doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.03.002

基于多传感器融合的水稻行识别与跟踪导航研究

贺　静[1,2]　何　杰[1,2]　罗锡文[1,2]　李伟聪[1,2]　满忠贤[1,2]　冯达文[1,2]

(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.广东省农业人工智能重点实验室,广州 510642)

摘要:水稻生产田间管理机械自动跟踪水稻行是提高水稻生产田间管理自动化程度的关键。为避免田间管理机械碾压水稻行,本文融合机器视觉和 2D 激光雷达信息识别水稻行,并进行水稻行跟踪导航控制。首先分别利用机器视觉和激光雷达提取水稻行中心点,并统一空间坐标和目标区域,再采用稳健回归算法拟合水稻行中心线,获取导航基准线并计算出导航参数。然后设计了预瞄追踪 PID 控制器,最后搭建了水稻行跟踪导航试验平台并进行试验研究。试验结果表明,跟踪模拟水稻行的曲线导航试验标准差为 27.51 mm;跟踪机械移载的水稻行导航试验横向偏差标准差为 43.03 mm,航向偏差标准差为 3.38°。

关键词:水稻行;融合识别;跟踪导航;机器视觉;激光雷达

中图分类号:S24;S237　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2022)03-0018-09　　**OSID**:

Rice Row Recognition and Navigation Control Based on Multi-sensor Fusion

HE Jing[1,2]　HE Jie[1,2]　LUO Xiwen[1,2]　LI Weicong[1,2]　MAN Zhongxian[1,2]　FENG Dawen[1,2]

(1. *Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment*, *Ministry of Education*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *Guangdong Provincial Key Laboratory for Agricultural Artificial Intelligence*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: Automatic mechanical tracking of rice rows is the key to increase the automation of field management in rice production. In order to avoid field management machinery rolling rice rows, machine vision and 2D LiDAR information were integrated to identify rice rows and perform navigation control of rice row tracking. Firstly, the rice row centroids were extracted from machine vision and LiDAR respectively, and the spatial coordinates and target areas were unified, and then a robust regression algorithm was used to fit the rice row centroids to obtain the navigation baseline and calculate the navigation parameters. Then a pre-sight tracking PID controller was designed. Finally, a rice row tracking and navigation test platform was built and experimental studies were conducted. The test results showed that the standard deviation of curve navigation test tracking simulated rice rows was 27.51 mm; the standard variance of lateral deviation of rice rows navigation test tracking mechanical shift was 43.03 mm and the standard variance of heading deviation was 3.38°.

Key words: rice row; fusion recognition; tracking navigation; machine vision; LiDAR

0　引言

近年来,水稻生产机械现代化新技术发展快速,自动导航农业机械已经应用于水稻生产耕、种、管、收的各个环节中[1-2],如无人驾驶拖拉机、无人驾驶插秧机和无人驾驶联合收获机等。然而,水稻生产工序多,劳动强度大,田间管理机械化水平不高。水稻追肥和病虫害防治的主要作业机械是高地隙喷雾机,作业时驾驶人员需集中精力避免轮胎碾压水稻行;水稻机械除草机作业时需避免轮胎碾压水稻,同时还需保证除草机具不损伤水稻[3-4]。目前,虽然全球卫星定位系统(Global navigation satellite

收稿日期:2021-11-15　修回日期:2021-12-22
基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2019B020224001)和国家自然科学基金项目(32071913)
作者简介:贺静(1985—),女,博士生,主要从事农业机械导航研究,E-mail:hejing_1127@stu.scau.edu.cn
通信作者:何杰(1985—),男,实验师,博士,主要从事农业机械导航研究,E-mail:hooget@scau.edu.cn

system，GNSS）导航技术可实现高地隙喷雾机和插秧机等水田作业机械自动导航作业[5-6]，但其作业跟踪导航的路径规划并未考虑对水稻行的碾压问题。此外，采用无人驾驶直播机或插秧机作业时，由于侧滑和偏移等导致移栽的水稻行与规划路径有偏差。因此，识别水稻行并自动跟踪水稻行是实现水稻生产田间管理机械自动作业的关键。

机器视觉和激光雷达是常用的作物行识别技术，科研工作者开展了大量研究[7-14]。但是，传感器都有一定的局限性，仅搭载单一传感器的移动平台在未知环境中定位精度差、信息获取不完整。农业生产是非结构化环境[15]，采用多传感器融合的导航技术是实现复杂环境下作物行识别的最佳方案。BENET 等[16]融合机器视觉、激光雷达和惯性测量单元（Inertial measurement unit，IMU）数据进行果树行识别与直线拟合，以实现自动跟踪果树行，试验结果表明，该融合方法具有较好的鲁棒性，可稳定实现果树行跟踪导航，但是通过识别拟合的路径和跟踪导航实际路径之间的偏差受车速和土壤结构的影响，作业平均横向误差在 0.1 ~ 0.4 m 之间。薛金林等[17]提出了一种基于机器视觉与激光雷达信息融合的农业车辆前方障碍物检测方法，试验结果表明，该方法能有效地剔除非障碍物的干扰，完整地检测出障碍物，但检测精度未见报道，且未考虑车体姿态的变化，算法难以在农田中应用。罗晨晖[18]以喷雾机为试验平台，提出机器视觉、2D 激光雷达和 GPS 信息融合的作物行识别方法，基于改进的 A* 算法进行路径规划，并进行了离线仿真试验，但田间试验未见报道。

我国南方水田环境复杂，虽然研究人员采用不同的算法感知环境信息，但研究结果因环境、作物生长状态以及选用的传感器和算法不同而差异很大[19-20]。为此，本文在 GNSS 导航技术的基础上，提出机器视觉和激光雷达融合的水稻行识别方法，并进行水稻行跟踪导航控制，避免水稻生产田间管理机械作业时碾压水稻，达到提高水稻田间管理智能化水平、实现水稻全程无人化生产的目的。

1　机器视觉和激光雷达的坐标融合

坐标融合示意图如图 1 所示，涉及像素坐标系 $O_{uv}UV$、相机坐标系 $O_CX_CY_CZ_C$、激光极坐标系 $O_{\rho\theta}\rho\theta$、激光坐标系 $O_lX_lY_lZ_l$、车体坐标系 $O_VX_VY_VZ_V$ 和参考地面坐标系 $O_WX_WY_WZ_W$ 共 6 个坐标系。其中，相机坐标系和车体坐标系的原点在地面的投影重合，X_W 和 Y_W 通过 WGS-84 地心坐标系经高斯-克吕格投影转换后获取，Z_W 为高程信息（获取的高程信息均减去了安装高度）。

