doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.040

基于激光雷达的果园行间路径提取与导航

李秋洁　丁旭东　邓　贤
(南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

摘要: 针对车辆果园行间自主导航出现的车辆偏航、非相邻树行干扰、植株缺失、树行弯曲等问题,提出一种基于激光雷达的行间路径提取方法,构建多样化虚拟果园环境仿真行间路径导航过程,评估路径提取算法性能。行间路径提取时,采用二维激光雷达(Light detection and ranging,LiDAR)获取果园树干测量数据,通过中值滤波削弱测量噪声,设计椭圆感兴趣区域(Region of interest,ROI)提取相邻树行,提出两步树行分割法获取相邻树行数据,通过最小二乘法拟合树行直线,将树行中心线作为导航路径。行间导航仿真时,建立虚拟果园环境和 LiDAR 测量模型,基于仿真测量数据生成导航路径,经过一阶数字低通滤波后实时控制车辆运动。仿真实验中,设置果树种植偏差为 ±20 cm,树干直径偏差为 ±3 cm,LiDAR 测量误差为 ±3 cm。实验结果表明,本文方法在车辆偏航、缺树、曲线树行等情况下均能准确提取导航路径,在偏航角不大于 15°、横向偏差不大于 1 m、缺树率不大于 25% 时均能将车辆轨迹与道路中心线的横向偏差控制在 ±14 cm 内。

关键词: 果园; 车辆导航; 激光雷达; 路径提取; 仿真
中图分类号: S24; TP23　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)S2-0344-07

Intra-row Path Extraction and Navigation for Orchards Based on LiDAR

LI Qiujie　DING Xudong　DENG Xian
(*College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Nanjing Forestry University*, *Nanjing* 210037, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of autonomous intra-row navigation of orchard vehicles, an intra-row path extraction method based on light detection and ranging (LiDAR) was proposed, and a diversified virtual orchard environment to simulate the intra-row path navigation process and evaluate the performance of path extraction algorithm was constructed. A 2D LiDAR was used to measure orchard trunks during the extraction of intra-row path and median filter was used to weaken the measurement noise. Then an elliptical region of interest (ROI) was designed to extract adjacent tree rows, followed by a two-step tree row segmentation method which classified the data into the left and right tree rows. Finally, the tree line was fitted by the least square method and the center line of the tree row was determined as the navigation path. The virtual orchard environment and LiDAR measurement model were established for the simulation of intra-row navigation. The navigation path was generated based on the simulation measurement data and the vehicle movement was controlled in real-time after using a first-order digital low-pass filter. In the simulation experiments, the planting deviation of fruit tree was set to be ±20 cm, the deviation of trunk diameter was ±3 cm, and the measurement error of LiDAR was ±3 cm. Experimental results showed that the proposed method can extract the navigation path accurately in the case of vehicle yaw, missing tree and curve tree row. When the yaw angle was not more than 15°, the lateral deviation was not more than 1 m, and the missing tree rate was not more than 25%, the lateral deviation between vehicle track and path centerline can be controlled within ±14 cm.

Key words: orchard; navigation; LiDAR; path extraction; simulation

收稿日期: 2020-08-03　修回日期: 2020-09-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(31901239)和江苏省基础研究计划-青年基金项目(BK20170930)
作者简介: 李秋洁(1983—),女,副教授,主要从事林业自动化与信息化研究,E-mail: liqiujie_1@163.com

0　引言

果园车辆导航技术是实施精细化果园管理的基础，可以有效减轻操作人员的劳动强度，提高果园作业的精度效率[1]。自动导航技术根据已知作业信息和环境信息，结合车辆自身传感器对动态环境信息的感知，进行路径规划与车体控制，完成相应的果园作业任务[2-4]。常用导航传感器有全球导航卫星系统（Global navigation satellite system，GNSS）[5-6]、惯性测量单元（Inertial measurement unit，IMU）[7]、视觉传感器[8-9]、激光雷达（Light detection and ranging，LiDAR）[10-18]等，它们通常单独使用或结合[2]使用。对于密植果园，由于浓密树冠对卫星信号的遮挡，使用 GNSS 导航定位存在较大局限[19]，IMU 长时间使用会产生误差累积，视觉传感器受光照变化、阴影等因素的影响较大。与之相比，LiDAR 具有测距精度高、分辨率好、抗干扰能力强等优点，广泛应用于果园环境感知和果树信息提取[20]，成为果园车辆导航领域的研究热点。

