

基于改进蚁群算法的农田平地导航三维路径规划方法

景云鹏^{1,2} 金志坤^{1,2} 刘刚^{1,2}

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为解决农田平地机无人驾驶作业时缺乏局部规划,进而实现平地路径在线调整的问题,以平地作业土方合理运卸且路径最短为目的,提出了一种基于改进蚁群算法的农田平地导航三维路径规划方法。基于农田三维地势模型,采用改进的蚁群算法规划三维路径;以平地作业土方运载为决策方向,建立新的路径搜索节点,对比平地机作业时平地铲运载土方量和经过栅格计算所需的挖填土方量,根据土方运载任务设置信息素更新规则和启发函数,获取农田平地的最佳三维路径;基于平地机的运动学模型,设置农田平地机转向约束条件,根据约束条件对路径进行平滑优化,并建立三维路径规划的效果评价标准。仿真结果表明:相比于原始蚁群算法,该方法的路径规划效果评价指标提高 33.3% 以上,可以更好地指导农田平地机实现局部平地任务,而且大大缩短了路径生成时间和路径长度,使路径更为平滑,更适用于辅助农田平地的自动导航作业。

关键词: 农田平地机; 导航路径规划; 蚁群算法; 约束优化

中图分类号: S281; S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0333-07

Three Dimensional Path Planning Method for Navigation of Farmland Leveling Based on Improved Ant Colony Algorithm

JING Yunpeng^{1,2} JIN Zhikun^{1,2} LIU Gang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of land grader in unmanned operation lacks local planning to realize on-line adjustment of leveling path, a three dimensional path planning method for automatic navigation of farmland leveling based on improved ant colony algorithm was proposed for the purpose of reasonable loading and unloading of earthwork and the shortest path in land leveling operation. Based on the three dimensional terrain model of farmland, the improved ant colony algorithm was used for three dimensional path planning. A new path search node was established based on the decision direction of earthwork transportation in leveling operation. The pheromone updating rules and heuristic functions of land leveling were set up by comparing the earthwork carried by the leveling shovel and the excavation and filling volume required by grid calculation, and then the optimal three dimensional path for earthwork transportation was obtained. The path was smoothed and optimized according to the steering constraints of land leveler, which was based on the kinematical model of the land leveler. And the effect evaluation standard of three dimensional path planning was established. The simulation results showed that compared with the original ant colony algorithm, the path planning effect of this method was improved by more than 33.3%, which could better guide the land leveler to realize the local leveling task. Moreover, this method shortened the path generation time and path length, making the path smoother, and was more suitable for automatic navigation of farmland leveling.

Key words: farmland leveler; guidance path planning; ant colony algorithm; constrained optimization

收稿日期: 2020-07-31 修回日期: 2020-09-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701100-2017YFD0701105)

作者简介: 景云鹏(1995—),男,博士生,主要从事 GNSS 农机导航与农田平整技术研究, E-mail: 963476694@qq.com

通信作者: 刘刚(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业电子信息技术研究, E-mail: pac@cau.edu.cn

0 引言

农田平地自动导航技术可以科学地指导农田平地机进行土地平整作业,从而减少人力操作,提高平地工作效率^[1]。平地路径规划是农田平地自动导航的重要组成部分,平地机可以通过判断自身与规划路径的距离误差以及航向误差,调整行驶状态,对农田土方进行合理运卸,实现农田平地的自动导航作业^[2]。

平地机工作时农田表面的高程上下变化,将路径放入三维空间内进行规划,可以更好地指导平地作业。目前,粒子群算法^[3]、人工势场法^[4-5]、A*算法^[6-9]和蚁群算法^[10-12]是三维空间常用的路径规划方法。相比于前3种方法,蚁群算法具有更强的适应性,其本质是一种并行的正反馈算法,具有较强的全局搜索能力^[13-14],更适用于拥有挖填土方任务的农田平整作业。然而,农田平整的任务是运卸土方和平整土地,不仅需要一条最短路径,还需要根据平地铲负载的土方量实时设计路径,经过合适的区域。

