doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.012

# 酿酒葡萄收获机自动对行驾驶局部路径动态规划算法

戴　祯[1]　郭延超[2]　王笑乐[1]　张志宁[1]　戴宝宝[1]　杨　洋[1]　张　铁[3]　陈黎卿[1]

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 智能农业动力装备全国重点实验室, 洛阳 471039;
3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083)

**摘要**: 葡萄精准对行采收可有效减少收获机振动机构与篱架碰撞几率,是实现大规模机械化采收的重要手段。基于 Frenet 坐标系下行间局部行驶场景模型,本文提出一种葡萄收获机自动对行路径规划算法。以全局作业路径为参考线,通过车载激光雷达实时识别前方葡萄行,利用 K-means 算法聚类葡萄点云;采用 Lattice 算法根据行驶车速对前方行驶区域动态点阵采样,基于五次多项式生成局部路径簇;以前、后轮转向极限位置为收获机轮廓特征点,进行特征点与横向条带分割的葡萄行最小包络矩形碰撞检测,并计算各条局部路径相对葡萄行和参考线的偏离代价;根据作业工况和环境条件确定葡萄行偏离参考线的决策限值,采用动态规划算法对加权求和后的偏离代价进行寻优,获得路径簇中代价最小路径作为当前局部路径;利用机器人仿真软件 Gazebo 和 Rviz 联合仿真并开展实车试验。结果表明,规划的局部路径相对葡萄行平均横向偏差为 4.37 cm,最大横向偏差为 10.95 cm,生成局部路径平均绝对曲率为 0.061 2 $m^{-1}$,最大绝对曲率为 0.201 1 $m^{-1}$。在全局路径相对葡萄行偏移较大时,局部路径能够有效纠正偏差,满足葡萄收获作业对行驾驶要求。在单次规划 6 m 路径的仿真试验中,本文算法平均耗时 213 ms/次,最大耗时 337 ms/次;规划 6 m 路径实车试验中,本文算法平均耗时 577 ms/次,最大耗时 816 ms/次。研究结果可为葡萄园场景下农机局部路径规划提供参考。

**关键词**: 葡萄收获机; 对行局部路径; 动态撒点采样; 路径偏移计算; 偏离代价寻优

**中图分类号**: S225.93　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0124-12　　**OSID**:

# Local Path Dynamic Programming Algorithm for Automatic Row Alignment Traveling of Wine Grape Harvester

DAI Zhen[1]　GUO Yanchao[2]　WANG Xiaole[1]　ZHANG Zhining[1]　DAI Baobao[1]　YANG Yang[1]
ZHANG Tie[3]　CHEN Liqing[1]

(1. *School of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*
2. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Luoyang* 471039, *China*
3. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*)

**Abstract**: Accurate row alignment harvesting of grapes can effectively reduce the collision between vibration mechanism of the harvester and the trellis, which is an important means to achieve large-scale mechanized harvesting. Based on the local driving scene model between grape rows in Frenet coordinate system, an automatic row alignment path planning algorithm for grape harvesters was proposed. Using the global operation path as a reference line, the algorithm utilized onboard LiDAR to identify grape rows ahead in real time, and applied the K-means algorithm to cluster the point cloud of grape rows. The Lattice algorithm was used to dynamically sample the driving area ahead according to the traveling speed, and then the local path clusters were generated based on fifth-order polynomials. The extreme steering positions of the front and rear wheels were taken as the feature points of the harvester, and then the collision detections were conducted between feature points and the lateral segmentation minimum bounding rectangle of grape rows, and the offset costs of each local path relative to grape rows and the

收稿日期: 2024-11-20　修回日期: 2024-12-22

**基金项目**: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002001)、智能农业动力装备全国重点实验室开放课题(SKLIAPE2023012)、芜湖市科技特派员专项(311222447023)

**作者简介**: 戴祯(1999—),男,硕士生,主要从事农业机械智能化控制研究,E-mail: daizhen0019@163.com

**通信作者**: 王笑乐(1990—),男,讲师,博士,主要从事智能农业机械装备研究,E-mail: wangxiaole@ahau.edu.cn

global path were calculated. Based on the operating states and environment condition, the decision limits of the grape line deviating from the reference line were determined, and the weighted sum of the offset costs were optimized by dynamic programming algorithm, and then the path with the minimum cost in the path cluster can be obtained as the current local path. The algorithm was validated through simulation by using the robot simulation software Gazebo and Rviz, as well as real experimental tests. The results showed that the average lateral error of the planned local path relative to grape rows was 4.37 cm, and the maximum absolute curvature was 0.201 1 $m^{-1}$. When the global path deviated significantly from the grape row, the local path can effectively correct the deviation and meet the driving requirements for grape harvesting operations. In the simulation test for planning a path of 6 m, the average processing time of this algorithm was 213 ms per iteration, with a maximum of 337 ms per iteration. In the experimental test for planning a path of 6 m, the average processing time was 577 ms per iteration, with a maximum of 816 ms per iteration. The relevant research methods can provide reference for local path planning of agricultural machinery in vineyard scenarios.

**Key words**: grape harvester; row alignment path planning; dynamic sprinkling sampling; path offset calculation; offset cost optimization

## 0　引言

我国酿酒葡萄种植规模不断扩大,葡萄园机械化作业已成为必然趋势[1-2],具备自动采收能力的葡萄收获机成为实现全程机械化的关键组成部分。葡萄扒藤上架、松土埋藤等环节易造成篱架倾斜,收获机振动分离机构拍打操作需要快速修正横向偏差[3],避免碰撞篱架,现有基于全局路径的导航技术[4-5]对葡萄园生产作业适应性不强。为此,研究葡萄收获机精准对行算法,快速修正全局路径偏移带来的横向偏差,实现基于动态局部路径自动对行驾驶[6-7],是解决上述问题的关键技术之一。

农业机械对行驾驶技术[8-10]的核心是动态路径规划与精准对行控制。在路径规划方面,李雨桐等[11]设计了一种根据农田边界生成全局路径的方法,减少了漏耕漏种现象。郑路等[12]提出了一种基于测绘信息生成全局作业路径,利用雷达监测生成局部最优路径的方法,提升了农业机器人作业精度。杨丽丽等[13]提出了一种基于二次规划的局部路径规划算法,实现了机耕道场景下农机动态避障和速度规划。胡林等[14]基于五次多项式进行初次路径规划并进行改进优化,成功规划了超车换道路径。苏卫星等[15]提出基于实时环境风险场的局部路径规划框架,能够规划出平顺高效、低风险的行驶路径。韩长杰等[16]设计了一种基于机器视觉的大田甘蓝对行喷雾控制系统,能够有效获取甘蓝作物特征与定位信息,实现精准对行控制。李媛媛等[17]采用改进动态规划算法,设计了一套果园机器人路径规划系统,能够在果园复杂环境中规划出一条无碰撞的最优路径。FAN 等[18]提出了一种基于 Frenet 坐标系的行驶路径及速度迭代优化方法,通过先采样、后优化的方式规划智能车辆动态轨迹。

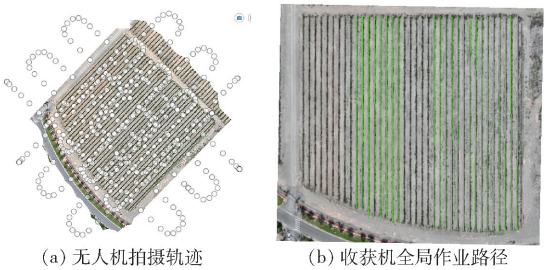
与大田对行喷药、机耕道对行行走、果园对行采摘等作业方式不同,酿酒葡萄机械化采收依靠收获机骑跨于葡萄架上方,通过内部分离装置拍打葡萄来实现[19],对收获机相对葡萄行位置精度要求较高。当全局作业路径与葡萄行存在较大偏差时,无法满足自动采收作业要求。为此,本文提出一种在全局路径引导下局部路径动态规划算法。将全局作业路径作为局部路径规划的实时参考线,基于车载激光雷达识别前方葡萄行,采用多项式拟合葡萄行聚类中心点,作为对行目标线。计算局部路径簇各条路径相对参考线和目标线的偏离代价,根据车速、行距等参数确定葡萄行偏离参考线的决策限值,采用动态规划算法获得加权求和后的最小代价路径作为当前局部路径,同步进行收获机与葡萄行碰撞检测,以实现精准对行控制。

