

无人驾驶农机自主作业路径规划方法

翟卫欣¹, 王东旭^{1,2}, 陈智博¹, 董 靛¹, 赵 欣¹, 吴才聪^{1*}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国兵器工业计算机应用技术研究所, 北京 100089)

摘 要: 针对无人驾驶农机自主作业的应用需求, 该研究设计了一种基于区块套行作业模式的路径规划方法, 以生成含有速度指令和机具状态指令的可执行路径, 重点解决田内作业的四边形地块适应性、无人驾驶农机适应性和农田作业路径完整规划等问题。该方法由农田信息处理模块和路径规划模块组成, 农田信息处理模块将测绘产生的地块轮廓数据和障碍物数据处理为便于运算的地块轮廓点数据和障碍物轮廓点数据形式, 然后由路径规划模块利用用户输入的作业方向、作业幅宽、转弯半径和起始方位等作业参数, 经过作业梯形区生成、掉头区与作业区划分、作业条带分割、障碍物条带处理、作业条带路由、掉头路径生成和最终指令路径生成等子模块, 最终生成无人驾驶农机的指令路径。仿真试验结果表明, 相对于相邻法, 该方法的作业面积比及作业路程比分别提升了 10.0% 和 8.8%。播种作业田间试验结果表明, 无人驾驶农机自主作业的横向偏差的均值和标准差分别为左偏 0.002 和 0.027 m, 满足作业要求。研究结果表明, 该方法适应不同的四边形农田和障碍物, 可以满足无人驾驶农机自主作业的需求。

关键词: 农业机械; 自动驾驶; 自主作业; 路径规划

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.001

中图分类号: S24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-16-0001-07

翟卫欣, 王东旭, 陈智博, 等. 无人驾驶农机自主作业路径规划方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 1-7. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.001 <http://www.tcsae.org>

Zhai Weixin, Wang Dongxu, Chen Zhibo, et al. Autonomous operation path planning method for unmanned agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 1-7. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.001 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

随着云定位和协同精密定位等技术的不断发展, 农机自动驾驶技术已大规模应用于农业生产, 有利于降低劳动强度、提高作业质量和提升劳动效率^[1-2]。在农机自动驾驶技术基础上发展的农机无人驾驶技术, 则致力于进一步减少劳动力数量, 以应对农业劳动力日益紧缺和用工成本日益高涨等严峻问题^[3]。相较于农机自动驾驶, 农机无人驾驶在作业速度和机具动作指令等方面, 对路径规划提出了更高的要求^[4], 需要研发基于指令的农机作业路径规划方法, 特别是研发适应不同四边形农田、不同农艺、不同机具和不同工序的农机路径规划方法。

与行人、移动机器人、车辆和无人机等场景不同^[5-8], 农机作业路径规划的主要目标是高效地实现农田全覆盖作业^[9]。目前, 该领域的研究热点主要集中在以 AB 线模式^[10]为基础的路由规划^[11]、地头转弯及障碍物处理等。在路由规划方面, 自从 Bochtis 等^[12]提出以非作业路程为评价指标以来, Conesa-Muñoz 等^[13]引入了停车点适应性, Rodias 等^[14]建立了油耗优化与评估模型, Graf 等^[15]以总

路程为指标完成了 2 种圈型模式 (circular pattern 及 circular pattern*) 的设计和评估, Utamima 等^[16-17]提出进化混合邻域搜索算法和进化分布式评估算法来优化非作业路程。在地头转弯方面, 孟志军等^[18]基于半圆形、梨形和鱼尾形等转弯模式进行了作业方向的优化, Cariou 等^[19]提出了基于回旋曲线的掉头方法, Boryga 等^[20]提出了基于多项式曲线的掉头路径规划方法。在障碍物处理方面, 奚小波等^[21]面向圆形障碍物, 设计了一种基于 Bezier 曲线的避障方法, Zhou 等^[22]提出了一种满足农田和障碍物适应性的路网生成方法。

现有的农机作业路径规划大多围绕单一问题 (如路由问题、掉头问题或避障问题) 进行算法优化和仿真测试, 以一个农田作业任务为研究对象的完整规划方法研究较少^[23], 尚无法满足无人驾驶农机应用需求。因此, 本文面向农机无人驾驶需要, 设计完整的农田作业路径规划方法, 包括作业条带分割、路由规划、掉头路径生成、障碍物处理等模块, 生成包含指令信息的路径点文件。为验证方法的合理性和高效性, 以真实地块和农机为基础进行仿真试验, 并基于 DF1004 无人驾驶农机开展田间播种试验。

1 材料与方 法

1.1 技术路线

路径规划方法架构见图 1, 主要包括农田信息处理模块和路径规划模块。农田信息处理模块基于地块轮廓测绘点数据和障碍物测绘点数据等农田信息生成作业参数; 路径规划模块基于作业方向、作业幅宽、转弯半径

收稿日期: 2021-06-25 修订日期: 2021-07-30

基金项目: 北京市科委项目 (Z201100008020008); 国家发展改革委员会项目 (JZNY001)

