

面向主从跟随协同作业的导航路径规划方法

翟志强¹ 王秀倩^{1,2} 王亮¹ 朱忠祥¹ 杜岳峰¹ 毛恩荣¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国重型汽车集团有限公司汽车研究总院, 济南 250013)

摘要: 针对传统多机协同路径规划方法未充分考虑从机自主性, 地头转弯路径可能发生重叠, 存在碰撞风险的问题, 本文提出一种面向主从跟随模式的多机协同作业导航路径规划方法。基于方向包围盒算法和分离轴定理建立农机安全状态检测模型, 检测农机之间是否发生碰撞; 建立基于地块全覆盖算法的主机路径规划模型, 计算最佳作业方向角并规划地头转弯模型; 建立从机作业路径规划模型, 根据主机与从机在协同作业中的相对距离要求规划从机直线作业路径, 制定协同转弯策略, 根据主机和从机的转弯状态判定从机停车等待时刻, 避免因转弯路径交叠引发的碰撞危险。以某小麦收获地块为测试场景开展仿真试验。试验结果表明, 所建方法能够规划出地块覆盖率高、作业时间短、动力消耗少的多机协同作业路径; 当地头转弯路径发生重叠时, 主机和从机能够根据所设计的协同转弯策略先后转向, 避免碰撞危险; 路径规划算法用时最小值为 0.453 s、最大值为 1.563 s、平均值为 0.951 s, 可为小麦、青贮收获等主从跟随式多机协同自主作业提供有效的全局作业路径。

关键词: 农业机械; 多机协同; 路径规划; 自动导航

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0542-06

Collaborative Path Planning for Autonomous Agricultural Machinery of Master – Slave Cooperation

ZHAI Zhiqiang¹ WANG Xiuqian^{1,2} WANG Liang¹ ZHU Zhongxiang¹ DU Yuefeng¹ MAO Enrong¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Automotive Research Institute, China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Ji'nan 250013, China)

Abstract: The traditional multi-machine collaborative path planning method exists several problems which ignore the autonomy of the slave and the turning path may overlap on the ground. A multi-machine cooperative navigation path planning method oriented to master – slave cooperation mode was proposed. Firstly, the safety state detection model of agricultural machinery was established based on the directional bounding box algorithm and the separation axis theorem. By comparing the relationship between the sum of the projection radius of each agricultural machinery envelope section on the separation axis and the projection length from the geometric center of the section, the collision between agricultural machinery can be detected. Then, the host path planning model based on the full coverage algorithm was established, and the optimal operation direction angle was solved with the minimum turning number as the optimization objective; according to the size relationship between the minimum turning radius and operation width of the main engine, two kinds of U-shaped and T-shaped turning models were established. Finally, the path planning model of slave was established, and the linear operation path of slave machine was planned according to the relative distance between master and slave in cooperative operation; The cooperative turning modes of master and slave were divided into three types: double U-type, double-T-type and UT type. The cooperative turning strategy was proposed, according to the turning state of the master and slave, the waiting time of the slave was determined to avoid the collision risk caused by overlapping turning paths. Taking the wheat harvest scene under a convex polygon plot as the experimental sample plot, the longitude and latitude coordinates of the plot vertex were extracted by using LocaSpace Viewer, and the rectangular coordinates of the plot were obtained through coordinate

收稿日期: 2021-07-05 修回日期: 2021-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101622, 52072407)和国家重点研发计划项目(2017YFD0700403)

作者简介: 翟志强(1989—), 男, 讲师, 主要从事农机装备自动驾驶及虚拟仿真技术研究, E-mail: zhaizhiqiang@cau.edu.cn

通信作者: 朱忠祥(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆与电液控制及智能化技术研究, E-mail: zhuzhongxiang@cau.edu.cn

transformation. The simulation experiment was carried out by using Matlab. The experimental results showed that the proposed method can plan multi-machine collaborative operation path with high land coverage, short operation time and low power consumption; the master and slave can turn successively according to the designed cooperative turning strategy to avoid collision, when the turning path overlaped; the minimum, maximum and average time of path planning algorithm were 0.453 s, 1.563 s and 0.951 s, respectively. The proposed method can avoid collision risk and can provide an effective global operation path for wheat and silage harvesting.

