

农田精准平整过程中三维地形实时测量方法研究

汪 沛^{1,2} 冯达文¹ 陈高隆¹ 何 杰^{1,2} 胡 炼^{1,2} 彭靖怡¹

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室茂名分中心, 茂名 525000)

摘要: 为提高农田平整作业过程中平后区域田面地形实时测量精度, 本文提出一种农田精准平整过程中三维地形实时测量方法 (Real-time 3D terrain measurement, Rt3DTM)。以安装有 GNSS 双天线和姿态传感器的支撑轮式旱地平地机为地形测量平台, 利用卡尔曼滤波器融合 GNSS 与加速度提高定位精度, 通过建立平地铲运动学模型获得支撑轮底点的车体坐标, 结合平地铲位姿信息对支撑轮底点进行世界坐标解算, 并利用最邻近插值法生成地形图。静态试验表明, Rt3DTM 方法能准确解算支撑轮底点坐标, 平面测量均方根误差小于 10 mm, 高程测量均方根误差均不大于 20 mm。水泥路面试验结果表明, 在 3 组不同车速下测量同一段水泥路面三维地形, 与真值的高差均方根误差均小于 30 mm。田间试验结果表明, Rt3DTM 测量的高程均方根误差为 16.5 mm, 平整度为 16 mm, 小于 30 mm 的高差分布列为 95.8%, 相比机载 GNSS 测量方法的均方根误差准确性提高 29.5%, 平整度准确性提高 11.1%, 高差分布列准确性提高 9.5%。提出的 Rt3DTM 方法能实时准确地获取平整作业过程中平后区域的地形信息, 为无人化农田平整实时路径规划研究提供基础。

关键词: 三维地形; 实时测量; 农田平整; GNSS; 卡尔曼滤波

中图分类号: S281; S29

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)03-0041-08

OSID:



Real-time 3D Terrain Measurement Method and Experiment in Farmland Leveling

WANG Pei^{1,2} FENG Dawen¹ CHEN Gaolong¹ HE Jie^{1,2} HU Lian^{1,2} PENG Jingyi¹

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Maoming Branch Center, Lingnan Modern Agricultural Science and Technology Guangdong Laboratory, Maoming 525000, China)

Abstract: In order to improve the real-time measurement accuracy of field surface topography in the area behind the leveling in the process of farmland leveling operation, a real-time measurement method of 3D topography in the process of farmland precision leveling was proposed. Using a supported-wheel dryland grader installed with GNSS dual antennas and attitude sensors as a terrain measurement platform, the Kalman filter was firstly used to fuse GNSS and acceleration to improve the positioning accuracy and frequency, and then the vehicle coordinates of the bottom point of the supported wheel were obtained by establishing the kinematic model of the grader, and finally the geodetic coordinates of the bottom point of the supported wheel were solved by combining the information of the position of grader and the topographic map was generated by using the nearest neighbor interpolation method. The test verification showed that this method can accurately solve the coordinates of the bottom point of the support wheel, and the root mean square error of the plane measurement was less than 10 mm, and the root mean square error of the elevation deviation was not more than 20 mm. The test results of cement pavement showed that the root mean square error of the elevation difference between the measured value and the true value was less than 30 mm when the three-dimensional terrain of the same section of cement pavement was measured at

收稿日期: 2022-11-28 修回日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101623、32071913)、广东省科技计划项目(2021B1212040009)和国家现代农业产业技术体系项目(CARS-13)

作者简介: 汪沛(1983—), 女, 讲师, 博士, 主要从事无人农场和精准作业研究, E-mail: wangpei@scau.edu.cn

通信作者: 胡炼(1984—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事智能农机装备和无人农场研究, E-mail: lianhu@scau.edu.cn

three different speeds. The field test results showed that the root mean square error of the measured terrain was 16.5 mm, flatness was 16 mm, and the elevation difference distribution less than 30 mm was 95.8%. Compared with the airborne GNSS measurement method, the root mean square error accuracy was improved by 29.5%, flatness accuracy was improved by 11.1%, and height difference distribution column accuracy was improved by 9.5%. The method proposed can obtain the topographic information of the area behind the leveling in real time and accurately during the leveling operation, and provide a basis for the research of real-time path planning of unmanned farmland leveling.

