doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.006

基于动态兴趣空间的烟草收获机自动对行系统设计与试验

王笑乐[1,2]　戴宝宝[1]　戴　祯[1]　胡志伟[1]　李宇轩[1]　赵金辉[3]　杨　洋[1,2]　陈黎卿[1,2]

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程研究中心, 合肥 230036;
3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对当前雷达感知在处理田间信息时存在干扰因素多、计算时间长等问题,本文以烟草收获机为对象,设计了一种结合激光雷达与北斗定位的自动对行系统。控制算法根据机身历史定位坐标拟合点云处理中心线,解决了机身偏斜造成的引导线偏斜、对错行等问题;根据已采集的烟株点云信息,计算当前田块行距和株高,作为提取兴趣空间(Region of interest,ROI)的决策依据;为缩短点云处理时间,动态调整 ROI 空间长度、宽度和高度范围,滤除干扰点云,提高计算效率和对行精度;提出基于点云密度的作物行分类方法,通过垂直投影和滑动窗口方法,确定 K-means 算法初始聚类中心,提高烟草行导航线拟合准确度;对获得的前视烟草行导航线,采用最优预瞄算法实现对行跟踪行驶。在 3 组不同行距的烟田开展自动对行测试,结果表明,机身中心相对烟草行实际中心线最大横向误差为 0.107 m,平均横向偏差为 0.074 m,收获导航线准确率为 94.8%,该系统能够有效保证收获机自动对行行驶;提出的动态 ROI 点云处理算法相比已有算法,平均点云处理时间由 536.2 ms 降至 148.95 ms。本文提出的烟草收获机自动对行系统及动态 ROI 点云处理算法,为大田行植作物装备无人自主作业提供了技术参考。

关键词: 烟草收获机; 自动对行行驶; 动态 ROI 点云; 最优预瞄算法

中图分类号: S225.93　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)04-0050-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Automatic Row-following System for Tobacco Harvester Based on Dynamic Region of Interest

WANG Xiaole[1,2]　DAI Baobao[1]　DAI Zhen[1]　HU Zhiwei[1]　LI Yuxuan[1]　ZHAO Jinhui[3]
YANG Yang[1,2]　CHEN Liqing[1,2]

(1. *School of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*
2. *Anhui Provincial Engineering Research Center of Intelligent Agricultural Machinery*, *Hefei* 230036, *China*
3. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In response to the problems as multiple interference factors, and long computation time in processing field information using current radar perception, an automatic alignment system that combined laser radar and Beidou positioning for tobacco harvesters. The control algorithm fit the point cloud processing centerline based on the historical positioning coordinates of the aircraft body, effectively solving problems such as deviate guide lines and misalignment caused by aircraft body deviation. Based on the collected point cloud information of tobacco plants, the current row spacing and plant height of the field were calculated as the decision basis for extracting the region of interest (ROI). To shorten the processing time of point clouds, the length, width, and height range of ROI space were dynamically adjusted, and interference point clouds were filtered out. A crop row classification method was proposed based on point cloud density, and the initial clustering center of K-means algorithm was determined through vertical projection and sliding window method to improve the accuracy of tobacco row navigation line fitting. The optimal preview algorithm was used to track and drive the obtained forward tobacco navigation line. Automatic parallel testing was conducted in three tobacco fields with different row

收稿日期: 2025-10-18　修回日期: 2025-11-07

基金项目: 中国烟草总公司重点研发项目(110202301016-04)

作者简介: 王笑乐(1990—),男,讲师,博士,主要从事农机智能化控制研究,E-mail: wangxiaole@ahau.edu.cn

通信作者: 杨洋(1988—),男,教授,博士,主要从事智能农业机械装备研究,E-mail: yy2016@ahau.edu.cn

spacing. The maximum lateral error between the center of the machine and the actual centerline of the tobacco row was 0.107 m, with an average lateral error of 0.074 m. The accuracy of the harvest navigation line was 94.8%, indicating that the system can effectively ensure automatic parallel driving of the harvester. The proposed dynamic ROI point cloud processing algorithm reduced the average point cloud processing time from 536.2 ms to 148.95 ms compared with existing algorithms. The tobacco harvester automatic alignment system and dynamic ROI point cloud processing algorithm proposed can provide technical references for unmanned autonomous operation of field planting crop equipment.

Key words: tobacco harvester; automatic row-following travel; dynamic ROI point clouds; optimal preview algorithm

0　引言

随着我国高标准农田建设大力推进,大田农机装备无人自主作业成为提高农业生产效率的重要手段[1]。烟草作为我国重要经济作物之一,烤烟种植面积和总产量常年位居世界首位[2]。然而,目前国内烟草收获作业仍高度依赖人工,劳动强度大、采收效率低、品质一致性差,制约了烟草生产规模化与标准化发展。广泛采用的半自动烟草收获机仍需人工驾驶和采收,尚未实现自主化和智能化作业,难以满足现代烟草产业高效、精准、绿色发展需求。因此,针对全自动烟草收获机关键技术展开研究,开发具备自动对行与自主导航功能的智能采收装备[3],对于提升烟草产业全程机械化水平,推动大田经济作物生产模式转型升级具有重要意义。

自动对行行驶是大田农机装备无人自主作业的关键技术[4-6],能够有效提高作业效率、减少劳动强度、降低伤苗率。现阶段,自动对行技术主要分为机械触碰对行、卫星定位对行、环境感知对行 3 种方式。机械对行方面,李涛等[7]采用角度传感器和 PID 控制算法,设计了一种根茎类作物收获机自动对行系统。王申莹等[8]开发了一种甜菜块根偏离行中心线距离检测机构,实现甜菜块根自动对行收获。DONG 等[9]设计了玉米偏差检测传感器和自动对行系统,基于偏航角估计模型和模糊控制模型的纯追踪方法计算目标转向角实现自动对行。卫星定位对行方面,何创新等[10]对棉花收获作业车辆首行轨迹进行线性拟合,通过平行轨迹引导后续收获作业。刘兆朋等[11]基于 GNSS 设计了一种喷雾机自动导航控制方法,能够实现直线和低头转弯行驶。郑康等[12]采用导航控制器与 IMU 获取位姿信息,设计了高地隙对行施药系统。环境感知对行方面,LUO 等[13]提出了基于 HSV 空间扫描的感兴趣区域动态提取算法,实现了未收获作物边缘和作物末端边缘的同时检测。ZHOU 等[14]提出 LiDAR 驱动的玉米作物行检测算法,在玉米生长前中期时表现良好的准确性。韩长杰等[15]基于机器视觉设计了甘蓝作物行定位与 ROI 提取方法,实现了大田甘蓝对行喷雾控制。

上述对行技术在大田耕种、喷施、收获等场景有着良好应用,但仍存在某些不足,例如:机械对行通常依靠特定结构实现,作物适应性和通用性相对较弱;卫星定位对行存在卫星信号弱,机身定位偏移等现实问题,鲁棒性尚需提高;环境感知对行依赖传感器性能,在复杂场景下应用受限。为此,部分学者采用感知和定位相结合的方法实现农机对行行驶,感知系统根据作物行特征信息提取前方导航线,定位系统提供作物和机身实时位置信息,能够有效提高对行精度。陈耀晖等[16]利用三维激光雷达对苗期作物进行精准定位,实现柑橘巡检机器人自主导航。江庆等[17]提出了基于固态激光雷达与 RGB 相机融合的玉米作物检测方法,为无人作业机器提供引导。印祥等[18]设计了高地隙施药机自动驾驶系统,自动导航模式下路径跟踪精度较高,满足田间施药作业需求。

环境感知与卫星定位相结合的方法有效提高了农机对行精度,但存在信息融合时数据冗余冲突、计算压力大、耗时长等问题。部分学者使用 ROI 选取方法对多余信息进行滤除[19-20],虽能够有效减少计算量,提高计算效率,但固定选取 ROI 方法易导致有效区域丢失,尤其在行间叶片相互遮蔽严重时,点云处理不当或视场不稳定造成的引导线偏斜、对错行等问题突出。为此,本文设计一种基于历史路径提取 ROI 点云的处理算法,提出考虑车速、点云数量及空间特征的三维 ROI 动态截取方法,以提高对行精度和计算速度;根据动态 ROI 点云坐标,基于改进 K-means 算法提取车辆行驶导航线,采用最优预瞄算法实现对行路径跟踪。

