

基于 GNSS 农田平整全局路径规划方法与试验

刘刚^{1,2} 康熙^{1,2} 夏友祥^{1,2} 景云鹏^{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. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对全球导航卫星系统 (Global navigation satellite system, GNSS) 农田平整系统缺少作业指导且效率低等问题, 提出了一种基于 GNSS 农田平整全局路径规划方法。分析农田实际平整条件, 创建适用于土地平整的农田地形环境模型, 生成农田地势信息图, 研究整块农田地势高程分布特征, 以平地作业中空载、满载的无效作业状态最少, 转向操作与重复行走最少为条件, 生成遍历整个农田的土地平整路径, 并通过拉力传感器实时监测铲车载荷。仿真试验结果表明, 相对于常规平整方法, 所提方法空载、满载率显著减小, 达到目标平整度时间节省 50% 以上。该方法可以规划有效路径, 减少无效作业时间, 平地效率提高 30% 以上。

关键词: 农田平整; 环境建模; 地势分析; 全局路径规划

中图分类号: S281 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0027-07

Global Path Planning Algorithm and Experiment Based on GNSS-controlled Precise Land Leveling System

LIU Gang^{1,2} KANG Xi^{1,2} XIA Youxiang^{1,2} JING Yunpeng^{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, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: GNSS controlled land leveling technology can improve farmland flatness effectively. To achieve saving the water and fertilizer, increase the effect of income so as to solve the problem on the lack of operation guidance and low efficiency in GNSS controlled land leveling system, a method of global path planning was proposed based on GNSS land leveling system. The theory of farmland leveling system was combined, and the conditions of farmland actual leveling were analyzed. Firstly, the actual condition of farmland was analyzed, and the farmland terrain environment model which was suitable for land-leveling was created, and then the farmland terrain information map was generated, from which the characteristics of farmland terrain distribution can be obtained. Under the condition of the least amount of invalid work about loaded and unloaded, and the condition of the least amount of steering and repetitive work, the traversal of the entire farmland land formation path was generated. The tension sensor was used to monitor the real time load of forklift. Then the simulated experiments were done and the data were analyzed, and the simulation results showed that compared with the conventional leveling method, in the method, the time of loaded and unloaded was significantly reduced, and the time of work was saved by more than 50%. The method can plan effective paths, reduce inefficient operating time, and increase the efficiency of land-leveling by more than 30%.

Key words: land leveling; environmental modeling; terrain analysis; global path planning

0 引言

土地平整可以对合理灌溉, 节约用水, 改善土壤

质量, 保持土壤肥料, 提高劳动生产率等起到重要的作用^[1-3]。

全球导航卫星系统 (Global navigation satellite

system,GNSS)平地技术是通过 GNSS 差分定位获取农田地势三维数据,通过计算机处理和设计最佳平整面,根据农田地势的实际高程与设计高程的落差自动精准控制铲车的升降从而实现土地平整^[4-5]。GNSS 控制平地技术适用于各种地形,具有不受阳光、风力、地势起伏等外界因素影响的优点,可以非常便捷地进行地形测量、设计基准面和土地平整,智能化和自动化程度较高,并且可扩展功能多,有着非常好的工作效率与发展前景^[6-7]。

GNSS 平地技术已在美国等发达国家得到了应用,包括 Trimble 公司的 FieldLevel II、Topcon 公司的 System 310、麦格集团的 GCS900 等系统,但其价格昂贵、安装较复杂、对国内农田环境和农用机械适用性较弱,不利于我国产业化推广^[8]。目前,我国前期研究的 GNSS 农田平整系统具有相对完善的功能,中国农业大学精细农业研究中心自 2009 年开始研发适合国内的 GNSS 智能化精细平地系统,经过几年的研究,实现了农田地形测量、平面平整、坡面平整、软硬件开发和系统集成。该系统精度高,能满足土地精细平整和灌溉需求^[8-10],但还存在对农田信息处理手段单一,在作业过程中缺少路径规划,容易出现铲车空载、满载、漏平和重平等问题,每块农田需要反复几次平整才能达到精度要求,作业效率低。

本文分析 GNSS 平地系统原理^[7],结合农田平整实际要求及作业经验,在改进系统硬件的基础上,对在地形测量后生成遍历农田的路径,指导平地作业,提高平地效率问题进行研究,提出一种基于地势信息的全局路径规划算法,并通过仿真对比试验验证算法的可行性。

