

基于 RTK - BDS 的无沟铺管机作业高程控制系统研究

赵博¹ 赵士猛¹ 马明² 崔宝辉¹ 伟利国¹ 王辉¹

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 吉林省农业机械化管理中心, 长春 130062)

摘要: 针对农田铺管装备采用传统激光高程控制技术控制精度低、适应性差的问题, 设计了基于载波相位实时动态差分北斗卫星定位系统 (RTK - BDS) 的无沟铺管机高程控制系统。该系统以 RTK - BDS 为核心, 以 V 型式无沟铺管机为作业对象, 采用多模型 UKF 多传感器信息融合算法获取高精度海拔高度信息; 利用多模态模糊 PID 算法控制高程油缸, 从而满足犁头按照指定坡降指标工作的需求。田间试验表明, 多模型 UKF 算法较无迹卡尔曼滤波 (UKF)、粒子滤波的滤波效果更好, 其波动幅度降低至 0.885 cm, 均方差降低至 0.040 cm, 多点相对误差在 ± 0.2 cm 之内; 不同坡降高程控制的控制误差均在 ± 2 cm 之内, 平均误差小于 1 cm, 满足无沟铺管机的作业需求。

关键词: 无沟铺管机; 作业高度; 控制系统; RTK - BDS; 多模型 UKF; 多模态模糊 PID 控制

中图分类号: S24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298 (2021) 11-0394-08

OSID:



Elevation Control System of Trenchless Pipe Installation Machine Based on RTK - BDS

ZHAO Bo¹ ZHAO Shimeng¹ MA Ming² CUI Baohui¹ WEI Ligu¹ WANG Hui¹

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. Jilin Agricultural Mechanization Administrative Center, Changchun 130062, China)

Abstract: Aiming at the problems of traditional laser elevation control technology, low control accuracy and poor adaptability of farmland pipe laying equipment, an elevation control system of trenchless pipe installation machine based on RTK - BDS was designed. The system was mainly composed of elevation detection system and elevation control system. The elevation detection system took RTK - BDS as the core, combined with the middle frame structure, used acceleration sensor, pulled wire sensor and other sensors, and adopted the multi-sensor information fusion algorithm of multi-model UKF to obtain high-precision altitude information; the elevation control system mainly controlled the height of the plow through the proportional valve control oil cylinder, and through the analysis of the mathematical model of the elevation oil cylinder control, the design was completed. The multi-mode fuzzy PID control algorithm was used to control the expansion and contraction of the oil cylinder, so as to realize the working requirements of the plow according to the specified slope index. Through the static test, UKF, particle filter and multi-model UKF algorithm were used to detect the elevation information. The test showed that the filtering effect of multi model UKF algorithm was better, and the maximum relative detection error was 0.181 cm, and the average relative error was 0.051 cm. In the dynamic situation, the tracking effect was better and the relative error was smaller. Through the field test, the elevation control experiment without slope, the elevation control experiment with slope and the comprehensive experiment were carried out. The results showed that the elevation control error can be kept within ± 2 cm, which can meet the requirements of pipe laying by trenchless pipe laying machine.

Key words: trenchless pipe installation machine; working height; control system; RTK - BDS; multi-model UKF; multi-mode fuzzy PID control

0 引言

盐渍化土壤是我国中低产田的主要类型之一,也是当前宜农未利用地开发的主要来源。在诸多治理措施中,暗管排水控盐技术是目前最有效的大面积改良方案^[1-2]。但是,我国因施工装备尤其是大型铺管机的发展滞后而影响了现代化暗管技术的应用与推广^[3]。目前国内外大型铺管机主要有刀链式开沟铺管机和 V 型犁式无沟铺管机两种。V 型犁式无沟铺管机可省去开沟、回填等工序,从而降低了施工难度和成本,提高了作业质量和效率,因此备受国内外关注^[4]。无沟铺管机直接将管道铺于地下,无法对铺管质量进行检查和纠正,因此对管道的高程控制提出了更高要求。

目前,作业高程控制以基于激光或卫星定位的高程控制技术为主。20 世纪 60 年代末,FOUSS 等^[5-7]开发了首套激光高程控制系统,从此铺管机械的高程控制系统均以激光技术为主。IRSEL 等^[8]开发了激光控制调平铲,在较硬的土地坡度控制精度在 0.05° 之内。王丽丽等^[9]研发了大型开沟铺管机的自动控制系统,实现了开沟铺管机的激光高程控制,高程误差可控制在 ± 20 mm 以内。赵祚喜等^[10]开发了基于 MEMS 惯性传感器的水田激光水平控制系统,检测误差不超过 1° 。激光技术仅适用于小范围的高程检测,在强光、大雾或大风的恶劣天气下,会对激光的检测精度及距离产生较大的影响。自 2005 年以来,国内外学者开始研究基于 GPS 的高程检测与控制系统。FOUSS 等^[11]研究了基于双 GPS 的高程控制系统,表明双 GPS 能够达到较高的高程检测精度。刘寅等^[12]分析了激光技术与 GPS 技术的优缺点,开发了基于 GPS 控制技术的土地平整系统,试验证明平整误差小于 2.5 cm。李笑等^[13]开发了 GNSS 平地系统,平地误差小于 5 cm。夏友祥等^[14]优化了基于 GNSS 的农田平整定位精度,利用卡尔曼(KF)和小波变换联合滤波算法,使高程均方差从 2.77 cm 降低到 2.37 cm。目前,采用卫星定位技术,尤其是采用我国北斗定位系统开展无沟铺管机高程控制的研究尚未见报道。

