

基于 RTK-GNSS 定位的农田地形快速测量技术

李宏鹏 牛东岭 王岩 李笑 孟庆宽 刘刚*

(中国农业大学 信息与电气工程学院/现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室/
农业部农业信息获取技术重点实验室,北京 100083)

摘要 针对现有农田土地平整中地形测量精度低、作业效率不高等问题,提出农田地形快速测量方法。该方法基于 RTK-GNSS 定位技术动态获取农田边界和内部离散点三维数据,利用三角形线性插值法建立数字高程模型并生成地形图,采用校正后的航迹法计算农田面积,并利用最小二乘法拟合农田坡面方程计算农田坡度和平整度等地势信息。在此基础上开发设计集成采集终端和数据处理软件,并与美国 FieldLevel II 系统进行农田地形测量对比试验。试验结果表明,本系统具有较高定位精度、稳定性和作业效率;与 FieldLevel II 系统测量数据相比,本系统综合相对平均误差率为 8.19%,能够满足农田土地精细平整地形快速测量的要求。

关键词 地形测量;RTK-GNSS;联合定位;集成终端;处理软件

中图分类号 S 24; P 21

文章编号 1007-4333(2014)06-0188-07

文献标志码 A

Rapid survey technology of farmland terrain based on RTK-GNSS

LI Hong-peng, NIU Dong-ling, WANG Yan, LI Xiao, MENG Qing-kuan, LIU Gang*

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education/

Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture/

College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Surveying a farmland before leveling rapidly and accurately can provide solutions for land leveling projects. In order to solve the problems of low accuracy and efficiency in the field measurement, a rapid survey method of farmland terrain was proposed. Firstly, 3D data of discrete points of boundary and internal were collected dynamically using RTK-GNSS. Secondly, a digital elevation model was generated using the method of triangulation with linear interpolation. Finally, the area was calculated with corrected track method, and the method of least squares was used to fit plane equation to calculate the slope and other information. On this basis, an integrated collection terminal and a data processing software were designed and then tested with American FieldLevel II system. The results showed that the system worked stably with high positioning accuracy and efficiency. Compared with the results of FieldLevel II system, the consolidated relative average error rate of the system was about 8.19%, which could meet the need of terrain surveying for precision field leveling.

Key words terrain survey; RTK-GNSS; joint positioning; integrated collection terminal; data processing software

农田土地精细平整是农业水资源管理解决方案的重要组成部分,能改善微地形,提高地面灌溉效率,具有节水节肥、增产增收等作用^[1-3]。快速准确的地形测量技术可以有效地勘探农田表面起伏现状,指导农田土地平整规划设计工作,同时为平整工

程中拉运土方计算费用和精细平整作业评价效果提供技术支持^[4-5]。

传统地形方法通常是利用水准仪、经纬仪、激光测量仪、手持 GPS 等设备,按照网格进行人工定点测量,这些方法存在测量精度低、工作量大、作业

收稿日期:2014-02-11

基金项目:国家“863”计划项目(2011AA100505)

第一作者:李宏鹏,硕士研究生,E-mail:lihongpeng0831@163.com

通讯作者:刘刚,教授,博士生导师,主要从事农业信息获取技术和精细农业系统集成技术研究,E-mail:pac@cau.edu.cn

效率低、工程成本高等缺点。国内外一些研究机构开展了机载式地形快速测量方法,如日本北海道大学开发了一种利用激光测距仪和 RTK 测量三维地形图的自动驾驶拖拉机^[6],周淑芳等利用机载激光雷达技术测量地形三维数据^[7],张漫等设计了一种基于 RTD DGPS 与激光测量相结合的三维地形信息测量系统^[8],孟志军等开发了一种面向土地精细平整的全地形车辆农田三维地形快速采集系统^[9],李益农等对 GPS 技术在农田平整测量中的应用可行性进行了初步研究^[10],美国 Trimble 公司开发设计了 FieldLevel II 系统,内嵌 WM-Survey 插件,可进行地形测量和土地平整^[11]。但是目前国内研究的机载式地形测量系统仍存在着作业效率不高、设备集成度低、操作复杂等问题,不利于农田地形的快速准确测量。

