

智能农机多机协同收获作业控制方法与试验

满忠贤，何杰，刘善琪，岳孟东，胡炼^{*}，
黄培奎，汪沛，罗锡文

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室，广州 510642；
2. 广东省农业人工智能重点实验室，广州 510642)

摘要：为提高多台无人化智能收获机和运粮车协同作业效率，该研究以2台不同型号水稻收获机和1台运粮车为研究对象，开展了智能农机多机协同收获作业控制方法研究。根据协同作业控制决策约束条件，建立协同收获作业中有限个状态过程的改进型连续时间马尔科夫链模型。以减少非作业时间为优化目标，通过模型预测未来一段时间内每台收获机的卸粮时间，动态更新每台收获机的卸粮顺序和时间。仿真试验结果表明：本文控制方法相对于仓满后再召唤运粮车的卸粮方式有效减少了作业时间，协同收获任务的农机平均作业时间减少了13.58%。田间试验结果表明：智能农机多机协同作业控制方法实现了2台水稻收获机和1台运粮车协同自主作业，在场景1中，相对于仓满召唤卸粮模式，收获机1和收获机2非作业时间分别减少了71.25%和42%，收获效率提高了6.65%和5.22%；在场景2中，相对于仓满召唤卸粮模式，收获机1和收获机2非作业时间分别减少了77.64%和37.09%，收获效率提高了12.07%和5.78%。本文提出的控制方法可以实现收获-卸粮转运自主作业，减少了收获机的非作业时间，提高了作业效率，可为无人农场智能收获协同作业提供支撑。

关键词：农业机械；无人农场；收获；多机协同策略；运粮

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202311002

中图分类号: S24;TP273

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0017-10

满忠贤，何杰，刘善琪，等. 智能农机多机协同收获作业控制方法与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 17-26. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202311002 <http://www.tcsae.org>
MAN Zhongxian, HE Jie, LIU Shanqi, et al. Method and test for operating multi-machine cooperative harvesting in intelligent agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 17-26. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202311002 <http://www.tcsae.org>

0 引言

农业是国民经济的基础，农业现代化是实现社会主义现代化不可或缺的一部分。当前，国内农业现代发展不断加快^[1-2]，先进的智能农机装备需求逐年增加，施行创新驱动发展战略，加快推进农机智能化与现代化技术的发展，是实现农业现代化、保障粮食安全迫切的要求^[3-5]。农机自动驾驶是农机智能化的重要发展方向，多机协同作业控制方法是智能农机无人化作业领域的关键技术之一^[6-8]，多台农机协同作业有效减少重复作业提高资源利用率，使人们从繁重的体力劳动中解脱出来，应用前景广阔。

随着农业生产规模化和高标准农田的建设，传统的农业生产模式发生了改变，如何更加科学合理的规划多机协同作业，对提高农业生产效率起着重要作用^[9-11]。王猛等^[12]为解决农业机械多机协同作业前的任务分配问

题，提出了基于多变异分组遗传算法的同种农机多机协同作业静态任务分配方法。在不同权重下基于多变异分组遗传算法的多机协同静态任务分配的机群代价比实际作业代价降低了29.48%~55.00%。宫金良等^[13]为合理分配农业机器人协同作业中各机器人的工作量与工作区域，提高了机器人协同作业的整体效能与工作效率，提出一种复杂环境下异质农业机器人任务分配及全区域覆盖策略。改进的遗传算法所得到的遍历各分区的路径长度与收敛迭代次数较传统遗传算法分别减少了2.8%与69.5%，较模拟退火算法分别减少了9.3%与19.0%。姚竞发等^[14]为解决作业路径规划不当发生作业冲突、效率降低、成本增加等问题，以总作业时间和作业时长为综合优化目标，综合考虑联合收割机转弯和作业冲突情况，提出了联合收割机多机无冲突协同作业路径优化算法。CAO等^[15]针对农田作业环境下多台农机协同的全局路径冲突问题，以收获机和运粮车收获卸粮为应用场景，提出了基于地形图和时间窗的全局路径冲突检测算法。梁亚杰等^[16]以总作业时长为综合优化目标，综合各种不确定场景，针对轮式自动驾驶拖拉机，提出了改进的迭代贪婪方法进行多机动态路径规划，解决以往传统方法在不确定情况发生后路径规划结果低效甚至失效的问题。

农机田间作业的总时间可分为作业时间和非作业时

收稿日期: 2023-11-01 修订日期: 2023-12-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000600)

作者简介: 满忠贤，博士生，研究方向为智能农机自主作业技术。

Email: manzx@scau.edu.cn

※通信作者: 胡炼，博士，研究员，研究方向为智能农机装备和无人农场。

Email: lianhu@scau.edu.cn

间, 非作业时间直接影响作业效率, 其中无人化收获和运粮非作业时间可分为转弯时间和地头等待卸粮时间。当前研究以协同作业路径规划和任务分配为重点^[17-21], 且主要集中考虑田间最短路径优化^[22-25]。根据田间作业工艺和作业经验等对作业时间和地头转弯时间进行优化, 在收获-运粮协同作业模式下的收获机地头等待时间并没有过多的研究。此外, 稻田难以满足运粮货车进入田间进行转运的协同作业^[26-29], 尤其是连片稻田收获作业时货车无法靠近每块稻田, 而收获机粮仓满粮时停止收获作业并前往远处货车处卸粮影响了收获作业效率。本文以 2 台无人驾驶水稻联合收获机和 1 台运粮车协同作业为研究对象, 在最短路径的基础上研究智能农机多机协同收获作业的控制方法, 以减少农机非作业时间, 提高作业效率。

1 协同收获作业控制决策模型

指令型协同控制作业中主机和从机一般采用不同的农业机械, 本研究应用场景中, 收获机作为主机, 运粮车作为从机。每个待收获地块分配 1 台主机, 配备 1 台从机。从机根据主机的运行状态对其卸粮顺序进行排序, 并估算出主机的卸粮时间和位置, 当主机达到卸粮条件时向从机发送卸粮请求指令。从机到达主机的指定位置与主机协同完成卸粮任务, 之后主机继续作业, 从机驶向下一台主机的卸粮估算位置, 从机达到转运条件时, 驶向货车所在位置完成转运任务。

1.1 协同收获控制决策模型

多台收获机按照分配的地块进行收获作业, 本文以减少非作业时间为约束条件, 总作业时间最短为目标, 对协同卸粮控制决策进行优化。

为了实现上述优化目的, 收获机到达卸粮点的条件为:

$$t_{n1} = \frac{\sum_q^s \sigma d_{a_n(q)a_n(q-1)}}{v_n} + \frac{\lambda H_n}{v_n g_n f_{kn}} \quad (1)$$