为了提高无沟铺管机坡降控制的控制精度、稳定性和适应性,设计基于载波相位实时动态差分北斗卫星定位系统(RTK-BDS)的无沟铺管机高程控制系统,采用多传感器信息融合技术,提高 BDS 海拔高度的检测精度,采用多模态模糊 PID 算法,提高开沟作业的高程控制精度,并通过田间试验验证方法与系统的可行性。

1 整机工作原理与控制系统

1.1 V 型犁式无沟铺管机作业原理

V 型犁式无沟铺管机包含主机、中间架、北斗移动站、犁具和北斗基站等,如图 1 所示。作业时,犁具在主机牵引下掀起一个三角形土堡,波纹排水管从犁头的管道进口进入,通过内部导管送至土堡底部,犁具经过后土堡借重力重落回沟,完成管道安装。

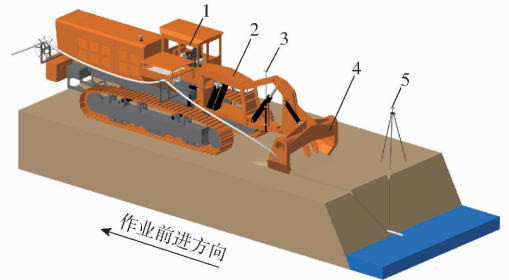


图 1 V 型犁式无沟铺管机作业示意图

Fig. 1 Diagram of pipe installation machine using V-plow

1. 主机 2. 中间架 3. 北斗移动站 4. 犁具 5. 北斗基站

如图 2 所示,中间架由两级平面四杆机构组成。第 1 级可以使用高程油缸控制第 2 级的后下控制臂的高度。后下控制臂与犁头保持一定位置,可以通过控制后下控制臂控制犁头的高度。管道出口位于犁头底部,可通过控制犁头的高度,来控制排水管道的高度。

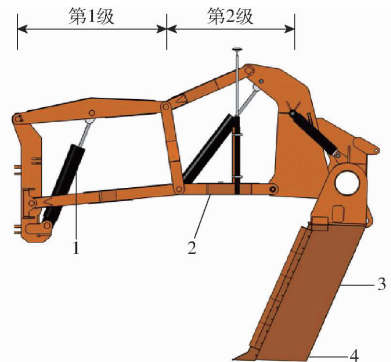


图 2 中间架结构示意图

Fig. 2 Picture of plowshare mount

1. 高程油缸 2. 后下控制臂 3. 犁头 4. 管道出口

1.2 高程控制系统

如图 3 所示,高程控制系统由工控机、北斗系统、拉线传感器、加速度传感器以及图 2 所示的高程油缸组成。北斗系统包含北斗基站和北斗移动站。北斗移动站安装在后下控制臂上,间接检测犁头的海拔高度。拉线传感器安装在高程油缸上,用来检测油缸的伸缩量,间接反映犁头高度的变化量。加速度传感器安装在后下控制臂上,用来检测犁头上下浮动的高程变化趋势。工控机安装在控制室中,

使用 CAN 通信接收各个传感器的数值,通过多传感器信息融合和高程控制算法控制高程油缸,达到高程控制的目的。



图3 高程控制系统组成

Fig.3 Composition of height control system

2 高程控制技术

2.1 高程控制系统方案

如图2所示,中间架是双级结构,水平的后下控制臂高度和犁头高度的高度差是固定的,控制犁头高度只需控制住后下控制臂的高度即可。因此可将北斗定位系统放置在后下控制臂上,间接检测犁头的海拔高度。但是由于北斗定位系统的高程精度为 $\pm 2\text{ cm}$,不能满足实际需要,因此本文采用多传感器信息融合技术来提高高程的检测精度。

根据于沛等^[15]对惯导的误差分析研究,可通过检测加速度信息来抑制振动等带来的环境误差,从而提高定位的检测精度。因此在后下控制板上增加了加速度传感器,来检测纵向加速度。另外结合中间架的结构,在高程油缸上增加了拉线位移传感器,来检测油缸位移对高程的影响,间接检测高程信息。