随着我国北斗导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)在农业中的应用,GNSS(Global navigation satellite system)高程测量精度得到了进一步的提高。本研究旨在研究一种基于 RTK-GNSS 技术的农田地形快速测量方法和集成技术设备,以期具备较高的定位精度,并能够自动采集地形三维数据,实时显示测量轨迹,自动计算地势信息,为土地精细平整提供有效的数据支撑。

1 农田地形快速测量系统的设计与实现

农田地形快速测量系统由农业作业车辆、RTK-GNSS 基站、集成采集终端和数据处理软件等组成。为配合后期的农田土地平整作业,通常选择配有平地铲的拖拉机作为测量作业农机具。将 RTK-GNSS 基站架设在田间空旷的地方,集成采集终端安装在拖拉机驾驶室内,移动站卫星天线固定在平地铲机械部件中间位置,接收差分信号的无线电台天线固定在驾驶室顶部。

1.1 集成采集终端

为适应农田复杂环境,本研究开发了集成采集终端。该终端采用一体式设计,集成 GNSS 接收模块、无线电台模块、核心处理模块、液晶触摸屏和电源模块(图 1)。GNSS 接收模块采用上海司南卫星导航公司生产的 K501 GNSS 主板。该主板支持 BDS/GPS 单系统独立定位和多系统联合定位;RTK 垂直定位精度可达 ± 5 mm,可适应较为恶劣的定位环境。无线电台模块为 U30 无线通讯模块,

该模块工作频带宽,同频干扰小,电磁兼容性好,频率稳定度高。核心处理模块选用威强电工业电脑公司的 KINO-CV-N26001 工业主板,该主板板载 1.6 GHz N2600 双核处理器,支持 TFT 液晶显示器、Windows 操作系统、CF 卡存储和 9~28 V DC 宽电压供电。液晶触摸屏选择 WVGA LED 背光 TFT LCD 四线电阻式触摸屏,用于显示和输入操作,可在强光下清晰显示。电源模块使用多级保护电路,支持 12 V 移动蓄电池和车载大容量蓄电池供电。为满足农田车载使用的特殊需求,本研究设计了铝合金外壳,所有模块封装其中。该外壳可通过旋转支架固定在拖拉机驾驶室内,具有良好的防尘和抗干扰等优点。

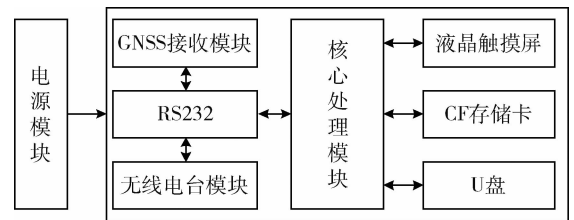


图 1 集成采集终端结构

Fig. 1 Structure of integrated collection terminal

1.2 数据处理软件

在 Windows 系统环境下,以 Microsoft Visual Studio 2008 为开发平台,基于 MFC 框架设计开发了可视化的数据处理软件,与集成采集终端配合使用。该软件包括参数配置、GNSS 数据读取与保存、测量轨迹实时显示、农田地形图自动生成、地势信息自动计算等功能,具有操作简单、处理速度快、可视化程度高等特点。

农田地形快速测量软件流程见图 2,主要包括 3 个步骤:1)参数配置。包括设定校正参数和通信端口。2)地形测量。按照原点标定、边界测量和内部测量的操作顺序,软件自动保存三维坐标,并实时显示测量轨迹指导行驶方向,以减少测量轨迹的重叠区域来获得最大的地块测量覆盖面积;测量过程中,软件自动读取和解析 GNSS 接收模块输出的 GGA 语句,提取当前位置经度、纬度和高程,计算高斯投影坐标和相对原点坐标。3)数据处理。完成测量后,软件自动生成农田地形图并计算农田面积、挖填土方量、坡度和平整度等地势信息。