1 系统设计

为了提高平地效率,增加拖拉机行走的目的性,根据 GNSS 精细农田平整的工作原理,结合实际需求,提出系统设计方案,在硬件、方法和软件方面进行改进。系统组成和系统总体框架如图 1 和图 2 所示。选择赫斯曼公司生产的 MA-004-111NA 型销轴力传感器对铲车载荷进行实时监控,传感器参数为:额定载荷 0~4 t,安全过载 150%,供电电压 10~30 V DC,输出信号 4~20 mA。

2 平地路径规划建模与算法描述

2.1 土地平整路径规划概述

常规的土地平整过程中,拖拉机始终保持直线行驶,到地头进行转向。这种方法操作要求低,线路明确简洁,但是在作业过程中容易出现平地铲空载、满载的情况,铲车空载、满载导致系统处于无土可

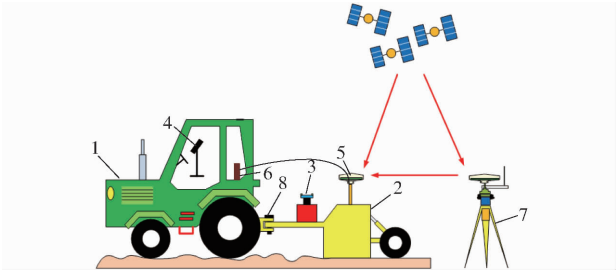


图 1 系统硬件组成

Fig. 1 System hardware components

1. 拖拉机 2. 平地铲 3. 液压系统 4. 智能控制终端 5. 移动站 6. 移动站电台 7. 基站 8. 销轴拉力传感器

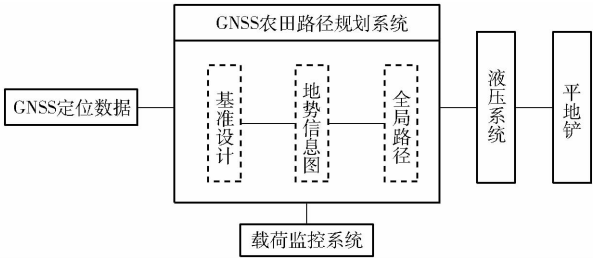


图 2 GNSS 农田路径规划系统框图

Fig. 2 Design of GNSS path planning system

卸、挖不动土的无效作业状态,在这种状态下拖拉机行驶过的农田地形没有得到改善,由于作业人员无法确定其位置,经常会出现漏平、重平的情况。为达到预期的平整效果,需要进行多次遍历农田的平地作业,极大影响了平地效率。

农田土地平整的路径规划通过地形测量获取农田地势信息,建立农田环境模型,利用路径规划算法分析地形三维数据,生成最有效的、遍历整个农田的路径指导作业。

路径规划流程如图 3 所示:①首先进行农田的地形测量,通过坐标转换、误差处理和插值处理获取农田地势信息。②根据地势信息计算农田基准高程。③生成农田地势信息图,显示每一块区域的挖填土方量,直观地表示农田各个位置的高低程度。④根据地势信息和全局路径规划算法,生成最优路径指导作业。⑤作业过程中,利用拉力传感器反馈铲车载荷,工作人员可以根据规划路径、铲车载荷和

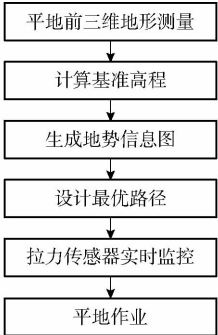


图 3 路径规划流程

Fig. 3 Flow chart of path planning algorithm

地势信息图判断拖拉机行驶方向。

2.2 算法设计与实现

2.2.1 环境建模方法

由于农田环境复杂,形状差异较大,拖拉机体积过大,无法灵活移动等原因,现有的环境建模方法无法满足要求,本文将栅格法与模板模型法相结合,建立一种适用于土地平整的农田地势环境建模方法。

农田土地平整的地形测量首先进行边界测量,确定农田形状,人为选取边界上一个位置为原点,拖拉机从原点出发,绕农田一圈回到原点,如图 4 所示;GNSS 测得数据组成边界点显示在地图上反映农田形状。