作者简介: 翟卫欣, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为时空大数据、地图学与地理信息系统、智能农机等。Email: zhaiweixin@cau.edu.cn

*通信作者: 吴才聪, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为农机导航与位置服务等。Email: wucc@cau.edu.cn

和起始方位等作业参数计算出不同的农田区域并生成包含指令信息的路径点集, 并实现数据的可视化。

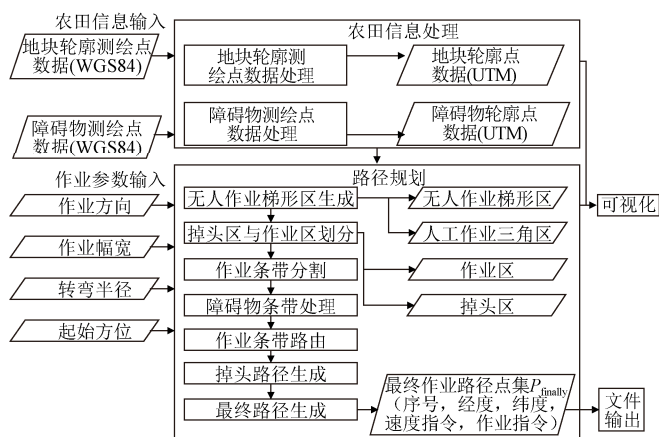


图1 无人驾驶农机路径规划流程

Fig.1 Path planning workflow for unmanned agricultural machine

1.2 农田信息处理

农田信息可通过对目标农田进行测绘获取, 测绘设备采集的位置数据坐标系为 WGS84 (World Geodetic System 1984), 为便于进行几何规划, 需要将地图数据转化为 UTM (Universal Transverse Mercator, 通用横轴墨卡托投影) 坐标系。农田信息主要分为 2 种, 分别是地块轮廓点数据和障碍物轮廓点数据, 因此设计 2 种测绘方案和数据处理方法。地块轮廓点数据获取方法较为简单, 可以直接利用厘米级 RTK (Real-Time Kinematic, 动态载波相位差分) 测绘装置进行控制点采集获取原始位置数据, 并经过地块轮廓测绘点数据处理转换为可直接运算的地块轮廓点数据。

原始位置数据为 csv 格式, 每一条数据包括点名称、纬度、经度和高程字段, 经过地块轮廓测绘点数据处理提取纬度和经度数据, 并转换为 UTM 坐标系格式, 以数

组形式存于内存空间中。

农田中的主要障碍物包括电线杆、电塔、沟渠、树等, 可简化为点障碍物和线障碍物, 为便于测绘和后续处理, 在测绘时点的命名形式为“AA B C DDD”, 其中, AA 表示障碍物序号; B 表示障碍物类型, 共 2 类: 点障碍物 (用 O 表示) 和线障碍物 (用 L 表示); C 表示障碍物中的点序号; DDD 表示障碍物点尺寸, 点障碍物取半径尺寸, 线障碍物取宽度尺寸。可近似为圆形的障碍物应处理为点障碍物, 利用测绘装置及卷尺工具对其圆心和半径进行测绘; 长条形障碍物为线障碍物, 利用测绘装置对端点及转折点进行测绘, 并利用卷尺测绘其宽度。

无论点障碍物还是线障碍物, 均可利用障碍物测绘点数据处理方法转换为多边形障碍物轮廓点数据。具体方法如下: 1) 通过对点名称进行解析和坐标系转换, 获取每个障碍物对象的测绘点列表, 字段包括障碍物类型、障碍物中的点序号、点尺寸、东向坐标和北向坐标; 2) 根据障碍物类型的不同, 构造 2 种障碍物轮廓计算方式, 并统一为多边形形式, 并用其顶点表示: 线障碍物的点坐标为边中点, 根据点尺寸和点坐标, 利用相邻点的矢量垂线生成该点所在边的两端点, 进而计算障碍物多边形的顶点; 点障碍物仅有 1 个测绘点, 即障碍物圆心点, 本研究用正多边形表示, 计算得到该多边形的顶点。

1.3 “区块套行”路径规划方法

本研究的“区块套行”路径规划方法基于 AB 线^[10]作业模式进行设计, 主要适用于四边形地块, 利用农田信息处理模块生成的地块轮廓点数据和障碍物轮廓点数据等农田信息, 结合作业方向、作业幅宽、转弯半径和起始方位等作业参数, 生成支持无人驾驶农机执行作业任务的最终作业路径点集文件。