Key words: agricultural machinery; multi-machine cooperation; path planning; automatic guidance

0 引言

随着我国农业规模化经营和产业集群化的发展,以及北斗卫星定位技术的不断提高,多机协同导航作业逐步成为智慧农业领域的研究热点^[1-4]。多机协同导航作业能够服务于结构化农田环境中的耕种管收作业环节,可突破传统单机导航作业和人工驾驶作业依赖于农民主观操纵水平的局限性,进一步提高作业效率和质量^[5-6]。根据农机作业场景可将多机协同导航作业模式分为自由模式和主从跟随模式^[7-12]。其中,自由模式指同种机型农机在不同作业区域独立执行同种作业任务。主从跟随模式下的作业机械可以是同类或多类机型,按照作业任务不同将农机划分为主机和从机,主机与从机根据预设的相对空间位置关系执行同种或异种作业任务,较自由模式而言,协同控制难度更大。设计路径规划方法是实现多机协同导航作业安全、保障作业质量的必要条件。研究人员在路径跟踪控制系统^[13-14]、单机作业路径规划^[15]以及农机作业任务调度^[16-24]等方面已开展较多研究,然而对于多机协同路径规划研究仍然缺乏。特别是现有大多数面向主从跟随模式的路径规划方法,从机作业路径主要根据主机作业路径平移得到,未充分考虑从机自主性,地头转弯路径可能重叠,存在碰撞风险。

本文提出一种面向主从跟随模式的多机协同导航路径规划方法,建立基于分离轴定理的农机碰撞检测模型,识别农机安全作业状态;建立基于全覆盖算法的主机路径规划模型,规划最佳作业方向和转弯路径;建立从机作业路径规划模型,根据主机与从机的安全作业状态,规划从机协同作业直线路径、转弯路径和转弯策略。

1 农机碰撞检测

1.1 农机安全模型

基于方向包围盒(Oriented bounding box, OBB)^[25]建立农机安全模型,确定农机碰撞检测区域。考虑农机外观特征在地面的投影形状近似于矩形,设定矩形

截面 $P_1P_2P_3P_4$ 为OBB模型的包络面,如图1所示。OBB在地面坐标系 OXY 的长、宽(L, W)分别为作业农机在地面投影截面的长、宽与最小安全距离之和。为保障作业安全,设定最小安全距离为0.50 m。 θ 表示车辆在坐标系 OXY 中的航向角。