基于 LiDAR 的果园行间车辆导航指通过 LiDAR 感知路径两侧果树信息，使车辆沿果树行间中心线行驶，所采用的导航路径提取方法可分为两类[10]：①利用株间相连形成的树墙提取树行，进而求取行中心线。此类测量数据含有丰富的树行信息，但叶幕间夹杂较多的噪声，为树行提取带来了困难。文献[11]采用对离群点鲁棒的随机采样一致（Random sample consensus，RANSAC）拟合矩形感兴趣区域（Region of interest，ROI）内的树墙直线，并通过扩展卡尔曼滤波器（Extended Kalman filter，EKF）进一步优化参考路径。文献[12]设置距离阈值滤除极远点和极近点，然后利用卡尔曼滤波器校正离群点，最后采用支持向量机（Support vector machine，SVM）求取导航路径。②利用树干检测提取树行，进而求取行中心线。此类测量数据仅包含树干信息，含有的噪声较少。文献[13]采用聚类方法分割出树干圆弧，计算树干中心点用于果园地图构造和实时定位。文献[10]在相邻两侧树行各选取 2 棵距离最近的树干，用于拟合树行直线。

车辆偏航、非相邻树行干扰、植株缺失、树行弯曲等因素增加了果园行间导航路径提取的难度[14-15]。本文通过中值滤波削弱树干数据的测量噪声，提出椭圆 ROI 和两步分割法提取相邻树行，采用最小二乘法拟合树行直线，求取树行中心线作为参考路径。为测试算法性能，构造多样化的虚拟果园环境，采用局部路径规划，基于 LiDAR 测量模型实时获取果园行间数据，根据导航路径控制车辆运动，生成车辆轨迹仿真结果。

1　果园路径提取

1.1　LiDAR 测量

2D LiDAR 通过旋转光学部件将激光脉冲发射至各个方向，形成一个二维扫描面，从而实现区域扫描和轮廓测量。令 2D LiDAR 扫描面与地面平行，扫描中轴线与车辆行驶方向重合，以 LiDAR 扫描中轴线作为极轴建立极坐标系，如图 1 所示。每次扫描返回各个角度的距离测量数据，记为 $\{(\theta_i, r_i)\}_{i=1}^{N}$，$r_i$ 表示测量距离，其中，角度计算公式为

$$\theta_i = \Delta\theta(i-1) + \theta_0 \tag{1}$$

其中

$$\theta_0 = -\frac{360 - \theta_b}{2}$$

式中　$\Delta\theta$——角度分辨率

θ_0——初始扫描角度

θ_b——盲区角度

θ_i——扫描角度

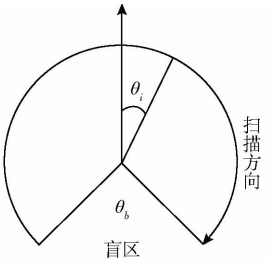
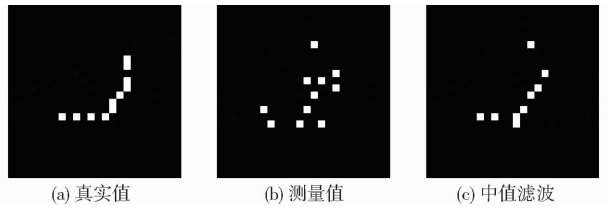


图 1　LiDAR 极坐标系

Fig. 1　Polar coodinate system of LiDAR

1.2　数据滤波

由于 LiDAR 测量值与真实值之间存在测量误差，需要进行数据滤波。考虑到树干边界测量点会出现跳变，故采用中值滤波，将测量点距离值设置为以该测量点为中心的邻域内所有测量点的距离中值。图 2 给出了一段树干测量数据的滤波结果，在削弱测量误差的同时较好地保留了树干边界点信息。



