 400		

并导出为 KML 文件,算法调用前先经过高斯投影算法进行坐标转换,将 GPS 坐标转换为平面坐标。

2.1 评价指标

除算法耗时外,还需要对所得路径的质量和作业效率进行评价。利用播种覆盖率 ξ_c 和重播率 ξ_d 评估作业质量,利用总行程长度 L 、有效工作路径占比 ζ_c 评估作业效率。有

$$\zeta_c = L_w / L_a \times 100\%$$
 (2)

$$\xi_c = (S_d + S_c) / S_a \times 100\%$$
 (3)

$$\xi_d = (S_{dc} + S_{cc}) / S_a \times 100\%$$
 (4)

式中 L_w ——有效工作路径总长度, m

L_a ——总行程长度, m

S_d ——方向平行区域有效播种面积, m²

S_c ——轮廓平行区域有效播种面积, m²

S_a ——待作业田块总面积, m²

1.5 方向平行路径作业方向和调度排序优化

采用凸多边形最小跨度法^[25]得到方向平行路径的最优作业方向角,计算得到该方向下的方向平行路径后,还需要安排合理的调度次序。将路径端点简化为城市点,该问题转化成用方向平行路径连接属于同一路径城市点、用行间转移衔接路径连接属于同一路径城市点的旅行商(TSP)问题。两条方向平行路径之间采用哪种衔接转弯策略,决定了总的作业效率,主要取决于行间距 d ,在行间距确定后,本文对不同策略分别进行了测试,并采用贪婪算法和 Google OR-Tools 进行求解^[5]。

2 仿真测试

前述全部算法过程在 Sublime Text 3 平台上编码实现,在 Intel Core i7-1065G7 CPU、1.5 GHz 主频、16 GB 内存、Windows 10 操作系统环境下,对典型机组对象,选取不同功率、最小转弯半径 R 的拖拉机以及不同播种工作幅宽 w 的旋耕、免耕播种机具,按照功耗进行配对,形成 4 套机组如表 1 所示。选取不同面积及边数的 4 块典型凸多边形边界实际地块,如图 9 所示,边界数据通过 Google Earth 获取

S_{dc} ——方向平行路径播种面积与轮廓平行路径播种面积之间重复播种面积, m²

S_{cc} ——轮廓平行路径彼此之间重复播种面积, m²

有效工作路径占比与衔接转移路径在总的路径中的数量占比是互补关系,一定程度反映前述衔接转移路径设计的合理性。

播种覆盖区域通过所有有效工作路径线段覆盖的长方形之间布尔运算并集(求和)得到。播种覆盖率与漏播率之间为互补关系。重播区域则包含 2 部分:轮廓平行路径部分,通过相邻有效工作路径线段覆盖长方形之间的布尔运算交集得到;方向平行路径部分,通过所有有效工作路径线段覆盖的长方形与方向平行区域多边形的布尔运算差集得到。

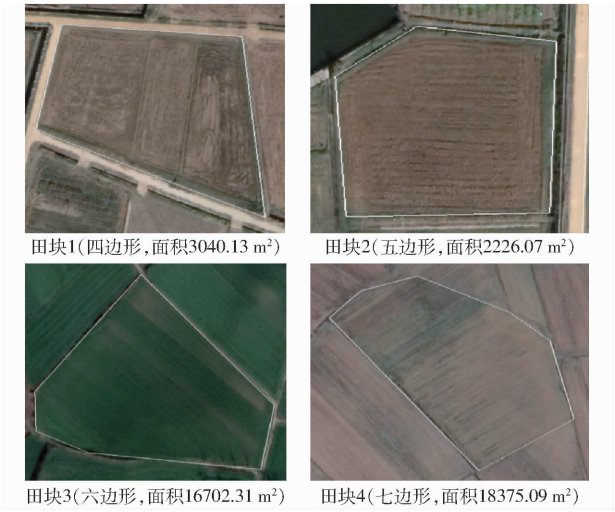


图 9 Google Earth 软件中选取实际田块的截图

Fig. 9 Screenshots of selecting actual fields in Google Earth software

除了路径长度外,总的作业耗时是更为直观的效率评价指标。为此将路径按照不同作业状态的速度大小及方向的差异,分为直线工进、直线移进、直线移退、曲线移进和曲线移退 5 种,分类统计长度,

