

基于 GNSS 的农田平整自动导航路径规划方法

刘 刚^{1,2} 李 笑¹ 康 熙¹ 夏友祥¹ 牛东岭¹

(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: 为了提高农田平整作业工作效率,分析了基于全球导航卫星系统(Global navigation satellite system,GNSS)的农田平整自动导航解决方案的可行性,改进了系统硬件设计,提出了一种基于GNSS的农田平整自动导航路径规划方法。该方法将全局路径规划和局部实时路径规划相结合,以铲车空载或满载时间最短为最优评价基准,融合K-均值与密度均值,聚类农田栅格;根据设计的铲车挖高填低方法和局部搜索策略得到平地路径全局规划,在实际作业中根据拉力传感器反映的实时载荷进行局部调整和规划。通过仿真试验和农田路径规划平地对比试验分析表明,最大高度差从22.8 cm降到2.7 cm,平整度从12.6 cm降到1.5 cm,高差分布列从81%上升到97%,平整效果能满足精细灌溉需求。该方法能够较好地实现路径规划,实现拖拉机高效平地作业,其中铲车的满载和空载率较其他方法小,满载和空载率总和在20%左右,增加了有效工作时间,降低了人工劳作强度,提高了平地效率。

关键词: 农田平整; 自动导航; 路径规划; 全球导航卫星系统

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0021-09

Automatic Navigation Path Planning Method for Land Leveling Based on GNSS

Liu Gang^{1,2} Li Xiao¹ Kang Xi¹ Xia Youxiang¹ Niu Dongling¹

(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: In order to improve the efficiency of GNSS (global navigation satellite system) controlled land leveling system, the feasibility of automatic GNSS-controlled land leveling system was discussed. A path planning algorithm for automatic GNSS-controlled land leveling system was proposed. Firstly the hardware design on early foundation was improved and the tension acquisition module was designed as well as correcting it, which provided data for later path planning. In this method, the global path planning and local real-time path planning were combined to forklift-load or full load the shortest and the longest effective operation of the optimal evaluation, integration and density mean K-means clustering farmland grid; then according to the design of low forklift excavation high filling method and local search strategy to give ground path global planning and the actual work was carried out in accordance with local adjustment and planning tension sensor. Farmland automatic navigation ground experiment showed that the maximum elevation difference after the plane leveling went down from 22.8 cm to 2.7 cm and the height standard deviation of elevation dropped from 12.6 cm to 1.5 cm; the cumulative percentage, of which the accuracy errors were less than 5 cm, was increased from 81% to 97% after the land leveling. This method can achieve better route planning and efficient working of tractors. The full loaded rate and unloaded rate of forklift, the sum of which was about 20%, were less than those of the other methods, increasing the effective working time and providing technical support for automatic GNSS-controlled land leveling system.

Key words: land leveling; automatic navigation; path planning; global navigation satellite system

引言

农业水资源短缺与用水效率低下是限制我国农业综合生产能力和可持续发展的重大战略性问题^[1-3]。大力推进土地整治,建设高标准农田已成为我国农业现阶段的重要战略,对现代农业和新农村建设具有重大意义。

应用全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)技术进行农田精细土地平整可提高农田灌溉效率与灌水均匀度,增加有效耕地面积,提高农机作业效率,改良土壤水盐分布,控制杂草的生长,能实现节水增产的效果^[4-6]。与常规平整和激光控制平地方法相比,其具有速度快、定位精度较高、不受地势高低及天气和时间等因素影响、适用于大面积农田土地平整作业等优势,综合效益高^[7]。

GNSS 智能化精细平整土地技术已经在发达国家得到了较好应用,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]。国内相关研究起步较晚,一些大学和科研院所近年来开始在 GNSS 平地技术方面做探索性的研究^[9-11]。中国农业大学精细农业研究中心自 2009 年开始自主研发适合国内的 GNSS 智能化精细平地系统,目前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^[7,12-13]。

当前 GNSS 智能化精细平地系统工作时,由于缺乏必要的路径规划与指导,GNSS 控制平地作业只能根据平地作业者的观察和估测进行土地平整,易出现作业重叠和遗漏;同时要不断调头查看铲土量,以免长时间超载或空载,增加了劳作强度和成本,降低了平地效率。因此考虑开发基于 GNSS 的农田平整自动驾驶系统,实现平地系统的路径规划与自动驾驶功能,以提高平地作业效率。

目前自动驾驶技术在现代农业生产中的应用越来越广,逐渐成为农业工程技术的重要组成部分,在药物喷洒、除草、种植、收获、车辆自动行走等方面得到了实际的应用^[14]。然而自动驾驶和路径规划技术在土地精细平整应用方面鲜有研究。李赫^[15]进行了 GPS 平地的路径规划方法研究,提出了几种基于模板的全局路径规划方式并进行了仿真试验。王岩等^[16]利用数学建模的方法,建立了拖拉机在平地作业行驶过程的路径实时规划与导航模型,实现了平地过程中的实时辅助导航作业,然而系统稳定性