## 1　基于点云地图的全局路径规划

采用低空无人机摄影技术,从倾斜、垂直等多角度对葡萄园进行全方位拍摄,获取葡萄园三维图像与点云信息。利用多视图图像、点云拼接技术构建葡萄园高精三维地图。选用大疆 Mavic3E 无人机搭载机械快门 4/3 英寸广角相机(2 000 万有效像素,最大分辨率 5 280 像素 ×3 956 像素)和实时动态差分定位模块(Real-time kinematic,RTK),具备厘米级定位功能(垂直定位误差为 2 cm/km,水平定位误差为 1.2 cm/km)。该无人机低空拍摄时不仅能够捕捉高清晰度地面影像,还通过其搭载的 RTK 传感器精确记录拍摄时的位置信息,确保影像数据地理准确性。

数据采集区域位于山东省烟台市莱山区(东经

121°40′23″,北纬 37°31′16″)的瀑拉谷酿酒葡萄种植园。使用 DJI Pilot 软件规划 1 组垂直摄影、4 组倾斜摄影航线,多角度拍摄葡萄园,如图 1 所示。利用 DJI Terra 软件提取图像数据,通过图像特征点与目标平面元素的融合,实现多视图图像密集匹配,形成葡萄园三维高精度地图,如图 1a 所示。



(a) 无人机拍摄轨迹 (b) 收获机全局作业路径

图 1 葡萄园无人机摄影轨迹及全局作业路径

Fig. 1 Trajectory of aerial drone in vineyard and global operation path

对葡萄行点云采用体素栅格下采样,在不损失重要特征信息情况下减小点云数量,使用 RANSAC 算法分割地面点云与植株点云,滤除地面点云。采用 K-means 算法聚类葡萄行的特征点,利用最小二乘法对特征点进行五次多项式拟合,获得作业全局路径。地头转向路径采取两行间隔的弓形转弯,满足葡萄收获机转弯要求,与作业路径拼接形成全局路径,如图 1b 所示。实测结果表明,无人机拍摄获取全局路径与葡萄行横向误差最大值为 27.4 cm,平均误差为 12.7 cm,4P－1 型葡萄收获机中枢分离机构最佳作业半幅宽度为 12 ~ 25 cm,全局路径精度无法满足对行采收作业要求。

## 2 对行驾驶局部路径规划算法

### 2.1 局部路径规划算法框架

局部路径规划算法框架如图 2 所示。以全局路径和北斗定位作为位置信息输入,通过激光雷达感知葡萄行信息,并将位置和葡萄行信息从笛卡尔坐标系转换至 Frenet 坐标系。采用 Lattice 算法,根据作业时行驶速度,在车体前方可行驶区域动态规划采样点将空间离散,使用五次多项式曲线连接采样点形成路径簇,利用动态规划算法求解路径簇中每一条路径代价,选取路径簇中代价最小路径作为跟踪局部路径。

### 2.2 行间行驶场景模型

收获机自动对行驾驶需获得的信息包括:由高精地图提取的行间宽度和全局路径信息,由激光雷达实时探测的葡萄行位置和轮廓信息,由组合导航实时获取的收获机定位和速度信息。为准确描述收获机、全局路径和葡萄行三者位置关系,免受道路曲率的影响,以全局路径作为参考线,分别构建笛卡尔坐标系和 Frenet 坐标系下行间局部行驶场景模型,如图 3 所示。

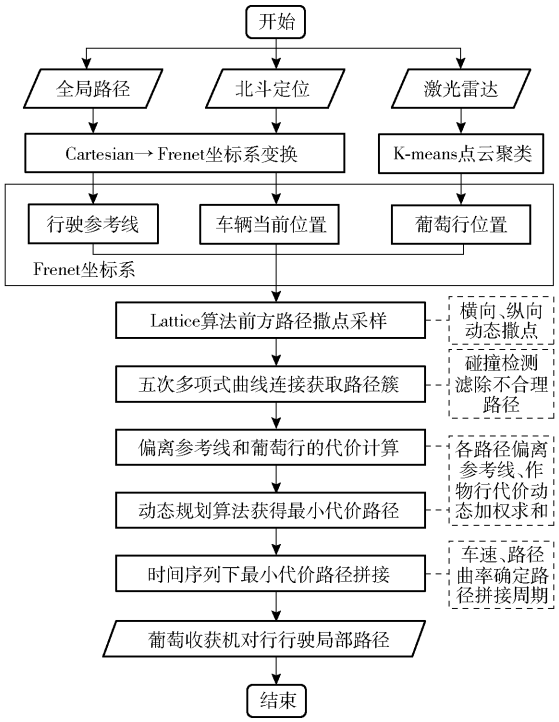



图 2 局部路径规划算法框架

Fig. 2 Framework of local path planning algorithm

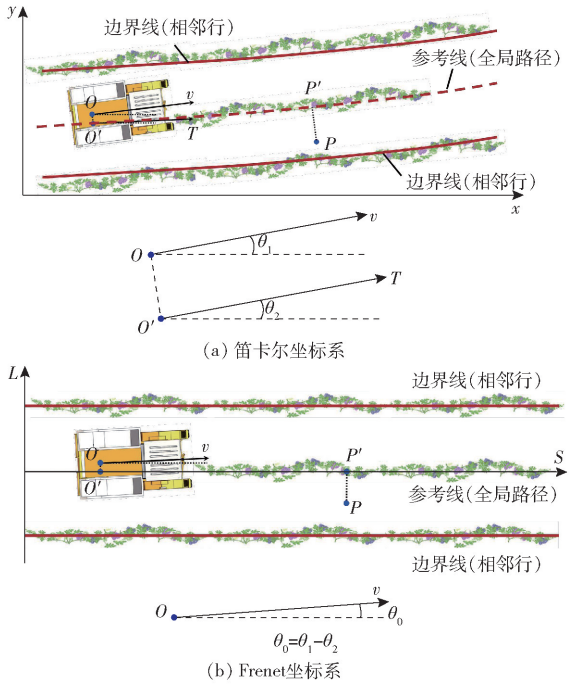



图 3 笛卡尔坐标系和 Frenet 坐标系下行间行驶模型

Fig. 3 Driving model between trellis in Cartesian coordinate system and Frenet coordinate system

由图 3 可以看出,相比笛卡尔坐标系,Frenet 坐标系能够将不规则形状的行间道路转换为直道区域,直观表达收获机行驶距离,以及葡萄行和收获机相对全局路径的位置,从而更容易线性约束。

### 2.3　动态点阵栅格采样

#### 2.3.1　纵向撒点范围和间距确定

路径规划前，需要对车辆前方一段距离的空间进行撒点采样，动态规划算法通过这些采样点求解最优路径。动态规划算法在 $S$ 方向（纵向）和 $L$ 方向（横向）分别使用等间隔采样，$S(t)$ 表示点 $t$ 在 $S$ 方向上坐标，$L(k)$ 表示点 $k$ 在 $L$ 方向上坐标，则有

$$S(t)=S(t-1)+\Delta s(v)\quad(t=1,2,\cdots,q(v)) \tag{1}$$

$$L(k)=L(k-1)+\Delta l\quad(k=1,2,\cdots,p) \tag{2}$$

式中　$q(v)$——纵向采样点数量

$p$——横向采样点数量

$\Delta s(v)$——纵向采样间隔，m

$\Delta l$——横向采样间隔，m

$v$——车速，m/s

4P－1 型葡萄收获机采收作业行驶速度通常为 0.5 ~ 2 m/s，最低车速与最高车速间存在 4 倍变化，应考虑不同车速下纵向撒点数量和采样间距对规划路径的影响，设定

$$\begin{cases} q(v)=7,\Delta s(v)=1\text{ m} & (0.5\text{ m/s}<v\leqslant 1.2\text{ m/s}) \\ q(v)=9,\Delta s(v)=1\text{ m} & (1.2\text{ m/s}<v\leqslant 1.6\text{ m/s}) \\ q(v)=11,\Delta s(v)=1\text{ m} & (1.6\text{ m/s}<v\leqslant 2\text{ m/s}) \\ q(v)=9,\Delta s(v)=1.5\text{ m} & (v>2\text{ m/s}) \end{cases} \tag{3}$$