再除以对应的作业速度,求和并加上各状态之间的切换时间,得到预估的作业时长。

2.2 仿真试验测试结果

以机组 A、C 对小面积田块 1、2 进行测试,以机组 B、D 对大面积田块 3、4 进行测试。作业方向角由最小跨度法得到,方向平行路径的调度由贪婪算法和 OR - Tools 进行对比测试。作业耗时预估时直线行进速度设定为 0.8 m/s,直线移进速度设定为 1.0 m/s,直线移退速度设定为 0.7 m/s,曲线移进速度设定为 0.6 m/s,曲线移退速度设定为 0.5 m/s,不同状态路径间切换时间设定为 2 s。所得的测试结果如表 2 所示,计算示例的部分结果截图如图 10、11 所示。图中,黑色实线为田块边界线,绿色实线为行边界线,蓝色虚线为有效工作路径线,橙色实线为衔接转移路径线,另外排水沟用一组棕色的平行线段表示,黑色、蓝色圆点分别表示方向平行路径、轮廓平行路径中拖拉机车头极限位置,而重漏作业面积示意图中浅绿色区域为油菜种子覆盖区域,深绿色区域表示该区域重播,白色区域表示该区域漏播。

表 2 凸多边形边界田块路径规划算法测试结果

Tab. 2 Test results of path planning algorithm in small convex polygon boundary fields														
田块 编号	机组 编号	方向平行 路径的调 度策略	偏置 次数	作业 方向角/ (°)	总路径 长度/ m	工作 路径 长度/m	有效工作 路径占 比/%	有效播种 面积/ m ²	重播 面积/ m ²	重播 率/ %	算法 耗时/ ms	播种 覆盖 率/%	不同状态 路径间切 换次数	预计 作业 时长/s
1	A	贪婪算法	5	157.19	3 201.56	1 904.10	59.47	2 932.38	42.48	1.45	1 060	96.46	231	4 714.16
		OR - Tools	6	157.19	3 488.40	2 001.86	57.39	2 934.36	57.80	1.97	8 003	96.52	241	5 119.16
	C	贪婪算法	5	157.19	2 454.73	1 507.74	61.42	2 939.84	45.29	1.54	1 056	96.70	231	3 612.42
		OR - Tools	5	157.19	2 477.12	1 507.74	60.87	2 939.84	45.29	1.54	6 978	96.70	232	3 641.41
2	A	贪婪算法	4	178.69	2 276.68	1 334.24	58.60	2 117.80	32.75	1.55	963	95.14	221	3 526.55
		OR - Tools	4	178.69	2 267.76	1 334.24	58.84	2 117.80	32.75	1.55	5 877	95.14	222	3 535.16
	C	贪婪算法	4	178.69	1 867.68	1 092.31	58.48	2 126.64	36.11	1.70	975	95.53	221	2 888.31
		OR - Tools	4	178.69	1 858.09	1 092.31	58.79	2 126.64	36.11	1.70	5 975	95.53	222	2 896.55
3	B	贪婪算法	3	172.46	7 500.36	5 405.96	72.08	16 437.65	271.78	1.65	1 434	98.42	320	10 488.58
		OR - Tools	4	172.46	8 379.85	5 820.33	69.46	16 442.48	388.73	2.36	6 400	98.44	340	11 784.80
	D	贪婪算法	4	172.46	8 764.40	6 685.02	76.27	16 406.29	172.16	1.05	2 040	98.23	458	11 775.29
		OR - Tools	4	172.46	8 894.25	6 685.02	75.16	16 406.29	172.16	1.05	6 786	98.23	458	11 799.48
4	B	贪婪算法	3	135.11	7 979.71	5 889.55	73.81	18 104.77	328.01	1.81	1 377	98.53	307	11 018.82
		OR - Tools	4	135.11	8 917.63	6 335.11	71.04	18 106.92	476.84	2.63	6 450	98.54	331	12 373.60
	D	贪婪算法	4	135.11	9 179.65	7 370.54	80.29	18 072.17	206.23	1.14	1 995	98.35	429	12 477.62
		OR - Tools	4	135.11	9 114.78	7 370.54	80.86	18 072.17	206.23	1.14	6 721	98.35	429	12 441.02