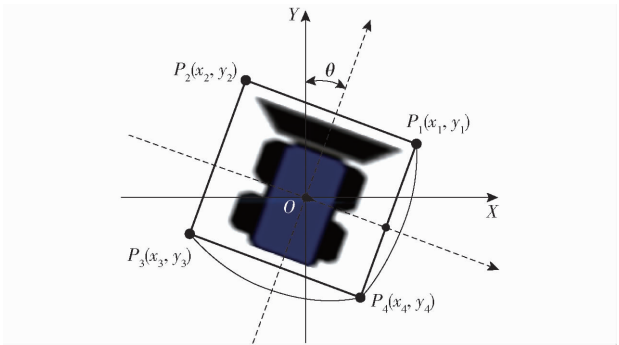


图1 农机安全模型

Fig. 1 Safety model of agricultural machinery

1.2 农机安全状态检测

基于分离轴定理 (Separating axis theorem, SAT)^[26]建立农机安全状态检测模型,如图2所示。

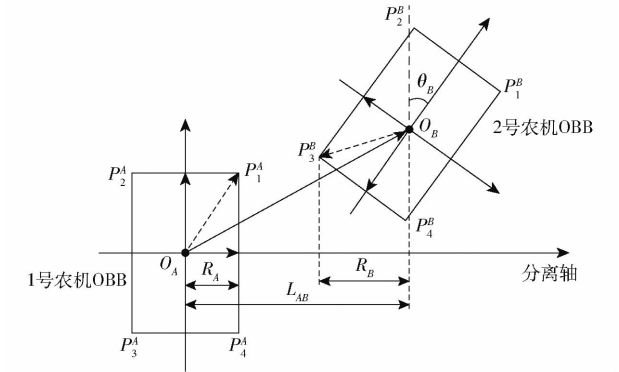


图2 农机安全状态检测模型

Fig. 2 Safety detection model of agricultural machinery

以2台农机协同作业为例, $O_A(x_A, y_A)$ 、 $O_B(x_B, y_B)$ 分别为1号农机和2号农机的OBB几何中心。以点 O_A 为原点建立分离轴坐标系,分离轴平行于1号农机OBB横向对称轴。 L_{AB} 表示2台农机OBB的几何中心距离在分离轴上的投影长度; R_A 、 R_B 分别为1号、2号农机OBB截面在分离轴上最大投影长度的半长,即投影半径。 R_A 、 R_B 及 L_{AB} 计算公式为

$$\begin{cases} R_A = W_A/2 \\ R_B = W_B \cos \theta_B/2 + L_B \sin \theta_B/2 \\ L_{AB} = x_B - x_A \end{cases} \quad (1)$$

式中 W_A ——1 号农机 OBB 的宽度,m
 θ_B ——2 号农机相对 1 号农机的航向角,(°)
 L_B ——2 号农机 OBB 的长度,m
 W_B ——2 号农机 OBB 的宽度,m

根据分离轴定理,当分离轴上农机 OBB 截面的投影半径之和大于等于几何中心距投影长度时(即 $L_{AB} \geq R_A + R_B$),农机之间不发生碰撞。

2 主机作业路径规划

2.1 确定最佳作业方向

基于单机全覆盖路径规划算法^[27]规划主机作业路径。首先求解主机最佳作业方向。设定作业方向角 $\alpha_i = [0, 180^\circ]$ 。为减少主机动力消耗,以地头总转弯数最小为优化目标,计算最近作业方向角 φ 为

$$\varphi = \operatorname{argmin}_{\alpha_i} (N) \quad (2)$$

其中
$$N = \sum_{i=1}^n \frac{L_i |\sin \alpha_i|}{2w}$$

式中 L_i ——第 i 条地块边界线的长度,m
 n ——地块边界线数量
 w ——主机作业宽度,m

2.2 地头转弯模型

根据主机转弯半径 r 和作业宽度 w 之间的尺寸关系,建立 U 形和 T 形 2 种地头转弯模型,如图 3 所示。转弯路径由 2 段转弯圆弧 $T_1 T_2$ 、 $T_3 T_4$ 和连接两圆弧的线段 $T_2 T_3$ 组成,直线 $T_A T_B$ 表示地头边界; β 为主机作业方向与地头的夹角; T_1 为转弯起始点, T_4 为转弯结束点; O_1 、 O_2 分别为 $T_1 T_2$ 和 $T_3 T_4$ 的圆心。当 $w \geq 2r$ 时,执行 U 形转弯;当 $w < 2r$ 时,执行 T 形转弯。将转弯路径沿着最佳作业方向直线连接,获得主机作业路径。

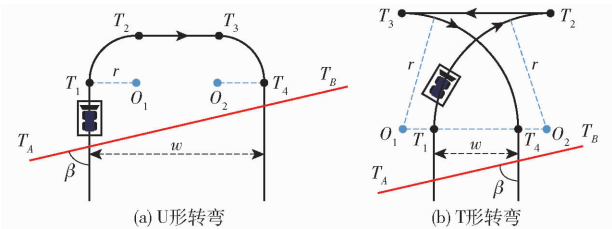


图 3 地头转弯模型

Fig. 3 Headland turn mode

3 从机作业路径规划

3.1 从机直线作业路径规划

根据主机与从机在主从跟随协同作业过程中

的相对距离要求,规划从机直线作业路径,如图 4 所示。

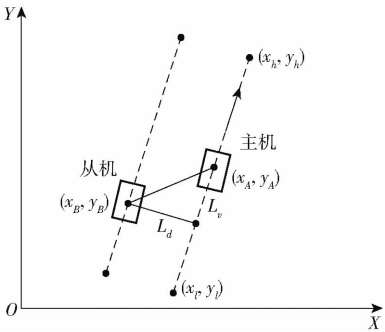


图 4 从机直线协同路径

Fig. 4 Collaborative path of linear operation

主机、从机在地面坐标系 OXY 中的位置坐标为 (x_A, y_A) 和 (x_B, y_B) ;主机直线路径与上、下地头的交点为 (x_h, y_h) 和 (x_l, y_l) 。主机与从机在协同队列中的纵向间距为 L_d 、横向间距为 L_v 。 L_d 和 L_v 的方向分别平行、垂直于作业方向,根据农机的尺寸参数及作业要求设定。从机的理想直线作业路径坐标计算式为