采用的车载激光雷达前视范围可通过调整俯视角在 4 ~ 12 m 范围进行调整，较高车速时，增大激光雷达前视范围，增加纵向采样长度；较低车速时减小前视范围，减少点云数据量，提高处理效率。相同横向宽度下，不同纵向采样间距会影响道路平滑度。较短的纵向间距使规划路径曲折，由于葡萄收获机质心较高，应选择较为平滑的道路行驶；较长的采样间距容易降低局部路径对葡萄行贴合度，降低对行驾驶精度。

为确定纵向采样间距，使用机器人仿真软件 Gazebo 进行收获机行驶仿真试验。在 Gazebo 软件中建立收获机动力学模型，使用 IMU 模块记录收获机侧向加速度，使用 Odom 模块记录收获机实时位置。在 Rviz 软件中显示全局路径和局部路径（图 4）。纵向采样间距过小时，路径曲率变化较大（图 4a）；纵向采样间距过大时，局部路径易出现超调（图 4b）；横向采样间隔过大时，局部路径跟踪精度降低（图 4d）。因此，需根据车身尺寸及行驶速度，合理规划纵向、横向采样间距。

距离参考线相同横向偏差条件下，不同纵向采样间距能够获得不同局部路径。将不同采样间距下的局部路径作为收获机跟踪路径，通过计算行驶时侧向加速度、空间位置和代码运行时间选择纵向采样间距。当横向采样间距 0.5 m 时，不同纵向间距

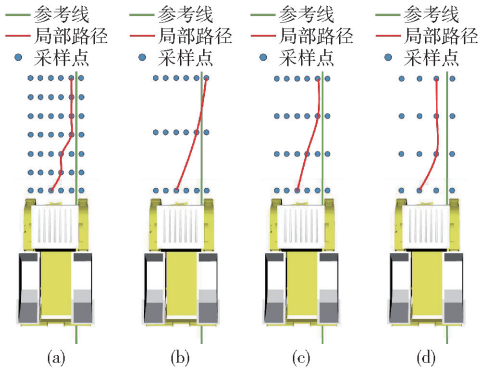



图 4　局部路径平滑度随采样间距变化

Fig. 4　Changes of local path with sampling interval

下侧向加速度、局部路径至葡萄行中心点距离计算结果如表 1 所示。

**表 1　葡萄收获机行驶过程仿真结果**

**Tab. 1　Simulation results of grape harvester driving process**

| 纵向采样间隔/m | 侧向加速度均值/(m·s$^{-2}$) | 局部路径偏离均值/cm | 代码平均运行时间/ms |
|---|---|---|---|
| 0.5 | 0.113 | 1.85 | 912 |
| 1.0 | 0.108 | 3.26 | 213 |
| 2.0 | 0.096 | 4.63 | 107 |

减小纵向采样间隔虽能获得更贴合参考线的路径，但由于路径更加曲折，导致侧向加速度较大，影响收获机行驶平稳性，且算法运行时间较长。增大采样间隔虽算法运行时间短、侧向加速度小，但规划路径偏离葡萄行较远，降低葡萄采收效率。考察葡萄收获机以车速 1 m/s 作业时局部路径规划效果，根据式（3）得出该车速下纵向采样点数量 $q(v)$ 为 7，纵向采样间隔 $\Delta s(v)$ 为 1 m，纵向采样长度 $S$ 为 6 m。

#### 2.3.2　横向动态撒点采样

葡萄收获机拍打装置是用于将葡萄从藤上抖落的装置，位于驾驶室正下方，如图 5 所示。$L_h$ 为两侧拍打装置间距；极限位置为葡萄收获机偏至一侧拍打装置与葡萄架到达安全距离时的位置，$l_l$、$l_r$ 分别为左、右极限位置；$d$ 为葡萄行平均宽度。

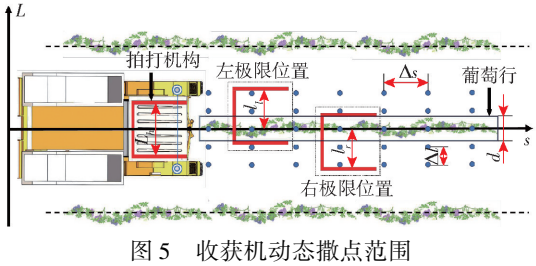



图 5　收获机动态撒点范围

Fig. 5　Dynamic sampling range of harvester

葡萄收获机行驶时横向撒点采样范围受拍打装置位置限制，撒点宽度应为 $l_l$ 与 $l_r$ 和，考虑篱架倾斜对收获机安全作业的影响，在葡萄行平均宽度 $d$ 基础上向

两侧各扩展 $\Delta d/2$ 安全距离,则横向撒点范围 $l_z$ 为

$$l_z = l_l + l_r - d - \Delta d \tag{4}$$

葡萄收获机偏移距离 $s$ 为

$$s = \begin{cases} l_l - L_h/2 & (l \geqslant 0) \\ l_r - L_h/2 & (l < 0) \end{cases} \tag{5}$$

式中 $l$——收获机在 Frenet 坐标系下横向偏移

当收获机到达左右两侧极限位置时,$l_l$、$l_r = L_h$,即最大偏移距离为 $(L_h - d)/2$,由此可得葡萄收获机相对于葡萄架中心位置偏移率 $p_l$ 为

$$p_l = \begin{cases} \dfrac{l_l - L_h/2}{(L_h - d)/2} \times 100\% & (l \geqslant 0) \\ \dfrac{l_r - L_h/2}{(L_h - d)/2} \times 100\% & (l < 0) \end{cases} \tag{6}$$

对于横向撒点间距,较大的撒点间距可使拟合的路径更平滑,但纵向跟踪精度会降低;较小的横向间距意味着更高的精度,但会造成系统运算量过大导致控制滞后,同时也加大对机械结构的考验。因此,结合前期仿真及试验测试数据,在横向位置根据偏移率 $p_l$ 对撒点距离进行动态规划

$$\Delta l = \begin{cases} 0.3 & (p_l \leqslant 30\%) \\ 0.25 & (30\% < p_l \leqslant 50\%) \\ 0.3 & (p_l > 50\%) \end{cases} \tag{7}$$

## 2.4 五次多项式路径曲线

相对收获机由近及远的方式逐行连接采样点能够得到多条路径,形成的局部路径簇代表此刻前方区域的所有行驶路径。三次多项式轨迹在行驶速度上连续,但加速度无法连续。为了使收获机在加速度上也获得连续,除了路径首尾位置和速度的约束,还需要对首尾加速度进行约束。因此共有 6 个约束条件:起始位置 $l_0$、结束位置 $l_1$、起始速度 $\dot{l}_0$、结束速度 $\dot{l}_1$、起始加速度 $\ddot{l}_0$、结束加速度 $\ddot{l}_1$。采用五次多项式来表示行驶轨迹。

$$l = s(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \tag{8}$$

式中 $a_0$、$a_1$、$a_2$、$a_3$、$a_4$、$a_5$——系数

代入起点信息 $(s_0, l_0, \dot{l}_0, \ddot{l}_0)$,得到

$$\begin{cases} l_0 = a_0 + a_1 s_0 + a_2 s_0^2 + a_3 s_0^3 + a_4 s_0^4 + a_5 s_0^5 \\ \dot{l}_0 = a_1 + 2a_2 s_0 + 3a_3 s_0^2 + 4a_4 s_0^3 + 5a_5 s_0^4 \\ \ddot{l}_0 = a_2 + 6a_3 s_0 + 12a_4 s_0^2 + 20a_5 s_0^3 \end{cases} \tag{9}$$

式中 $s_0$——起始位置沿参考线的纵向位移

代入终点信息 $(s_1, l_1, \dot{l}_1, \ddot{l}_1)$,得到

$$\begin{cases} l_1 = a_0 + a_1 s_1 + a_2 s_1^2 + a_3 s_1^3 + a_4 s_1^4 + a_5 s_1^5 \\ \dot{l}_1 = a_1 + 2a_2 s_1 + 3a_3 s_1^2 + 4a_4 s_1^3 + 5a_5 s_1^4 \\ \ddot{l}_1 = a_2 + 6a_3 s_1 + 12a_4 s_1^2 + 20a_5 s_1^3 \end{cases} \tag{10}$$

