

# 基于快速扩展随机树的小麦收割机作业路径智能控制方法

钱桂名<sup>1</sup>

QIAN Guiming

## 摘要

小麦收割机作业受农田地形和作物分布、农田尺寸和形状等多种因素的影响,造成小麦收割机的路径智能控制效果不佳,导致收割效率和小麦收割质量相对偏低,提出基于快速扩展随机树的小麦收割机作业路径智能控制方法。从路径的起点到终点都是作业区域点,每个作业区域点收割任务一次完成,不能重复路过两次,所有作业区域点收割任务不能超过收割机预算时间为约束,建立了小麦收割机作业路径控制数学模型。将小麦收割机在待收割小麦农田中开始收割起始点作为扩展树的根节点,让小麦收割机从根节点出发,随机扩展选取小麦收割机的下一个可移动位置,对构建目标函数进行寻优。通过在整个自由空间生成一棵扩展随机树的方法,控制小麦收割机在最优可行路径上。测试结果表明,所提路径控制方法综合考虑了单位面积油耗和收割效率,能够在同样时间内完成更多的收割作业,具有更高的收割效率和小麦收割质量,提高了作业效率和生产能力。

## 关键词

快速扩展随机树;小麦收割机;作业路径;智能控制;数学描述;根节点;扩展随机树

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.02.041

## 0 引言

小麦收割机<sup>[1-2]</sup>作为现代化农业的重要工具,对于提高农业生产效率、降低农业劳动力需求和增加农民收入等方面都具有重要的价值。小麦收割机的广泛应用,显著提高了农业生产效率。但是在其应用过程中,路径规划<sup>[3-4]</sup>通常依赖于操作员的经验和直觉,缺乏科学的分析和优化。受农田地形、作物分布等因素的影响,作业路径不够优化、效率较低。随着智能农业技术的不断发展,相关研究不断取得进展。

黄海峰<sup>[5]</sup>提出以联合收割机协同作业过程为对象,分析了行进速度、作业幅宽和单台收割机作业成本等因素,根据分析结果提出了一种以收割成本控制为目标的联合收割机作业路径控制优化算法,并采用DCS技术搭建了联合收割机系统作业调度控制系统。陈飞燕等人<sup>[6]</sup>通过建立农机站和配置收割机的车型,解决了农机调度不合理的问题。通过分析散户订单的时间窗、作业时间以及农田的大小,确定了农机站中收割机的数量配置和收割机的区域配置。许娜等人<sup>[7]</sup>将基于PCA和模板匹配的方法引入联合收割机控制系统中,以提高对高分辨率可见光农田路标导航图像的目标识别能力。通过PCA算法对分割图像进行特征提取和主成分分析,并将图像主轴旋转到水平方向与训练样本库进行匹配,从而识别出导航路标并生成预设的路径。

上述方法虽然实现了路径规划,但是往往无法灵活应对突发的情况和变化。如果出现农田内部的障碍物或不可行的区域,操作员需要停止作业或手动绕过,造成时间和资源的额外消耗。快速扩展随机树(rapidly exploring random tree, RRT)算法<sup>[8]</sup>是一种高效且可扩展的路径规划算法,能够通过随机采样和快速生长的方式快速生成路径树,并找到连接起点和目标的最优路径。因此,为了减少作业过程中的资源浪费,通过智能规划路径和避开障碍物的方式,优化作业路线、提高作业效率。本文从小麦收割机作业路径的角度出发,设计了一种智能控制方法,以保障控制效果。

## 1 小麦收割机作业路径智能控制方法设计

### 1.1 小麦收割机作业二维路径控制目标函数设计

为了能够实现对小麦收割机作业路径的有效控制,全面、系统地分析小麦收割机作业路径控制问题是极为必要的。为此,本文首先对小麦收割机作业路径控制问题转换为一种数学描述,如图1所示。

