

基于无效目标滤除的毫米波雷达农田障碍物检测方法

薛金林¹ 程 峰¹ 汪冰清² 李雨晴¹ 马拯胞³ 褚阳阳¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省农机信息中心, 南京 210017;

3. 江苏省农机具开发应用中心, 南京 210017)

摘要: 农田障碍物检测是农机自动驾驶的前提, 针对毫米波雷达的农田障碍物检测, 本文提出一种无效目标滤除的算法。首先对毫米波雷达所输出的目标信息进行解析并提取农田目标障碍物信息, 然后使用无效目标滤除算法对解析后的空目标、伪目标、非威胁数据进行滤除。对雷达数据中目标距离为零的空目标直接滤除; 对因雷达工作性能或回波信号不稳定而产生的伪目标通过雷达有效目标生命周期法进行过滤; 对超出横向距离阈值和纵向距离阈值的非威胁目标直接滤除。试验结果表明, 所提算法在静止状态, 平均滤除率达到 85% 以上。当速度为 3 km/h 时, 未作业状态的平均滤除率为 85.24%, 旋耕为 84.23%; 当速度为 5 km/h 时, 未作业为 84.22%, 旋耕为 84.18%; 当速度为 7 km/h 时, 未作业为 84.19%, 旋耕为 84.16%。尽管在行驶状态下, 随着速度的提升或悬挂旋耕机, 滤除率有一定的下降, 但本文所提算法在各种状态下的平均滤除率均可达到 84% 以上。

关键词: 农田障碍物检测; 毫米波雷达; 无效目标过滤; 多普勒效应

中图分类号: S232.3; TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)04-0233-08

OSID:



Method for Millimeter Wave Radar Farm Obstacle Detection
Based on Invalid Target Filtering

XUE Jinlin¹ CHENG Feng¹ WANG Bingqing² LI Yuqing¹ MA Zhengbao³ CHU Yangyang¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Jiangsu Agricultural Machinery Information Center, Nanjing 210017, China

3. Jiangsu Agricultural Machinery Development and Application Center, Nanjing 210017, China)

Abstract: Farmland obstacle detection is a prerequisite for automatic driving of farm machinery. For farmland obstacle detection based on millimeter wave radar, an algorithm for invalid target filtering was proposed. Firstly, the target information output from the millimeter wave radar was analyzed and the farmland target obstacle information was extracted, and then the empty target, pseudo target and non-threat data were filtered out by using the invalid target filtering algorithm. The empty targets with zero target distance in the radar data were directly filtered out; the pseudo targets generated by the radar working performance or unstable echo signal were filtered by the radar effective target life cycle method; the non-threat targets exceeding the horizontal distance threshold and vertical distance threshold were directly filtered out. The experimental results showed that the average filtering rate of the proposed algorithm reached more than 85% in the static state. When the speed was 3 km/h, the average filtration rate was 85.24% in the non-working state and 84.23% in rotary tillage. When the speed was 5 km/h, 84.22% were not operated and 84.18% were rotary tillage. When the speed was 7 km/h, the non-operation was 84.19%, and the rotary tillage was 84.16%. The experimental results showed that although the filtering rate was decreased to a certain extent with the increase of speed or hanging rototiller tool in the driving state, the filtering rate of the proposed algorithm could reach more than 84% either in the stationary state or in the driving state. This method can be used to detect obstacles in farmland under complex environment. Under driving conditions, the experimental results showed that the vibration of the tractor had a large influence on the filtering effect. In order to reduce the impact of vibration, a device for millimeter wave radar vibration damping was designed, through the experimental verification, it was showed that the device vibration damping effect was obvious, the average filtering rate in the unoperated state reached more than 84%, which can help to reduce the impact of tractor vibration.

Key words: farm obstacle detection; millimeter wave radar; invalid target; Doppler effect

收稿日期: 2022-07-21 修回日期: 2022-11-11

基金项目: 江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2021-38)和江苏省现代农业产业技术体系建设专项(JATS[2021]483)

作者简介: 薛金林(1974—),男,教授,博士,主要从事农业车辆测控技术研究,E-mail: xuejinlin@njau.edu.cn

0 引言

农田障碍物是影响智能农业车辆安全行驶及作业的重要因素,障碍物的检测则是实现自动驾驶的首要条件^[1-3]。目前障碍物检测研究主要有:单传感器检测和多传感器融合检测^[4-6]。多传感器融合算法目前以图像融合毫米波点云或激光点云为主,由于农田障碍物数据集不完善,融合模型无法得到充分训练,检测效果降低^[7]。