式中 $s_1$——结束位置沿参考线的纵向位移

五次多项式曲线参数使用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} 1 & s_0 & s_0^2 & s_0^3 & s_0^4 & s_0^5 \\ 0 & 1 & 2s_0 & 3s_0^2 & 4s_0^3 & 5s_0^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6s_0 & 12s_0^2 & 20s_0^3 \\ 1 & s_1 & s_1^2 & s_1^3 & s_1^4 & s_1^5 \\ 0 & 1 & 2s_1 & 3s_1^2 & 4s_1^3 & 5s_1^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6s_1 & 12s_1^2 & 20s_1^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_0 \\ \dot{l}_0 \\ \ddot{l}_0 \\ l_1 \\ \dot{l}_1 \\ \ddot{l}_1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

将式(11)转换为矩阵形式,记为:$\boldsymbol{SA} = \boldsymbol{L}$,则五次多项式路径曲线参数为:$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{L}$。

采样撒点起始位置为车辆质心,即局部路径簇起始点,以 d$s$ 为纵向间隔,终点为纵向长度 6 m 处的采样点,有 $s_0 = s$,$l_0 = l$,$\dot{l}_0 = \tan\theta$,$\ddot{l}_0 = 0$,$\ddot{l}_1 = \ddot{l}_0 = 0$。

## 2.5 对行行驶碰撞检测

酿酒葡萄多采用篱架种植,收获时葡萄行近似为直线。葡萄种植园相邻行间距普遍为 2.5 ~ 3.5 m,研究对象 4P-1 型收获机宽度 4.1 m,拍打装置最大间距 0.8 m,收获机在左、右极限位置时,易与两侧相邻葡萄行及骑跨行发生碰撞。因此,有必要在规划局部路径时对路径上每一时刻的机身位置与相邻葡萄行及骑跨行进行碰撞检测,以滤除发生碰撞局部路径。图 6 为葡萄收获机碰撞检测标识点,通过前轮转向极限位置设置标识点宽度,通过前、后轮相对位置设置标识点长度,使车辆在沿葡萄行走时不会发生碰撞。

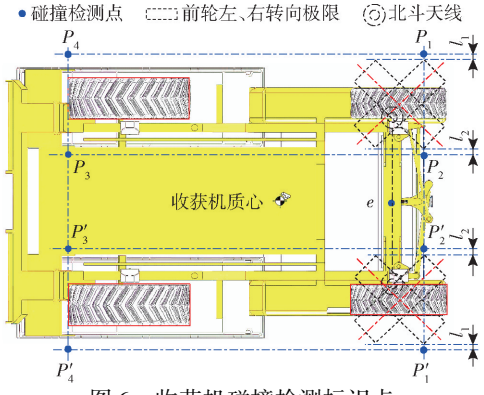



图 6 收获机碰撞检测标识点

Fig. 6 Marker points of collision detection of harvester

碰撞检测时,以两北斗导航天线中点 $e$(北斗系统定位点)为中心,根据车体尺寸和转向轮活动范围设置 8 个点 $P_1$、$P_2$、$P_3$、$P_4$、$P'_1$、$P'_2$、$P'_3$、$P'_4$ 作为收获机轮廓标识点,采用面积比较法进行碰撞检测。

如图 7 所示,对激光雷达获得的葡萄行点云数

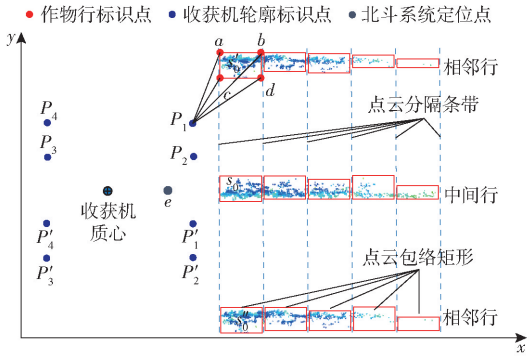



图 7　收获机与葡萄行碰撞检测原理图

Fig. 7　Collision detection principle between harvester and grape row

据采用横向水平条带分割后，获得沿葡萄行中心线的若干组点云，对每组点云进行平面二维投影，并运用最小矩形进行包络，即能够获得该组葡萄点云边界。

图 7 中点 $a$、$b$、$c$、$d$ 为激光雷达识别葡萄行后，采用水平条带分隔法，通过最小矩形包络方式得到的条带内葡萄点云 4 个顶点。根据车体尺寸和实时航向角，以点 $e$ 为中心计算出 $P_1 \sim P_4$、$P'_1 \sim P'_4$ 共 8 个点的位置，分别与葡萄行标识点 $a$、$b$、$c$、$d$ 连接。以点 $P_1$ 为例，将其分别与 $a$、$b$、$c$、$d$ 连线得到 $\triangle P_1ab$、$\triangle P_1ad$、$\triangle P_1bc$、$\triangle P_1dc$，累加 4 个三角形面积并与矩形 $abcd$ 面积作比较，计算过程为

$$S_{P_1mj} = \sqrt{q_{P_1mj}(q_{P_1mj} - l_{P_1m})(q_{P_1mj} - l_{P_1j})(q_{P_1mj} - l_{mj})} \tag{12}$$

其中

$$q_{P_1mn} = \frac{l_{P_1m} + l_{P_1j} + l_{mj}}{2} \tag{13}$$

式中　$m$、$j$——矩形顶点 $a$、$b$ 和矩形顶点 $c$、$d$

$l_{P_1m}$、$l_{P_1j}$、$l_{mj}$——$\triangle P_1mj$ 边长

$q_{P_1mj}$——计算三角形面积 $S_{P_1mj}$ 中间参数

$S_{P_1mj}$——$\triangle P_1mj$ 面积

三角形面积和为

$$S_{c'} = S_{P_2ab} + S_{P_2ad} + S_{P_2bc} + S_{P_2dc} \tag{14}$$

将三角形面积和 $S_{c'}$ 与矩形面积 $S_c$ 做差，即

$$\Delta S = S_c - S_{c'} \tag{15}$$

若 $\Delta S > 0$ 则未发生碰撞，返回碰撞代价为 0；若 $\Delta S < 0$ 则发生碰撞，返回 1 项极高代价，取 $e^{16}$。

## 2.6　代价计算

通过五次多项式曲线连接采样点后得到一段局部路径，为计算路径代价，首先将路径离散得到若干个点，然后计算这些点相对于参考线（全局路径）偏离代价和葡萄行偏离代价，根据车速、行距等参数确定葡萄行偏离参考线决策限值，对葡萄行和参考线偏离代价加权求和得到路径总代价，最后选择代价最小的路径用于跟踪局部路径。

### 2.6.1　参考线偏离代价

参考线偏离代价反映局部路径相对全局路径偏移程度。Frenet 坐标系下，路径离散点纵向偏差 $l$ 越大则点与全局路径距离越远，对应的路径代价越大。设每个离散点路径代价为 $\text{cost}p_i$，计算式为

$$\text{cost}l_p = \sum_{i=0}^{k} l^2 \text{cost}p_i \tag{16}$$

式中　$k$——离散点数量

$\text{cost}l_p$——路径的参考线偏离代价

### 2.6.2　葡萄行偏离代价

葡萄行偏离代价反映局部路径相对葡萄行的偏移程度，路径偏移葡萄行越远则代价越高。如图 8 所示，由 K-means 聚类算法处理水平条带分割后的葡萄行雷达点云，得到葡萄行不同位置的聚类中心点。通过坐标系变换将中心点位置由笛卡尔坐标系转到 Frenet 坐标系，得到葡萄行中心点 $p_n$ 在 Frenet 坐标系下坐标（$s_n$，$l_n$）。