(a) 真实值　(b) 测量值　(c) 中值滤波

图 2　中值滤波结果

Fig. 2　Median filtering results

1.3　感兴趣区域提取

为去除非相邻树行干扰，设置 ROI 提取两侧相邻树行。本文采用椭圆 ROI，以极轴为长轴方向，与圆形 ROI 相比，椭圆 ROI 能够扩大探测面积，在同

等宽度下采集到更多的树行信息,提高树行直线的拟合精度,如图 3 所示。

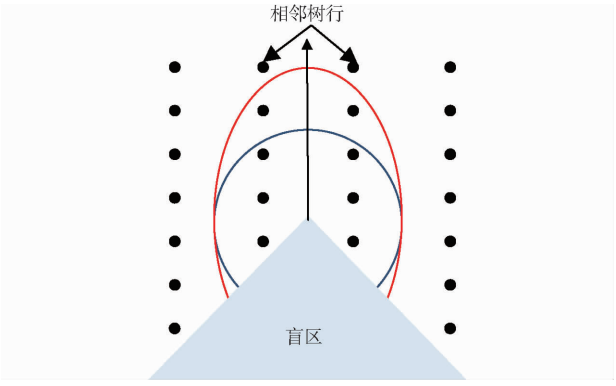


图 3 圆形 ROI 和椭圆 ROI 示意图

Fig. 3 Circular ROI and elliptical ROI

椭圆极坐标方程如下

$$r_0 = \frac{ab}{\sqrt{a^2\sin^2\theta + b^2\cos^2\theta}} \tag{2}$$

其中 $a = C_1 d_t \quad b = C_2 d_r$

式中 θ——极角

a——长轴长度

b——短轴长度

d_r——行距

d_t——株距

C_1、C_2——椭圆尺寸参数,由实验确定, $C_1 > 1$, $C_2 \geqslant 1$

1.4 路径提取

从 LiDAR 测量数据中筛选出 $r \leqslant r_0$ 的测量点用作路径提取。首先,需要分割出相邻树行。考虑到车辆可能存在偏航角,无法直接根据扫描中轴线分割树行,本文提出一种两步分割策略,如图 4 所示,具体步骤为:

(1)树行预分割:假设车辆偏航角在[$-\alpha_{max}$, α_{max}]之间,则角度小于 $-\alpha_{max}$ 的测量点属于左侧树行,角度大于 α_{max} 的测量点属于右侧树行,[$-\alpha_{max}$, α_{max}]范围属于不确定区域。建立 LiDAR 直角坐标系,将测量点极坐标变换为直角坐标

$$\begin{cases} x_i = r_i\sin\theta_i \\ y_i = r_i\cos\theta_i \end{cases} \tag{3}$$

采用最小二乘法分别拟合左右两侧树行直线,根据直线斜率估计偏航角 $\hat{\alpha}$。

(2)树行精确分割:用 $\hat{\alpha}$ 分割 ROI 内的所有测量点,角度小于 $\hat{\alpha}$ 的属于左侧树行,否则属于右侧树行。采用最小二乘法分别拟合左右两侧树行直线,提取树行中心线作为导航路径,路径方程记为

$$x = y\tan\alpha + \Delta x \tag{4}$$

式中 α——偏航角

Δx——横向偏移量

受视角限制,LiDAR 仅能测量左侧树干右表面和右侧树干左表面,因此拟合后的左侧树行相对于实际树行向右偏约 1/4 树干直径,拟合后的右侧树行相对于实际树行向左偏约 1/4 树干直径,由于对称性,上述误差在计算树行中心线时相互抵消。

2 果园导航路径仿真

为测试路径提取方法在多样化果园环境下的行间导航性能,建立虚拟果园局部环境和 LiDAR 测量模型,通过局部路径规划模拟车辆运动轨迹。

2.1 虚拟果园局部环境

建立果园世界坐标系,x 轴与树行垂直,y 轴与树行平行,根据给定株距、行距、树干直径求取树干世界坐标(x_s, y_s),然后,对树干位置和直径引入随机扰动项,以模拟种植偏差和树木生长差异。根据给定图像分辨率将树干世界坐标转换为图像坐标,在图像上用黑色像素表示树干,背景像素设置为白色。将车辆与 LiDAR 简化为同一质点,位置记为(x_v, y_v),与 y 轴的夹角记为 γ_v。初始时刻,车辆位于图像底部中心,$\gamma_v = 0°$,如图 5a 所示。

在标准化果园的基础上,考虑各种复杂情况。图 5b 为删除部分树干后的果园图像。图 5c、5d 为车辆存在初始偏航时的果园图像,保持车辆初始位置和方向不变,对果园进行平移和旋转,树干位置变为