3 讨论

通过以上对凸多边形边界田块下油菜联合直播机组仿真计算实例可以看出,该算法对于典型凸多边形田块具有较好的适应性,能解决凸多边形边界田块油菜联合直播机组作业路径规划问题。

对于小面积田块,播种覆盖率为 95.14% ~ 96.70%,而对于大面积田块,播种覆盖率为 98.23% ~ 98.54%,说明小面积田块的漏播面积更为明显。主要原因是相对于一定的机组物理参数而言,小面积田块中,机组无法遍历的“死区”更多,漏播区域更大。

重播导致种子、化肥和燃油等的浪费,算例中

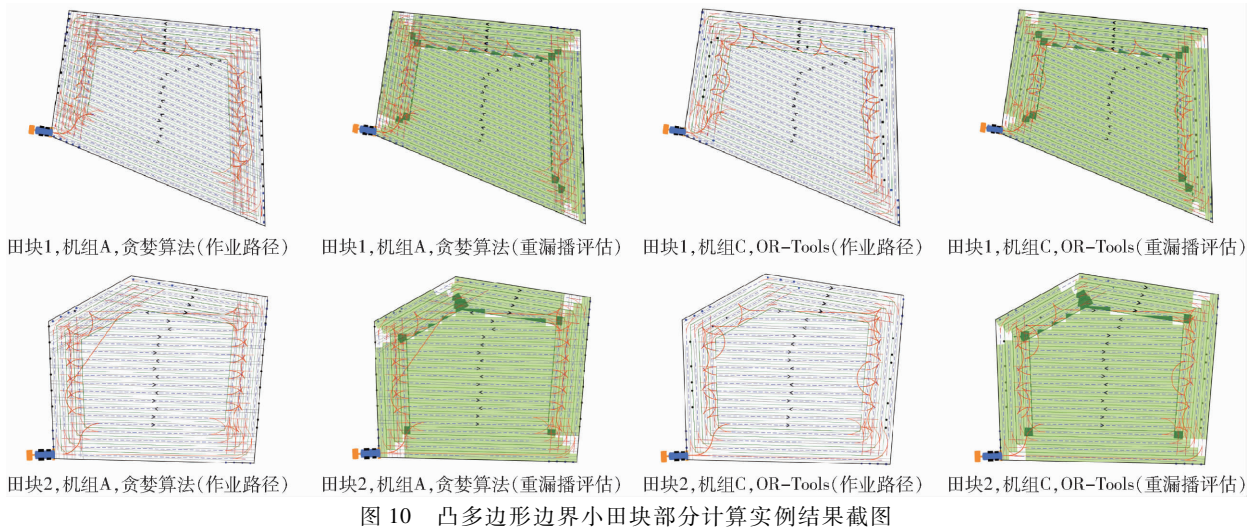


Fig. 10 Screenshots of some calculation example results in small convex polygon boundary fields

