

GNSS 平地作业路径实时规划与导航方法研究*

王岩¹ 李宏鹏² 牛东岭² 李笑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. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为有效提高 GNSS(Global navigation satellite system)控制土地平整的工作效率,提出了基于导航技术的 GNSS 平地作业路径实时规划与辅助决策方法。通过拉力传感器实现了平地作业中铲车载荷的实时检测,利用数学建模的方法,建立了拖拉机平地作业行驶过程的路径实时规划与导航模型。通过拉力传感器实时采集铲车载荷反馈值,根据拖拉机行驶目标区域的地势情况,以避免铲车过载和空载为原则,确定拖拉机的行驶目标点,解算出拖拉机行驶的转向角,实现了最优导航平地作业。农田平地试验结果分析表明,该方法能够较好地实时规划路径并提供导航方向,引导拖拉机高效地平地作业;基于该方法的平地作业,其铲车的过载或空载率总和并不大于 6.9%,远低于未使用导航时的平地情况。

关键词: 土地平整 GNSS 载荷监测 路径规划 导航

中图分类号: S23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)S0-0271-05

引言

农田土地平整可改善农田表面的地形状况,提高农田灌溉效率与灌水均匀度,达到节水增产的效果。土地精细平整对于水资源管理和农业现代化均具有积极深远的推动作用^[1-5]。GPS 控制平地技术作为一种智能化的土地平整方式,美国 Trimble 公司已有商业化产品,在应用研究技术领域已较为成熟^[6]。我国作为发展中国家和农业大国,近几年也相继开展了利用 GPS 进行土地精细平整的研究工作^[7]。随着中国北斗卫星系统的建立与完善,基于 GNSS 的控制平地技术研究开始起步。GNSS 土地平整系统选用高精度高集成性的 GPS(Global position system)和 BDS(BeiDou navigation satellite system)双星定位设备,代替纯 GPS 接收设备,提高了定位精度,增强了系统的实用性与集成性^[8]。

基于 GPS 的导航技术在农机部分作业中得到了较好的应用^[9-12]。现有的 GPS 控制平地系统工作时,拖拉机的行走方向主要依赖驾驶员对前方农田表面起伏的判断与观察,容易长时间处于空载或者过载的情况。李赫^[13]根据最优规划原则,提出了几种固定的路径规划方式。但该方法没有考虑平地过程中地形实时变化等因素的影响。为了提高平地

作业效率,在课题组前期开展的 GNSS 控制平地技术研究基础上,根据农田土地的实时状况,开展平地作业路径规划与导航方法研究,并进行相关试验与验证分析。

1 GNSS 土地平整系统

1.1 系统组成

GNSS 土地平整系统主要包括拖拉机、平地铲、液压系统、集成控制终端、移动站卫星天线、基站和销轴式拉力传感器等,如图 1 所示^[8]。其中铲车载荷的检测是通过连接拖拉机与铲车处的销轴式拉力传感器实现的,本文开展的路径规划与导航方法也是以铲车载荷实时检测为前提的。

1.2 工作原理

GNSS 平地平整系统主要以 RTK-GNSS(Real-time kinematic GNSS)作为唯一定位方式,以硬件结构为支撑,以软件为控制核心,以拖拉机为动力,以平地铲为作业机具。主要包括 3 个环节,分别为地形测量、基准设计和平整作业^[14-18]。首先,在土地平整之前驾驶拖拉机按照原点标定、边界测量和内部测量的顺序测量农田地形,并生成农田地形图,为土地平整提供数据指导;然后,建立目标平整基准面方程,作为平整作业时参考面计算依据^[19-21];最后,

收稿日期:2014-07-31 修回日期:2014-08-22

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100505)

作者简介:王岩,硕士生,主要从事农业智能化检测装置技术研究,E-mail: thedreamofpurple@163.com

通讯作者:刘刚,教授,博士生导师,主要从事电子信息农业应用研究,E-mail: pac@cau.edu.cn

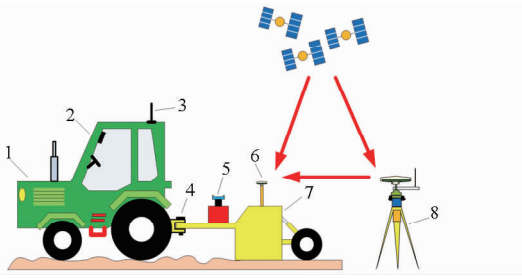


图1 GNSS土地平整系统组成

Fig.1 Components of GNSS-controlled land leveling system

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

在平整作业过程中,将实时获取的农田当前位置的水平坐标代入目标基准面方程计算目标设计高程,通过目标设计高程与当前位置实际高程的差值,判断当前位置地势高低,进而输出控制信号驱动液压系统来控制平地铲的自动升降,实现挖填作业,达到精细平整土地的目的。