Key words: 3D terrain; real-time measurement; farmland leveling; GNSS; Kalman filter

0 引言

农田精准平整可提高农田灌溉效率,增加灌水均匀度和肥料均匀性,并且能抑制杂草生长,起到保水保肥抑草作用^[1-3]。因此,农田精准平整技术是农业规模化和精细化生产的有力保障^[4-6]。在农田精准平整技术中,全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)因其使用便捷,无距离限制,能快速获取位置信息等优点得到广泛应用^[7-8],但目前在农田平整作业中仍靠操作人员观察未平整农田的地势,再凭经验决定平整基准高度和平整作业路线,导致平整作业效率低,同时平整质量无法保障^[9-11],因此亟需研究农田地形信息测量技术,获取农田三维地形^[12-13]。

近年来,无人机、摄影和激光雷达等相互结合的遥感技术快速发展,具有覆盖面积大、作业效率高等优点,已被应用于农田测量领域^[13-14]。POLAT等^[15]对基于机载激光雷达和无人机的数字高程模型在垂直精度等方面进行了比较,发现基于无人机的模型和基于激光雷达的模型精度相同,且其优点多于激光雷达模型。杜蒙蒙等^[16]提出了一种基于多旋翼无人机与激光测距技术的农田地形测绘方法,该方法获取的海拔与手持 PPK-GPS 设备采集海拔的均方根误差为 5.2 cm。GNSS 在农田地形测量方面也得到了应用,张漫等^[17]设计了一种 RTD-DGPS 与激光测量相结合的三维地形信息测量系统,测量误差不超过 4 cm。李宏鹏等^[18]集成了 RTK-GPS 定位技术和农田地形测量方法,开发了基于 GNSS 的农田快速地形测量系统,在静态试验下高程测量精度小于 1 cm。ZHAO 等^[19]采用 GNSS 和姿态航向参考系统(Attitude and heading reference system, AHRS)获取了水田硬底层的高低不平信息,不平等级介于 C 级和 E 级之间。景云鹏等^[9]提出了一种基于 GNSS 双天线和姿态航向参考系统组合的地形测量方法,试验结果表明与单天线地形测量方式相比,双天线测量得到的农田平整度的准确性提高约 10%,有效降低了测量误差。

综上,目前农田三维地形测量技术主要分为机

载 GNSS 和无人机搭载的传感器两种方式。机载 GNSS 地形测量方法是通过采集 GNSS 天线的坐标,依据天线与铲刀间的固定高差计算铲刀的位置信息,进而测量农田地形,但液压油缸的运动导致平地铲无法准确反映地形变化,使得 GNSS 定位不能准确表达农田地形。无人机搭载传感器的方式受电池续航等因素影响^[20],不能持续在空中进行农田地形实时测量,且需在平整前、平整后分别测量才能获得农田地形,后台软件处理无人机获取的数据也需要一定时间^[21]。因此,以上农田表面三维地形测量方法主要应用于平整前计算平整基准和平整后评估平整效果,而平整过程中实时获得平整后区域的地形信息是根据平整质量动态规划平整路径的基础。为此,本文针对在农田平整过程中无法实时测量平整后地形问题,以支撑轮式旱地平地机为平台,构建平地铲运动学模型,结合平地铲位姿信息解算出支撑轮底的三维坐标信息表征农田地形,最后进行田间平整作业试验验证。

1 农田平整过程中三维地形实时测量方法

1.1 平整过程中三维地形实时测量原理

农田平整过程中三维地形实时测量方法(Real-time 3D terrain measurement, Rt3DTM)通过测量旱地平地机支撑轮底点坐标实现平整过程中平整后区域三维地形实时测量,如图 1 所示。以安装有 GNSS 双天线和姿态传感器的支撑轮式旱地平地机为地形实时测量研究平台^[22],建立以定位天线相位中心为原点的车体坐标系。采用卡尔曼滤波器^[23]融合 GNSS 与三轴加速度信息以获取最优估计 GNSS 定位信息,利用平地机支撑轮始终由平整后农田地表支撑的特性,通过平地铲机械结构与位移传感器实时测量液压油缸长度建立平地铲运动学模型,获取支撑轮底点在车体坐标系下的坐标信息,并结合 GNSS 双天线航向信息与平地铲姿态信息解算各支撑轮底点在世界坐标系下的位置信息,进而实时得到平整后农田三维地形。

1.2 GNSS 和加速度卡尔曼融合测量算法

GNSS 测量平地铲的精度直接影响地形测量精

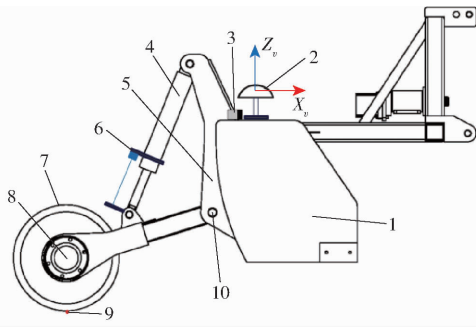


图1 平整过程中三维地形实时测量示意图

Fig.1 Schematic of 3D terrain measurement in real time during grading process

1. 平地铲 2. GNSS 天线 3. 姿态传感器 4. 液压油缸 5. 高程调节架 6. 位移传感器 7. 支撑轮 8. 支撑轮中心 9. 支撑轮底点 10. 支撑轮架转动点