路径规划过程见图 2, 主要包括无人作业梯形区生成、掉头区与作业区分割、作业条带分割、障碍物条带处理、作业条带路由、掉头路径生成、最终路径生成等子模块。

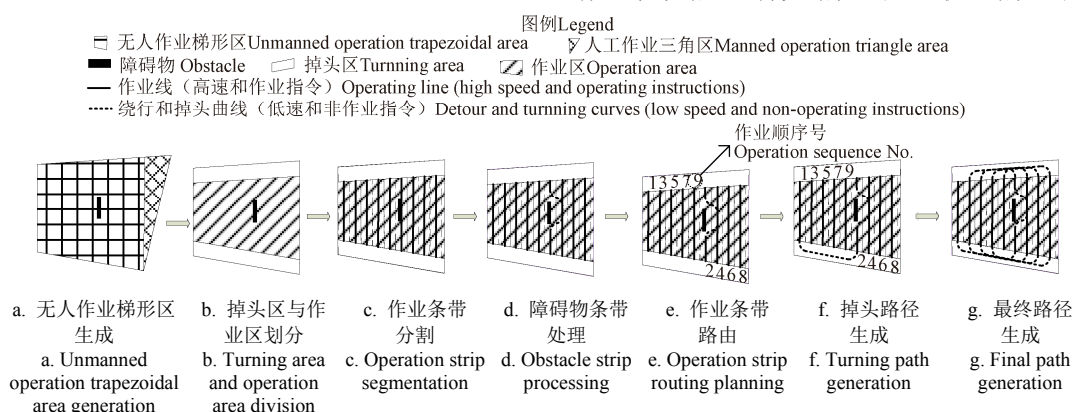


图2 无人驾驶农机路径规划过程

Fig.2 Path planning process for unmanned agricultural machine

1) 无人作业梯形区生成。考虑到作业路径的平行性要求, 首先对地块进行无人作业适应性划分, 以作业方向为平行边在四边形地块内部构建最大梯形, 生成适应于无人作业的梯形区, 见图 2a。

2) 掉头区与作业区分割。根据作业幅宽 w 和转弯半径 r 设置掉头区的宽度 w_{turn} , 见式 (1)。

$$w_{\text{turn}} = \left\lceil \frac{r + \frac{w}{2}}{w} \right\rceil \cdot w \quad (1)$$

进而利用作业方向参数在无人作业梯形区的非作业方向边划分 2 个宽度为 w_{turn} 的平行四边形作为掉头区 (图 2b)。

3) 作业条带分割。AB 线的基本作业单元为作业条

带，因此本研究先对作业区进行作业条带分割，生成作业直线——即作业条带中心线（图 2c）。作业条带方向为作业方向，宽度为作业幅宽，以近起始方位的梯形区平行边为起始边向另一边进行延展，最终完成整个作业区的作业条带分割。

4) 障碍物条带处理（图 2d）。障碍物条带指与障碍物相交的作业条带，由于线障碍物和点障碍物均已抽象为用顶点表示的多边形形式，因此可以统一处理。本文障碍物绕行策略的优化综合考虑转弯半径、障碍物外形和作业条带的综合影响，详见图 3。

如图 3a，首先对作业条带的障碍物相交性进行判断，定义相交及非相交条带的编号分别为 q_c 和 q_n ，将作业条带 q_c 划分为前后 2 个作业段和中间绕行段，绕行段主要由绕行弧和绕行直线组成。绕行段的生成与障碍物多边形和作业条带 q_n 有关，首先找到障碍物前置与后置极限边直线 L_f 和 L_b ，将其与作业条带 q_n 进行相交得到绕行直线段的两端点 P_{nf} 和 P_{nb} ，绕行曲线可分为“双弧”和“弧-线-弧”形式，如图 3b 和 3c，绕行曲线形式的选择与转弯半径 r 和绕行宽度 d_{cir} 有关，当 $d_{cir} \leq 2r$ 时，绕行曲线为“双弧”形式，由 2 个相切弧组成，当 $d_{cir} > 2r$ 时，绕行曲线段为“弧-线-弧”形式，由 2 个 4 等分圆弧和连接线段组成。

5) 作业条带路由。为满足高作业路程比要求，利用作业条带路由方法对作业条带进行排序（图 2e）。以作业路程比最大为目标，构造短掉头路程的掉头模式，要求相邻顺序作业的掉头为 U 形模式，相邻顺序的作业直线间距离不小于 $2r$ ，且应为作业幅宽的整数倍，因此采用区块套行作业模式进行作业条带路由方法设计。区块作业模式将所有作业路径（数量为 $N_{operate}$ ）划分为 N_{blocks} 个单元区块和 1 个剩余区块。

定义每个单元区块作业条带数为 n_{block} ，按式 (2) 计算：

$$q_k = \begin{cases} \left\lfloor \frac{k}{n_{block}} \right\rfloor \cdot n_{block} + \left((k \bmod n_{block} + 1) \bmod 2 \times \left\lfloor \frac{n_{block}}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{k \bmod n_{block}}{2} \right\rfloor \right), & k \leq n_{block} \cdot N_{blocks} \\ n_{block} \cdot N_{blocks} + (k - n_{block} \cdot N_{blocks}) \bmod 2 \times \left\lfloor \frac{N_{operate} - n_{block} \cdot N_{blocks}}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{k - n_{block} \cdot N_{blocks}}{2} \right\rfloor, & k > n_{block} \cdot N_{blocks} \end{cases} \quad (4)$$