同时,在平整作业过程中,路径实时规划是通过销轴式拉力传感器实时检测当前铲车所受拉力,将拉力转换成电流信号发送给集成控制终端,并通过规划算法计算铲车的导航转向角,从而实现平地过程的路径指导。

为了检验平整作业效果,通常在完成平整作业后,再次对农田进行地形测量,获取农田地势信息,与平整前的数据进行对比,可以对平整作业效果进行定量评价。

2 路径实时规划模型

2.1 数据获取与预处理

平地作业开始前先进行地形测量,利用安装在铲车中间位置的卫星天线,通过RTK差分定位方法,获取农田表面离散点三维数据,通过坐标转换,保存各个离散点相对于所标定的原点的三维坐标值;对测量数据进行粗大误剔除;根据铲车尺寸确定栅格大小并对农田栅格划分,进而使用克里格插值法得到农田三维数据,并以矩阵 \mathbf{H} 的形式保存数据处理后的农田高程值;计算农田基准高程,以挖填土方量平衡为原则,计算式为

$$H_r =$$

$$H_a - \frac{1+R}{2RN} \left[R \sum (H_a - H_f) - \sum (H_c - H_a) \right] \quad (1)$$

式中 H_r ——基准高程

H_a ——插值处理后得到的高程值的平均值

R ——挖填土方比,取值范围为(1.0,1.2)

N ——栅格总数

H_f ——插值后小于 H_a 的高程值

H_c ——插值后大于 H_a 的高程值

最后设定导航更新周期 T ,用于平地开始后周期性获得拖拉机当前的导航位置信息,根据导航位置信息和实时铲车载荷信息计算导航路径。

2.2 行走目标点的确定

平地过程开始后,在接收到的GNSS定位信息中,周期性读取拖拉机行走方向角 θ 和铲车的三维坐标,通过拉力传感器周期性获取铲车载荷量 R_V 。其中, R_V 为拉力传感器实时返回的,取值范围为[0,1],铲车满载时 R_V 取值为1,对应土方体积为 V_0 ,空载时 R_V 取值为零。

为了保证拖拉机平地作业过程中的行走路径更为圆滑,在寻找最优目标点之前,首先划定目标区域范围,之后便可在该区域内确定最优规划目标点。目标区域范围是由拖拉机的实时位置坐标和行驶方向角确定的,是一个以固定于铲车上的GNSS移动站天线所在位置为圆心、中心角为 90° 、半径长度固定的扇形区域。为了防止非边缘掉头情况下,平地作业导航系统给出转向角度过大的指示,中心角为 90° 的扇形目标区域,限制了导航过程最大的行驶转向角,并设定在左右方向上均不超过 45° 。在拖拉机行驶过程中,扇形目标区域伴随拖拉机的前进同步推进,如图2所示。

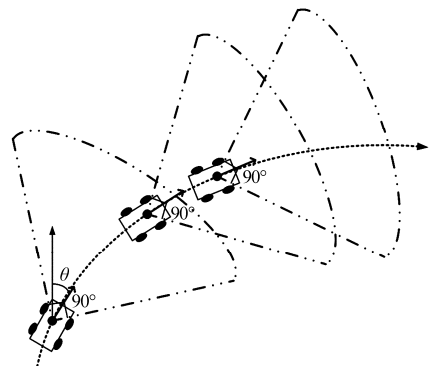


图2 目标区域的划定

Fig.2 Destination areas of navigation

在土地平整作业环境中,由于拖拉机本身是带有体积的,所以拖拉机的实时三维位置坐标其实是由固定于铲车上的GNSS移动站电台的位置所决定^[22]。再者,因为GNSS接收机本身具有 ± 10 mm的水平动态定位误差,而且所平整的农田面积一般较大,导航指示以坐标点的形式给出的实际意义并不大,因此本文选择将导航目标点以目标栅格的形式给出。在数据获取与预处理阶段,已经完成对地块的栅格划分。若栅格位于扇形目标区域内的面积