1　烟草收获机自动对行系统

1.1　系统硬件组成

烟草收获机自动对行系统硬件主要包括三维激光雷达(大疆 Livox HAP 3D LiDAR 型)、北斗卫星定位系统(华测 CGI-430 RTK GNSS 型)、装有 ROS2

操作系统的便携式计算机(处理器 i7 13620H,系统 Ubuntu20.04)及通信线缆等,雷达和定位系统主要参数如表 1 所示。

表 1 激光雷达和北斗定位系统主要参数

Tab.1 Main parameters of LiDAR and Beidou positioning system

项目	参数	数值
大疆 Livox HAP 3D LiDAR 型激光雷达	激光波段中心波长/nm	905
	激光通道数	144
	最大探测距离/m	260
	测量精度/cm	<2
	数据获取速度/(点·s^{-1})	452 000
	垂直视场角/(°)	25.1
	水平视场角/(°)	120
	垂直角分辨率/(°)	0.23
	水平角分辨率/(°)	0.18
华测 CGI-430 RTK GNSS 型北斗定位系统	水平定位精度/cm	±2
	定向精度/((°)·m^{-1})	0.05
	数据更新率/Hz	100
	通信接口	3×RS232、1×CAN、1×RJ45

烟草收获机采用门架结构和履带式底盘,内部装有采摘机械臂,锂电池驱动行驶,收获机长 2.06 m、宽 1.42 m、高 1.95 m,通过 CAN 总线接受上位机对行系统发送的履带线速度信号,实现路径跟踪行驶。收获机田间作业场景如图 1 所示,激光雷达安装在收获机正前方,距离地面高度 2.4 m,俯视倾角 30°;北斗定位天线对称安装在车架两侧,距离车辆前端 0.8 m。

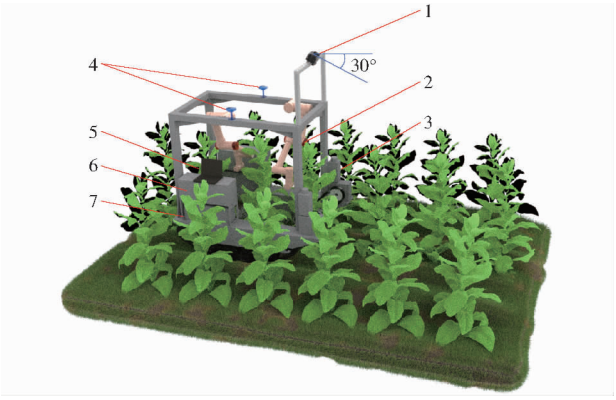

图 1 烟草收获机田间作业场景

Fig.1 Field operation scenarios of tobacco harvesters

1. 激光雷达 2. 采摘机器手臂 3. 驱动电机 4. 北斗天线 5. 上位机 6. 电控箱 7. 动力电池

1.2 对行行驶算法

提出的烟草收获机自动对行算法如图 2 所示,以机身实时北斗定位坐标和激光雷达点云为输入,将雷达点云变换至大地坐标系后,进行动态 ROI 点云计算:①根据机身历史坐标拟合点云处理中心线,作为 ROI 提取参考线。②采用随机抽样一致性(Random sample consensus,RANSAC)算法对前视点云进行直线拟合,获得烟草行间距,计算 ROI 宽度 B_t。③基于雷达前视距离和当前车速,实时计算 ROI 长度 L_t。④根据冠层株高和点云数量确定 ROI 高度 H_t,动态调整烟草点云 ROI 空间[B_t, L_t, H_t]。

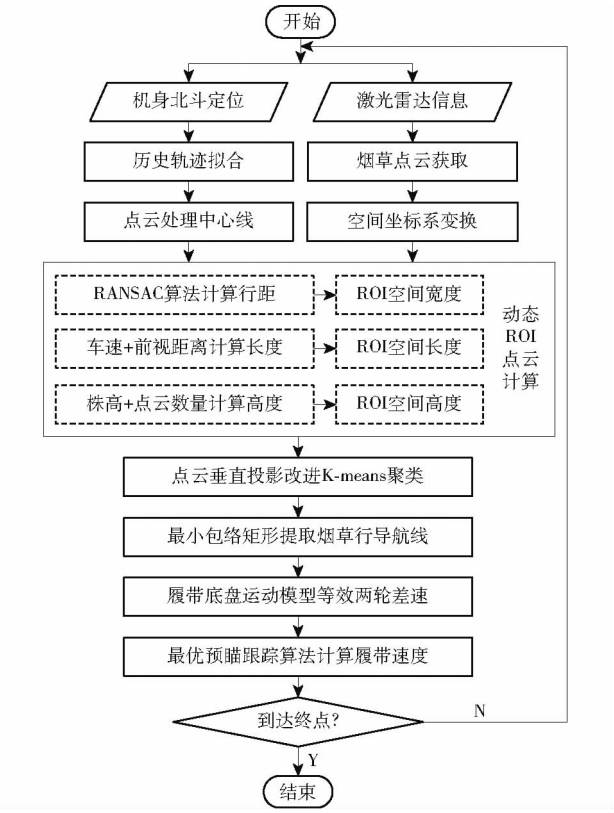

图 2 自动对行算法流程图

Fig.2 Automatic row-following algorithm flowchart

获得 ROI 内点云 P_R 后,将其投影至 XOY 水平面,基于二维点云密度分布特征,采用滑动窗口算法选取 K-means 初始聚类中心,对烟草行点云进行聚类分割;基于最小包围矩形算法,对目标簇内的烟草点云进行拟合,获得烟草行导航线。为实现导航线稳定跟踪,建立履带底盘运动学模型,采用最优预瞄跟踪算法,计算预瞄点与机身中心横向偏差,获得底盘前进速度与转向角并转换成左、右履带速度,实现烟草行精准跟踪。

2 自动对行行驶方法

烟草收获机对行作业时,雷达原始点云数据量大,直接处理易导致计算冗余、效率低,且机身滑移、叶片遮蔽等因素,可能导致引导线偏斜和对错行。为此,提出基于机身历史轨迹拟合点云处理中心线,为前视 ROI 提取提供基准,以提升点云处理效率与对行稳定性。

2.1　点云处理中心线提取

收获机入行作业前，调整机身航向与烟草行中心线对齐，收获机以初始速度 v_0 驶入作业区域，此时北斗定位系统实时记录机身在时刻 $t_i(i=1,2,\cdots,N,N$ 为定位点数量）的经纬度坐标 $Q_i(q_i^{lat},q_i^{lon})$。由于经纬度坐标直接用于轨迹计算复杂度较高，为简化后续数据处理流程，需将机身经纬度 Q_i 通过高斯投影变换至大地坐标系下，得到绝对位置坐标 $G_i(x_i,y_i)$。

对机身绝对位置坐标 G_i 进行直线拟合，若采用经典最小二乘法对各时刻轨迹点赋予同等权重，易导致早期轨迹点干扰拟合结果，使拟合中心线与实际烟草行产生偏离。为此，引入时间衰减加权最小二乘法进行点云中心线拟合，通过赋予近期轨迹点更高权重，增强其对拟合结果的贡献度，同时削弱早期点干扰，提升拟合中心线实时性与准确性。权重函数随时间呈指数衰减趋势，计算式为

$$w_u = w_0 \mathrm{e}^{-\lambda(t_{now}-t_u)} \tag{1}$$

式中　w_u——第 u 个轨迹点权重

w_0——初始时刻权重初始数值

t_{now}——当前时刻时间戳

t_u——第 u 个轨迹点时间戳

λ——衰减系数

λ 越大，权重衰减越快，近期轨迹点影响越显著。

加权最小二乘法拟合中心线时，为放大高权重轨迹点误差反馈，同时缩小低权重轨迹点的误差影响，以最小化加权误差平方和为目标函数，构建点云处理中心线 $y=kx+b$ 的优化模型，目标函数为

$$f(k,b)=\min\left(\sum_{u=1}^{n}(w_u(y_u-(kx_u+b)))^2\right) \tag{2}$$

式中　(x_u,y_u)——第 u 个轨迹点坐标

通过对 k、b 求偏导并令为 0 可解得最优拟合参数，得到点云处理中心线。

为确保中心线拟合精度满足后续 ROI 提取需求，对拟合结果进行残差分析，计算各定位点到拟合直线的欧氏距离，计算式为

$$d_{res}^u=\frac{|kx_u-y_u+b|}{\sqrt{k^2+1}} \tag{3}$$

式中　d_{res}^u——残差

考虑到北斗定位精度和田间地面起伏易导致车身位置存在定位误差，残差均值 $\overline{d}_{res}^u$ 需不大于 4 cm，否则缩小时间窗口，重新进行点云处理中心线计算，直至其精度满足要求。