度,在复杂田间作业时平地铲位姿频繁变化会导致 GNSS 输出数据精度降低^[24]。因此,采用卡尔曼滤波器融合 GNSS 定位与姿态传感器输出的加速度以获取更高精度的定位信息。

加速度输出误差处理。机具频繁振动会引起姿态传感器输出的数据中含异常值,采用 3σ 准则剔除异常加速度^[25],计算式为

$$|a_i - L| > 3\sigma \quad (1)$$

式中 a_i ——采样时刻 i 加速度, m/s^2

L ——加速度算术平均值, m/s^2

σ ——采样时刻 i 加速度标准差, m/s^2

误差若大于这个区间,则认为该加速度为异常值进行剔除。

卡尔曼滤波器融合 GNSS 定位天线三轴位移与三轴加速度。调整平地铲至合适的高度,获取一个世界基准坐标点。平地铲作业时,依据定位天线实时定位与基准坐标得到的三轴位移与加速度融合获取精准位移,定位天线的三轴位移和速度计算式为

$$S_k = S_{k-1} + \dot{S}_{k-1} T_0 + 0.5 a_{k-1} T_0^2 \quad (2)$$

$$\dot{S}_k = \dot{S}_{k-1} + a_{k-1} T_0 \quad (3)$$

式中 S_{k-1} ——定位天线第 $k-1$ 个采样时刻位移, mm

$\dot{S}_{k-1}$ ——定位天线第 $k-1$ 个采样时刻速度, mm/s

a_{k-1} ——定位天线第 $k-1$ 个采样时刻加速度, mm/s^2

T_0 ——采样时间, s

将 S_{k-1} 和 $\dot{S}_{k-1}$ 作为运动空间的二维状态向量 $x_k = (S_{k-1}, \dot{S}_{k-1})$ 。建立运动递推方程与观测方程

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (4)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (5)$$

$$\text{其中 } A = \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.5T_0^2 \\ T_0 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中 A ——状态转移矩阵 B ——输入矩阵

H ——观测矩阵 u_{k-1} ——输入向量

w_{k-1} ——过程噪声 v_k ——观测噪声

融合流程如图2所示,通过卡尔曼滤波器融合得到 GNSS 定位天线三轴最优位移 $x_{d,k}^{kf}$ 与世界基准坐标点 P_{b-w} 计算得到最优世界坐标矩阵为

$$P_k^{kf} = x_{d,k}^{kf} + P_{b-w} \quad (6)$$

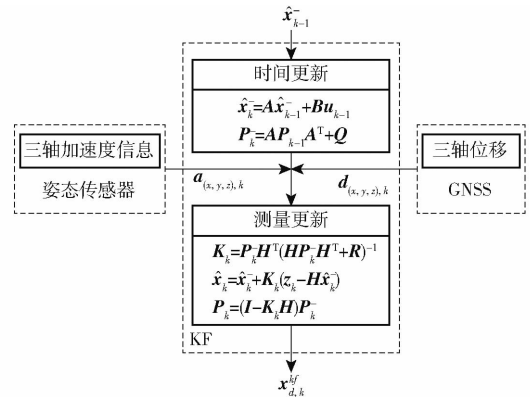


图2 定位融合算法流程图

Fig.2 Principle diagram of localization estimation algorithm

1.3 平地铲运动学模型

如图3所示,模型涉及车体坐标系 ($O_v X_v Y_v Z_v$) 与世界坐标系 ($O_w X_w Y_w Z_w$)。设平地铲为刚体,建立车体坐标系以 GNSS 定位天线的定位点为原点 O_v , X_v 轴垂直双天线连线指向前方, Y_v 轴与双天线连接线重合指向定向天线, Z_v 轴垂直于 $X_v O_v Y_v$ 指向上方;姿态传感器的 XYZ 三轴分别与 $X_v Y_v Z_v$ 保持同一方向。模型中,油缸长度由位移传感器测量获取,位移传感器的输出值与油缸长度拟合得到关系式

$$\begin{cases} c_1 = -0.02434p_1 + 2953 \\ c_2 = -0.02319p_2 + 2629 \end{cases} \quad (7)$$