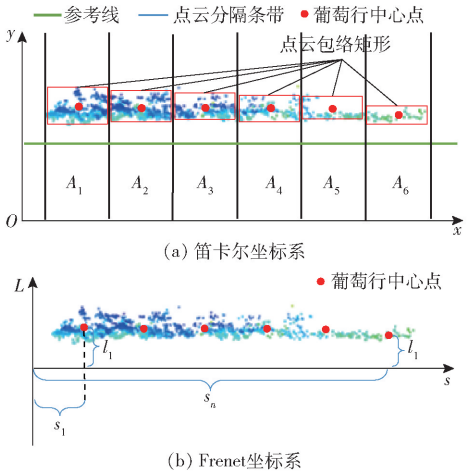



图 8　笛卡尔坐标系和 Frenet 坐标系下葡萄行中心点

Fig. 8　Grape row center points in Cartesian coordinate system and Frenet coordinate system

为保证规划局部路径精度，需滤除偏离参考线过大的葡萄行点。通过计算葡萄行点 $p_n$ 在 Frenet 坐标系下 $l_n$ 坐标均值 $\bar{l}_n$ 及各点方差 $S_l$ 来判断该点是否被滤除，计算式为

$$\begin{cases} \bar{l}_n = \dfrac{\sum_{i=0}^{n} l_i}{n} \\ S_l = \dfrac{\sum_{i=0}^{n} (l_i - \bar{l}_n)}{n} \end{cases} \tag{17}$$

式中　$l_i$——当前葡萄行点纵向偏差

$n$——激光雷达聚类的葡萄行点数量

葡萄行点云信息包括 Frenet 坐标系下的坐标（$s_i$，$l_i$）、纵向偏差均值 $\bar{l}_n$、纵向偏差方差 $S_l$。采

用一阶低通滤波算法处理各点方差，滤除方差过大的点，提高局部路径精度和平滑度，滤波公式为

$$l_i = l_{i-1} + \frac{2\pi dT_s}{2\pi dT_s + 1}(S_l - l_{i-1}) \tag{18}$$

式中 $l_{i-1}$——前 1 个葡萄行点纵向偏差

$T_s$——算法平均运行时间

图 9 中红色点为激光雷达聚类得到葡萄行中心点，当规划的全局路径偏离葡萄行时，增加葡萄行偏离代价会使规划的局部路径偏向葡萄行，提高对行驾驶精度。

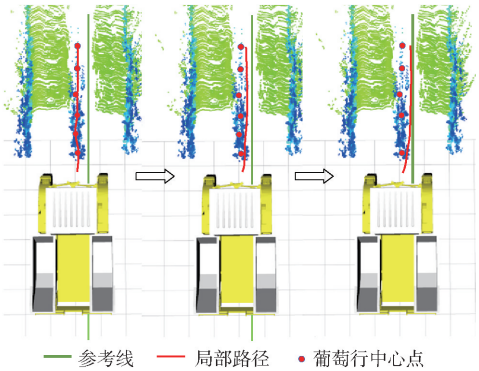



图 9 不同葡萄行偏离代价下局部路径

Fig. 9 Local paths at different offset costs of grape rows

sigmoid 函数可将输入值变换为 0 ~ 1 的输出值，将葡萄行与点之间横向偏差差值记为 $\Delta l_i$ 并作为 sigmoid 函数输入值。设离散点横向偏离代价为 $\text{costo}_i$，得到葡萄行偏离代价 $\text{cost}l_o$ 为

$$\text{cost}l_o = \sum_{i=0}^{k} \text{sigmoid}(\Delta l_i)\,\text{costo}_i \tag{19}$$

## 2.7 局部路径动态生成

由于葡萄园内不同葡萄行偏离参考线的距离不同，需要动态调整参考线偏离代价和葡萄行偏离代价权重来规划对行精度较高的路径。例如，当葡萄行偏离参考线过远时，1 条贴近葡萄行的局部路径的葡萄行偏离代价较小、参考线偏离代价较大，此时规划路径介于葡萄行与参考线之间。为解决这一问题，设置葡萄行偏离上限 $l_a$ 作为动态调整权重的指标。当葡萄行偏离参考线距离超出 $l_a$ 时，便增加葡萄行偏离代价权重、减少参考线偏离代价权重，使规划的路径更贴进葡萄行。

当葡萄行与参考线十分贴近，且点云在横向位置较为分散时，易导致规划的路径曲折、路径曲率大。为解决这一问题，设置葡萄行偏离下限 $l_b$ 作为动态调整权重的指标。当葡萄行偏离参考线的距离小于 $l_b$ 时，减少葡萄行偏离代价权重、增加参考线偏离代价权重，使规划的路径平滑。

综上，设参考线偏离代价系数为 $\omega_1$、葡萄行偏离代价系数为 $\omega_2$、葡萄行偏离上限为 $l_a$、葡萄行偏离下限为 $l_b$。根据葡萄行点 $p_n$ 在 Frenet 坐标系下纵向偏差 $l_n$ 均值来计算 $\omega_1$、$\omega_2$，计算式为

$$\omega_1 = 1 - \omega_2 \tag{20}$$

$$\omega_2 = \begin{cases} \text{sigmoid}(|\bar{l}_n - l_a|) & (\bar{l}_n \geqslant l_a) \\ \text{sigmoid}\left(\left|\bar{l}_n - \dfrac{l_a + l_b}{2}\right|\right) & (l_b < \bar{l}_n < l_a) \\ 1 - \text{sigmoid}(|\bar{l}_n - l_b|) & (\bar{l}_n \leqslant l_b) \end{cases} \tag{21}$$

$l_a$、$l_b$ 确定来源于仿真试验和实车试验，以提高对行的精准性和平顺性。当收获机尺寸、葡萄行间距、作业行驶速度、参考线相对于葡萄行的最大偏差发生变化时，根据仿真和试验结果进行调整。例如，当规划的局部路径与葡萄行横向偏差大于葡萄行宽度时，调小葡萄行偏离上限 $l_a$ 以增大葡萄行代价；当规划的局部路径曲率较大时，调大葡萄行偏离下限 $l_b$ 以减小路径曲率。

如图 10 所示，当 $\bar{l}_n \geqslant l_a$ 时，表明当前葡萄行偏离参考线较远，需增大葡萄行偏离代价以保证对行精度；当 $l_a < \bar{l}_n < l_b$ 时，表明当前葡萄行偏离参考线较小，以 $l_a$、$l_b$ 的中间值为参考以调整 $\omega_1$、$\omega_2$，保证对行精度的同时使路径平滑；$\bar{l}_n \leqslant l_a$ 时，表明当前行驶位置上葡萄行几乎与参考线重合，由于参考线曲率平滑、行驶侧向加速度小，需增大参考线偏离代价以增加行驶平顺性。

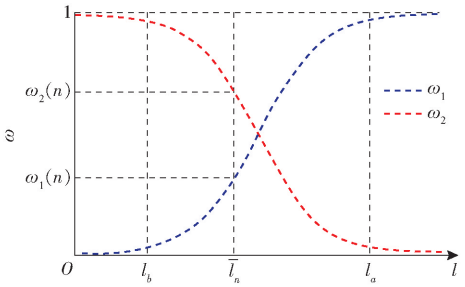



图 10 偏离代价比例系数变化曲线

Fig. 10 Changes of proportional coefficient of offset costs

为了寻找偏离代价值最小最优局部路径，动态规划过程分为两步：首先计算路径簇中每条路径代价，然后从最后一列采样点回溯，寻找代价最小采样点信息，并将其保存下来作为路径。如图 11 所

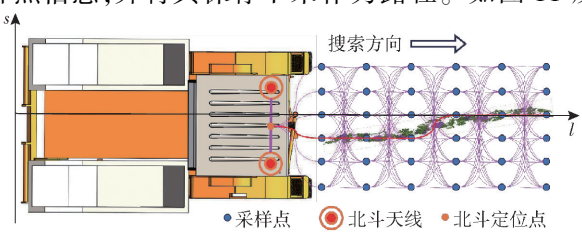



图 11 正向搜索采样点过程

Fig. 11 Process of searching sampling points forward

示，用五次多项式连接采样点得到路径，将每小段五次多项式曲线进行离散化求解其代价值，将代价值最小的采样点作为父节点，下一行采样点作为子节点，继续求解采样点成本值，直至最后一行采样点。