单传感器检测技术主要有超声波、视觉及雷达^[3-4,8-11]。超声波传感器环境适应性好、操作简单且便于部署,利于障碍物检测,然而面对表面特征复杂的农田障碍物、多变的农田空气温度,其检测精度不能保证^[12-13]。视觉检测技术能够较为全面地获取障碍物信息,同时价格较低,在农机自动驾驶领域应用广泛^[14],但其实时性受制于机载设备的运算能力^[15]。雷达障碍物检测传感器分为激光雷达和毫米波雷达。激光雷达传感器常见于城市道路自动驾驶领域,其探测距离远、受有源信号干扰弱且精度高,但是农田不同于城市道路,往往凹凸不平,且强光与尘土都会降低激光雷达的障碍物检测精度^[16-17]。其中,二维激光雷达不能测量障碍物高度信息;三维激光雷达可立体地呈现障碍物信息,在农业方面主要应用于作物表型研究^[18],高昂的价格阻碍了其在农业自动驾驶领域的应用。毫米波雷达能够检测出农机前方障碍物距离自身的方位信息,有较强的探测能力和分辨能力,最重要的是不受烟、雾、尘的影响,能够全天候全天时工作,很好地弥补了激光雷达、超声波、视觉等传感器的不足,而且与激光雷达等传感器相比,毫米波雷达价格便宜^[19]。使用毫米波雷达能有效提升检测的可靠性、鲁棒性、精确性,但是毫米波雷达输出的原始数据中存在空目标、伪目标及非威胁目标等大量的无效目标,这些目标会降低障碍物检测的精度^[20]。

针对毫米波雷达输出数据中存在大量无效目标的问题,本文提出一种基于无效目标滤除的毫米波雷达农田障碍物检测方法。通过对毫米波雷达目标信息的解析,使用无效目标滤除算法对解析后的空目标、伪目标、非威胁数据进行检测判断及滤除,以提高毫米波雷达对障碍物检测的精度。

1 材料与检测方法

1.1 软硬件及信息采集

本研究采用德国大陆公司生产的 77 GHz 长距 ARS 408-21XX 型毫米波雷达,扫描频率为 17 Hz,在一个测量周期内独立测量物体的距离和速度;最大

探测距离为 250 m(长距模式),运动目标测量数可达 256 个。其可靠性高、尺寸小,便于在农机上安装部署。该毫米波雷达的主要性能参数如表 1 所示。

表 1 ARS 408-21XX 型毫米波雷达性能参数
Tab.1 Parameters of ARS 408-21XX millimeter

参数	wave radar			
	长距窄	长距窄	短距宽	短距宽
	视角 (±9°)	视角 (±4°)	视角 (±60°)	视角 (±40°)
探测距离/m	0.2~150	0.2~250	0.2~20	0.2~70
水平角分辨率/(°)	3.2	1.6	12.3	4.5
水平角精度/(°)	±0.3	±0.1	±5	±1
探测距离分辨率/m	1.79	1.79	0.39	0.39
探测距离精度/m	±0.4	±0.4	±0.1	±0.1
速度分辨率/(km·h ⁻¹)	0.37	0.37	0.43	0.43
速度精度/(km·h ⁻¹)	±0.1			

选用目标输出模式采集障碍物信息,并通过 CAN 通信将采集的信息传递给上位机,经无效目标过滤算法处理后输出有效目标信息。试验所需的软硬件包括搭建 ROS 的 Ubuntu16.04LTS 操作系统、Intel(R) Core(TM) i7-8700k CPU @ 3.70GHz 的 CPU、德国大陆的 ARS 408-21XX 毫米波雷达、JS-1004 型轮式拖拉机、创芯科技 CAN 分析仪(Linux 版)以及耐杰 12 V 直流电源。

1.2 毫米波雷达目标检测原理

本研究所用毫米波雷达采用 FMCW(调频连续波)技术,可以同时测量距离和速度,且在短距离测量方面存在明显的优势^[21-22]。FMCW 毫米波雷达通过测量发射信号与接收信号之间的频率差来获得目标与雷达之间的距离,其测距工作原理如图 1 所示, t_c 为扫频周期的一半, f_c 为扫频带宽, τ 为从信号发射到接受回波所经历的时间。

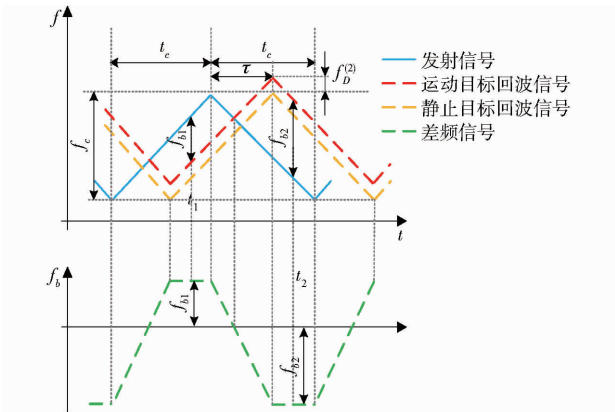


图 1 毫米波雷达测距工作原理图

Fig.1 Principle of millimeter wave radar ranging

设 $f_s(t)$ 、 $f_e(t)$ 分别为发射信号和回波信号的频率变化函数,则差频信号的频率 $f_b(t)$ 为

$$f_b(t) = f_s(t) - f_e(t)$$

(1)

根据图 1 中的几何关系,利用相似三角形定理可得

$$\frac{f_b}{\tau} = \frac{f_c}{t_c}$$

(2)

相对距离 R 计算式为

$$R = \frac{\tau c_0}{2}$$

(3)

式中 c_0 ——电磁波在自由空间传播速度,约 3×10^8 m/s

由式(2)、(3)可以得到相对距离与差频信号频率之间的关系为

$$R = \frac{c_0 t_c f_b}{2 f_c}$$

(4)