$$l_v^2 + l_d^2 = (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 \quad (3)$$

$$l_d = \frac{|(y_h - y_l)x_B + (x_h - x_l)y_B + x_h y_l - x_l y_h|}{\sqrt{(x_h - x_l)^2 + (y_h - y_l)^2}} \quad (4)$$

3.2 从机转弯作业路径规划

为保证多机协同作业安全,避免因转弯路径重叠引发碰撞危险,建立从机协同转弯路径模型。首先划分农机转弯状态。以 2 台协同作业农机为例,在协同转弯过程中,设定主机、从机当前所处的转弯状态用 M 表示。根据转弯模型(图 3)和主从跟随作业的相对位置关系,将 M 划分为如下 4 种:①农机由起点 T_4 沿直线作业路径行驶至 T_1 , $M = 1$ 。②农机由点 T_1 沿最小半径转弯至 T_2 ,即沿圆弧路径 $T_1 T_2$ 作业时, $M = 2$ 。③农机由 T_2 行进至 T_3 ,即沿线段 $T_2 T_3$ 作业时, $M = 3$ 。其中,U 形转弯时农机由 T_2 前进至 T_3 ;T 形转弯时农机由 T_2 后退至 T_3 。④农机由点 T_3 沿最小半径转弯行驶至 T_4 ,即沿着圆弧路径 $T_3 T_4$ 作业时, $M = 4$ 。

规划协同转弯模式。设主机和从机的作业宽度 w 相等;转弯半径分别为 r_1 、 r_2 。主机和从机在地头转弯时将有 3 种协同转弯模式,如图 5 所示。若 $w \geq 2r_1$ 且 $w \geq 2r_2$,将采用双 U 协同转弯;若 $w < 2r_1$ 且 $w < 2r_2$,将采用双 T 协同转弯;若 $w > 2r_1$ 且 $w < 2r_2$,将采用 UT 协同转弯。

设计主从协同转弯策略,具体为:①主机到达 T_1 开始转向时($M = 2$),从机继续沿直线作业行行驶。当从机到达 T_1 时,对于 U 形转弯模式,若主机

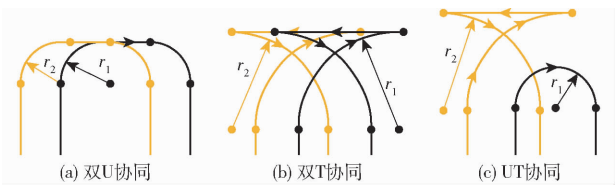


图5 协同转弯模式

Fig.5 Coordinated turning mode of headland

仍处于 $M = 2$ 的状态,从机停车等待;对于 T 形转弯模式,主机到达 T_3 之前均为 $M = 3$ 状态,为避免碰撞危险,从机需要停车等待。②从机跟随主机协同转向,转向过程中根据所建农机安全状态模型检测碰撞危险,决定从机是否停车。若发生碰撞危险,则从机停车,待主机行驶至安全距离后,从机继续转向,即对于 U 形转弯模式,当 $M = 3$ 时,从机开始转向;对于 T 形转弯模式,当 $M = 4$ 时,从机开始转向。③主机转弯结束到达 T_4 、从机仍在转弯时,主机在 T_4 停车等待,从机继续转向。④从机转弯结束,到达转弯变直线临界点 P_4 时,跟随主机沿预设直线路径协同作业。