计算全部路径代价后，从最后一列采样点开始回溯寻求代价最小路径的采样点信息，将其保存下来作为动态规划路径。

## 3　局部路径跟踪方法

### 3.1　葡萄收获机运动学模型

葡萄收获机跟踪局部路径进行收获作业，行驶速度较低，轮胎受到侧向力较小，因此在不考虑侧偏、俯仰和侧倾等运动的条件下，可将四轮收获机简化为两轮自行车模型进行运动学分析，如图 12 所示。$(x_0,\ y_0)$为车辆后轮中心点坐标；$(x_f,\ y_f)$为车辆前轮中心坐标；$\varphi$ 为车辆航向角；$\delta$ 为前轮转向角；$L$ 为轴距。

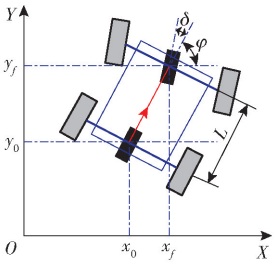



图 12　葡萄收获机运动学模型

Fig. 12　Kinematic model of grape harvester

笛卡尔坐标系下葡萄收获机运动学模型为

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{\varphi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\varphi\\ \sin\varphi\\ \tan\varphi/L\end{bmatrix} \tag{22}$$

### 3.2　局部路径动态预瞄跟踪方法

车辆在相同道路和速度条件下，基于 Pure Pursuit 算法的路径跟踪效果一定程度取决于预瞄距离[20]，不同预瞄距离下预瞄点差别较大，导致跟踪效果存在差异。

搜索最优预瞄点路径跟踪控制方法如图 13 所示，该算法根据车辆当前位置与目标路径间的距离来确定预瞄区域。在选定的预瞄区域中遍历路径点，基于车辆运动学模型预测下一时刻车辆状态，采用枚举算法搜索最优预瞄点，将该预瞄点代入 Pure Pursuit 算法，计算前轮转角作为车辆运动学模型的输入，最后得到新的车辆位姿状态量，将该状态量返回控制方法，实现闭环控制。

如图 14 所示，$p_2$ 为目标路径点；$\alpha$ 为车辆后轴中心与预瞄点所连向量与车辆偏航角的夹角；$l_d$ 为

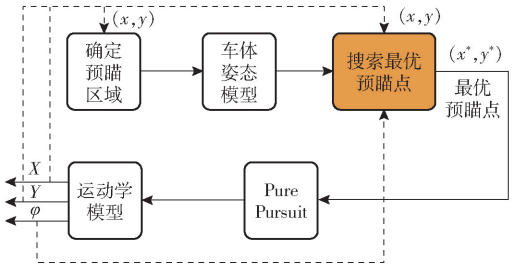



图 13　路径跟踪控制框图

Fig. 13　Framework of path tracking control method

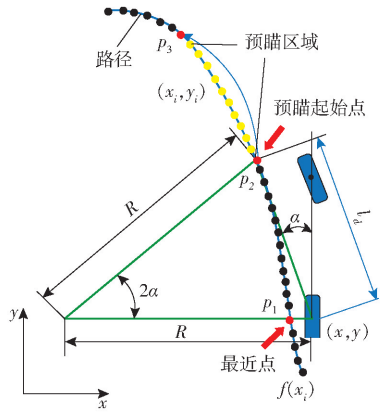



图 14　局部路径预瞄点跟踪原理图

Fig. 14　Principle of local path preview point tracking

预瞄距离；$R$ 为轨迹圆弧半径。需要确定前轮转向角 $\delta$，使后轴中心点轨迹圆弧能够经过点 $p_2$。

图 14 中，$(x,y)$为车辆当前位置坐标，$(x_i,y_i)$为目标路径点坐标，$p_1$ 为目标路径距离车辆当前位置最近点，$p_2$ 为预瞄区域起始点，$p_3$ 为预瞄区域终点，$f(x_i)$为目标路径。

根据 Pure Pursuit 算法，求解行驶过程中 $t$ 时刻前轮转角 $\delta(t)$，计算式为

$$\delta(t)=\arctan(Lk(t))=\arctan\frac{2L\sin\alpha(t)}{l_d} \tag{23}$$

## 4　对行驾驶虚拟仿真试验

为验证本文局部路径规划算法与跟踪算法有效性，基于 ROS 机器人操作系统下三维物理仿真平台 Gazebo 与三维可视化工具 Rviz 搭建联合仿真环境。导入无人机采集的高精度葡萄园模型与收获机三维模型，配置收获机各部件物理属性，引入里程计、运动控制与激光雷达插件，根据横向误差仿真结果验证算法有效性。

### 4.1　收获机模型搭建

采用 Solidworks 软件建立收获机三维模型，导出 urdf 格式文件，使用标签、属性配置各部件物理信息。将收获机 urdf 文件转为 xacro 文件并添加运动控制和激光雷达插件，配置各部件相对位置和运动关系。在仿真环境中控制收获机模型运动并输出激光雷达点云信息，如图 15 所示。

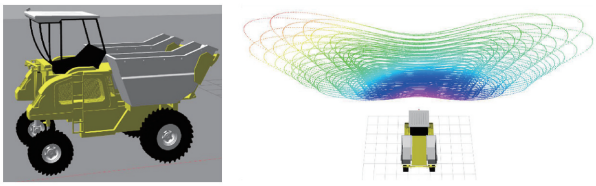


图 15 收获机仿真模型和激光雷达点云

Fig. 15 Harvester simulation model and Lidar point cloud

### 4.2 仿真环境搭建

将无人机建模得到的葡萄园高精地图导入 Gazebo 环境中,得到葡萄园高拟真场景,如图 16 所示。将此场景作为局部路径规划算法及跟踪运动控制的验证环境。

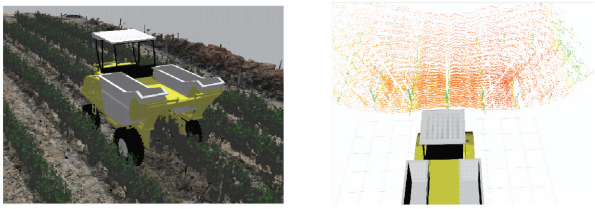


图 16 仿真环境下收获机模型和点云信息

Fig. 16 Harvester model and point cloud in simulation environment

### 4.3 对行驾驶仿真结果分析

局部路径跟踪仿真结果如图 17 所示,蓝色路径为已知的全局路径,红色线为规划局部路径。可看出,在全局路径相对葡萄行存在一定偏移时,动态规划局部路径与葡萄行贴合度较高。根据 Gazebo 软件中里程计插件记录的数据,得到 3 条相邻葡萄行局部路径规划结果及横向偏差,如图 18、19 所示。

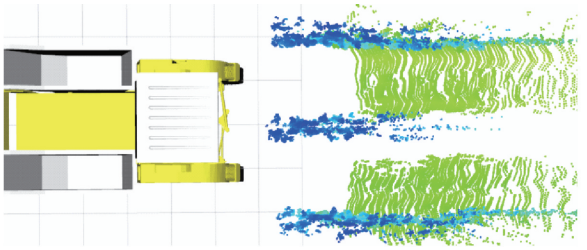


图 17 Rviz 软件中仿真结果

Fig. 17 Simulation results in Rviz software

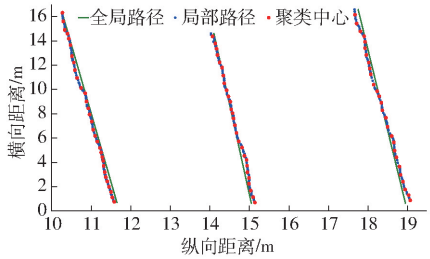



图 18 局部路径偏差仿真结果

Fig. 18 Simulation results of local paths

由图 19 可看出,仿真分析得到的聚类中心点所表示的葡萄行与无人机建模得到的全局路径存在一定横向偏差,规划得到的局部路径与聚类中心点的贴合度较高,表明动态规划的局部路径对葡萄行的跟踪效果较好,图 19 中聚类中心与局部路径相对全局路径的横向偏差一致性较高。