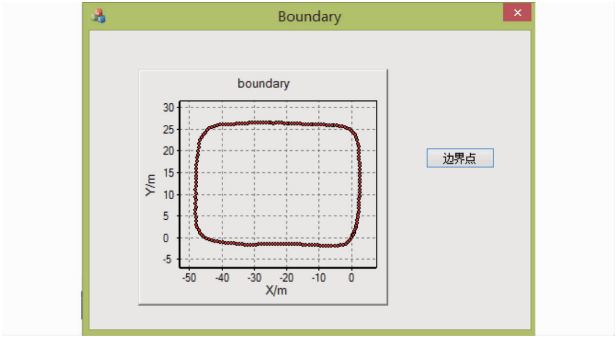


图 4 边界测量
Fig. 4 Boundary measurement

由于 GNSS 在边界测量过程中收集的数据为拖拉机行驶的位置信息,路线曲折并且四角呈弧形,不满足环境建模标准,本文利用方向包围盒方法 (Oriented bounding box, OBB) 对边界进行标准化处理^[11]。首先确定农田中心点 $C(x_c, y_c)$ 的位置

$$\begin{cases} x_c = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n x_m \\ y_c = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n y_m \end{cases} \quad (1)$$

寻找与 C 点距离最短的点 $P(x_p, y_p)$, 利用 l_{CP} 确定 OBB 主轴;生成包围盒如图 5 所示,即为环境边界。

在生成环境边界后,对内部区域进行单元格划分,并预留两侧区域为转弯地头。由于拖拉机不同

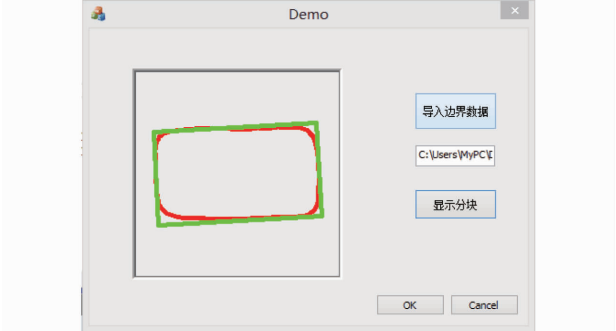


图 5 环境边界
Fig. 5 Boundary of environment

于普通机器人,灵活度不高,并且在平地过程中,应尽量保持直线行驶,普通栅格并不适用。本文将单元格设定为长方形,借鉴常规土地平整方法,即保证拖拉机的直线行驶,在特定情况转向,减少操作难度,如图 6 所示。



图 6 单元格划分
Fig. 6 Cell division

由于地块大小不统一,如先确定单元格长 L_b ,可能出现剩余地头区域极大或极小的情况,所以先确定地头长 L_a 为平地铲宽度 r ,既保证铲车对区域的全覆盖,又给拖拉机转向留有足够空间。将两侧地头内部区域分成单元格,其中单元格的宽度 d 与 L_a 相同,为平地铲宽度 r ,保证铲车在单元格内挖填土无剩余区域;由于 GNSS 农田平整系统用于精细平整,农田最大高度差 S_d 在 10 cm 以下^[12-15],为保证铲车在一个单元格内不空载、满载,根据平地铲规格(表 1)。由计算土方量的公式可得

$$L_b \leq \frac{2.5 \times 0.7 \times 1.0}{dS_d} = 7 \text{ m} \quad (2)$$

表 1 旱田平地铲主要参数

Tab. 1 Parameters of upland field shovel				
参数	铲宽/m	铲高/m	铲长/m	切向角/(°)
数值	2.5	0.7	1.0	50

此单元格设定的意义在于保证拖拉机在其中直线行驶,即 L_b 不能太小。首先求出一行单元格个数 p 及余数 q ,再计算出单元格长 L_b ,保证 $6 \text{ m} \leq L_b \leq 7 \text{ m}$,即

$$\frac{L - 2L_a}{6} = p \cdots \cdots q \quad (3)$$

$$L_b = 6 + \frac{q}{p} \quad (4)$$

式中 L ——环境边界长

2.2.2 路径规划算法

路径规划旨在于在地图中生成一条遍历整个农田的作业路径,在环境建模基础上生成地势信息图;通过整体地势判断,确定路径走向,在生成过程中根据特定原则进行局部调整;遍历后更新地势信息图,针对由空载、满载造成的未完全平整单元格进行二次规划平整,达到不漏平、重平,提高平整效率的效