和实际工作效率还需要增强。

本文针对 GNSS 自动驾驶精细土地平整系统的路径规划技术进行研究,在改进的拖拉机精细平整系统硬件基础上,结合实际需求,对平地过程中的路径规划和导航技术开展研究,提出一种基于全局路径规划和局部路径规划的平地路径规划算法,并通过试验检验算法的可行性。

1 系统硬件的改进

1.1 铲车载荷监测设计与校正

针对平整作业中由于持续挖土而导致铲车长时间超载、拖拉机寿命减少、平地效率降低等问题,在前期 GNSS 智能化精细土地平整系统工作原理和研究基础上,增加了拉力传感器,设计了拉力采集模块,并进行了标定与校正,实现了铲车载荷的监测和反馈控制,为后续的路径规划导航提供了数据来源。本文采用应变式拉力传感器(输出电流 0~20 mA,承受拉力 0~40 kN),设计了拉力采集模块,将输出的模拟电流转换成数字电压信号发送到智能控制终端,图 1 为铲车载荷监测模块的设计框图。

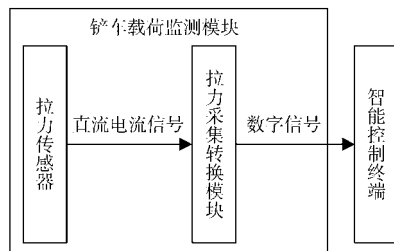


图 1 铲车载荷监测模块设计框图

Fig. 1 Design block of forklift loading monitoring module

为测试设计的拉力采集模块的精度,使用 HDX801 型智能信号发生器作为电流信号输入,对电路板从 0~20 mA 递增 1 mA 输入,记录 30 s 电压测量值并求平均,采用分段线性方程进行电压测量校正,校正结果如图 2 所示。

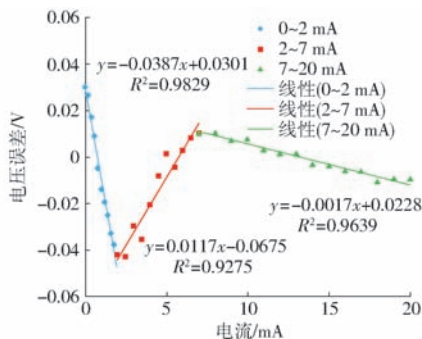


图 2 电压测量误差校正

Fig. 2 Correcting of voltage measurement error

1.2 系统硬件平台搭建

根据 GNSS 精细农田平整的工作原理^[16],智能

控制终端安装在驾驶室内,平板式拉力传感器安装在拖拉机与平地铲之间,RTK-GNSS 基站安装在农田边界,移动站安装在铲车上。系统的实际硬件模型如图 3 所示。

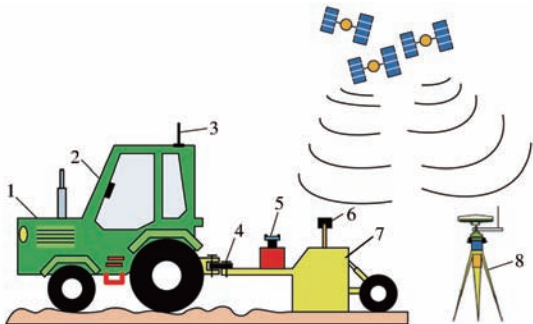


图 3 系统硬件组成

Fig. 3 System hardware components

1. 拖拉机 2. 智能控制终端 3. 移动站电台天线 4. 平板式拉力传感器 5. 液压系统 6. 移动站卫星天线 7. 平地铲 8. 基站

2 平地路径规划建模与算法描述

2.1 土地平整路径规划

拖拉机平整作业的路径规划作为自动导航平整作业的前提和核心,具有重要的研究意义。农田自动平整作业前,需事先规划好合适的作业路线,按照合理路线平整土地,减少作业时间,降低拖拉机能耗,提升土地平整效率。土地平整时导航拖拉机的作业路径不同于移动机器人行走的线状路径,而是一种全覆盖式的面状路径^[17]。当前对移动机器人全覆盖路径规划的研究主要分为:单元分解法,以 Trapezoidal、Boustrophedon^[18-19] 为代表;栅格法,以内螺旋覆盖法、基于模板模型和势场法^[20-22] 为代表;以及神经网络、生物激励^[23-24] 等启发式算法。然而这些路径规划算法主要针对避障问题,其对于全覆盖路径规划仍然以线扫描为主,对于需要考虑地势高程和铲车载荷的平地过程并不适用。针对土地平整时需要覆盖整个农田,同时铲车超载会严重影响平地过程的问题,本文提出了一种基于全局和局部结合的路径规划方法,实现了平整过程中的路径规划和导航。