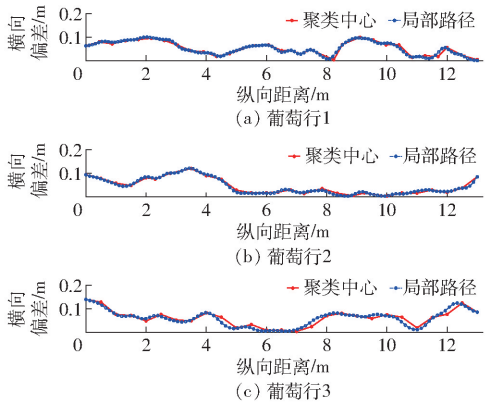



图 19 仿真试验局部路径与葡萄行相对全局路径偏差

Fig. 19 Offset of local paths and grape rows relative to global path

表 2 为仿真获得的葡萄行聚类中心和局部路径相对全局路径偏差结果。可以看出,3 条葡萄行中心线距全局路径横向偏差最大达 13.97 cm,平均值为 5.37 cm,局部路径距葡萄行中心线横向偏差最大值为 4.46 cm,平均值为 2.10 cm,能够满足葡萄收获机对行作业的精度要求。仿真得到的 3 条局部路径曲率变化曲线如图 20 所示,局部路径平均绝对曲率为 0.083 7 $m^{-1}$,最大绝对曲率为 0.198 3 $m^{-1}$,动态规划出的局部路径整体较为平滑。

**表 2 横向偏差仿真结果**

**Tab. 2 Simulation results of lateral offset** m

| 项目 | 葡萄行 1 | | 葡萄行 2 | | 葡萄行 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 聚类中心 | 局部路径 | 聚类中心 | 局部路径 | 聚类中心 | 局部路径 |
| 最大值 | 0.099 8 | 0.100 6 | 0.120 3 | 0.121 8 | 0.139 7 | 0.140 0 |
| 最小值 | 0.004 7 | 0.001 9 | 0.002 9 | 0.002 8 | 0.004 1 | 0.005 0 |
| 平均值 | 0.053 5 | 0.054 1 | 0.045 3 | 0.043 7 | 0.062 2 | 0.059 5 |

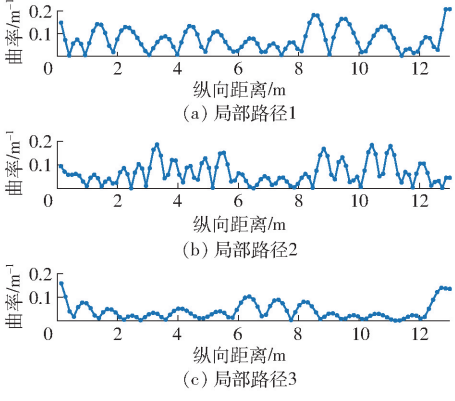



图 20 局部路径曲率仿真计算结果

Fig. 20 Simulation results of local path curvature

## 5　实车测试

### 5.1　对行驾驶控制系统平台

为验证局部路径规划算法的有效性，设计了一套酿酒葡萄收获机对行驾驶控制系统，如图 21 所示。该系统主要部件包括三维激光雷达、北斗定位设备、工控机、转向驱动电机、角度传感器、底层控制器、电源等，设备具体型号及参数如表 3 所示。软件开发基于 Ubuntu 20.04 系统，在 ROS 架构下采用 C++和 Python 联合编程，完成自动驾驶算法及动态路径规划算法的编写。

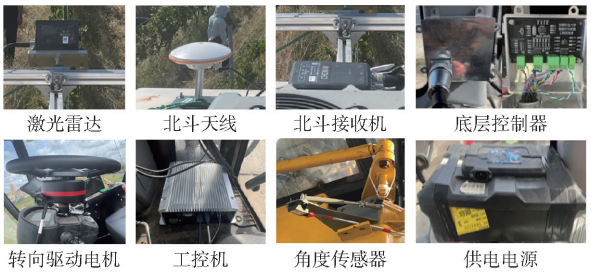



图 21　葡萄收获机对行驾驶系统部分设备

Fig. 21　Equipment of grape harvester alignment driving system

**表 3　试验设备型号及主要参数**

**Tab. 3　Type and main parameters of test devices**

| 硬件 | 型号 | 参数 |
|---|---|---|
| 激光雷达 | 大疆 Livox HAP | 量程：150 m@10% 反射率<br>测距随机误差：<2 cm<br>点云输出：452 000 点/s |
| 北斗定位设备 | 华测 CGI-430 | 水平定位精度：1 cm±1ppm<br>姿态精度：0.1°/2 m 基线<br>数据更新率：100 Hz |
| 转向驱动电机 | 联适 EMS2 | 功率：100 W<br>额定转速：100 r/mm<br>额定转矩：10 N·m |
| 角度传感器 | HWT905-232 | 量程：$X$、$Z$：±180°；$Y$：±90°<br>倾角精度：0.05° |
| 工控机 | 派勤 N-BOX-S3 | CPU：i3-1135G4<br>电源输入：12 V<br>系统内存：16 GB |

### 5.2　实车试验结果分析

酿酒葡萄收获机实车试验地点位于山东省烟台市莱山区（东经 121°40′23″，北纬 37°31′16″）的瀑拉谷酿酒葡萄种植园，使用 4P-1 型酿酒葡萄收获机搭载对行驾驶控制系统平台，试验在天气晴、土壤良好条件下进行（图 22）。

试验时，通过转速闭环系统将车速稳定在 3.6 km/h（1 m/s），对行驾驶系统进行自动转向，通过工控机输出提前规划的全局路径和算法动态规划的局部路径。收获机自动对行行驶过程中，基于激光雷达点云聚类的葡萄行中心点、全局路径和局部路径如图 23 所示。



图 22　实车试验场景

Fig. 22　Scenario of real vehicle test

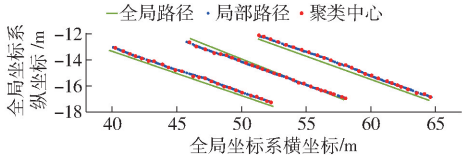



图 23　局部路径试验结果

Fig. 23　Test results of local paths

无人机规划全局路径与葡萄行聚类中心存在一定横向偏差，而动态规划的局部路径与葡萄行中心线贴合度较高，表明全局路径与葡萄行存在一定偏差时，实时规划的局部路径对葡萄行的跟踪效果较好。图 24 中局部路径和聚类中心相对全局路径的横向偏差较为一致，能够验证这一结论。局部路径横向偏差曲线无剧烈波动，表明局部路径较为平滑，能够满足收获机收获作业要求。

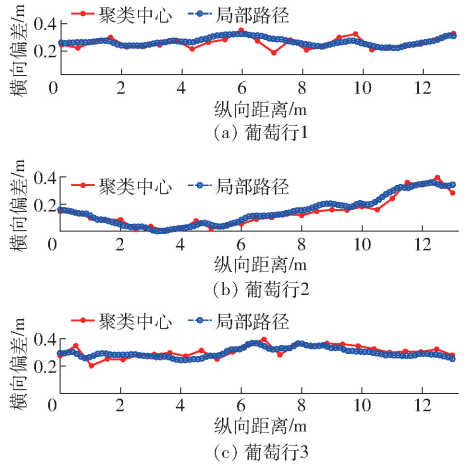



图 24　实车试验局部路径与葡萄行相对全局路径偏差

Fig. 24　Offset of local paths and grape rows relative to global path

表 4 为试验得出的葡萄行聚类中心和局部路径相对全局路径偏差结果。可以看出，3 条葡萄行中心线距全局路径横向偏差最大值达 39.48 cm，平均值 23.36 cm，表明无人机规划的全局路径与葡萄行存在一定偏差。局部路径距葡萄行中心线的横向偏差最大值 12.93 cm，平均值 5.06 cm，能够满足葡萄收

获机对行作业的精度要求。实车试验生成的局部路径与葡萄行的贴合度较虚拟仿真结果有所降低,主要原因是实车试验时葡萄行点云聚类难度较大,聚类结果与真实位置存在一定偏差,该算法对横向偏差较大的葡萄行中心线跟踪效果有所降低,但能够满足对行行驶要求。

**表 4 横向偏差试验结果**

**Tab. 4 Test results of lateral offset** cm

| 项目 | 葡萄行 1 | | 葡萄行 2 | | 葡萄行 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 聚类中心 | 局部路径 | 聚类中心 | 局部路径 | 聚类中心 | 局部路径 |
| 最大值 | 35.38 | 32.63 | 39.30 | 35.66 | 39.48 | 36.71 |
| 最小值 | 18.91 | 22.30 | 0.18 | 0.17 | 20.18 | 24.23 |
| 平均值 | 26.00 | 26.96 | 13.53 | 14.52 | 30.54 | 29.60 |