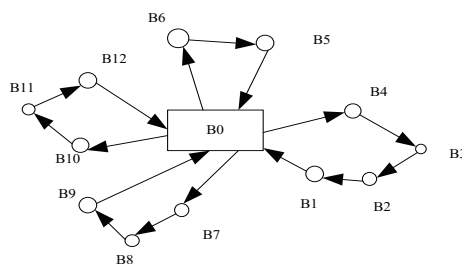


图1 小麦收割机作业路径控制问题数学描述

图 1 中基本体现了 B0 到 Bi 所有可执行的运动路径，即后续的小麦收割机作业路径控制问题可以转换为最优路径的确定问题，对应的目标为保障所有区域小麦收割都能够完整进行。在此基础上，本文将小麦收割机作业路径控制问题转化为能耗最低、所需时间最少或行驶路线最短的选择问题。

本文以行驶路线最短为优化目标<sup>[9]</sup>，对小麦收割机作业路径进行控制时，为了保障其能够满足实际应用需求，设置了假设条件，即小麦收割机在换区作业中的行走速度为定值，各路线通行状态一致，行驶费用和所需时间与路程成正比，小麦收割机全程无故障，所有费用均来自行驶费用。此时，小麦收割机路径 Y 轴上控制目标函数可以描述为：

$$y_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{done} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $y_{ki}$  表示小麦收割机路径控制目标函数；*done* 表示待收割小麦农田中点 *i* 任务在第 *k* 个顺利完成；*else* 表示待收割小麦农田中点 *i* 任务在第 *k* 个未顺利完成。根据得到的小麦收割机路径控制目标函数，获取当前小麦收割机作业路径 X 轴控制目标函数为：

$$x_{ij} = \begin{cases} y_{ki}/\gamma, & \text{done'} \\ 0, & \text{else'} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $x_{ij}$  表示当前小麦收割机作业路径；*done'* 表示待收割小麦农田中收割机从点 *i* 到点 *j* 的收割任务顺利完成； $\gamma$  表示作业路径控制中的影响因素，包括农田地形和作物分布、农田尺寸和形状、障碍物和限制区域等；*else'* 表示待收割小麦农田中收割机从点 *i* 到点 *j* 的收割任务未顺利完成。

按照上述所示的方式，获取当前小麦收割机作业路径在二维坐标上的目标函数，为下一步设计小麦收割机作业路径控制智能控制方法奠定了基础。

## 1.2 基于快速扩展随机树的小麦收割机作业路径控制

结合 1.1 部分得到的当前小麦收割机作业路径控制问题的数学描述结果可以看出，小麦收割机作业路径智能控制问题可以理解为是在多约束下，对目标函数进行寻优。针对此，本文在具体的控制过程中引入了快速扩展随机树（RRT 算法）。

RRT 算法<sup>[10]</sup>的基本原理是将小麦收割机在待收割小麦农田中开始收割起始点作为扩展树的根节点，让移动小麦收割机从根节点出发，随机扩展选取新的节点（也就是小麦收割机的下一个可移动位置），通过在整个自由空间生成一棵扩展随机树的方法来获得一条可行路径。在上文小麦收割机作业路径控制目标函数的基础上，设定约束条件，包括行驶距离和时间，可用以下公式表示为：

$$C = \frac{k_1 \times d + k_2 \times t}{x_{ij}} \quad (3)$$

式中：*C* 表示小麦收割机行驶路径的约束条件； $k_1$  和  $k_2$  分别表示小麦收割机的行驶距离权重系数和行驶时间权重系数；*d* 为行驶距离；*t* 为行驶时间。

在此基础上，本文设计以 RRT 算法为基础的小麦收割机作业路径控制，实现步骤如下。

(1) 初始化：将起始点作为扩展树的根节点，随机选择一个初始节点，并将其加入到扩展树中。

(2) 从扩展树中随机选择一个节点 *vnew* 作为新的扩展节点，并计算其与已扩展节点集合的距离。

(3) 在已扩展节点集合中寻找与 *vnew* 距离最近的节点 *vold*，具体的实现方式如图 2 所示。

```
for j in range(len(tree)):
    if tree[j] not in visited_nodes and cost_map[tree[j].x][tree[j].y] != float('inf'):
        parent = tree[j]
        child = node
        while True:
            cost = cost_map[parent.x][parent.y] + distance(parent, child) + time
            if child not in visited_nodes or cost < cost_map[child.x][child.y]:
                cost_map[child.x][child.y] = cost
                child.parent = parent
                child.cost = cost
                visited_nodes.add(child)
            if child == goal_node:
                break
            parent = child
            child = Node(random.randint(0, 100), random.randint(0, 100))
            if parent not in visited_nodes:
                break
        tree.append(child)
```