式中 c_1, c_2 ——右侧与左侧油缸实时测量长度, mm

p_1, p_2 ——位移传感器输出

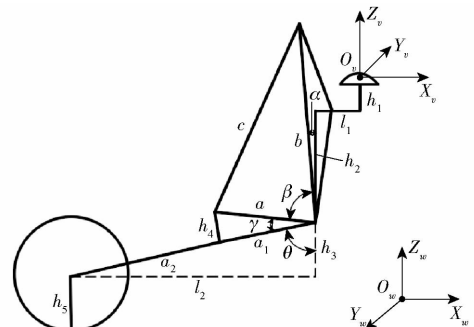


图3 平地铲运动模型示意图

Fig.3 Schematic of grading shovel movement model

在车体坐标系中,首先计算相对平地铲前进方向最右侧一个支撑轮底点的车体坐标,原点减去天线安装处至支撑轮中心在 $X_vO_vY_v$ 的投影距离可得到该支撑轮底点在 X_v 轴上的距离;因在 Y_v 轴方向上,平地铲与支撑轮表现为刚体,所以该支撑轮底点存在固定距离 d_y ; Z_v 轴方向上,原点与田面的距离即为定位原点与田面的高差,其中包括天线与平地铲垂直固定距离和由液压油缸伸缩引起的垂直变化高度。综上可得到最右侧支撑轮底点车体坐标的解算方程组为

$$\begin{cases} \alpha = \arccos \frac{h_2^2 + b^2 - 26.5^2}{2h_2b} \\ \beta = \arccos \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \\ \gamma = \arccos \frac{a^2 + a_1^2 - h_4^2}{2aa_1} \\ \theta = 180 - \alpha - \beta - \gamma \\ l_2 = (a_1 + a_2) \sin \theta \\ h_3 = (a_1 + a_2) \cos \theta \end{cases} \quad (8)$$

式中 $a、a_1、a_2、b、l_1、h_1、h_2、h_4、h_5、\alpha$ ——平地铲结构性常量
 θ ——支撑轮架与垂直线间的夹角, (°)
 β ——支撑轮架与高程调节架间的夹角, (°)
 c ——油缸长度, mm
 l_2 ——支撑轮底点与支撑轮架转动点在 X_v 轴上的距离, mm
 h_3 ——支撑轮架转动点与支撑轮中心在 Z_v 轴上的距离, mm

在平整过程中,依据实时测量的右侧油缸长度 c_1 代入式(8)可得到最右侧支撑轮底点在车体坐标矩阵为

$$\mathbf{P}_{v1} = \begin{bmatrix} X_{v1} \\ Y_{v1} \\ Z_{v1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 - l_2 \\ d_y \\ -h_1 - h_2 - h_3 - h_5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

在模型中,可依据支撑轮的间距由最右侧支撑轮坐标平移得到任意一个支撑轮底点的车体坐标,如已知最左侧与最右侧支撑轮的间距为 d_b ,坐标平移得到最左侧支撑轮中心与 Y_v 轴垂直交点的坐标 $\mathbf{P}'_v = [0 \quad d_y + d_b \quad 0]^T$,结合左侧油缸长度 c_2 与式(8)可求取最左侧支撑轮底点在车体坐标矩阵为

$$\mathbf{P}_{v2} = [X_{v2} \quad Y_{v2} \quad Z_{v2}]^T = \mathbf{P}'_v + \mathbf{P}_{v1} \quad (10)$$

根据姿态传感器输出的横滚角、俯仰角和 GNSS 双天线获取的航向角信息,建立姿态传感器绕 XYZ 三轴旋转的矩阵 $\mathbf{R}_x、\mathbf{R}_y、\mathbf{R}_z$,得到综合旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_v^w = \mathbf{R}_z^T \mathbf{R}_y^T \mathbf{R}_x^T = \begin{bmatrix} \cos \varphi_y & -\sin \varphi_y & 0 \\ \sin \varphi_y & \cos \varphi_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_p & 0 & \sin \varphi_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_p & 0 & \cos \varphi_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_r & -\sin \varphi_r \\ 0 & \sin \varphi_r & \cos \varphi_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 φ_y ——航向角, (°)
 φ_p ——俯仰角, (°)
 φ_r ——横滚角, (°)

基于式(6)得到的定位天线最优世界坐标矩阵 $\mathbf{P}_k^{kf}$,结合式(8)~(11)可得两侧支撑轮底点在世界坐标系下的坐标为

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{w1} = \mathbf{R}_v^w \mathbf{P}_{v1} + \mathbf{P}_k^{kf} \\ \mathbf{P}_{w2} = \mathbf{R}_v^w \mathbf{P}_{v2} + \mathbf{P}_k^{kf} \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\mathbf{P}_{w1}、\mathbf{P}_{w2}$ ——最右与最左侧支撑轮底点的世界坐标矩阵

平地铲支撑轮底点为支撑轮与田面的切点,平地铲运动学模型输出点信息即为支撑轮与田面切点的坐标信息,对所有输出的支撑轮底点集合可获取农田地形点云,并采用最邻近插值法生成地形图。

2 地形测量试验

2.1 试验材料与评价方法

2.1.1 试验材料

如图4所示,采用久保田704型拖拉机和悬挂多轮式旱地平地机(铲宽为2.2 m)为试验平台,试验选择最左与最右侧支撑轮进行地形测量验证。农田三维地形实时测量方法集成到团队前期研发的基于Android的GNSS农田平整系统中。采用布瑞特科技公司生产的BRT38型位移传感器测量液压油缸长度,其拉绳长为1 000 mm,分辨率为4 096 bits,



