

四边形田块下油菜联合收获机全覆盖作业路径规划算法

罗承铭^{1,2}, 熊陈文¹, 黄小毛^{1,2*}, 丁幼春^{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: 为解决无人农场模式下油菜联合收获作业过程中自主导航作业路径自动规划及优化问题, 该研究提出了两套完整的针对任意四边形边界田块的油菜联合收获全覆盖作业路径规划算法。采用“理论分析-算法设计及程序编码-算例测试与仿真评估”的技术路线及方法, 首先分析油菜联合收获机的作业特点与机具特性, 拟定油菜联合收获无人化作业过程对路径规划工作的基本要求, 再通过等距偏置处理和扫描线填充算法生成全覆盖作业路径, 并采用 OR-Tools 软件对方向平行路径进行调度优化。通过 4 块典型实际田块进行仿真计算和测试, 结果表明, 算法耗时在 0.17~4.73 s 之间, 混合路径相对于目前生产中广泛使用的环形作业路径, 在未经调度优化时, 倒车次数减少 36.36%~40.00%; 混合路径中, 行调度优化后倒车次数相对于未调度优化时减少 33.33%~60.87%, 非作业路径长度减少 7.20%~20.23%。该研究为长江中下游区域稻油轮作无人农场中油菜无人化联合收获提供了作业路径规划方面的理论与技术支撑。

关键词: 农业机械; 收获; 算法; 油菜; 路径规划; 调度优化; 无人农场

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.016

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-09-0140-09

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.016 http://www.tcsae.org

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 140-148. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.016 http://www.tcsae.org

0 引言

随着城镇化进程的不断推进, 中国农村劳动力老龄化与短缺问题逐渐凸显, “机器换人”的需求日益增加。近年来随着农机自动驾驶技术和农用车辆底盘数字化驱动技术的快速发展, 智能化的农业装备被广泛应用于农业生产的各个环节, 无人农场生产模式正迅速地被广泛接受并进行各种试验示范^[1-3]。作业路径是车辆自动驾驶作业跟踪的依据, 作业路径及调度策略一定程度上决定着具体作业条件下的机具、农资消耗总量和利用率。

对比传统农业车辆在作业过程中通过驾驶员主观判断来规划选择作业路径的方式, 通过计算机规划算法自动规划路径能够显著提高农机作业效率和质量、节约能源消耗^[4]。Palmer 等^[5]利用车载 GPS 记录的数据, 通过事后分析传统喷雾机作业轨迹发现, 作业重叠(13%~27%)和遗漏(0.03%~1.56%)现象严重, 而通过提出的路径规划算法, 作业距离减少 16%, 作业消耗减少 10%。Bochtis 等^[6]通过不同形状田块、不同作业参数的 288 组实例对比研究发现, 经过算法优化获得的作业调度方案

比传统的逐行调度方案在非有效作业距离上平均降幅达到 58.65%, 而在地头转弯空间上则平均节约了 19.23%。

自动驾驶车辆跟踪的目标路径经历了基于机器视觉目标检测识别在线规划^[7]、A-B 点示教、全过程示教和全局离线事前规划等几个阶段。Conesa-Muñoz 等^[8]针对田间精准除草问题, 以路径总长度、油箱容量和除草剂补给等为优化目标, 考虑农机不同的行进速度与转弯半径, 建立多机协同作业路径规划方法。Seyyedhasani 等^[9]为优化多机协同作业, 提出了一种能够动态、实时更新车辆路径的全覆盖路径规划算法。Hameed^[10]通过对二维与三维田块进行分析, 设计了一种多目标优化的路径规划算法, 可减少 10%~15%的作业时间。Plessen^[11]针对大田植保作业时喷雾机容量较小的问题, 提出了基于多次补给作业的区域覆盖路径规划方法。Utamima 等^[12]以最短路径为优化目标, 在农机路径规划中提出了进化混合邻域搜索算法, 有效缩短了农机的作业总长度。Nilsson 等^[13]以田块全覆盖为主要目标, 考虑路径长度、作业时间和土壤压实等次要目标, 基于人工蜂群算法建立农机路径规划方法。国内对于农机路径规划研究起步较晚, 孟志军等^[14]针对凸多边形田块, 提出了基于不同的路径优化目标, 通过计算最优作业角度生成作业路径的方法。刘刚等^[15]提出了以农田地势高程分布特征为先决条件, 以无效作业状态、转向操作和重复行走距离最少为优化目标的农机全覆盖路径规划方法。

综上, 现有研究大多针对轮式拖拉机或收获机展开, 针对履带式油菜联合收获机的研究较少, 更鲜有考虑油菜联合收获机的分禾竖割刀对作业路径的影响。鉴于此,

收稿日期: 2020-11-25 修订日期: 2021-01-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31771683); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2662020GXP001, 2662019QD001)

作者简介: 罗承铭, 博士, 讲师, 研究方向为车辆导航与控制、智能农业装备与系统。Email: chmluo@mail.hzau.edu.cn

*通信作者: 黄小毛, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为农机作业路径智能规划及应用(无人农场、飞播、创意景观农业机械化)。

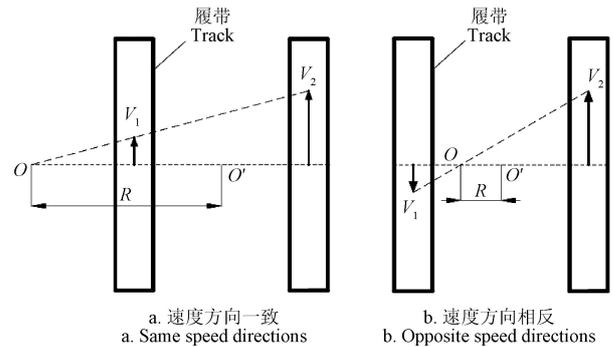
Email: huangxiaomao@mail.hzau.edu.cn

本研究通过分析长江中下游稻油水旱轮作区油菜作物联合收获过程的作业特点，以最小漏收面积为前提、最短作业总长度为优化目标，针对四边形这一最为常见的田块边界类型条件下的油菜联合收获作业路径问题，分别为单侧竖割刀和双侧竖割刀的油菜联合收获机，提出传统环形路径（轮廓平行路径）和混合路径（先轮廓平行路径、后方向平行路径）的全覆盖作业路径规划算法，以期为长江中下游稻油轮作无人农场中油菜无人化联合收获提供作业路径规划方面的理论与技术支撑。