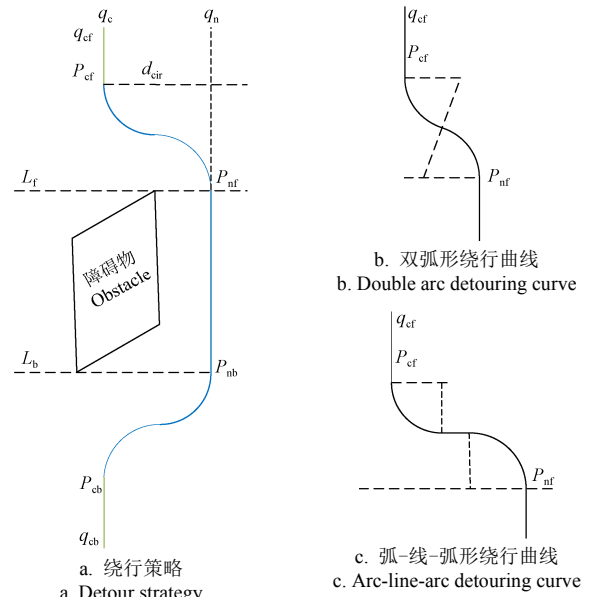
6) 掉头路径生成。掉头路径在相邻顺序的作业直线之间生成，根据转弯半径参数和两作业直线坐标，可生成“弧-线-弧”形式的 U 形转弯掉头路径（图 2f）。

7) 最终路径生成。为确保无人驾驶农机的速度状态和机具状态，为路径设计 2 类基本指令（见表 1），在直线作业路径点上增加高速和作业指令，在绕行和掉头曲线路径点上增加低速和非作业指令，最终生成含有指令信息的作业路径点形式的最终路径（图 2g）。

表 1 作业路径上的基本指令

Table 1 Basic instruction on operation path

指令类型 Instruction type	指令值 Instruction value	指令含义 Instruction meaning
速度指令	1	高速
Speed instruction	0	低速
机具状态指令	1	作业
Implement state instruction	0	非作业



注： $q_{cf}P_{cf}$ 为前置作业段； $P_{cf}P_{nf}$ 为前置绕行段曲线； $P_{nf}P_{nb}$ 为绕行直线； $P_{nb}P_{cb}$ 为后置绕行曲线段； $P_{cb}q_{cb}$ 为后置作业； L_f 为障碍物前置极限边线； L_b 为障碍物后置极限边线； d_{cir} 为绕行宽度，m。
Note: $q_{cf}P_{cf}$ is the front operation section; $P_{cf}P_{nf}$ is the front detour curve section; $P_{nf}P_{nb}$ is the detour straight section; $P_{nb}P_{cb}$ is the rear detour curve section; $P_{cb}q_{cb}$ is the rear operation section; L_f is the front limit edge of the obstacle; L_b is the rear limit edge of the obstacle; d_{cir} is the detour width, m.

图 3 障碍物条带处理方法

Fig.3 Processing method of obstacle strips involving obstacles

$$n_{block} = \left\lceil \frac{2r}{w} \right\rceil \times 2 + 1 \quad (2)$$

则单元区块数 N_{blocks} 按式 (3) 计算：

$$N_{blocks} = \left\lfloor \frac{N_{operate}}{n_{block}} \right\rfloor - 1 \quad (3)$$

定义作业顺序号为 k ，则此刻的作业条带编号 q_k 按式 (4) 计算：

2 仿真试验

为验证区块套行法相较于其他传统方法的优越性，本文以真实地块参数开展仿真试验。以北京市大兴区榆垓镇某地块作为仿真试验区域，地块总面积为 5.57 hm^2 ，通过 i90 惯导 RTK (Real-Time Kinematic) 设备进行地块轮廓测绘点数据和障碍物测绘点数据的采集，详细数据见表 2。

由于相邻条带作业“灯泡型”转弯法^[24]（简称相邻法）较为流行，因此本文将相邻法作为对照组开展试验。试验分为 5 组，分别应用相邻法及区块套行法，参照文献[25]对作业起点、作业方向、作业幅宽和转弯半径等作业参数进行设计，详见表 3。

本文以试验 1 为例进行分析，结果见图 4 (Universal Transverse Mercator Grid System, 通用横墨卡托格网系统，UTM)，仿真运算发现，区块套行法的掉头区面积为 2.14 hm^2 ，而“相邻法”为 5.00 hm^2 ，因此区块套行法

的掉头区更小，意味着更高的作业面积比和作业路程比。

表 2 仿真试验地块轮廓及障碍物测绘点数据
Table 2 Mapping points of field outline and obstacles in simulation tests

测绘数据类型 Surveying data type	点名称 Point name	纬度 Latitude/(°)	经度 Longitude/(°)
地块轮廓测绘点数据 Plot contour surveying point data	0	39.530 89	116.291
	1	39.532 64	116.290 9
	2	39.532 77	116.287 7
障碍物测绘点数据 Obstacle surveying point data	01 L 1 380	39.532 38	116.290 2
	01 L 2 360	39.531 33	116.290 3

注：障碍物测绘点名称“01 L 1 380”中，“01”表示障碍物序号为 01；“L”表示障碍物类型为线障碍物；“1”表示障碍物中的点序号为 1；“380”表示线障碍物的宽度为 380 cm。
Note: In the point name “01 L 1 380” of the obstacle surveying point data: “01” means the obstacle serial No. is 01; “L” means the obstacle type is a line obstacle; “1” means the serial No. of the point in the obstacle is 1; “380” means the width of the line obstacle is 380 cm.