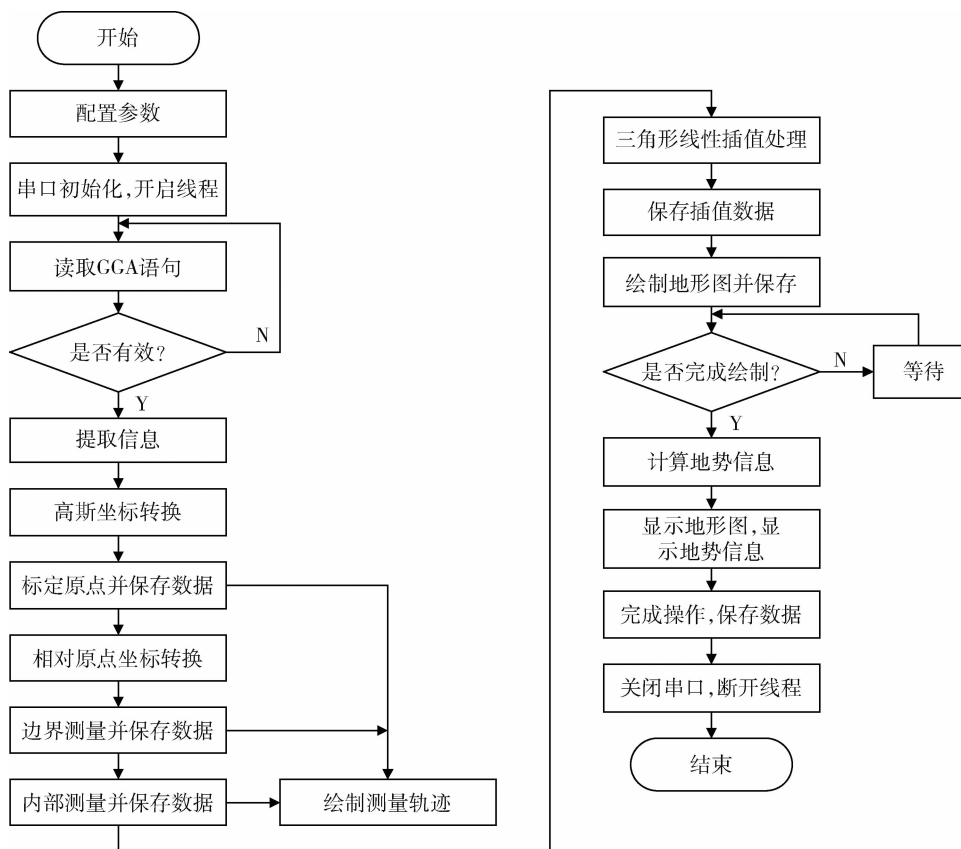


图2 数据处理软件流程

Fig. 2 Flowchart of data processing software

2 农田地形快速测量方法

2.1 数字高程模型

利用采集的有限离散点选择合适的插值方法可准确地建立数字高程模型(Digital elevation model, DEM)。在实际应用中,不同的插值方法会导致同一块农田的地形图精度相差较大。常用的插值方法有反距离加权插值法、径向基核函数法插值法、最小曲率插值法、克里格插值法和三角网线性插值法等^[12]。通过试验对比,本研究选择三角形线性插值法,该方法对于分布不规则的离散点,直接利用原始数据作为网格结点进行插值,不改变原始数据和精度,能够保存原有关键的地形特征,并且绘制的地形图保留边界测量轨迹形状,可以很好地适应复杂、不规则地形^[13]。

三角形线性插值法建立数字高程模型的主要步骤包括:1)将采集的离散点自动联结最佳的三角网,确保没有重复或交叉的三角形,可保证插值精度;2)在所形成的三角形上进行线性插值,找到

相应等高线的起点并追踪等值点;3)全部追踪完成后,将相应等值离散点连接成曲线最后输出等高线图^[14]。

2.2 农田面积计算方法

目前常用的农田面积测量方法有航线法和航迹法。航线法是通过农田边界转折点围成的多边形估算农田面积;航迹法是通过采集农田边界离散点的坐标估算农田面积^[15]。航线法需要采集转折点坐标,适合于规则农田;而航迹法不受农田形状的限制,并且计算精度随测量区域的增大而增加。因此本研究采用航迹法计算农田面积,并进行校正。