目标的相对距离 R 与差频信号的频率 f_b 成正比。因此,只要测得差频信号的频率即能确定目标的相对距离 R 。

当目标障碍物与雷达之间有相对运动时,会发生多普勒效应,这时发生相对运动时的反射信号频率为多普勒频率^[23]。多普勒频率 $f_b^{(2)}$ 的计算公式为

$$f_b^{(2)} = \frac{2 f_s v_r}{c_0}$$

(5)

式中 v_r ——目标相对运动速度

图 1 中的 f_{b1} 、 f_{b2} 分别是发出信号与接收信号处

于上升沿和下降沿所得到的差频函数,结合式(4)、(5)可知此时的差频函数为

$$\begin{cases} f_{b1} = \frac{f_c}{t_c} \frac{2R}{c_0} - \frac{2f_s v_r}{c_0} \\ f_{b2} = \frac{f_c}{t_c} \frac{2R}{c_0} + \frac{2f_s v_r}{c_0} \end{cases}$$

(6)

求解以下方程可获得 v_r 和 R 两者的具体数值。

$$\begin{cases} v_r = \frac{f_c}{t_c f_s} R - \frac{1}{2} \frac{c_0}{f_s} f_{b1} \\ v_r = \frac{1}{2} \frac{c_0}{f_s} f_{b2} - \frac{f_c}{t_c f_s} R \end{cases}$$

(7)

当进行多个目标的相对距离和相对速度测量时,需要对发射信号频率应用运动目标检测技术进行处理^[24]。通过改变后面周期的扫频带宽,将会得到不同扫频带宽发出信号的两个共同解,从而确定多个目标的相对距离和速度。

1.3 目标模式

为降低复杂程度以及保证检测识别的实时性,本研究采用 ARS 408-21XX 毫米波雷达的目标输出模式,即雷达完成一次扫描(60 ms)后,通过 CAN 报文形式将检测到的目标的相关数据输出。CAN 报文中的数据形式是十六进制,需要根据给定的通信协议进行数据解析,以得到目标的直观信息,如图 2 所示。

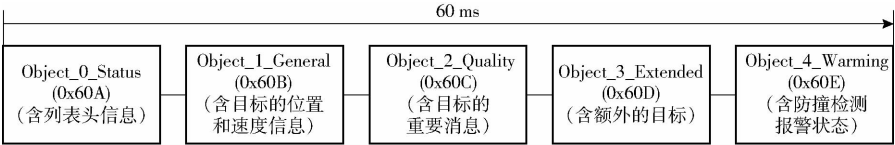


图 2 CAN 报文格式及具体信息

Fig. 2 Format of CAN message and specific information

本研究对象为农田障碍物,需要获取农田目标障碍物的方位、速度、反射截面积、运动方向等信息,而这些信息包含在 Object_1_General 和 Object_3_Extended 消息段中。

1.3.1 Object_1_General 消息段

Object_1_General 包含 Object_ID、Object_DistLong、Object_DistLat、Object_VrelLong、Object_DynProp、Object_VrelLat、Object_RCS,如表 2 所示。

其中, Object_ID 描述的是目标 ID,一旦目标被检测到,该目标的 ID 就一直保持不变; Object_DistLong 描述的是纵向距离; Object_DistLat 描述的是横向距离; Object_VrelLong 描述的是纵向相对速度; Object_VrelLat 描述的是横向相对速度; Object_DynProp 描述的是目标动态属性,例如目标是静止还是运动的; Object_RCS 描述的是雷达散射截面。

表 2 Object_1_General 消息段内容

Tab. 2 Contents in Object_1_General message segment

信号	起始位	长度	最小值	最大值	分辨率
Object_ID	0	8	0	255	1
Object_DistLong	19	13	- 500 m	1 138. 2 m	0. 2 m
Object_DistLat	24	11	- 204. 6 m	204. 8 m	0. 2 m
Object_VrelLong	46	10	- 128. 00 m/s	127. 75 m/s	0. 25 m/s
Object_VrelLat	53	9	- 64. 00 m/s	63. 75 m/s	0. 25 m/s
Object_RCS	56	8	- 64. 0 dBm ²	63. 5 dBm ²	0. 5 dBm ²

1.3.2 Object_3_Extended 消息段

Object_3_Extended 包含了 Object_ID、Object_AreLong、Object_Class、Object_AreLat、Object_OrientationAngel、Object_Length、Object_Width, 如表 3 所示。其中, Object_AreLong 描述的是目标纵向

相对加速度; Object_AreLat 描述的是目标横向相对加速度; Object_Class 描述的是目标类别; Object_OrientationAngel 描述的是目标方位角; Object_Length 描述的是目标长度; Object_Width 描述的是目标宽度。

表 3 Object_3_Extended 的消息内容
Tab.3 Message contents for Object_3_Extended

信号	起始位	长度	最小值	最大值	分辨率
Object_ID	0	8	0	255	1
Object_AreLong	21	11	- 10. 00 m/s ²	10. 47 m/s ²	0. 01 m/s ²
Object_AreLat	28	9	- 2. 50 m/s ²	2. 61 m/s ²	0. 01 m/s ²
Object_OrientationAngel	46	10	- 180. 00°	180. 00°	0. 4°
Object_Length	48	8	0 m	51. 0 m	0. 2 m
Object_Width	56	8	0 m	51. 0 m	0. 2 m