大于栅格总面积的 50%, 则设定该栅格为有效栅格, 这样就将寻找导航目标点的问题转化为在当前所有有效栅格中实时寻找最优目标栅格的过程。由于扇形目标区域是动态更新的, 因此有效栅格也不是固定的, 均随着拖拉机的行进而实时改变。

农田基准高程确定后, 平整过程的挖填土方量是一定的, 因此本文中最优目标栅格的确定原则是避免铲车空载和满载, 从而提高平地效率, 减少拖拉机无效的行走路程。实现这个最优规划目标主要是通过实时获取铲车的载荷数据, 并在保存的农田栅格高程数据中找到对应的最优行走目标点。设栅格评价参数为 D_{ij} , 用来描述每个有效栅格对于导航原则的符合程度, 计算式为

$$D_{ij} = n_{ij} \frac{P_{ij}}{k} \quad (2)$$

其中
$$P_{ij} = \frac{\sum (H_{ij} - H_r) S_0}{V_0} + R_v \quad (3)$$

$$n_{ij} = \begin{cases} 0 & (H_r - 2 \leq H_{ij} \leq H_r + 2) \\ 1 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 i, j ——横、纵坐标上的总栅格数

H_{ij} ——栅格 (i, j) 对应的高程值

S_0 ——单个栅格面积

P_{ij} ——铲车的预期载荷量百分比, 取值范围为 $[0, 1]$, 超出此范围的对应的有效栅格不会是最优栅格, 进行剔除处理

k ——常量, 平地作业全程最优的铲车载荷参数值, 取 0.6 ~ 0.8

n_{ij} ——栅格标记参数

利用式(2)和(3)评价当前所有有效栅格相对符合最优的程度, 如图 3 所示。 D_{ij} 数值最接近 1 的对应有效栅格, 即为当前时刻导航目标区域中的实时最优目标栅格。

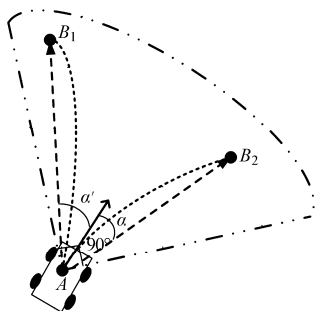


图 3 目标栅格的锁定

Fig. 3 Calculation of destination grid

锁定最优目标栅格后, 要通过可视化且直观的方式呈现给平地作业者, 才完成有效的导航过程。本文提出的方法是通过计算拖拉机转向角来进行指导导航。具体是通过拖拉机所在位置坐标 $P(x_1,$

$y_1)$ 和目标栅格的中心点 $Q(x_2, y_2)$ 以及拖拉机当前行驶方向角来计算拖拉机要到达目标点所需的转向角度。

2.3 转向角的计算

如图 4 所示, 设拖拉机行走轨迹曲线上 P 点处的切线记为 L , L 直线方程为

$$y = lx + c \quad (5)$$

其中
$$l = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \cot\theta \quad (6)$$

式中 θ ——拖拉机的当前方向角, 直接可从 GNSS 接收数据中读取

c ——常量

l ——斜率

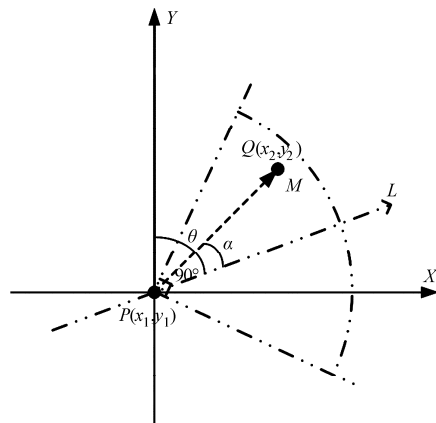


图 4 转向角的计算

Fig. 4 Calculation of steering angle

P, Q 的连线为铲车的目标航向, 设其所在直线为 M , 斜率为 m , 计算式为

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (7)$$

则导航转向角为

$$\tan|\alpha| = |\tan(\alpha_1 - \alpha_2)| =$$

$$\left| \frac{\tan\alpha_1 - \tan\alpha_2}{1 + \tan\alpha_1 \tan\alpha_2} \right| = \left| \frac{l - m}{1 + lm} \right| \quad (8)$$