2.2　点云信息处理

2.2.1　烟草点云获取

以成熟期烟田数据为对象，烟草植株平均行距 106 cm，平均株高 152 cm。烟草点云采集过程中，激光雷达积分时间为 200 ms，收获机以速度 0.5 m/s 沿烟草行垄间进行行驶，采集的烟草三维点云数据结果如图 3 所示。

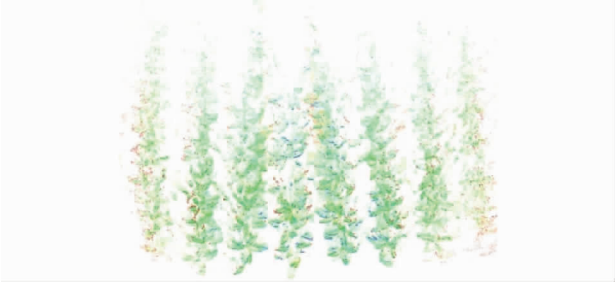

图 3　烟草点云

Fig. 3　Tobacco point cloud

2.2.2　点云坐标系变换

激光雷达获取的点云数据为雷达坐标系，需通过坐标变换转换至大地坐标系[21]，才可将点云处理中心线用作 ROI 分割参考线。坐标系变换如图 4 所示，对应的旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和平移矩阵 $\boldsymbol{T}$ 为

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{yaw}}=\begin{bmatrix}\cos\alpha & -\sin\alpha & 0\\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{pitch}}=\begin{bmatrix}\cos\beta & 0 & \sin\beta\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{roll}}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma\\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma\end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{T}=[x_T \quad y_T \quad z_T]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

式中　α、β、γ——x、y、z 轴旋转角

x_T、y_T、z_T——坐标系相对位置

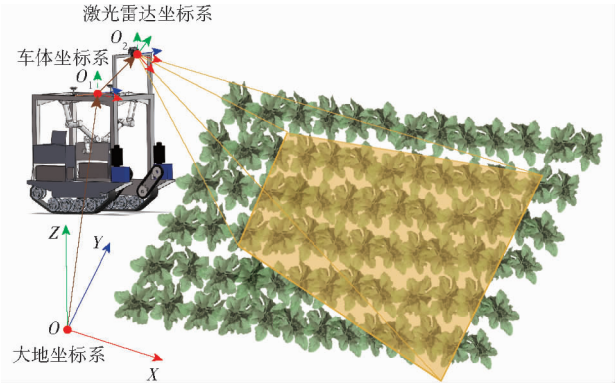

图 4　雷达至大地坐标系变换

Fig. 4　LiDAR coordinate system to earth coordinate system transformation

设点 P_c 在激光雷达坐标系下为[x_L,y_L,z_L],在车体坐标系下为[x_C,y_C,z_C],变换式为

$$\begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} + \boldsymbol{T} \tag{8}$$

车辆位置与大地坐标系原点相对三维坐标[x_K,y_K,z_K],即可得点 P_c 在大地坐标系下位置[x_M,y_M,z_M],变换式为

$$\begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_K \\ y_K \\ z_K \end{bmatrix} \tag{9}$$

2.2.3 动态 ROI 提取

将烟草点云由雷达坐标系变换至大地坐标系后,以点云处理中心线作为 ROI 分割参考线,结合烟草行点云三维形态信息、激光雷达前视距离以及收获机实时行驶速度,构建 ROI 动态调节机制,以实现目标点云精准筛选与计算效率优化。

ROI 空间长度由雷达前视距离和实时车速决定,而前视距离受安装倾角影响:倾角较大时,探测视野聚焦近场,虽能识别近距烟草行,但导航线长度受限,易引发跟踪控制波动;倾角较小时,视野延伸远场,虽能获取长距烟草行信息,但导航线难于实时反映当前烟草行形态,降低对行控制精度。通过田间对比试验,确定雷达最优安装倾角为 30°,此时雷达探测有效范围既能完整捕捉烟草行空间形态变化,又能确保导航线与机身距离适配控制需求。基于最优倾角下雷达有效范围,结合烟草收获机实时行驶速度,建立 ROI 长度动态规划模型为

$$L_t = l_0 - mv_t \tag{10}$$

式中 l_0——激光雷达前视距离

m——车速比例系数

v_t——实时车速

由于收获机机身横跨一行烟草植株,ROI 宽度需与烟草植株实际行间距动态匹配,以确保目标烟草行点云完整覆盖。行植烟草点云在大地坐标系下 XY 水平面的投影可近似为直线,利用 RANSAC 算法拟合 XY 平面内的烟草行。该算法能有效排除杂草、零散叶点等离群点干扰,拟合精度与鲁棒性优于普通最小二乘法[22]。为保障拟合效果,设定 RANSAC 算法关键参数:距离阈值为 ε、置信度 ψ、最小内点数量 $N_{\min}$,具体拟合流程为

(1)从 XY 平面点云集合 $P(x_i,y_i)$ 中随机抽取 2 个点,构造初始直线模型 $y = k_j x + b_j$。

(2)计算所有点到该直线的欧氏距离 d_i,统计满足 $d_i \leqslant \varepsilon$ 的内点数量 N_{in}。

(3)若 $N_{\text{in}} \geqslant N_{\min}$,则基于所有内点采用最小二乘法优化直线模型参数,得到最优参数 k_j^* 与 b_j^*。

(4)重复步骤(1)~(3),直至找到内点数量最多的直线 $L_1: y = k_1 x + b_1$,将其视为第 1 条烟草行直线。

(5)从点云集合 P 中剔除 L_1 对应的内点,对剩余点云重复上述流程,依次拟合 $L_2, L_3, \cdots, L_n$,直至剩余点云数量小于 $N_{\min}$ 停止拟合。

拟合得到的 f 条直线中可能包含虚假直线,通过内点数量筛选和斜率一致性筛选保留真实烟草行。通过计算每条直线内点占比 η_j 进行内点数量筛选,计算式为

$$\eta_j = \frac{N_{\text{in},j}}{\sum_{j=1}^{f} N_{\text{in},j}} \times 100\% \tag{11}$$

式中 $N_{\text{in},j}$——第 j 条直线的内点数量

为了筛选出能够真实反映烟草行特征的直线,保留 $\eta_j \geqslant 15\%$ 的直线。计算筛选后的直线斜率均值 $\bar{k}$,真实烟草行之间斜率通常不超过 10°,故保留满足 $|k_j - \bar{k}| \leqslant \tan 5°$,最终得到 n 条真实烟草行直线。

将 n 条直线按 X 轴排序,相邻直线垂直距离即为烟草行行距,计算式为

$$d_{\text{real}}^j = \frac{|b_{j+1} - b_j|}{\sqrt{k^2 + 1}} \tag{12}$$

式中 b_j、b_{j+1}——相邻直线截距

取所有 d_{real}^j 的均值为实时行距 d_{real}。为保证收获机在对行作业时 ROI 始终包含当前目标烟草行,对 ROI 宽度进行横向扩展,保留 3 行烟草处于 ROI 内,能够避免单一烟草行点云导致跟踪的不确定性,因此烟草行点云 ROI 宽度 B_t 设为 $3d_{\text{real}}$。

图 5 中,点 P_1、P_2、P_3、P_4 为车辆历史轨迹点;l_1 和 l_2 为车辆当前位置与点云 ROI 起始距离和终点距离;L_t 为 ROI 长度;B_t 为 ROI 宽度。