4 仿真试验与结果分析

以小麦收获场景为测试场景,主机为某型小麦收获机,安全模型尺寸为 $W_A = 6.5\text{ m}$, $L_A = 7.5\text{ m}$;从机为某型谷物运输机,安全模型尺寸为 $W_B = 3\text{ m}$, $L_B = 6\text{ m}$ 。农机作业宽度 $w = 13\text{ m}$ 。试验地块为在中国农业大学上庄实验站、中国农业大学涿州实验站、山东菏泽等地随机选取的 40 个地块。运用图新地球软件获取相应地块的经纬度坐标。在 Matlab 环境下开展仿真试验,计算机处理器型号为 Intel (R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.2 GHz,内存为 16.0 GB,操作系统为 64 位的 Windows 10。

以中国农业大学涿州实验站中某小麦收获场景的多机协同作业路径结果为例。试验地块面积为 $8.86 \times 10^4\text{ m}^2$,顶点数量为 7,如图 6 所示。地块区域顶点(ABCDEFG)在 WGS-84 地心坐标系下的经

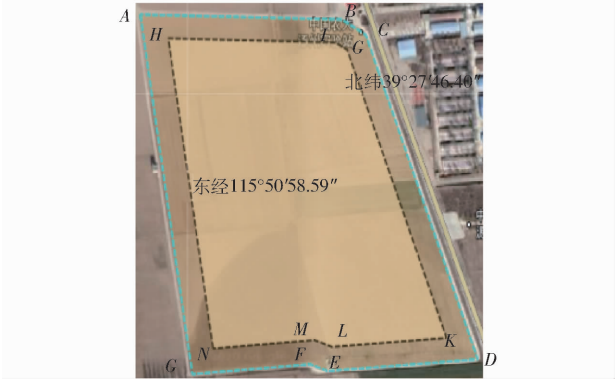


图6 试验地块地图

Fig.6 Map of experimental field

纬度坐标如表 1 所示。运用高斯投影算法将经纬度坐标转换为二维平面坐标,结果见表 1。设定小麦种植区域(HIGKLMN)为作业区域,地块边界内缩距离为作业宽度的 1.8 倍,即 23.4 m。根据式(2)可得最佳作业方向角为 110° ,设定小麦播种行向与最佳作业方向一致。

表 1 试验地块坐标

Tab.1 Coordinates of experimental field			
顶点	经度	纬度	平面直角坐标/(m,m)
A	115°50'56.63"E	39°27'48.99"N	(659 132.52,4 371 605.81)
B	115°51'5.08"E	39°27'48.82"N	(659 334.63,4 371 605.02)
C	115°51'6.01"E	39°27'48.32"N	(659 359.09,4 371 590.11)
D	115°51'10.78"E	39°27'37.83"N	(659 477.78,4 371 268.91)
E	115°51'4.48"E	39°27'37.45"N	(659 327.54,4 371 254.04)
F	115°51'3.75"E	39°27'37.67"N	(659 310.01,4 371 260.50)
G	115°50'58.81"E	39°27'37.35"N	(659 192.04,4 371 248.15)

沿最佳作业方向,通过调整主机与从机的转弯半径(即 r_1 、 r_2),规划 3 种转弯协同模式下的主从机作业路径,算法平均耗时为 0.984 s,规划结果如图 7 所示。由图 7a~7f 可见,规划出的作业路径无遗漏,可实现对作业区域的全覆盖;在直线协同作业阶段,主机和从机的作业路径相互平行,主机和从机的 OBB 模型无重叠区域,无碰撞危险。在地头转弯处,主机和从机根据作业宽度和转弯半径的尺寸关系执行相应的协同转弯模式:图 7a、7d 中, $r_1 = 6\text{ m}$ 、 $r_2 = 4\text{ m}$, $w \geq 2r_1$ 且 $w \geq 2r_2$,采用双 U 协同模式;图 7b、7e 中, $r_1 = 10\text{ m}$ 、 $r_2 = 10\text{ m}$, $w < 2r_1$ 且 $w < 2r_2$,采用双 T 协同模式;图 7c、7f 中, $r_1 = 10\text{ m}$ 、 $r_2 = 4\text{ m}$, $w > 2r_1$ 且 $w < 2r_2$,采用 UT 协同模式。当地头转弯路径发生重叠时,主机和从机能够根据所设计的协同转弯策略先后转向,避免碰撞危险,以图 7b 双 T 协同转弯为例,地头转弯处的局部视图见图 7g~7i。由图 7g 可见,主机和从机到达地头转弯处后,主机优先转向掉头;从机在转弯起点 T_1 处停车等待,直至主机到达转弯点 T_3 后开始协同转弯。图 7h 中,从机跟随主机协同转向,若 OBB 模型发生重叠,则从机停车等待,直至主机行驶至无碰撞危险区域。图 7i 中,主机到达转弯点 T_4 后停车等待直至从机完成转向,此后从机跟随主机继续协同作业。