路径规划导航的具体流程如图 4 所示:①自动平整前进行三维地形测量,通过坐标转换、误差处理和差值处理获取待平整农田的地势信息,为路径规划提供数据来源。②根据三维地势测量得到的地势信息,设计平整的基准高程,计算挖填土方量。③设计最优评价基准,以铲车载荷为评价基准。④根据最优评价基准设计路径规划算法,建立模型,规划自动平整的最优路径。⑤按预定路径进行自动平地作业。

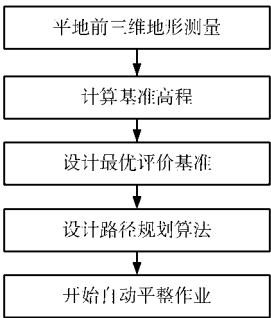


图 4 路径规划流程图

Fig. 4 Path planning process

2.2 算法设计与实现

2.2.1 三维地形测量与栅格划分

平地作业开始前首先进行三维地形测量。通过原点标定,边界测量和内部测量以及三角网差值方法得到农田地势信息,生成三维地势图。在此基础上,为方便路径规划,对农田进行栅格划分,建立农田栅格地图。栅格为规则的正方形,作为土地平整离散化的最小单元,栅格边长的选取根据拖拉机和铲车的大小来确定,选取铲车的宽度 L 作为栅格的边长 r ,即

$$r = L \tag{1}$$

如图 5 所示,在矩形农田 $OABC$ 中, O 是在地形测量中作为原点进行标定的点。以 O 为起点划分边长为 r 的栅格,其中 OA 方向上可被划分的栅格数为

$$j_{\max} = \begin{cases} L_{OA}/r & (L_{OA} \% r = 0) \\ L_{OA}/r + 1 & (L_{OA} \% r \neq 0) \end{cases} \tag{2}$$

同理 OB 方向上的最大栅格数为

$$i_{\max} = \begin{cases} L_{OB}/r & (L_{OB} \% r = 0) \\ L_{OB}/r + 1 & (L_{OB} \% r \neq 0) \end{cases} \tag{3}$$

式中 L_{OA} ——矩形地块的 OA 边长度

L_{OB} ——矩形地块的 OB 边长度

经过栅格划分,农田中每个栅格坐标都可以用

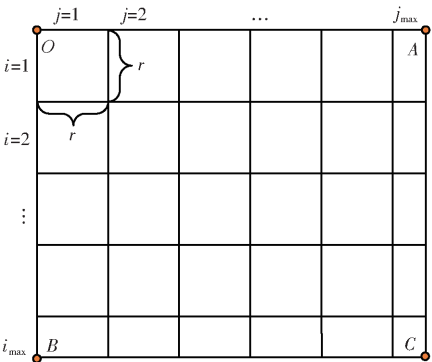


图 5 农田栅格划分示意图

Fig. 5 Farm grid division

(i, j) 来表示,并且农田中任意一点所在的栅格位置坐标都可以得到。划分栅格后,利用 GNSS 实测点数据求取算术平均数的方法计算每个栅格的高程,并用 H_{ij} 表示。

2.2.2 农田平整基准面的设计

常规平地的工程设计方法有平均法、平面法、断面法、等高线调整法等多种。为符合实际作业环境,在实际土地平整中,考虑拖拉机的转弯以及本身的体积,各高程点在平地时对地块影响所占权重并不相同,采用加权平均法设计基准面高程^[25]。基准高程计算式为

$$H_{av} = \frac{1}{4n} \left(\sum H_c + 2 \sum H_s + 3 \sum H_t + 4 \sum H_m \right) \quad (4)$$

式中 H_{av} ——所测地块平均高程(基准高程)

$\sum H_c$ ——栅格各角点高程之和

$\sum H_s$ ——地边点高程之和

$\sum H_t$ ——栅格网各拐点高程之和

$\sum H_m$ ——地块各中点高程之和

n ——高程点个数

2.2.3 设计最优评价基准

研究路径规划和自动驾驶的目标主要是为了提高平地效率。在土地平整中最直观有效的平整流程是将高地势的土方量运移到地势低的地方,从而使整个地块均匀平整,也就是从平均栅格高程大的位置往栅格高程小的位置进行平地作业。同时经过前期大量试验发现,平地铲的载土量对平地效率和平地过程影响较大。超载时,拖拉机无法继续平地作业,需手动抬起平地铲卸土,然后反复在此刮土方才得以平整;空载时拖拉机仅仅增加了能耗而不能有效地进行平地作业,因此需要尽量减少铲车满载和空载时间。