通常将平地路径规划分为全局路径规划和局部路径规划,全局路径规划主要改变农田整体地势的变化趋势,指导平地机将地势较高区域的土方运送至地势较低区域^[15]。文献[16]提出了一种应用于GNSS农田平整作业的全局路径规划方法,以提高土方挖填作业效率为目标,生成遍历整个农田的平面路径。全局规划的路径较长,对田地覆盖全面,多是不同路径的叠加组合^[17-18]。局部路径规划应是可调整的,根据不同的起始点规划出一条较短的土方运送路线,不仅可以作为优化路径组成新的全局规划路径,还可独立用于二次土地平整作业,提高农田的平整度。针对以上问题,本文提出一种基于改进蚁群算法的三维路径规划方法,旨在为农田平地自动导航提供可指导平地作业的局部路径。

1 三维路径规划算法

1.1 农田地势模型

通常在三维空间内进行路径规划,需要建立相应的三维模型,以确定路径搜索的工作环境^[19]。智能机器人在进行蚁群三维路径规划搜索时,多采用栅格法作为三维模型的组成结构^[20]。作为平地机的工作环境,农田在XY平面的工作区域并非全是规则的正方形,需要限制算法的搜索边界,图1是一块面积17.9 m×56.3 m的农田地势模型。

建模方法为:首先,遍历整块农田,通过RTK-GNSS获取农田内部地势点的三维位置数据($x_n, y_n,$

z_n), n 为数据个数。分别提取横坐标 x 的极值点 $\{x_{\min}, x_{\max}\}$,纵坐标 y 的极值点 $\{y_{\min}, y_{\max}\}$,如图2所示,设置农田路径搜索区域的边界(其中 A, B, C, D 为纵横坐标的极值点)。然后,设定路径规划单位栅格长度 l ,以 l 为取样间隔,分别在极值区间($x_{\min}, x_{\max}$)采样得到插值横坐标 X_{DEM} ,极值区间($y_{\min}, y_{\max}$)采样得到插值纵坐标 Y_{DEM} 。最后,对数据集 $\{x_n, y_n, z_n, X_{\text{DEM}}, Y_{\text{DEM}}\}$ 进行插值处理^[21],得到描述农田地势的三维地势模型,并作为蚁群算法的路径搜索环境。

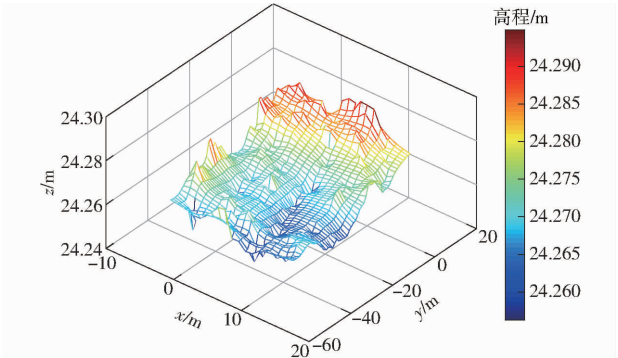


图1 农田三维地势模型

Fig.1 Three dimensional terrain model of farmland

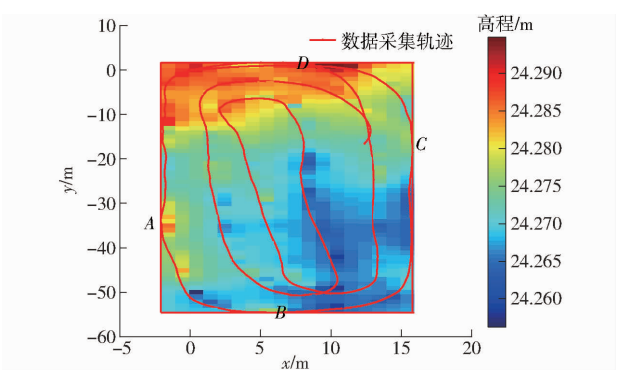


图2 地势模型的边界设定

Fig.2 Boundary setting of terrain model

1.2 土方量计算

基于农田三维地势模型,计算农田平整作业的土方信息,包括平地铲在路径追踪过程中的负载土方量和地势模型每一个单位栅格的挖、填土方量。农田平整过程中,通过在拖拉机与平地铲处安装拉力传感器,实时地获取平地铲内负载的土方量 V_t ,其计算公式为

$$V_t = \gamma WL(H_i - H_{av}) + b_t \tag{1}$$

式中 γ ——电流—负载转换比例系数
 W ——平地铲宽度
 L ——平地铲长度
 b_t ——转换常数
 H_i ——平地铲所处位置的高程
 H_{av} ——平均高程