式中 t_{n1} 表示收获机到达卸粮状态的时间, s; q 和 s 代表收获机从第 q 行到第 s 行; $a_n(q)$ 和 $a_n(q-1)$ 表示第 n 台机器第 q 行起点和 $q-1$ 行终点; q 表示作业行数; $d_{a_n(q)a_n(q-1)}$ 表示两行间距离, m; σ 为转弯距离系数, 为实际转弯路径与规划路径的比值; f_{kn} 为第 n 台收获机作业幅宽, m; λ 为水稻密度, kg/m³; v_n 为收获机行驶速度, m/s; H_n 为收获机粮仓容量, m³; g_n 为收获机单位面积收获量, kg/m²。

收获机的卸粮时间 t_{n2} 为

$$t_{n2} = \frac{\lambda H_n}{B_n} \quad (2)$$

式中 B_n 为第 n 台收获机卸粮效率, kg/s。

运粮车在田间的运移时间 t_{n3} 为

$$t_{n3} = \frac{d_{a_{n-1}(s)a_n(s)}}{v_y} \quad (3)$$

式中 $d_{a_{n-1}(s)a_n(s)}$ 为收获机从 $n-1$ 次卸粮位置到第 n 次卸粮位置的距离, m; v_y 为运粮车的行驶速度, m/s。

所采用的 2 台收获机的粮仓大小和收获速度基本相同, 若采用收获机仓满后再进行卸粮的方式, 2 台收获机可能同时到达卸粮条件, 一台收获机与运粮车协同卸

粮时, 另一台收获机会在卸粮位置等待运粮车, 造成非作业时间的增加。为减少非作业时间, 协同作业控制决策约束条件为

$$H_{s1} + H_{s2} \leq H_{sy} \quad (4)$$

$$\text{mint}(s, H_{sy}) \quad (5)$$

$$\begin{cases} t_{s1} = t_{sn1} \\ t_{s2} = t_{s1} + t_{sn2} + t_{sn3} \\ t_s = t_{s2} + t_y \\ \min T = \sum_{s=1}^r \text{mint}(s, H_{sy}) \end{cases} \quad (6)$$

式中 H_{s1} , H_{s2} , H_{sy} 分别表示收获机 1、收获机 2、运粮车在第 s 次协同卸粮任务中的粮食总量, kg; s , r 表示第 s 和 r 次协同卸粮任务 (运粮车从初始等待位置到下一次回到初始等待位置的过程); t_{s1} 和 t_{s2} 分别表示第 s 次协同卸粮任务中第一台和第二台收获机所需要的时间, s; t_{sn1} 表示第 s 次协同卸粮任务中第一台收获机达到卸粮条件所需时间, s; t_{sn2} 表示第 s 次协同卸粮任务中 2 台收获机卸粮所需的时间, s; t_{sn3} 表示第 s 次协同卸粮任务中运粮车前往下一台收获机所需的时间, s; t_y 表示第 s 次协同卸粮任务中运粮车返回卸粮所需要的总时间, s; t_s 表示第 s 次协同卸粮任务所需要的总时间, s; T 为协同收获的总时间, s; H_{sy} 表示第 s 次协同卸粮任务中运粮车的容量, m³。

收获机的卸粮条件可能会随时间而变化, 一台运粮车一次只能服务一台收获机, 服务的时间取决于收获的粮食总量。要保证协同收获的总时间最少, 就要合理地配置每一台收获机的收获顺序, 在一个协同卸粮任务中可能是先收先卸也可能是先收后卸。运粮车在某个状态下停留的时间不依赖于系统已经处于该状态的时间, 同时从一个状态转移到另一个状态的过程与之前状态和之后的状态无关^[30-32]。

1.2 模型优化

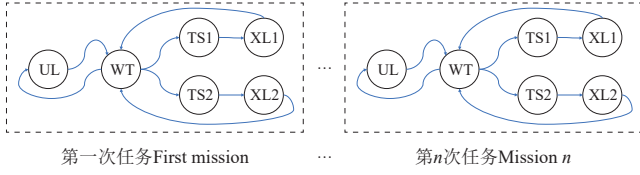
根据上述协同作业控制决策约束条件, 本文提出改进型连续时间马尔科夫链模型描述协同收获作业过程中的有限个状态。使用马尔科夫链预测未来一段时间内收获机的收获量。收获机的收获量直接影响协同作业中的等待时间, 进而影响整体作业时长。将 2 个马尔科夫链作为一个聚类, 代表一个协同卸粮任务, 根据总的卸粮任务数生成 s 个马尔科夫聚类。在每一个卸粮任务中, 主要有 4 种可能的状态: 等待召唤状态 (WT)、前往卸粮点状态 (TS)、协同卸粮状态 (XL) 和前往货车转运状态 (UL)。记一个聚类中的马尔科夫链的状态 i_s 到状态 j_s 的转移概率为 P_{sij} , 状态空间是有限集, 时间是连续的, 协同收获作业的马尔科夫链如图 1 所示。

在连续时间上, 马尔科夫模型 $PrX(t+s)$ 表示为

$$Pr\{X(t+s) = j_s | X(t) = i_s, X(u), 0 < u < t\} \quad (7)$$

式中 $X(t)$ 为协同卸粮任务中的随机状态; u 和 t 表示状态数。

在有限个状态随机过程中, 任意 i_s 到 j_s 的转移概率 $P_{sij}(n)$ 为



注：TS1、TS2 为运粮车前往第 1、第 2 台收获机状态；XL1、XL2 为第 1、第 2 台收获机向运粮车卸粮状态。WT 表示等待召唤状态，UL 表示前往货车转运状态。
Note: TS1 and TS2 indicate that the grain truck is going to the first and second harvesters; XL1 and XL2 are the state that the first and second harvesters are unloading grain to the grain truck. WT represents waiting for summoning status, UL represents the transfer status to the truck.