以地块面积、地块顶点数量和算法处理时间为统计指标,用于评价协同路径规划算法的性能,结果如图 8 所示,统计结果见表 2。试验地块面积为 $1.53 \times 10^4 \sim 2.63 \times 10^5\text{ m}^2$,平均值为 $6.79 \times 10^4\text{ m}^2$;顶点数量为 4~10,平均值为 6;路径规划算法处理时间的最小值为 0.453 s、最大值为 1.563 s、平均值为 0.951 s。结果表明所建算法能够快速、有效地规划出主从跟随式多机协同作业路径。

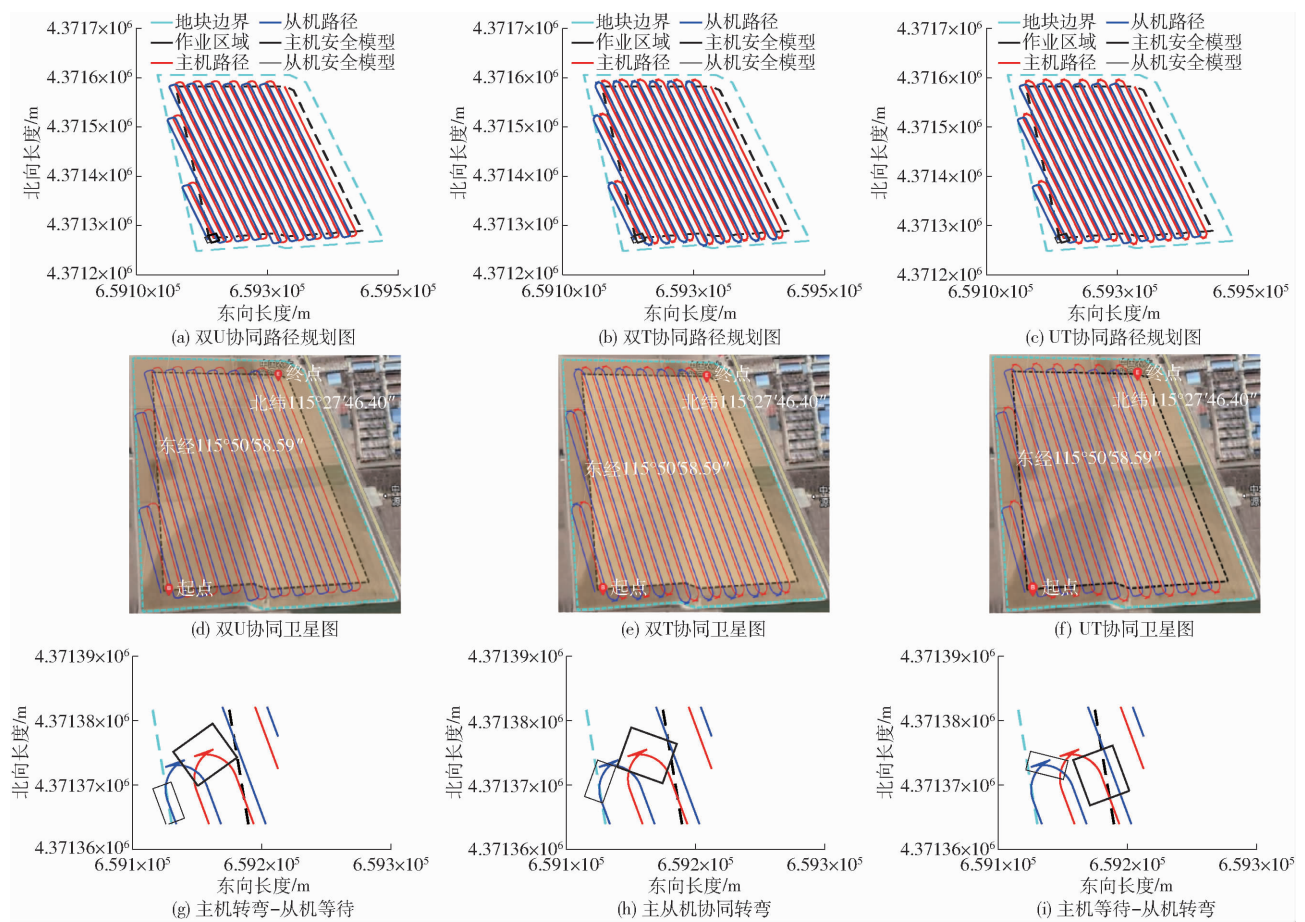


图 7 路径规划结果

Fig. 7 Path planning results

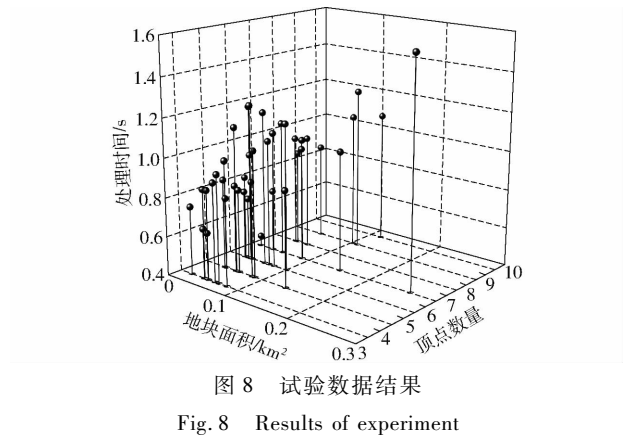


图 8 试验数据结果

Fig. 8 Results of experiment

5 结论

(1) 提出的面向主从跟随模式的多机协同作业

表 2 试验统计结果

Tab. 2 Statistical results of experiment

参数	最小值	最大值	平均值
地块面积/m ²	1.53×10^4	2.63×10^5	6.79×10^4
顶点数量	4	10	6
算法用时/s	0.453	1.563	0.951

导航路径规划方法,能够快速、有效地规划出地块覆盖率高、作业时间短、动力消耗少的主机和从机作业路径,可避免转弯路径交叠引发的碰撞危险。

(2) 所建方法理论上能够适用于小麦、青贮收获等结构化农田环境下主从跟随式多机协同作业场景,为主机和从机提供全局作业路径。

参 考 文 献

[1] 靳双珍, 刘国顺, 闫新甫, 等. 我国发展精准农业的必要性与应用前景[J]. 浙江农业科学, 2010(2): 414-416.
JIN Shuangzhen, LIU Guoshun, YAN Xinpu, et al. Necessity and application prospect of precise agriculture in China[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2010(2): 414-416. (in Chinese)

[2] 张漫, 季宇寒, 李世超, 等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1-18.
ZHANG Man, JI Yuhua, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1-18. (in Chinese)

[3] 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1-10.
HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese)