蚁群算法进行三维路径搜索时,蚂蚁以栅格为单位向前搜索路径,单位栅格内所含有的挖、填土方信息,是路径规划下一前进节点的判别依据,通过插值计算后,农田地势高程点分布在三维地势模型的单位栅格内,可使用方格网法^[22]计算单位栅格的挖、填土方量。

1.3 改进的蚁群算法

农田平整的土方运载任务可明确为:根据平地铲内的土方量负载,寻找下一栅格进行合理的土方挖、填,求得一条长度最短、途经区域平整度最好的路径。因此,以农田平整任务为路径搜索前进节点的判断依据,改进的蚁群算法流程如图 3 所示。

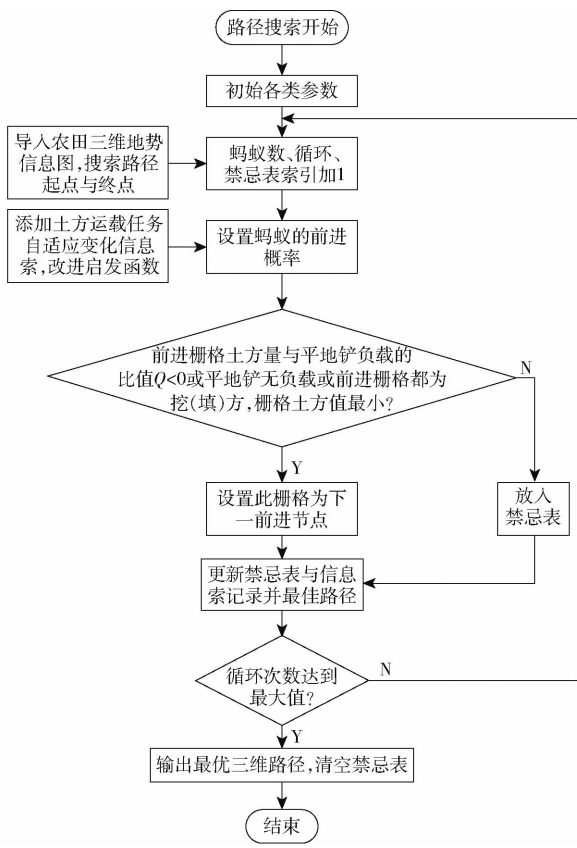


图 3 改进蚁群算法的流程图

Fig. 3 Flow chart of improved ant colony algorithm

算法的具体实现步骤为:

- (1) 遍历搜索整块农田,以挖方土方量最大栅格的 1 个顶点为路径起始点,记为 $(x_{start}, y_{start}, z_{start})$ 。以填方土方量最小栅格的 1 个顶点为路径终止点,记为 $(x_{end}, y_{end}, z_{end})$ 。
- (2) 初始路径搜索参数,设置蚂蚁数目 m 和搜索循环次数 N ,栅格的初始化信息量 $\tau_{ij}(t) = c$,其中 c 为常数,且初始时刻 $\Delta\tau_{ij}(0) = c$ 。规定蚂蚁在三维空间内的搜索路线,在单位栅格的 x 轴单向前进、 y 轴正负双向行进、 H (高程)轴正负双向行进,每次行进的距离不超过 $2l$ 。
- (3) 路径搜索每循环一次更新循环次数 N 加 1,

路径搜索禁忌表索引 k_k 加 1 和蚂蚁数目 k 加 1。
(4) 蚂蚁从起始点向终止点行进时,改进状态转移搜索概率 $p_{ij}^k(t)$
$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha (\eta_{ij}(t))^\beta}{\sum_{k \in N} (\tau_{ik}(t))^\alpha (\eta_{ik}(t))^\beta} & (j \in N) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\eta_{ij}(t)$ —— t 时刻栅格节点的启发值
 α ——信息素重要指数
 β ——启发式因子的重要指数