图 1 协同收获作业的马尔可夫链

Fig.1 Markov chain for collaborative harvesting

$$P_{sij}(n) = \frac{l_{ij}^n}{L_i} \quad (8)$$

式中 l_{ij}^n 表示状态 i_s 到 j_s 的转移次数， L_i 表示 i_s 出现的总次数。

运粮车在转移到另一种状态之前处于现有状态的概率 $P_{sij}X(t+s)$ 为

$$P_{sij}\{X(t+s) = i_s | X(t) = i_s\} = P_{sij}\{X(t) = i_s | X(0) = i_s\} \quad (9)$$

当运粮车从状态 i_s 到状态 j_s 的时间间隔极小时，协同作业中的等待时间最短，此时的 P_{sij} 可以表示为

$$P_{sij}\{X(t+\Delta t) = i_s | X(t) = i_s\} = P_{sij}\{X(\Delta t) = i_s | X(0) = i_s\} \quad (10)$$

式中 $P_{sij}(\Delta t)$ 为初始状态为 i_s 时经过 Δt 时间转移至状态 j_s 的概率。

根据式 (8) ~ (10)，将运粮车的状态转移概率转化为协同作业中等待时间的概率，当时间间隔无限小时可表示为

$$\begin{cases} q_{ij} = \frac{\lim_{\Delta t \rightarrow 0} P_{sij}(\Delta t)}{\Delta t}, i \neq j \\ q_{ii} = \frac{\lim_{\Delta t \rightarrow 0} P_{sii}(\Delta t)}{\Delta t} \end{cases} \quad (11)$$

式中 q_{ij} 和 q_{ii} 为状态转移速率。

每一个卸粮任务中有 4 种运行状态，各状态之间的时变概率构成的变概率矩阵为

$$P(\Delta t) = \begin{bmatrix} p_{11}(\Delta t) & p_{12}(\Delta t) & p_{13}(\Delta t) & p_{14}(\Delta t) \\ p_{21}(\Delta t) & p_{22}(\Delta t) & p_{23}(\Delta t) & p_{24}(\Delta t) \\ p_{31}(\Delta t) & p_{32}(\Delta t) & p_{33}(\Delta t) & p_{34}(\Delta t) \\ p_{41}(\Delta t) & p_{42}(\Delta t) & p_{43}(\Delta t) & p_{44}(\Delta t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

若连续时间马尔可夫链时具有有限空间 I ，则转移速率可以构成状态转移速率矩阵 Q ：

$$Q = \begin{bmatrix} -q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & -q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & -q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & -q_{44} \end{bmatrix} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(\Delta t) - I}{\Delta t} \quad (13)$$

I 状态转移速率矩阵 Q 每行的元素之和为 0。

假设系统处于 $i_s \geq 1$ ，只要有收获机需要卸粮或者卸粮完成（无论哪个收获机先触发条件），系统都会离开

状态 i_s 到达 j_s 。收获机到达卸粮条件的时间间隔 λ 服从指数分布，收获机的卸粮时间 μ 服从指数分布，因此运粮车完成一次协同卸粮的时间 $\mu + \lambda$ 服从指数分布。如果在运粮车完成卸粮之前下一台收获机达到卸粮条件的概率为 $q(i, i+1)$ ，类似地在运粮车完成卸粮之后下一台收获机达到卸粮条件的概率为 $q(i, i-1)$ ，其中：

$$\begin{cases} q(i, i+1) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \\ q(i, i-1) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \end{cases} \quad (14)$$

则根据连续时间马尔可夫链来分析协同卸粮过程，设 p_n 表示处于卸粮状态 n 的时间长度，基于 $PQ = 0$ 并且 μ_n 、 λ_n 存在内在联系可以得出：

$$\begin{cases} 0 = -(\mu_n + \lambda_n)p_n + \lambda_{n-1}p_{n-1} + \mu_{n+1}p_{n+1}, n \geq 1 \\ 0 = -\lambda_0 p_0 + \mu_1 p_1 \end{cases}$$

$$Q = \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda & 0 & 0 \\ \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda & 0 \\ 0 & \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda \\ 0 & 0 & \mu & -(\lambda + \mu) \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{\lambda + \mu} & 0 & \frac{\lambda}{\lambda + \mu} & 0 \\ 0 & \frac{\mu}{\lambda + \mu} & 0 & \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \\ 0 & 0 & \frac{\mu}{\lambda + \mu} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

记收获机的收获时间和卸粮时间为 $\lambda_n(\lambda_{n1}, \lambda_{n2})$ ， $\mu_n(\mu_{n1}, \mu_{n2})$ ，收获时间和卸粮时间的比值 ρ_n 为

$$\rho_n = \frac{\lambda_n}{\mu_n} = \frac{t_{n1}}{t_{n2}} \quad (16)$$

根据式 (15) 可得：

$$\begin{cases} p_n = \begin{cases} \rho_1^n p_0, 1 \leq n < k \\ \rho_1^{k-1} \rho^{n-k+1} p_0, 1 \leq n \leq k \end{cases} \\ \begin{cases} \rho_1 = \frac{\lambda}{\mu_1} \\ p_0 = \left(\sum_{n=0}^{k-1} \rho_1^n + \sum_{n=k}^{\infty} \rho_1^{k-1} \rho^{n-k+1} \right)^{-1} \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

式中 $\rho^{(k-1)}$ ， $\rho_2^{(n-k+1)}$ 表示收获机 1 和 2 第 $k-1$ 次收获时间和卸粮时间的比值； p_0 为马尔可夫链的预测初值； ρ_1 和 ρ_2 代表收获机 1 和 2 收获时间和卸粮时间； λ_1 和 λ_2 代表收获机 1 和 2 收获时间； μ_1 和 μ_2 代表收获机 1 和 2 的卸粮时间。

系统中每台收获机的平均卸粮次数 X_h 为

$$X = \sum_{n=0}^{\infty} n p_n = p_0 \left(\sum_{n=0}^{k-1} n \rho_1^n + \sum_{n=k}^{\infty} n \rho_1^{k-1} \rho^{n-k+1} \right) \quad (18)$$

利用利特尔法可得平均卸粮时间 W_q 为

$$W_q = \frac{1 - p_0}{\lambda} = Pr\{\text{收获机到达卸粮条件时另一台不卸粮}\} \quad (19)$$

结合式 (1) ~ (2) 和式 (19)，得出每一个卸粮任务中的收获机到达卸粮条件以及每台整个作业过程中收

获机的卸粮顺序,进而得到基于改进型连续时间马尔科夫链模型,如图2所示,算法实现过程如下:

- 1) 构建路径分配图。根据收获任务信息,多台收获机按照各自分配的地块进行收获作业。
- 2) 初始化估计参数。获取农机作业参数,生成协同作业控制决策约束条件。