1.4 毫米波雷达无效目标的滤除方法

在实际工况下, 由于农机作业环境中存在噪声以及毫米波雷达自身的缺陷, 雷达检测到的目标中只有少数为目标障碍物, 大多数为无效目标。无效目标分为空目标、伪目标和非威胁目标, 它们的滤除方法各不相同。对于空目标, 完全根据所测得的目标距离值进行判断, 确定后直接滤除; 基于经验设定横纵向的距离阈值, 将非威胁目标的横纵坐标同阈值比较, 若其绝对值大于阈值, 则滤除。建立一个线程, 综合连续的雷达多帧检测结果, 设定一个阈值, 采用有效目标生命周期方法滤除伪目标, 有效目标生命周期方法分成产生、持续与消亡 3 个阶段, 根据状态参数值判断是否是伪目标(如表 4 所示), 如果是则滤除。其中, 状态参数 DetectCount 描述的是目标被探测到的次数, 状态参数 LostCount 描述的是目标连续丢失的次数。

表 4 雷达有效目标生命周期
Tab.4 Life cycle of radar effective target

阶段	状态参数	实际意义
产生	DetectCount + 1 且 LostCount = 0	当检测到前端目标时, DetectCount 开始累积, 并且 LostCount 设置为 0
	DetectCount > C _D 且 LostCount < C _L	检测到目标的累积次数大于 C _D , 并且连续丢失的次数小于 C _L
持续	LostCount ≥ C _D 且 DetectCount = 0	该目标连续丢失次数大于 C _L , DetectCount 被置 0, 说明该目标已经消失, 不再对其进行探测, 将其滤除

目标出现丢失的原因有: ①毫米波雷达在短时间内出现波动造成目标丢失。②地势凹凸不平可能会导致毫米波雷达行为异常, 甚至可能暂时失去原始有效目标。③因临时目标的出现暂时阻挡了原始有效目标。④原始有效目标离开了设定的目标筛选区域。累积次数阈值 C_D 与丢失次数阈值 C_L 可经过试验获得。本文中阈值 C_D 和 C_L 分别设置为 3 和 5。

通过设置雷达检测到的目标有效生命周期, 可以防止有效目标的误过滤。

对于非威胁目标, 根据实际应用场景选取合适的目标区域, 通过目标是否在目标区域中进行判断。本研究以拖拉机为研究对象, 选取拖拉机所在作业区域及相邻区域作为目标区域。毫米波雷达安装在拖拉机的正中位置, 以毫米波雷达垂直向下与水平地面的交点为坐标系原点, 假设坐标系的 x 轴为车辆行驶方向, y 轴垂直于拖拉机的纵向。假设拖拉机作业区域及相邻区域共存在 3 个障碍物, 如图 3 所示。

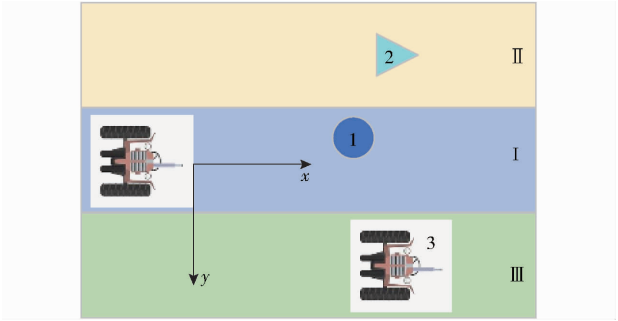


图 3 拖拉机作业区域
Fig.3 Tractor operating area

对于作业区域 I 内的目标是否具备威胁性, 通过纵向距离阈值来衡量。设 X₀ 为纵向距离阈值, 非威胁目标的纵向坐标 x 应满足条件

$$|x| > X_0 \tag{8}$$

对于相邻区域 II 和 III 内的目标是否具备威胁性, 通过横向距离阈值来衡量。设 Y₀ 为横向距离阈值, 非威胁目标的横向坐标 y 应满足

$$|y| > Y_0 \tag{9}$$

试验用拖拉机的尺寸为 4 200 mm × 2 120 mm × 2 820 mm, 悬挂旋耕机作业。为预留一定的拖拉机转弯空间, 横向阈值 Y₀ 设置为 8 m。ARS 408 - 21XX 毫米波雷达最远可检测 250 m 的障碍物, 大多