每行驶至下一节点栅格时,将计算出的栅格挖方土方量设置为正值,填方土方量设置为负值,计算栅格土方量与平地铲负载土方量的比值,优先选取比值小于 0 的栅格,为蚂蚁的下一个前进节点。当平地铲无负载(土方量为 0)时,优先选择挖方土方量的栅格为下一前进节点;当前进栅格都为填方或者挖方土方量时,优先选取值最小的栅格为下一前进节点。将舍弃的搜索栅格放入下一只蚂蚁行驶路径的禁忌表中,令全部蚂蚁按照改进的搜索概率完成起始点路径的周游。

(5) 记录本次循环的最佳路线,根据搜索路径的收敛次数,根据搜索平地作业路径的收敛次数,设置收敛函数 $(1 + at^3)$,设置蚁群算法的信息素蒸发系数随着每次路径搜索循环自适应变化

$$\rho(t) = \rho(t-1)b^{(1+at^3)} \quad (a, b \in (0, 1)) \quad (3)$$

式中 $\rho(t)$ ——信息素蒸发系数
 a ——平地路径收敛系数
 b ——平地作业信息素蒸发因子

当所有蚂蚁完成一次周游,各路径上的信息素进行更新

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (4)$$

其中 $\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k$
$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{d_{ij}} & (\text{当蚂蚁 } k \text{ 在时刻 } k \text{ 至 } k+1 \text{ 行走时}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

式中 $\Delta\tau_{ij}$ ——本次迭代中信息素的增量
 $\Delta\tau_{ij}^k$ ——第 k 只蚂蚁在本次迭代时遗留下的信息素量
 Q ——常量
 d_{ij} ——第 k 只蚂蚁在本次周游中所走过的路径长度

加入土方负载任务函数,改进三维空间下蚁群的前进距离函数并加入土方负载函数

$$D(x,y,z)=\frac{K}{\sqrt{(x_{i+1}-x_i)^2+(\lambda y_{i+1}-\lambda y_i)^2+(z_{i+1}-z_i)^2}+\sqrt{(x_{\text{end}}-x_i)^2+(y_{\text{end}}-y_i)^2+(\lambda z_{i+1}-\lambda z_i)^2}} \tag{5}$$

式中 $D(x,y,z)$ ——前进距离函数
 (x_i,y_i,z_i) ——某一时刻的三维坐标
 λ ——土方系数 K ——比例常数
土方负载函数为

$$U(x,y,z)=\frac{WL}{|V_{i+1}-V_i|+c_i} \tag{6}$$

式中 V_i ——某一时刻平地铲的负载量
 c_i ——负载常数
其中,启发函数等于前进距离函数与土方负载函数的乘积,并按照改进的蚁群方法更新禁忌表与信息表。

(6)判断是否满足农田三维路径搜索的结束条件,若达到了搜索循环次数,则结束路径搜索输出最优结果,否则跳回步骤(3)。

2 路径优化方法

2.1 基于平地机运动模型的约束优化

改进的蚁群算法所生成的三维路径为多条线段连接的折线,平地机进行路径追踪时,由于转向角的限制,会导致追踪误差变大,达不到理想的精度^[23]。因此,基于平地机运动学模型设置最佳路径的优化约束条件,在该约束条件限制下,对路径进行 B-spline curves 平滑优化,可以得到一条平滑的、适合导航追踪的路径。

如图 4 所示,牵引式农田平地机在进行路径跟踪时,通过自动驾驶控制系统引导拖拉机和平地铲最终驶入规划路径。考虑拖拉机驱动轮(后轮)与平地铲行驶轮在一条路径行驶时,所处位置对应的曲率半径在极限情况下相交于旋转中心 O_{ICR} ,那么拖拉机的转向半径 R 应该满足自身的最小转弯半径 R_{min} ,由此根据几何和运动学关系^[24],可以得到约束条件

$$\frac{1}{\chi^2} \leq L_F^2 + R_{min}^2 + 2\cos(2\varphi) \tag{7}$$
$$\left(\varphi \in \left[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right]\right)$$