图4 地形实时测量平台与测试现场
Fig.4 Topographic real-time measurement platform and test site

1.定位天线 2.定向天线 3.姿态传感器 4.最左侧支撑轮
5.平整控制系统 6.位移传感器 7.平地铲 8.最右侧支撑轮

线性精度达到 $\pm 0.1\%$,最大工作速度为 1 m/s 。采用维特智能公司制造的 HWT-6052 型姿态传感器,其横滚角和俯仰角精度在无磁场干扰且校准下均小于 0.01° ,加速度静态测量误差为 0.02 m/s^2 。定位系统采用北京和芯星通科技有限公司生产的 UB482 型全系统双天线卫星定位板卡,其 RTK 精度在平面测量时为 $10\text{ mm}\pm 1\text{ mm}$,高程测量为 $15\text{ mm}\pm 1\text{ mm}$,双天线航向精度为 $0.2(^{\circ})/R$,其中, R 为基线距离,单位 m 。试验使用 Leica Ms60 型全站仪 (50 m 范围内,扫描精度为 0.6 mm ,扫描点间隔为 100 mm)采集农田表面数据作为三维地形参照标准。

2.1.2 测量精度评价方法

为评价地形测量方法的精度,采用均方根误差和高差分布列进行分析评价。均方根误差用于衡量测量值与真实值之间的误差,本文所提方法测量的高程与对应的路面真实高程差值均方根误差越小,说明该方法测量地形与真实地形越接近^[26]。高差分布列用于评价测量的地形与真实地形的差异与分布特征,即通过计算统计所有测量点与其对应真实点的高差小于某一距离的百分比^[3]。

2.2 静态试验

为验证 Ri3DTM 的可行性,设计了静态试验分析测量精度,试验现场如图 5 所示,采用全站仪测量放置在最左侧与最右侧支撑轮顶端的棱镜三维坐标信息,依据支撑轮轮径计算支撑轮底点的三维坐标信息,并以此底点三维坐标信息作为真值与 Ri3DTM 的测量数据对比得到 X 、 Y 、 Z 方向的偏差,试验设置液压油缸长度分别为 735、704、671、650、630 mm,其结果如表 1 所示。对表 1 进行统计分析,结果如表 2 所示。



图 5 静态试验现场
Fig.5 Static test site
1. 全站仪 2. 棱镜

由表 2 可知,在静态下,使用 Ri3DTM 测量的支撑轮底点坐标在平面方向的均方根误差均不大于 9 mm 。高程方向的均方根误差不大于 20 mm 。显然,平面测量精度明显优于高程测量精度,主要是由于 GNSS 的高程测量精度低于平面测量精度。同时,

表 1 静态试验测量结果				
Tab.1 Static test measurement results				
mm				
位置	油缸长度	X 方向偏差	Y 方向偏差	Z 方向偏差
最右侧支撑轮底点	735	1	9	17
	704	5	9	21
	671	9	10	14
	650	7	6	7
	630	5	3	20
最左侧支撑轮底点	735	7	1	4
	704	3	9	18
	671	2	12	25
	650	1	9	26
	630	0	9	19

表 2 静态试验结果偏差统计				
Tab.2 Deviation statistics of static test results				
mm				
位置	方向	最小偏差	最大偏差	均方根误差
最右侧支撑轮底点	X	1	9	6
	Y	3	10	8
	Z	7	21	17
最左侧支撑轮底点	X	0	7	4
	Y	1	12	9
	Z	4	26	20

各支撑轮底端与农田接触部分为小平面,此区域下农田高程基本保持一致,则平面精度存在毫米级损失并不影响高程精度。因此,在高精度平面信息与区域高程一致的原则下,动态试验中将高程测量作为研究对象。

2.3 水泥路面试验

为了验证 Ri3DTM 在动态环境下的性能,在华南农业大学增城教学科研基地选用一条长约 80 m 的水泥地进行试验。卡尔曼滤波器参数 Q 与 R 比例决定滤波效果^[27],基于试验数据的试错搜索处理,得到 $Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$;在 XY 方向融合时 $R = 10$,在 Z 方向 $R = 15$ 。使用平地机控制系统调整平地铲刀距地一定高度,将此高度作为基准高程并打开自动平整模式,平地机分别以行驶速度 0.75 、 1.2 、 1.6 m/s 模拟平整作业并同时地形测量,完成后利用全站仪扫描水泥路面的三维信息作为路面的真实三维信息。以测量点的平面坐标在路面真实三维点云信息遍历出最近的真实点,通过比较测量点与真实点的高程,得到 3 个速度下测量点的高差如图 6 所示。