设边界测量点相对原点水平坐标为 (X_i, Y_i) ,其中 $i=1, 2, \dots, m$, m 为测量的边界点数,这些点组成一个闭环。则测量边界的轨迹长度 L 为

$$L = \sum_{i=1}^{m-1} \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2} \quad (1)$$

测量边界围成的面积 S_1 为

$$S_1 = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{m-1} (X_{i+1} + X_i)(Y_{i+1} - Y_i) \right| \quad (2)$$

由于在实际测量中卫星天线安装在平地铲或车辆的中间位置,与农田实际地边仍有一段距离,会造成测量边界围城的面积小于农田实际面积,需要进行校正。设卫星天线与农田实际地边距离为 W ,则测量边界与实际地边围成的小区域面积 S_2 为

$$S_2 = WL \quad (3)$$

校正后的农田面积 S 计算公式为

$$S = S_1 + S_2 \quad (4)$$

2.3 挖填土方量计算方法

当前,农田土地平整多为农机作业服务模式,而运土方量是估算土地平整费用的重要依据,并且土地平整多采用平面平整,因此本研究设计了平面平整时基于基准高程的挖填土方量的计算方法。考虑到土壤的类型、含水量以及碾压对土壤体积造成的变化,设置了土方挖填比参数 R ,范围为 $1.0 \sim 2.0$ 。农田水平基准高程 H_B 为

$$H_B = \bar{H} - \frac{1+R}{2R(p+q)} \cdot [R(p\bar{H} - H_L) - (H_H - q\bar{H})] \quad (5)$$

式中: \bar{H} 为插值后所有高程的平均值; p 为插值后所有高程中 $\leq \bar{H}$ 的个数, H_L 为所有 $\leq \bar{H}$ 的高程的总和; q 为插值后所有高程中 $> \bar{H}$ 的个数, H_H 为所有 $> \bar{H}$ 的高程的总和。挖土方 C 和填土方 F 分别为

$$C = \frac{S}{p+q}(H_C - rH_B) \quad (6)$$

$$F = \frac{S}{p+q}(tH_B - H_F) \quad (7)$$

式中: r 为插值后所有高程中 $> H_B$ 的个数, H_C 为所有 $> H_B$ 的高程的总和; t 为插值后所有高程中 $\leq H_B$ 的个数, H_F 为所有 $\leq H_B$ 的高程的总和。

2.4 农田坡度计算方法

土地平整前勘探农田原始坡度可以为设计满足田间地面灌溉水流方向需求的平整面提供技术指导。利用插值后地形三维数据拟合农田坡面方程可以计算农田坡度。假设拟合的坡面方程为 $Z=AX+BY+D$,插值后某点的三维坐标为 (X_j, Y_j, Z_j) ,其中 $j=0,1,2,\dots,K$, K 为插值后点数。根据最小二乘法,要达到最佳拟合,需要使样本点到拟合面的距离平方和 M 最小^[5],计算公式为

$$M = \sum_{j=0}^K (Z_j - AX_j - BY_j - D)^2 \quad (8)$$

使 M 最小时,要满足

$$\begin{cases} M_A = \frac{\partial M}{\partial A} = \sum_{j=0}^K -2X_j(Z_j - AX_j - BY_j - D) = 0 \\ M_B = \frac{\partial M}{\partial B} = \sum_{j=0}^K -2Y_j(Z_j - AX_j - BY_j - D) = 0 \\ M_D = \frac{\partial M}{\partial D} = \sum_{j=0}^K -2(Z_j - AX_j - BY_j - D) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

利用克莱姆法则(Cramer's rule)可解出拟合方程系数 A, B, D 。根据空间向量法,农田坡度 α 为

$$\alpha = \tan\left(\arccos \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1}}\right) \times 100\% \quad (10)$$