表 3 作业参数
Table 3 Operation parameters

试验号 Test No.	起始点 Starting point	作业方向 Operation direction	作业幅宽 Operation width/m	转弯半径 Turning radius/m
1	1	2→3	2.6	5.3
2	1	2→3	3.6	5.3
3	1	2→3	2.6	4.1
4	2	2→3	2.6	5.3
5	1	1→0	2.6	5.3

注：作业方向为从前一个点指向后一个点的方向。
Note: The operation direction is the direction from the former to the latter.

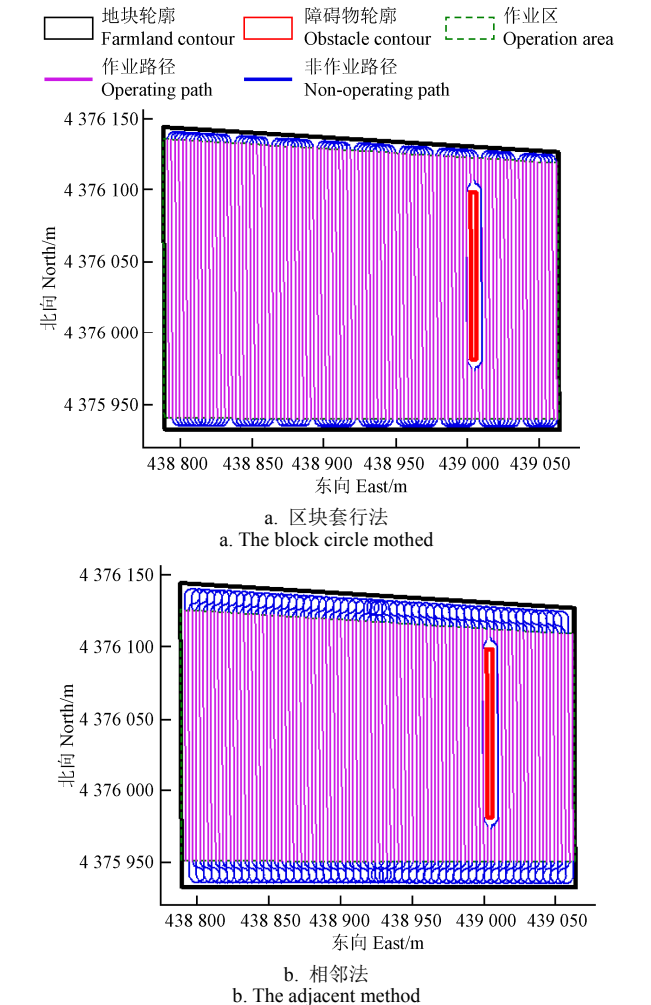


图 4 仿真试验 1 作业路径规划结果
Fig.4 Operation path planning results in simulation test 1

选取面积、路程等指标进行作业效用评价^[26-27]，结果见表 4。通过对比可以发现，区块套行法的作业面积比及作业路程比 2 项指标均明显优于相邻法，平均分别提升了 10.0 %和 8.8 %，说明区块套行法中基于 U 型掉头进行的路由规划能够有效减少掉头区面积和缩短掉头路程，具有可行性与高效性。

表 4 仿真试验结果
Table 4 Simulation test results

试验号 Test No.	方法 Method	作业面积 Operation area/hm ²	作业面积比 Operation area ratio /%	总路程 Total distance/ m	作业路程 Operation distance/ m	作业路程比 Operation distance ratio/%
1	a	5.03	90.3	21 921	19 361	88.3
	b	4.45	79.8	21 667	17 125	79.0
2	a	5.13	91.2	15 879	14 128	89.0
	b	4.48	80.4	15 654	12 449	79.5
3	a	5.03	90.3	21 496	19 365	90.0
	b	4.59	82.4	21 222	17 674	83.3
4	a	5.07	91.0	21 928	19 506	89.0
	b	4.49	80.5	21 674	17 270	79.7
5	a	5.07	90.9	21 916	19 494	88.9
	b	4.49	80.5	21 662	17 257	79.7

注：a 为区块套行法；b 为相邻法；作业路程指机具状态为“作业”的路径长度；总路程指生成的路径总长度；作业面积=作业路程×作业幅宽，总面积利用多边形面积算法获得；作业面积比=作业面积/总面积；作业路程比=作业路程/总路程。
Note: a is the block circle method; b is the adjacent method; the operating distance refers to the length of the path with the implement state as “operating”; the total distance refers to the total length of the generated path; operating area = operating distance × operating width, with the total area obtained by the polygon area calculation method; operating area ratio = operating area/total area; operating distance ratio = operating distance/total distance.

