

矩形边界条件下农机作业方向平行路径的排序优化

黄小毛¹ 付正坤¹ 丁幼春¹ 王建勇² 黎 焯¹

1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学理学院, 武汉 430070

摘要 针对矩形边界地形条件下的方向平行路径,在考虑多种可能地头转弯策略、不同作业模式的农艺要求和机具自身转弯特性的情况下,利用计算机技术寻求最优的行作业任务调度排序策略,以尽可能减少机器的地头转向距离和时间,减少作业总消耗。首先,在分析现有常用转弯策略生成原理的基础上,提出 2 种新型转弯策略。然后,将调度排序问题转化成旅行商问题(traveling salesman problem, TSP),并采用贪婪算法进行求解。仿真试验结果表明,采用的贪婪算法高效稳定,与常用习惯调度排序策略相比,机器转弯效率得到显著提高。

关键词 农业车辆; 作业路径; 离线规划; 转弯方式; 排序优化

中图分类号 S 232.3; TP 319 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2014)04-0130-07

农业生产中,大田作业机械在田间工作时,其移动轨迹(也称作业路径)最终会覆盖整个场地。在田地边界一定的前提下,作业路径的形状和走向是影响农机作业效率的最主要因素,因此,系统研究作业路径对提高农机作业效率和质量、降低农机消耗具有重要意义^[1]。

随着计算机技术的发展及其对各行各业的不渗透,现已开始应用于农业机械田间作业路径的规划优化^[1-11]。利用计算机技术对已知边界信息的田地农机作业路径的离线静态规划,既可以为农机自动驾驶提供必备的路径依据,也可以为人工驾驶方式提供路径参考^[1]。本试验针对一种规则四边形/矩形边界地形条件下的方向平行路径,考虑多种可能地头转弯策略、不同作业模式的农艺要求及机具自身转弯特性的情况下,寻求最优的行作业任务调度排序策略,以尽可能减少机器的地头转向距离和时间,从而减少作业总消耗。

1 转弯策略与生成原理

转弯是可移动机器改变原有作业方向的一种常规操作。由于其构造特点(长宽尺寸较大、多轮着地承压、两轮以上驱动),农业机器一般(履带式机器除外)不能直接折线转向即原地转向,而需要一定迂回空间即具有一定转弯半径才能完成转向动作,同时

产生额外的转弯消耗(空间、时间和燃油)。由于机器本身特性及地形条件复杂性的原因,机器在田间作业时必须完成次数众多的转弯操作,这些操作一般对于作业本身而言并没有直接贡献,所以必定影响作业效率。

农业机器在田间作业时,其作业效率可以用下式表达:

$$E_f = \frac{t_T}{t_T + \sum t_i}$$

式中 t_T 为机具直接作业时间,指机器沿有效作业路径前进并对土地或作物直接作用的时间,是理论上的作业时间; t_i 为辅助作业时间,指为直接作业服务而消耗的间接时间,包括机器准备时间、故障维修或停机检修时间、终了整理时间和地头转弯时间。地头转弯时间是一项必不可少的常规性辅助作业时间。国外通过对 GPS 记录的机器数据分析研究表明,地头转弯策略是影响机器作业至关重要的一个因素之一^[12],因此,转弯的策略和效率很大程度上决定着作业效率。

对特定机型而言,在机器最小转弯半径一定的前提条件下,高效率的转弯策略应具备以下 4 项基本特性:

1) 距离特性。尽可能小的转弯路径长度,以尽量减少转弯消耗(时间、燃油);

收稿日期: 2013-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51205150)、教育部博士点新教师基金项目(20110146120007)和浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放课题(A1211)

黄小毛, 博士, 副教授, 研究方向: 现代农业装备设计与测控, E-mail: huangxiaomao@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 黎 焯, 博士, 讲师, 研究方向: 农业电气化与自动化, E-mail: lx@mail.hzau.edu.cn

2) 地头空间特性。占用尽可能小的地头转弯空间,以减少地头空间的准备工作量;