选择使用铲车载荷百分比 P_v 作为衡量铲车当前载荷大小的物理量。铲车载荷百分比 P_v 的表达式为

$$P_v = \frac{V}{V_{\max}} \times 100\% \quad (5)$$

式中 V ——拉力采集转换模块实时传入智能控制终端的电压,反映当前铲车的载荷

$V_{\max}$ ——拉力传感器能采集的最大拉力,经过测试采集 100 次后求平均,反映铲车满载时承受的拉力,取 1.5 V

P_v 的取值范围在 $[0, 1]$ 之间, $P_v = 0$ 时铲车空载, $P_v = 1$ 时铲车满载。采用拉力传感器实时监测铲车的拉力,判断当前铲车载荷量,根据大量平地经

验, P_v 超过 70% 时,则需引导拖拉机向地势低的地方作业。

2.2.4 路径规划算法

针对最优评价指标和原则,提出了一种路径规划算法。算法流程如图 6 所示。

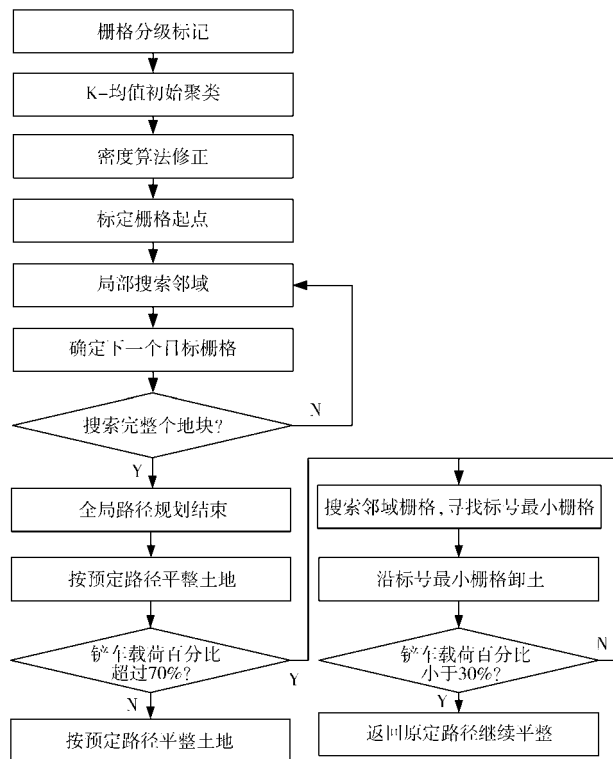


图 6 路径规划算法流程图

Fig. 6 Flow chart of path planning algorithm

算法具体实现步骤如下:

(1) 将农田地势信息进行分级处理,得到农田栅格化地图。

在地形测量以后,通过误差处理剔除极点,根据最大高程、最小高程和基准设计高程将栅格高程作分级处理,考虑 GNSS 测量误差和实际平地经验,以 4 cm 为级与级之间的分隔线,并将分级后的栅格地图重新用数字标记。将基准高程 H_{av} 标记为 D_{av} , $D_{av} = 0$,目标栅格 (i, j) 的高程 H_{ij} 则标记为 D_{ij} ,其中 H_{ij} 为栅格内采集的离散点高程的平均值。

$$D_{ij} = \begin{cases} \frac{H_{ij} - H_{av}}{4} & ((H_{ij} - H_{av}) \% 4 = 0) \\ \frac{H_{ij} - H_{av}}{4} + 1 & ((H_{ij} - H_{av}) \% 4 \neq 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中 H_{ij} ——目标栅格 (i, j) 的平均高程

D_{ij} ——目标栅格 (i, j) 的标记数字

通常不同栅格间农田土量变化是均匀的,相邻栅格之间标记的数字不会跳动太大,但也可能出现少量的坑洼地段。

分级后的栅格地图如图 7 所示。

(2) 用 K-均值和密度算法融合,将栅格地图的

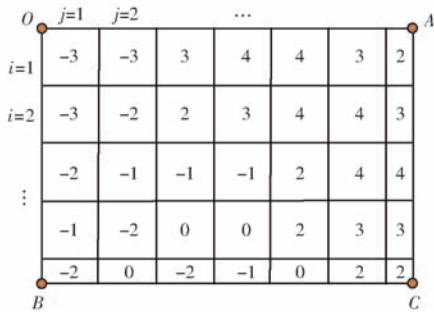


图7 分级后的栅格地图

Fig. 7 Grid map after grading

所有栅格进行聚类,将离散的栅格点合并成具有地势差异的不同地块,为之后的全局路径规划提供数据基础。

为实施自动导航平地作业,需要在地形测量后首先规划整体的全局路径,使拖拉机按照规划的路径进行平地作业。对于全覆盖的平地作业路径规划,直接根据高程的高低规划的全局路径会导致转弯过多,不具有实用性。因此首先对步骤(1)得到的栅格地图进行聚类:①首先采用 K-均值聚类的思想,该算法快速简单,效率高,但依赖中心点 N 值的选取,同时对噪声很敏感。而密度聚类要求聚类空间中对象的数目不小于某一给定阈值,将其归为一簇^[26],因此确定 N 个簇及其中心后,采用密度聚类,进一步剔除噪声点。②对于栅格数据对象集合,以各个栅格的高程为标准,选取 N 个栅格类中心作为初始的类质心,如图 7 的栅格地图,在图中各任选一个:4、3、2、1、0、-1、-2、-3 作为类别的中心点记为 $u_1, u_2, \dots, u_8$,其中 $N=8$ 。③按照最邻近原则把栅格地图标记 D_{ij} 按类质心分为各个类别。④按照平均法重新计算各个栅格类的质心,从而确定新的类心。一直迭代,重复步骤②,直到类心的移动距离不发生变化。迭代公式为

$$J = \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^n \| D_{ij}^m - u_k \|^2 \quad (7)$$