以收获机当前机身中心在大地坐标系下投影点 $O_0(x_0,y_0)$ 作为基准点,结合点云处理中心线的走向确定 ROI 起始位置。定义 ROI 沿中心线方向的前端点 $O_1(x_1,y_1)$ 和后端点 $O_2(x_2,y_2)$,其中点 O_1 与点 O_0 沿中心线距离为 l_1,点 O_1 与点 O_2 沿中心线距离即为 ROI 长度 L_t。

首先计算前端点 $O_1(x_1,y_1)$

$$\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} = l_1 \tag{13}$$

将中心线方程 $y = kx + b$ 代入式(13),化简得

$$x_1 = x_0 + \sqrt{\frac{l_1^2}{1 + k^2}} \tag{14}$$

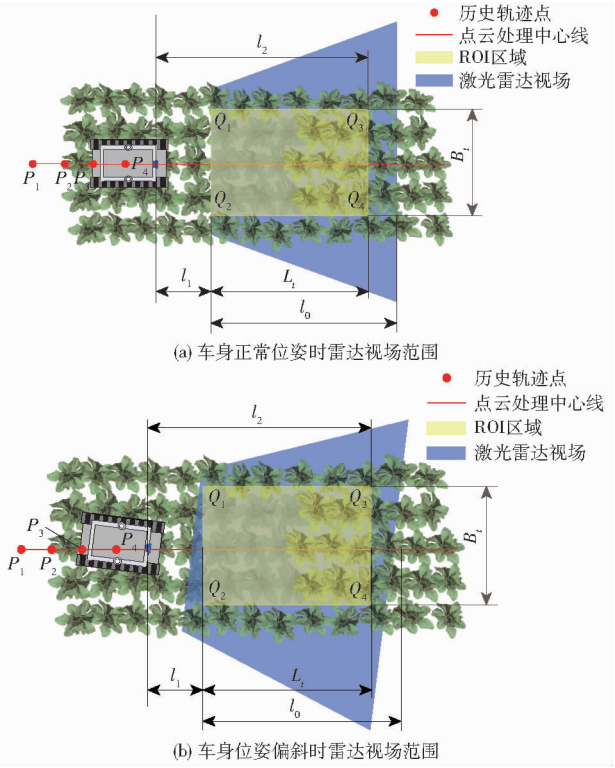

图 5　点云动态 ROI 调节

Fig. 5　Dynamic ROI adjustment for point cloud

将 x_1 代入 $y = kx + b$ 即可得到 y_1，即 $y_1 = k\,x_1 + b$。

同理可得 $x_2 = x_1 + \sqrt{\dfrac{L_t^2}{1+k^2}}$，$y_2 = k\,x_2 + b$。

如图 6 所示，ROI 为垂直于点云处理中心线的矩形区域，需基于点 O_1、O_2 坐标计算矩形 4 个顶点 Q_1（$x_{\text{left}}^{(1)}$，$y_{\text{left}}^{(1)}$）、Q_2（$x_{\text{right}}^{(1)}$，$y_{\text{right}}^{(1)}$）、Q_3（$x_{\text{left}}^{(2)}$，$y_{\text{left}}^{(2)}$）、Q_4（$x_{\text{right}}^{(2)}$，$y_{\text{right}}^{(2)}$），计算式为

$$\begin{cases} x_{\text{left}}^{(1)} = x_1 - \dfrac{B_t}{2\sqrt{1+k^2}} \\ y_{\text{left}}^{(1)} = kx_{\text{left}}^{(1)} + b \\ x_{\text{right}}^{(1)} = x_1 + \dfrac{B_t}{2\sqrt{1+k^2}} \\ y_{\text{right}}^{(1)} = kx_{\text{right}}^{(1)} + b \\ x_{\text{left}}^{(2)} = x_2 - \dfrac{B_t}{2\sqrt{1+k^2}} \\ y_{\text{left}}^{(2)} = kx_{\text{left}}^{(2)} + b \\ x_{\text{right}}^{(2)} = x_2 + \dfrac{B_t}{2\sqrt{1+k^2}} \\ y_{\text{right}}^{(2)} = kx_{\text{right}}^{(2)} + b \end{cases} \tag{15}$$

2.2.4　动态双阈值分割点云

对裁剪后的 ROI 点云数据进行地面点云滤除，滤除高度直接影响点云质量与后续处理效果，高度过高易导致剩余点云稀疏，在后续聚类分割中易因

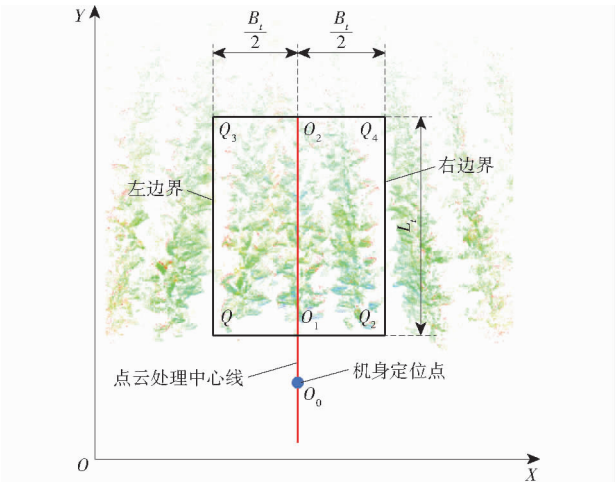

图 6　点云 ROI 边界提取

Fig. 6　Point cloud ROI boundary extraction

特征点不足造成烟草行位置偏差增大；高度过低则会保留大量地面点、杂草点，导致点云数据量激增，增加计算时间。为此，本文提出基于烟株实际高度的 ROI 上下边界动态阈值分割法，根据实时田间烟草高度确定 Z 轴滤波范围。

确定 ROI 上边界：由于成熟期烟草植株高度存在个体差异，采用遍历统计法确定 ROI 内点云的 Z 轴坐标最大值 $Z_{\max}$，作为直通滤波 Z 轴方向的上边界。确定 ROI 下边界：综合考虑地面点过滤与有效冠层保留需求，设定下边界为上边界向下偏移 H_t，计算式为

$$H_t = \tau Z_{\max} - \Delta Z \tag{16}$$

式中　τ——烟草冠层保留系数，依据烟草成熟期冠层从顶部至底部的有效特征点分布密度设定

ΔZ——地面杂草平均高度

ROI 点云 Z 轴滤波范围为（$Z_{\max} - H_t$，$Z_{\max}$），如图 7 所示。

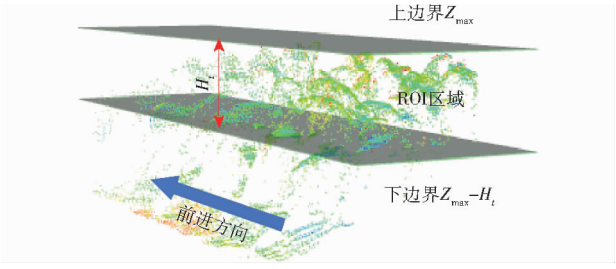

图 7　点云高度双阈值分割

Fig. 7　Segmentation of dual-threshold for point cloud height

2.2.5　点云滤波去噪

确定点云 ROI 后仍存在离群点干扰，需通过滤波去噪优化点云质量。离群点因空间分布稀疏，与周围邻近点距离显著大于正常烟草冠层点云，且所有点到邻近点的距离服从高斯分布（由均值 μ 与标准差 σ 表示），因此可通过设定距离阈值剔除离群

点。设点云中第 N 点三维坐标为 $P_n(x_n,y_n,z_n)$，该点到任意点 $P_s(x_s,y_s,z_s)$ 距离 d_s 为

$$d_s=\sqrt{(x_s-x_n)^2+(y_s-y_n)^2+(z_s-z_n)^2} \tag{17}$$

去除离群点后点云质量有所提升，但数据量仍较大，易导致后续 K-means 聚类算法计算耗时增加。体素滤波可在保持烟草行点云整体形态不变的前提下，通过空间体素化降低点云密度，实现数据降维。经统计滤波和体素滤波后，能充分保留烟草行空间分布特征，并减少点云数量以提高计算效率，滤波前、后烟草点云如图 8 所示。