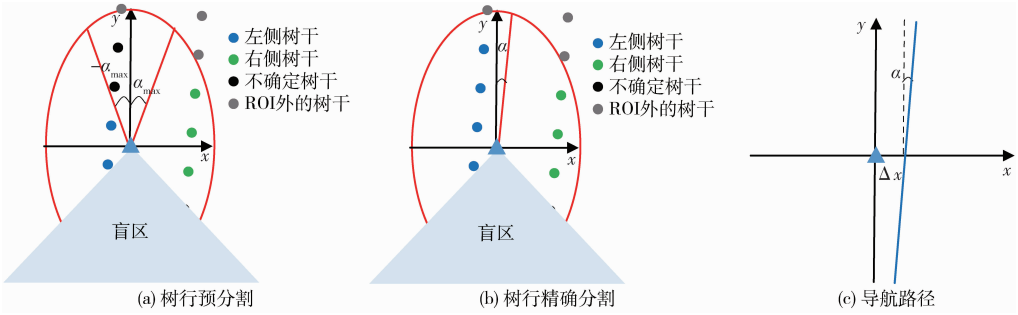


图 4 树行分割策略图

Fig. 4 Strategy diagrams of tree row segementation

$$\begin{cases} x = x_s\cos\alpha_0 + y_s\sin\alpha_0 + \Delta x_0 \\ y = y_s\cos\alpha_0 - x_s\sin\alpha_0 \end{cases} \tag{5}$$

式中　α_0——初始偏航角

Δx_0——初始横向偏移量

图 5e、5f 是曲线树行的模拟图像，引入波长为 λ、振幅为 A 的正弦扰动，树干位置变为

$$\begin{cases} x = x_s + A\sin\dfrac{2\pi y_s}{\lambda} \\ y = y_s \end{cases} \tag{6}$$

式(5)、(6)可组合使用，以模拟更加复杂的果园环境。

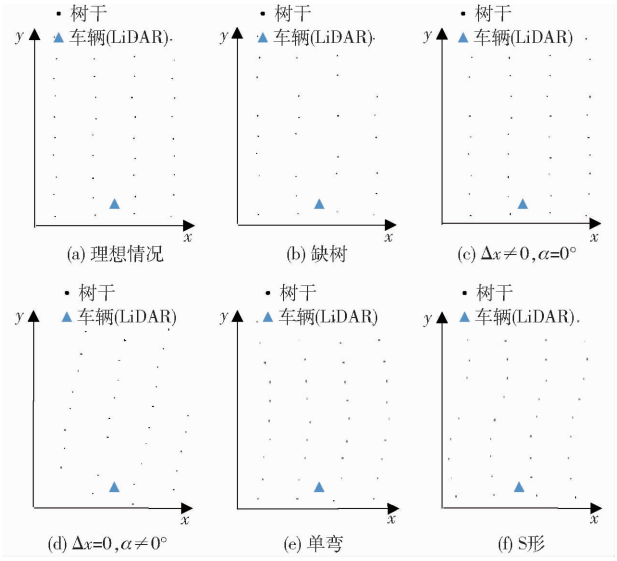


图 5　虚拟果园环境

Fig. 5　Virtual orchard environment

2.2　LiDAR 测量模型

根据 LiDAR 测距原理，角度为 θ_i 的扫描线的果园图像坐标为

$$\begin{cases} x = x_v + r\sin\left(\dfrac{\pi\theta_i}{180} + \gamma_v\right) \\ y = y_v + r\cos\left(\dfrac{\pi\theta_i}{180} + \gamma_v\right) \end{cases} \tag{7}$$

式中　r——扫描线极径

令 r 以 Δr 为间隔增长，在果园图像上检测黑色树干点，记录首次探测到树干点时的极径 r_i。为模拟 LiDAR 测距误差，引入随机扰动项作为实际测量数据。采用上述方法记录所有扫描线的测量数据 $\{(\theta_i, r_i)\}_{i=1}^{N}$。

2.3　局部路径规划

利用前文介绍的路径提取方法，采用局部路径规划实现车辆导航，如图 6 所示。假设 t 时刻车辆位置为 $(x_v(t), y_v(t))$，方向为 $\gamma_v(t)$，首先利用 LiDAR 测量模型获取当前测量数据 $\{(\theta_i(t), r_i(t))\}_{i=1}^{N}$，然后采用路径提取方法估计导航路径参数 $\Delta x(t)$ 和 $\alpha(t)$，最后建立车辆运动控制模型，求取 $t+1$ 时刻的车辆位置和方向。