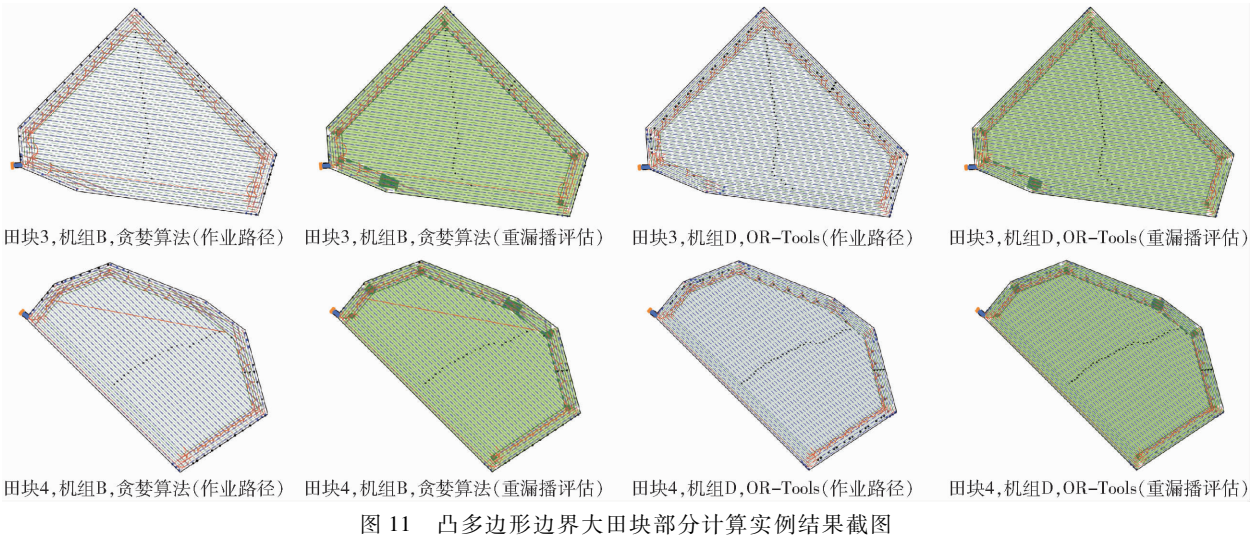


Fig. 11 Screenshots of some calculation example results in large convex polygon boundary fields

小面积田块重播率为 1.45% ~ 1.97%, 大面积田块重播率为 1.05% ~ 2.63%, 且田块边界越复杂、偏置次数越多, 则重播率相对越大。分析其原因, 田块形状越不规则, 机组在方向平行路径与轮廓平行路径播种重叠次数越多, 重播区域越大; 偏置次数增加, 轮廓平行路径中拐角衔接次数随之增多, 机组在拐角衔接区域播种重叠次数增多, 相较于区域划分导致的重播区域减小, 田块总体重播区域增大, 间接说明方向平行区域设置的必要性。

从作业效率的角度分析, 对于小面积田块, 有效工作路径占比为 57.39% ~ 61.42%, 不同状态路径间切换 221 ~ 241 次, 预计作业时长 2 888.31 ~ 5 119.16 s, 而对于大面积田块, 有效工作路径占比为 69.46% ~ 80.86%, 不同状态路径间切换 307 ~ 458 次, 预计作业时长 10 488.58 ~ 12 477.62 s, 且偏置次数越多, 则有效工作路径占比相对越小、不同状态路径间切换次数相对越多、预计作业时长相对越久。分析其原因, 偏置次数增加, 方向平行区

域有效工作路径随之减小, 轮廓平行区域有效工作路径虽然增加, 但跨行衔接路径、拐角衔接路径的增加比例超过轮廓平行区域有效工作路径增加比例, 有效工作路径占比随之减小; 由于拐角衔接路径衔接次数与多边形田块顶点数成比例增加, 跨行衔接路径衔接次数也随偏置次数增加成比例增加, 相较于行间转移衔接路径和方向平行路径之间的衔接次数减少来说, 总体上不同状态路径间切换次数增加; 与此同时, 拐角衔接与跨行衔接过程曲线转移过程较多, 故机组预计作业时长增加。