式中 J ——聚类中心值,当 J 小于指定阈值收敛时迭代结束

D_{ij}^m ——第 m 个目标栅格 (i, j) 的标记数字

u_k ——栅格类质心

针对 K-均值聚类对噪声敏感的问题,采用 DBSCAN 密度算法修正聚类的栅格,使给定聚类空间中的一定邻域 ε 内所包含相同栅格类的数目不小于给定阈值 t_{MPLS} ,否则剔除噪声点。判别公式为

$$\sum_{\varepsilon} |u_k - D_{ij}^m| > t_{\text{MPLS}} \quad (8)$$

这里取 $t_{\text{MPLS}} = 6$,得到聚类后的栅格地图如图 8 所示,此时由于密度合并修正,修正后的类质心数目 $N' = 5$ 。

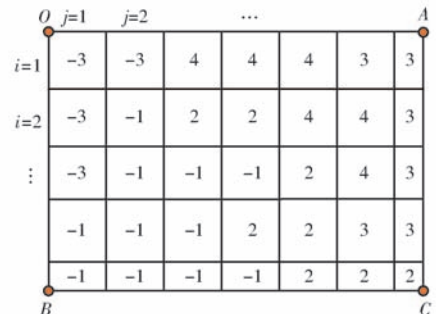


图8 聚类后的栅格地图

Fig. 8 Grid map after clustering

(3)根据 2 次聚类处理后的栅格地图,设计平地的全局路径规划,指导拖拉机按照规划的路径自动平整土地。

平整土地时,拖拉机沿着地势高的栅格挖土,向着地势低的栅格填土完成平整作业。考虑农田高程分布是连续的,一般不存在高程直接跳变的情况。因此,从地势高的地方挖土,一级一级往地势低的地方卸土能减少作业长度,降低铲车超载空载时间。为减少铲车满载情况,采取从高到低,一层层挖土卸土,即从 4→3→2→-1→-3。采用启发式搜索算法中的局部择优搜索法,搜索算法是从一个初始点出发,然后从搜索解的邻域开始,如有更优的解则移动至该解并继续执行搜索直至搜索完整个集合。在农田平整路径规划中,将栅格地图聚类后从地势最高栅格点开始,搜索以起始栅格点为中心的 3×3 栅格矩阵,找到距离其最近的且与其大小最接近的栅格作为下一个搜索起始点,从高到低,可以重复当前点,但不能从低到高向上搜索,直到遍历所有栅格点路径规划结束,拖拉机则按搜索的路径平整土地。遍历后的自动导航路径规划示意图如图 9 所示,从起点 4 开始,到终点 -3 结束,遍历了整个栅格地图。至此,基于全局的路径规划得以完成。

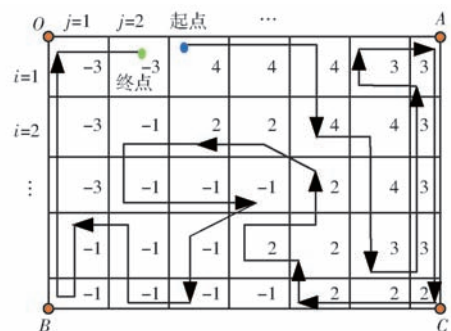


图9 自动导航路径规划图

Fig. 9 Automatic navigation path planning

(4)采用拉力传感器监测铲车载荷,将局部路径调整规划与全局路径规划相结合,提高系统的稳定可靠性。

在 GNSS 自动导航土地精细平整过程中,在上

述的全局路径规划基础上,还需考虑铲车载荷量大小,避免铲车因超载无法作业。针对自动导航平整过程中可能出现的铲车超载问题,通过拉力传感器监测铲车载荷。在拉力值超出满载的 70% 时,对此时的路径进行微调,搜索以当前栅格点为中心的 3×3 栅格矩阵,找到其中标记最小的栅格,该栅格的地势最低。控制拖拉机沿地势最低的栅格行驶卸土,在土方量低于满载的 30% 时,重新控制拖拉机沿原先规划的路径平地。平地过程中全局路径保持不变,当铲车接近超载和空载时进行实时局部调整。这样减少了铲车满载空载时间,降低了驾驶员劳作强度,提高了平地效率。