1 油菜联合收获过程的作业特点及路径要求

中国南方地区农田耕地面积相对较小且分散，尤其在长江中下游稻油水旱轮作区，田块之间的边界界限十分明显，一般都伴随着田埂、沟渠、坡岸等不可跨越的障碍物。因此油菜联合收获机作业时，除了出入口外（有时连出入口也没有，而需借助专用爬梯），田块的边界均为不可跨越，这是长江中下游区域油菜联合收获作业过程的第一个特点。第二，油菜作物植株分叉较多，机械收获时，为减少割台损失，需要在割台侧边加装竖式割刀进行主动分禾^[16-17]，有双侧竖割刀和单侧（左或右）竖割刀两种形式。其中双侧竖割刀对收获次序没有要求，而单侧竖割刀则需要按照一定的次序进行收获作业。

油菜为旱地作物，因此南方油菜田内部均设有有一定数量的排水沟，为保证机器良好的通过性能，油菜联合收获机一般采用履带式而非轮式底盘。履带式油菜联合收获机通常以差速方式进行转向^[18]，利用两侧履带卷绕速度大小或方向上的不同，使机器完成转向和转弯过程。若不考虑土壤地表造成的滑移滑转现象，履带式车辆转向原理按照两侧履带速度方向是否一致可分成两种情形（图1）。当两侧履带速度方向相同时，若速度大小相等（ $V_1=V_2$ ）机器会直线前行，而若一侧速度减小且两侧速度比值 k 保持不变（即 $k=|V_2|/|V_1|$ 为定值），则机器会向速度值小的一侧转向，此时机器作回转运动，回转中心 O 落在机器外部且物理中心 O' 绕回转中心 O 作圆周运动，转弯半径一般大于机器宽度的一半（图1a）。当速度方向相反且比值 k 不变时，机器原地回转，回转中心 O 落在机器履带中心和物理中心 O' 之间，即 O' 绕 O 作圆周运动，此时转弯半径一般小于机器宽度的一半（图1b）。当 $V_1=-V_2$ 时， O' 、 O 重合，转弯半径为 $R=0$ ，为原地逆差式转向；当 $V_1=0$ 时，图1中两种情形归为一种，为单侧制动式转向。两种情形下，机器的瞬时回转中心 O 的位置始终保持不变，因此回转中心周围土壤会遭到严重不均匀挤压和破坏。实际操作中，除转弯空间受限时采用原地回转式转弯外，一般多用变速动态式转弯，即边行进、边转弯，此时机器瞬时回转中心的位置和转弯半径的大小会随行进量和速度比值的变化而变化。此外，转弯半径还与履带的滑转率（%）、滑移率（%）等因素相关，实际转弯半径相对于理论转弯半径的修正系数在 1.737~2.947 之间变化^[19]。为简化计算过程，算法设计时假设转弯半径恒定不变，但会取多组不同数值进行验证。



注： O' 为车体的物理中心； O 为车体理论转向中心； V_1 、 V_2 为两侧履带的速度， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； R 为油菜联合收获机的转弯半径， m 。下同。

Note: O' is the vehicle's physical center; O is the vehicle's theoretical steering center; V_1 and V_2 are the speeds of the two sides of the crawler, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; R is the turning radius of the rape combine harvester, m . The same below.

图1 履带式车辆转向原理

Fig.1 Steering principle of a tracked vehicle

综上，概括长江中下游稻油轮作区油菜联合收获自动化作业过程对所规划作业路径的要求为：

1) 遵循以不碾压未收获作物且与田块的刚性边界相适应（机器在田间移动时尤其是地头转弯或转移时不可触碰边界）的总原则，一般执行“先外围、后内部”的田块遍历覆盖总策略，须先采用轮廓平行路径进行作业以腾出足够的地头转弯空间。

2) 收获的具体次序要与油菜联合收获机割台上竖割刀的形式相适应：左侧竖割刀的油菜联合收获机，只能相对于田块中心沿逆时针方式作业；右侧竖割刀的油菜联合收获机，只能相对于田块中心沿顺时针方式作业。双侧竖割刀的油菜联合收获机则没有限制。

3) 以收获作业路径全覆盖为总前提，以油菜联合收获机最小能耗和最少作业时间为优化总目标，即在基础的有效收获作业路径和无作业的转移衔接路径生成时尽可能使油菜联合收获机的漏收面积最小、总的作业路径最短、转弯次数最少、倒车次数最少。

2 算法基本原理

2.1 田块边界数据定义及算法流程

以多边形表示田块边界，田块边界的顶点可通过人工手持 GPS 实地打点或地理信息系统（Geographic Information System, GIS）中鼠标选取，经过通用横轴墨卡托（Universal Transverse Mercator, UTM）投影算法^[20]进行坐标转换，将 GPS 坐标数据转化为平面坐标数据，按逆时针方向依次存储在多边形数组中。

以多边形田块边界信息、田块出入口位置和油菜联合收获机的基本参数为输入。算法执行时，首先通过等距偏置处理生成轮廓平行路径，当油菜联合收获机为单侧竖割刀时，生成由轮廓平行路径为主要作业路径的环形路径；当油菜联合收获机具有双侧竖割刀时，则需要再经过多边形扫描线填充算法处理，生成由轮廓平行路径和方向平行路径为主要作业路径的混合路径。算法流程如图2所示。

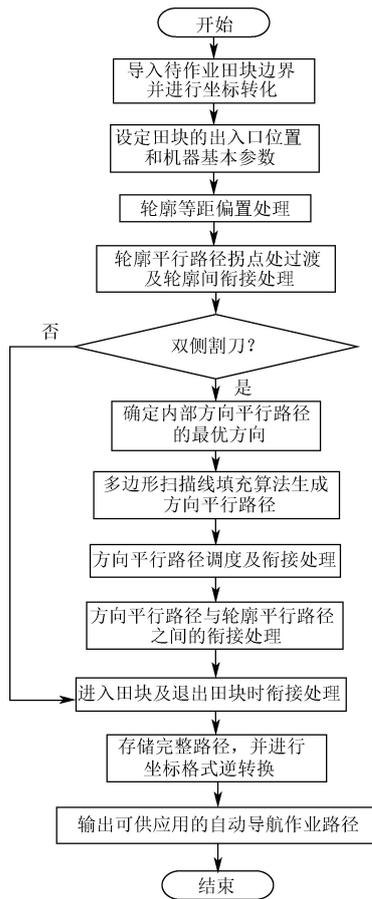
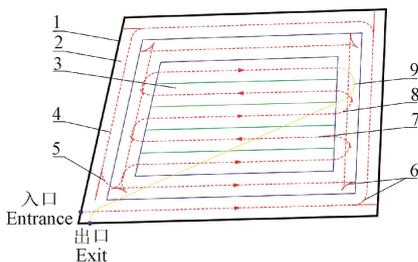


图2 油菜联合收获机作业路径规划算法流程图

Fig.2 Flow chart of operation path planning algorithm for rape combine harvester

在混合路径中，油菜联合收获机由入口位置开始作业，先按照轮廓平行路径及其衔接路径完成田块外围区域收割，形成足够的地头转弯空间，再按照方向平行路径及其衔接路径继续作业，直至完成整个田块的收割任务，如图3所示。



1.田块 2.轮廓平行作业区域 3.方向平行作业区域 4.轮廓平行路径 5.环间衔接路径 6.环上拐角衔接路径 7.方向平行路径 8.方向平行衔接路径 9.退出路径
1.Field 2.Working area for parallel contours 3.Working area for parallel directions 4.Path of parallel contours 5.Linking path between rings 6.Connection path at corners 7.Path of parallel directions 8.Connection path for parallel directions 9.Exit path
注：虚线表示前行路径，实线表示倒车路径，箭头表示路径方向；图中为混合路径，针对双侧竖割刀的油菜联合收获机。
Note: The dotted line represents the forward path, the solid line represents the reverse path, and the arrow represents the path direction; the picture shows a mixed path, aiming at a rape combine harvester with double-sided vertical cutters.