图 2 扩展节点计算方式

从图 2 可以看出，“节点”代表小麦收割机的位置，“距离”代表两个节点之间的距离，“时间”代表小麦收割机从一个节点移动到另一个节点所需的时间，“能耗”代表行驶能耗，包括距离和时间。

(4) 以 *vnew* 为根节点，*vold* 为父节点，生成新的子树，具体的输出结果可以表示为：

$$\text{if } \text{node.parent} \neq \text{None}: \text{print}(f"\text{Node } (\{\text{node.x}\}, \{\text{node.y}\}) - \text{Parent } (\{\text{node.parent.x}\}, \{\text{node.parent.y}\}) - C \{\text{node.cost}\}") \quad (4)$$

式中：*node* 是一个类，表示一个节点，也就是小麦收割机可执行的路径。

(5) 在约束下对目标函数进行迭代寻优，以减小扩展树的规模，具体的实现方式可以表示为：

$$P_{\text{node}} = \frac{n_{\text{curr}}}{n_{\text{iter}}} \times \frac{C}{\lambda} \quad (5)$$

式中： $P_{\text{node}}$  表示剪枝节点， $n_{\text{curr}}$  表示  $x_{\text{new}}$  的备选父节点， $n_{\text{iter}}$  表示所有邻近节点， $\lambda$  表示路径代价最小系数。在此过程中，检查新生成的子树是否满足所有约束条件。如果满足，将其加入到扩展树迭代，并更新已扩展节点集合；否则，返回步骤 (2)。

(6) 如果扩展树的节点数量达到 *N* 或者满足最大迭代次数，则停止算法执行；否则，返回步骤 (2)。

按照上述所示的方式，从已扩展节点集合中输出满足所有约束条件的目标函数解，即为本文控制小麦收割机作业路

径的执行轨迹。

## 2 应用测试

### 2.1 测试场地信息

为了能够更加直观地分析本文设计小麦收割机作业路径智能控制方法的实际应用效果,本文开展了对比测试。本次实验选择一块位于某省的小麦农田作为实验场地。对测试场地的具体情况进行基础统计。在测试开始前,对测试场地进行了详细的勘察和信息收集,具体情况如表1所示。

表1 待收割农田相关信息

| 编号 | 参数                        | 信息        |
|----|---------------------------|-----------|
| 1  | 地形起伏峰值/m                  | 0.36      |
| 2  | 最大坡度/°                    | 10.24     |
| 3  | 地块面积/亩                    | 116.8     |
| 4  | 小麦密度/(株·亩 <sup>-1</sup> ) | 70万       |
| 5  | 小麦生长高度/m                  | 18.0~22.4 |

### 2.2 测试方案设计

在上述环境中进行应用测试,具体测试方案如下。

#### (1) 小麦收割机参数初始化

本次实验使用的小麦收割机为北京雷沃重工股份有限公司生产的4LZ-9B秸秆回收型小麦收割机,具有较高的收割效率和良好的作业性能。该小麦收割机收割现场如图3所示。



图3 小麦收割机收割现场示意图

为了保证实验中测试小麦收割机不会突发故障,导致无法行进,在实验前对其参数进行初始化处理,结果如表2所示。

表2 小麦收割机参数表

| 参数                           | 数值    |
|------------------------------|-------|
| 发动机马力/HP                     | 200   |
| 发动机转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 2200  |
| 喂入量/(kg·s <sup>-1</sup> )    | 9     |
| 工作效率/(亩·h <sup>-1</sup> )    | 12~22 |
| 作业宽幅/mm                      | 2750  |