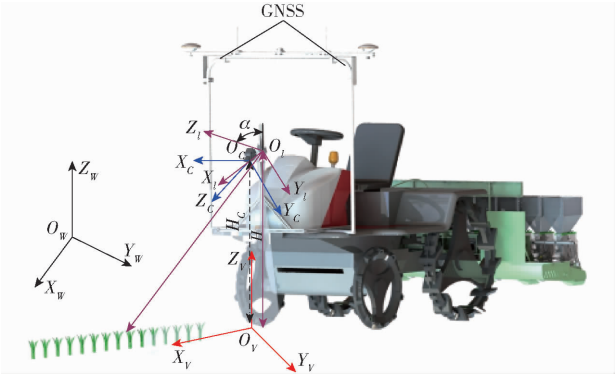


图 1　多传感器空间融合

Fig. 1　Multi-sensors spatio information fusion

1.1　激光极坐标系转车体坐标系

任意激光扫描点 $P(\rho,\theta)$（ρ 为激光雷达光束所测到的距离，θ 为激光雷达扫描角）转换到激光坐标系为 $\boldsymbol{P}_l=[\rho\cos\theta \quad \rho\sin\theta \quad 0]^{\mathrm{T}}$，车体坐标系下为点 $\boldsymbol{P}_V=[X_V \quad Y_V \quad Z_V]^{\mathrm{T}}$，设激光坐标系原点 O_l 投影在车体坐标系下的点为 O'_l，O_V 为车体坐标系原点，则

$$\boldsymbol{P}_V=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&\cos\varphi&\sin\varphi\\0&-\sin\varphi&\cos\varphi\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos(-\alpha)&0&-\sin(-\alpha)\\0&1&0\\\sin(-\alpha)&0&\cos(-\alpha)\end{bmatrix}\boldsymbol{P}_l+\begin{bmatrix}d_{x23}\\d_{y23}\\H_l\end{bmatrix}\tag{1}$$

式中　d_{x23}、d_{y23}——O'_l 和 O_V 在 X_V 轴和 Y_V 轴方向的安装间距，mm

α——激光雷达与垂直线（Z_V 轴）的夹角，（°）

φ——激光雷达与左右方向水平线（Y_V 轴）的夹角，（°）

H_l——激光雷达安装高度

1.2　像素坐标系转车体坐标系

水稻行图像中预瞄点 $\boldsymbol{P}_l=[U \quad V]^{\mathrm{T}}$（$U$ 为该像素点对应的列数，V 为对应的行数）对应相机坐标系下的某点 $\boldsymbol{P}_C=[X_C \quad Y_C \quad Z_C]^{\mathrm{T}}$，即通过坐标的三维旋转和平移，实现相机坐标系下的点 $\boldsymbol{P}_C=[X_C \quad Y_C \quad Z_C]^{\mathrm{T}}$ 对应在车体坐标系下的点 $\boldsymbol{P}_V=[X_V \quad Y_V \quad Z_V]^{\mathrm{T}}$ 的转换，转换公式为

$$\begin{bmatrix}U\\V\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}f_{c1}&0&c_{c1}\\0&f_{c2}&c_{c2}\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dfrac{X_C}{Z_C}\\\dfrac{Y_C}{Z_C}\\1\end{bmatrix}\tag{2}$$

式中　f_{c1}、f_{c2}、c_{c1}、c_{c2}——相机内部参数

$$\begin{cases} X_V = \dfrac{H_C f_{c2}\cos\gamma - (V - c_{c2})H_C\sin\gamma + Z_V(V\sin\gamma - f_{c2}\cos\gamma - c_{c2}\sin\gamma)}{(V - c_{c2})\cos\gamma + f_{c2}\sin\gamma} \\ Y_V = -\dfrac{(U - c_{c1})(X_V\cos\gamma - \sin\gamma Z_V + H_C\sin\gamma)}{f_{c1}} \end{cases} \tag{3}$$

式中 H_C——相机安装高度，mm

γ——相机与前进方向水平线（X_V 轴）的夹角，(°)

Z_V——图像中对象的高度，mm

对二维图像中某点的像素值，无法提供深度信息 Z_V，即不能准确地推算与它对应的三维空间坐标。但是，同一处理时刻，机器视觉和激光雷达识别的对象相同，因此图像二维像素转三维坐标时，缺少的高度信息可通过激光雷达获取。

1.3 车体坐标系转大地坐标系

航向姿态参考系统（Attitude and heading reference system，AHRS）安装在车体上，以准确获取车体的横滚角（α_x）和俯仰角（α_y），双天线 GNSS 提供航向角（α_z），由全局翻滚-俯仰-航向矩阵

$$^{w}\boldsymbol{R}_V = \boldsymbol{R}_Z^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_Y^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_X^{\mathrm{T}} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha_y\cos\alpha_z & -\cos\alpha_x\sin\alpha_z + \cos\alpha_z\sin\alpha_x\sin\alpha_y & \sin\alpha_x\sin\alpha_z + \cos\alpha_x\cos\alpha_z\sin\alpha_y \\ \cos\alpha_y\sin\alpha_z & \cos\alpha_x\cos\alpha_z + \sin\alpha_x\sin\alpha_y\sin\alpha_z & -\sin\alpha_x\cos\alpha_z + \cos\alpha_x\sin\alpha_y\sin\alpha_z \\ -\sin\alpha_y & \cos\alpha_y\sin\alpha_x & \cos\alpha_x\cos\alpha_y \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 $\boldsymbol{R}_X$——绕 X 轴旋转矩阵

$\boldsymbol{R}_Y$——绕 Y 轴旋转矩阵

$\boldsymbol{R}_Z$——绕 Z 轴旋转矩阵

可知从车体坐标系转至大地坐标的综合旋转矩阵 $^{w}\boldsymbol{R}_V$。设车体坐标系原点 O_V 对应在大地坐标系下为点 O_{W_V}，O_{W_G} 为 GNSS 定位的当前车体位置，O_G 为车体坐标系下 GNSS 主天线对应的安装位置，可由车体的几何关系获得，则 O_{W_V} 和 O_{W_G} 的对应关系为

$$O_{W_V} = O_{W_G} + {}^{w}\boldsymbol{R}_V(O_V - O_G) \tag{5}$$

车体坐标系下某点 $\boldsymbol{P}_V = [X_V \quad Y_V \quad Z_V]^{\mathrm{T}}$ 转换到大地坐标系下 $\boldsymbol{P}_W = [X_W \quad Y_W \quad Z_W]^{\mathrm{T}}$ 计算式为

$$\begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} = {}^{w}\boldsymbol{R}_V \begin{bmatrix} X_V \\ Y_V \\ Z_V \end{bmatrix} + O_{W_V} \tag{6}$$