3 田间试验

本文的试验平台为无人驾驶拖拉机，该机器以 DF1004 CVT 线控无级变速拖拉机为基础，通过融合 FARMSTARF2BD-2.5RD 北斗高精度农机自动驾驶系统，能够执行路径跟踪、机具升降及速度控制等功能，见图 5。

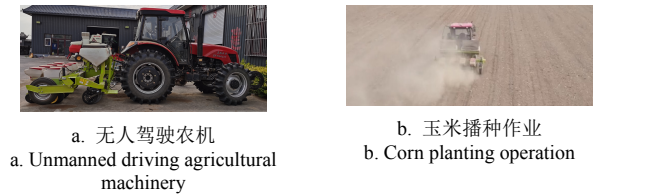


图 5 无人驾驶农机及玉米播种作业
Fig.5 Unmanned driving agricultural machinery and corn planting operation

田间试验地块位于北京市大兴区榆垓镇，内部无障碍物，轮廓数据见表 5，地块总面积为 1.50 hm²。作业试验选择玉米播种试验，试验时间为 2020 年 6 月，作业参数设置如下：作业起点是 1 号点，作业方向从点 2 指向点 3 (2→3)，作业幅宽 2.6 m，转弯半径 10 m。

表 5 田间试验地块轮廓测绘点数据
Table 5 Mapping points of field outline in field tests

点名称 Point name	纬度 Latitude/(°)	经度 Longitude/(°)
0	39.530 92	116.288 7
1	39.532 71	116.288 7
2	39.532 7	116.287 8
3	39.530 91	116.287 8

作业结果分为规划路径和实际路径, 规划路径由区块套行法生成, 实际路径由无人驾驶农机在实际作业中产生, 通过北斗高精度农机自动驾驶系统获取, 详见图 6。可以发现, 无人驾驶农机作业的实际结果和规划结果基本吻合。通过对作业环节的横向偏差进行量化分析发现, 总体而言, 最值为左偏 0.273 m 和右偏 0.174 m, 均值为左偏 0.002 m, 标准差为 0.027 m。

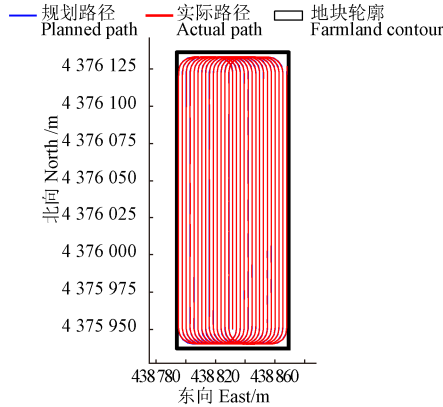


图 6 田间试验中规划路径与实际路径

Fig.6 The planned path and the actual path in the field test

横向偏差结果见图 7。箱线图(图 7a)表征了各条带横向偏差的异常值、上下边缘、上下四分位数和中位数等统计特征, 可以发现, 主要偏差来源于直线作业的起点(如作业顺序号为 1 的条带, 图 7b)和终点(如作业顺序号为 15 的条带, 图 7c)处, 即掉头环节和作业环节的交接位置。作业效用评价发现, 本次试验的作业面积为 1.30 hm², 作业面积比为 87.0%, 总路程为 6 379 m, 作业路程为 5 010 m, 作业路程比为 78.5%。当前路径规划研究以掉头优化为主, 掉头区面积占比在 15%以上, 换算为作业面积比为 85%^[28]; 而当前机手作业的有效作业时间仅占总作业时间的 40%左右, 换算为作业路程比为 60%^[29]。显然, 和现有研究与机手作业的相应指标相比, 本文的区块套行法在作业面积比和作业路程比方面均得到了明显的提升。