数农机作业速度一般不超过 10 km/h,同时考虑雷达 5% 的测量误差,纵向距离阈值设置为 50 m,足够农机进行避障等操作。

基于上文的无效目标滤除方法,本文设计了无效目标的滤除算法流程,如图 4 所示。

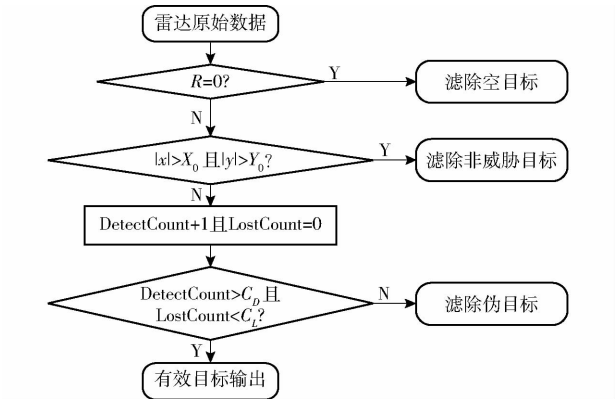


图 4 无效目标的滤除算法流程图

Fig.4 Filtering process for invalid targets

2 试验与结果分析

2.1 无效目标的过滤算法性能试验

ARS 408-21XX 型毫米波雷达的安装既要减少因安装位置过低易受地面起伏影响而产生的无效目标,同时也要考虑调试阶段对雷达俯仰角的调整。因此先将三维万向节安装在拖拉机前,再将亚克力板安装其上,最后将毫米波雷达通过螺栓固定于亚克力板上。该安装位置距离地面约 500 mm,符合安装要求。实车安装如图 5 所示。



图 5 ARS 408-21XX 型毫米波雷达实车安装

Fig.5 Installation of ARS 408-21XX millimeter wave radar in a tractor

为了验证行驶及耕地作业过程中算法对地面不平以及农机自身的振动而产生的无效目标滤除效果,试验分为 3 部分展开:拖拉机处于静止状态、处于未作业行驶状态及旋耕作业行驶状态。试验环境如图 6 所示,在检测范围内设置障碍物为黑衣人、树、白衣人。

2.1.1 拖拉机处于静止状态

试验时,将拖拉机停驶在距离障碍物约 100 m 处。使用 PCAN-USB 设备接收 ARS 408-21XX 毫



图 6 试验环境

Fig.6 Experimental environment

米波雷达数据,并通过 can-utils 来读取报文。静止状态下所接收的部分数据如表 5 所示。

表 5 静止状态下未过滤的毫米波雷达部分解析数据

Tab.5 Unfiltered partial resolved data of millimetre wave radar at static state

ID	时间戳	纵坐标/m	横坐标/m	障碍物类别
0	10:14:41:381	41.4	-28.8	点
1	10:14:41:477	34.2	-2.1	白衣人
18	10:14:41:535	40.6	1.8	黑衣人
3	10:14:41:615	52.8	0.1	点
6	10:14:41:709	17.0	24.0	点
5	10:14:41:756	39.4	-35.6	点
13	10:14:41:852	44.6	-1.2	树
31	10:14:41:945	59.8	-27.4	点
27	10:14:41:991	56.8	2.6	点
2	10:14:42:086	19.2	20.8	点

毫米波雷达未过滤的解析数据包括了大量的空目标、伪目标和非威胁目标。针对空目标,根据目标的横纵坐标,在算法中将 $X=0$ 或 $Y=0$ 的目标 ID 滤除;针对伪目标,根据雷达有效生命周期,在算法中将检测到目标的累积次数 C_d 设置为 3,丢失次数 C_l 设置为 5;针对非威胁目标,设置横纵坐标的阈值将其滤除。

拖拉机处于静止状态时,试验环境中的白衣人从拖拉机左前方向右平移,分别移动 1、2、3 m,拖拉机及树和黑衣人位置不变,使用毫米波雷达输出目标信息,然后利用算法滤除无效目标。静止状态下处理前后结果如图 7 所示。

试验环境中的目标经算法处理后得到 3 种障碍物的有效目标信息:白衣人、树和黑衣人,其余杂点信息被有效滤除。经过 3 次试验,在静止状态下应用本文所提出的雷达数据,无效目标滤除算法的平均滤除率达 85% 以上。

2.1.2 拖拉机处于未作业行驶状态

根据文献[25],设计旋耕作业时的行驶速度分别为 3、5、7 km/h,为控制变量,则未作业行驶状态也按上述 3 种速度分别进行试验。试验过程中,

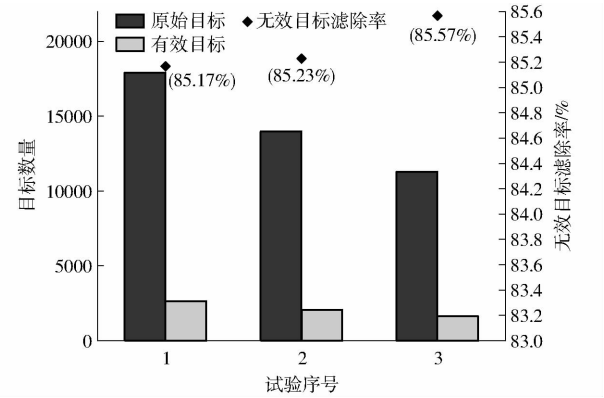
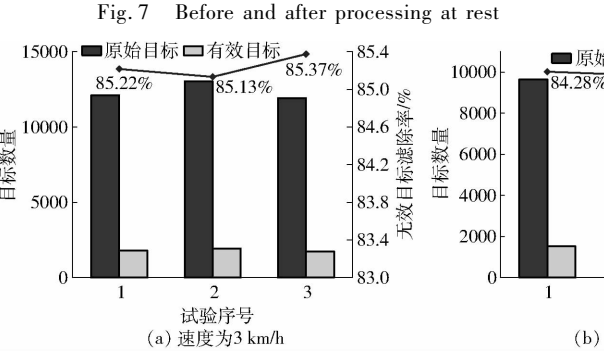
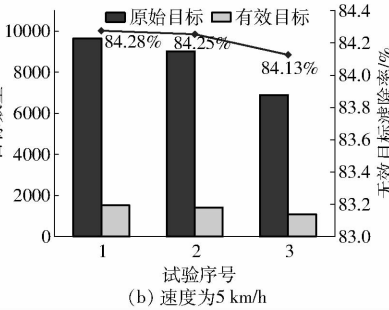