图3 混合路径示意图

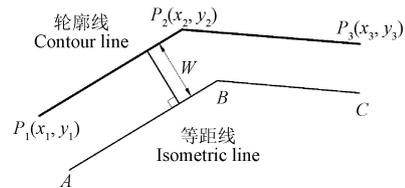
Fig.3 Schematic diagram of mixed path

2.2 多边形等距偏置处理

多边形等距偏置算法^[21]是轮廓平行路径的基础算法，以油菜联合收获机的作业幅宽为偏置距离，将待作业田块的边界轮廓线逐步向内偏置，即可获得一组等距多边形。对于凸多边形而言，其等距多边形可以通过解析法准确求解获得，且不会随着偏置次数的增加而出现“退化现象”（多边形顶点减少或多边形个数增加）^[21]。对任意相邻的两边界轮廓线 P_1P_2 、 P_2P_3 ，利用平行线定理可得出等距线 AB 、 BC 所在直线的斜截式方程，如式（1）所示，解方程即可得到顶点 P_2 偏置后对应的 B 点坐标（图4）。以此类推，求出其他各顶点偏置后的坐标，即可得到偏置后的等距多边形。

$$\begin{cases} y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}x + \frac{x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2 + W \cdot l_{P_1P_2}}{x_2 - x_1} \\ y = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}x + \frac{x_3 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_3 + W \cdot l_{P_2P_3}}{x_3 - x_2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 x_1 、 y_1 分别表示 P_1 的横坐标、纵坐标， m ； x_2 、 y_2 分别表示 P_2 的横坐标、纵坐标， m ； W 为油菜联合收获机的作业幅宽， m ； $l_{P_1P_2}$ 、 $l_{P_2P_3}$ 为边界线段 P_1P_2 、 P_2P_3 的长度， m 。



注： W 为油菜联合收获机的作业幅宽， m ； P_1P_2 和 P_2P_3 为田块边界轮廓线； AB 和 BC 为偏置后的等距线。
Note: W is the working width of the rape combine harvester, m ； P_1P_2 and P_2P_3 are the contour lines； AB and BC are the isometric lines with the offset.

图4 多边形轮廓线偏置示意图

Fig.4 Schematic diagram of polygon contour offsetting

若田块内部区域的作业路径以方向平行路径为主，则需要先通过轮廓平行路径收获边界附近区域来为方向平行路径的行间调度腾出足够的地头转弯空间。该区域空间的大小取决于实际操作时的转弯类型和机器的物理参数，保证机器顺畅转弯并避免在转弯过程中触碰到田块边界上的潜在障碍物。通过大量测试分析，本研究拟定经验公式来计算实际偏置次数，如式（2）所示。

$$m = \left\lceil \frac{\left(R + \frac{B}{2} + L_s\right)}{W} \right\rceil \quad (2)$$

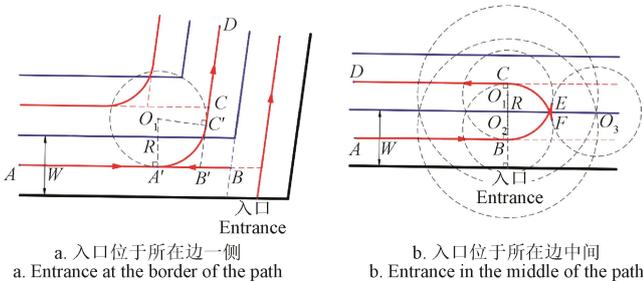
式中 m 为偏置次数； $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整； R 为油菜联合收获机的转弯半径， m ； B 为油菜联合收获机的车身宽度， m ； L_s 为安全距离，根据油菜联合收获机的导航精度进行取值， m 。

2.3 轮廓平行路径及其衔接路径

按照多边形等距偏置算法，将田块的轮廓边界依次偏置处理 m 次，偏移距离除第一次偏置为 $W/2$ 外，后续偏置时的偏移距离均在前一次基础上加 W ，即可得到初始的轮廓平行路径环组。该路径环组存在 2 个问题

需要进一步进行平滑过渡处理：1) 各环之间彼此孤立；2) 每环为一组首尾相连的线段，各相邻线段间夹角小于 180° 。为满足机器行驶要求，需分别进行环间衔接处理和环上拐角处理，获得环间衔接路径和环上拐角衔接路径。

对于轮廓平行路径的环间衔接，根据田块入口相对于所在边位置的不同，又分为两种情况：1) 刚好位于所在边一侧；2) 处于所在边中间。分别采取两种不同的处理策略，以尽可能获得最优的路径，如图 5 所示。对于进入点刚好位于所在边一侧且与单侧竖割刀方位属性一致时（左侧竖割刀，逆时针收割，对应所在边右侧；右侧竖割刀，顺时针收割，对应所在边左侧），采用的衔接策略如图 5a 所示。算法设计时，取当前环的最后一一直线段 AB 和相邻下一环形路径的第一一直线段 CD ，反向延长线段 CD ，交线段 AB 于 B' 点，对 $\angle AB'C$ 进行半径为 R 的圆角处理，垂足分别为 A' 和 C' 。按照“ AB 直线前进， BA' 直线倒车， $A'C'$ 圆弧转弯， $C'D$ 直线前进”的路径完成衔接。当进入点位于非侧边位置或与竖割刀方位属性不一致时，采用的衔接策略如图 5b 所示。算法设计时，作入口所在轮廓线的垂线分别交线段 AB 、线段 CD 于 B 点、 C 点。过 B 点以 O_1 为圆心做半径为 R 的圆，同时以 O_1 为圆心做半径为 $2R$ 的圆，对 C 点同样处理，圆心位置为 O_2 ，其中两个半径为 $2R$ 的圆交于 O_3 点，并以 O_3 为圆心做半径为 R 的圆，与前述两个半径为 R 的圆分别相切于 E 、 F 点，此时按照“ AB 直线前进， BE 圆弧转弯， EF 圆弧倒车， FC 圆弧转弯， CD 直线前行”的路径完成衔接。



注： O_1 、 O_2 和 O_3 表示辅助圆心；黑色实线表示田块边界，红色实线表示路径线，蓝色实线表示路径的边界线；箭头表示路径方向。下同。
 Note: O_1 , O_2 and O_3 represent the centers of the auxiliary circles; the solid black line represents the boundary of the field, the solid red line represents the path line, and the solid blue line represents the boundary line of the path; arrows represent the direction of the path. The same below.