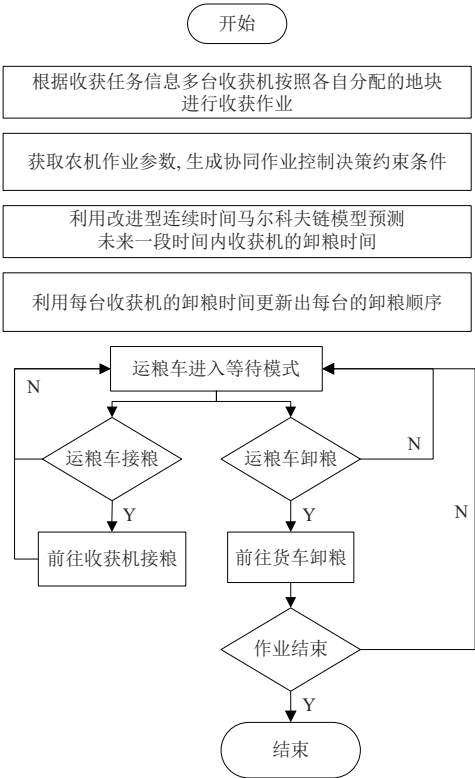


图2 改进型连续时间马尔科夫链模型
Fig.2 Improved continuous-time Markov chain model

3) 估计卸粮时间。利用改进型连续时间马尔科夫链模型预测未来一段时间内收获机的卸粮时间。

4) 卸粮顺序更新。利用每台收获机的卸粮时间更新出每台的卸粮顺序。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

收获机采用雷沃 GE80S-H 和洋马 YH1180 收获机,运粮车为雷沃 4 LZ-7G1,如图3所示。3 台农机均采用全电控底盘,具有线控的离合、割台、油门和履带行驶系统,采用 CAN (controller area network) 总线发送控制指令。无人驾驶系统由一体化显控终端和定位天线组成。显控终端集成高精度北斗定位模块,定位精度为 $10\text{ mm}+1\times10^{-6}$,航向精度 $0.2^\circ/l$ (l 为双天线基线长),控制器直线导航控制精度为 $\pm2.5\text{ cm}$,平均接行精度为 $\pm2.5\text{ cm}$;同时集成 4G 通讯模块,通过 MQTT (message queuing telemetry transport) 协议与无人农场云管控平台通讯,利用平台服务器实现多台农机之间的协同通讯。



图3 无人驾驶收获机实车试验
Fig.3 Real vehicle test of unmanned harvester
试验农机技术的参数如表1所示。

表1 农机技术参数表

Table 1 Table of technical parameters of agricultural machinery			
项目 Items	雷沃 GE80S-H 收获机 Lovol GE80S-H harvester	洋马 YH1180 收获机 Yanmar YH1180 harvester	雷沃 4 LZ-7G1 运粮车 Lovol 4 LZ-7G1 grain truck
外形尺寸 (长×宽×高)Outline dimension (Length× width× height) /mm×mm×mm	6 800×2 960×3 400	5 610×2 506×2 635	3 220×2 140×2 800
整体质量 Overall weight/kg	5 400	4 180	2 850
配套动力 Supporting power/kW	175	87.3	89
粮仓容积 Granary volume/L	2 100	2 100	4 100
喂入量 Feeding rate/ (kg · s ⁻¹)	6	6	

2.2 试验方法

2.2.1 仿真试验

为验证本文设计的多台农机协同作业智能控制方法的正确性和可行性,采用 Matlab 2019b 软件进行算法编程,并进行仿真试验。

GE80S-H 收获机和 YH1180 收获机(下文记为收获机 1 和收获机 2)的喂入量、粮仓容量和卸粮时间均相同,运粮车粮仓容量为收获机粮仓容量的 2 倍。设定收获机作业时长为 60 min,每 10 min 需要卸粮一次,每次卸粮时长 1 min,运粮车在 2 个田块之间的运移时间为 2 min,运粮车前往货车卸粮后返回田间的时间为 3 min,其余时间忽略不计。对照试验采用仓满停车召唤卸粮的方式。

2.2.2 田间试验

为验证智能农机多机协同收获作业控制方法的田间作业效率,在华南农业大学增城教学科研基地进行试验,试验场景如图4所示。田间试验的跟踪控制方法为自适应单神经元 PID 跟踪控制^[33],卸粮模式为收获机到达卸粮点等待运粮车^[34],利用无人农场云管控平台记录每一台农机所发送和接收到的控制指令。

- (1) 试验场景 1: 2 台收获机在同一较大面积地块作业,货车在道路上行驶,运粮车进入田中接粮转运。田块区域 1 和区域 2 的面积基本相同,协同卸粮在短边地头处进行,具体卸粮点由收获机发出的卸粮坐标确定。
- (2) 试验场景 2: 2 台收获机分别在不同田块(连片田块)作业,货车在道路上行驶,无法驶入机耕道,

需通过运粮车从各田块接粮并转运至货车上。田块 1 和田块 2 中采用本文提出的协同作业方法，收获机和运粮车先后从农机仓库出发自主前往各作业区域并进行自动作业，完成作业后返回农机仓库。