由图 6 可知,经过卡尔曼滤波器融合后的定位数据波动明显减小,3 组速度试验下基于滤波后定位数据获取的支撑轮底点测量值与真实值高差的均方根误差分别为 11.8 、 19.6 、 27.4 mm ;小于 30 mm

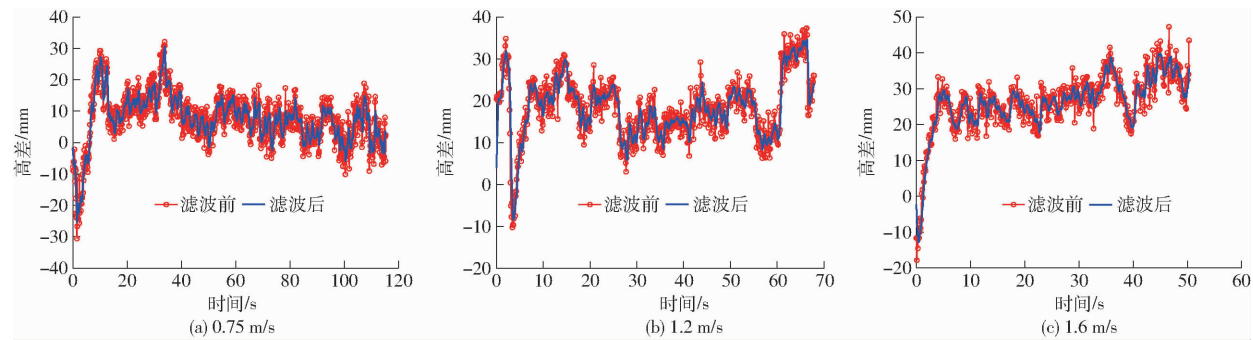


图6 不同车速下测量值与真实值的高差

Fig.6 Elevation difference between measured and true values at different vehicle speeds

的高差分布列分别为 99.83%、92.35% 和 72.42%。试验结果表明,设计的卡尔曼滤波器能有效提高定位精度,以及 Ri3DTM 能够在模拟平地作业过程中准确地测量路面高程,绘制的路面地形与路面真实地形高度重合。

2.4 田间试验

为验证 Ri3DTM 在实际作业中的测量性能,分别使用 Ri3DTM 与机载 GNSS 农田地形测量方法进行地形采集。在华南农业大学增城教学科研基地选用一块农田 (面积为 80 m × 30 m) 进行平整作业,并实时测量平整后区域的农田地形,平整作业以连环式路径进行,平均作业速度为 1.24 m/s。全站仪架设在作业农田的中间位置进行扫描,以保证全站仪测量精度,如图 7 所示。



图7 全场地形测量

Fig.7 Whole field topographic survey

将 3 种方法采集的地形点云信息通过 Matlab 插值后得到地形图如图 8 所示。由图 8 可知,Ri3DTM 明显优于机载 GNSS 测量方法,地形相似度更高。由图 8b 可知,多处地形略高于真实地形,原因是在平整过程中平地铲空载且铲刀与真实田面有一定高差,而 Ri3DTM 中的支撑轮始终紧贴地面行驶,因此解决了机载 GNSS 测量方法由于平地铲空载时造成的测量误差,提高了地形测量精度。

采用均方根误差、平整度^[18]和高差分布列对两种方法的测量结果进行评价,结果如表 3 所示。相比于机载 GNSS 测量方法,Ri3DTM 测量结果的均方根误差由 23.4 mm 下降到 16.5 mm,准确性提高 29.5%;平整度由 22 mm 下降到 16 mm,准确性提高 11.1%;小于 30 mm 的高差分布列由 87.5% 提高到 95.8%,准确性提高 9.5%。试验结果表明,Ri3DTM 测量得到的农田地形与真实地形重合度更高,其性能更优于机载 GNSS 测量方法。