2 水稻行识别

2.1 水稻行中心点提取

2.1.1 目标区域选取

选取数据处理的目标区域旨在减少噪声干扰的同时加快运行速度。对采集的图像和激光数据进行目标区域的选择，并统一目标区域。设水稻行行距为变量 L_{space}，参照车体前进方向，车体坐标系的原点 O_V 在车体中轴线的右侧，距离为 d_{o_vax}，为保证目标区域内车体中轴线左右两侧均有水稻行信息，设定在车体坐标系下左右方向的目标区域为：$Y_v \in [-L_{space}, L_{space} + 2d_{o_vax}]$。设采集图像的高度为 I_h，宽度为 I_w，则由式（2）、（3）可知，图像底部的中心点 $\left(\dfrac{I_w}{2}, I_h\right)$ 对应在车体坐标系下 X_V 轴方向的距离 $L_{X-\min}$。另一方面，由三角关系可知，激光雷达的前视距离 $L_{X-\max} = H_l\tan(90 - \alpha)$，因此设定识别系统的目标区域为 $X_v \in [L_{X-\min}, L_{X-\max}]$。

2.1.2 目标区域内水稻行中心点提取

（1）水稻行图像中心点提取

图像中心点提取处理流程如图 2 所示，其中，目标区域的预处理操作包括超绿特征算法灰度化[21]、自动阈值二值化[22]和中值滤波去噪[23]。考虑一定区域内的水稻生长基本一致，若启动跟踪系统后无水稻生长时期分类信息，则利用最小错误率的贝叶斯决策进行生长时期判断[24]，并保存判断结果，同时根据生长时期判断结果进行行信息增强处理；若已知采集环境水稻行的分类信息，则直接进行行信息增强处理。

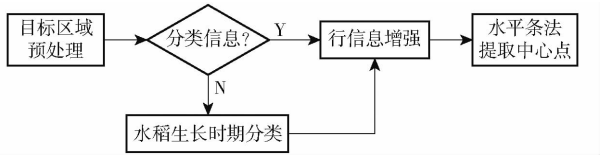


图 2 视觉传感器水稻行中心点提取流程图

Fig. 2 Flow chart of rice row center point extraction by vision sensor

（2）目标区域范围内 2D 激光雷达中心点提取

激光雷达提取水稻行中心点的流程如图 3 所示。锐利的边缘和反射表面会导致激光雷达光束错位，并产生粗差点[25]（图 4a）。为了剔除粗差点干扰，选用拉依达准则（3σ 准则）进行查找判断[26]，剔除粗差点干扰（图 4b）。

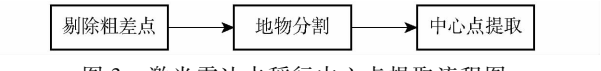
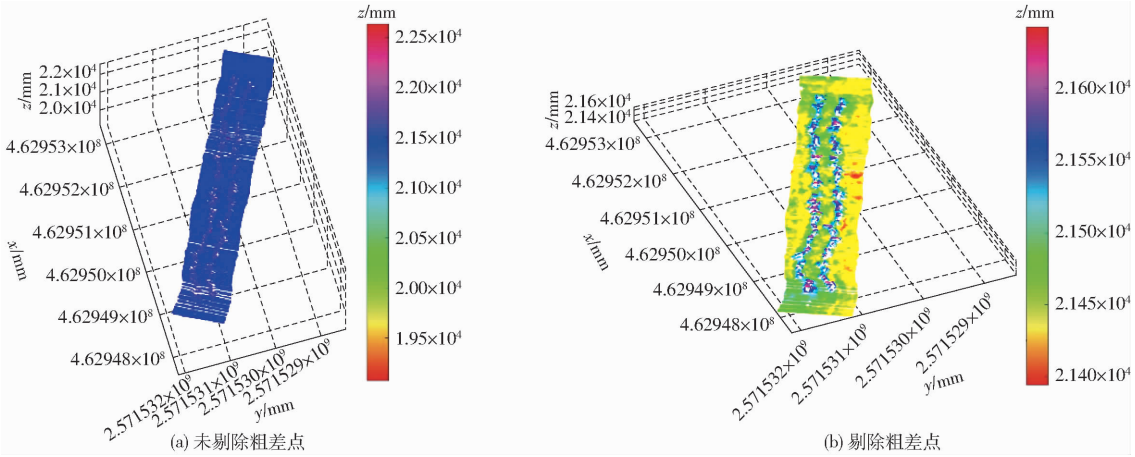


图 3 激光雷达水稻行中心点提取流程图

Fig. 3 Flow chart of extracting center point of rice row by LiDAR

拟合平面法是常用的行地物分割方法[27-29]，但存在地面点需人工选择且高度差阈值的设定无依据，以及粗差点影响大等问题。剔除粗差点后的点云数据可反映真实的田面状况，但各数据点在高度方向的差异受地形等各种因素的影响，设定一个固定阈值难以准确实现地物分割。为此，提出基于



(a) 未剔除粗差点　　(b) 剔除粗差点

图 4　粗差点噪声剔除前后对比

Fig. 4　Comparison before and after outlier noise elimination

AHRS 横滚信息动态设定高度差阈值，对每帧数据独立进行地物分割。

如图 5 所示，由于水田硬底层不平，车体姿态变化频繁，利用式(6)的校正模型对车体姿态进行校正，以消除车体姿态变化影响。通过三角函数关系，可计算出第 i 帧激光扫描线与车体位置的距离为 $L_{_X}=H_l\tan\beta$，其中 $\beta=90°-\alpha$。同一帧激光在路面不平的情况下，地面点云与其均值的最大高度落差 $Z_{cha}(i)=L_{_Y}\tan\alpha_{x1}$，其中 $L_{_Y}=\left|\tan\theta\dfrac{H_l}{\cos\beta}\right|$，$\alpha_{x1}$ 为激光扫描位置的横滚角，车体当前测量的横滚角位置与其有一定距离。一般情况下，距离激光扫描线位置越近的激光帧对应的横滚角与 α_{x1} 的误差越小，因此选用指数平滑模型进行数据预测[30]。平滑模型为

$$\alpha_{x1}=k_a\alpha_x(i)+k_a(1-k_a)\alpha_x(i-1)+\cdots+k_a(1-k_a)^9\alpha_x(i-9) \tag{7}$$

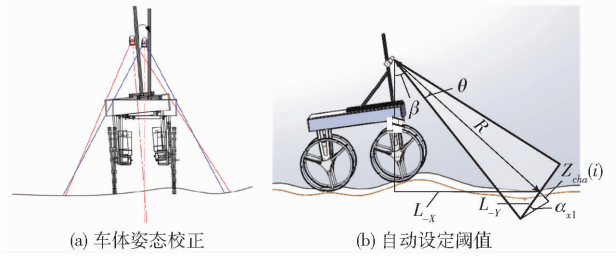
式中　k_a——平滑系数，$0<k_a<1$，考虑数据波较大设定 $k_a=0.5$

考虑地面点云中可能存在低矮杂草的干扰点，设定阈值 $Z_T(i)$ 为

$$Z_T(i)=\mathrm{mean}(Z_w(i,:))+30+Z_{cha}(i) \tag{8}$$

式中　Z_w——激光扫描点 P 的垂直方向的高度

若 $Z_w>Z_T(i)$，则该点为非地面点；若 $Z_w\leqslant Z_T(i)$，则该点为地面点。在低矮杂草的环境下进行地物分割的结果如图 6 所示。