如图4所示,该高程控制系统首先通过信息采集模块,将加速度传感器、北斗定位系统和拉线位移传感器的数据采集到内存中,根据多模型 UKF 算法进行传感信息融合,获取高精度的高程数据。

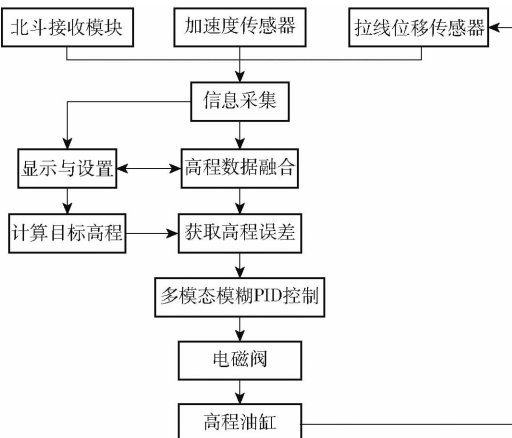


图4 高程控制系统原理框图

Fig.4 Overall scheme of level control system

控制器通过外部输入的方式设置所需要控制的起始点坐标 (x, y, h) 、管道出口与北斗天线高程差

Δh 和控制斜率 k 。

与当前位置 (x^*, y^*, h^*) 进行比较,通过两点距离公式得到车辆此时与起点的距离 d 为

$$d = \sqrt{(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2} \quad (1)$$

可得到当前位置犁头底部的目标高度 H 为

$$H = h + dk \quad (2)$$

根据当前时刻融合得到的北斗天线的高程值 h^* ,便可以得到当前时刻的高程差 ΔH 为

$$\Delta H = H - (h^* - \Delta h) \quad (3)$$

根据高程误差,通过多模态模糊 PID 控制器,控制高程油缸的伸缩,使犁头达到目标高度。然后各传感器实时采集控制后的犁头高程控制状态,将检测信息发送给控制器,供控制器做出相应控制。依次往复。

2.2 基于多模型 UKF 的自适应加权融合算法

无迹卡尔曼滤波算法在很大程度上克服了算法的线性化误差,具有广泛的应用前景^[16]。但是单一模型的 UKF 算法无法准确地对噪声分布进行预测。需从不同角度对信号进行处理,从而提高传感器检测数据的鲁棒性^[17]。本设计使用多模型 UKF 算法来预测高程信息,通过自适应加权求和方式,对各个模型处理得到的数据进行整合,得到最终的预测结果。

如图5所示,该算法使用上一时刻高程的预测值 $X(k-1|k-1)$ 和协方差矩阵 $P(k-1|k-1)$,使用各个不同的模型进行 UKF 滤波处理,得到各个模型下的预测值。通过各个模型下的预测值和协方差矩阵,自适应地计算各个模型的加权融合因子,进行加权求和得到当前时刻的最终预测值和方差。

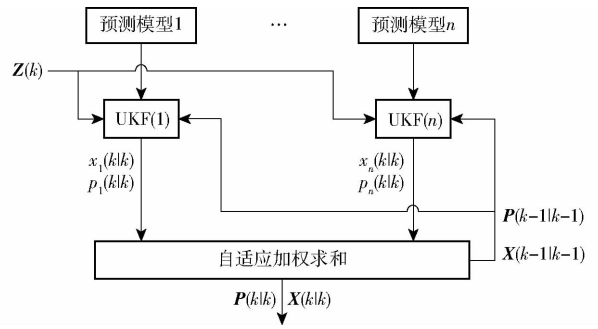


图5 多模型 UKF 融合算法流程图

Fig.5 Flow chart of algorithm for multi-model UKF

设 UKF 的预测方程为

$$X(k+1) = FX(k) + Q \quad (4)$$

式中 $X(k+1)$ —— $k+1$ 时刻的预测值

F ——状态转移矩阵

$X(k)$ ——第 k 时刻的检测值

Q ——预测噪声信号方差

观测方程为

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{W}\mathbf{X}(k) + \mathbf{R} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{Z}(k)$ ——第 k 时刻的观测值

\mathbf{W} ——观测矩阵

\mathbf{R} ——检测噪声信号方差

本文系统设计了 3 个预测模型,分别为匀速模型、匀加速度模型和位移模型^[18]。根据 3 个模型,分别使用 UKF 滤波算法得到第 i 个预测模型的 UKF 算法的检测值 \hat{X}_i 和协方差矩阵 \mathbf{P}_i 。分别取协方差矩阵 \mathbf{P}_i 的第 1 行第 1 列的数据为 p_1 、 p_2 和 p_3 ,根据支持度和自适应加权融合算法^[19],可得到加权融合因子 w_i 为

$$w_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{q_i}} \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