果^[16-19]。算法流程图如图 7 所示。

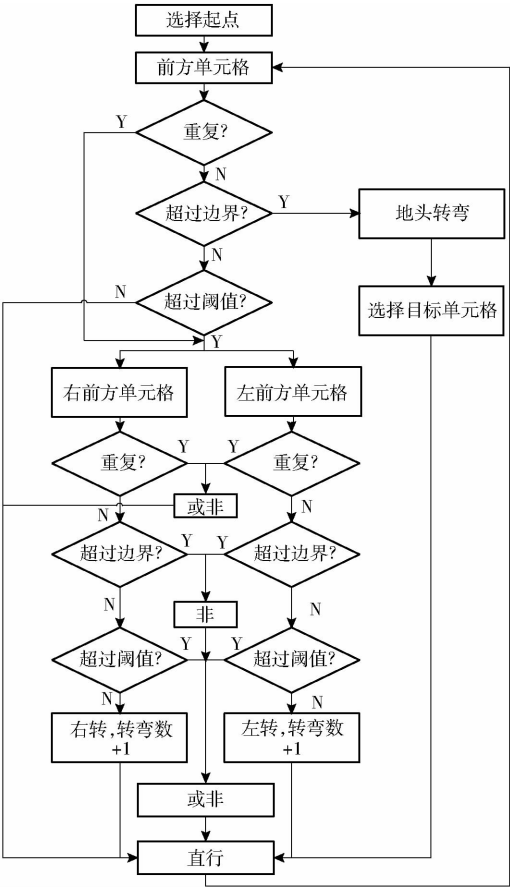


图 7 算法流程图

Fig. 7 Flow chart of algorithm

算法具体实现步骤如下：

(1) 标定单元格

地形测量后,通过误差处理剔除极点,计算基准高程 H_{av} ,并根据边界测量点生成标准化农田地形;将测得高程数据根据位置映射到单元格中,求出每个单元格内高程点的均值以表示单元格的平均高程,即

$$H_{ij} = \frac{1}{n}(H_1 + H_2 + \cdots + H_n) \tag{5}$$

式中 $H_1, H_2, \cdots, H_n$ ——单元格内各点高程

通过比较单元格平均高程与基准高程,得到其高、低程度并计算其挖填土方量 V_{ij} 为

$$V_{ij} = 2.5L_b(H_{av} - H_{ij}) \tag{6}$$

本文通过系统中地形测量功能于中国农业大学上庄实验站收集的真实农田数据,利用算法生成地势信息图,如图 8 所示。

(2) 地势分析

将农田纵向均分为二,分别计算总挖填土方量,判断地势高低;计算每一行单元格挖填土方量,用 $V_1, V_2, \cdots, V_n$ 表示;规定拖拉机在地势高侧地头转向时,其目标行挖填土方量与当前载荷量之和最小,且大于 0;拖拉机在地势低侧地头转向时,其目标行

0.823	0.628	0.405	0.441	-0.00	0.151	-0.76	-0.80
0.613	0.522	-0.08	0.114	-0.50	-0.05	-0.36	-0.84
0.367	0.299	0.081	-0.08	-0.53	-0.52	-0.42	-0.66
0.169	0.245	0.173	-0.06	-0.40	-0.52	-0.35	-0.71
0.247	0.126	0.164	-0.05	-0.31	-0.42	-0.31	-0.76
0.182	0.112	0.063	0.069	-0.16	-0.45	-0.09	-0.81
0.581	0.116	0.046	0.290	-0.01	-0.27	-0.03	-0.75
0.588	0.200	0.144	0.389	-0.00	0.032	0.016	-0.51
0.690	0.192	0.196	0.454	0.029	-0.03	-0.04	-0.41
0.762	0.392	0.414	0.546	0.026	-0.20	-0.19	-0.31
0.935	0.573	0.624	0.537	0.189	-0.30	-0.38	-0.35

图 8 地势信息图

Fig. 8 Dialog of terrain information

挖填土方量与当前载荷量之和最大,且小于 1.7 m^3 。

(3) 路径生成

路径生成的基本原则为:在保证铲车不空载、满载的情况下,保持直线行驶,拖拉机的目标点为其所在单元格左前、前和右前 3 个单元格。首先计算 $V_1, V_2, \cdots, V_n$ 绝对值,从小到大判断每一行两端单元格中土方量较大且大于 0 的单元格为路径起始点,开始生成路径。生成标准为:通过计算铲车内当前土方量与目标单元格土方量之和,预测铲车状态,设定空载、满载阈值,铲车内土方量在 2 个阈值范围内,则视为有效作业,即

$$V_0 \leq V_h \leq V_s \tag{7}$$

式中 V_0 ——空载阈值,为 0

V_s ——满载阈值,为 1.7 m^3

①首先计算铲车内土方量与前方单元格土方量之和 V_h ,如果在阈值范围之内,说明拖拉机直行过下一个单元格铲车始终保持有效作业状态,生成直行路径,更新铲车内土方量为 V_h ,更新前方单元格土方量为 0,对左右两侧单元格不予考虑。