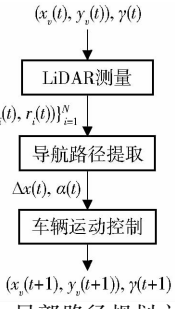


图 6　局部路径规划方案

Fig. 6　Local path planning

车辆运动控制过程如下：

(1)为提高路径提取鲁棒性、平滑车辆轨迹，利用上一时刻的导航路径信息，采用一阶数字低通滤波对导航路径进行平滑

$$\begin{cases} \Delta x_p(t) = w\Delta x(t) + (1-w)\Delta x_p(t-1) \\ \alpha_p(t) = w\alpha(t) + (1-w)\alpha_p(t-1) \end{cases} \tag{8}$$

式中　w——滤波系数，$w \in [0,1]$

α_p——滤波后偏航角

Δx_p——滤波后横向偏移量

(2)假设 t 时刻到 $t+1$ 时刻的车辆移动距离为

$$\Delta l = v\Delta t \tag{9}$$

式中　v——车辆速度，为常数

Δt——LiDAR 测量时间间隔

求取以 Δl 为半径的圆与导航路径的交点，选择纵坐标较大的交点作为 $t+1$ 时刻的车辆位置，如图 7a 所示，车辆向 $\alpha_v(t)$ 方向移动 Δl。若交点不存在，则车辆以固定角度向导航路径移动 Δl，如图 7b 所示。车辆偏移角 $\alpha_v(t)$ 计算公式为

$$\alpha_v(t) = \begin{cases} \min\left(\arcsin\dfrac{\Delta x_p(t)\cos\alpha_p(t)}{\Delta l}\right) + \alpha_p(t) & \text{(存在交点)} \\ \operatorname{sign}(\alpha_p(t))\,\alpha_{v\max} & \text{(不存在交点)} \end{cases} \tag{10}$$

(3)假设车辆移动后将偏移角调整至 $\alpha_p(t)$，则 $t+1$ 时刻果园图像坐标系下的车辆位置和方向为

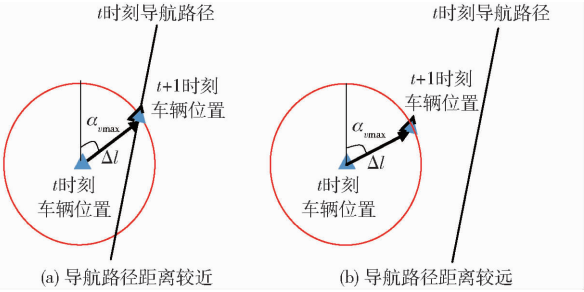


图 7　车辆运动控制图

Fig. 7　Vehicle motion control

$$\begin{cases} x_v(t+1) = x_v(t) + \Delta l \sin(\alpha_v(t)) \\ y_v(t+1) = y_v(t) + \Delta l \cos(\alpha_v(t)) \\ \gamma_v(t+1) = \gamma_v(t) + \alpha_p(t) \end{cases} \quad (11)$$

3 试验与结果分析

3.1 果园局部环境构建

果园局部环境参数如表 1 所示。为研究复杂果园环境下的路径提取和导航性能,在 3.2 节和 3.3 节中引入车辆偏航、缺树和曲线树行。

表 1 果园局部环境参数

Tab. 1 Local environment parameters of orchard

参数	数值
图像分辨率/(m·像素$^{-1}$)	0.01
场地长度/m	20
场地宽度/m	16
行距 d_r/m	4
株距 d_t/m	2
树干直径/cm	12
种植偏差/cm	-20 ~ 20
直径偏差/cm	-3 ~ 3

3.2 路径提取仿真

路径提取方法参数如表 2 所示。LiDAR 测量模型参数参考了北阳电机公司生产的 UTM-30LX 型 2D LiDAR,这款 LiDAR 已在林木参数提取中成功应用[21-22]。

表 2 路径提取方法参数

Tab. 2 Parameters of path extraction method

项目	参数	数值
LiDAR 测量模型	盲区角度 θ_b/(°)	90
	角度分辨率 $\Delta\theta$/(°)	0.25
	测量间隔 Δt/s	0.25
	探测范围/m	0 ~ 15
	探测步长 Δr/像素	1
	测量误差/cm	±3
数据滤波	滤波窗口尺寸	5
感兴趣区域提取	长轴参数 C_1	3.2
	短轴参数 C_2	1
路径提取	偏航角/(°)	-15 ~ 15