使用加权求和方法得到当前时刻的融合值 X 为

$$X = \sum_{i=1}^3 w_i \hat{X}_i \quad (7)$$

2.3 液压控制系统模型

系统液压部分主要由比例电磁阀和油缸组成。其中比例电磁阀的响应频率为 650 Hz,油缸的响应频率为 5 Hz。此时比例电磁阀的响应频率远远高于油缸的响应频率,因此将比例电磁阀当作比例环节处理,即

$$G(s) = K_s \quad (8)$$

式中 $G(s)$ ——比例电磁阀系统函数

K_s ——比例电磁阀比例系数

油缸的模型主要由滑阀的线性化方程、液压缸的流量方程和负载力平衡方程等确定^[20-21]。在高层油缸伺服系统中,滑阀的线性化流量方程为

$$q_L = K_p x_v - K_c p_c \quad (9)$$

式中 q_L ——液压缸控制腔的控制流量

K_p ——阀芯流量控制系数

x_v ——滑阀位移, m

K_c ——伺服阀泄漏系数

p_c ——液压缸控制腔的控制压力, Pa

对线性化流量方程进行拉氏变换得到

$$Q_L = K_p X_v - K_c P_c \quad (10)$$

式中 X_v ——拉氏变换后的滑阀位移, m

P_c ——拉氏变换后的液压缸控制腔控制压力

液压缸的流量连续性方程为

$$\begin{cases} q_L + C_{ip}(p_s - p_c) = \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{B_e} \frac{dP_c}{dt} \\ V_c = V_0 + A_h x_p \end{cases} \quad (11)$$

式中 C_{ip} ——液压缸内部泄漏系数

p_s ——液压缸活塞杆侧的压力, Pa

V_c ——液压缸控制腔容积, m^3

B_e ——液压缸控制腔弹性模量

V_0 ——液压缸控制腔初始容积, m^3

A_h ——液压缸控制腔活塞作用面积, m^2

x_p ——液压缸活塞位移, m

t ——时间, s

流量连续性方程的增量方程拉氏变换为

$$Q_L = \left(A_h X_p + \frac{V_c}{B_e} P_c \right) s + C_{ip} P_c \quad (12)$$

液压缸-负载力平衡方程为

$$P_c A_h - p_s A_r = M_t \frac{d^2 x_p}{dt^2} + B_p \frac{dx_p}{dt} + K x_p + F_l \quad (13)$$

式中 A_r ——液压缸活塞杆侧的活塞作用面积, m^2

M_t ——活塞及其负载的总质量, kg

B_p ——活塞及其负载的粘性阻尼系数

K ——负载的弹簧刚度

F_l ——作用在液压缸上的外负载力, N

平衡方程的增量方程的拉氏变换为

$$P_c A_h = M_t X_p s^2 + B_p X_p s + K X_p + F_l \quad (14)$$

由于该系统全部为刚性结构,这时负载的弹簧刚度 K 为 0, 对式(10)、(12)、(14)约去变量 Q_L 和 P_c , 得到液压缸活塞位移 x_p 的传递函数

$$X(s) = \frac{\frac{K_p}{A_h} X_v - \frac{1}{A_h} \left(K_{ce} + \frac{V_c}{B_e} s \right) F_l}{s \left[\frac{M_t V_c}{B_e A_h^2} s^2 + \left(\frac{M_t K_{ce}}{A_h^2} + \frac{V_c B_p}{B_e A_h^2} \right) s + 1 + \frac{K_{ce} B_p}{A_h^2} \right]} \quad (15)$$

其中

$$K_{ce} = K_c + C_{ip}$$

2.4 多模态模糊 PID 控制系统设计

阀控液压系统是一个具有较大滞后、非线性的时变系统,使用一般的 PID 控制或模糊 PID 控制无法从根本上解决动态品质和稳定精度的矛盾^[22]。而多模态模糊 PID 控制方式可以兼顾调节速度和稳定性的问题,通过实时改变控制参数,提高系统的适应性。该高层多模态模糊 PID 控制器结构如图 6 所示。

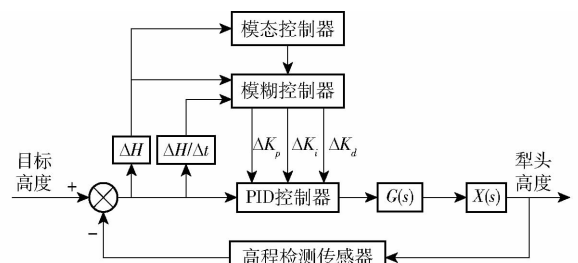


图 6 高层多模态模糊 PID 控制器原理图

Fig. 6 Principle of elevation fuzzy PID controller

系统通过多传感器融合技术获取当前犁头的高

程,与目标高程相减得到高程误差 ΔH 。模态控制器通过高程误差,判断当前时刻所需要的控制模态,控制模糊控制器和 PID 控制器获得控制信息,控制电磁阀的开度,进而控制油缸的伸缩,使得油缸达到目标高程。