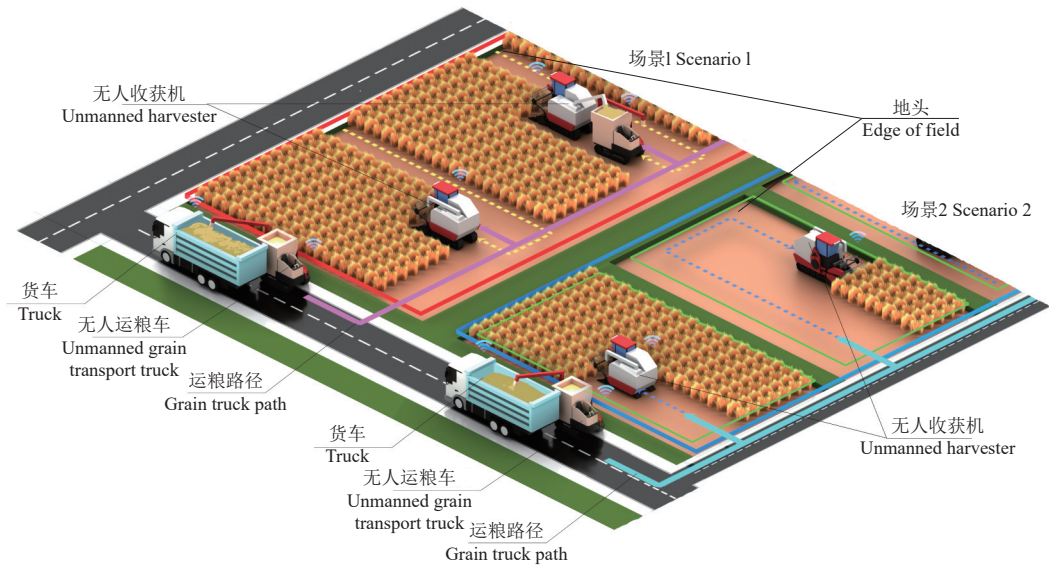


图 4 田间试验场景示意图
Fig.4 Schematic diagram of field test scene

3 试验结果与分析

3.1 仿真试验结果

仓满召唤卸粮方式的仿真结果如图 5 所示，作业时间如表 2 所示，在传统召唤卸粮模式中，当收获机 1 满仓时在地头等待运粮车，同时收获机 2 在地头等待运粮车，此时的等待时间就是本文所要优化的非作业时间。本文提出的智能农机多机协同收获作业控制方法的仿真结果如图 6 所示，通过调节每台收获机的作业时间避免另一台收获机等待，运粮车在完成收获机 1 的卸粮后到达收获机 2 的卸粮位置，此时收获机 2 恰好到达卸粮位置开始卸粮，节省了地头等待的非作业时间。仿真结果表明：本文提出的智能农机多机协同收获作业控制方法可以有效减少非作业时间，提高作业效率，与仓满召唤卸粮方式相比，收获机 1 和收获机 2 的作业完成时间减少了 10.25% 和 17.28%，运粮车的作业完成时间减少了 10.71%，协同收获平均作业完成时间减少了 13.58%。

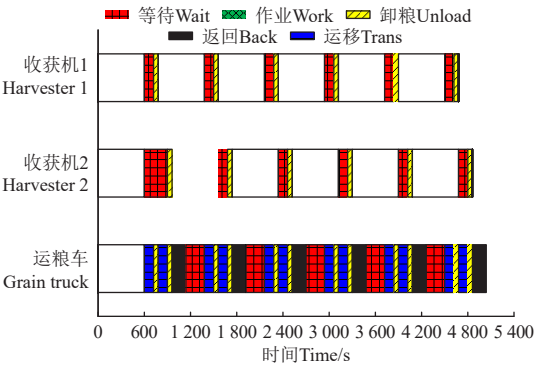


图 5 召唤卸粮仿真结果
Fig.5 Summoning unloading simulation results

表 2 作业时间汇总表

Table 2 Operation time summary table				
控制方法 Control method	机型 Type	完成时间 End time/min	等待时间 Wait time/min	卸粮次数 Unloading times
召唤卸粮 Summoning unloading	收获机 1 Harvester 1	78	12	6
	收获机 2 Harvester 2	81	15	6
	运粮车 Grain truck	84	30	6
本文方法 Method of this paper	收获机 1 Harvester 1	70	3	8
	收获机 2 Harvester 2	67	0	7
	运粮车 Grain truck	73	7	7

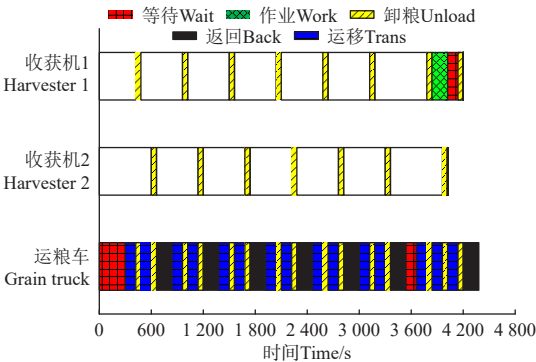


图 6 智能农机多机协同收获作业控制方法仿真结果
Fig.6 Simulation results of cooperative harvesting of multi-intelligent agricultural machinery

3.2 田间试验结果与分析

3.2.1 场景 1

场景 1 协同收获试验中，2 台收获机和运粮车作业轨迹如图 7 所示，按照本文方法计算出来的平均卸粮时间为 4.2 min，平均每圈卸粮 1 次，通过试验前收获量预估，每台收获机在收获完一圈时都要提前通知运粮车接粮。本文方法计算结果和试验前收获量预估结果基本一致。表 3 是协同收获前 4 次的网络通讯信息，根据表 3

获得的时间信息如图 8 所示。由表 3 和图 8 可知, 收获机每圈都要召唤运粮车协同转运, 平均卸粮时间为 4.1 min, 试验结果验证了所提方法的准确性。收获机 1 和收获机 2 召唤运粮车的时间相差不大, 收获机 2 地头等待的非作业时间逐渐减少, 2 台收获机的非作业时间分别为 3.45 和 6.95 min; 与仓满召唤卸粮模式相比, 2 台收获机的非作业时间分别减少了 71.25% 和 42%; 收获效率分别提高了 6.65% 和 5.22%。