3 GNSS 平地试验与分析

3.1 路径规划算法实现

为验证本文提出的基于 GNSS 的农田平整自动导航平地路径规划算法的可行性,采用 Matlab 2010 和 Visual Studio 2008 混合编程,验证提出的算法并编写平整规划软件。

通过 RTK-GNSS 接收机采集农田边界点和内部点,实现农田三维地形测量,测量点轨迹如图 10 所示,不同颜色代表地势高程的差异。

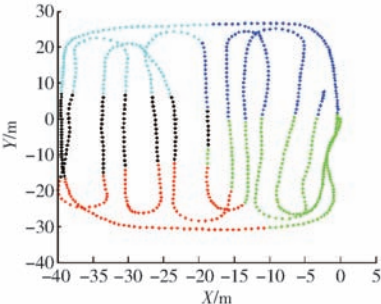


图 10 地形测量轨迹图
Fig. 10 Trajectories of topographic survey

对采集的农田地势离散点采用滑动平均法以及拉依达准则剔除误差点数据,并采用三角网线性插值法进行插值,得到待平整农田地势。根据上文提及的算法对地势高程差进行分级处理和栅格化,得到栅格地图如图 11 所示。

采用本文提出的 K-均值和密度融合算法聚类栅格地图,得到地势高低不同的划分区域,其中 K-均值的质心数目 N 为所分的级数,在图中 $N = (34.15 - 33.95) / 0.04 = 5$,结果如图 12 所示。

将栅格聚类后,从地势最高区域栅格开始,通过邻域搜索按照从高到低来挖土填土,完成逐步覆盖遍历整个农田地块的过程。规划的全局路线示意图如图 13 所示。

在图 13 中,对应聚类后的栅格地图,1、2、3、4、5

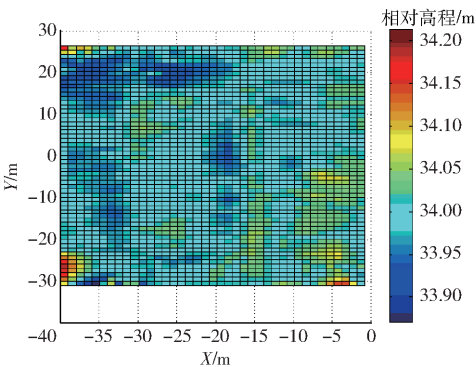


图 11 标记后的栅格地图
Fig. 11 Marked grid map

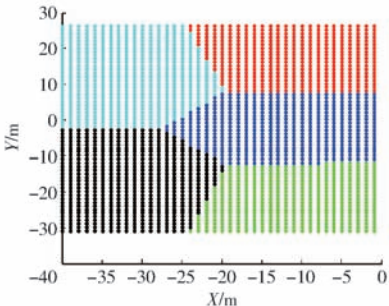


图 12 聚类后的栅格地图
Fig. 12 Clustered grid map

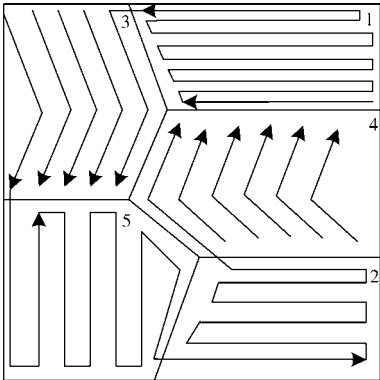


图 13 全局路径图
Fig. 13 Global paths

分别代表颜色从红到黑、地势从高到低的 5 块区域。起点从地势最高的区域 1 中栅格开始,根据局部搜索原理和距离判定,首先遍历地块 1,将地块 1 所挖的土方,逐渐填往地块 3、5、2、4,直至整个农田平整完全。在过程中实时通过拉力传感器监测铲车载荷,并作出实时的调整,减少铲车过度超载和空载时间。

3.2 GNSS 平地对比试验

为验证本文提出的基于 GNSS 农田平整的自动导航平地路径规划算法的可行性,于 2016 年 4 月份在中国农业大学上庄实验站进行了土地平整试验,选取了相邻一块长约 100 m、宽约 100 m 的试验田,并将其均分为 4 块 A、B、C、D,对应分别进行本文提出的路径规划平整作业、按人工经验平整的作业