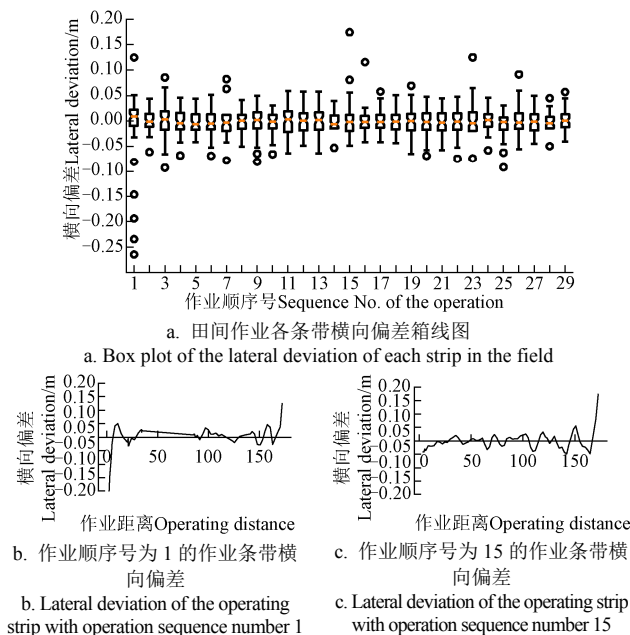


图 7 田间试验横向偏差

Fig.7 The lateral deviations in the field test

4 结 论

本研究提出一种无人驾驶农机自主作业路径规划方法, 在农田地块数据及障碍物数据测绘及预处理的基础上, 考虑作业起点、作业方向、转弯半径、作业幅宽等作业参数, 构建了完整田内作业的农机路径规划框架, 具有农田四边形适应性和作业参数适应性等特点。研究中引入速度指令和机具状态指令信息, 解决了田内作业无人农机规划完整性问题。仿真试验结果表明, 相比传统的相邻法, 区块套行法的作业面积比及作业路程比提高了 10.0%和 8.8%。玉米播种田间试验结果表明, 应用区块套行法所规划路径的农机无人驾驶作业, 其横向偏差的均值和标准差分别为左偏 0.002 m 和 0.027 m, 满足无人驾驶的作业要求。

[参 考 文 献]

- [1] Yin X, Wang Y X, Chen Y L, et al. Development of autonomous navigation controller for agricultural vehicles[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020; 13(4): 70-76.
- [2] 吴才聪, 方向明. 基于北斗系统的大田智慧农业精准服务体系构建[J]. 智慧农业, 2019, 1(4): 83-90.
Wu Caicong, Fang Xiangming. Development of precision service system for intelligent agriculture field crop production based on BeiDou system[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(4): 83-90. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘小伟, 吴才聪, 车宇. 无人化农机技术与装备发展趋势[J]. 农机科技推广, 2019(18): 26-27.
Liu Xiaowei, Wu Caicong, Che Yu. Development trend of unmanned agricultural machinery technology and equipment[J]. Agriculture Machinery Technology Extension, 2019(10): 26-27. (in Chinese with English abstract)
- [4] 吴才聪, 王东旭, 陈智博, 等. SF2104 拖拉机自主行驶与作业控制方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 42-48.
Wu Caicong, Wang Dongxu, Chen Zhibo, et al. Autonomous driving and operation control method for SF2104 tractors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 42-48. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李云伍, 徐俊杰, 王铭枫, 等. 丘陵山区田间道路自主行驶转运车及其视觉导航系统研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 52-61.
Li Yunwu, Xu Junjie, Wang Mingfeng, et al. Development of autonomous driving transfer trolley on field roads and its visual navigation system for hilly areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(1): 52-61. (in Chinese with English abstract)
- [6] Zhang X H, Fan C G, Cao Z Y, et al. Novel obstacle-avoiding path planning for crop protection UAV

- using optimized Dubins curve[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(4): 172-177.
- [7] 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)
- [8] 郑滋, 杨圣慧, 郑永军, 等. 多旋翼无人机避障航迹规划算法[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(23): 59-69.
- Zheng Zi, Yang Shenghui, Zheng Yongjun, et al. Obstacle avoidance path planning algorithm for multi-rotor UAVs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(23): 59-69. (in Chinese with English abstract)
- [9] Lu E, Xu L Z, Li Y M, et al. Modeling of working environment and coverage path planning method of combine harvesters[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(2): 132-137.
- [10] 吴才聪. 北斗在农业生产过程中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 74-124.
- [11] Vougioukas S G. Annual review of control robotics and autonomous systems[J]. *Agricultural Robotics*, 2019, 2(5): 365-392.
- [12] 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.
- [13] Conesa-Munoz J, Bengochea-Guevara J M, Andujar D, et al. Route planning for agricultural tasks: A general approach for fleets of autonomous vehicles in site-specific herbicide applications[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 127(9): 204-220.
- [14] Rodias E, Berruto R, Busato P, et al. Energy savings from optimised in-field route planning for agricultural machinery[J]. *Sustainability*, 2017, 9(11): 1-13.
- [15] Graf Plessen M M. Partial field coverage based on two path planning patterns[J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 171(5): 16-29.
- [16] Utamima A, Reiners T, Ansariipoor A H. Optimisation of agricultural routing planning in field logistics with evolutionary hybrid neighbourhood search[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 184(6): 166-180.
- [17] Utamima A, Reiners T, Ansariipoor A H. Evolutionary estimation of distribution algorithm for agricultural routing planning in field logistics[J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 161 (10): 560-567.
- [18] 孟志军, 刘卉, 王华, 等. 农田作业机械路径优化方法[J], *农业机械学报*. 2012, 43(6): 147-152.
- Meng Zhijun, Liu Hui, Wang Hua, et al. Optimal path planning for agricultural machinery[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(6): 147-152. (in Chinese with English abstract)
- [19] Cariou C, Gobor Z, Seiferth B, et al. Mobile robot trajectory planning under kinematic and dynamic constraints for partial and full field Coverage[J]. *Journal of Field Robotics*, 2017, 34(7): 1297-1312.
- [20] Boryga M, Kolodziej P, Golacki K. Application of polynomial transition curves for trajectory planning on the headlands[J]. *Agriculture*, 2020, 10(5): 1-16.
- [21] 奚小波, 史扬杰, 单翔, 等. 基于 Bezier 曲线优化的农机自动驾驶避障控制方法[J]. *农业工程学报*. 2019, 35(19): 82-88.
- Xi Xiaobo, Shi Yangjie, Shan Xiang, et al. Obstacle avoidance path control method for agricultural machinery automatic driving based on optimized Bezier[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(19): 82-88. (in Chinese with English abstract)
- [22] Zhou K, Jensen A L, Bochtis D, et al. Metric map generation for autonomous field operations[J]. *Agronomy*, 2020, 10(1): 1-17.
- [23] Moysiadis V, Tsolakis N, Katikaridis D, et al. Mobile robotics in agricultural operations: A narrative review on planning aspects[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(10): 1-17.
- [24] Evans J T, Pitla S K, Luck J D, et al. Row crop grain harvester path optimization in headland patterns[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 171(4): 1-8.
- [25] 中国农业机械化科学研究院编. 农业机械设计手册 上[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 175-415.
- [26] Nilsson R S, Zhou K. Method and bench-marking framework for coverage path planning in arable farming[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 198(10): 248-265.
- [27] Nilsson R S, Zhou K. Decision support tool for operational planning of field operations[J]. *Agronomy*, 2020, 10(2): 1-12.
- [28] Wang H, Noguchi N. Adaptive turning control for an agricultural robot tractor[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(6): 113-119.
- [29] Wu C C, Chen Z B, Wang D X, et al. Behavior modelling and sensing for machinery operations using smartphone's sensor data: A case study of forage maize sowing[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(6): 66-74.