图 8 给出了理想情况、车辆偏航、缺树情况下的单次路径提取结果,图 8 表明本文的路径提取方法能有效提取出导航路径。

3.3 路径导航仿真

路径导航参数:车辆速度 $v = 0.8$ m/s,固定偏转角 $\alpha_{vmax} = 0.15°$,导航路径滤波系数 $\omega = 0.5$。记录车辆轨迹和道路中心线在果园坐标系 x 轴方向的偏差。当偏航角不大于 15°、初始偏差不大于 1 m、缺树率不大于 25% 时,本文方法能将车辆轨迹与道路中心线的偏差控制在 ±14 cm 内。图 9 给出了不同

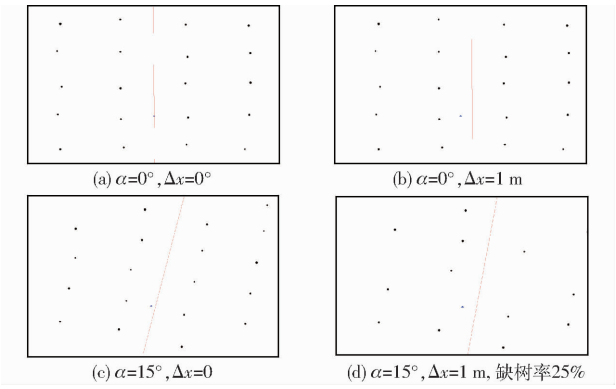


图 8 路径提取仿真结果

Fig. 8 Simulation results of path extraction

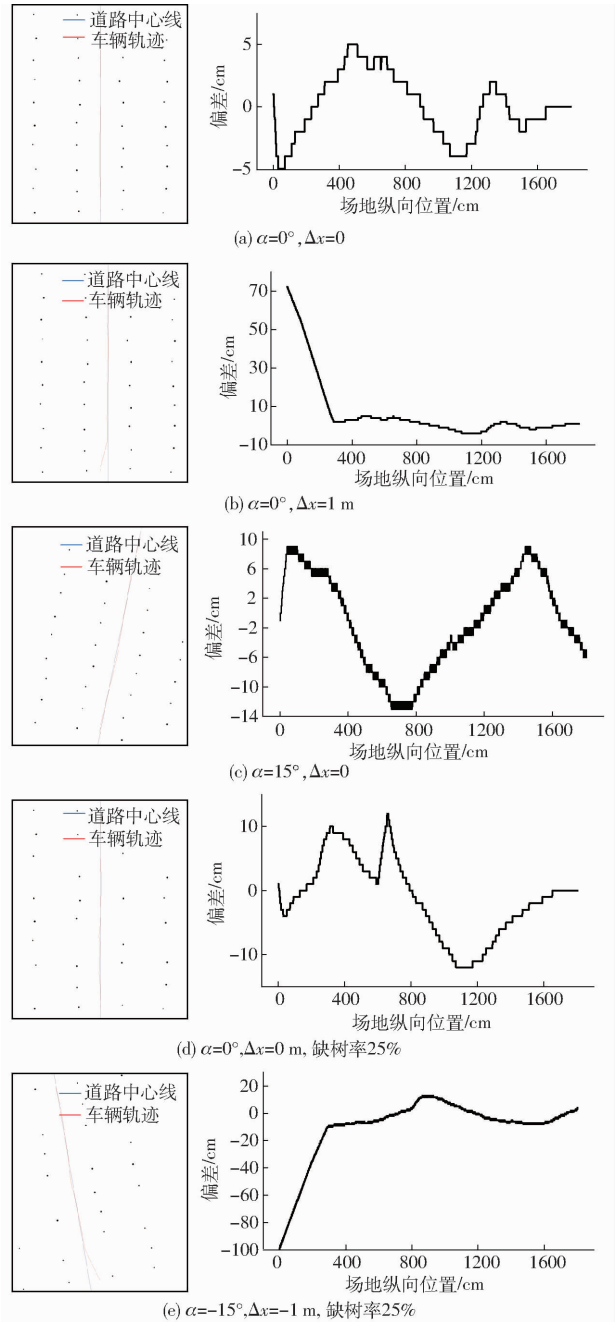


图 9 直线树行的路径导航仿真结果

Fig. 9 Simulation results of path investigation for straight tree row

情况下直线树行的路径导航结果。当车辆初始时刻无偏航时，车辆轨迹与道路中心线基本重合，偏差在 ±5 cm 内，如图 9a 所示。当车辆初始时刻存在横向偏移 1 m 时，通过路径导航能在 4 m 后将偏差控制在 ±5 cm 内，如图 9b 所示。当车辆初始时刻存在偏航角 15°时，通过路径导航可将横向偏差控制在 ±13 cm，如图 9c 所示。当车辆无偏航，但存在 25% 缺树时，仍能保证车辆轨迹与道路中心线基本重合，横向偏差在 ±12 cm 内，如图 9d 所示。当同时存在车辆偏航和缺树时，通过路径导航能迅速将横向偏差控制在 ±17 cm 内，如图 9e 所示。

图 10 给出了曲线树行的路径导航结果。车辆轨迹较为平滑且基本位于树行中间，没有出现入弯过早的问题，表明本文方法可推广至曲线树行。

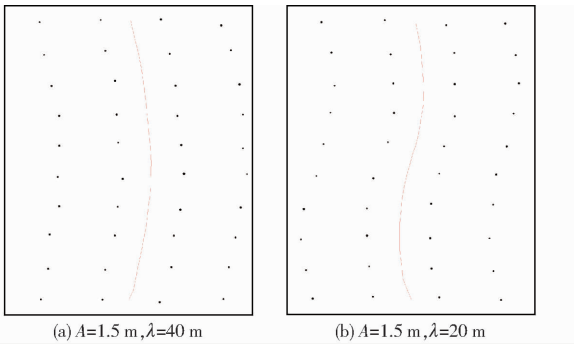


图 10　曲线树行的路径导航仿真结果

Fig. 10　Simulation results of path investigation for curved tree row

4　结论

（1）针对果园行间导航路径提取出现的车辆偏航、非相邻树行干扰等问题，采用 LiDAR 获取树干测量数据，通过中值滤波削弱测量噪声，设计椭圆 ROI 提取相邻树行，提出两步树行分割法获取相邻树行数据，通过最小二乘法拟合树行直线，将树行中心线作为导航路径。

（2）针对果园行间导航仿真问题，构建多样化的虚拟果园环境模拟种植偏差、树木生长差异及车辆偏航、缺树、曲线树行等情况，建立 LiDAR 测量模型获取仿真测量数据，采用本文提出的路径提取方法生成导航路径，实时控制车辆运动。