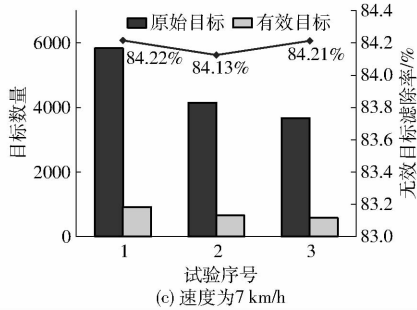
图7 静止状态下处理前后结果



(a) 速度为3 km/h



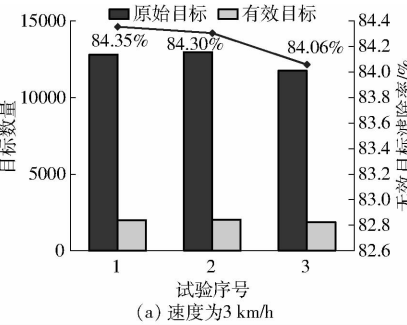
(b) 速度为5 km/h



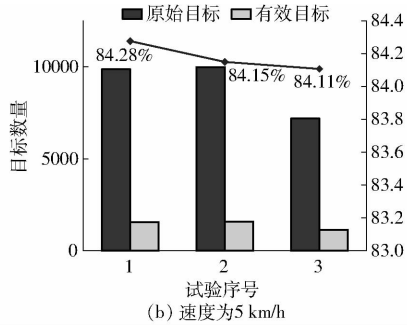
(c) 速度为7 km/h

图8 行驶状态下处理前后结果

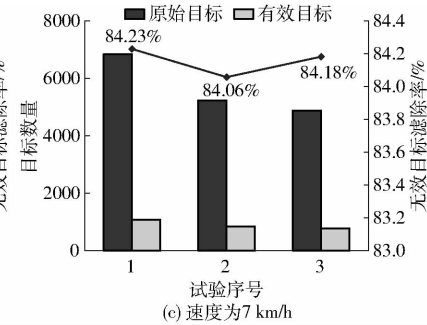
Fig.8 Results before and after processing in motion



(a) 速度为3 km/h



(b) 速度为5 km/h



(c) 速度为7 km/h

图9 旋耕作业行驶状态下处理前后结果

Fig.9 Results before and after processing in motion of rotary tillage operation

旋耕作业时由于发动机输出的功率增加,拖拉机的振动加剧,此因素使得伪目标的数量增多。相较于未作业状态,在同一速度下,无效目标滤除率出现了下降,但经过9次试验,无效目标滤除算法对3类无效目标的滤除率也达到84%以上。

2.2 不同状态下无效目标滤除率对比

为直观分析不同状态下的滤除效果,所得的滤除率及平均值如表6所示。

随着速度的提升,无论拖拉机处于未作业状态还是旋耕状态,算法的滤出效果均有一定的下降,这是因为随着拖拉机速度的提升,拖拉机的振动会更明显。当拖拉机处于旋耕状态时,相对于未作业状态,同一速度下,滤除率降低,原因在于悬挂旋耕机时,由于发动机做功增加,拖拉机的振动也随之加剧。

3个障碍物的位置以及毫米波雷达的角度等都保持不变,在每个速度状态下各进行3次试验,以验证速度对滤除效果的影响。行驶状态下处理前后结果见图8。行驶过程中由于拖拉机振动以及地面不平等因素,产生了一些伪目标。经过9次试验,无效目标滤除算法有效滤除了伪目标、空目标及非威胁目标,平均滤除率达84%以上。

2.1.3 拖拉机处于旋耕作业行驶状态

在保证障碍物位置及雷达角度不变的前提下,以设定速度进行3次旋耕作业试验,以验证旋耕作业场景对滤除效果的影响。旋耕作业行驶状态下处理前后结果如图9所示。

表6 无效目标滤除率对比

Tab.6 Comparison of invalid target filtering

	rates			%
状态	第1次	第2次	第3次	平均滤除率
静止	85.17	85.23	85.57	85.32
未作业 3 km/h	85.22	85.13	85.37	85.24
未作业 5 km/h	84.28	84.25	84.13	84.22
未作业 7 km/h	84.22	84.13	84.21	84.19
旋耕作业 3 km/h	84.35	84.30	84.06	84.23
旋耕作业 5 km/h	84.28	84.15	84.11	84.18
旋耕作业 7 km/h	84.23	84.06	84.18	84.16

针对拖拉机振动的影响,本文根据文献[26]所提方法设计了一款用于毫米波雷达的减振装置,该装置中间为安装板,用螺栓连接于侧板,安装板上下由弹簧连接于上下板,下板通过螺栓固定于车身并