(a) 车体姿态校正　　(b) 自动设定阈值

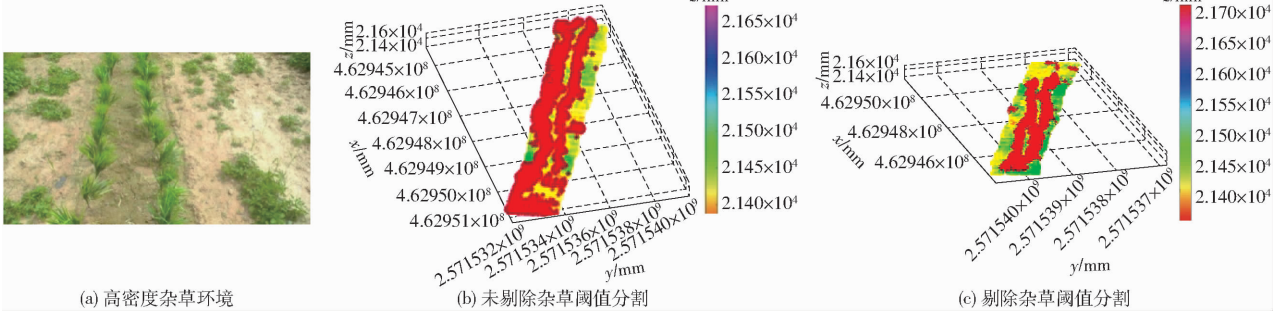
图 5　自动阈值设定示意图

Fig. 5　Schematics of automatic threshold setting

同一激光帧下，不同对象对应大地坐标系的位置存在差异，根据这一特点对各帧激光的非地面点云数据进行分类，不同类别的阈值 T_{lidar} 为不同类别水稻行对应激光扫描线的最小间距差，其中 0.352 9 为激光雷达的角度分辨率，$w_l\in[0,1]$ 为比例系数，设定 $w_l=0.75$，则

$$T_{lidar}=\frac{L_{space}w_l}{L_{_Y}}\frac{\theta}{0.352\,9}=\frac{0.75L_{space}}{\left|\tan\theta\dfrac{H_l}{\cos\beta}\right|}\frac{\theta}{0.352\,9} \tag{9}$$

不同采集环境下，机器视觉和激光雷达在同一识别区域识别的中心点数据如图 7 所示，其中红色点为机器视觉识别的结果，蓝色点为激光雷



(a) 高密度杂草环境　　(b) 未剔除杂草阈值分割　　(c) 剔除杂草阈值分割

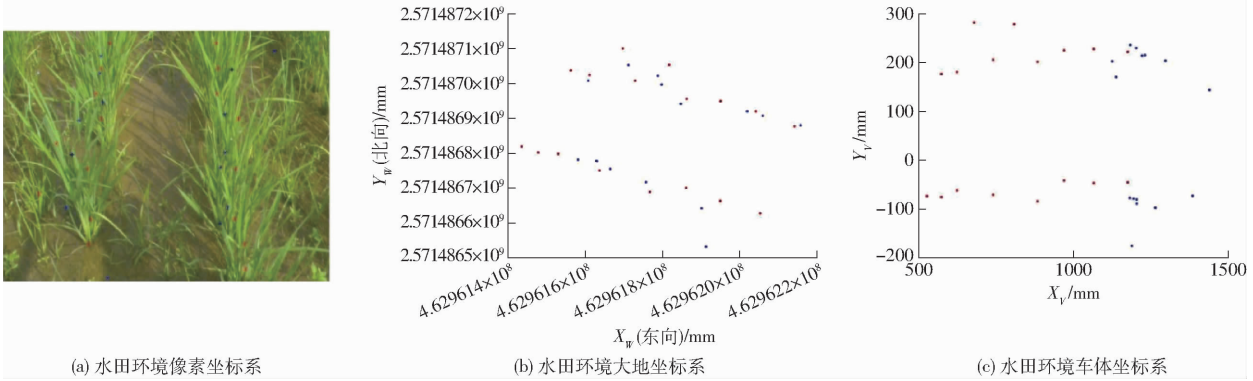
图 6　杂草环境下的阈值分割

Fig. 6　Threshold segmentation in weed environment

达识别的结果。结果表明,机器视觉和激光雷达在不同环境下均能准确提取水稻行中心点。

2.2 中心点聚类拟合水稻行中心线

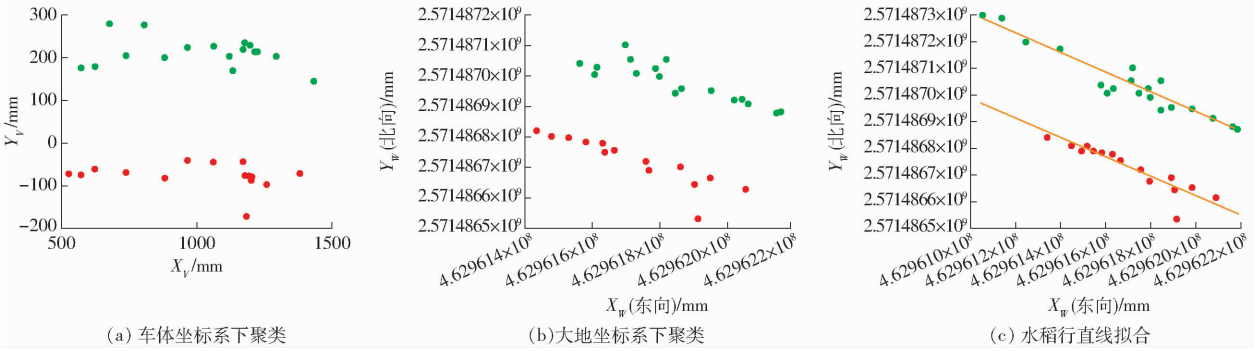
各中心点在两个坐标系下的 *XOY* 平面投影图如图 7 所示,结果显示大地坐标系和车体坐标系下均分类明显,但是大地坐标系下的数据相较于车体坐标系计算量大。因此,在车体坐标系下利用 K-means 方法聚类中心点[31],依据大地坐标系和车体坐标系下数据存储时的关系,实现大地坐标系下的数据分类,最后利用稳健回归法拟合水稻行线[32],结果如图 8(图中红色点为机器视觉识别结果,绿色点为激光雷达识别结果)所示。



(a) 水田环境像素坐标系 (b) 水田环境大地坐标系 (c) 水田环境车体坐标系

图 7 不同坐标系下的水稻行中心点

Fig. 7 Rice row center point in different coordinate systems



(a) 车体坐标系下聚类 (b)大地坐标系下聚类 (c) 水稻行直线拟合

图 8 水田环境下的水稻行识别

Fig. 8 Rice row recognition in paddy field environment

3 水稻行跟踪导航信息提取与控制

3.1 水稻行跟踪导航信息提取

设大地坐标系下拟合的水稻行线的斜率和截距分别为 k_{line} 和 b_{line},$a = \text{mean}(k_{line})$,$b = \text{mean}(b_{line})$,则导航基准线方程为:$y_{navi} = ax + b$。