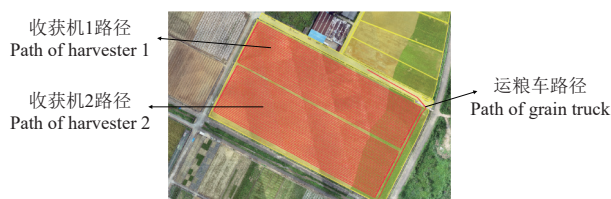


图 7 场景 1 收获作业轨迹

Fig.7 Harvest trajectory of Scenario 1

表 3 场景 1 网络通讯信息

Table 3 Scene 1 network communication information

时间 Time/s	消息传递 Message passing	作业状态 Working state	解析 Analysis
1506	收获机 1→运粮车	收获机 1 第 1 圈	收获机 1 召唤运粮车卸粮
1560	收获机 2→运粮车	收获机 2 第 1 圈	收获机 2 召唤运粮车卸粮
1689	运粮车→收获机 1		运粮车到达收获机 1 卸粮点
1670			收获机 1 开始卸粮
1931	收获机 1→运粮车		收获机 1 卸粮完成
1953	运粮车→收获机 2		运粮车到达收获机 2 卸粮点
1954			收获机 2 开始卸粮
2195	收获机 2→运粮车		收获机 2 卸粮完成
2620		第 1 次卸粮	运粮车返回货车转运
3430	收获机 1→运粮车	收获机 1 第 2 圈	收获机 1 召唤运粮车卸粮
3612	运粮车→收获机 1		运粮车到达收获机 1 卸粮点
3613			收获机 1 开始卸粮
3693	收获机 2→运粮车	收获机 2 第 2 圈	收获机 2 召唤运粮车卸粮
3855	收获机 1→运粮车		收获机 1 卸粮完成
3880	运粮车→收获机 2		运粮车到达收获机 2 卸粮点
3881			收获机 2 开始卸粮
4120	收获机 2→运粮车		收获机 2 卸粮完成
4538		第 2 次卸粮	运粮车返回货车转运
5352	收获机 1→运粮车	收获机 1 第 3 圈	收获机 1 召唤运粮车卸粮
5530	运粮车→收获机 1		运粮车到达收获机 1 卸粮点
5531			收获机 1 开始卸粮
5630	收获机 2→运粮车	收获机 2 第 3 圈	收获机 2 召唤运粮车卸粮
5673	收获机 1→运粮车		收获机 1 卸粮完成
5695	运粮车→收获机 2		运粮车到达收获机 2 卸粮点
5696			收获机 2 开始卸粮
6034	收获机 2→运粮车		收获机 2 卸粮完成
6460		第 3 次卸粮	运粮车返回货车转运
7280	收获机 1→运粮车	收获机 1 第 4 圈	收获机 1 召唤运粮车卸粮
7462	运粮车→收获机 1		运粮车到达收获机 1 卸粮点
7463			收获机 1 开始卸粮
7531	收获机 2→运粮车	收获机 2 第 4 圈	收获机 2 召唤运粮车卸粮
7710	收获机 1→运粮车		收获机 1 卸粮完成
7738	运粮车→收获机 2		运粮车到达收获机 2 卸粮点
7739			收获机 2 开始卸粮
7982	收获机 2→运粮车		收获机 2 卸粮完成
7983		第 4 次卸粮	运粮车返回货车转运

3.2.2 场景 2

场景 2 协同收获试验中, 2 台收获机和运粮车按

照预定路径进行作业, 作业轨迹如图 9 所示, 每台收获机规划 5 圈作业, 运粮车进行 3 次转运。按照本文方法计算的平均卸粮时间为 3.3 min, 平均每 3 圈卸粮 1 次。表 4 是网络通讯信息, 根据表 4 得到的时间信息如图 10 所示。

由表 4 和图 9 可知, 运粮车转运的收获圈数分别为 3、4 和 3 圈, 平均卸粮时间为 3.55 min, 2 台收获机的作业完成时间分别为 54.67 和 59.66 min, 非作业时间为 1.9 和 5.85 min; 相对于仓满召唤卸粮模式, 2 台收获机的非作业时间分别减少了 77.64% 和 37.09%; 收获效率分别提高了 12.07% 和 5.78%。

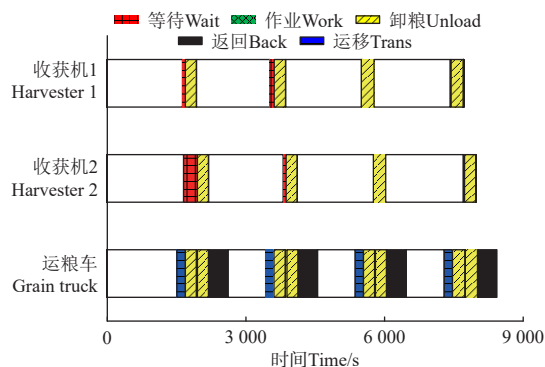


图 8 场景 1 协同收获试验时间窗

Fig.8 Scenario 1 time window of collaborative harvest experiment

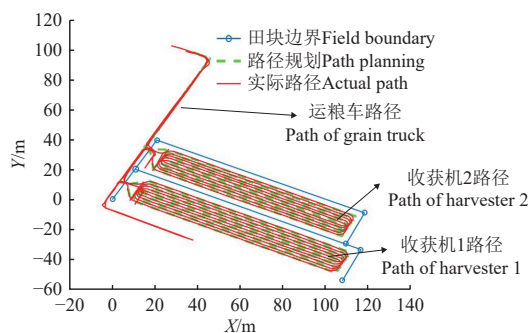


图 9 场景 2 协同收获试验时间窗

Fig.9 Scenario 2 time window diagram of collaborative harvest test

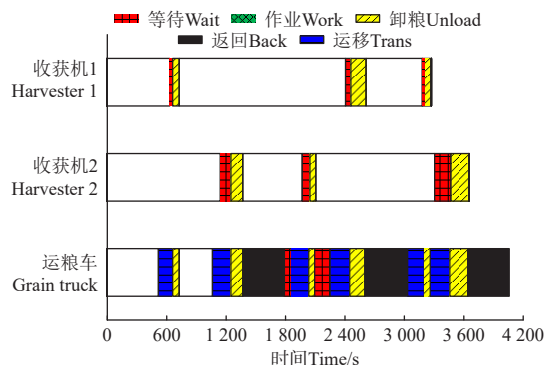


图 10 场景 2 收获作业轨迹

Fig.10 Harvest trajectory of Scenario 2

表 4 场景二网络通讯信息
Table 4 Scenario 2 network communication information

时间 Time/s	消息传递 Message passing	作业状态 Working state	解析 Analysis
522	收获机 1→运粮车	收获机 1 第 1 圈	收获机 1 召唤运粮车卸粮
661	运粮车→收获机 1		运粮车到达收获机 1 卸粮点
662			收获机 1 开始卸粮
729	运粮车→收获机 1	收获机 2 第 2 圈	收获机 1 卸粮完成
1070	收获机 2→运粮车		收获机 2 召唤卸粮
1246	运粮车→收获机 2		运粮车到达收获机 2 卸粮点
1248		第 1 次卸粮	收获机 2 开始卸粮
1360	收获机 2→运粮车		收获机 2 卸粮完成
1792			运粮车返回货车转运
1859	收获机 2→运粮车	收获机 2 第 3 圈	收获机 2 召唤运粮车卸粮
2041	运粮车→收获机 2		运粮车到达收获机 2 卸粮点
2042			收获机 2 开始卸粮
2101	收获机 2→运粮车	收获机 1 第 4 圈	收获机 2 卸粮完成
2264	收获机 1→运粮车		收获机 1 召唤卸粮
2463	运粮车→收获机 1		运粮车到达收获机 1 卸粮点
2464		第 2 次卸粮	收获机 1 开始卸粮
2618	收获机 1→运粮车		收获机 1 卸粮完成
3063			运粮车返回货车转运
3110	收获机 1→运粮车	收获机 1 第 5 圈	收获机 1 召唤卸粮
3242	运粮车→收获机 1		运粮车到达收获机 1 卸粮点
3243			收获机 1 开始卸粮
3280	收获机 1→运粮车	收获机 2 第 5 圈	收获机 1 卸粮完成
3281	收获机 2→运粮车		收获机 2 召唤运粮车卸粮
3465	运粮车→收获机 2		运粮车到达收获机 2 卸粮点
3466		第 3 次卸粮	收获机 2 开始卸粮
3577	运粮车→收获机 2		收获机 2 卸粮完成
3999			运粮车返回货车转运