式中 α ——导航转向角

α_1 ——直线 L 的倾斜角

α_2 ——直线 M 的倾斜角

对求得的结果求解反正切就可以得到转向角的绝对值。若铲车在原来行驶方向上左转时, 转向角 α 符号为负, 右转时转向角 α 符号为正; 在坐标系中, 若目标点 B 在直线 L 的左半部则为左转, 在 L 右半部则为右转; 将栅格 B 中心点 Q 坐标代入判定式, 即

$$L = lx - y + c \quad (9)$$

若 $L > 0$, 则转向角 $\alpha > 0$, 铲车右转; 若 $L < 0$, 则 $\alpha < 0$, 铲车左转。

2.4 地形数据的实时更新

拖拉机按照给出的导航转向角行驶,同时,农田地形在拖拉机经过的地方会发生改变,因此使用 GNSS 土地平整系统接收新的地形数据,对原有保存的栅格高程值的矩阵数据实时更新,从而使所规划的路径更准确有效。对更新后的地形数据进行判断,对于符合基准高程的精度范围的栅格进行标记,即要满足

$$H_r - 2 \leq H_{ij} \leq H_r + 2 \quad (10)$$

将该栅格的标记参数 n_{ij} 设定为零,即已达到平整标准,否则为默认值 1。标记参数为零的栅格在之后的平地过程,将不会被设为目标点,避免多次重复行走,同时可以提高运算效率。

当一个导航更新周期 T 结束后,系统完成一次上述数据获取与预处理、目标点确定、转向角的计算和地形数据的实时更新过程,进入下一个导航周期,相应的扇形目标区域、有效栅格、目标栅格、转向角等数据都变成新的周期数据。

3 平地导航试验

为了验证本文所述导航方法的可行性,进行了农田平整试验。在中国农业大学上庄试验站的农田中选取一块整体地况、土质等条件分布均匀的地块,面积为 $50 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。将其均分为 2 块同样大小,即 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的小地块,分别作为导航试验组和对比试验组的平整区域。

先后在 2 地块上进行相同时间(不包括平地前、后地形测量的时间)的平整作业。对比 2 组试验的平地前、后地形数据(表 1)和铲车载荷检测数据(表 2),并分析在使用导航方法和不使用导航方法情况下的平地效率^[23-25]。

从表 1、表 2 的试验数据的对比可以看出,在使

用本文所述导航方法且平地时间相同的情况下,平地效果明显优于不使用导航方法的对比试验组,同时有效降低了平地过程铲车的满载和空载时间,整个平地过程满载和空载率之和不大于 6.9%。

表 1 平地效果对比

Tab. 1 Contrast of landing effects

指标	对比组		导航组	
	平地前	平地后	平地前	平地后
最大高差/cm	25.4	17.4	26.6	14.7
平整度/cm	12.3	6.3	11.2	5.1
5 cm 高差分布列/%	68.2	89.4	71.3	94.2

注:表中 5 cm 高差分布列是指与基准高程 H_r 的高度差小于 $\pm 5 \text{ cm}$ 的测量点占有所有地形数据的比例。

表 2 铲车载荷监测数据对比

Tab. 2 Contrast of load monitoring data %

指标	对比组	导航组
空载率	16.6	4.4
满载率	7.4	2.5

4 结束语

本文为 GNSS 土地平整过程提供了动态的路径规划和实时的辅助导航。通过拉力传感器反馈铲车的实时载土量,以减少全程铲车满载和空载时间为原则,通过动态路径规划和导航方法,提高了整个平地过程的工作效率。农田平地试验分析表明,该方法能够很好地指导拖拉机平地过程,实时地规划路径并提供导航方向;在相同平地作业时间内,使用该方法进行导航的平地效果要明显优于未使用导航的平地效果;以该导航方法作为辅助决策时铲车的过载或空载率总和不大 6.9%,远远低于未使用导航时的情况。

参 考 文 献

- Zhang N Q, Wang M H, Wang N. Precision agriculture—a worldwide overview[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36(2-3): 113-132.
- Finney C. The benefits of land leveling on irrigation schemes in Turkey and Sindh Province[J]. ICID Journal, 1996, 45(1): 1523-1539.
- Yang C, Peterson C L, Shropshire G J, et al. Spatial variability of field topography and wheat yield in the Palouse region of the Pacific Northwest[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(1): 17-27.
- Wang M H. Possible adoption of precision agriculture for developing countries at the threshold of the new millennium[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 30(1-3): 45-50.
- 许迪, 李益农, 李福祥, 等. 常规土地平整方法与激光平地技术组合应用分析[J]. 水利学报, 1999(10): 52-56.
Xu Di, Li Yinong, Li Fuxiang, et al. Study on combination of conventional and laser-controlled land grading procedures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(10): 52-56. (in Chinese)
- Neményi M, Mesterházi P Á, Pecze Z S, et al. The role of GIS and GPS in precision farming[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 40(1-3): 45-55.
- 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. GPS application in agricultural land leveling survey[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 66-70. (in Chinese)
- 李宏鹏. 基于 RTK-GNSS 定位的农田土地精细平整集成系统的研究与优化[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.