使下弹簧与车身连接,其示意图如图 10 所示。

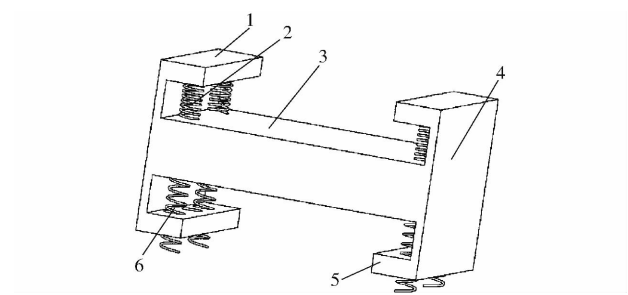


图 10 雷达减振装置示意图

Fig. 10 Schematic of radar damping device

1. 上板 2. 上弹簧 3. 安装板 4. 侧板 5. 下板 6. 下弹簧

在校园里选择了相似环境并使用同一拖拉机,对拖拉机未作业行驶状态的滤除效果进行了试验,未作业 3 km/h 的平均滤除率为 84.46%,未作业 5 km/h 的平均滤除率为 84.44%,未作业 7 km/h 的平均滤除率为 84.41%。试验结果表明未作业状态

下平均滤除率可达到 84.40% 以上,减振效果明显。

3 结论

(1)以毫米波雷达为传感器,提出了一种对毫米波雷达产生的数据进行滤除以降低计算量的方法。经过对毫米波雷达输出的目标信息的解析后提取出农田目标障碍物信息,并开发无效目标滤除算法对解析后的空目标、伪目标、非威胁目标数据进行检测判断与滤除处理。

(2)以 JS-1004 型拖拉机为平台,分别进行静止、未作业及旋耕作业 3 种状态试验,试验表明本文所提算法可有效滤除无效目标,静止状态平均滤除率可达 85% 以上,未作业或作业行驶状态均可达 84% 以上。

(3)针对拖拉机振动的影响,设计了一个减振装置,试验表明有效提高了无效目标滤除率。

参 考 文 献

[1] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1-18.
ZHANG Man, JI Yuhao, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1-18. (in Chinese)

[2] 薛金林,闫嘉,范博文. 多类农田障碍物卷积神经网络分类识别方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 35-41.
XUE Jinlin, YAN Jia, FAN Bowen. Classification and identification method of multiple kinds of farm obstacles based on convolutional neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 35-41. (in Chinese)

[3] 何勇,蒋浩,方慧,等. 车辆智能障碍物检测方法及其农业应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 21-32.
HE Yong, JIANG Hao, FANG Hui, et al. Research progress of intelligent obstacle detection method for vehicles and its application in agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 21-32. (in Chinese)

[4] AHMED S, QIU B, AHMAD F, et al. A state-of-the-art analysis of obstacle avoidance methods from the perspective of an agricultural sprayer UAV's operation scenario[J]. Agronomy, 2021, 11(6):1069.

[5] LIU M, CHEN J, ZHAO X, et al. Dynamic obstacle detection based on multi-sensor information fusion[J]. IFAC PaperOnLine, 2018, 51(17): 861-865.

[6] XUE J, CHENG F, LI Y, et al. Detection of farmland obstacles based on an improved YOLO v5s algorithm by using CIoU and anchor box scale clustering[J]. Sensors, 2022, 22:1790.

[7] 王海,徐岩松,蔡英凤,等. 基于多传感器融合的智能汽车多目标检测技术综述[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(4): 440-455.
WANG Hai, XU Yansong, CAI Yingfeng, et al. Overview of intelligent vehicle multi-target detection technology based on multi-sensor fusion[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(4):440-455. (in Chinese)

[8] CHANG S, ZHANG Y, ZHANG F, et al. Spatial attention fusion for obstacle detection using mmWave radar and vision sensor[J]. Sensors, 2020, 20(4):956.

[9] 陈斌,张漫,徐弘祯,等. 基于改进 YOLO v3-tiny 的全景图像农田障碍物检测[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊):58-65.
CHEN Bin, ZHANG Man, XU Hongzhen, et al. Improved YOLO v3-tiny based panoramic image farmland obstacle detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 58-65. (in Chinese)

[10] GHOLAMI F, KHANMIRZA E, RIAHI M. Real-time obstacle detection by stereo vision and ultrasonic data fusion[J]. Measurement, 2022, 190: 110718.

[11] LONG N, WANG K, CHENG R, et al. Assisting the visually impaired: multitarget warning through millimeter wave radar and RGB-depth sensors[J]. Journal of Electronic Imaging, 2019, 28(1): 013028.

[12] 贾闯,李加念,洪添胜,等. 山地果园单轨运输机超声波避障系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊): 69-74.
JIA Chuang, LI Jianian, HONG Tiansheng, et al. Design and test of ultrasonic obstacle avoidance system for mountain orchard monorail conveyor[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.): 69-74. (in Chinese)

[13] CORNO M, FURIOLI S, CESANA P, et al. Adaptive ultrasound-based tractor localization for semi-autonomous vineyard operations[J]. Agronomy, 2021, 11(2): 287.