- [4] 陈学庚,温浩军,张伟荣,等. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业, 2020, 2(4): 1-16.
CHEN Xuegeng, WEN Haojun, ZHANG Weirong, et al. Advances and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 1-16. (in Chinese)
- [5] IIDA M, KUDOU M, OHO K, et al. Automatic following control for agricultural vehicle[C] // Proceedings of 6th International Workshop on Advanced Motion Control, 2000: 158-162.
- [6] NOGUCHI N, WILL J, REID J, et al. Development of a master-slave robot system for farm operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 1-19.
- [7] ZHANG Xi, MARCUS G, PATRICK O N, et al. A semi-autonomous tractor in an intelligent master-slave vehicle system[J]. Intel Serv Robotics, 2010(3): 263-269.
- [8] ZHANG Chi, NOGUCHI N. Development of leader-follower system for field work[C] // Proceedings of IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2015: 364-368.
- [9] ZHANG Chi, NOGUCHI N, YANG Li. Leader-follower system using two robot tractors to improve work efficiency[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121: 269-281.
- [10] JD A, ND J, PJ S, et al. Development and implementation of a team of robotic tractors for autonomous peat moss harvesting [J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(6-7): 549-571.
- [11] STAVROS G V. A distributed control framework for motion coordination of teams of autonomous agricultural vehicles[J]. Biosystems Engineering, 2012, 113(3): 284-297.
- [12] ZHANG Ping, QIAO Junfei, ZHANG Hengyi. Path planning and tracking for agricultural master-slave robot system[C] // Proceedings of International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering, 2010: 55-58.
- [13] 朱忠祥, 宋正河, 谢斌, 等. 拖拉机队列自动控制系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 149-154.
ZHU Zhongxiang, SONG Zhenghe, XIE Bin, et al. Automatic control system of tractors platooning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 149-154. (in Chinese)
- [14] 白晓平, 王卓, 胡静涛, 等. 基于领航-跟随结构的联合收获机群协同导航控制方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 14-21.
BAI Xiaoping, WANG Zhuo, HU Jingtao, et al. Harvester group corporative navigation method based on leader-follower structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 14-21. (in Chinese)
- [15] 张万枝, 刘正铎, 郭子蒙, 等. 多农机重复路径协同作业下的导航路径迭代学习控制[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 34-39.
ZHANG Wanzhi, LIU Zhengduo, GUO Zimeng, et al. Navigation control of collaborative operation in the repeat path for multiple agricultural machinery based on iterative learning[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 34-39. (in Chinese)
- [16] LI Shichao, XU Hongzhen, JI Yuhan, et al. Development of a following agricultural machinery automatic navigation system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 335-344.
- [17] MERNOUT B, MARCO H, TAMÁS K. Complete field coverage as a multi-vehicle routing problem[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(18): 97-102.
- [18] HASAN S, JOSEPH S D. Reducing field work time using fleet routing optimization[J]. Biosystems Engineering, 2018, 169: 1-10.
- [19] BOCHTIS D D, SØRENSEN C G, VOUGIOUKAS S G. Path planning for in-field navigation-aiding of service units[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(1): 80-90.
- [20] ZHANG Mengzhe, SOURABH B. Scheduling and motion planning for autonomous grain carts [C] // Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, 2015: 3422-3427.
- [21] 时静亚. 现代播种机调度系统设计——基于 GIS 旅游资源开发与规划[J]. 农机化研究, 2018, 40(12): 236-239, 244.
SHI Jingya. Design for scheduling system of modern seeding machine—based on the development and planning of GIS tourism resources[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(12): 236-239, 244. (in Chinese)
- [22] 曹如月, 李世超, 季宇寒, 等. 基于蚁群算法的多机协同作业任务规划[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 34-39.
CAO Ruyue, LI Shichao, JI Yuhan, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 34-39. (in Chinese)
- [23] 胡俊, 杨绍昌. 篮球队员协作模式在多收割机械协同作业中的应用[J]. 农机化研究, 2018, 40(7): 236-240.
HU Jun, YANG Shaochang. Application of basketball team cooperation model in multi harvest mechanical cooperative operation [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(7): 236-240. (in Chinese)
- [24] 姚竟发, 滕桂法, 霍利民, 等. 联合收割机多机协同作业路径优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 12-18.
YAO Jingfa, TENG Guifa, HUO Limin, et al. Optimization of cooperative operation path for multiple combine harvesters without conflict[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(17): 12-18. (in Chinese)
- [25] 胡志刚, 秦启飞. 基于凸包的最小体积有向包围盒生成算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(2): 105-111.
HU Zhigang, QIN Qifei. Algorithm for finding minimum volume oriented bounding boxes based on convex hull[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(2): 105-111. (in Chinese)
- [26] 刘超, 蒋夏军, 施慧彬. 基于 OBB 包围盒碰撞检测算法的改进[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(6): 43-48.
LIU Chao, JIANG Xiajun, SHI Huibin. Improved collision detection algorithm based on oriented bounding box[J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(6): 43-48. (in Chinese)
- [27] 刘长卿. 基于 BDS 的拖拉机自动导航路径规划方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.