2.5 农田平整度计算方法

农田平整度指田面起伏程度,是土地平整效果的重要衡量指标,通常用各点到拟合面垂直距离的标准差 S_d 来表征^[16]。 S_d 越小,说明田面起伏越小,即农田越平整。 S_d 为 0 是理论上的最佳平整度。

插值后某点 (X_j, Y_j, Z_j) 到拟合面垂直距离为

$$d_j = \frac{|AX_j + BY_j + D - Z_j|}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1}} \quad (11)$$

所有点到拟合面垂直距离的平均值 \bar{d} 为

$$\bar{d} = \frac{1}{K} \sum_{j=0}^K d_j \quad (12)$$

则标准差 S_d 为

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^K (d_j - \bar{d})^2}{K - 1}} \quad (13)$$

3 试验与分析

3.1 RTK-GNSS 定位精度试验

高精度的 RTK-GNSS 测量数据是农田地形快速准确测量的关键,因此,本研究对使用的 RTK-GNSS 模块进行了静态定点定位精度试验。将楼顶固定位置卫星观测天线信号引入室内,使用 3 个移动站同时测量该固定位置定位数据。3 个移动站共用 1 个基站,分别工作在 GPS 独立定位、BDS 独立定位和 GPS+BDS 联合定位模式下,并且 3 个卫星天线放置在同一水平面内。定位频率为 1 Hz,同步测量时间为 40 min。