②如铲车内土方量与前方单元格土方量之和超出阈值范围,分别计算其与左前、右前单元格土方量之和,如果都不在范围之内,则说明拖拉机转向不能避免空载、满载,则继续保持直行至前方单元格,更新铲车内土方量为 V_0 或 V_s ,前方单元格土方量减少 $V_0 - V_h$ 或 $V_s - V_h$ 。

③如果计算铲车内土方量与左前、右前单元格土方量之和的其一在阈值范围内,则说明拖拉机只有转向才能进行有效平整,则生成转向路径,更新铲车内土方量为 V_h ,更新前方单元格土方量为 0。

④如左前、右前均满足条件,则同时生成 2 条路径,说明两侧均能进行有效平整,并且路径一分为二同时继续生成路径。

⑤路径生成至地头位置,按照地势分析中地头转向原则选取目标单元格继续生成路径。

⑥所有路径遍历整个农田后,由转弯计数器记录每种路径的转弯数量,选择转弯数量最少的路径为最终生成路径。

(4) 二次平整路径生成

由于农田地势情况复杂,常规土地平整需要多次遍历农田作业才能达到目标平整度。通过生成路径平整后仍可能出现少数空载、满载情况,本方法在一次遍历作业后更新地势信息图,标记空载、满载单元格,显示单元格挖填土方量,并以避免空载、满载及路径最短为原则,生成二次平整路径,确保土地完全平整,提高平整效率。

3 仿真对比试验

为验证本文提出的基于 GNSS 农田平整的全局路径规划算法的可行性,在中国农业大学上庄实验站,选取 2 块大小、地势不同的试验田,设定为农田 1、农田 2,收集真实地形数据,对其分别进行对比仿真试验,在地势信息图上生成路线示意图,对比规划路径与 2 种常规路径在一次遍历后的空载、满载情况以及剩余挖填土方量,计算完全平整效率,对本方法效果进行判断。仿真生成路径以农田 1 为例。

3.1 一次遍历试验

一次遍历试验路径生成如图 9 ~ 11 所示。

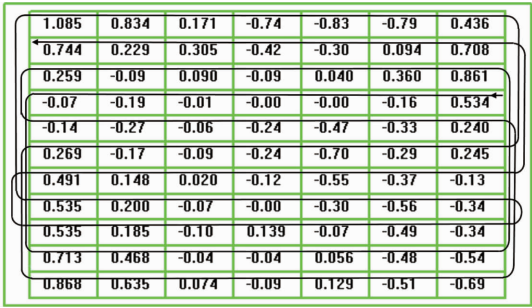


图 11 农田 1 规划路径

Fig. 11 Path planning of No. 1 farmland

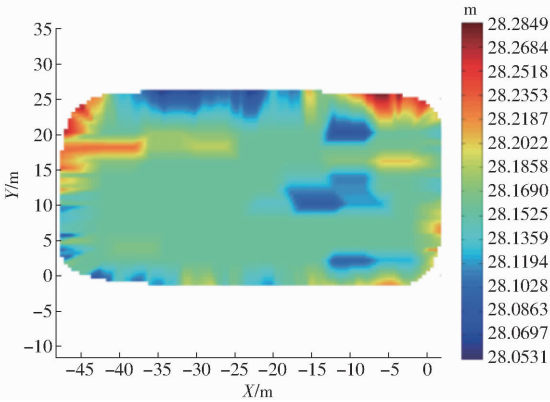
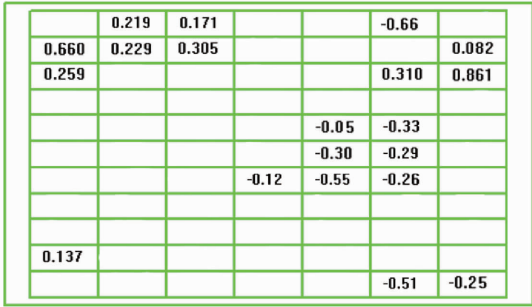