图 5 轮廓平行路径环间衔接策略
 Fig.5 Connection strategies between rings of contour parallel paths

对于轮廓平行路径的环上拐角衔接，同样存在两种不同的情况及处理策略。对于最外环而言，因为田块边界除入口外多为不可触碰和跨越的“刚性边界”，采用“ AB 直线前进， BA' 直线倒车， $A'C'$ 圆弧转弯， $C'D$ 直线前进”的衔接路径如图 6a 所示。对于其它非最外环路径而言，因最外环的收割作业而腾挪出一定的转弯空间，采用“ AB 直线前进， BE 圆弧倒车， EC 圆弧转弯， $C'D$ 直线前进”的衔接路径如图 6b 所示。

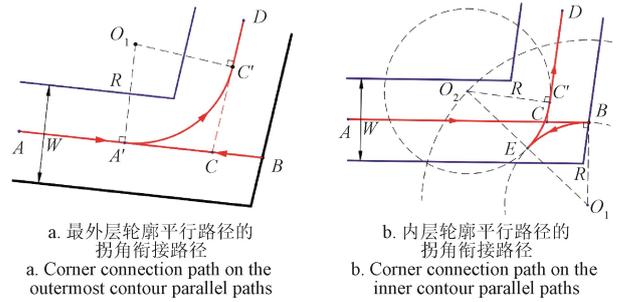


图 6 轮廓平行路径拐角衔接策略

Fig.6 Corner connection strategies of contour parallel paths

2.4 方向平行路径及其衔接路径

当油菜联合收获机仅具有一侧竖割刀时，通过由轮廓平行路径组成的环形路径，即可完成整个田块区域的收割任务，这是最传统也是目前采用最多的一种收割策略。当油菜联合收获机具有双侧竖割刀时，则有更多的选择。当按照轮廓平行路径完成田块外围区域收割后，形成足够的地头转弯空间，剩下的待收获区域，可以采用方向平行路径进行作业，此时的组合路径称为混合路径。

方向平行路径是指机器的有效作业路径线段互相平行，且方向固定地平行于田块的某一条边界。该方向称之为最优作业方向，可按照多边形最小跨度法^[22]求解得到，有效作业路径线段为一组间距为 W 的平行线组，可采用基于活性边表法的扫描线填充算法^[23]获得。有效作业路径是彼此孤立的平行线段，同样需要衔接处理，也即是通常意义上的转弯掉头。

当转弯半径大于 0 时，为使车辆行进顺畅，其转向过程须遵循一定的转弯策略进行平滑过渡。黄小毛等^[24]在 U 型、 Ω 型和 T 型等 3 种常见转弯策略的基础上，提出了长度更短的 M 型转弯策略和 T'型转弯策略。具体选择哪种转弯策略，主要取决于 2 条方向平行路径间间距 (W , m) 和最小转弯半径 (R , m) 之间的关系，同时考虑转弯路径长度、地头空间的大小和作业种类，保证最小的转弯长度和地头空间且不造成作物碾压。通过对比，选取 U 型转弯策略和 T'型转弯策略作为方向平行衔接路径，其转弯过程原理如图 7 所示。当使用 U 型转弯时，机器采用“ AB 直线前进， BH_1 圆弧转弯， H_1H_2 直线前行， H_2C 圆弧转弯， CD 直线前行”的路径如图 7a 所示。当使用 T'型转弯时，机器采用“ AB 直线前进， BH_2 圆弧转弯， H_2H_1 圆弧倒车， H_1C 圆弧转弯， CD 直线前行”的路径如图 7b 所示。

2.5 方向平行路径调度优化

方向平行路径中有效作业路径的调度次序会极大地影响转弯的路径总长度和效率。传统作业中普遍采取逐行往复式的调度策略，该调度策略配合 Ω 型转弯策略被广泛使用、操作手法相对容易被接受，但实践证明并非最优策略^[25]。通过对方向平行路径进行调度优化，可以有效减少非工作路径的长度。

本研究将该调度问题看作旅行商问题 (Travelling Salesman Problem, TSP)^[24] 并采用 Google 公司开发的一种用于组合优化问题的开源软件套件 OR-Tools 进行优

化。将每条方向平行路径线段的端点看成一个城市，为确保属于同一条方向平行路径的 2 个城市以相邻方式依次包含在最终解里面，将对应两点的“名义距离”设置为 0。此外考虑到 2 条方向平行路径衔接时一般按照同侧方式进行转移，因此对于 2 条方向平行路径 AB、CD 而言，拟定按照表 1 方式计算优化时的 TSP 距离矩阵。

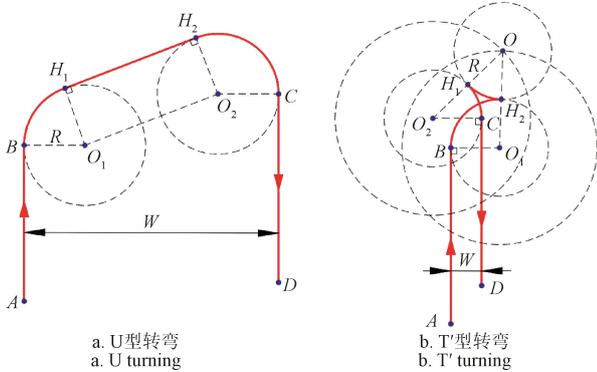


图 7 方向平行衔接路径的 U 型与 T'型转弯策略
Fig.7 U and T' turning strategies with direction parallel connection path

表 1 距离矩阵计算方法
Table 1 Calculation method of distance matrix

方向平行路径的端点 Endpoints of direction parallel paths	计算方法或取值 Calculation method or evaluation
A ↔ B	0
A ↔ C	属同侧转移: 若 $W \geq 2R$, 按 U 型转弯策略计算; 否则, 按 T'型转弯策略计算
A ↔ D	属异侧转移: 不允许, 取值为 $+\infty$
C ↔ D	0
C ↔ B	属异侧转移: 不允许, 取值为 $+\infty$
B ↔ D	属同侧转移: 若 $W \geq 2R$, 按 U 型转弯策略计算; 否则, 按 T'型转弯策略计算