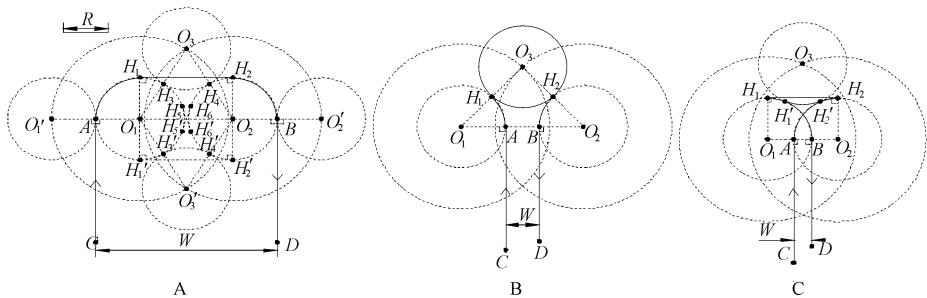
3) 碾压特性。尽量不影响已作业或未作业区域内土壤或作物原有状况,或与作业模式相匹配,比如收获作业时已作业区域可以二次碾压以用作转弯空间而未作业区则不可以,一般耕作作业时已作业和未作业区域均可重复碾压,而播种作业则未作业区域可重复碾压而已作业区域不可以;

4) 倒车特性。与机器的倒车性能相适应,比如有的机器(铰接)不能倒车,有的机器可沿直线倒车,而有的车辆则沿曲线倒车。

目前,对方向平行路径而言,生产实践中常用的转弯策略主要有 3 种,即 U 型(或 Π 型)、 Ω 型(或梨型)和 T 型(或鱼尾型)^[1-10]。通过详细分析这 3 种常见转弯策略以及对应路径的生成原理后可以发现,要实现从一条直线路径 CA 到另一条直线路径 BD 的顺利转换(图 1-A),一般必须具备 3 个要素:一条必备的转入圆弧(如弧 AH_1 或 AH_1H_3)、一条必备的转出圆弧(如弧 H_2B 或 H_4H_2B)和一条可选的过渡直线(如直线 H_1H_2)或圆弧(如优弧或劣弧 H_3H_4),即当前直线路径→转入圆弧→可选的过渡圆弧或直线→转出圆弧→目标直线路径。相邻要素之间要求光滑过渡连接即相切。对转入圆弧和转出圆弧而言,可以位于路径的左右两侧,同时优弧和劣

弧均可选;而对过渡直线而言,可以是两圆弧所在两圆的 4 条公切线中的任意一条;对过渡圆弧而言,则可以是转入圆弧和转出圆弧所在两圆的两外公切圆切点间的圆弧而且也是优、劣弧均可,故可能存在数十种不同组合而形成对应的转弯策略。但通过系统分析后发现,其中大多数会严重违反上述的 4 项基本特性,同时发现除了 3 种常见的转弯策略,还存在 2 种可能比较优质的潜在转弯策略(图 1-B, C),它们分别是 Ω 型转弯策略的变种形式即 M 型转弯策略和 T 型转弯策略的变种形式即 T'型转弯策略。

在文献[1]中详细阐述了常见 3 种转弯策略的路径生成原理,且与本试验设计提出的 M 型转弯策略和 T'型转弯策略的路径生成原理也基本相同。与 Ω 型转弯策略相比,M 型转弯策略中的过渡圆弧用劣弧 H_1H_2 代替优弧 H_1H_2 。这种改变使得路径长度减少很多,但要求车辆具有沿圆弧倒车能力,同时要注意当圆心 O_3 到直线 AB 的距离小于 2 倍的转弯直径时,可能造成已作业或未作业区域的二次碾压。而与 T 型转弯策略相比,T'型转弯策略中用过过渡圆弧 $H_1'H_2'$ (劣弧)代替过渡直线 H_1H_2 。T'型转弯策略具有和 M 型转弯策略相同的倒车及二次碾压特性,使用时应该注意与车辆特性及工作模式相匹配。



A. U 型转弯策略及其变化模式 U turning and its varied mode; B. Ω 型及 M 型转弯策略 Ω turning and M turning; C. T 型及 T'型转弯策略 T turning and T' turning.