#### (2) 利用MATLAB软件模拟作业线路

根据测试场地信息和农田小麦生长状况,整体收割路径规划的制定是根据地块的大小和形状,将地块分为若干个区域,按照自北向南的顺序进行收割。其中,具体规划方案如图4所示。

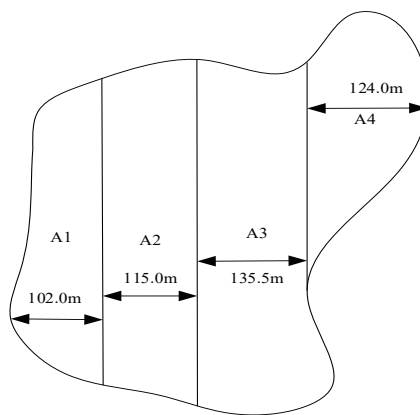


图4 测试场地收割划分方案示意图

按照图4所示的方式,将测试场地收割划分为A1、A2、A3、A4四个区域,对应的最大宽度分别为102.0m、115.0m、135.5m以及124.0m。

#### (3) 在测试小麦收割机上配置不同的控制算法

选取4台完全一致的目标小麦收割机,分别配备本文提出的基于快速扩展随机树的小麦收割机作业路径智能控制方法、文献[5]提出的基于DCS技术的作业路径控制方法,文献[6]提出的面向散户订单的收割机区域路径优化方法,以及文献[7]提出的基于PCA模式识别算法的收割机自主路径规划方法。

配备不同控制方法后,小麦收割机能够根据场地信息和小麦生长状况,自动规划出最优的收割路径,同时具备自动导航、故障诊断等功能。同时为确保实验数据的准确性和可靠性,小麦收割机配备了高精度GPS设备,能够实时获取精确的地理位置信息。

#### (4) 选取指标完成测试

为了更全面验证所提方法的控制效果,通过对比不同控制方法下的单位面积小麦收割机油耗以及麦秆切割不干净、麦粒脱离不彻底、单位面积收割效率的情况,对不同的控制方法作出客观评价。

### 2.3 测试结果与分析

首先进行主观验证,以全部需收割区域为测试区域,分别利用四种方法对目标小麦收割机路径进行控制,对控制后的覆盖效果进行分析,以覆盖区域的大小判断不同方法的控制效果,结果如图5所示。



(a) 本文设计路径控制方法 (b) 文献[5]路径控制方法





(c) 文献 [6] 路径控制方法      (d) 文献 [7] 路径控制方法

图 5 不同方法的控制效果测试分析

由图 5 可知，本文设计路径控制方法相较于文献 [5]、文献 [6] 和文献 [7] 控制后的作业覆盖区域更广，基本实现了全覆盖，而三种对比方法都遗漏了较大的待收割区域，由此证明了本文设计路径控制方法具有更好的控制效果。

为了进一步验证不同方法的控制效果，在测试过程中，四种方法分别对应 A1、A2、A3、A4 四个区域，完成收割后，对具体的收割效果进行对比分析，其中，表 3 展示了四种不同方法的单位面积油耗、麦秆切割不干净率、麦粒脱离不彻底率和单位面积收割效率。

表 3 不同方法测试结果对比表

| 指标                                | 文献 [5]<br>路径控制<br>方法 | 文献 [6]<br>路径控制<br>方法 | 文献 [7]<br>路径控制<br>方法 | 本文设计<br>路径控制<br>方法 |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| 单位面积油耗<br>( $L \cdot m^{-2}$ )    | 3.2                  | 2.8                  | 2.5                  | 2.3                |
| 麦秆切割不干<br>净率/%                    | 15                   | 10                   | 8                    | 5                  |
| 麦粒脱离不彻<br>底率/%                    | 10                   | 5                    | 3                    | 2                  |
| 单位面积收割<br>效率/( $t \cdot h^{-1}$ ) | 0.8                  | 1.2                  | 1.5                  | 1.7                |