由于 TSP 属于典型的组合优化问题，目前尚无可求取准确解的完美算法，该问题也一直是计算机领域的难点问题^[26-27]。本研究通过调用 OR-Tools 软件套件内的路由解算器，完成方向平行路径的调度优化。路径规划算法在执行调度优化前，需先采用距离矩阵计算方法求出方向平行路径各端点之间的距离矩阵。调度优化时，首先使用局部最优路径策略得到调度次序的初始解，再通过引导式局部搜索策略继续求解获得新的调度次序，同时计算每一个调度次序对应的路径总长度，当搜索时间大于设定时间（最大搜索时间设置为 4 s）时，输出最小路径总长度所对应的调度次序，即为最优调度次序。

2.6 算法运行环境

本研究的油菜联合收获作业路径规划算法以 Python 作为编程语言，在 PyCharm 平台上编程实现，并结合 PyQt5 开发工具编写路径规划软件。在 Inter(R) Core(TM) i5-9400 CPU @ 2.9 GHz、16 GB、Windows10 操作系统环境下，运行程序并进行效果测试。

3 实例仿真计算

选取 4 块典型的四边形实际田块进行算法求解和效率

计算分析测试。田块边界数据通过 Google Earth 软件获取，并以 KML 格式作为交换格式。其中田块 1、2 为湖北武汉市实际田块，田块 3、4 为湖北宜昌市实际田块，田块面积分别为 2 033.02、2 571.35、2 784.94 和 3 329.01 m²。采用星光 4LZY-3.5S 油菜联合收获机的作业参数，外形尺寸为 5.12 m×2.52 m×2.72 m、割幅为 $W=2.20$ m、喂入量为 3.50 kg/s。因履带式车辆底盘实际转弯半径受行进速度和土壤特性等多个因素影响无法准确量化，故对该机器分别取 $R=1.50、1.70、2.00、2.20$ m 4 个数值进行算法仿真试验。试验中，将路径规划算法规划出的路径按照是否执行收割操作分为作业路径（边行走、边收割）和非作业路径（只行走转移、不收割），求出相应路径总长度，算法耗时为主程序在进行算法求解过程中所消耗的 CPU 时间。

3.1 环形路径和混合路径的对比仿真试验

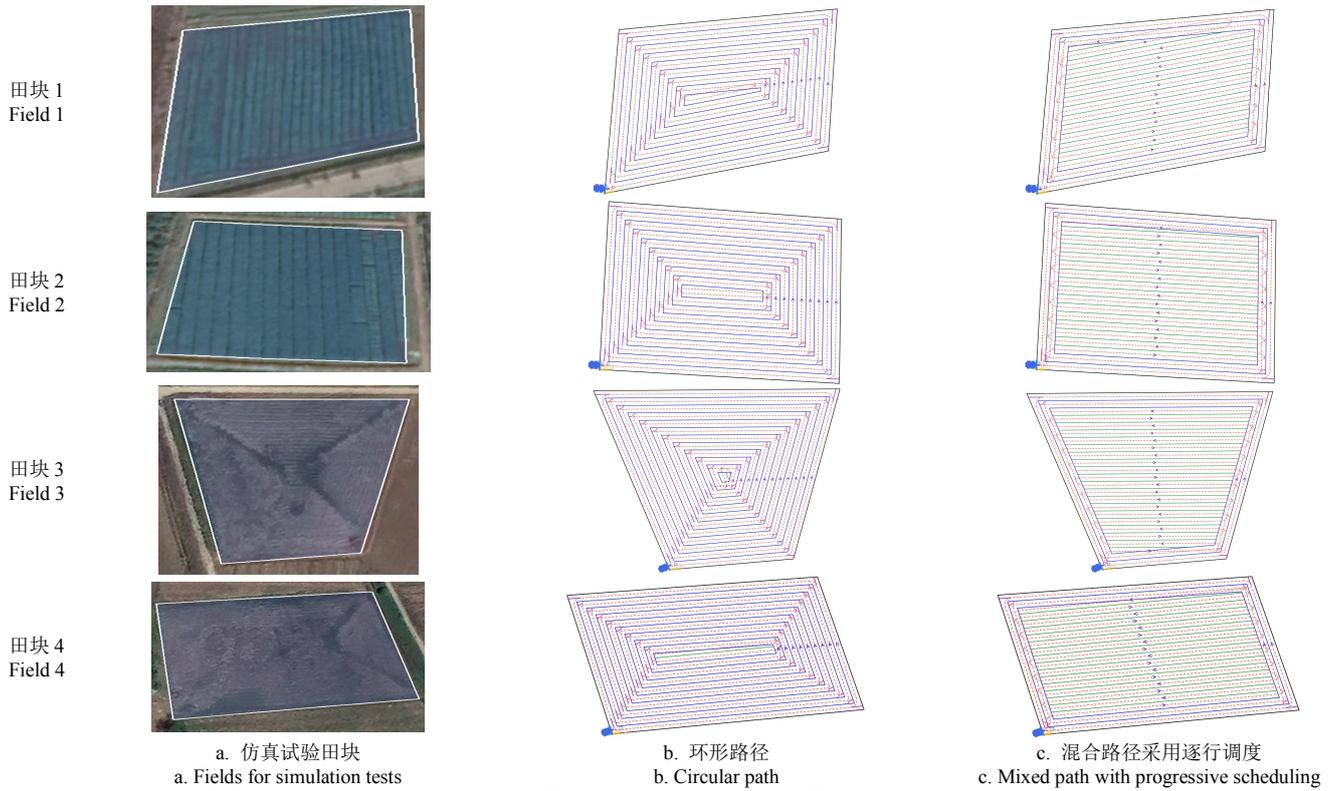
对传统环形路径（即轮廓平行路径）算法和混合路径（即先轮廓平行路径、后方向平行路径）算法的求解结果进行对比研究。在算法设计时虽以最小漏收面积为首要满足指标，但由于实际田块边界部分夹角太小，导致尖角处机器无法进入，无法保证绝对不漏收，故对比时忽略一些细小漏收面积的影响。方向平行路径调度时采用传统的逐行调度策略。设定转弯半径为 1.50 和 2.00 m 两个水平，采用环形路径算法和混合路径算法对 4 块实际田块进行仿真试验，试验数据如表 2 所示，部分算例的完整路径结果如图 8 所示。其中作业路径由轮廓平行路径中的前行路径部分和方向平行路径组成，非作业路径由轮廓平行路径中的倒车路径、方向平行路径间衔接路径、退出路径 3 个部分组成。倒车次数优化率 $\gamma_1=(N_1-N_2)/N_1 \times 100\%$ ，其中 $N_1、N_2$ 分别是环形路径和混合路径结果中的倒车次数。由表 2 可知，2 种路径算法对应的路径总长度都随田块面积的增加而增大，同时也随转弯半径的增加而增大。其中环形路径的算法耗时为 0.17~0.25 s，混合路径的算法耗时为 0.38~0.61 s。由图 8 可知，环形路径算法和混合路径算法获得的路径线基本覆盖整个田块。