4 结 论

本文提出了智能农机多机协同收获作业的控制方法，建立了改进型连续时间马尔科夫链模型，并通过 2 台收获机和 1 台运粮车的水稻收获协同作业对所提方法进行仿真和试验验证，主要结论如下：

1) 在仿真试验中，相较于仓满召唤卸粮方式，智能农机多机协同收获作业控制方法，收获机 1 和收获机 2 的作业完成时间分别减少了 10.25% 和 17.28%，运粮车的作业完成时间减少了 10.71%，协同收获任务农机平均作业完成时间减少了 13.58%，验证了本文算法的有效性。

2) 在 2 个应用场景开展了智能农机多机协同收获作业控制的试验。由试验结果可知，在场景 1 中，相对于仓满召唤卸粮模式，收获机 1 和收获机 2 的非作业时间分别减少了 71.25% 和 42%，收获效率分别提高了 6.65% 和 5.22%；在场景 2 中，相对于仓满召唤卸粮模式，收获机 1 和收获机 2 的非作业时间分别减少了 77.64% 和 37.09%，收获效率分别提高了 12.07% 和 5.78%。实现了水稻收获/卸粮转运自主作业，减少了收获机的非作业时间，提高了水稻收获效率，可为无人农场智能协同收获作业提供支撑。

3) 本文提出的多台农机的协同作业可以根据实际情况增加或减少智能农机的数量，建立新的马尔科夫链便会合理地配置每一台收获机的收获顺序。同时本文所提出的 2 种场景包含了绝大多数田块的情况，其他场景也可以经过分割或者分配成为本文所试验的 2 种场景。对于更大的作业田块，由于收获机的粮仓容量有限，一圈

收获作业需进行多次卸粮，后续将进一步优化算法以提高适应性。

[参 考 文 献]

[1] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42 (6): 8-17.

LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8-17. (in English with Chinese abstract) (in Chinese with English abstract)

[2] 潘彪, 田志宏. 中国农业机械化高速发展阶段的要素替代机制研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 1-10.

PAN Biao, TIAN Zhihong. Mechanism of factor substitution during rapid development of China's agricultural mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(9): 1-10. (in Chinese with English abstract)

[3] 翟长远, 杨硕, 王秀, 等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2022, 53 (4): 1-20.

ZHAI Zhangyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and Prospect of Intelligent Measurement and Control Technology for Agricultural Equipment[J]. 2022, 53(4): 1-20. (in Chinese with English abstract)

[4] 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]. 2020, 51(7): 1-12. (in Chinese with English abstract)

[5] 罗锡文, 王在满, 曾山, 等. 水稻机械化直播技术研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 1-13.

LUO Xiwen, WANG Zaiman, ZENG Shan, et al. Recent advances in mechanized direct seeding technology for rice[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 1-13. (in Chinese with English abstract)

[6] , 王博, 毛罕平, 王亚娜等. 多维度农机多机协同技术采纳影响因素与作用机制研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54 (1): 45-53.

WANG Bo, MAO Hanping, WANG Yana, et al. Influencing factors and mechanism of multi-dimensional agricultural machinery collaborative technologies adoption[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 45-53. (in Chinese with English abstract)

[7] 李寒, 钟涛, 张可意, 等. 基于 WebGIS 的农机多机协同导航服务平台设计[J]. 农业机械学报, 2022, 53 (S1): 28-35.

LI Han, ZHONG Tao, ZHANG Keyi, et al. Design of

- agricultural machinery multi-machine cooperative navigation service platform based on WebGIS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 28-35. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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 Yuhao, 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 with English abstract)
- [9] LI S, MAN Z, NING W, et al. Intelligent scheduling method for multi-machine cooperative operation based on NSGA-III and improved ant colony algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204:107532
- [10] 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(S1): 34-39.
CAO R, LI S, JI Y, et al. Multi-machine Cooperation Task Planning Based on Ant Colony Algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(S1): 34-39. (in Chinese with English abstract)
- [11] 翟志强, 王秀倩, 王亮, 等. 面向主从跟随协同作业的导航路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(S1): 542-547.
ZHAI Zhiqiang, WANG Xiuqian, WANG Liang, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(S1): 542-547. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王猛, 赵博, 刘阳春, 等. 基于多变异分组遗传算法的多机协同作业静态任务分配[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 19-28.
WANG Meng, ZHAO Bo, LIU Yangchun, et al. Static task allocation for multi-machine cooperation based on multi-variation group genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 19-28. (in Chinese with English abstract)
- [13] 宫金良, 王伟, 张彦斐, 等. 基于农田环境的农业机器人协同作业策略[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 11-19.
GONG Jinliang, WANG Wei, ZHANG Yanfei, et al. Cooperative working strategy for agricultural robot groups based on farmland environment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(2): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [14] 姚竞发, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(17): 12-18. (in Chinese with English abstract)
- [15] CAO R, GAO Y, ZHANG Z, et al. Global path conflict detection algorithm of multiple agricultural machinery cooperation based on topographic map and time window[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 208:107773
- [16] 梁亚杰, 杨丽丽, 徐媛媛, 等. 不确定场景下无人农机多机动态路径规划方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 1-8.
LIANG Yajie, YANG Lili, XU Yuanyuan, et al. Dynamic path planning method for multiple unmanned agricultural machines in uncertain scenarios[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(21): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王猛, 赵博, 刘阳春, 等. 同种农机机群动态作业任务分配方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 199-210.
WANG Meng, ZHAO Bo, LIU Yangchun, et al. Dynamic task allocation method for the same type agricultural machinery group[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 199-210. (in Chinese with English abstract)
- [18] , 姚竞发, 刘静, 滕桂法等. 机群协同作业路径动态优化[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 103-110.
YAO Jingfa, LIU Jing, TENG Guifa, et al. Dynamic optimization of cooperative operation path of cluster[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6): 103-110. (in Chinese with English abstract)
- [19] JING H, YAO L, QUAN Q, et al. An autonomous task assignment and decision-making method for coverage path planning of multiple pesticide spraying UAVs[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212:108128
- [20] CAO R, LI S, YU J, et al. Task assignment of multiple agricultural machinery cooperation based on improved ant colony algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182:105953
- [21] 康守强, 李坤, 王本宽, 等. 多计算任务调度优化的机载智能状态监测单元[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 58-68.
KANG Shouqiang, LI Kun, WANG Benkuan, et al. Airborne intelligent state monitoring unit for multi-computing task scheduling optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(03): 58-68. (in Chinese with English abstract)
- [22] LI T, HONGTAO Z, JIAQI S, et al. A robust multiple unmanned aerial vehicles 3D path planning strategy via improved particle swarm optimization[J]. Computers and Electrical Engineering, 2023, 111(PA):108947
- [23] 王宁, 韩雨晓, 王雅萱, 等. 农业机器人全覆盖作业规划