图 12 农田 1 常规螺旋形地形图

Fig. 12 Conventional spiral topographic map of No. 1 farmland



图 9 农田 1 常规螺旋形

Fig. 9 Conventional spiral of No. 1 farmland

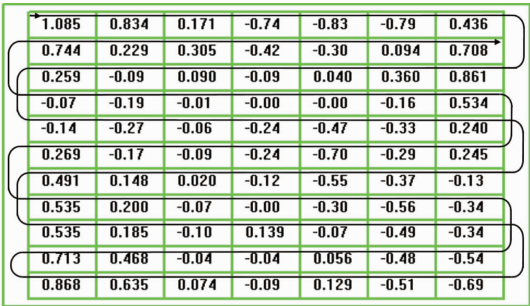


图 10 农田 1 常规蛇形

Fig. 10 Conventional serpentine of No. 1 farmland

一次遍历后地势信息与三维地形如图 12 ~ 14 所示。

3.2 完全平整试验

经过一次遍历后,农田地势有明显改善,但由于在过程中有无效作业情况,一些单元格地势没有改变,需要继续平整直至所有单元格挖填土方量为 0。

农田 1 利用常规螺旋形路径经过 3 次遍历达到完全平整,共经过 240 个单元格;利用常规蛇形路径

经过 2 次遍历达到完全平整,共经过 191 个单元格;规划路径共经过 100 个单元格。农田 2 利用常规螺旋形路径经过 2 次遍历达到完全平整,共经过 126 个单元格;利用常规蛇形路径经过 2 次遍历达到完全平整,共经过 181 个单元格;规划路径共经过 84 个单元格。农田 1 规划路径如图 15 所示。

3.3 试验结果与分析

试验以真实农田数据为基础,利用本文算法生成作业路径,仿真规划路径与 2 种常规路径在相同地块平整过程,通过地势信息图变化,计算得到一次遍历后空载、满载率,挖填土方量和完全平整效率,如表 2、3 所示。

2 块农田由于大小、地势不同,利用相同路径方法得到的结果不同,由表 2 可知,常规螺旋形和常规蛇形路径空载、满载率在 20% 以上,完全平整效率不超过 41%,规划路径一次遍历后空载、满载率仅为 11%,完全平整效率为 77%;由表 3 可知,常规蛇形路径效果一般,一次遍历空载、满载率为 46%,说