对于同一田块下的同一机组, OR-Tools 虽然在部分情况下有效工作路径占比、预计作业时长优于贪婪算法, 但提升幅度不大, 而多数情况下贪婪算法的优化性能更优, 且算法耗时小得多, 因此更值得选用。此外, 总的算法耗时 963 ~ 8 003 ms, 多次测试结果说明所设计的算法高效、稳定。

4 结 论

(1) 针对无人农场油菜联合机组全覆盖路径规划问题,根据联合播种机作业特点的不同,根据免耕播种和旋转播种的差异,提出两种不同的路径规划算法,通过仿真试验验证该算法高效、可靠、稳定。

(2) 对实际机组进行田块仿真测试结果表明,油菜联合直播机组的播种覆盖率 95.14% ~ 98.54%,重播率 1.05% ~ 2.63%,有效工作路径占比 57.39% ~ 80.86%,不同状态路径间切换 221 ~ 458 次,预计作业时长 2 888.31 ~ 12 477.62 s,算法耗时 963 ~ 8 003 ms,满足农业生产要求。

参 考 文 献

- [1] 王伟韦,陈黎卿,杨洋,等. 农业机械底盘技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2021,52(8):1-15.
WANG Weiwei, CHEN Liqing, YANG Yang, et al. Development and prospect of agricultural machinery chassis technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8):1-15. (in Chinese)
- [2] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1):1-18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1):1-18. (in Chinese)
- [3] 李道亮,李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报,2020,51(7):1-12.
LI Daoliang, LI Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7):1-12. (in Chinese)
- [4] 黄小毛,付正坤,丁幼春,等. 矩形边界条件下农机作业的方向平行路径排序优化[J]. 华中农业大学学报,2014, 33(4):130-136.
HUANG Xiaomao, FU Zhengkun, DING Youchun, et al. Optimization of directional parallel path sorting of agricultural machinery operation under rectangular boundary conditions[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(4):130-136. (in Chinese)
- [5] 罗承铭,熊陈文,黄小毛,等. 四边形田块下油菜联合收获机全覆盖作业路径规划算法[J]. 农业工程学报,2021,37(9):140-148.
LUO Chengming, XIONG Chenwen, HUANG Xiaomao, et al. Coverage operation path planning algorithms for the rape combine harvester in quadrilateral fields[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9):140-148. (in Chinese)
- [6] 周俊,何永强. 农业机械导航路径规划研究进展[J]. 农业机械学报,2021,52(9):1-14.
ZHOU Jun, HE Yongqiang. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9):1-14. (in Chinese)
- [7] OKSANEN T, VISALA A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(8):651-668.
- [8] OKSANEN T, VISALA A. Path planning algorithms for agricultural machines[J]. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, 2007, 9(7):1-19.
- [9] HAMEED I A, BOCHTIS D D, SORENSEN C G. Driving angle and track sequence optimization for operational path planning using genetic algorithms[J]. Journal of Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(6):1077-1086.
- [10] SPEKKEN M, DE BRUIN S. Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time[J]. Precision Agriculture, 2013, 14(2):183-197.
- [11] JESUS C M, GONZALO P, ANGELA R. Mix-opt: a new route operator for optimal coverage path planning for a fleet in an agricultural environment[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 54:364-378.
- [12] SEYYEDHASANI H, DVORAK J S. Using the vehicle routing problem to reduce field completion times with multiple machines [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 134:142-150.
- [13] AMALIA U, TORSTEN R, AMIR H A. Optimisation of agricultural routing planning in field logistics with evolutionary hybrid neighbourhood search[J]. Biosystems Engineering, 2019, 184:166-180.
- [14] 刁智华,赵明珍,宋寅卯,等. 基于机器视觉的玉米精准施药系统作物行识别算法及系统实现[J]. 农业工程学报,2015, 31(7):47-52.
DIAO Zhihua, ZHAO Mingzhen, SONG Yinmao, et al. Crop line recognition algorithm and realization in precision pesticide system based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7):47-52. (in Chinese)
- [15] 胡炼,罗锡文,曾山,等. 基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10):12-18.
- [16] 关卓怀,陈科尹,丁幼春,等. 水稻收获作业视觉导航路径提取方法[J]. 农业机械学报,2020,51(1):19-28.
GUAN Zhuohuai, CHEN Keyin, DING Youchun, et al. Visual navigation path extraction method in rice harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1):19-28. (in Chinese)
- [17] 田光兆,顾宝兴, IRSHAD Ali Mari,等. 基于三目视觉的自主导航拖拉机行驶轨迹预测方法及试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19):48-53.
TIAN Guangzhao, GU Baoxing, IRSHAD A M, et al. Traveling trajectory prediction method and experiment of autonomous navigation tractor based on trinocular vision[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19):48-53. (in Chinese)