模糊控制器通过当前系统的误差 e 和误差变化率 \dot{e} ,利用模糊控制规则进行模糊推理,通过查询模糊矩阵表进行参数调整。本模糊控制器的隶属度函数为三角形函数,误差 e 的变量取(负大、负中、负小、零、正小、正中、正大),误差的变化率 \dot{e} 的变量取(负大、负中、负小、零、正小、正中、正大)。建立相关的模糊规则表^[23]。

为了提高响应速度,减少调节时间,多模态模糊 PID 控制器在高程误差比较大时,采用比较大的模糊 PID 参数控制。在误差相对较小时,为了防止超调,提高控制的稳定性,采用比较小的模糊 PID 参数。通过油缸的控制试验,根据高程误差的大小,系统分为 3 种模态,即

$$\Delta HC$$

$$\begin{cases} (-1.5 \text{ cm}, 1.5 \text{ cm}) & (\text{稳态模态}) \\ (-10 \text{ cm}, -1.5 \text{ cm}) \cup (1.5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}) & (\text{过渡模态}) \\ (-\infty, -10 \text{ cm}) \cup (10 \text{ cm}, +\infty) & (\text{加速模态}) \end{cases} \quad (16)$$

每一种模态对应不同的模糊控制器控制论域和 PID 控制器的控制参数。通过切换 3 种模态,实现调控速度与稳定性相互兼顾的效果。

3 田间试验

2020 年 10 月,在山东省德州市开展了田间无沟铺管机高程控制系统的试验。试验采用五点取样法测得田间土壤含水率平均值为 20.1%,土壤坚实度平均值为 543 kPa。田间试验如图 7 所示。



图 7 田间试验

Fig. 7 Field experiment

3.1 高程检测试验

3.1.1 静态试验

(1) 单点试验

使用工控机对某一定点采样,然后分别采用 UKF 滤波、粒子滤波和多模型 UKF 滤波 3 种方法进

行滤波,分析各个滤波方法对采样数据的滤波效果。图 8 为 3 种滤波方法效果曲线。表 1 为 3 种滤波方法的性能比较。

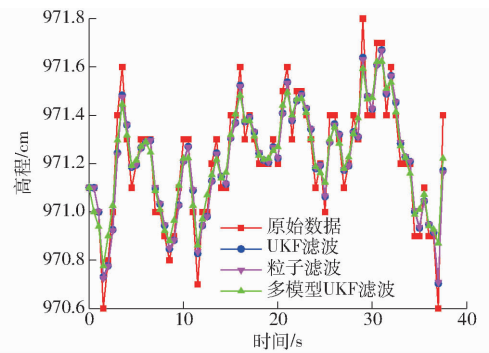


图 8 定点试验结果对比

Fig. 8 Comparison of fixed-point experiment methods

表 1 单点高程静态性能

Tab. 1 Performance comparison of methods cm

方法	最大值	最小值	波动幅度	均值	均方差
无滤波	971.925	970.560	1.465	971.218	0.082
UKF	971.722	970.704	1.018	971.219	0.047
粒子滤波	971.713	970.709	1.004	971.219	0.047
多模型 UKF	971.661	970.776	0.885	971.220	0.040

试验结果表明,3 种滤波算法都能够降低原始数据的波动幅度,而多模型 UKF 滤波后的高程数据,相比其他两种滤波方法,其波动的范围更小。如图 8 所示,多模型 UKF 滤波可以得出有 86.6% 的滤波值能保持在误差为 $\pm 0.2 \text{ cm}$ 的范围内,只有 1.2% 的高程检测数据点的绝对误差超过 0.4 cm。由表 1 可以得出,UKF 滤波和粒子滤波的均值相同,对原始数据均得到了进一步的改善,粒子滤波波动幅度比 UKF 的波动幅度小 0.014 cm。而多模型 UKF 算法的波动幅度比 UKF 和粒子滤波的波动幅度都要小,其波动幅度能降低到 0.885 cm,均方差降低到 0.040 cm,最大绝对值误差为 0.556 cm。因此本文提出的多模型 UKF 算法的静态效果更好。

(2) 多点试验

移动犁头,以每 10 cm 作为一个检测点,使用多模型 UKF 算法分别测量这些点的高程检测值,并记录分析高程的相对精度。

使用编号为 0 的点作为基准点,使用每一次采样点与基准点的相对高程误差与理论误差进行比较,试验结果如表 2 所示。根据试验结果可以得出,该检测系统的相对检测误差最大为 0.181 cm,相对误差平均值为 0.051 cm,系统的相对静态检测精度比较精确。