（3）仿真实验表明，存在种植偏差 ±20 cm、树干直径偏差 ±3 cm 和测量误差 ±3 cm 时，本文方法在车辆偏航、缺树、曲线树行等情况下均能准确提取导航路径。在偏航角不大于 15°、初始偏差不大于 1 m、缺树率不大于 25% 时，能将车辆轨迹与道路中心线的横向偏差控制在 ±14 cm 内。

参　考　文　献

[1] 郭成洋，范雨杭，张硕，等. 果园车辆自动导航技术研究进展[J]. 东北农业大学学报，2019，50(8)：87－96.
GUO Chengyang，FAN Yuhang，ZHANG Shuo，et al. Progress on vehicle automatic navigation in orchard[J]. Journal of Northeast Agricultural University，2019，50(8)：87－96.（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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：1－18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.001.（in Chinese）

[3] BAILLIE C P，LOBSEY C R，ANTILLE D L，et al. A review of the state of the art in agricultural automation. Part III：Agricultural machinery navigation systems[C]// American Society of Agricultural and Biological Engineers，Annual International Meeting，Detroit，Michigan，2018.

[4] 谭晨佼，李轶林，王东飞，等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农机化研究，2020，42(5)：7－14，32.
TAN Chenjiao，LI Yilin，WANG Dongfei，et al. Review on automatic navigation technologies of agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2020，42(5)：7－14，32.（in Chinese）

[5] BRUNA P，MOLIN J. Path errors in sugarcane transshipment trailers[J]. Engenharia Agrícola，2020，40(2)：223－231.