- 研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53 (S1): 1-19.
- WANG Ning, HAN Yuxiao, WANG Yaxuan, et al. Research progress on full coverage operation planning of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 1-19. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陈凯, 解印山, 李彦明等. 多约束情形下的农机全覆盖路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53 (5): 17-26+43.
- CHEN Kai, JIE Yinshan, LI Yanming, et al. Full coverage path planning method of agricultural machinery under multiple constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 17-26. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 140-148. (in Chinese with English abstract)
- [26] GEORGE A, YAEI E. Human-robot collaboration systems in agricultural tasks: A review and roadmap[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204.107541
- [27] 曹如月, 李世超, 魏爽等. 基于 Web-GIS 的多机协同作业远程监控平台设计[J]. 农业机械学报, 2017, 48 (S1): 52-57+14.
- CAO R, LI S, WEI S, et al. Design of remote monitoring platform for multi-machine cooperative operation based on Web-GIS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(S1): 52-57. (in Chinese with English abstract).
- [28] AMALIA U, TORSTEN R. Navigating route planning for multiple vehicles in multifield agriculture with a fast hybrid algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212.108021
- [29] 张闻宇, 张智刚, 罗锡文, 等. 收获机与运粮车纵向相对位置位速耦合协同控制方法与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 1-11.
- ZHANG Wenyu, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Position-velocity coupling control method and experiments for longitudinal relative position of harvester and grain truck[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李浩, 林湘宁, 喻锐, 等. 基于连续时间马尔可夫链的继电保护装置动作行为预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (S1): 121-128.
- LI Hao, LIN Xiangning, YU Kun, et al. Based on continuous time markov chain prediction model of action behavior of relay protection device[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 121-128. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王瑞, 肖冰松. 基于改进鸽群优化和马尔可夫链的多无人机协同搜索方法[J]. 工程科学学报, 2019, 41 (10): 1342-1350.
- WANG Rui, XIAO Bingsong. Cooperative search for multi-UAVs via an improved pigeon-inspired optimization and Markov chain approach[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(10): 1342-1350. (in Chinese with English abstract)
- [32] 郭佳, 马朝斌, 张绍博, 等. 优化的马尔可夫链人工蜂群算法[J]. 计算机科学与探索, 2020, 14(6): 985-995.
- GUO Jia, MA Chaobin, ZANG Shaobo, et al. Optimized artificial bee colony algorithm with Markov chain[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2020, 14(6): 985-995. (in Chinese with English abstract)
- [33] DING F, ZHANG W, LUO X, et al. Gain self-adjusting single neuron PID control method and experiments for longitudinal relative position of harvester and transport vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213.108215
- [34] ZHANG W, HU L, DING F, et al. Parking precise alignment control and cotransporter system for rice harvester and transporter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215.108443

Method and test for operating multi-machine cooperative harvesting in intelligent agricultural machinery

MAN Zhongxian, HE Jie, LIU Shanqi, YUE Mengdong, HU Lian^{*}, HUANG Peikui, WANG Pei, LUO Xiwen

(1. Key Laboratory of Key Technology for South Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Artificial Intelligence (GDKL-AAI), Guangzhou 510642, China)

Abstract: This study aims to improve the cooperative operation efficiency of multiple unmanned intelligent harvesters and grain trucks. A control system of multi-machine cooperative harvesting was proposed in the intelligent agricultural machinery. Two types of rice harvesters and one-grain truck were also taken as the research objects. An improved model of a continuous-time Markov chain was established for the finite state processes in the collaborative harvesting operation, according to the constraints of control decisions. The unloading conditions of harvesters varied greatly over time. A grain truck only served one harvester at a time, while the service time depended on the total amount of grain harvested. The minimum total time of collaborative harvesting was highly required to configure the harvesting sequence of each harvester. Particularly, there was the tradeoff between harvesting first or unloading first in a collaborative grain unloading task. The time that the grain truck stayed in a certain state was independent of that in the system. The process of transferring from one state to another was also unrelated with the previous and subsequent state. The unloading sequence and time of each harvester were predicted and dynamically updated to reduce the non-operation time using the improved model. The simulation results show that the control system of multi-machine cooperative harvesting effectively reduced the non-operation time for the high working efficiency. The completion time of grain truck, harvesters 1 and 2 was reduced by 10.71%, 10.25%, and 17.28%, respectively, compared with the full warehouse calling for grain unloading. The average completion time of agricultural machinery was reduced by 13.58% for the cooperative harvesting task. The waiting time was also greatly reduced in the grain unloading area. The field experiments show that the control system of multiple intelligent agricultural machineries was realized in the cooperative autonomous operation of two rice harvesters and one-grain truck. In scenario 1, there was a similar time for harvesters 1 and 2 to call the grain truck. The non-operation time for the two harvesters was 3.45 and 6.95 min, respectively. Among them, the non-operation time was gradually reduced for harvester 2 to wait in the field. The non-operation time of harvesters 1 and 2 decreased by 71.25% and 42%, respectively, whereas, the harvest efficiency increased by 6.65% and 5.22%, respectively, compared with the full-call grain unloading. In scenario 2, the intelligent agricultural machinery was able to independently enter the grain unloading area. The average non-operation and the completion time of the two harvesters were 54.67 and 59.66 min, respectively. The non-operation time of harvesters 1 and 2 decreased by 77.64% (1.9 min) and 37.09% (5.85 min), respectively, whereas, the harvest efficiency increased by 12.07% and 5.78%, respectively. The autonomous operation of harvesting/unloading transportation was realized to reduce the non-operation time of harvester for the high efficiency. Two scenarios can be expected to allocate the other ones in the vast majority of fields. The findings can provide support to the intelligent harvesting collaborative operation in unmanned farms. The improved model can also be further optimized for the scenarios when a circle of harvesting operation cannot be completed in a larger field, due to the limited granary capacity of the harvester.

Keywords: agricultural machinery; unmanned farm; harvest; multi-machine cooperation strategy; transport grain