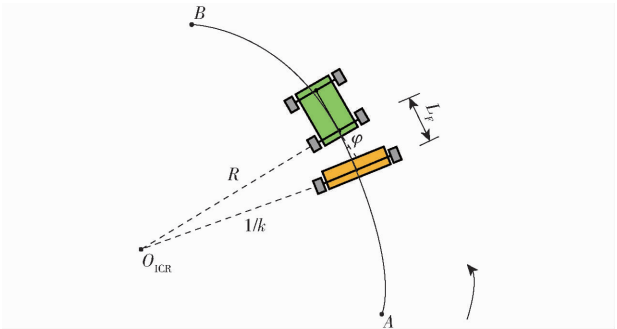


图 4 农田平地机的路径追踪状态

Fig.4 Path tracking state of farmland leveler

其中 $\chi = \frac{|x_g'y_g'' - x_g''y_g'|}{((x_g')^2 + (y_g')^2)^{\frac{3}{2}}}$
式中 χ ——最优路径上各点对应的曲率
 L_F ——平地铲后车轮轴的中心与平地铲牵引连接处的距离
 φ ——拖拉机与平地铲之间的夹角
 (x_g,y_g) ——生成路径的点坐标

其中,约束条件限制了规划路径上各点的曲率范围,结合式(7)进行 B-spline curves 平滑优化^[25],即可获取最终的最优规划路径。

2.2 平地路径效果评价

基于约束优化后平滑的三维路径,当平地机追踪规划路径时,以栅格的挖、填土方量为参考,建立路径规划的效果评价指标,计算式为

$$P = \frac{\sum V_{\text{fill}} - \sum V_{\text{dig}}}{\max(V_t)} \tag{8}$$

式中 P ——路径规划效果评价指标
 $\sum V_{\text{fill}}$ ——规划路径经过栅格中填方土方量的总和, m^3
 $\sum V_{\text{dig}}$ ——规划路径经过栅格中挖方土方量的总和, m^3

由式(8)可知,当平地机根据三维路径从挖方土方量栅格出发至填方栅格,所经过填方土方量的总和等于挖方土方量的总和时, $P=0$,此时为完成平地任务的最优规划路径;当所经过填方土方量的总和大于挖方土方量的总和时, $P>0$,此时平地铲的负载土方可提前运送完成,所规划路径适用于二次平整作业(挖方土方量区域较少);当所经过填方土方量的总和小于挖方土方量的总和时, $P<0$,说明此路径无法完成土地平整任务或路径经过地势较高,需要再次规划路径完成平地作业。

3 仿真实验与分析

3.1 仿真环境

为验证本文提出的三维路径规划方法的可行性,在中国农业大学上庄实验站选取 2 块大小、地势不同的实验田。如图 5a 所示,选取的第 1 块农田尺寸为 17 m × 43 m,该实验田被农田平地机进行了 1 次农田平整作业,但仍有部分区域出现局部高程超出或低于基准高程 0.1 ~ 0.2 m。如图 5b 所示,选取的第 2 块农田尺寸为 49 m × 25 m,该试验田未经过农田平整作业,农田表面地势起伏较明显,高程

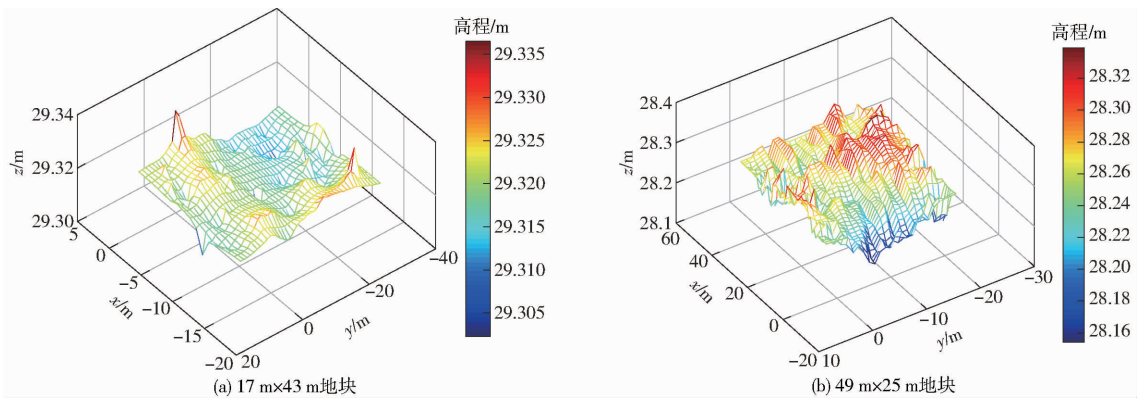


图 5 2 块农田的三维地势模型

Fig. 5 Three dimensional terrain model of two farmlands

落差较大。

3.2 结果分析

如图 6a 所示,第 1 块农田选取的路径起始点分别为(-13.48 m, -27.93 m, 29.34 m)和(-1.48 m, -16.93 m, 29.32 m)。最佳路径在迭代过程中不断收敛,由图 6b 可知本文采用的改进蚁群搜索方法更快收敛至最短路径。结合表 1 中的数据,相比于