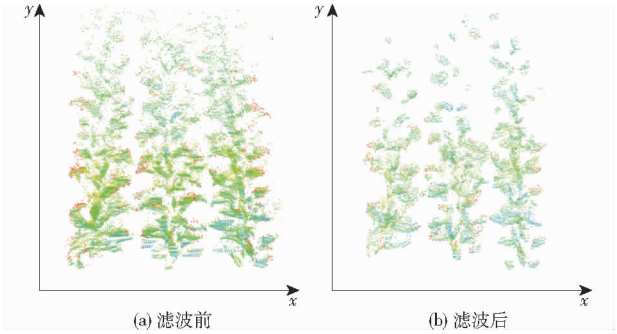

图 8 点云滤波前后对比

Fig. 8 Comparison before and after point cloud filtering

2.2.6 基于密度的烟草行分类

ROI 内点云包含 3 行烟草作物，中间行用于提取导航路径。作物行分类常采用 K-means 聚类算法，该算法具有伸缩性好、计算复杂度低等优势，但需预先设定簇数 K，对初始聚类中心敏感，易陷入局部最优。结合烟草收获机对行场景特性，ROI 内点云包含 3 行烟草行，因此簇数目可以确定为 3。同时烟草行一般沿直线分布，利用垂直投影法可清晰呈现作物行分布特征。基于此，本文提出一种基于垂直投影确定初始聚类点的改进 K-means 算法。

首先对 ROI 点云进行垂直投影，点云不包含地面信息，烟草行因植株冠层点云密集呈密度峰值，行间区域因无有效点云呈密度谷值。为降低后续密度统计计算量，将点云沿 X 轴方向划分为间隔 0.05 m 的网格，统计每个网格内点云数量，生成点云密度分布网格图，如图 9 所示。

若直接将密度分布网格图的局部峰值作为初始聚类中心，易因烟草冠层点云密度不均，导致同一烟草行对应多个局部峰值，引发初始聚类中心冗余。考虑到点云密度分布整体呈 3 个峰值特征，采用滑动窗口法提取 3 个有效密度峰值 ρ_1、ρ_2、ρ_3。

滑动窗口宽度 W 直接决定峰值检测精度，需与烟草作物行实际宽度匹配，故将窗口宽度 W 设为 d_{real}。沿 Y 轴方向由小到大遍历密度分布网格，当某一网格点云密度大于其左右 $W/2$ 范围内所有网格密度时，标记该网格对应的 Y 轴坐标为候选峰值。为剔除同一烟草行内的冗余候选峰值，引入几何约束条件：候选峰值间 Y 轴间距需大于阈值 $D_{\min}$，取 $D_{\min}=0.8d_{\text{real}}$。若 $D_{(k,k+1)}<D_{\min}$，则合并两峰值，保留峰值较大的值；若 $D_{(k,k+1)}\geqslant D_{\min}$，则保留 2 个候选峰值。

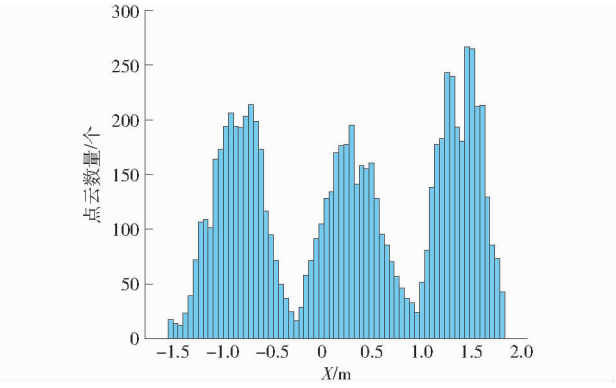

图 9 点云密度分布

Fig. 9 Point cloud density distribution

统计筛选后候选峰值数量，若峰值数量大于 3，说明 $D_{\min}$ 过小，则增大阈值 $D_{\min}$（每次增量为 0.1 m）继续迭代；若峰值数量小于 3，则减小阈值 $D_{\min}$（每次减量为 0.1 m）继续迭代；当峰值数量等于 3 时，则停止迭代，进行初始聚类中心确定。对 3 个局部最大值 p_1、p_2、p_3 对应的 X 轴坐标，取各区间所有点云 X 轴坐标中值，作为初始聚类中心点 x_1、x_2、x_3。

激光雷达拍摄点云呈近密远疏分布，若直接取峰值区间内点云 Y 轴坐标均值，易受边缘密集点干扰。因此，采用中值滤波确定初始聚类中心纵坐标 y_k 抑制极端值的影响，其计算式为

$$y_k=\text{Med}[y_{j-c},\cdots,y_j,\cdots,y_{j+c}]\quad\left(c=\frac{m_c-1}{2}\right) \tag{18}$$

式中 y_j——点云纵坐标

m_c——中值滤波窗口宽度

基于点云密度分布特性确定初始聚类中心，计算 ROI 内所有点云到 3 个初始聚类中心的欧氏距离，将每个点归入距离最近的聚类中心所在簇，完成第 1 次簇划分；计算每个簇内所有点云坐标均值，作为新的聚类中心；重复上述流程，直至相邻两次迭代的聚类中心欧氏距离均小于设定精度阈值，停止迭代，最终得到 3 行烟草行点云聚类效果。传统 K-means 聚类效果与改进 K-means 聚类效果对比如图 10 所示。

2.2.7 对行行驶导航线提取

聚类烟草点云进行后，为获取中间行导航线，对目标簇采用最小包围矩形法进行提取，流程如图 11 所示。得到最小包围矩形后，选取矩形 2 条长边（沿 X 轴方向）中点 M_1、M_2，连接 M_1 和 M_2 的直线即

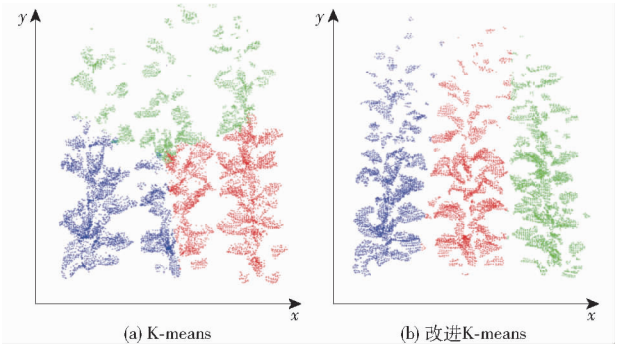

图 10　聚类算法效果对比

Fig. 10　Comparison of clustering algorithm effect

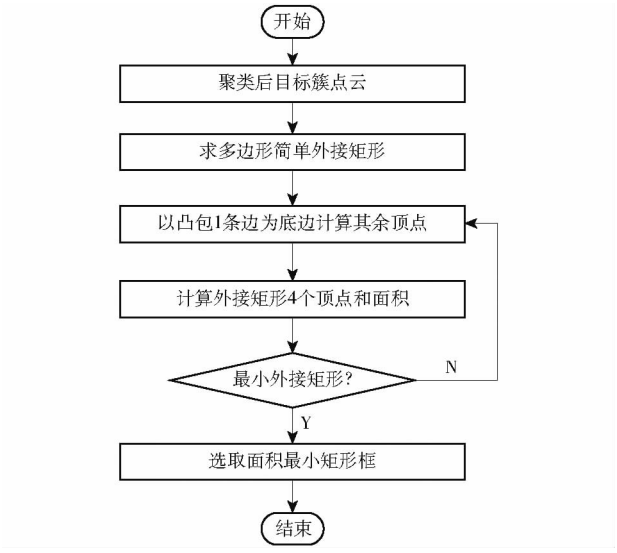

图 11　最小包围矩形计算流程

Fig. 11　Calculation flowchart of minimum bounding rectangle

为烟草行导航线。该导航线可作为烟草收获机对行行驶的参考路径，引导收获机沿着目标烟草行进行收获作业，路径提取结果如图 12 所示。

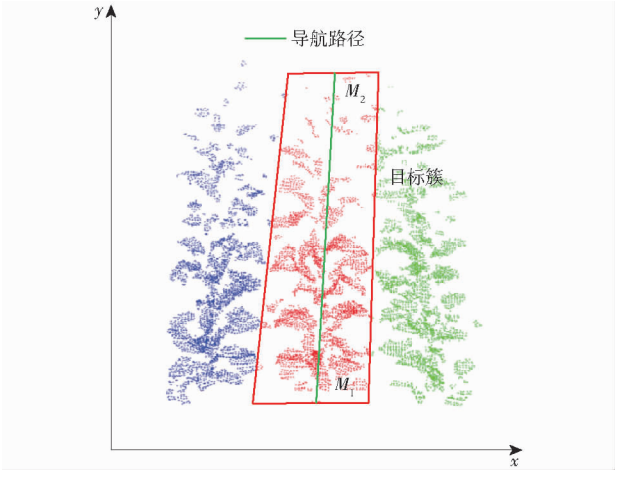

图 12　导航线提取

Fig. 12　Navigation line extraction

2.3　路径跟踪

2.3.1　履带底盘运动学模型

履带式烟草收获机在田间作业过程中行驶速度较慢，转向时制动侧履带的滑移和转向侧履带的滑转对直线路径跟踪干扰较小。在不考虑横向滑动，假设小角度转向且瞬时转向中心不变的运动条件下，可将履带底盘运动学模型等效为两轮差速驱动模型进行运动学分析，如图 13 所示。