图 1 各种转弯策略及其路径生成原理示意图

Fig. 1 Different turning strategies and their generation principle sketch

2 数学模型

对于规则四边形地形而言,当作业起点、幅宽和方向确定后,有效作业路径(方向平行路径)是固定的。实际作业时,主要是确定各个作业行之间的作业顺序,即合理调度排序问题,因此,如果将作业

行视为待遍历的城市,机器视为旅行商,该问题就可以看成是寻求遍历所有城市最短路径的经典旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)。

将连接行作业路径间的转弯路径总长度作为优化目标函数,以所有行作业路径的排列次序作为自

变量,可建立描述该问题的数学模型。若用 i, j 表示行作业路径统一编号, n 为总行数, a 为起始行号, b 为终止行号, N 表示集合 $\{1, 2, 3, \dots, n\}$, l_{ij} 表示 i 行到 j 行之间的转弯路径长度, 决策变量 $x_{ij} = 1$ 表示转弯路径中包含从 i 行到 j 行的转弯路径, $x_{ij} = 0$ 表示转弯路径中不包含从 i 行到 j 行的转弯路径, $|S|$ 表示集合 S 的元素个数, 则优化模型可表述如下^[13]:

$$\min \sum_{i \neq j} l_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$l_{ij} = l_{ji}; \forall i, j; i, j \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \begin{cases} 1, i \in N, i \neq b \\ 0, i \in N, i = b \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = \begin{cases} 1, j \in N, j \neq a \\ 0, j \in N, j = a \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{i, j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, 2 \leq |S| \leq n - 1, S \subset N \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{1, 0\}, i, j \in N, i \neq j \quad (6)$$

模型中,式(1)为优化目标函数,要求转弯路径总长度最小;式(2)表示从 i 行到 j 行与从 j 行到 i 行的转弯路径长度相等即具有往返对等性;式(3)~(6)保证每条作业行都被遍历 1 次且最终不回到起始行。

3 算法设计

TSP 问题是一个经典的组合优化问题,属于 NP-Hard 问题。目前尚无一种有效算法能彻底解决该问题,在有限时间能找到问题的最优解。人们提出一些启发式智能仿生算法尝试解决该问题,一般在有效时间内只能找到近似解,而且算法时间复杂度和空间复杂度很高。

贪婪算法是一种通过逐步构造来求取近似最优解的多项式算法。算法在求解过程的每一步,都按照贪婪准则(greedy criterion)作出一个看上去最优的决策,决策作出后便不再更改。该算法由于只是从“眼前”角度“贪婪”地选取“最优”,所以一般得到近似解,但思路清晰且结构简单,是一种性能优良的近似搜索算法^[13-14]。

本试验采用贪婪算法来求解所提出的农机行作业调度问题。首先,计算行作业路径中任意两条路径间转换时的最小转弯路径长度值,进而构造最小转弯路径长度阵。在每次求解中,因为存在多种不同转弯策略,所以要比较多次才能求出。同时,由于转弯路径具有往返对等性,因此,所构造的长度矩阵

为三角形矩阵。然后,以最小转弯路径长度为贪婪准则,从设定的初始行开始,在求解每一步都找出一个与前一路径之间转弯路径长度最小的行。将该行行号追加到解中并以该行为新起点继续转入下一步搜索,直到所有行均出现在解中。该贪婪求解算法的流程如图 2 所示。