试验得到的 3 条局部路径曲率变化曲线如图 25 所示,局部路径平均绝对曲率为 0.061 2 $m^{-1}$,最大绝对曲率为 0.201 1 $m^{-1}$。可以看出,动态规划出的局部路径整体较为平滑,有利于葡萄收获机转向控制。

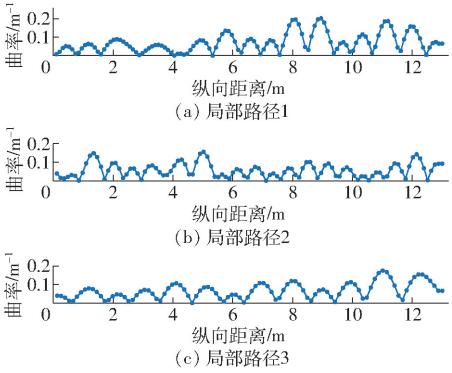



图 25 不同局部路径曲率试验结果

Fig. 25 Curvatures of different local paths from experiment results

虚拟仿真和实车试验中算法运行次数和时间如表 5 所示,实车试验时平均运行时长为 577 ms,高于仿真试验的 213 ms,原因是对行跟踪时激光雷达、北斗定位、角度传感器等设备运行耗时及内部信息传递存在一定时间延迟,能够满足车速 1 m/s 下单次规划 6 m 的要求。

**表 5 算法运行时长**

**Tab. 5 Running time of algorithm**

| 类别 | 运行次数 | 最长时长/ms | 最短时长/ms | 平均时长/ms |
|---|---|---|---|---|
| 仿真 | 50 | 337 | 107 | 213 |
| 实车 | 33 | 816 | 441 | 577 |

## 6 结论

(1)相较于使用单一全局路径进行对行驾驶,提出的将葡萄行中心线与全局路径作为双目标线,采用动态加权方式计算偏离代价以生成最优局部路径。在全局路径与葡萄行贴合度较高时,能够生成较为平滑局部路径;在全局路径偏离葡萄行时,能够生成贴合葡萄行的局部路径,减小了全局路径偏差带来的影响。

(2)在局部路径生成过程中引入了对行行驶碰撞检测算法,通过判断收获机轮廓特征点与葡萄行最小包络矩形相对位置,滤除收获机可能与葡萄行发生碰撞的局部路径,并加入了葡萄行两侧安全区域的定义,降低了作业时碰撞概率。

(3)葡萄园高拟真环境仿真试验和实车试验结果表明,规划的局部路径相对葡萄行平均横向偏差为 4.37 cm,最大横向偏差为 10.95 cm,生成局部路径平均绝对曲率为 0.061 2 $m^{-1}$,最大绝对曲率为 0.201 1 $m^{-1}$,能够满足葡萄收获作业对行行驶要求。单次规划 6 m 路径的实车试验中,本算法平均耗时 577 ms/次,最大耗时 816 ms/次,满足车速 1 m/s 的采收作业要求。

## 参 考 文 献

[1] 谢永良, 尹建军, 余承超,等. 轮式 AGV 沿葡萄园垄道行驶避障导航算法与模拟试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 13 -22.
XIE Yongliang, YIN Jianjun, YU Chengchao, et al. Obstacle avoidance navigation algorithm and analog experiment for wheeled AGV running along vineyard ridge road[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 13 -22. (in Chinese)

[2] 刘继展, 唐善奇, 单帅, 等. 机器人采摘葡萄果穗振动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 1 -8.
LIU Jizhan, TANG Shanqi, SHAN Shuai, et al. Simulation and test of grape fruit cluster vibration for robotic harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 1 -8. (in Chinese)

[3] 李成松, 高振江, 坎杂, 等. 酿酒葡萄果–蒂振动分离试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 39 -44.
LI Chengsong, GAO Zhenjiang, KAN Za, et al. Experiment of fruit - pedicle vibration separation of wine grape[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 39 -44. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 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）

[6] 毕松，余鑫. 基于3D点云分析的果园行间穿梭机器人路径规划方法[J]. 农业机械学报，2024，55(10)：37－50.
BI Song，YU Xin. Path planning method for inter-row shuttle in densely planted orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(10)：37－50.（in Chinese）

[7] 窦汉杰，陈震宇，翟长远，等. 果园智能化作业装备自主导航技术研究进展[J]. 农业机械学报，2024，55(4)：1－22.
DOU Hanjie，CHEN Zhenyu，ZHAI Changyuan，et al. Research progress on autonomous navigation technology for orchard intelligent equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(4)：1－22.（in Chinese）

[8] 孟志军，王昊，付卫强，等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报，2023，54(10)：1－24.
MENG Zhijun，WANG Hao，FU Weiqiang，et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(10)：1－24.（in Chinese）

[9] 肖珂，夏伟光，梁聪哲，等. 复杂背景下果园视觉导航路径提取算法[J]. 农业机械学报，2023，54(6)：197－204，252.
XIAO Ke，XIA Weiguang，LIANG Congzhe，et al. Visual navigation path extraction algorithm in orchard under complex background[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(6)：197－204，252.（in Chinese）

[10] 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）

[11] 李雨桐，周祥，李保忠，等. 拖拉机自动驾驶全局路径规划算法研究[J]. 拖拉机与农用运输车，2023，50(3)：75－79.
LI Yutong，ZHOU Xiang，LI Baozhong，et al. Research on global path planning algorithm for automatic driving of tractor[J]. Tractor & Farm Transporter，2023，50(3)：75－79.（in Chinese）

[12] 郑路，张啸，王建国，等. 基于宏微结合的田间作业机器人路径规划[J]. 农业机械学报，2023，54(9)：13－26.
ZHENG Lu，ZHANG Xiao，WANG Jianguo，et al. Path planning of field robot based on macro-micro combination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(9)：13－26.（in Chinese）

[13] 杨丽丽，唐晓宇，吴思贤，等. 机耕道自动驾驶农机局部路径规划[J]. 农业工程学报，2024，40(1)：27－36.
YANG Lili，TANG Xiaoyu，WU Sixian，et al. Local path planning for autonomous agricultural machinery on farm road[J]. Transactions of the CSAE，2024，40(1)：27－36.（in Chinese）

[14] 胡林，杨冬兆，张新，等. 基于DQP－LMPC的智能车超车换道动态路径规划[J]. 机械工程学报，2024，60(10)：171－181.
HU Lin，YANG Dongzhao，ZHANG Xin，et al. Dynamic path planning of intelligent vehicle overtaking lane change based on DQP－LMPC[J]. Journal of Mechanical Engineering，2024，60(10)：171－181.（in Chinese）

[15] 苏卫星，赵晓雯，温永刚，等. 基于环境风险的自动驾驶局部路径规划算法[J]. 信息与控制，2023，52(3)：369－381.
SU Weixing，ZHAO Xiaowen，WEN Yonggang，et al. Local path planning algorithm for autonomous driving based on environmental risk[J]. Information and Control，2023，52(3)：369－381.（in Chinese）

[16] 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）

[17] 李媛媛，汪威. 基于改进动态规划算法的果园移动机器人路径规划[J]. 农机化研究，2023，45(3)：40－44.
LI Yuanyuan，WANG Wei. Path planning of orchard mobile robot based on improved dynamic programming algorithm[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2023，45(3)：40－44.（in Chinese）

[18] FAN Haoyang，FAN Zhu，LIU Changchun，et al. Baidu Apollo EM motion planner[J]. arXiv Preprint，arXiv：1807.08048，2018.

[19] 李成松，高振江，坎杂，等. 双支撑酿酒葡萄果实振动分离装置作业机理[J]. 农业工程学报，2015，31(4)：26－32.
LI Chengsong，GAO Zhenjiang，KAN Za，et al. Operation mechanism of double support vibration separation device for wine grape berry[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(4)：26－32.（in Chinese）

[20] 陈黎卿，许鸣，柏仁贵，等. 高地隙植保机辅助驾驶系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(9)：25－32.
CHEN Liqing，XU Ming，BAI Rengui，et al. Design and test of auxiliary driving system for high-gap plant protection machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(9)：25－32.（in Chinese）