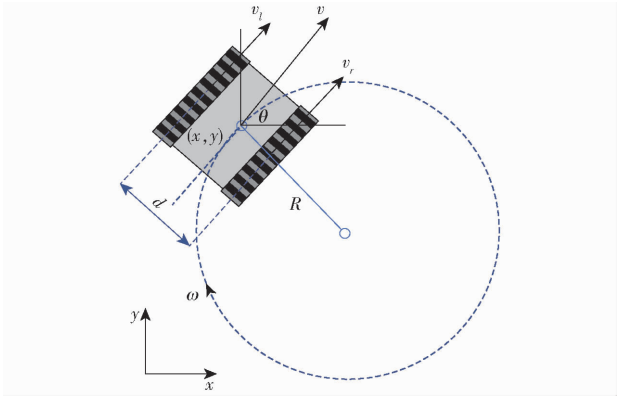

图 13　履带车运动学模型

Fig. 13　Tracked machine kinematics model

由图 13 可得

$$\begin{cases} v = \dfrac{v_l + v_r}{2} \\ v_l = v - \dfrac{\omega d}{2} \\ v_r = v + \dfrac{\omega d}{2} \end{cases} \tag{19}$$

式中　v——车辆中心线速度

ω——车辆中心角速度

v_l——左侧履带速度

v_r——右侧履带速度

d——两履带中心轮距

假设此时履带车辆中心位置(x,y)表示履带车位置，此时烟草收获机运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = v\cos\theta \\ \dot{y} = v\sin\theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \tag{20}$$

式中　θ——航向角

2.3.2　最优预瞄跟踪算法

最优预瞄点路径跟踪算法依据车辆当前位置与目标路径的间距确定预瞄区域，在该区域内遍历所有路径点，根据车辆运动学模型推算下一时刻车辆运行状态，采用枚举算法筛选出最优预瞄点，进而通过 Pure Pursuit 算法[23]计算前轮转角控制车辆行驶。Pure Pursuit 算法原用于 Ackermann 转向车辆，在履带式底盘上对其进行曲率输出与差速映射，使算法可在无转向机构的履带车辆上实现轨迹跟踪控制。预瞄区域通常与车辆行驶速度、路径复杂程度等因素有关，图 14 为最优预瞄算法原理图。

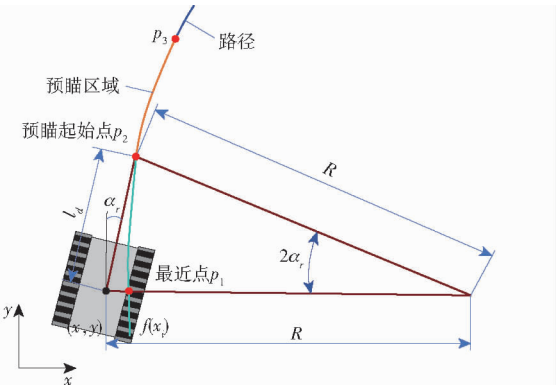

图 14 最优预瞄点跟踪原理

Fig. 14 Optimal preview point tracking principle

图 14 中,(x,y)为车辆当前位置坐标,p_1为最近点,p_2为预瞄区域起始点,p_3为预瞄区域终点,α_r为履带车辆中心位置与预瞄点所连向量与车辆偏航角的夹角;l_d为预瞄距离;$f(x_i)$为目标路径。

履带车需先通过最优预瞄点计算期望转向半径R,计算式为

$$\begin{cases} R = \dfrac{l_d^2}{2\sin\alpha_r} \\ \omega = \dfrac{v}{R} = \dfrac{2v\sin\alpha_r}{l_d^2} \end{cases} \tag{21}$$

联立式(19)~(21)可得履带收获机左、右轮速度为

$$\begin{cases} v_l = v - \dfrac{vd\sin\alpha}{l_d^2} \\ v_r = v + \dfrac{vd\sin\alpha}{l_d^2} \end{cases} \tag{22}$$

3 田间试验

为验证本文设计的烟草收获机自动对行系统在实际作业场景中有效性与稳定性,于 2025 年 6 月 14 日在安徽省宣城市沪皖现代烟草农业高科技示范园(东经 118°35′41.02″,北纬 30°46′44.83″)开展履带式烟草收获机田间自动对行验证试验,试验现场如图 15a 所示;于 2025 年 8 月 6 日在云南省曲靖市旧县白塔村(东经 103°26′42.35″,北纬 25°22′32.51″)进行履带式烟草收获机自动对行收获试验,试验现场如图 15b 所示。试验包括点云处理中心线合理性验证、导航线提取准确性分析以及对行行驶算法实车验证。

3.1 历史轨迹误差

为验证基于历史轨迹拟合点云处理中心线方法的可行性,试验采用北斗实时采集车辆位置信息,以此获取点云处理中心线,同时通过 RTK 定位技术采集烟草植株的实际位置信息,经路径拟合后作为烟草作物行中心线,对两者误差进行分析。

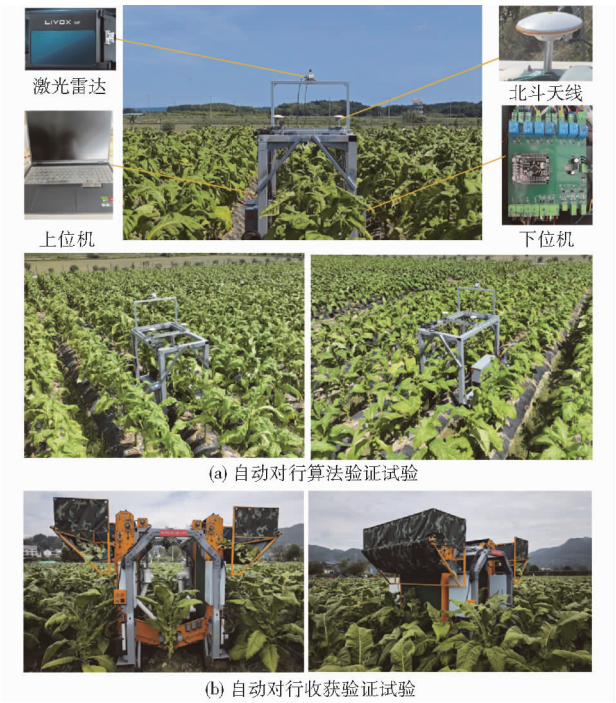

图 15 自动对行田间试验

Fig. 15 Field test of automatic row-following travel

试验过程中,烟草收获机分别以速度 0.5、1 m/s 各进行 5 次对行行驶,烟草作物行实际长度为 40 m,以频率 2 次/s 记录收获机对行过程中的实时经纬度、行驶速度、航向角等信息,最终获取 10 组对行收获过程中的实车轨迹数据。用 RTK 每隔 1 m 采集烟草植株经纬度信息,作为烟草植株实际位置信息,用于拟合烟草作物行中心线。将 10 组实车轨迹数据进行点云处理中心线与烟草作物行中心线进行对比,结果如表 2 所示。