为确保农机沿水稻行行走,需求解车体和导航基准线的横向偏差和航向偏差[33],农机与导航基准线的横向偏差 ε 和航向偏差 δ 的关系如图 9 所示。

航向偏差定义为:车体航向角 β_s 和带有车头信息的导航基准线的方向角 $\beta_{lextend}$ 之间的夹角 δ[34],计算式为

$$\delta = \begin{cases} \beta_{lextend} - \beta_s + 2\pi & (\beta_{lextend} - \beta_s < -\pi) \\ \beta_{lextend} - \beta_s - 2\pi & (\beta_{lextend} - \beta_s > \pi) \\ \beta_{lextend} - \beta_s & (-\pi \leqslant \beta_{lextend} - \beta \leqslant \pi) \end{cases} \tag{10}$$

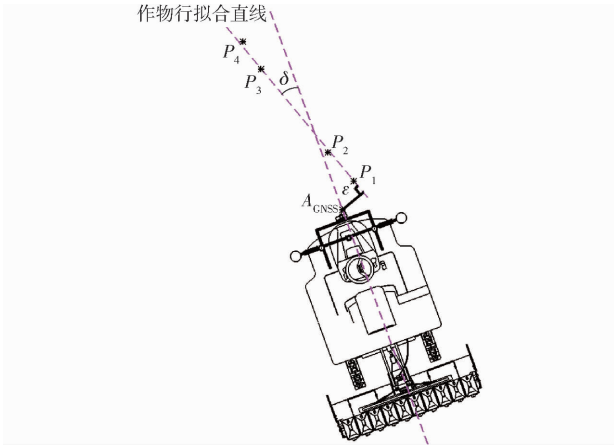


图 9 航向偏差和横向偏差示意图

Fig. 9 Schematic of heading deviation and lateral deviation

横向偏差定义为点 $A_{GNSS} = (X_{wa}, Y_{wa})$ 到导航基准线的垂直距离 ε,计算式为

$$\varepsilon = \frac{|aX_{wa} - Y_{wa} + b|}{\sqrt{a^2 + 1}} \tag{11}$$

横向偏差根据向量叉乘积的正负判定方向。若车头方向相对导航线偏左，$\varepsilon = -\varepsilon$；若车头方向相对导航线偏右，则 $\varepsilon = \varepsilon$。

3.2　基于预瞄追踪的 PID 水稻行跟踪导航控制

以一定前视距离在路径上选取一点作为跟踪目标点进行导航控制具有良好的上线性能[35]，在大地坐标系 $O_wX_wY_wZ_w$ 中前视距离跟踪原理如图 10 所示。设路径跟踪前视距离为 d_p，试验平台融合系统的中心为 O；P 为前视距离为 d_p 时在导航基准线上的目标点，相对预瞄追踪线的航向偏差为 δ'，则基于航向偏差轮角决策量为

$$\delta' = \frac{\pi}{2} + \delta - \arccos\frac{\varepsilon}{d_p} \tag{12}$$

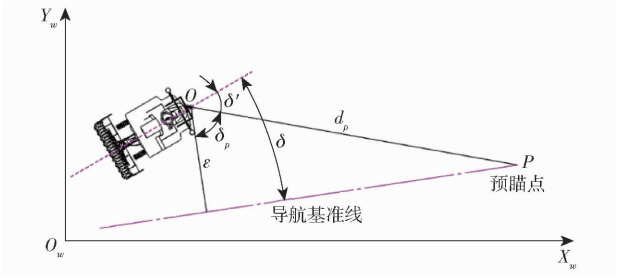


图 10　前视距离跟踪示意图

Fig. 10　Schematic of tracking model

为满足系统的快速响应和稳定控制转向要求，在预瞄追踪的基础上，采用 PID（Proportional integral differential）算法决策前轮转向轮角。

横向偏差轮角 PID 决策量 $\theta_{\varepsilon pid}$ 为

$$\theta_{\varepsilon pid} = K_{\varepsilon p}\varepsilon(k) + K_{\varepsilon i}T_\varepsilon\sum\varepsilon(k) + K_{\varepsilon d}\frac{\varepsilon(k)-\varepsilon(k-1)}{T_\varepsilon} \tag{13}$$

式中　$K_{\varepsilon p}$、$K_{\varepsilon i}$、$K_{\varepsilon d}$——横向偏差轮角 PID 控制参数

$\varepsilon(k)$、$\varepsilon(k-1)$——第 k 和第 $k-1$ 时刻所得到的横向偏差

T_ε——横向偏差获取周期

预瞄追踪航向偏差轮角 PID 决策量 $\theta_{\delta' pid}$ 为

$$\theta_{\delta' pid} = K_{\delta' p}\delta'(k) + K_{\delta' i}T_{\delta'}\sum\delta'(k) + K_{\delta' d}\frac{\delta'(k)-\delta'(k-1)}{T_{\delta'}} \tag{14}$$

式中　$K_{\delta' p}$、$K_{\delta' i}$、$K_{\delta' d}$——预瞄追踪航向偏差轮角 PID 控制参数

$\delta'(k)$、$\delta'(k-1)$——第 k 和第 $k-1$ 时刻所得到的预瞄追踪航向偏差

$T_{\delta'}$——预瞄追踪航向偏差获取周期

则转向角 PID 决策量 θ_{pid} 为

$$\theta_{pid} = \theta_{\varepsilon pid} + \theta_{\delta' pid} \tag{15}$$

4　试验与分析

4.1　试验硬件平台

以乘坐式水稻插秧机的机头为平台设计了试验平台，如图 11 所示，主要包括：上海世达尔水稻精量穴直播机以及配套机头（洋马 VP6G）、荷兰 XSENS 公司的 MTI－300 型 AHRS、HOKUYO 公司的 URG－04LX 型 2D 激光雷达、BASLER 公司的 Aviator 1990－50gc 面阵相机（分辨率为 1 920 像素 ×1 080 像素），BEI 公司的 DUNCAN9360 型连杆式轮角传感器。其中相机的安装高度 $H_C = 1\,115$ mm，安装角 $\gamma = 36.9°$（利用 Matlab R2019b 自带工具 Camera Calibrator 进行相机标定获取），$f_{c1} = 1\,508.7$，$f_{c2} = 1\,554.4$，$c_{c1} = 944.1$，$c_{c2} = 531$。激光雷达安装高度 $H_l = 1\,220$ mm，安装角 $\alpha = 35.5°$，$\varphi = 1.744°$。预瞄追踪 PID 的主要控制参数为：$K_{\delta' p} = 1$，$K_{\delta' i} = 0.2$，$K_{\delta' d} = 1$，$K_{\varepsilon p} = 1$，$K_{\varepsilon i} = 0.2$，$K_{\varepsilon d} = 1$。