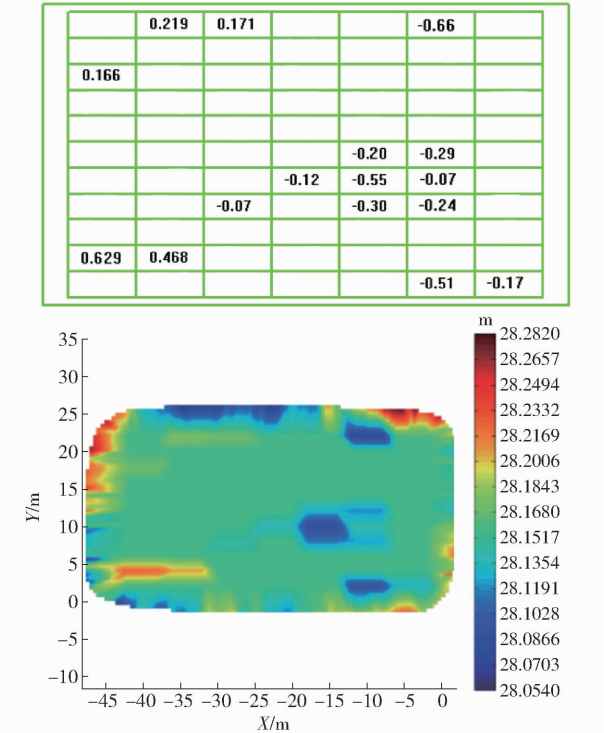


图 13 农田 1 常规蛇形地形图

Fig. 13 Conventional serpentine topographic map of No. 1 farmland

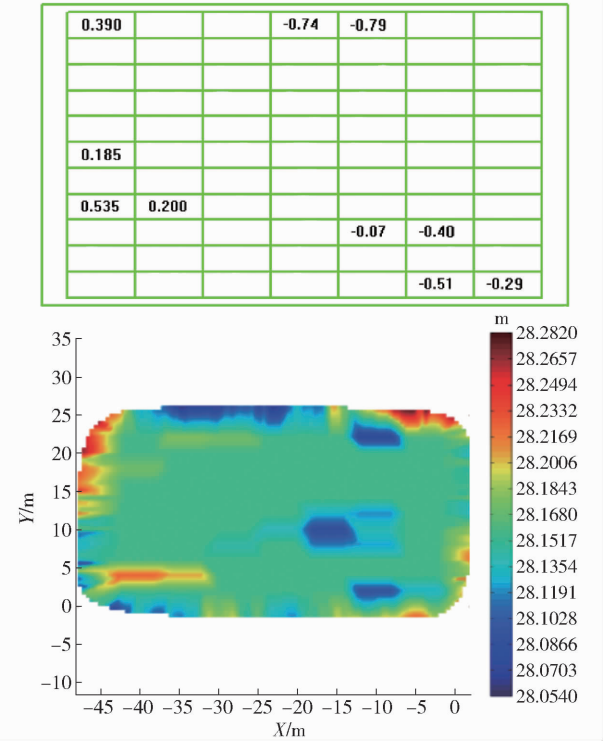


图 14 农田 1 规划路径地形图

Fig. 14 Path planning topographic map of No. 1 farmland

明有效作业仅达到 50% 左右,完全平整效率为 34.6%,常规螺旋形路径效果稍好,有 73% 的有效作业率及 50% 的完全平整效率,规划路径有效作业率达到 86%,完全平整率达到 75%。

由试验可知,常规平整方法由于路径固定,对于

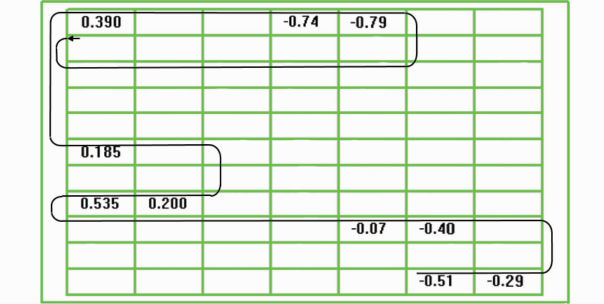


图 15 农田 1 完全平整规划路径

Fig. 15 Planning level path of No. 1 farmland

表 2 农田 1 对比结果

Tab. 2 Compared results of No.1 farmland

路径	空载、满载率/%	剩余挖填土方量/m ³	完全平整效率/%
常规螺旋形	26	6.56	32.1
常规蛇形	22	4.90	40.3
规划路径	11	4.11	77.0

表 3 农田 2 对比结果

Tab. 3 Compared results of No.2 farmland

路径	空载、满载率/%	剩余挖填土方量/m ³	完全平整效率/%
常规螺旋形	27	4.16	50.0
常规蛇形	46	7.33	34.6
规划路径	14	3.11	75.0

不同地势分布农田效果一般且波动较大,容易出现空载、满载现象,达到预期效果需要多次平整,完全平整效率低;相对于常规方法,本文提出的路径规划方法可以减少无效作业时间,不受农田地形影响,提高平整效率。

4 结论

- (1)在 GNSS 精细土地平整集成系统基础上增加了铲车载荷监控系统,实时获取载荷信息,便于工作人员了解铲车状态,作业过程中可及时进行局部调整。
- (2)提出了一种适用于农田土地平整的环境建模方法,根据地形测量信息,利用 OBB 包围盒方法规范农田边界,利用特定算法对农田内部单元格化。通过对 GNSS 信号的处理,生成地势信息图,显示每一个区域的挖填土方量,直观地反映了农田的地势分布情况,结合铲车载荷监控系统,预测铲车状态,避免空载、满载情况发生。
- (3)提出了一种可以遍历整个农田的路径规划算法,利用真实地形数据进行了仿真对比试验,与两种常规 GNSS 平整作业路径相比,提出的路径规划算法铲车空载、超载率最小,一次平整后剩余挖填土方量最少,完全平整效率大幅度提高。综合分析表明,该算法可满足土地精细平整与灌溉要求,提高了平地效率。