表 2 点云处理中心线与作物行中心线误差

Tab. 2 Errors between point cloud processing centerline and crop row centerline

序号	最大误差/cm	平均误差/cm	平均角度偏差/(°)
1	9.58	3.65	2.85
2	11.35	5.26	1.68
3	10.77	3.84	1.35
4	8.37	4.23	1.52
5	10.26	4.85	3.56
6	6.23	3.58	4.05
7	7.52	2.36	3.28
8	7.68	3.68	2.71
9	5.94	4.71	3.54
10	8.63	5.27	2.67

由表 2 可知,基于实车轨迹拟合生成的点云处理中心线与烟草作物行中心线平均误差为 0.043 m,与烟草行中心线基本保持重叠。结果表明,根据收获机历史轨迹拟合点云处理中心线,能够满足烟草收获机田间对行导航行走的可靠性要求。

3.2　导航线误差

为验证本文算法提取烟草作物行导航线的效果，选取不同工况下烟草植株点云数据，结合北斗定位数据进行导航线处理。图 16 为不同工况下烟草点云和导航线提取结果，图 16a 为低遮挡烟草田间环境，叶片间遮挡较小，能够看到地面；图 16b 为高遮挡烟草田间环境，叶片间遮挡严重，地面几乎不可见；图 16c 为杂草茂盛烟草田间环境，杂草几乎覆盖地面。对应的点云数据及导航线提取结果分别如图 16d（低遮挡点云）、图 16e（高遮挡点云）、图 16f（杂草环境点云）、图 16g（低遮挡导航线）、图 16h（高遮挡导航线）、图 16i（杂草环境导航线）。

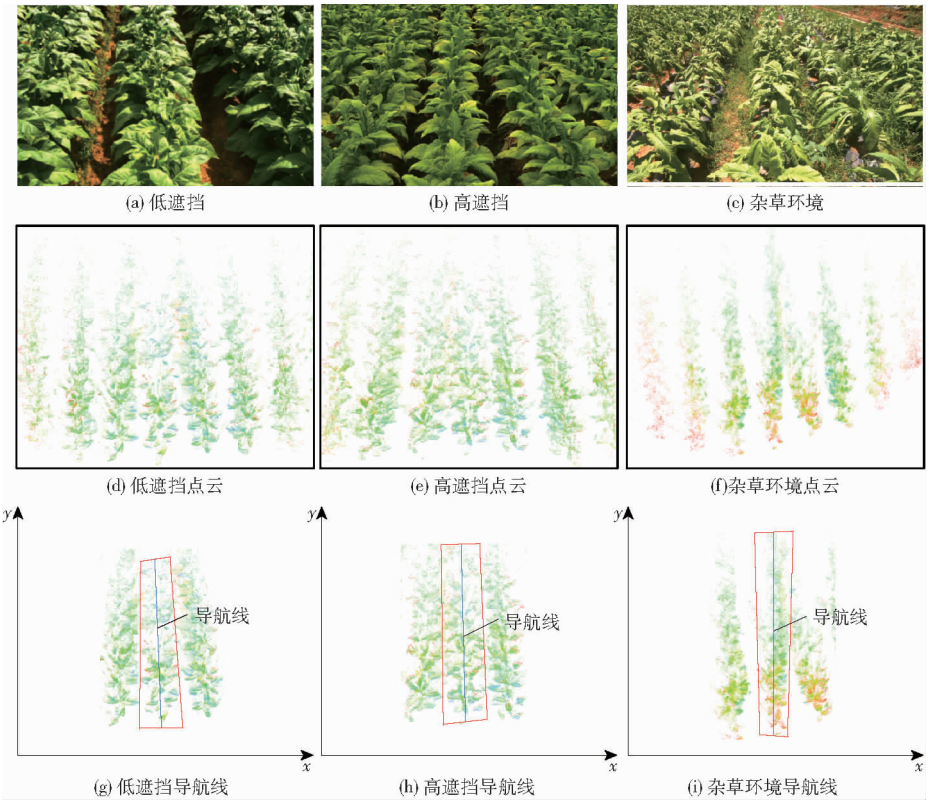

图 16　不同工况下烟草行导航线提取

Fig. 16　Extraction of tobacco row navigation lines under different working conditions

为评估本文算法准确性，以人工标定烟草行导航线作为评价标准，计算本文算法检测得到的烟草行导航线与人工标定导航线之间的夹角 θ_e，评价算法检测准确度，如图 17 所示。

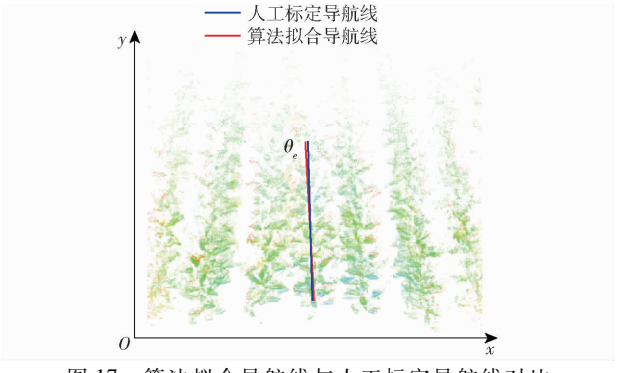

图 17　算法拟合导航线与人工标定导航线对比

Fig. 17　Comparison of algorithm-fitted and manually calibrated navigation lines

试验选取行驶速度 0.5、1.0 m/s 下的 100 帧点云数据进行人工标定烟草行导航线，与本文算法提取的导航线进行平均角度偏差对比，同时统计算法准确率与平均耗时，结果如表 3 所示。

表 3　导航线提取结果

Tab. 3　Navigation line extraction results

速度/(m·s^{-1})	平均角度偏差/(°)	准确率/%	平均耗时/ms
0.5	2.16	94.8	151.3
1.0	2.52	95.1	146.6

由表 3 可知，本文算法烟草作物行导航线与人工标定烟草行导航线平均角度偏差为 2.34°，准确率不低于 94.8%，平均耗时 148.95 ms。满足收获机对行行驶时提取导航线的准确性和实时性。

为进一步验证本文算法准确性与实时性，将其与传统点云处理算法进行对比。选取收获机在速度 1.0 m/s 下的 100 帧点云数据进行作物行检测和导航线提取，对比结果显示：与传统算法相比，提取导航线平均角度偏差降低 4.234°，平均点云处理时间由 536.2 ms 降至 148.95 ms。

3.3　路径跟踪误差

为测试激光雷达和北斗融合导航系统的综合性能，选取高遮挡烟田环境作为测试场景，在该烟田中

随机选取 3 组烟草作物行,以速度 1.0 m/s 进行对行试验。系统通过实时获取前方烟草行导航线,计算并输出烟草收获机左右轮行驶速度指令,实现自动对行。烟草收获机自动对行时,采用 GNSS 定位系统实时记录收获机轨迹坐标,确保轨迹数据准确性。

图 18 为 1 次试验作物行跟踪轨迹。由图 18 可知,当收获机与作物行出现较大偏差时,在融合导航系统先验信息的引导下,收获机能够快速进行转向修正,最终使实车轨迹与人工标定作物行保持高度接近,图 18 验证了系统偏差修正能力。

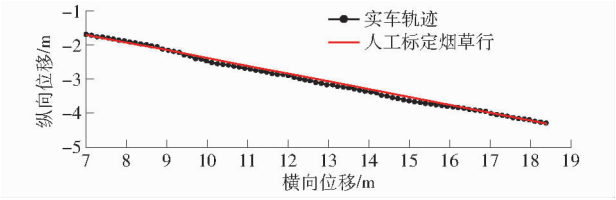

图 18 作物行跟踪轨迹

Fig. 18 Tracking trajectory of crop row

实车轨迹横向偏差如图 19 所示。由图 19 可知,3 组对行试验中收获机实车轨迹与人工标定作物行导航线最大横向偏差为 0.107 m,且所有组别平均横向偏差均在 0.074 m 以内。融合导航系统在整个自动对行过程中,横向偏差始终保持在较小范围,未出现明显的偏差累积或失控情况,证明激光雷达与北斗融合导航系统具备较高的对行精度,能够满足烟草收获机自动对行收获实际作业需求。