Autonomous operation path planning method for unmanned agricultural machinery

Zhai Weixin¹, Wang Dongxu^{1,2}, Chen Zhibo¹, Dong Liang¹, Zhao Xin¹, Wu Caicong^{1✉}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Institute of Computer Application Technology, Norinco Group, Beijing 100089, China)

Abstract: This study aims to meet the application requirements of unmanned driving and autonomous operation in agricultural machinery, particularly for better adaptability of quadrilateral farmland. A path planning was also designed to implement the farmland operation using unmanned agricultural machinery. AB line operation mode was selected to generate executable paths with speed and implement state instructions. Two parts were composed of farmland information processing and path planning. The farmland information processing module was used to process the surveying point data in land contour and obstacles. Among them, one data processing was for land contour surveying and mapping points, and another for obstacle surveying and mapping points. The former was used to extract the longitude and latitude fields of original position data, and then convert them into Universal Transverse Mercator (UTM) coordinates. The latter was utilized to convert the point and line obstacles generated by surveying and mapping into the unified obstacle polygonal contour data for the subsequent path planning. Next, the operating parameters were defined by the user in the path planning module, including the operating direction, operating width, turning radius, and starting position. The sub-modules were also constructed, such as unmanned operation trapezoidal area generation, turning and operation area division, operation strip segmentation, obstacle strip processing, strip routing planning, turning, and final path generation. The research methods were as follows: (1) In the sub-module of unmanned operation trapezoidal area generation, the operation direction was taken as the parallel side to construct a trapezoidal area suitable for unmanned operation in the quadrilateral land. (2) In the sub-module of turning and operation area division, the width of the turning area was set, according to the operating width and turning radius. Then, 2 parallelogram turning and 1 operation area were generated inside the unmanned operation trapezoidal areas. (3) In the sub-module of operation strip segmentation, the operating direction was taken as the strip direction, while, the operating width as the strip width, in order to complete the strip dividing of the entire operation areas. (4) In the sub-module of obstacle strip processing, the operation line was cut to intersect with the obstacle polygon back and forth, and thereby to construct a detour path composed of arcs and line segments. (5) In the sub-module of strip routing planning, the operation strips were sorted in order. All the strips were divided into the blocks with constructing units, while, the strip selection was designed for different operating sequences to achieve better orderly operation strips. (6) In the sub-module of turning path generation, a U-shaped turning path was generated in the form of "arc-line-arc" using the adjacent sequence of operation strips and turning radius. (7) In the sub-module of final path generation, the final path was realized by adding speed instructions and implement state instructions at the path points. The final path was thus executed in the unmanned agricultural machine. Simulation tests show that the proposed method was suitable for different quadrilateral farmland and obstacles. The operation area ratio and distance ratio increased by 10.0% and 8.8%, respectively, compared with the adjacent. Field tests show that the mean value and standard deviation for the lateral deviations of agricultural unmanned driving and autonomous operation were 0.002 m to the left and 0.027 m, respectively. Consequently, the generated path can meet the requirements of unmanned and autonomous operation in agricultural machinery. The finding can provide a complete path planning for unmanned agricultural machinery with the high adaptability of farmland and operating parameters for higher production efficiency.

Keywords: agricultural machinery; automatic driving; autonomous operation; path planning