RTK-GNSS 移动站静态定点定位采集点水平方向分布和高程测量值误差分布见图 3 和图 4。

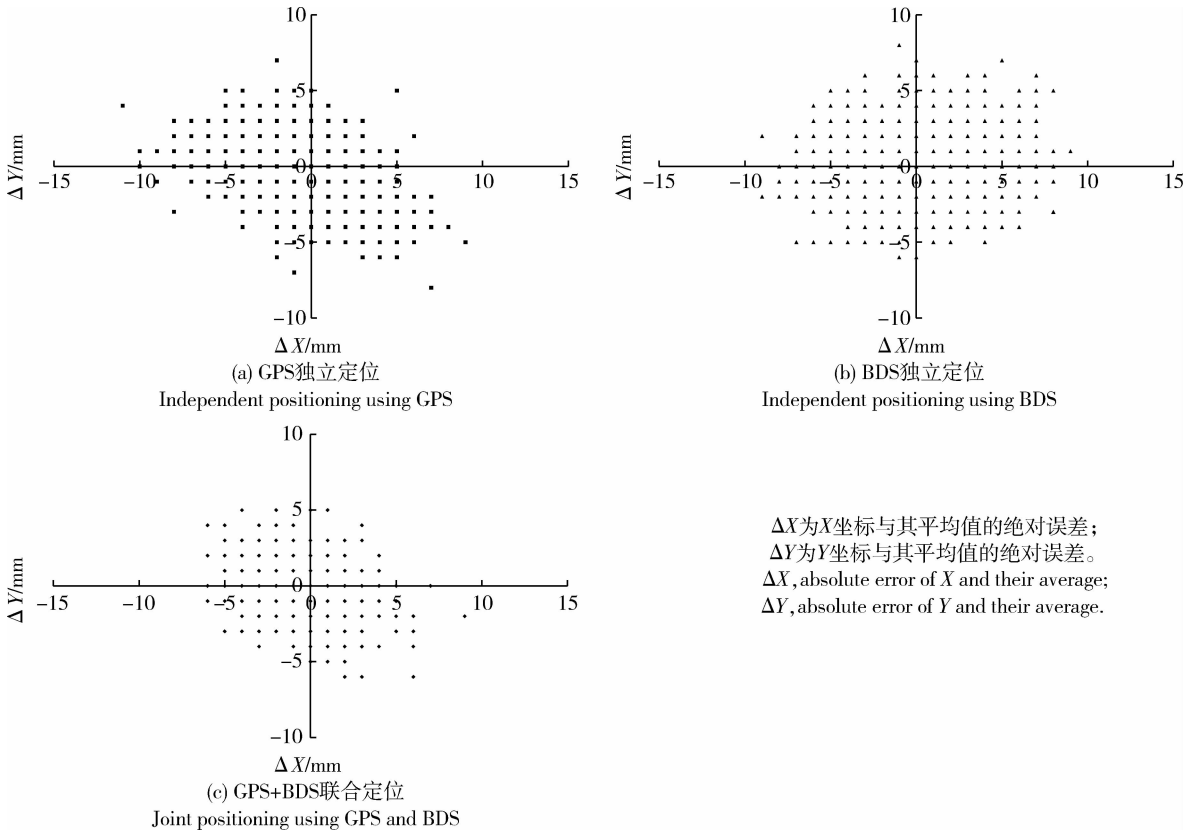


图3 RTK-GNSS 移动站静态定点定位采集点水平方向分布图

Fig. 3 Horizontal distribution of static collection points using RTK-GNSS

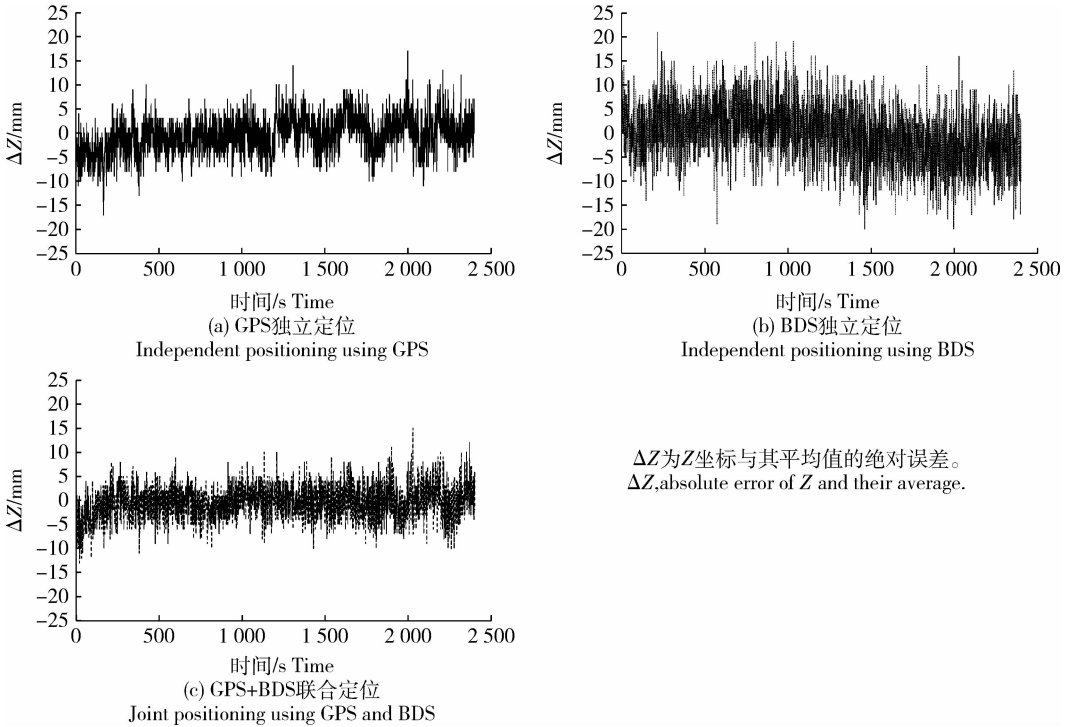


图4 RTK-GNSS 移动站静态定点定位高程测量值误差分布

Fig. 4 Distribution of elevation measurement error using RTK-GNSS

3 种定位模式下 X、Y、Z 坐标测量误差分布频率见表 1。RTK-GNSS 移动站静态定点定位实测点为 2 400 个,由于测量点坐标存在重复现象,因此在采集点水平方向分布图中可观察到的点数明显少

于实测点数。3 种定位模式中,GPS+BDS 联合定位采集点水平方向分布最为集中,其高程测量误差明显低于独立定位,且随时间的变异性最小。结果表明,GPS+BDS 联合定位测量精度更高,稳定性更好。

表 1 3 种定位模式测量误差的分布频率

Table 1 Frequency distribution of measurement error using three different positioning modes