3.2 方向平行路径调度优化仿真试验

为进一步优化混合路径总长度，在混合路径算法内嵌入 OR-Tools 软件套件内的路由解算器，对方向平行路径进行调度优化。非作业路径的优化率($\epsilon, \%$)为 OR-Tools 调度后混合路径中非作业路径长度 (T_2, m) 相对于逐行调度后混合路径中非作业路径长度 (T_1, m) 的降低幅度，即 $\epsilon=(T_1-T_2)/T_1 \times 100\%$ ，且进一步对比倒车次数减少的幅度，即 $\gamma_2=(N_3-N_4)/N_3 \times 100\%$ 。设定本次试验中油菜联合收获机的转弯半径为 1.70 m 和 2.20 m，采用逐行调度策略和 OR-Tools 调度策略对 4 块实际田块进行仿真试验，试验数据如表 3 所示，部分算例的完整路径结果如图 9 所示。由表 3 可知，2 种调度策略下混合路径总长度与田块面积、转弯半径呈正相关，其中逐行调度策略的算法耗时为 0.38~0.61 s，OR-Tools 调度策略的算法耗时为 4.42~4.73 s。由图 9 可知，混合路径在采用 OR-Tools 调度策略后获得的路径线基本覆盖整个田块。

表 2 不同田块下环形路径和混合路径的对比测试结果
Table 2 Test results comparison of circular parallel path and mixture path for different fields

田块编号 No. of fields	转弯半径 Turning radius R/m	环形路径 Circular path					混合路径 Mixture path					倒车次数 优化率 Optimization rate of number of reverses $\gamma_1/\%$
		非作业路径长度 Non-operation path length/m	作业路径长度 Operation path length/m	总长度 Total length/m	倒车次数 Number of reverses N_1	算法耗时 Algorithm time/s	非作业路径长度 Non-operation path length/m	作业路径长度 Operation path length/m	总长度 Total length/m	倒车次数 Number of reverses N_2	算法耗时 Algorithm time/s	
1	1.50	102.74	1 004.82	1107.56	33	0.17	121.93	983.34	1 105.27	21	0.38	36.36
	2.00	113.62	1 007.39	1121.01	33	0.17	142.51	989.02	1 131.53	21	0.38	36.36
2	1.50	103.02	1 251.67	1354.69	37	0.21	110.10	1 237.52	1 347.62	23	0.57	37.84
	2.00	115.91	1 256.54	1372.45	37	0.21	133.94	1 243.87	1 377.81	23	0.56	37.84
3	1.50	124.63	1 356.45	1481.08	45	0.25	148.14	1 318.35	1 466.49	27	0.57	40.00
	2.00	134.36	1 364.04	1498.41	45	0.25	178.48	1 324.60	1 503.09	27	0.59	40.00
4	1.50	102.46	1 605.16	1707.62	37	0.20	110.67	1 583.91	1 694.58	23	0.60	37.84
	2.00	113.13	1 608.31	1721.44	37	0.22	134.64	1 589.93	1 724.57	23	0.61	37.84



注：白色实线为田块边界线，虚线为路径线，实线为路径的边界线；箭头表示路径方向。下同。
Note: The solid white line is the boundary line of the field, the dashed line is the path line, and the solid line is the boundary line of the path; the arrow indicates the path direction. The same below.

图 8 不同实际田块下环形路径和混合路径求解结果
Fig.8 Results of circular parallel path and mixture path for different actual fields

表 3 不同调度策略下混合路径规划算法的测试结果
Table 3 Testing results of mixed path planning algorithms under different scheduling strategies

田块编号 No. of field	转弯半径 Turning radius R/m	混合路径逐行调度 Mixed path with traverse line by line				混合路径 OR-Tools 调度 Mixed path with OR-Tools scheduling				倒车次数 优化率 Optimization rate of number of reverses $\gamma_2/\%$	非作业路径 优化率 Optimization rate of non-operation path $\epsilon/\%$
		非作业路径长度 Non-operation path length T_1/m	作业路径长度 Operation path length /m	倒车次数 Number of reverses N_3	算法耗时 Algorithm time/s	非作业路径长度 Non-operation path length T_2/m	作业路径长度 Operation path length /m	倒车次数 Number of reverses N_4	算法耗时 Algorithm time/s		
1	1.70	130.16	985.38	21	0.38	116.48	986.33	14	4.42	33.33	10.51
	2.20	150.74	991.48	21	0.39	132.99	992.48	11	4.45	47.62	11.78
2	1.70	119.63	1 239.94	23	0.57	103.16	1 239.94	9	4.67	60.87	13.77
	2.20	143.47	1 246.42	23	0.56	114.44	1 246.42	9	4.70	60.87	20.23
3	1.70	160.27	1 320.94	27	0.58	148.73	1 320.94	12	4.70	55.56	7.20
	2.20	190.64	1 327.23	27	0.59	173.87	1 327.23	11	4.73	59.26	8.80
4	1.70	120.23	1 586.10	23	0.61	108.78	1 586.10	9	4.64	60.87	9.52
	2.20	144.20	1 592.55	23	0.61	126.95	1 592.55	9	4.65	60.87	11.96

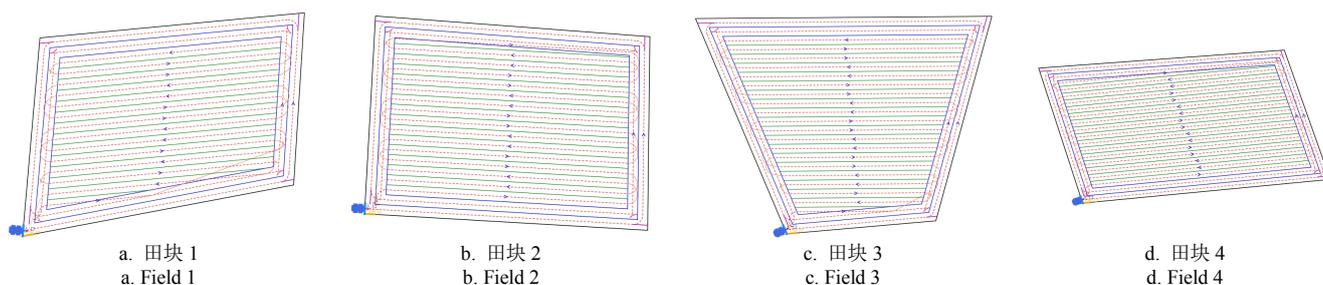


图9 采用 OR-Tools 调度优化后混合路径规划算法的求解结果
Fig.9 Results of hybrid path planning algorithm after scheduling optimization by OR-Tools