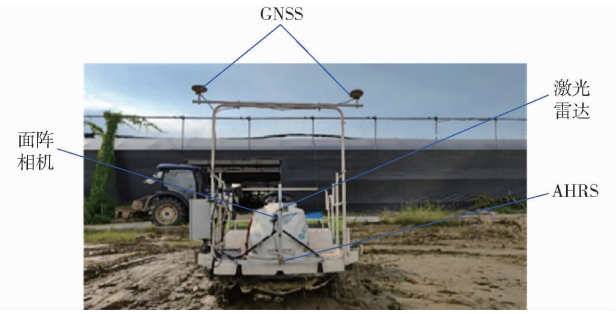


图 11　硬件平台

Fig. 11　Hardware platform

采用 LabVIEW 设计水稻行跟踪导航系统，并通过 CAN 总线将横向偏差和航向偏差等信息发给 GNSS 导航系统，GNSS 导航系统将导航控制指令发送到底盘线控系统，实现水田作业平台自动导航控制，如图 12 所示。GNSS 导航系统为潍柴雷沃重工股份有限公司的 AG1BD－2.5GD 型，多传感器融合的导航系统采集 AHRS、GNSS、面阵相机和激光雷达的频率均为 10 Hz，通过 CAN 总线向 GNSS 导航系统发送横向偏差和航向偏差等信息的频率为 10 Hz。

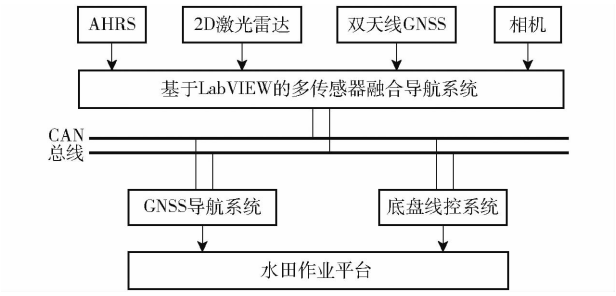


图 12　试验平台系统框图

Fig. 12　System diagram of test platform

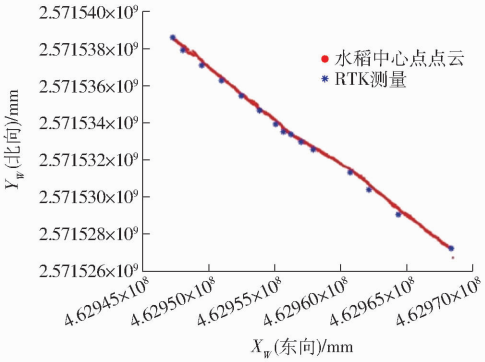
4.2 模拟水稻行曲线跟踪导航

为了验证多传感器融合的水稻行跟踪导航系统的性能,在华南农业大学增城试验基地的水田中插放仿真秧苗进行验证试验。如图 13a 所示,仿真水稻插放在水田中,水稻株间距为 150 mm,水稻最大弯曲度处的水稻偏移直线位置 400 mm。试验过程中人工驾驶直播机至仿真水稻行起点位置,设置车体速度为 1 m/s,转向控制的最大角速度约为 0.448 rad/s,利用无线终端启动导航系统,导航结束后导出跟踪导航试验数据。

图 13b 为提取试验过程中机器视觉和激光雷达识别的水稻行中心点的大地坐标系数据在 *XOY* 平面的投影图,其中蓝色点为人工手持华测公司的 I70 型 RTK - DGPS 测量的水稻行位置,RTK 平面精度为 $\pm(8+1\times10-6D)$ mm,D 为距离。结果表明,实时处理过程中提取的水稻行中心点数据真实地反映了水稻行信息。



(a) 试验现场



(b) 中心点提取

图 13 模拟水稻行跟踪导航试验

Fig. 13 Simulated rice row tracking and navigation experiment

试验过程中人工手持 RTK 测量记录的水稻行曲线即为跟踪导航的目标路径,水稻行跟踪试验结束后,将试验平台车体中轴线的 GNSS 定位数据作为试验平台实际行走轨迹,与目标路径上的位置点进行比较,分析水稻行曲线跟踪误差。跟踪误差计算方法为:查找行走轨迹中与目标路径位置点距离最近的点,采用欧氏距离计算两点的距离,该距离即为跟踪误差。

试验平台行走轨迹和目标路径的误差分析结果如图 14 所示,结果表明,基于机器视觉和激光雷达的跟踪导航系统实现了水稻行跟踪导航,系统的标准偏差为 27.51 mm,最小误差为 1.73 mm,但是最大误差(92.45 mm)较大,可能是由于水田硬底层不平引起了车体侧滑。

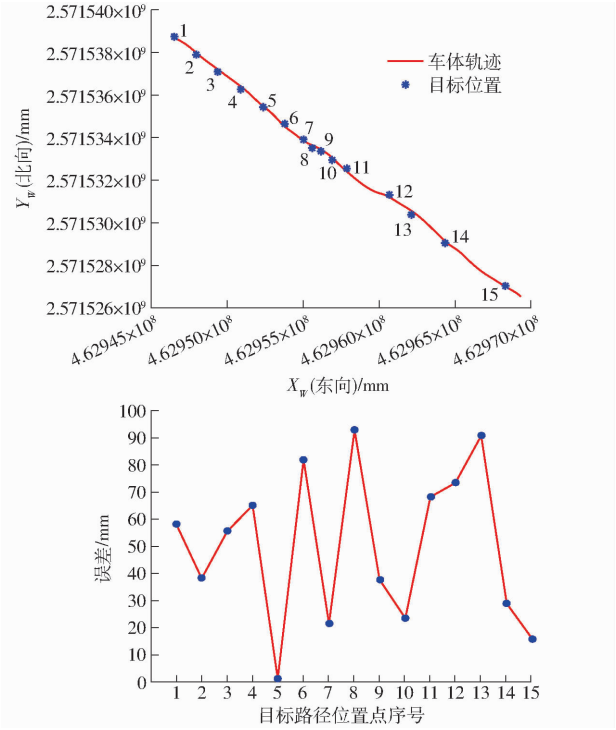


图 14 水稻行曲线跟踪误差

Fig. 14 Error of rice row curve tracking

4.3 机械移栽水稻行跟踪导航田间试验

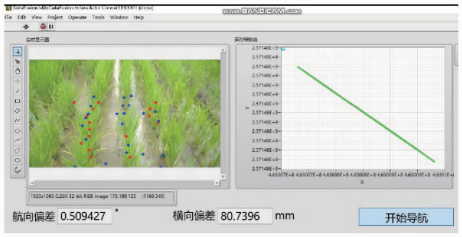
田间试验环境为华南农业大学增城试验基地试验田,试验田采用插秧机移栽秧苗,2021 年 8 月 10 日移栽,水稻行行距为 L_{space} = 300 mm。田间试验环境和人机交互界面如图 15 所示,进行水稻行跟踪导航试验。