定位模式 Positioning modes	$\Delta X \in [-5, 5]$	$\Delta Y \in [-5, 5]$	$\Delta Z \in [-5, 5]$	$\Delta R \leq 5$
GPS 独立定位 Independent positioning using GPS	96.21	98.38	79.71	89.67
BDS 独立定位 Independent positioning using BDS	95.21	98.63	57.71	87.88
GPS+BDS 联合定位 Joint positioning using GPS and BDS	99.29	99.38	88.29	97.38

注: $\Delta R = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}$, $\Delta R \leq 5$ 表示测点在半径为 5 mm 的圆内。
Note: $\Delta R \leq 5$ indicates that the measured point falls in a circle with 5 mm radius.

3.2 地形测量准确度试验

2013 年 5 月在中国农业大学涿州实验站选择一块 40 m × 50 m 的农田(北纬 39° 27', 东经 115° 50')进行农田地形测量准确度对比试验。分别使用美国 Trimble 的 FieldLevel II 系统和本系统测量;拖拉机型号为约翰迪尔 1204;平地铲宽度为 3 m;RTK-GNSS 基站架设在距离农田 10 m 的位置;移动站卫星天线安装在铲车横梁正中间位置;铲车升至最高处时,卫星天线距离地面约 1.2 m;土方挖填比设置为 1.2。

FieldLevel II 系统和本系统测量轨迹见图 5,生成的地形图见图 6。因测量路径的不完全一致使得地形图略有差异,但都很好的反映了农田地势和形状,并且呈现的地势整体趋势基本一致。与 FieldLevel II 系统相比,本系统生成的地形图平滑

度稍差,其成图方法尚需进一步优化。

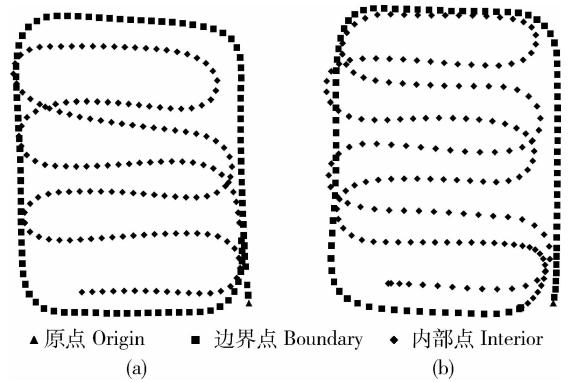


图 5 FieldLevel II 系统 (a) 和本系统 (b) 的测量轨迹

Fig. 5 Survey pathes of FieldLevel II system(a) and own system(b)

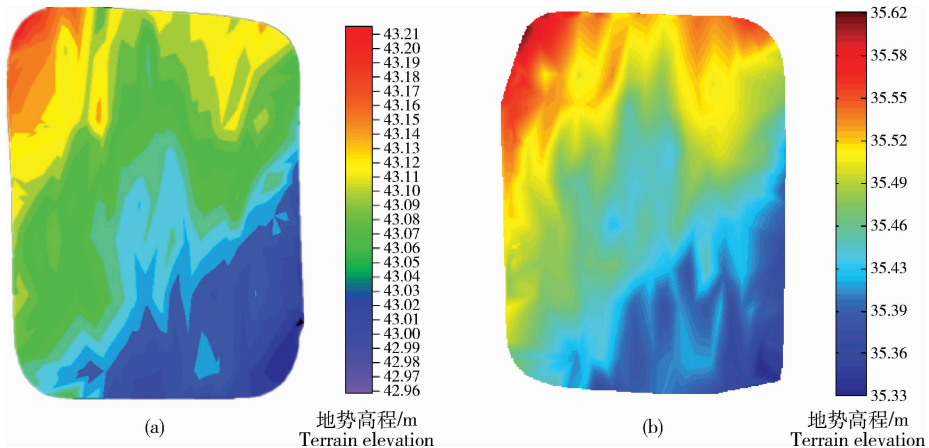


图 6 FieldLevel II 系统 (a) 和本系统 (b) 生成的地形图

Fig. 6 Terrain maps generated by FieldLevel II system(a) and own system(b)