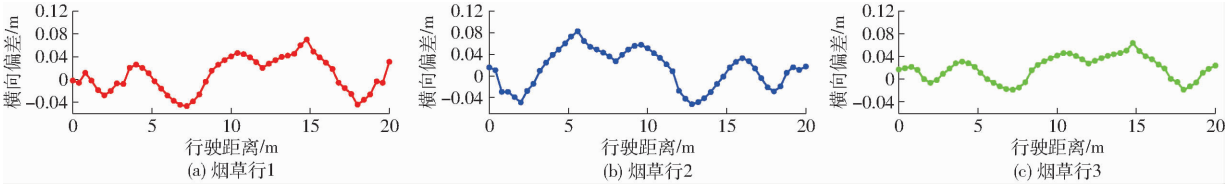

图 19 实车轨迹横向误差

Fig. 19 Real-vehicle trajectory lateral error

4 结论

(1)提出了一种基于历史轨迹引导的动态 ROI 点云提取方法。利用烟草收获机历史轨迹拟合点云处理中心线,结合激光雷达前视距离、收获机车速以及烟草点云三维信息对点云进行动态 ROI 提取,实现了目标烟草行点云精准裁剪,有效降低了点云处理数据量,缩短了计算时间。

(2)改进了 K-means 聚类方法,将 ROI 垂直投影获取点云密度分布,利用滑动窗口算法求解密度峰值,以此确定初始聚类中心。该算法有效提升了烟草行点云相互遮挡严重时聚类准确性与稳定性。

(3)田间自动对行试验结果表明,点云处理中心线与烟草作物中心线平均横向偏差为 0.043 m;烟草行导航线与人工标定烟草行导航线平均角度偏差为 2.34°;烟草行跟踪试验平均横向偏差为 0.074 m,能够满足烟草收获作业对行行驶要求。算法平均耗时 148.95 ms,满足收获作业实时性要求。

参 考 文 献

[1] 罗锡文, 胡炼, 何杰, 等. 中国大田无人农场关键技术研究与建设实践[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 1-16.
LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 1-16. (in Chinese)

[2] 李贝利. 刍议中国烟草机械制造业的国际竞争力[J]. 中国烟草学报, 2023, 29(6): 113-119.
LI Beili. Discussion on the international competitiveness of China's tobacco machinery manufacturing industry[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2023, 29(6): 113-119. (in Chinese)

[3] 刘成良, 贡亮, 苑进, 等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 1-22, 55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 1-22, 55. (in Chinese)

[4] 韩树丰,何勇,方慧.农机自动导航及无人驾驶车辆的发展综述[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(4): 381-391, 515.
HAN Shufeng, HE Yong, FANG Hui. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: a review[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Sciences), 2018, 44(4): 381-391, 515. (in Chinese)

[5] GENG Aijun, HU Xiaolong, LIU Jiazhen, et al. Development and testing of automatic row alignment system for corn harvesters [J]. Applied Sciences, 2022, 12(12): 6221.

[6] 戴祯, 郭延超, 王笑乐, 等. 酿酒葡萄收获机自动对行驾驶局部路径动态规划算法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 124-135.
DAI Zhen, GUO Yanchao, WANG Xiaole, et al. Local path dynamic programming algorithm for automatic row alignment traveling of wine grape harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 124-135. (in Chinese)

[7] 李涛，周进，徐文艺，等. 根茎类作物收获机自动对行系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(11)：102－110.
LI Tao，ZHOU Jin，XU Wenyi，et al. Design and test of auto-follow row system employed in root and stem crops harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(11)：102－110.（in Chinese）

[8] 王申莹，胡志超，CHEN Charles，等. 牵引式甜菜联合收获机自动对行系统设计与台架试验[J]. 农业机械学报，2020，51(4)：103－112，163.
WANG Shengying，HU Zhichao，CHEN Charles，et al. Design and test of auto-follow row system employed in root and stem crops harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：103－112，163.（in Chinese）

[9] DONG Naixi，ZHANG Zhen，LI Chuangchuang，et al. Design of a deviation detection sensor and an auto-follow row system for corn harvesters[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，2023，237(9)：2132－2142.

[10] 何创新，巩蕾，苗中华，等. 基于平行轨迹导航的采棉机自动对行控制方法[J]. 农业机械学报，2024，55(6)：34－41.
HE Chuangxin，GONG Lei，MIAO Zhonghua，et al. Automatic row-follow control method for cotton picker based on parallel trajectory navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(6)：34－41.（in Chinese）

[11] 刘兆朋，张智刚，罗锡文，等. 雷沃 ZP9500 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）

[12] 郑康，韩长杰，翟长远，等. 苗期作物的高地隙喷雾机对行施药系统设计与试验[J]. 中国农机化学报，2025，46(2)：98－104.
ZHENG Kang，HAN Changjie，ZHAI Changyuan，et al. Design and experiment of row-oriented spraying system of high clearance sprayer for seedling crops[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2025，46(2)：98－104.（in Chinese）

[13] LUO Yusen，WEI Lele，XU Lizhang，et al. Stereo-vision-based multi-crop harvesting edge detection for precise automatic steering of combine harvester[J]. Biosystems Engineering，2022，215：115－128.

[14] ZHOU Yang，YANG Yang，ZHANG Boli，et al. Autonomous detection of crop rows based on adaptive multi-ROI in maize fields[J]. International Journal of Agriculture and Biotechnology，2021，14(4)：217－225.

[15] 韩长杰，郑康，赵学观，等. 大田甘蓝作物行识别与对行喷雾控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(6)：89－101.
HAN Changjie，ZHENG Kang，ZHAO Xueguan，et al. Design and experiment of row identification and row-oriented spray control system for field cabbage crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(6)：89－101.（in Chinese）

[16] 陈耀晖，李家一，鲍泽韩，等. 自主导航柑橘表型巡检机器人设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(3)：49－57.
CHEN Yaohui，LI Jiayi，BAO Zehan，et al. Design and experimentation of autonomous navigated citrus phenotype inspection robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(3)：49－57.（in Chinese）

[17] 江庆，安东，韩华宇，等. 基于激光雷达与 RGB 相机融合的玉米作物行检测算法研究[J]. 农业机械学报，2024，55(10)：263－274.
JIANG Qing，AN Dong，HAN Huayu，et al. Maize crop row detection algorithm based on fusion of LiDAR and RGB camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(10)：263－274.（in Chinese）

[18] 印祥，安家豪，王艳鑫，等. 高地隙施药机自动驾驶系统研制与试验[J]. 农业工程学报，2021，37(9)：22－30.
YIN Xiang，AN Jiahao，WANG Yanxin，et al. Development and experiments of the autonomous driving system for high-clearance spraying machines[J]. Transactions of the CSAE，2021，37(9)：22－30.（in Chinese）

[19] 张刚，马强龙，马标，等. 基于激光雷达传感器的小麦收获导航线实时检测[J]. 农业开发与装备，2022(2)：19－22.
ZHANG Gang，MA Qianglong，MA Biao，et al. Real-time detection of wheat harvesting navigation line based on laser radar sensors[J]. Agricultural Development & Equipments，2022(2)：19－22.（in Chinese）

[20] 杨洋，马强龙，陈志桢，等. 激光雷达实时提取甘蔗垄间导航线[J]. 农业工程学报，2022，38(4)：178－185.
YANG Yang，MA Qianglong，CHEN Zhizhen，et al. Real-time extraction of the navigation lines between sugarcane ridges using LiDAR[J]. Transactions of the CSAE，2022，38(4)：178－185.（in Chinese）

[21] HE Jing，DONG Wenhao，TAN Qingneng，et al. A variable-threshold segmentation method for rice row detection considering robot travelling prior information[J]. Agriculture，2025，15(4)：413.

[22] 周明宽，夏俊芳，杨方，等. 基于 Hough 矩阵和 RANSAC 算法的果园视觉导航平台系统设计与试验[J]. 农业工程技术，2022，42(21)：101.
ZHOU Mingkuan，XIA Junfang，YANG Fang，et al. Design and experiment of visual navigated UGV for orchard based on Hough matrix and RANSAC[J]. Agricultural Engineering Technology，2022，42(21)：101.（in Chinese）

[23] YANG Yang，LI Yankai，WEN Xing，et al. An optimal goal point determination algorithm for automatic navigation of agricultural machinery：improving the tracking accuracy of the pure pursuit algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2022，201：194.