试验过程:打开水稻行跟踪导航系统的人机交互界面点击开始导航按钮,同时开启录屏软件。发送导航指令,直播机由 GNSS 导航系统控制行驶至水稻行附近。启动水稻行跟踪导航系统获取水稻行信息后,系统从 GNSS 导航控制切换为水稻行跟踪导航系统提供横向偏差和航向偏差控制试验平台行走,到达行末时启用无线端发送指令停车,导航结束导出导航过程试验数据。

人工手持华测 I70 型 RTK - DGPS 测量记录水稻行位置作为目标路径的位置点,车体中轴线的 GNSS 定位数据作为车体路径,实际车体路径和目标路径的位置点如图 16 所示,结果表明,由于硬底层不平和水稻行种植不均,车体路径有小幅度的偏差,但基本在两行水稻中间。



(a) 田间试验



(b) 田间试验人机交互界面

图 15　田间试验环境和交互界面

Fig. 15　Field experiment environment and human – computer interaction interface

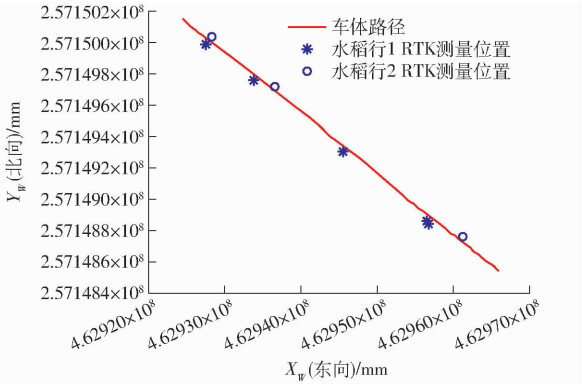


图 16　水稻行跟踪试验的试验平台轨迹

Fig. 16　Rice navigation driving track in field trials

水稻行跟踪导航系统的横向偏差和航向偏差如图 17 所示，其中最小横向偏差为 0.03 mm，最大横向偏差为 143.1 mm，横向偏差标准差为 43.03 mm；最小航向偏差为 0.002°，最大航向偏差为 17.32°，航向偏差标准差为 3.38°。结果表明：水稻行跟踪导航系统能准确控制试验平台跟踪水稻行行走。

5　结论

(1)定义了机器视觉和激光雷达识别的坐标系统，并推导了各个坐标系的相互转换关系，以实现机器视觉和激光雷达识别的水稻行中心点的空间坐标统一。

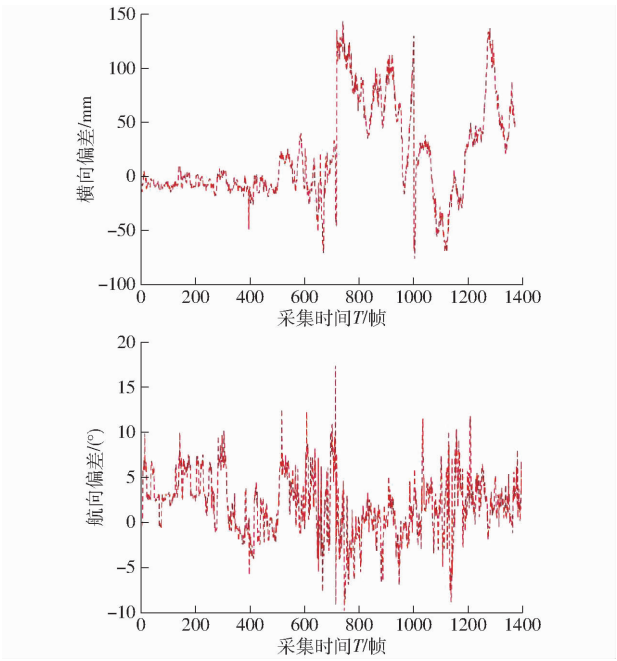


图 17　田间试验偏差

Fig. 17　Deviations of field trial

(2)针对水田硬底层高低不平的特点，激光雷达提取水稻行中心时，提出了根据车体姿态信息动态设定分割阈值，试验结果表明在凹凸不平的路面环境下，该方法也能较好地实现地物分割。提出了在车体坐标系下利用 K-means 算法聚类中心点，聚类结果对应在大地坐标系下拟合直线，有效降低了运算量，提高了系统运行速度。

(3)水稻行跟踪导航试验结果表明，基于机器视觉和激光雷达的水稻行跟踪导航能快速识别水稻行，并实现水稻行跟踪导航，模拟水稻行曲线跟踪试验标准偏差为 27.51 mm；在水田跟踪机械移载水稻行的横向偏差标准差为 43.03 mm，航向偏差标准差为 3.38°。但在硬底层高低不平的水田中会出现跟踪目标水稻行改变现象，主要是车体姿态变换引起的识别区域改变而引起导航路径发生改变。

参　考　文　献

[1]　周俊，何永强. 农业机械导航路径规划研究进展[J]. 农业机械学报，2021，52(9)：1－14.
ZHOU Jun, HE Yongqiang. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 1－14. (in Chinese)

[2]　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 Yuhan, 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)

[3]　今井淳容. 除草用ブラシローラ及び水田除草方法：5400715[P]. 2012－01－19.

[4]　株式会社オーレック(福岡県). 水田除草作業機：6000050[P]. 2014－05－01.