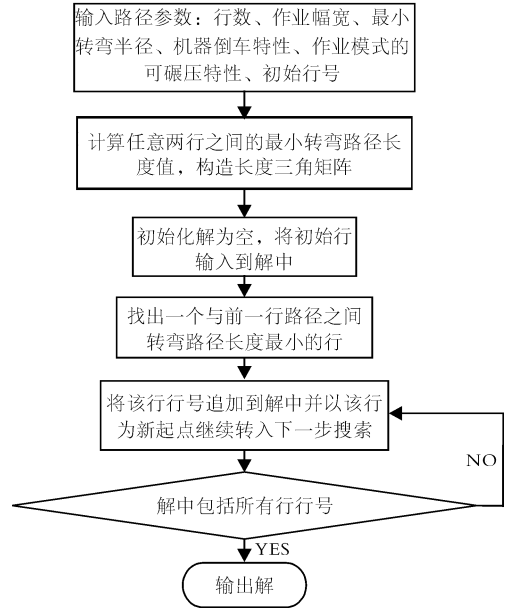


图 2 贪婪求解算法的流程图

Fig. 2 Algorithm flowchart of greedy search method

4 算法应用实例

本试验设计算法的时间复杂度为 $O(n^2)$ (其中 n 为待作业总行数), 具体求解过程在 Visual C++ 中设计成单核单线程模式程序实现, 在 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-2410M、RAM 为 3.00 GB DDR3、机械硬盘、操作系统为 Windows 7 32 位环境下, 分别采用相同的倒车特性和二次碾压特性, 对不同的作业行数、作业幅宽和最小转弯半径进行多次仿真试验, 并将求解结果与 2 种生产中常用习惯调度排序策略(逐行和两侧来回穿梭)进行对比, 得到不同策略下调度排序的结果对比如表 1 所示。

在表 1 中, 提升效率为同等试验条件下算法求解结果相对于试验中最差习惯策略结果的提升效果, 部分典型实例的图例如图 3~图 8(均为程序运行时的屏幕截图)所示。

此外, 算法运行效率及耗时的试验结果(重复运行 3 次取平均值)如表 2 所示。

表 1 优化前后试验结果的对比

Table 1 Experimental results of common-used strategies and algorithmic strategy

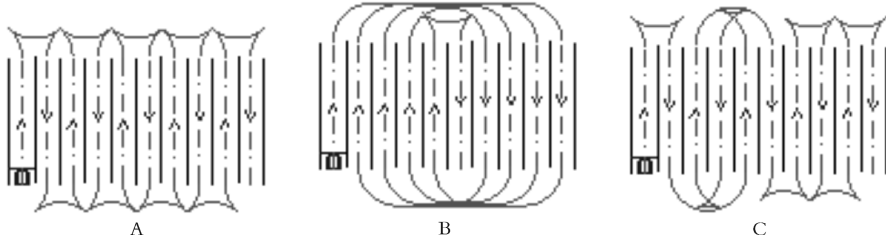
实例 Case	行数 No. row	幅宽/m Width	最小转弯 半径/m Minimum turning radius	转弯路径总长度/m Overall turning path length			提升 效率/% Promoted efficiency
				习惯调度排序 1 Commonly-used sequence strategy 1	习惯调度排序 2 Commonly-used sequence strategy 2	算法求解 Algorithmic strategy	
1	10	2	3	84.82	126.82	84.82	49.5
2		3	5	204.37	219.24	170.37	28.7
3	20	3	4	238.76	663.76	270.76	145.1
4		2	5	650.81	564.79	364.34	55.0
5	30	4	6	778.63	1 972.69	566.63	248.1
6		2	5	687.53	1 092.45	507.53	115.2

表 2 算法耗时的测试结果

Table 2 Consumed time testing results of the algorithm

ms

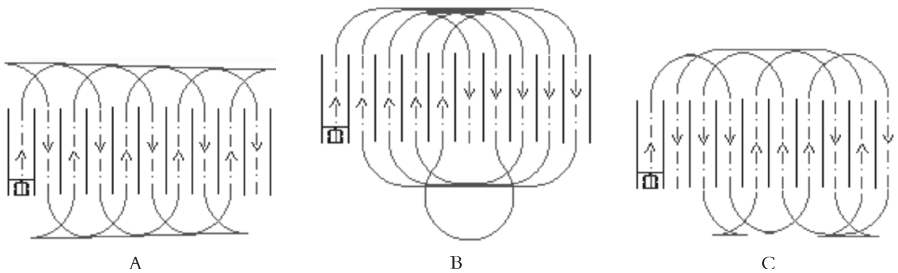
项目 Items		行数 No. row									
		5	10	20	40	60	100	150	300	500	1 000
试验 I	Test I	61	93	156	374	561	1 186	2 402	7 192	16 286	68 172
试验 II	Test II	47	109	218	327	608	1 201	2 418	7 301	18 814	64 974
试验 III	Test III	62	124	141	343	577	1 170	2 356	6 724	19 063	72 805
平均值	Average value	57	109	172	348	582	1 186	2 392	7 072	18 054	68 650



A:习惯排序策略 1 Commonly-used sequence strategy 1; B:习惯排序策略 2 Commonly-used sequence strategy 2; C:算法求解 Algorithmic strategy.