(随机将土从地势高处运往地势低处)、按 Boustrophedon 路径平整作业、按内螺旋路径平整作业,农田示意图如图 14 所示。

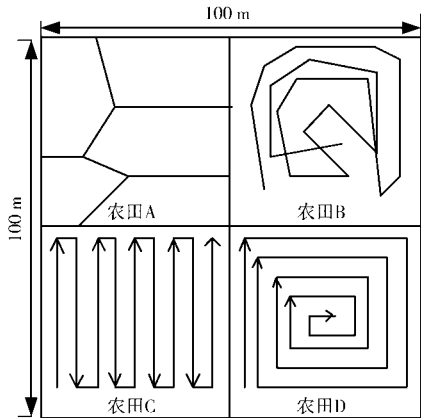


图 14 地形测量轨迹图

Fig. 14 Trajectories of topographic survey

划分后 4 块农田土质分布均匀,地势状况基本相同。以约翰迪尔 5-904 型拖拉机为平整作业机具,智能控制终端安装在拖拉机驾驶室内,GNSS 基站架设在距离农田边界 10 m 外的位置,移动站卫星天线安装在铲车横梁正中间位置,拉力传感器安装在拖拉机与铲车连接处。其中 GNSS 数据收发的频率为 1 Hz,按照 4 种路径分别进行对比平整试验,平整时间各为 2 h,比较 4 种方式平整前后的效果,并根据拉力传感器输出电压计算超载空载的时间。

3.3 试验结果与分析

以本文提出的路径规划算法为代表,农田 A 平整前后的地形如图 15、16 所示。

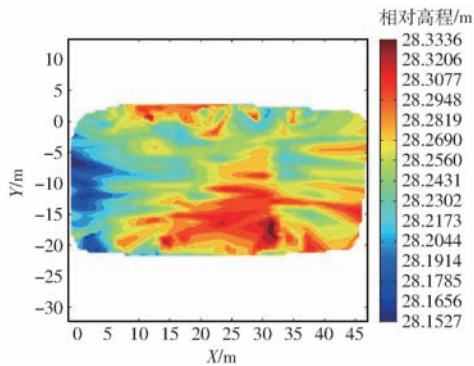


图 15 平整前地形图

Fig. 15 Map before leveling

分别对比 4 组试验的平地前后地形数据(表 1、2)和铲车载荷监测数据(表 3),分析各路径规划组的平地效率。其中实际作业时间比 η 为平整总时间与铲车超载时间、空载时间的差占总时间的百分比。

从表 1 可以看出,均分的 4 块农田面积大小相同,最大高程差为 19 ~ 22 cm,高差分布列差异在 3% 以内,平整度差异在 2 cm 内。可以认为 4 块农

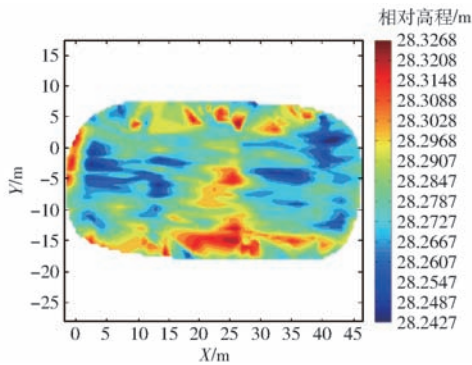


图 16 平整后地形图

Fig. 16 Map after leveling

表 1 平整前各农田地势

Tab.1 Terrain data before leveling

地块编号	面积/ m ²	最大高度差/ cm	平整度/ cm	5 cm 高差 分布列/%
A	50 × 50	22.8	12.6	81.175
B	50 × 50	19.3	10.9	82.824
C	50 × 50	23.2	13.2	78.364
D	50 × 50	21.5	11.6	80.396

表 2 平整后各农田数据

Tab.2 Terrain data after leveling

地块编号	面积/ m ²	最大高度差/ cm	平整度/ cm	5 cm 高差 分布列/%
A	50 × 50	2.7	1.5	97.730
B	50 × 50	3.1	2.4	96.244
C	50 × 50	5.4	4.1	88.439
D	50 × 50	3.3	2.2	92.227

表 3 平整过程中铲车载荷监测数据

Tab.3 Contrast of load monitoring data

地块编号	超载时间/ min	超载时间 比/%	空载时间/ min	空载时间 比/%	实际作业时 间比 η /%
A	11	9.2	15	12.5	78.330
B	32	26.7	13	10.8	62.544
C	47	39.2	27	22.5	38.339
D	41	34.2	21	17.5	48.427

田的地势基本一致,对比试验具有一定普适性和科学性。从表 1、2 平整前后数据的对比可知,按照上述 4 种方法平整 2 h,最大高程差明显下降,平整度和高差分布列明显得以改善,均取得良好效果,能满足实际作业需要。由表 2、3 可知,经过对比,按照本文提出的算法进行平地后农田的最大高差和平整度最低,铲车超载和空载时间最短,证明了与常规按经验平整方法以及 Boustrophedon、内螺旋等按模板全覆盖路径算法相比,本文提出的算法能增加有效作业时间,提高平地效率。

4 结论

(1)在前期 GNSS 精细土地平整系统研究基础

上改进了系统硬件设计,实现了对铲车载荷的监测,为后续路径规划提供了数据和硬件基础。

(2)针对基于 GNSS 的农田平整自动导航系统的路径规划技术进行研究,提出了一种基于全局和局部结合的路径规划方法,该算法通过 K-均值与密度均值融合将农田栅格聚类,然后根据铲车挖高填低和局部搜索策略得到平地路径全局规划,并在实际作业中根据拉力传感器进行局部调整和规划,提高了平地效率。