[5] 刘兆朋,张志刚,罗锡文,等. 雷沃 ZP950 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1):15 - 21.
LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(1):15 - 21. (in Chinese)
[6] 何杰,朱金光,张智刚,等.水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(3):17 - 24.
HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):17 - 24. (in Chinese)
[7] 袁佐云. 基于计算机视觉的作物行中心线识别研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
YUAN Zuoyun. Study on recognizing of crop row centre line with computer vision[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
[8] JI R, QI L. Crop-row detection algorithm based on random Hough transformation[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 54(3 - 4): 1016 - 1020.
[9] BAKKER T, ASSELTK V, BONTSEMA J, et al. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(4):357 - 368.
[10] JIANG G Q, WANG Z H, LIU H M. Automatic detection of crop rows based on multi-ROIs[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(5):2429 - 2441.
[11] ZHANG X, LI X, ZHANG B, et al. Automated robust crop-row detection in maize fields based on position clustering algorithm and shortest path method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154(3 - 4):165 - 175.
[12] PENG Y, QU D, ZHONG Y, et al. The obstacle detection and obstacle avoidance algorithm based on 2-D LiDAR[C]// IEEE International Conference on Information & Automation. IEEE, 2015.
[13] CHATEAU T, DEBAIN C, COLLANGE F, et al. Automatic guidance of agricultural vehicles using a laser sensor[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2000, 28(3):243 - 257.
[14] HIREMATH S A, VAN DER HEIJDEN G W A M, VAN EVERT F K, et al. Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100:41 - 50.
[15] 李建平,林妙玲.自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J].农业工程学报,2006,22(9):232 - 236.
LI Jianping, LIN Miaoling. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(9):232 - 236. (in Chinese)
[16] BENET B, LENAIN R, ROUSSEAU V. Development of a sensor fusion method for crop row tracking operations[J]. Advances in Animal Biosciences, 2017, 8(2):583 - 589.
[17] 薛金林, 董淑娴, 范博文. 基于信息融合的农业自主车辆障碍物检测方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊):29 - 34.
XUE Jinlin, DONG Shuxian, FAN Bowen. Detection of obstacles based on information fusion for autonomous agricultural vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):29 - 34. (in Chinese)
[18] 罗晨晖. 多信息特征融合的作物行识别与路径规划研究[D]. 镇江:江苏大学, 2020.
LUO Chenhui. Research on crop row recognition and path planning based on multi-information fusion[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)
[19] ZHANG Q, CHEN M E S, LI B. A visual navigation algorithm for paddy field weeding robot based on image understanding [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2017, 143:66 - 78.
[20] CHOI K H, HAN S K, HAN S H, et al. Morphology-based guidance line extraction for an autonomous weeding robot in paddy fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 113:266 - 274.
[21] 宋宇, 刘永博, 刘路,等. 基于机器视觉的玉米根茎导航基准线提取方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2):38 - 44.
SONG Yu, LIU Yongbo, LIU Lu, et al. Extraction method of navigation baseline of corn roots based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):38 - 44. (in Chinese)
[22] 张铮, 王艳平, 薛桂香. 数字图像处理与机器视觉——Visual C + + 与 Matlab 实现[M]. 北京: 人民邮电出版社,2010.
[23] 黄沛琛. 基于视觉与卫星定位的履带式果园机器人的导航系统研究[D]. 广州:华南农业大学,2019.
HUANG Peichen. Research on orchard navigation system for tracked robot based on machine vision and GNSS[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[24] HE J, ZANG Y, LUO X, et al. Visual detection of rice rows based on Bayesian decision theory and robust regression least squares method[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(1):199 - 206.
[25] BALDUZZI M, DIMITRY V, STUCKENS J, et al. The properties of terrestrial laser system intensity for measuring leaf geometries: a case study with conference pear trees (*Pyrus communis*)[J]. Sensors, 2011, 11(2):1657 - 1681.
[26] 张敏, 袁辉. 拉依达(PauTa)准则与异常值剔除[J]. 郑州工业大学学报, 1997, 18(1):84 - 88.
ZHANG Min, YUAN Hui. The PauTa criterion and rejecting the abnormal value[J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 1997,18(1):84 - 88. (in Chinese)
[27] 官云兰, 刘绍堂, 周世健,等. 基于整体最小二乘的稳健点云数据平面拟合[J]. 大地测量与地球动力学,2011, 31(5):80 - 83.
GUAN Yunlan, LIU Shaotang, ZHOU Shijian, et al. Robust plane fitting of point clouds based on TLS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(5):80 - 83. (in Chinese)

(下转第 137 页)

79 – 84.
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD – DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 79 – 84. (in Chinese)
[21] 廖庆喜,杨波,李旭,等. 内充气吹式油菜精量排种器气室流场仿真与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(4): 51 – 54.
LIAO Qingxi, YANG Bo, LI Xu, et al. Simulation and experiment of inside-filling air-blow precision metering device for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 51 – 54. (in Chinese)
[22] 陆永光,胡志超,林德志,等. 基于 CFD – DEM 花生荚果管道输送过程数值模拟[J]. 中国农机化报, 2016, 37(6): 104 – 109.
LU Yongguang, HU Zhichao, LIN Dezhi, et al. Numerical simulation of peanuts particles conveying in pipeline using CFD – DEM coupled approach[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6): 104 – 109. (in Chinese)
[23] 陈洋. 花生荚果清选装置设计与仿真分析[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2020.
CHEN Yang. Design and simulation analysis of peanut pod cleaning device[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[24] 丁宁,李海涛,闫安,等. 秸秆多级连续冷辊压成型参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10): 196 – 202,290.
DING Ning, LI Haitao, YAN An, et al. Optimization and experiment on straw multi-stage continuous cold roll forming for molding parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 196 – 202, 290. (in Chinese)
[25] 陈海涛,王洪飞,王业成,等. 三叶式自动清换种大豆育种气吸排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(12): 75 – 85.
CHEN Haitao, WANG Hongfei, WANG Yecheng, et al. Design and experiment of three-leaf type air-suction seed meter with automatic clear and replace seeds features for soybean plot test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 75 – 85. (in Chinese)
[26] 王金峰,尚文虎,翁武雄,等. 圆盘顶出式水田侧深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6): 62 – 72.
WANG Jinfeng, SHANG Wenhu, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of disc ejection type paddy field side deep fertilization device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 62 – 72. (in Chinese)
[27] 戴飞,付秋峰,赵武云,等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4): 117 – 125,247.
DAI Fei, FU Qiufeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 117 – 125, 247. (in Chinese)
[28] 王晗昊,李耀明,徐立章,等. 再生稻联合收获机清选装置内部气流场分析与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(20): 84 – 92.
WANG Hanhao, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Simulation and experiment of air flow field in the cleaning device of ratooning rice combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 84 – 92. (in Chinese)

(上接第 26 页)

[28] 李必军, 方志祥, 任娟. 从激光扫描数据中进行建筑物特征提取研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(1): 65 – 70.
LI Bijun, FANG Zhixiang, REN Juan. Extraction of buliding's feature from laser scanning data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(1): 65 – 70. (in Chinese)
[29] REISER D, VÁZQUEZ-ARELLANO M, PARAFOROS D S, et al. Iterative individual plant clustering in maize with assembled 2D LiDAR data[J]. Computers in Industry, 2018, 99: 42 – 52.
[30] 黎锁平, 刘坤会. 平滑系数自适应的二次指数平滑模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(2): 94 – 99.
LI Suoping, LIU Kunhui. Quadric exponential smoothing model with adapted parameter and its applications[J]. Systems Engnieering-Theory & Practice, 2004, 24(2): 94 – 99. (in Chinese)
[31] ANIL K J. Data clustering: 50 years beyond K-means[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(8): 651 – 666.
[32] 王谷,过秀成. 包含异常数据的居民出行稳健回归分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2011,35(3): 509 – 511.
WANG Gu, GUO Xiucheng. Robust regression analysis of trip generation including abnormal data[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(3): 509 – 511. (in Chinese)
[33] NOGUCHI N, REID J F, BENSON E, et al. Vehicle automation system based on multi-sensor integration[C]// American Society of Agricultural Engineers Meeting, 1998.
[34] 罗尤春. 自动驾驶理论及在农机中的应用[M]. 北京:电子工业出版社,2020: 47 – 53.
[35] 王辉, 王桂民, 罗锡文,等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11 – 19.
WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11 – 19. (in Chinese)