从单位面积油耗方面来看，文献 [7] 路径控制方法和本文设计路径控制方法的油耗较低，分别为  $2.5 L/m^2$  和  $2.3 L/m^2$ ，相较于文献 [5] 路径控制方法的  $3.2 L/m^2$  降低了 18.75% 和 21.88%。文献 [6] 路径控制方法的油耗为  $2.8 L/m^2$ ，也低于文献 [5] 路径控制方法，但高于文献 [7] 路径控制方法和本文设计路径控制方法。

麦秆切割不干净率方面，文献 [7] 路径控制方法和本文设计路径控制方法的表现较好，分别为 8% 和 5%，低于文献 [5] 路径控制方法的 15% 和文献 [6] 路径控制方法的 10%。这意味着文献 [7] 路径控制方法和本文设计路径控制方法能够更干净利落地切割麦秆。

麦粒脱离不彻底率方面，文献 [7] 路径控制方法和本文设计路径控制方法同样表现出色，分别为 3% 和 2%，相较于文献 [5] 路径控制方法的 10% 和文献 [6] 路径控制方法的 5% 大幅降低。这意味着使用文献 [7] 路径控制方法和本文设计路径控制方法能够提高麦粒的收割效率。

单位面积收割效率方面，本文设计路径控制方法最高，

为  $1.7 t/h$ ，高于文献 [5] 路径控制方法的  $0.8 t/h$ 、文献 [6] 路径控制方法的  $1.2 t/h$  和文献 [7] 路径控制方法的  $1.5 t/h$ 。这表明使用本文设计路径控制方法能够提高单位面积的小麦收割效率。

综上所述，从表 3 的数据对比分析中可以看出，本文设计路径控制方法综合考虑了单位面积油耗和收割效率，具有更高的收割效率和小麦收割质量，是四种方法中控制效果相对较好的。

3 结语

本文提出基于快速扩展随机树的小麦收割机作业路径智能控制方法，实现了对行驶路径的有效控制。本文以合理的小麦收割机在农田中行驶的路径为基础，提出小麦收割机作业路径控制方法。首先可以有效提高作业效率，有效降低收割过程中的浪费，降低重复收割或漏收情况发生的概率；其次可以提高作业质量，有效解决麦秆切割不干净、麦粒脱离不彻底等问题；然后，精确的路径控制可以降低油耗，为农民节省成本；最后，通过精确的路径控制，可以最大限度地减少对土地的压实。

参考文献：

[1] 路瑜,张晨亮.图形学与人机交互下小麦收割机路径设计分析[J].农机化研究,2021,43(12):207-212.

[2] 祖锡华.基于改进粒子群算法的小麦收割机路径优化控制研究[J].南方农机,2021,52(2):63-64.

[3] 南风,曹光乔,李亦白,等.基于小麦收割机作业路线行走方向的调度优化研究[J].中国农机化学报,2022,43(4):98-105.

[4] 赵沙沙.小麦收割机卸粮高度自动化调节系统设计[J].自动化技术与应用,2021,40(10):7-10.

[5] 黄海峰.基于DCS技术的联合收割机作业路径控制研究[J].农机化研究,2023,45(8):29-31+239.

[6] 陈飞燕,陈小雨,宋陶然.面向散户订单的收割机区域配置与路径优化[J].物流工程与管理,2021,43(9):91-96.

[7] 许娜,周炜明.基于PCA模式识别算法的收割机自主路径规划设计[J].农机化研究,2019,41(4):204-208.

[8] 代伟,李创业,杨春雨,等.基于低差异序列与快速扩展随机树融合算法的机械臂路径规划[J].控制理论与应用,2022,39(1):130-144.

[9] 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.

[10] 宁宇铭,李团结,姚聪,等.基于快速扩展随机树一贪婪边界搜索的多机器人协同空间探索方法[J].机器人,2022,44(6):708-719.

【作者简介】

钱桂名(1984—)，男，四川遂宁人，本科，讲师，研究方向：工业设计。

(收稿日期：2023-11-10)