[6] 周俊，许建康，王耀羲，等. 基于 GNSS 的智能水田旋耕平地机研究[J/OL]. 农业机械学报，2020，51(4)：38－43.
ZHOU Jun，XU Jiankang，WANG Yaoxi，et al. Development of paddy field rotary-leveling machine based on GNSS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：38－43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200404&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.004.（in Chinese）

[7] 刘进一，杜岳峰，张硕，等. GNSS/MIMU/DR 的农业机械组合导航定位方法[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(增刊)：1－7.
LIU Jinyi，DU Yuefeng，ZHANG Shuo，et al. Automatic navigation method for agricultural machinery based on GNSS/MIMU/DR information fusion[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(Supp.)：1－7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2016s001&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.001.（in Chinese）

[8] 彭顺正, 坎杂, 李景彬. 矮化密植枣园收获作业视觉导航路径提取[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 45 - 52.
PENG Shunzheng, KAN Za, LI Jingbin. Extraction of visual navigation directrix for harvesting operation in short-stalked and close-planting jujube orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 45 - 52. (in Chinese)

[9] LI Y, WANG X, LIU D. 3D autonomous navigation line extraction for field roads based on binocular vision[J]. Journal of Sensors, 2019, 8: 1 - 16.

[10] 薛金林, 张顺顺. 基于激光雷达的农业机器人导航控制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 55 - 60.
XUE Jinlin, ZHANG Shunshun. Navigation of an agricultural robot based on laser radar[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 55 - 60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140909&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.009. (in Chinese)

[11] LEMOS R A D, NOGUEIRA L A C D O, RIBEIRO A M, et al. Unisensory intra-row navigation strategy for orchards environments based on sensor laser[C]// Congresso Brasileiro de Automática, Brazil, 2018.

[12] 艾长胜, 林洪川, 武德林, 等. 葡萄园植保机器人路径规划算法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 77 - 85.
AI Changsheng, LIN Hongchuan, WU Delin, et al. Path planning algorithm for plant protection robots in vineyard[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 77 - 85. (in Chinese)

[13] 周俊, 胡晨. 密植果园作业机器人行间定位方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 22 - 28.
ZHOU Jun, HU Chen. Inter-row localization method for agricultural robot working in close planting orchard[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 22 - 28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151104&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.004. (in Chinese)

[14] ZHANG S, GUO C, GAO Z, et al. Research on 2D laser automatic navigation control for standardized orchard[J]. Applied Sciences, 2020, 10(8): 2763.

[15] 陈军, 蒋浩然, 刘沛, 等. 果园移动机器人曲线路径导航控制[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 179 - 182, 187.
CHEN Jun, JIANG Haoran, LIU Pei, et al. Navigation control for orchard mobile robot in curve path[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 179 - 182, 187. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120433&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.033. (in Chinese)

[16] TSOLAKIS N, BECHTSIS D, BOCHTIS D. AgROS: a robot operating system based emulation tool for agricultural robotics[J]. Agronomy 2019, 9: 0403.

[17] BLOK P M, VAN BOHEEMEN K, VAN EVERT F K, et al. Robot navigation in orchards with localization based on particle filter and Kalman filter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 261 - 269.

[18] THANPATTRANON P, AHAMED T, TAKIGAWA T. Navigation of autonomous tractor for orchards and plantations using a laser range finder: Automatic control of trailer position with tractor[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 90 - 103.

[19] ZHANG Huichun, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang, et al. Testing of GPS accuracy for precision forestry applications[J]. The Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(1): 237 - 245.

[20] 孙娜, 王艳君, 邱权, 等. 激光传感器在农业中的应用[J]. 北方园艺, 2019(20): 150 - 156.
SUN Na, WANG Yanjun, QIU Quan, et al. Application of LiDAR in agriculture[J]. Northern Horticulture, 2019(20): 150 - 156. (in Chinese)

[21] 李秋洁, 袁鹏成, 邓贤, 等. 基于移动激光扫描的靶标叶面积计算方法[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 192 - 198.
LI Qiujie, YUAN Pengcheng, DENG Xian, et al. Calculation method of target leaf area based on mobile laser scanning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 192 - 198. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200521&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.021. (in Chinese)

[22] 李秋洁, 郑加强, 周宏平, 等. 基于车载二维激光扫描的树冠体积在线测量[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 309 - 314.
LI Qiujie, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Online measurement of tree canopy volume using vehicle-borne 2D laser scanning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 309 - 314. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161238&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.038. (in Chinese)