原始的蚁群算法,该方法可使最佳路径长度减少 5.72 m,路径生成时间减少 7.42 s,图 6c 表明,通过约束优化后的路径更为平滑,更适合于农田平地机的导航追踪。第 1 块农田经过了平地机 1 次平整作业,改进算法后的路径规划效果评价指标提高了 33.3%。因此也可证明该方法能为 2 次农田平整作业提供合理地指导路径。

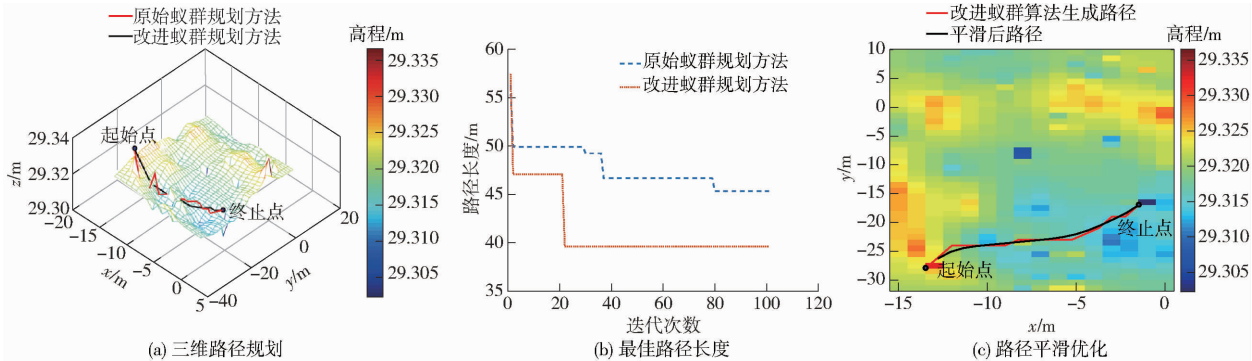


图 6 17 m × 43 m 农田的平地作业三维路径规划

Fig. 6 Three dimensional path planning of land leveling operation in 17 m × 43 m farmland

表 1 农田路径规划实验结果

Tab.1 Experimental results of farmland path planning

路径参数	17 m × 43 m 地块		49 m × 25 m 地块	
	改进蚁群算法	原始蚁群算法	改进蚁群算法	原始蚁群算法
路径长度/m	39. 61	45. 33	153. 91	176. 34
路径生成时间/s	43. 56	50. 98	113. 67	152. 12
效果评价指标 P	0. 38	0. 57	-0. 13	-0. 36

如图 7a 所示,第 2 块农田路径规划的起始点分别为(31.03 m, -17.72 m, 28.34 m)和(-0.97 m, -6.72 m, 28.17 m);图 7b 显示采用本文改进的蚁群路径搜索方法,使搜索路径更快收敛至最短路径。结合表 1 中的数据,相比于原始的蚁群算法,该方法可使最佳路径长度减少 22.43 m,路径生成时间减