(3)针对提出的算法在中国农业大学上庄实验站进行了平整对比试验,与常规 GNSS 平整作业、

Boustrophedon 路径遍历、内螺旋路径遍历相比,平地后本文提出路径规划算法试验组的最大高差、平整度和高差分布列均为最好;同其他 3 种平整方式相比,本文提出的算法的铲车超载和空载率均为最小。综合分析表明,本文提出的算法可满足土地精细平整与灌溉要求,提高了平地效率。

(4)探讨了基于 GNSS 农田平整过程的自动导航技术应用的可行性并提出了一种可用的路径规划算法,为后续进一步研究自动平地过程中的控制方法和路径规划算法打下了基础,同时也为实现 GNSS 农田平整全自动导航作业提供了技术支持。

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 商会经济研讨会论文集, 2012:233.
- 2 朱勇. 浅谈节水灌溉技术[J]. 技术与市场, 2011, 18(9): 33-33.
- 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. Experimental study of land leveling precision border irrigation performance and yield of crops [J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(4): 43-48. (in Chinese)
- 5 白岗桢, 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 leveling improve soil water-salt distribution and increase the yield of spring wheat[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, 2005: 125-129.
LIU Gang, SI Yongsheng, LIN Jianhan, et al. Development of laser ground controllers and field trials analysis [C]//Proceedings of the 2005 Annual Meeting of CSAE, 2005:125-129. (in Chinese)
- 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 and test-based global navigation satellite system intelligent finish grading system[J]. Transaction of the CSAE, 2015, 31(3): 48-55. (in Chinese)
- 8 NEMÉNYI M, MESTERHÁZI P Á, PECZE Z, et al. The role of GIS and GPS in precision farming[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 40(1-3): 45-55.
- 9 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.
- 10 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. Preliminary research on GPS leveling of farmland topographic survey application[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 66-70. (in Chinese)
- 11 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. For land leveling three-dimensional terrain vehicle measurement system design and implementation [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 255-258. (in Chinese)
- 12 王泷, 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 is based on a flat slope farmland technology and testing[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 456-460. (in Chinese)
- 13 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(9): 142-146.
LIU Yin, LI Hongpeng, LIU Gang, et al. GPS-based control technology of land leveling system[J]. Agricultural Mechanization Research, 2014(9): 142-146. (in Chinese)
- 14 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. Application of automatic navigation technology in agricultural engineering in progress [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 232-236. (in Chinese)
- 15 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 GPS ground-based path planning method[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2013. (in Chinese)
- 16 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. GNSS real-time grading path planning and navigation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 271 – 275. (in Chinese)
- 17 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)
- 18 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 complete coverage path planning of cleaning robot[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- 19 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.
CHEN Yihuai, ZHU Bo. Complete coverage path planning of mobile robot based on partition of unity method[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(4): 148 – 149, 152. (in Chinese)
- 20 CHOSET H, NAGATANI K, RIZZI A. Sensor based planning: Using a honing strategy and local map method to implement the generalized Voronoi graph[C]//Proceedings of SPIE Conference of Systems and Manufacturing, 1997.
- 21 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.
- 22 刘建华, 杨建国, 刘华平, 等. 基于势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 18 – 27.
LIU Jianhua, YANG Jianguo, LIU Huaping, et al. Robot global path planning based on ant colony optimization with artificial potential field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 18 – 27. (in Chinese)
- 23 曹宇杰, 邓本再, 詹一佳. 基于模糊神经网络的 RoboCup 足球机器人局部路径规划方法研究[J]. 电子设计工程, 2015(23): 141 – 144.
CAO Yujie, DENG Benzai, ZHAN Yijia. The research of local path planning method based on fuzzy neural network for RoboCup soccer robot[J]. Electronic Design Engineering, 2015 (23): 141 – 144. (in Chinese)
- 24 吕战永, 曹江涛. 自反馈生物激励神经网络机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(16): 255 – 258, 270.
LÜ Zhanyong, CAO Jiangtao. Robot path planning with biologically inspired neural network and self-feedback function[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(16): 255 – 258, 270. (in Chinese)
- 25 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 Zenggang. GIS application of high standards in the construction of basic farmland[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 26 申玉发, 张晓昱, 赵立强. 密度 K 均值聚类算法及在复杂网络分析中的应用[J]. 河北科技师范学院学报, 2013, 27(4): 32 – 36.
SHEN Yufa, ZHANG Xiaoyu, ZHAO Liqiang. The density of K -means clustering algorithm and its application in complex network analysis[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2013, 27(4): 32 – 36. (in Chinese)
- 27 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.
YANG Jianchao. Identification and elimination of measurement errors and gross errors [J]. Metrology and Measurement Technique, 2006, 33(11): 4 – 5. (in Chinese)