3 结论

(1)提出了平整作业过程中农田三维地形实时测量方法,构建了平地铲运动学模型,结合平地铲位姿信息准确地解算到了支撑轮底点位置坐标。

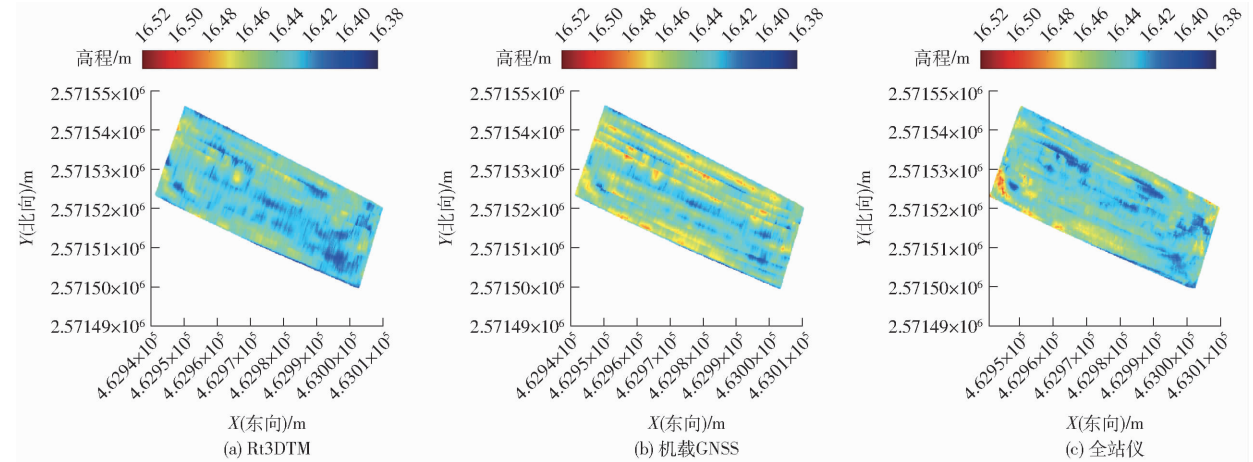


图8 不同测量方式地形测量结果

Fig.8 Topographic measurement results of different measurement methods

表 3 Rt3DTM 与机载 GNSS 测量方法地形测量结果统计

Tab.3 Statistics of topographic measurements by Rt3DTM and airborne GNSS measurement methods

方法	均方根误差/ mm	平整度/mm	高差分布列 (<30 mm)/%
全站仪		18	
Rt3DTM	16.5	16	95.8
机载 GNSS	23.4	22	87.5

注:全站仪测量地形为真实地形,其不存在均方根误差和高差分布列。

(2)设计了融合 GNSS 定位与三轴加速度的卡尔曼滤波器,提高了平地铲田间作业时位姿频繁变化时的定位精度。

(3)静态、水泥路面动态和田间作业 3 组试验结果表明:静态平面测量均方根误差小于 10 mm,高程测量均方根误差不大于 20 mm;实时测量方法在动态下可准确获取水泥路面地形信息,平地机在速度 0.75、1.2、1.6 m/s 行驶下测量结果的均方根误差分别为 11.8、19.6、27.4 mm;田间作业中测量的均方根误差为 16.5 mm,平整度为 16 mm,小于 30 mm 的高差分布列为 95.8%,相比传统测量方法的均方根误差准确性提高 29.5%,平整度准确性提高 11.1%,高差分布列准确性提高 9.5%,结果表明实时测量方法测量的地形与真实地形重合度更高,可为平整作业实时路径规划研究提供准确的实时三维地形。

参 考 文 献

[1] 胡炼,罗锡文,林潮兴,等. 1PJ-4.0 型水田激光平地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 146-151.
HU Lian, LUO Xiwen, LIN Chaoxing, et al. Development of 1PJ-4.0 laser leveler installed on a wheeled tractor for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 146-151. (in Chinese)

[2] TANG L, HU L, ZANG Y, et al. Method and experiment for height measurement of scraper with water surface as benchmark in paddy field[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 198-205.

[3] 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)

[4] 董玉娟,石奉华. GPS-RTK 结合手机奥维互动地图在农田土地平整测量中的应用[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(31): 238-241.
DONG Yujuan, SHI Fenghua. Application of GPS-RTK and mobile phone orville interactive map in the agricultural land leveling survey[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2016, 44(31): 238-241. (in Chinese)

[5] ZHAO R, HU L, LUO X, et al. Method for estimating vertical kinematic states of working implements based on laser receivers and accelerometers[J]. Biosystems Engineering, 2021, 203: 9-21.

[6] 翟长远,杨硕,王秀,等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 1-20.
ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 1-20. (in Chinese)

[7] 夏友祥,刘刚,康熙,等. 基于 GNSS 的农田平整定位精度优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 40-44.
XIA Youxiang, LIU Gang, KANG Xi, et al. Optimization and analysis of location accuracy based on GNSS-controlled precise land leveling system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 40-44. (in Chinese)

[8] 胡炼,杨伟伟,许奕,等. 基于 GPS 技术的水田平地机的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(5): 130-134.
HU Lian, YANG Weiwei, XU Yi, et al. Design and experiment of paddy field leveler based on GPS[J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36(5): 130-134. (in Chinese)

[9] 景云鹏,金志坤,刘刚. GNSS 双天线结合 AHRS 测量农田地形[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 166-174.
JING Yunpeng, JIN Zhikun, LIU Gang. Topographic survey of farmland based on GNSS dual antenna combined with AHRS[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 166-174. (in Chinese)

[10] 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(Supp.): 271-275. (in Chinese)