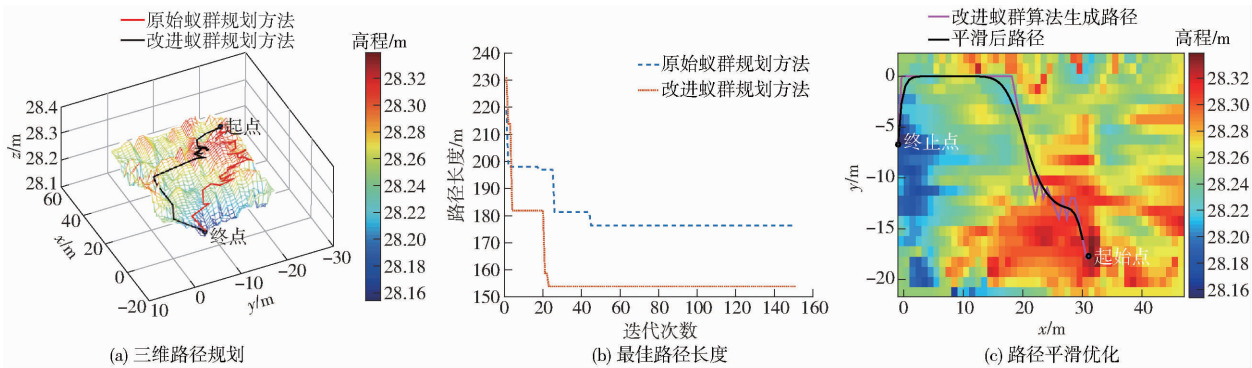


图 7 49 m × 25 m 农田的平地作业三维路径规划

Fig. 7 Three dimensional path planning of land leveling operation in 49 m × 25 m farmland

少 38.45 s;图 7c 表明,基于农田平地机运动学模型的约束优化方法可以将复杂的折线路径平滑处理。第 2 块农田未经过农田平整作业,改进算法后的路径规划效果提高了 63.9%。证明该方法可以为农田平整作业提供局部规划路径,可在全局路径规划中用来调整局部路线。

4 结论

(1)改进了蚁群算法的信息素更新方法和启发函数,加入土方运载任务判断路径搜索节点,以土方量合理挖、填为依据提出了一种适用于农田

平整作业的三维路径规划方法,减少了路径长度和生成时间。

(2)路径规划后,基于农田平地机的运动学模型对路径进行带约束条件的平滑优化,得到的最优路径更适用于农田平地自动导航的路径跟踪,并根据土方运载状况建立路径规划的效果评价标准。

(3)对 1 次平整过的农田和未平整农田进行仿真实验,结果分析表明,改进的路径规划方法可使 2 种农田地块的路径规划效果分别提高 33.3% 和 63.9%,表明本文方法适用于农田平整的局部路径规划。

参 考 文 献

- [1] JING Yunpeng, LIU Gang, XIA Youxiang. Automatic navigation system and control methods based on GNSS-controlled land leveling technology [J]. International Agricultural Engineering Journal, 2019, 28(3): 43–55.
- [2] 王岩, 李宏鹏, 牛东岭, 等. GNSS 平地作业路径实时规划与导航方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 271–275.
WANG Yan, LI Hongpeng, NIU Dongling, et al. Real-time path planning and navigation in GNSS controlled land leveling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 271–275. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s144&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.044. (in Chinese)
- [3] 杨超杰, 裴以建, 刘朋. 改进粒子群算法的三维空间路径规划研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(11): 117–122.
YANG Chaojie, PEI Yijian, LIU Peng. Research on three-dimensional space path planning based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(11): 117–122. (in Chinese)
- [4] 袁朝春, 翁烁丰, 何友国, 等. 基于改进人工势场法的路径规划决策一体化算法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 394–403.
YUAN Chaochun, WENG Shuofeng, HE Youguo, et al. Integration algorithm of path planning and decision-making based on improved artificial potential field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 394–403. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190946&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.046. (in Chinese)
- [5] 修彩靖, 陈慧. 基于改进人工势场法的无人驾驶车辆局部路径规划的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(9): 808–811.
XIU Caijing, CHEN Hui. A research on local path planning for autonomous vehicles based on improved APF method[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(9): 808–811. (in Chinese)
- [6] 殷建军, 董文龙, 梁利华, 等. 复杂环境下农业机器人路径规划优化方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 17–22.
YIN Jianjun, DONG Wenlong, LIANG Lihua, et al. Optimization method of agricultural robot path planning in complex environment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 17–22. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190502&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.002. (in Chinese)
- [7] 赵德群, 段建英, 陈鹏宇, 等. 基于 A* 算法的三维地图最优路径规划[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(7): 146–152.
ZHAO Dequn, DUAN Jianying, CHEN Pengyu, et al. Optimal path planning for 3D map based on A* algorithm[J]. Computer Systems & Applications, 2017, 26(7): 146–152. (in Chinese)
- [8] 胡蕾, 高立娥, 刘卫东, 等. 基于 Dubins 曲线和改进 A* 算法的 AUV 路径规划方法[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(8): 259–262.
HU Qiang, GAO Li'e, LIU Weidong, et al. The AUV path planning method based on the improved A* search and Dubins curve [J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(8): 259–262. (in Chinese)
- [9] 马飞, 杨峰岫, 顾青, 等. 基于改进 A* 算法的地下无人铲运机导航路径规划[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 303–309.
MA Fei, YANG Haoshen, GU Qing, et al. Navigation path planning of unmanned underground LHD based on improved A* algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 303–309. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150743&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.043. (in Chinese)
- [10] 屈鸿, 黄利伟, 柯星. 动态环境下基于改进蚁群算法的机器人路径规划研究[J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(2): 260–265.