[14] NISSIMOV S, GOLDBERGER J, ALCHANATIS V. Obstacle detection in a greenhouse environment using the Kinect sensor

- [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 113: 104 – 115.
- [15] INOUE K, KAIZU Y, IGARASHI S, et al. The development of autonomous navigation and obstacle avoidance for a robotic mower using machine vision technique[J]. IFAC PapersOnLine, 2019, 52(30): 173 – 177.
- [16] 季宇寒, 徐弘祯, 张漫, 等. 基于激光雷达的农田环境点云采集系统设计[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 1 – 7. JI Yuhao, XU Hongzhen, ZHANG Man, et al. Design of LiDAR-based point cloud acquisition system for farmland environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Sup.): 1 – 7. (in Chinese)
- [17] 尚业华, 张光强, 孟志军, 等. 基于欧氏聚类的三维激光点云田间障碍物检测方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 23 – 32. SHANG Yehua, ZHANG Guangqiang, MENG Zhijun, et al. Field obstacle detection method of 3D LiDAR point cloud based on Euclidean clustering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 23 – 32. (in Chinese)
- [18] GUO Q, WU F, PANG S, et al. Crop 3D – a LiDAR based platform for 3D high-throughput crop phenotyping[J]. Science China Life Sciences, 2018, 61(3): 328 – 339.
- [19] HE J, TERASHIMA S, YAMADA H, et al. Diffraction signal based human recognition in non-line-of-sight (NLOS) situation for millimeter wave radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 4370 – 4380.
- [20] 谭力凡. 机器视觉与毫米波雷达融合的前方车辆检测方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018. TAN Lifan. Research on forward vehicle detection method by fusion of machine vision and millimeter wave radar [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [21] 孙柯, 吴开华, 王亚涛, 等. 基于毫米波雷达的植保无人机避障系统研究[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(6): 73 – 76. SUN Ke, WU Kaihua, WANG Yatao, et al. Research on millimeter wave radar-based obstacle avoidance system for plant protection UAVs[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(6): 73 – 76. (in Chinese)
- [22] 宋文豪, 周斌, 卜智勇, 等. 基于复合型 FMCW 波形的多目标匹配算法[J]. 中国科学院大学学报, 2022, 39(1): 110 – 118. SONG Wenhao, ZHOU Bin, BU Zhiyong, et al. Multi-target matching algorithm based on composite FMCW waveform[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2022, 39(1): 110 – 118. (in Chinese)
- [23] 赵瑞娟. 基于 FMCW 雷达的差频信号采集系统设计[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(6): 83 – 85, 128. ZHAO Ruijuan. Design of differential frequency signal acquisition system based on FMCW radar[J]. Ship Electronics Engineering, 2019, 39(6): 83 – 85, 128. (in Chinese)
- [24] 宋健强, 刘云学, 李珂. 基于梯形波调制 FMCW 雷达的多目标检测[J]. 空间电子技术, 2018, 15(6): 12 – 16, 22. SONG Jianqiang, LIU Yunxue, LI Ke. Multi-target detection based on trapezoidal wave modulated FMCW radar[J]. Space Electronics Technology, 2018, 15(6): 12 – 16, 22. (in Chinese)
- [25] 林静, 张桐嘉, 陈彬, 等. 深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 28 – 39. LIN Jing, ZHANG Tongjia, CHEN Bin, et al. Design and test of deep pine and stubble rototilling and monopoly combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 28 – 39. (in Chinese)
- [26] 穆旭锋. 一种车用毫米波雷达防护装置: 201821975521.9[P]. 2019 – 07 – 23.

(上接第 221 页)

- [25] 韩振浩, 李佳, 苑严伟, 等. 基于 U-Net 网络的果园视觉导航路径识别方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 30 – 39. HAN Zhenhao, LI Jia, YUAN Yanwei, et al. Path recognition of orchard visual navigation based on U-Net[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 30 – 39. (in Chinese)
- [26] 刘伟洪, 何雄奎, 刘亚佳, 等. 果园行间 3D LiDAR 导航方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 165 – 174. LIU Weihong, HE Xiongkui, LIU Yajia, et al. Navigation method between rows for orchard based on 3D LiDAR[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 165 – 174. (in Chinese)
- [27] ESTER M, KRÖGER P, SANDER J, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[C]//KDD, 1996, 96: 226 – 231.
- [28] 蔡怀宇, 陈延真, 卓励然, 等. 基于优化 DBSCAN 算法的激光雷达障碍物检测[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 83 – 90. CAI Huaiyu, CHEN Yanzhen, ZHUO Liran, et al. LiDAR object detection based on optimized DBSCAN algorithm[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 83 – 90. (in Chinese)
- [29] 陈广胜, 程逸群, 景维鹏. 基于 KD 树划分的云计算 DBSCAN 优化算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(4): 21 – 27. CHEN Guangsheng, CHENG Yiqun, JING Weipeng. DBSCAN optimization algorithm based on KD-tree partitioning in cloud computing[J]. Computer Engineering, 2017, 43(4): 21 – 27. (in Chinese)
- [30] 范晶晶, 王力, 褚文博, 等. 基于 KDTree 树和欧式聚类的越野环境行人识别的研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(12): 1410 – 1415. FAN Jingjing, WANG Li, CHU Wenbo, et al. Research on pedestrian recognition in cross-country environment based on KDTree and Euclidean clustering[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(12): 1410 – 1415. (in Chinese)