3.3 仿真试验结果分析

针对四边形边界田块下的油菜收获路径规划问题,提出了环形路径算法与混合路径算法,分别对 4 组不同面积、不同形状的实际田块进行了仿真试验。由图 8 和图 9 可知,环形路径算法和混合路径算法获得的路径线基本覆盖整个田块,满足最小漏收面积要求。由表 2 和表 3 中的算法耗时可知,2 种路径类型对应的算法在加入调度优化前,算法耗时随田块面积的增大而缓慢增加,但均小于 1.00 s;加入调度优化后,因 TSP 问题求解,算法耗时大幅增加,但也均小于 5.00 s。这说明设计的算法稳定、可靠、高效。

对比表 2 中环形路径总长度和混合路径总长度可知,当转弯半径设定在 1.50 m 时,混合路径作业总长度较短,而当转弯半径增大至 2.00 m 时,此时环形路径作业总长度反而要短一些。为了探究这一规律,对实际田块 2 进行仿真试验,设置转弯半径范围为 1.40~2.30 m,间隔 0.10 m。2 种路径算法下路径总长度结果如图 10 所示,当转弯半径在 1.40~1.70 m 时,混合路径总长度较短,当转弯半径在 1.80~2.30 m 时,环形路径总长度更短。

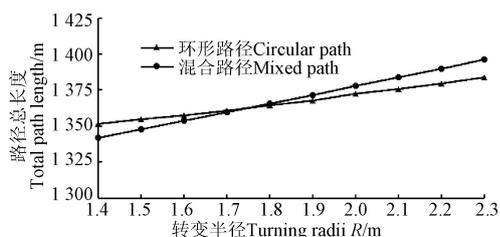


图 10 田块 2 在不同转弯半径下路径总长度对比

Fig.10 Comparison of total path lengths of field 2 under different turning radii

由表 2 中作业路径长度和非作业路径长度可知,2 种路径下转弯半径增大对作业路径长度影响不大,主要影响非作业路径长度,其中混合路径的非作业路径长度增幅较大,主要原因是混合路径中方向平行衔接路径的长度受转弯半径变化影响较大。此外,从表 2 倒车次数可知,相比于环形路径,采用混合路径可减少 36.36%~40.00%的倒车次数,进而减少了农机作业过程所消耗的时间。

由表 3 可知,对混合路径进行调度优化后,非作业路径长度优化效果在 7.20%~20.23%之间。对比表 3 中不同转弯半径下的非作业路径长度,可以发现其优化幅度

与转弯半径的大小相关,当转弯半径越大时,调度优化的效果越明显。同时对比图 9 中田块的规整程度可以发现,当田块的形状越接近矩形,以及方向平行路径需要的衔接路径(转弯)次数越多时,调度优化效果就越明显。因调度优化后方向平行衔接路径更多的采用 U 型转弯,相比未采用调度优化的混合路径,倒车次数减少了 33.33%~60.87%,能进一步节省作业时间。

4 结论

1) 针对四边形田块边界类型条件下的油菜联合收获作业路径规划问题,在分析油菜联合收获作业特点的基础上,为单侧竖割刀的油菜联合收获机,提出了全覆盖作业环形路径规划算法;为双侧竖割刀的油菜联合收获机,提出了全覆盖作业混合路径规划算法。

2) 对 4 组实际田块进行仿真测试结果表明,本研究所设计的两种收获作业路径算法满足实际收获过程中的各种要求。在不考虑调度优化的情况下,环形路径的算法耗时为 0.17~0.25 s,混合路径的算法耗时为 0.38~0.61 s,当转弯半径较小时,混合路径总长度较短,当转弯半径较大时,环形路径总长度较短,在算法输入参数相同的条件下,混合路径相比于环形路径能减少 36.36%~40.00%的倒车次数。在对混合路径算法进行调度优化后,其非作业路径长度减少了 7.20%~20.23%,倒车次数进一步减少了 33.33%~60.87%,相较于环形路径算法更优,此时算法耗时在 4.42~4.73 s,满足油菜联合收获机在收获作业准备过程中快速规划路径的需要。

3) 本研究为长江中下游区域稻油轮作无人农场中油菜无人化联合收获提供了作业路径规划方面的理论及技术支持。其中多边形偏置、轮廓平行路径的环上及环间衔接处理、方向平行路径调度优化时距离矩阵等计算方法同样适用于其他非四边形的凸多边形边界田块,但对于凹多边形边界田块,则还需要进一步深入研究。此外,算法中假设车辆转弯半径为某一定值,属于静态规划,因此还需要进一步研究动态转弯特性对路径规划结果的影响。

[参 考 文 献]