[21] 沈成康. 断裂力学[M]. 上海:同济大学出版社, 1996.

[22] LIU M Z, LI C H, ZHANG Y B, et al. Semi-theoretical analyses on mechanical performance of flexible-belt shearline extrusion walnut shell crushing[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2016, 32(4): 459 – 467.

[23] 杨耀乾. 薄壳理论[M]. 北京: 中国铁路出版社, 1981.

[24] 孙桓, 陈作模, 葛文杰. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.

[25] 周福君, 王文明, 李小利, 等. 凸轮摇杆式摆动型玉米株间除草装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 77 – 85.

ZHOU Fujun, WANG Wenming, LI Xiaoli, et al. Design and experiment of cam rocker swing intra-row weeding device for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 77 – 85. (in Chinese)

[26] 张彦彬, 刘洋, 刘明政, 等. 核桃剥壳取仁机的设计与实验研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(4): 132 – 136.

ZHANG Yanbin, LIU Yang, LIU Mingzheng, et al. Design and experimental study of a walnut decorticating and kernel taking out machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(4): 132 – 136. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 40 页)

[18] 刘进一, 杜岳峰, 张硕, 等. 基于 GNSS/MIMU/DR 的农业机械组合导航定位方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 1 – 7.

LIU Jinyi, DU Yuefeng, ZHANG Shuo, et al. Automatic navigation method for agricultural machinery based on GNSS/MIMU/DR information fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 1 – 7. (in Chinese)

[19] 刘娅. 基于可视图法的避障路径生成及优化[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.

LIU Ya. Path generation and optimization of obstacle avoidance based on visibility graph[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

[20] 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.

MENG Zhijun, LIU Hui, WANG Hua, et al. Optimization method of field operation machinery path[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 147 – 152. (in Chinese)

[21] 王建波, 赵玉芹, 朱晨辉, 等. 自动导航拖拉机田间作业路径规划与应用试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 242 – 245.

WANG Jianbo, ZHAO Yuqin, ZHU Chenhui, et al. Field-work path planning for tractor with automatic navigation and practical application[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 242 – 245. (in Chinese)

[22] 朱亚坤, 寇子明, 李俊飞. 拖拉机方向平行作业转弯路径规划研究[J]. 机械设计与制造, 2020(3): 110 – 113.

ZHU Yakun, KOU Ziming, LI Junfei. Research on turning path of parallel operation of tractor[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(3): 110 – 113. (in Chinese)

[23] 常明, 纪俊文. 计算机图形学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.

[24] 黄琦. 履带式无人车辆的路径规划方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.

HUANG Qi. Research on path planning method for tracked unmanned vehicles[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)

[25] LI Y, CHEN H, MENG J E, et al. Coverage path planning for UAVs based on enhanced exact cellular decomposition method[J]. Mechatronics, 2011, 21(5): 876 – 885.