图 3 实例 1:不同策略下的调度排序结果对比(可曲线倒车、可二次碾压)

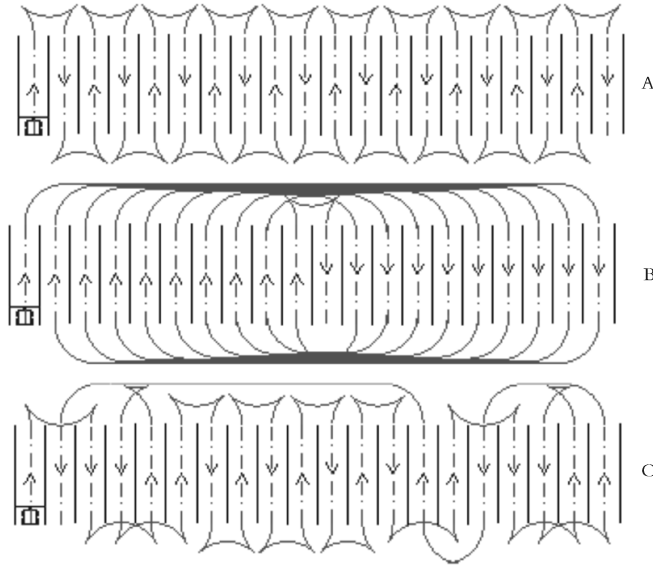
Fig. 3 Sequence results by different strategies for case 1 (non-reversely movable along curve, overlapped)



A:习惯排序策略 1 Commonly-used sequence strategy 1; B:习惯排序策略 2 Commonly-used sequence strategy 2; C:算法求解 Algorithmic strategy.

图 4 实例 2:不同策略下的调度排序结果对比(可倒车、不可二次碾压)

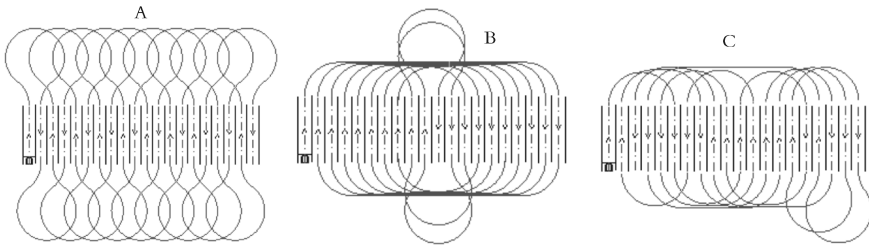
Fig. 4 Sequence results by different strategies for case 2 (reversely movable, non-overlapped)



A:习惯排序策略 1 Commonly-used sequence strategy 1; B:习惯排序策略 2 Commonly-used sequence strategy 2;
C:算法求解 Algorithmic strategy.

图 5 实例 3:不同策略下的调度排序结果对比(可倒车、可二次碾压)

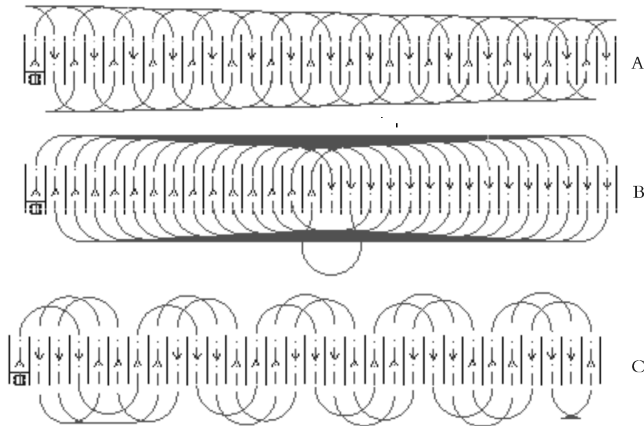
Fig. 5 Sequence results by different strategies for case 3 (reversely movable, overlapped)



A:习惯排序策略 1 Commonly-used sequence strategy 1; B:习惯排序策略 2 Commonly-used sequence strategy 2;
C:算法求解 Algorithmic strategy.