- QU Hong, HUANG Liwei, KE Xing. Research of improved ant colony based robot path planning under dynamic environment [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2015, 44(2): 260–265. (in Chinese)
- [11] 李向军, 霍艳丽, 曾勍炜, 等. 三维机器人路径规划的一种变异算子蚁群算法[J]. 计算机仿真, 2015, 32(2): 364–368.
LI Xiangjun, HUO Yanli, ZENG Qingwei, et al. A mutation operator ant colony algorithm to three-dimensional path planning of robots[J]. Computer Simulation, 2015, 32(2): 364–368. (in Chinese)
- [12] 陈超, 张莉. 基于改进蚁群算法的三维路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(20): 192–196.
CHEN Chao, ZHANG Li. Three-dimensional path planning based on improved ant colony algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(20): 192–196. (in Chinese)
- [13] ZHAO Haitong, ZHANG Changsheng, ZHANG Bin. A decomposition-based many-objective ant colony optimization algorithm with adaptive reference points[J]. Information Sciences, 2020, 540(11): 435–448.
- [14] SONG Peicheng, PAN Jengshyang, CHU Shuchuan. A parallel compact cuckoo search algorithm for three-dimensional path planning[J]. Applied Soft Computing Journal, 2020, 94(9): 106–122.
- [15] FERNANDO A, AUAT C, GUSTAVO S, et al. Algebraic path tracking to aid the manual harvesting of olives using an automated service unit[J]. Biosystems Engineering, 2016, 142: 117–132.
- [16] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 27–33. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180503&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.003. (in Chinese)
- [17] ELBANHAWI M, SIMIC M. Randomised kinodynamic motion planning for an autonomous vehicle in semi-structured agricultural areas[J]. Biosystems Engineering, 2014, 126: 30–44.
- [18] AMALIA U, TORSTEN R, AMIR H, et al. Optimisation of agricultural routing planning in field logistics with evolutionary hybrid neighbourhood search[J]. Biosystems Engineering, 2019, 184: 166–180.
- [19] 刘可, 李可, 宿磊, 等. 基于蚁群算法与参数迁移的机器人三维路径规划方法[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 29–36.
LIU Ke, LI Ke, SU Lei, et al. Robot 3D path planning method based on ant colony algorithm and parameter transfer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 29–36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200103&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.003. (in Chinese)
- [20] 谭玉新, 杨维, 徐子睿. 面向煤矿井下局部复杂空间的机器人三维路径规划方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1634–1642.
TAN Yuxin, YANG Wei, XU Zirui. Three-dimensional path planning method for robot in underground local complex space [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1634–1642. (in Chinese)
- [21] YOSHITAKA H, MASAHIRO T. Moving object removal and surface mesh mapping for path planning on 3D terrain[J]. Taylor & Francis, 2020, 34(6): 375–387.
- [22] 陈爱梅, 吴昊, 吴北平, 等. 四种土方量计算方法的对比研究与应用[J]. 北京测绘, 2015, 29(1): 104–108.
CHEN Aimei, WU Hao, WU Beiping, et al. Comparative study and application of four kinds of earthwork calculation methods [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2015, 29(1): 104–108. (in Chinese)
- [23] TAMBA T A, HONG B, HONG K S. A path following control of an unmanned autonomous forklift[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2009, 7(1): 113–122.
- [24] MOGENS M, GRAF P, ALBERTO B. Reference trajectory planning under constraints and path tracking using linear time-varying model predictive control for agricultural machines[J]. Biosystems Engineering, 2017, 153: 28–41.
- [25] BU X, SU H, ZOU W, et al. Curvature continuous path smoothing based on cubic Bezier curves for car-like vehicles[C]// IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. IEEE, 2016: 1453–1458.