[11] 刘刚,康熙,夏友祥,等. 基于 GNSS 农田平整全局路径规划方法与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 27-33.
LIU Gang, KANG Xi, XIA Youxiang, et al. Global path planning algorithm and experiment based on GNSS-controlled precise land leveling system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 27-33. (in Chinese)

[12] 郎晓哲,刘刚,谢幸福,等. 机载式农田三维地形测量系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 69-72.
LANG Xiaozhe, LIU Gang, XIE Xingfu, et al. Tractor-mounted field 3-D topography surveying system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 69-72. (in Chinese)

- [13] 金志坤, 景云鹏, 刘刚. 基于无人机 LiDAR 的农田平整地势测量方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 51–57.
JIN Zhikun, JING Yunpeng, LIU Gang. Farmland leveling topography measurement method based on UAV LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 51–57. (in Chinese)
- [14] 杨普, 赵远洋, 李一鸣, 等. 基于多源信息融合的农业空地一体化研究综述[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 185–196.
YANG Pu, ZHAO Yuanyang, LI Yiming, et al. Review of research on integration of agricultural air-ground integration based on multi-source information fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 185–196. (in Chinese)
- [15] POLAT N, UYSAL M. An experimental analysis of digital elevation models generated with LiDAR data and UAV photogrammetry[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, 46(7): 1135–1142.
- [16] 杜蒙蒙, 刘颖超, 姬江涛, 等. 基于无人机与激光测距技术的农田地形测绘[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 60–67.
DU Mengmeng, LIU Yingchao, JI Jiangtao, et al. Farmland topographic mapping based on UAV and LiDAR technology[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(22): 60–67. (in Chinese)
- [17] 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.
ZHANG Man, CHEN Yu, JIA Wentao, et al. Design of three dimensional topographic information measuring system[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(6): 1451–1454. (in Chinese)
- [18] 李宏鹏, 牛东岭, 王岩, 等. 基于 RTK-GNSS 定位的农田地形快速测量技术[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(6): 188–194.
LI Hongpeng, NIU Dongling, WANG Yan, et al. Rapid survey technology of farmland terrain based on RTK-GNSS[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(6): 188–194. (in Chinese)
- [19] ZHAO R, HU L, LUO X, et al. A novel approach for describing and classifying the unevenness of the bottom layer of paddy fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 552–560.
- [20] KUMAR A, YOON S, KUMAR V R S. Mixed reality simulation of high-endurance unmanned aerial vehicle with dual-head electromagnetic propulsion devices for earth and other planetary explorations[J]. Applied Sciences, 2020, 10(11): 3736.
- [21] 周方圆, 杨鹏举. 无人机航拍图像拼接技术研究 with 实现[J]. 电子测试, 2022, 36(11): 50–52.
ZHOU Fangyuan, YANG Pengju. Research and implementation of UAV aerial image mosaic technology[J]. Electronic Test, 2022, 36(11): 50–52. (in Chinese)
- [22] 胡炼, 杜攀, 罗锡文, 等. 悬挂式多轮支撑旱地激光平地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 15–21.
HU Lian, DU Pan, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on multi-wheel support laser land leveler hanging on tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 15–21. (in Chinese)
- [23] 赖韬, 伊廷华, 王健宇, 等. 基于多速率卡尔曼滤波方法的位移和加速度数据融合[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(6): 707–713.
LAI Tao, YI Yanhua, WANG Jianyu, et al. Data fusion of displacement and acceleration measurements based on multi-rate Kalman filtering technique[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(6): 707–713. (in Chinese)
- [24] 任钊, 戴吾蛟, 余文坤, 等. 复杂环境下 GNSS/INS 紧组合垂直振动监测精度评估[J]. 导航定位学报, 2022, 10(4): 81–88.
REN Zhao, DAI Wujiao, YU Wenkun, et al. Accuracy evaluation of GNSS/INS tight combination vertical vibration monitoring in complex environment[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2022, 10(4): 81–88. (in Chinese)
- [25] 贺静, 何杰, 罗锡文, 等. 基于多传感器融合的水稻行识别与跟踪导航研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 18–26.
HE Jing, HE Jie, LUO Xiwen, et al. Rice row recognition and navigation control based on multi-sensor fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 18–26. (in Chinese)
- [26] 于子钧, 刘斌, 姜琦刚, 等. 基于 RTK 的高程数据对比分析[J]. 世界地质, 2019, 38(2): 549–555.
YU Zijun, LIU Bin, JIANG Qigang, et al. Comparison and analysis of elevation data based on RTK[J]. World Geology, 2019, 38(2): 549–555. (in Chinese)
- [27] AKHLAGHI S, ZHOU N, HUANG Z. Adaptive adjustment of noise covariance in Kalman filter for dynamic state estimation [C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2017.