图 6 实例 4:不同策略下的调度排序结果对比(不可倒车、不可二次碾压)

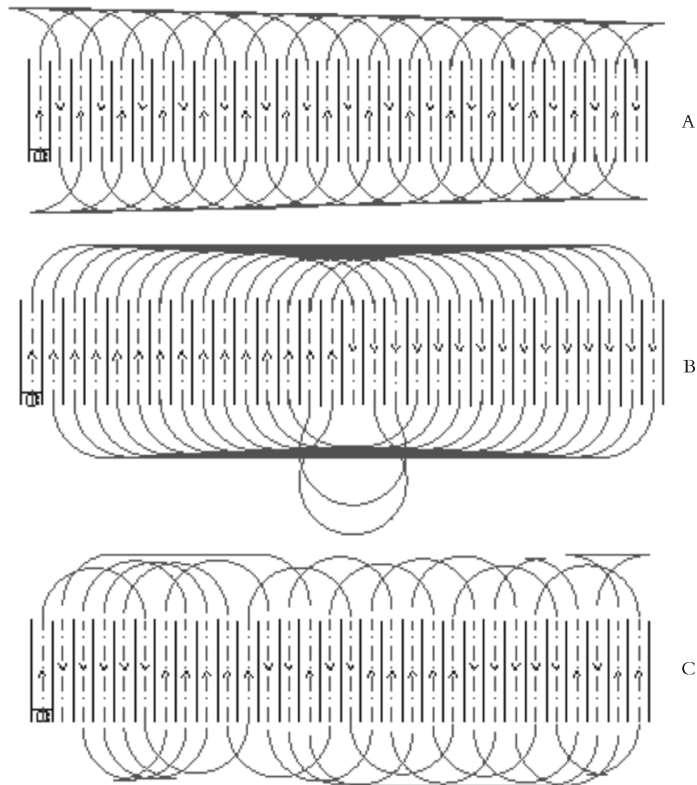
Fig. 6 Sequence results by different strategies for case 4 (non-reversely movable, non-overlapped)



A:习惯排序策略 1 Commonly-used sequence strategy 1; B:习惯排序策略 2 Commonly-used sequence strategy 2;
C:算法求解 Algorithmic strategy.

图 7 实例 5:不同策略下的调度排序结果对比(可直线倒车、可二次碾压)

Fig. 7 Sequence results by different strategies for case 5 (reversely movable along line, overlapped)



A: 习惯排序策略 1 Commonly-used sequence strategy 1; B: 习惯排序策略 2 Commonly-used sequence strategy 2;
C: 算法求解 Algorithmic strategy.

图 8 实例 6: 不同策略下的调度排序结果对比(可倒车、不可二次碾压)

Fig. 8 Sequence results by different strategies for case 6 (reversely movable, non-overlapped)

5 讨论

本试验针对一种规则四边形/矩形边界地形条件下农机作业的方向平行路径, 提出 2 种新型地头转弯策略即 M 型和 T' 型转弯策略, 其转弯效率(路径长度和时间)分别较 Ω 型和 T 型转弯策略显著提高, 但是要求机器具有曲线倒车的性能, 因此, 机器在转弯路径优化时会有更大的提升空间。其二, 将问题转化为 TSP 问题, 并用贪婪算法求解。仿真试验结果表明: 通过算法求解优化, 转弯效率较生产中习惯调度策略得到了显著提高, 提升效果从 28.7%~248.1%; 算法求解过程稳定可靠, 时间消耗不大(1 000 行的求解时间约为 1 min), 能够满足生产需要。本试验设计的测试算例比 Bochtis 等^[4]的测试算例更丰富(行数、幅宽、转弯半径等), 旨在验证所设计算法的普适性。其三, 实际机器的具体作业路径的优化问题, 要建立在详细了解机器性能(作业幅宽、转弯半径、直线或曲线倒车性能等)、