参 考 文 献

- 1 陈岩, 乔雪丹. 关于城市水资源高效利用问题的探讨[C]//经济生活——2012 商会经济研讨会, 2012.
- 2 朱勇. 浅谈节水灌溉技术[J]. 技术与市场, 2011, 18(9): 33.
- 3 吕庆飞. 激光控制平地系统的改进设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
LÜ Qingfei. Design and experimental study of improved laser control leveling system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 4 李益农, 许迪, 李福祥. 田面平整精度对畦灌性能和作物产量影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 43–48.
LI Yinong, XU Di, LI Fuxiang. Study on influences of field leveling precision on border irrigation quality and crop yield [J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(4): 43–48. (in Chinese)
- 5 白岗栓, 杜社妮, 于健, 等. 激光平地改善土壤水盐分布并提高春小麦产量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 125–134.
BAI Gangshuan, DU Sheni, YU Jian, et al. Laser land leveling improve distribution of soil moisture and soil salinity and enhance spring wheat yield[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 125–134. (in Chinese)
- 6 刘刚, 司永胜, 林建涵, 等. 激光平地控制器的开发与农田试验分析[C]//2005 年中国农业工程学会学术年会论文集, 2005.
- 7 李笑, 李宏鹏, 牛东岭, 等. 基于全球导航卫星系统的智能化精细平地系统优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 48–55.
LI Xiao, LI Hongpeng, NIU Dongling, et al. Optimization of GNSS-controlled land leveling system and related experiments [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 48–55. (in Chinese)
- 8 NEMENYI M, MESTERHAZI P A, PECZE Z, et al. The role of GIS and GPS in precision farming[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 40: 45–55.
- 9 李益农, 许迪, 李福祥, 等. GPS 在农田土地平整地形测量中应用的初步研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 66–70.
LI Yinong, XU Di, LI Fuxiang, et al. Application of GPS technology in agricultural land levelling survey [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 66–70. (in Chinese)
- 10 孟志军, 付卫强, 刘卉, 等. 面向土地精细平整的车载三维地形测量系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 255–258.
MENG Zhijun, FU Weiqiang, LIU Hui, et al. Design and implementation of 3D topographic surveying system in vehicle for field precision leveling [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 255–258. (in Chinese)
- 11 吴强. 基于 OBB 碰撞检测及其算法改进研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- 12 许迪, 李益农, 刘刚. 激光控制农田土地精细平整应用技术体系研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 267–272.
XU Di, LI Yinong, LIU Gang. Research progress on the application system of laser-controlled precision land leveling technology [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 267–272. (in Chinese)
- 13 袁本银. 北斗系统对 GNSS 用户终端产业的机遇和挑战[J]. 交通标准化, 2012(8): 12–13.
- 14 王泂, 刘刚, 刘寅, 等. 基于 GPS 的农田坡面平整技术与试验[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(5): 456–460.
WANG Long, LIU Gang, LIU Yin, et al. GPS-based land slope leveling technique and its implementation [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 456–460. (in Chinese)
- 15 刘寅, 李宏鹏, 刘刚, 等. 基于 GPS 控制技术的土地平整系统[J]. 农机化研究, 2014, 36(9): 142–146
LIU Yin, LI Hongpeng, LIU Gang, et al. Land leveling system based on GPS techniques [J]. Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(9): 142–146. (in Chinese)
- 16 李建平, 林妙玲. 自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 232–236.
LI Jianping, LIN Miaoling. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 232–236. (in Chinese)
- 17 李赫. 基于 GPS 平地的路径规划方法的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
LI He. Research on the route planning method of land leveling based on GPS [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2013. (in Chinese)
- 18 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Sup.): 271–275. (in Chinese)
- 19 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, 2011.
LIU Xiangfeng. Research on optimal global path planning for complete coverage with GPS guidance on tractor [D]. Fuxin: Liaoning Technology University, 2011. (in Chinese)
- 20 张月. 清洁机器人全覆盖路径规划研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
ZHANG Yue. Research on the complete coverage path planning of cleaning robot [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- 21 陈逸怀, 朱博. 基于单元分解法的移动机器人遍历路径规划[J]. 装备制造技术, 2014(4): 148–149, 152.
- 22 CHOEST H, NAHATANI K, RIZZI A. Sensor based planning: using a honing strategy and local map method to implement the generalized Voronoi graph[J]. Intelligent Systems & Advanced Manufacturing, 1998, 3210: 72–83.
- 23 BORENSTEIN J, KOREN Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1989, 19(5): 1179–1187.
- 24 王增刚. GIS 在高标准基本农田建设中的应用研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013.
WANG Zengang. GIS application of high standards in the construction of basic farmland [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 25 杨建潮. 测量误差及粗大误差的判别与消除[J]. 计量与测试技术, 2006, 33(11): 4–5.
- 26 谢德胜, 徐友春, 万剑, 等. 基于 RTK-GPS 的轮式移动机器人轨迹跟随控制[J]. 机器人, 2017, 39(2): 221–229.
XIE Desheng, XU Youchun, WANG Jian, et al. Trajectory tracking control of wheeled mobile robots based on RTK-GPS [J]. Robot, 2017, 39(2): 221–229. (in Chinese)
- 27 王仲民, 井平安, 朱博. 基于神经元激励的移动机器人遍历路径规划[J]. 控制工程, 2017, 24(2): 283–286.
WANG Zhongmin, JING Ping'an, ZHU Bo. Coverage path planning of mobile robot based on neuronal excitation [J]. Control Engineering of China, 2017, 24(2): 283–286. (in Chinese)