- [1] 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 with English abstract)
- [2] 吴才聪, 王东旭, 陈智博, 等. SF2104 拖拉机自主行驶与作业控制方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 42-48. Wu Caicong, Wang Dongxu, Chen Zhibo, et al. Autonomous driving and operation control method for SF2104 tractors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 42-48. (in Chinese with English abstract)
- [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 with English abstract)
- [4] Bochtis D D, Sørensen C G C, Busato P. Advances in agricultural machinery management: A review[J]. Biosystems Engineering, 2014, 126(39): 69-81.
- [5] Palmer R J, Wild D, Runtz K. Improving the efficiency of field operations[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(3): 283-288.
- [6] Bochtis D D, Sørensen C G, Busato P, et al. Benefits from optimal route planning based on B-patterns[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(4): 389-395.
- [7] 艾长胜, 林洪川, 武德林, 等. 葡萄园植保机器人路径规划算法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 77-85. Ai Changsheng, Lin Hongchuan, Wu Delin, et al. Path planning algorithm for plant protection robots in vineyard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(13): 77-85. (in Chinese with English abstract)
- [8] Conesa-Muñoz J, Bengochea-Guevara J M, Andujar D, et al. Route planning for agricultural tasks: A general approach for fleets of autonomous vehicles in site-specific herbicide applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 204-220.
- [9] Seyyedhasani H, Dvorak J S. Dynamic rerouting of a fleet of vehicles in agricultural operations through a Dynamic Multiple Depot Vehicle Routing Problem representation[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 63-77.
- [10] Hameed I A. Intelligent coverage path planning for agricultural robots and autonomous machines on three-dimensional terrain[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 74(3/4): 965-983.
- [11] Plessen M M G. Partial field coverage based on two path planning patterns[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 16-29.
- [12] Utamima A, Reiners T, Ansariipoor A H. Optimisation of agricultural routing planning in field logistics with evolutionary hybrid neighbourhood search[J]. Biosystems Engineering, 2019, 184: 166-180.
- [13] Nilsson R S, Zhou K. Method and bench-marking framework for coverage path planning in arable farming[J]. Biosystems Engineering, 2020, 198: 248-265.
- [14] 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. Optimal path planning for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 147-152. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘刚, 康熙, 夏友祥, 等. 基于 GNSS 农田平整全局路径规划方法与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 27-33. Liu Gang, Kang Xi, Xia Youxiang, et al. Global path planning algorithm and experiment based on GNSS-controlled precise land leveling system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 27-33. (in Chinese with English abstract)
- [16] 马丽娜, 魏俊逸, 黄小毛, 等. 油菜联合收获机割台振动对田间收获落粒影响分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 134-138, 201. Ma Lina, Wei Junyi, Huang Xiaomao, et al. Analysis of harvesting losses of rapeseed caused by vibration of combine harvester header during field operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp2): 134-138, 201. (in Chinese with English abstract)
- [17] 柴晓玉, 徐立章, 严超, 等. 油菜割台竖割刀切割频率随动调节装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 93-99. Chai Xiaoyu, Xu Lizhang, Yan Chao, et al. Design and test of cutting frequency follow-up adjusting device for vertical cutting knife of rapeseed cutting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 93-99. (in Chinese with English abstract)
- [18] 赵建柱, 王枫辰, 朱永奇, 等. 静液压-机械驱动桥式履带底盘分段跟随转向控制研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 36-41. Zhao Jianzhu, Wang Fengchen, Zhu Yongqi, et al. Subsection following steering control strategy and test of hydrostatic-mechanical driving crawler chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 36-41. (in Chinese with English abstract)
- [19] 关卓怀, 沐森林, 吴崇友, 等. 履带式联合收获机水田作业转向运动学分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 29-38. Guan Zhuohuai, Mu Senlin, Wu Chongyou, et al. Steering kinematic analysis and experiment of tracked combine harvester working in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(13): 29-38. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吴迪军. UTM 投影地区工程独立坐标系的建立方法[J]. 测绘工程, 2020, 29(4): 7-10, 14. Wu Dijun. Establishment of engineering independent coordinate system in countries and regions using UTM projection[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2020, 29(4): 7-10, 14. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张小燕, 朱朦, 董本志. 三次 NURBS 空间曲线的投影等距偏置算法[J]. 林业和草原机械, 2016, 27(2): 29-32. Zhang Xiaoyan, Zhu Meng, Dong Benzhi. Offset algorithm

- of a third-order NURBS curve based on projection[J]. *Forestry and Grassland Machinery*, 2016, 27(2): 29-32. (in Chinese with English abstract)
- [22] Yan L, Hai C, Meng J E, et al. Coverage path planning for UAVs based on enhanced exact cellular decomposition method[J]. *Mechatronics*, 2011, 21(5): 876-885.
- [23] 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 Xiaomao, Zhang Lei, Tang Lie, et al. Path planning for autonomous operation of drone in fields with complex boundaries[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(3): 34-42. (in Chinese with English abstract)
- [24] 黄小毛, 付正坤, 丁幼春, 等. 矩形边界条件下农机作业方向平行路径的排序优化[J]. *华中农业大学学报*, 2014, 33(4): 130-136. Huang Xiaomao, Fu Zhengkun, Ding Youchun, et al. Sequence optimization of direction parallel path for the agricultural vehicles in field of rectangle boundary[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2014, 33(4): 130-136. (in Chinese with English abstract)
- [25] Conesa-Munoz J, Pajares G, Ribeiro A. 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.
- [26] 韩伟, 张子成. 求解旅行商问题的离散型贝壳漫步优化算法[J]. *模式识别与人工智能*, 2016, 29(7): 650-657. Han Wei, Zhang Zicheng. Discrete mussels wandering optimization algorithm for solving traveling salesman problem[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2016, 29(7): 650-657. (in Chinese with English abstract)
- [27] 程毕芸, 鲁海燕, 黄洋, 等. 求解 TSP 的自适应优秀系数粒子群优化算法[J]. *计算机应用*, 2017, 37(3): 750-754. Cheng Biyun, Lu Haiyan, Huang Yang, et al. Particle swarm optimization algorithm based on self-adaptive excellence coefficients for solving traveling salesman problem[J]. *Journal of Computer Applications*, 2017, 37(3): 750-754. (in Chinese with English abstract)

Coverage operation path planning algorithms for the rape combine harvester in quadrilateral fields

Luo Chengming^{1,2}, Xiong Chenwen¹, Huang Xiaomao^{1,2*}, Ding Youchun^{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: To realize automatic planning and optimization of operation paths for the autonomous navigation of rape combine harvesters during the harvesting operation in unmanned farms, two sets of coverage path planning algorithms for arbitrary quadrilateral fields were proposed in this study through procedures including theoretical analysis, design of algorithms, programming, and simulation and evaluation using examples. First, the fundamental requirements of the coverage path planning problem for the unmanned operation process of the rape combine harvest were defined after analyzing the characteristics of the harvesting process (plant branches intertwined and required to be separated by vertical cutters to reduce harvest loss, and field boundaries generally not crossable in rice/rape rotation regions) and of the combine harvesters (small turning radii and strong mobility of crawler-type machines). Then, full coverage operation paths were generated based on an isometric offsetting process and the scanline filling algorithm, and scheduling optimization was performed using the OR-Tools. The two sets of global operation coverage path planning algorithms for rape harvesting in arbitrary quadrilateral fields included one for the “contour parallel” circular operation paths based on the one-sided vertical cutter header and the other for the “contour parallel + direction parallel” mixed operation paths based on the bilateral vertical cutter header. The latter algorithm first used contour parallel paths to harvest the field to make enough turning space for the machine, and then it used the direction parallel paths to complete the harvesting operation in the central area. Through the test and simulation using the data of four typical actual fields, the stability and reliability of the algorithms were verified, and the algorithm running time was between 0.17 s and 4.73 s, which meets the basic requirements of path planning of rape combine harvesting for unmanned farming. At the same time, compared with the circular operation paths, which are widely used in actual harvesting operation, the total operation length of mixed paths was smaller than that of the traditional circular paths when no optimization was performed and the turning radius was small, and the number of reverses in the operation process was reduced by 36.36%-40.00%. After optimization, the number of reverses was further reduced by 33.33%-60.87%, and the length of non-operation paths was reduced by 7.20%-20.23% compared with the path without any optimization. Results showed that the mixed paths resulted in a better operation effect than the traditional circular operation paths. This study could provide theoretical and technical support for the combined harvesting of winter rape in unmanned farming of rice/rape rotation in the middle and lower reaches of the Yangtze River in China.

Keywords: agricultural machinery; harvesting; algorithms; rape; path planning; scheduling optimization; unmanned farming