作业种类(耕作、播种、收获、中耕除草等)以及农艺要求(未作业区域或已作业区域的可二次碾压性能)的基础之上。

此外, 贪婪算法求解 TSP 问题的效率较高(耗时少), 但不一定获得最优的结果, 因此, 下一步的工作可以考虑运用更多最新的智能仿生算法(如遗传算法、蚁群算法等)进行该类问题的求解, 以寻求更优的调度排序策略。同时, 还应该考虑多台机器并行作业时的调度优化策略^[1], 以适应超大田块作业优化的问题。

参 考 文 献

- [1] 黄小毛, 丁幼春, 宗望远, 等. 农机作业地头转弯方式及路径生成算法研究[C]//中国农业工程学会. 中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. 重庆: [n. s.], 2011: 22-24.
- [2] 孟志军, 刘卉, 王华, 等. 田作业机械路径优化方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 147-152.
- [3] 刘向锋. 面向 GPS 导航拖拉机的最优全局覆盖路径规划研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学图书馆, 2012.

- [4] BOCHTIS D D, VOUGIOUKAS S G. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern [J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(1): 1-12.
- [5] OKSANEN T, VISALA A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines [J]. *Journal of Field Robotics*, 2009, 26(8): 651-668.
- [6] OKSANEN T, VISALA A. Path planning algorithms for agricultural machines [J]. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, 2007, 9(7): 1-19.
- [7] BOCHTIS D D, VOUGIOUKAS S G, GRIEPENTRONG H W. A mission planner for an autonomous tractor [J]. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(5): 1429-1440.
- [8] JIN J, TANG L. Optimal coverage path planning for arable farming on 2D surfaces [J]. *Transactions of the ASABE*, 2010, 53(1): 283-295.
- [9] HAMEED IA, BOCHTIS D D, SORENSEN C G, et al. Automated generation of guidance lines for operational field planning [J]. *Journal of Biosystems Engineering*, 2010, 107(4): 294-306.
- [10] JIN J, TANG L. Coverage path planning on three-dimensional terrain for arable farming [J]. *Journal of Field Robotics*, 2011, 28(3): 424-440.
- [11] ZANDONADI R S, STOMBAUGH T S, LUCK J D, et al. Software tool for estimating overlapped areas in agricultural field operations [C]//American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). Paper No. 096957 in Proceeding of the 2009 ASABE Annual International Meeting. Reno: ASABE, 2009: 21-25.
- [12] TAYLOR R K, SCHROCK M D, STAGGENBORG S A. Extracting machinery management information from GPS data [C]//American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Paper No. 02-10008. Joseph: ASAE, 2002.
- [13] 黄小毛, 叶春生, 莫健华, 等. 考虑潜在起点的 RP 路径排序问题研究[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(3): 317-320.
- [14] 黄小毛. 熔丝沉积成形若干关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学图书馆, 2009.

Sequence optimization of direction parallel path for the agricultural vehicles in field of rectangle boundary

HUANG Xiao-mao¹ FU Zheng-kun¹ DING You-chun¹ WANG Jian-yong² LI Xuan¹

1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

2. *College of Science, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

Abstract Computer technology is increasingly used in the path planning and the optimization of agricultural machinery's field operation. In this paper, the optimal path sequence strategies to minimize the total operating length and time of the vehicle's headland turning are introduced, taking into consideration of the direction of the parallel paths in fields of rectangle boundary, a variety of possible strategies of headland turning, the agronomic requirements of different operating modes and the turning characteristics of machineries. First two kinds of new turning strategies were put forward after the analysis of the generation principle of the existing turning strategies. Then the scheduling problem was formulated into the traveling salesman problem (TSP), and the greedy search algorithm was utilized to address it. Simulation experimental results showed that the algorithm is efficient and robust, and the turning efficiency is significantly improved compared to the commonly-used scheduling and sorting strategies.

Key words agriculture vehicle; operating path; off-line planning; turning mode; sequence optimization

(责任编辑:陈红叶)