FieldLevel II 系统和本系统计算的农田地势信息见表 2。与 FieldLevel II 系统相比,本系统测量数据相对误差率为:面积 2.10%;挖土方 7.65%;

填土方 7.75%;坡度 12.16%;平整度 11.29%;综合平均误差 8.19%。测量精度满足地形测量要求。

表 2 FieldLevel II 系统和本系统计算的农田地势信息

Table 2 Farmland terrain information calculated by FieldLevel II system and own system

测量系统 Survey systems	面积/m ² Area	挖土方/m ³ Cut	填土方/m ³ Fill	坡度/% Slope	平整度/m Flatness
FieldLevel II 系统 FieldLevel II system	2 000	34.0	28.4	0.390 6	0.062
本系统 Own system	1 958	31.4	26.2	0.438 1	0.069
绝对误差 Absolute error	-42	-2.6	-2.2	0.047 5	0.007

4 结 论

针对现有农田地形测量技术中存在的问题,本研究设计开发了基于 RTK-GNSS 定位的农田地形快速测量系统。该系统由集成采集终端和数据处理软件组成,可实时显示测量轨迹,自动生成地形图和计算地势信息。与国内其他机载式地形测量系统相比,本系统具有设备集成度高、操作简单、处理速度快、可视化程度高、作业效率高等优点。

试验结果表明,本研究采用的基于 GPS+BDS 联合定位的 RTK-GNSS 模块定位精度高,测量数据随时间变异性低,稳定性好,可以实现小于 10 mm 的静态高程测量精度,满足地形测量数据采集精度的要求;与 FieldLevel II 系统相比,使用本研究的方法测量的地势数据的综合平均相对误差约 8.19%,满足农田地形测量工作的要求。

进一步将研究动态测量中粗大误差的处理方法,提高高程测量精度,从而提高地形快速测量的准确度。

参 考 文 献

[1] 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

[2] 李庆,罗锡文,汪懋华,等.采用倾角传感器的水田激光平地机设计[J].农业工程学报,2007,23(4):88-93

[3] 谢幸福,刘刚,郎晓哲,等.激光控制平地系统激光接收器设计与试验[J].农业机械学报,2009,40(增刊1):77-81

[4] 黄琪,刘友兆,班春峰,等.基于数字高程模型和数学规划的土

地平整工程设计优化[J].农业工程学报,2011,27(11):313-318

[5] 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,2009,23(5):65-70

[6] Yokota M, Mizushima A, Ishii K, et al. 3-D map generation by a robot tractor equipped with a Laser range finder[C]//Zhang Q, Iida M, Mizushima A. Automation Technology for Off-Road Equipment. St Joseph, MI, USA: ASAE Publications, 2004: 374-379

[7] 周淑芬,李增元,范文义,等.基于激光雷达数据的 DEM 获取及应用[J].遥感技术与应用,2007,22(3):356-360

[8] 张漫,陈雨,贾文涛,等.三维地形信息测量系统的设计[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(6):1451-1454

[9] 孟志军,付卫强,刘奔面,等.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(增刊2):255-259

[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

[11] 王澆. 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

[12] Abd-Aziz S, Steward B L, Kaleita A, et al. Assessing the effects of DEM uncertainty on erosion rate estimation in an agricultural field[J]. Transactions of ASABE, 2012, 55(3): 785-798

[13] 王建雄. CAD 环境下基于不规则三角网的 DEM 算法及实现[J].云南农业大学学报,2005,20(4):573-576

[14] 吴威龙.基于不规则三角网数字高程模型(DEM)的土方计算方法[J].湖北民族学院学报:自然科学版,2008,26(2):234-236

[15] 王陈陈,马明建,马娜,等.基于 GPS 的土地面积测量算法[J].山东理工大学学报:自然科学版,2013,27(4):64-68

[16] 司永胜,刘刚,杨政,等.激光平地系统的开发与试验[J].江苏大学学报:自然科学版,2009,30(5):441-445

责任编辑:刘迎春