- 9 Reid J F, Zhang Q, Noguchi N, et al. Agricultural automatic guidance research in North America[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 25(1-2): 155-167.
- 10 Zhang Q, Reid J F, Noguchi N. Agricultural vehicle navigation using multiple guidance sensors[C]// *Proceedings of International Conference on Field and Service Robotics*, 1999: 293-298.
- 11 Li M, Imou K, Wakabayashi K, et al. Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2009, 2(3): 1-26.
- 12 O'Connor M, Bell T, Elkaim G, et al. Automatic steering of farm vehicles using GPS[M]// Robert P C, Rust R H, Larson W E. *Precision Agriculture*. USA: American Society of Agronomy, 1996: 767-777.
- 13 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.
- 14 Zimmerman K R, Gross A, O'Connor M, et al. System and method for land-leveling: USA, US6880643 [P]. 2005-04-19.
- 15 Keller R J, Nichols M E, Lange A F. Methods and apparatus for precision agriculture operations utilizing real time kinematic global positioning system systems: USA, US6199000 [P]. 2001-03-06.
- 16 王泷. GPS 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, 2013.
- 17 刘寅. GPS 控制平地系统的改进与试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.
- 18 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-based land slope leveling technique and its implementation [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(5): 456-460. (in Chinese)
- 19 Aziz S A, Steward B L, Tang Lie, et al. Multiple GPS measurements for digital elevation model[C]// *Proceedings of the 4th World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources*. ASABE, 2006: 329-334.
- 20 Aziz S A, Steward B L, Kaleita A, et al. Assessing the effects of DEM uncertainty on erosion rate estimation in an agricultural field [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(3): 785-798.
- 21 沈映政, 董云, 李北方. 规则格网数字高程模型的建立[J]. *地理空间信息*, 2012, 10(1): 153-154, 157.
- 22 吴延霞. 基于 GPS/GIS 的激光平地机作业路径规划方法的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- 23 贾文涛, 刘峻明, 于丽娜. 基于农田高程信息快速采集系统的平整精度评价方法[J]. *中国土地科学*, 2009(5): 65-70.
Jia Wentao, Liu Junming, Yu Li'na. Study on evaluation methods of farmland-leveling precision based on information fast collecting system of farmland altitude [J]. *China Land Science*, 2009(5): 65-70. (in Chinese)
- 24 张发顺. 农田激光平整效果评价方法与试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- 25 许迪, 李益农. 精细地面灌溉技术体系及其研究的进展[J]. *水利学报*, 2007, 38(5): 529-537.
Xu Di, Li Yinong. Review on advancements of study on precision surface irrigation system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(5): 529-537. (in Chinese)

Real-time Path Planning and Navigation in GNSS-controlled Land Leveling

Wang Yan¹ Li Hongpeng² Niu Dongling² Li Xiao² 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, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: GNSS-controlled (Global navigation satellite system) land leveling technology plays an important role in improving the landform of field surface, also in enhancing use efficiency of water and irrigation efficiency. Aiming at improving the working efficiency of GNSS-controlled land leveling system, the application of real-time intelligent navigation technology, which provided decision-making aid in land precise leveling, had explored. A tension sensor was added into this GNSS-controlled land leveling system to realize the load monitoring of the forklift. The model of real-time land planning and navigation during the time of land leveling was set up, using mathematical modeling methods. The destination point of tractor was calculated with the load data and the terrain around it, in the principle of reducing the times of overload and empty load situations. Therefore, the turning angle could be calculated to give the navigation information to the users. Farmlands experiments were taken in the end and it turned out that: firstly, this method could be used to guide the driving in the process of land leveling quite well. Secondly, within the same leveling time in these experiments, the leveling effects with land planning and navigation functions showed to be much better than those of without. Finally, the sum proportion of overload and empty load when the land planning and navigation functions worked was no more than 6.9%, much better than the situation of without these functions.

Key words: Land leveling GNSS Load monitoring Path planning Navigation