3.1.2 动态试验

采用手动控制高程油缸的方法,使犁头从初始

表 2 多点梯度静态测试试验
Tab.2 Multi-gradient static test cm

编号	平均高度	实际距离	检测距离	相对误差
0	1 050.161	0	0	0
1	1 040.190	-10	-9.971	-0.029
2	1 030.138	-20	-20.023	0.023
3	1 020.183	-30	-29.978	-0.022
4	1 010.034	-40	-40.127	0.127
5	1 000.093	-50	-50.068	0.068
6	989.980	-60	-60.181	0.181
7	980.130	-70	-70.031	0.031
8	970.224	-80	-79.937	-0.063
9	960.123	-90	-90.038	0.038
10	950.007	-100	-100.154	0.154

位置下降到地表(经测量,犁头初始位置距地面为 40.60 cm)。采用 3 种滤波算法分别进行动态检测滤波,分析高程检测系统的动态特性。3 种方法动态试验的高程滤波效果如图 9 所示,滤波性能如表 3 所示。

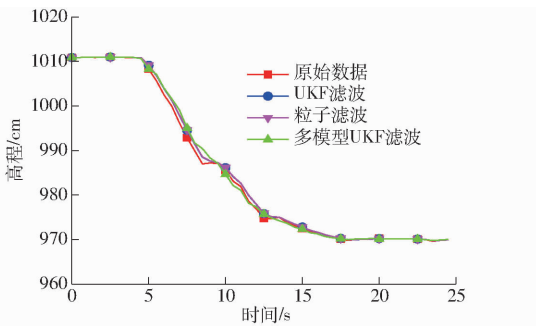


图 9 动态试验结果对比

Fig. 9 Comparison diagram of dynamic test results

表 3 3 种方法性能比较

方法	初始高度	移动后高度	变化量	相对误差
无滤波	1 010.951	970.218	40.733	0.133
UKF	1 010.950	970.221	40.730	0.131
粒子滤波	1 010.950	970.221	40.730	0.131
多模型 UKF	1 010.949	970.222	40.727	0.127

由于北斗系统的遮挡、换星和中间控制臂的水平调节等情况,使得高程检测偶尔会出现停顿现象,如图 9 所示,8.2~9.8 s 之间出现停顿现象。虽然 UKF 算法和粒子滤波算法对原始数据都有相应的滤波效果,但是对该停顿现象却不能有效的滤除。而使用多模型 UKF 滤波算法,不但比 UKF 和粒子滤波算法平滑,而且能够有效滤除该种情况,且跟随效果比较好。根据表 3 可以看出,多模型 UKF 算法的相对误差比其他两种方法都小,为 0.127 cm,动态相对高程精度更高。

3.2 高程控制试验

3.2.1 空载无坡降

使犁头保持在地面以上,进行空载无坡降高程

试验,使犁头保持在原有水平高度上。经试验,铺管机的平均行走速度为 0.815 km/h,实时的高程误差如图 10 所示。

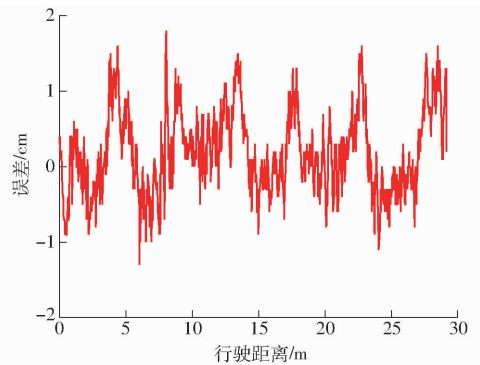


图 10 空载无坡降试验高程误差变化曲线

Fig. 10 Relationship between elevation error and distance

由图 10 可知,在无坡降高程控制时,高程控制的浮动范围在 ± 2 cm 之内,最大为 1.676 cm。其中有 92.5% 的高程误差在 ± 1 cm 之内,能够满足无坡降的控制需求。

3.2.2 空载定坡降

使犁头保持在地面以上,进行空载定坡降高程试验,其中坡降设置为工程的极限值 4/1 000 (每 1 000 cm 升高 4 cm)。经试验,铺管机的平均行走速度为 0.942 km/h,相对高程误差如图 11 所示。

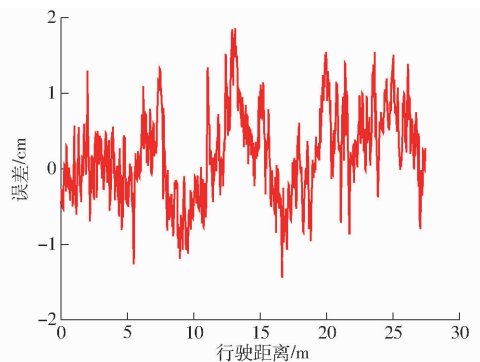


图 11 空载定坡降试验高程误差变化曲线

Fig. 11 Elevation error variation curve of no-load constant gradient experiment

如图 11,高程误差绝对值最大为 1.9787 cm,误差在 ± 2 cm 之内,其中有 94.2% 的高程误差在 ± 1 cm 之内,满足大坡降情况下的高程控制需求。

3.2.3 工程应用

工程应用试验选取 4 个不同的地块。每个地块分别采用不同的坡降进行高程控制试验,试验结果如表 4 所示。

由表 4 可以得出,在不同的坡降控制下,该控制系统的高程控制波动范围都在 ± 2 cm 之内,平均控制精度在 1 cm 之内,满足无沟铺管机的控制要求。

表4 工程应用试验结果

Tab.4 Elevation control results of comprehensive test

地块 编号	坡降	cm				
		起点 高度	终点 高度	行走 距离	最大 误差	平均 误差
1	0	625.39	625.86	357.11	1.65	0.80
	0	623.04	622.76	355.64	1.88	0.47
	0	623.24	624.26	355.86	1.60	0.95
2	2/10 000	617.94	626.77	382.62	-1.89	0.17
	2/10 000	617.35	625.17	378.22	1.91	0.16
	2/10 000	618.37	626.32	379.17	1.92	0.91
3	3/10 000	610.72	622.28	409.27	1.80	0.19
	3/10 000	608.16	620.81	408.29	-1.93	-0.45
	3/10 000	610.92	622.53	408.23	-1.73	-0.54
	3/10 000	609.84	621.95	407.23	-1.73	-0.54
4	5/10 000	601.34	623.04	431.46	1.58	0.78
	5/10 000	602.03	623.06	432.42	-1.55	0.25
	5/10 000	603.77	624.19	431.44	-1.60	-0.82

4 结论

(1)根据无沟铺管机高程自动控制需求,设计了基于RTK-BDS的高程检测系统。使用多模型

UKF传感器信息融合技术,对北斗定位系统、加速度传感器和拉线位移传感器的数据进行融合,提高了高程检测精度和适应性。

(2)分析了高程控制油缸的控制传递函数,使用多模态模糊PID控制器实现高程控制,解决了调节速度与稳定性的矛盾,在误差较大时反应速度快,在误差较小时控制精度高。

(3)进行了高程检测试验,在静态高程试验中,多模型UKF算法体现出比UKF和粒子滤波更好的滤波效果,单点高程波动幅度在0.885 cm之内,均方差降低到了0.04 cm,多点高程检测的相对误差在 ± 0.2 cm之内。在动态试验中,多模型UKF算法体现出更加平稳的滤波效果。

(4)为了验证高程控制系统的控制效果,进行了空载无坡降和定坡降试验,结果表明:在无坡降和大坡降的情况下,高程控制系统的控制误差在 ± 2 cm之内,且有90%以上的数据点在 ± 1 cm之内。进行了工程应用试验,结果表明:在多种坡降中,高程控制系统的高程误差均能保持在 ± 2 cm之内,平均误差在1 cm之内,满足无沟铺管机的控制要求。

参 考 文 献

- [1] 于淑会,刘金铜,李志祥,等.暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J].中国生态农业学报,2012,20(12):1664-1672.
YU Shuhui, LIU Jintong, LI Zhixiang, et al. Research progress on mechanism of saline alkali soil improvement by subsurface drainage and response of farmland ecosystem [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(12):1664-1672. (in Chinese)
- [2] 窦旭,史海滨,李瑞平,等.暗管排水条件下春灌定额对土壤水盐运移规律的影响[J/OL].农业机械学报,2020,51(10):318-328.
DOU Xu, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effect of spring irrigation quota on soil water and salt transport under subsurface drainage [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):318-328. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201036&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.036. (in Chinese)
- [3] 王少丽,许迪,陈皓锐,等.农田除涝排水技术研究综述[J].排灌机械工程学报,2014,32(4):343-349.
WANG Shaoli, XU Di, CHEN Haorui, et al. Review of research on farmland waterlogging and drainage technology [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(4):343-349. (in Chinese)
- [4] RITZEMA H P, NIJLAND H J, CROON F W. Subsurface drainage practices: from manual installation to large-scale implementation[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1-2):60-71.
- [5] FOUSS J L, HAMDY M Y. Simulation of a laser beam automatic depth control[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(4):692-695.
- [6] BROUGHTON R S, FOUSS J L. Subsurface drainage installation machinery and methods[J]. Agricultural Drainage, 1999, 38:963-1003.
- [7] FOUSS J L, FAUSEY N. Research and development of laser-beam automatic grade-control system on high-speed subsurface drainage equipment[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(5):1663-1667.
- [8] İRSEL G, ALTINBALIK M T. Adaptation of tilt adjustment and tracking force automation system on a laser-controlled land leveling machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150:374-386.
- [9] 王丽丽,胡小安,伟利国,等.大型开沟铺管机自动控制系统的研制[J].机电工程,2012,29(12):1448-1452,1460.
WANG Lili, HU Xiaohan, WEI Liguang, et al. Development of automatic control system for large pipe laying machine [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 29(12):1448-1452,1460. (in Chinese)
- [10] 赵祚喜,罗锡文,李庆,等.基于MEMS惯性传感器融合的水田激光平地机水平控制系统[J].农业工程学报,2008,24(6):119-124.

- ZHAO Zuoxi, LUO Xiwen, LI Qing, et al. Horizontal control system of paddy field laser grader based on MEMS inertial sensor fusion [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(6): 119-124. (in Chinese)
- [11] FOUSS J L, CLARK III B. Dual RTK-GPS systems on drainage plows[C]//2016 10th International Drainage Symposium Conference, 2016: 1-7.
- [12] 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):142-146,151.
LIU Yin, LI Hongpeng, LIU Gang, et al. Land leveling system based on GPS control technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(9): 142-146,151. (in Chinese)
- [13] 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 experiment of intelligent fine leveling system based on global navigation satellite system [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(3): 48-55. (in Chinese)
- [14] 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/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):40-44.
XIA Youxiang, LIU Gang, KANG Xi, et al. Optimization and experiment of farmland leveling positioning accuracy based on GNSS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(Supp.): 40-44. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s007&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.007. (in Chinese)
- [15] 于沛,闫禄,张金云,等. 振动条件下陀螺加速度计误差抑制技术[J]. 噪声与振动控制,2019,39(2):37-41.
YU Pei, YAN Lu, ZHANG Jinyun, et al. Error suppression technology of gyro accelerometer under vibration condition [J]. Noise and Vibration Control, 2019,39(2): 37-41. (in Chinese)
- [16] JIGNESH J, CORCORAN B, ZHU C, et al. Unscented Kalman filters for polarization state tracking and phase noise mitigation [J]. Optics Express, 2016, 24(19): 22282-22295.
- [17] 冯兴田,邵康,崔晓,等. 基于多模态切换的宽电压增益 LLC 谐振变换器控制策略[J]. 电工技术学报,2020,35(20): 4350-4360.
FENG Xingtian, SHAO Kang, CUI Xiao, et al. Control strategy of wide voltage gain LLC resonant converter based on multi-mode switching [J]. Transactions on Electrical Machines and System, 2020,35(20): 4350-4360. (in Chinese)
- [18] 付翔,何宗权,黄斌,等. 基于多信息数据融合滤波的坡度识别算法[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2021,42(2): 173-179.
FU Xiang, HE Zongquan, HUANG Bin, et al. Slope recognition algorithm based on multi information data fusion filtering [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2021,42(2): 173-179. (in Chinese)
- [19] 孙田川,刘洁瑜. 基于支持度和自适应加权的 MEMS 陀螺信息融合算法[J]. 传感技术学报,2016,29(10):1548-1552.
SUN Tianchuan, LIU Jieyu. Information fusion algorithm of MEMS gyroscope based on support degree and adaptive weighting [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016,29(10): 1548-1552. (in Chinese)
- [20] 胡国良,张佳伟,钟芳,等. 径向流磁流变阀控缸系统动力性能研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):418-426.
HU Guoliang, ZHANG Jiawei, ZHONG Fang, et al. Dynamic characteristics analysis of radial flow MR valve controlled cylinder system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(6): 418-426. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180650&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.050. (in Chinese)
- [21] 吕卫强,席静,章百宝,等. 液压缸位置伺服系统模糊 PID 控制器[J]. 兵工自动化,2020,39(9):41-44.
LÜ Weiqiang, XI Jing, ZHANG Baibao, et al. Fuzzy PID controller for hydraulic cylinder position servo system [J]. Ordnance Industry Automation, 2020,39(9): 41-44. (in Chinese)
- [22] 刘吉臻,李露,房方. 多模态控制的研究与应用综述[J]. 控制工程,2015,22(5):869-874.
LIU Jizhen, LI Lu, FANG Fang. Review of research and application of multimodal control [J]. Control Engineering of China, 2015, 22(5): 869-874. (in Chinese)
- [23] 谭鹏,樊卫华,张杰,等. 基于多模态 PID 的曳引机驱动控制系统设计[J]. 计算机测量与控制,2016,24(7):93-96.
TAN Peng, FAN Weihua, ZHANG Jie, et al. Design of traction machine drive control system based on multi-mode PID [J]. Computer Measurement and Control, 2016,24(7): 93-96. (in Chinese)