

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.002

轮式 AGV 沿葡萄园垄道行驶避障导航算法与模拟试验

谢永良^{1,2} 尹建军³ 余承超³ 贺 坤³ 胡旭东¹ 李仁旺¹

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江经济职业技术学院物流技术学院, 杭州 310018;
3. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 针对轮式 AGV 沿葡萄园垄道循迹受到障碍物阻碍的问题,应用滚动优化原理提出了基于超声波测距与航向角检测的 AGV 防撞避障导航算法。采用交叉布置的 8 路超声波传感器检测垄道边界与障碍物,提出了同一障碍物匹配与类型判据及动态障碍物轨迹预测模型。以 AGV 横向位置偏差和航向偏角作为模糊控制器输入,获得 AGV 前轮期望导向角,为 AGV 绕行障碍物提供参考航向角。基于滚动优化原理提出了调节绕行偏角和调节车速的避障导航策略,设计了 AGV 绕行静态障碍物、减速或停车避让动态障碍物的导航算法。试验系统的上位机采用 LabVIEW 开发的避障导航算法程序,实时将导航数据发送到下位机 PLC 来控制 AGV 转向。模拟试验结果表明,该导航算法实现 AGV 沿垄道预设路径纠偏行驶的同时,可导引 AGV 避免与垄道上的障碍物发生碰撞,验证了防撞避障导航算法的有效性,可为无人化轮式拖拉机等前轮导向车辆沿垄道循迹的防撞预警与避障技术提供参考。

关键词: 轮式自动导引车; 循迹导航; 避障算法; 预测控制; 滚动优化原理

中图分类号: TP241.3; S372 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0013-10

Obstacle Avoidance Navigation Algorithm and Analog Experiment for Wheeled AGV Running along Vineyard Ridge Road

XIE Yongliang^{1,2} YIN Jianjun³ YU Chengchao³ HE Kun³ HU Xudong¹ LI Renwang¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Department of Logistic Technology, Zhejiang Technical Institute of Economics, Hangzhou 310018, China

3. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the problem of obstacles threat for wheeled AGV tracking along a vineyard ridge road, based on distance measurement and heading angle detection, rolling optimization principle was used to propose an anti-collision obstacle avoidance navigation algorithm of wheeled AGV. Cross-arranged 8-way ultrasonic sensors were used to detect the boundaries of the ridge road and obstacles on the ridge road. The same obstacle matching, obstacle type criterion and trajectory prediction model of dynamic obstacle were put forward. The AGV lateral position deviation and heading deviation angle were used as inputs of fuzzy controller to obtain expected guidance angle of AGV front wheel, which provided a referenced heading angle for wheeled AGV to bypass obstacles. Based on the rolling optimization principle, the obstacle avoidance navigation strategies of adjusting heading deviation angle and vehicle speed were proposed, and the AGV navigation algorithm of bypassing static obstacles, avoiding dynamic obstacles by deceleration or parking of AGV were designed. The software of LabVIEW was used to develop the obstacle avoidance navigation algorithm program, and navigation data was sent to the PLC to control AGV steering in real-time. Simulation experiments showed that the navigation algorithm can make the AGV track with the mode of deviation rectification along preset path of ridge road, which can guide the AGV to avoid collision with obstacles on the ridge road, which verified the effectiveness of the navigation algorithms. It can provide a reference for anti-collision warning and obstacle avoidance technology of front-wheel guided vehicle like unmanned wheeled tractor to track along a ridge road.

Key words: wheeled AGV; tracking navigation; obstacle avoidance algorithm; prediction control; rolling optimization principle

收稿日期: 2018-03-16 修回日期: 2018-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475212)

作者简介: 谢永良(1972—),男,博士生,浙江经济职业技术学院讲师,主要从事农业机器人和物流工程研究,E-mail: 564059974@qq.com

通信作者: 尹建军(1973—),男,研究员,博士,主要从事特种收获机械集成设计和采收机器人研究,E-mail: yinjianjun@ujs.edu.cn

0 引言

轮式自动导引车 (Automated guided vehicle, AGV) 目前已广泛应用于车间物料运输、仓储物流等领域,对企业柔性集成化生产模式起到至关重要的作用^[1]。在农业生产领域,AGV 主要从事果实套袋、施药、采摘、搬运等工作,为减少劳动力、提高生产效率提供了一种解决方案^[1-2]。因而,实现 AGV 按既定路线自主导航行驶和防碰避障的智能化局域路径优化逐渐成为国内外众多学者的研究重点^[3-11]。

环境信息已知的 AGV 全局路径规划算法有可视图法、自由空间法、栅格法等^[4-6],但此类算法不适用于障碍物复杂多变、环境信息未知的非结构化果园环境。对于环境信息未知的局部路径规划算法,势场蚁群算法存在易陷入局部极小值问题^[12];遗传算法^[13]计算量大,难以保证在复杂环境中的实时性和快速性;模糊逻辑算法^[14]控制规则数目多达几十条时会占用大量系统资源。上述算法在静态障碍物的避障路径全局规划应用中取得了良好效果,但并没有考虑在规划过程中局域路径优化问题,在未知的动态障碍物环境中缺乏有效的规划方法。席裕庚^[15]将预测控制的基本原理从控制问题推广到一般广义控制问题求解,利用机器人实时探测得到的局部环境信息,以滚动窗口方式实施优化与反馈相结合的在线路径规划。文献^[16-17]运用该原理在动态不确定环境中取得了良好的避碰效果。

本文面向葡萄园自主行驶应用需求,针对轮式 AGV 沿葡萄园垄道循迹受到障碍物阻碍的问题,基于超声波测距与 AGV 航向偏角检测,应用滚动优化原理研究轮式 AGV 沿直线垄道行驶的避障导航策略和算法,以工控机与 PLC 构建主从控制的 AGV 试验系统,通过模拟试验来验证导航算法的有效性,以期对轮式拖拉机等前轮导向车辆无人化作业时沿垄道循迹的防碰预警与避障技术提供参考。

1 问题描述与分析

以篱架整枝的食用葡萄园垄道为 AGV 作业道路,如图 1a 所示,葡萄植株成行种植,行距 4~6 m,植株行之间的垄道即为作业道路。大中型食用葡萄园内设绿肥基地,养殖猪、鸡等,为植株提供粪肥。如图 1b 所示,AGV 沿葡萄园垄道行驶过程中,预设路径可能会出现静态障碍物(筐、篓等用具)或突发性动态障碍物(管理员工或畜禽),要求 AGV 必须具备环境探测和障碍物躲避的局域路径规划能力,求解出一条从初始位置到目标终点的无碰路径^[15]。

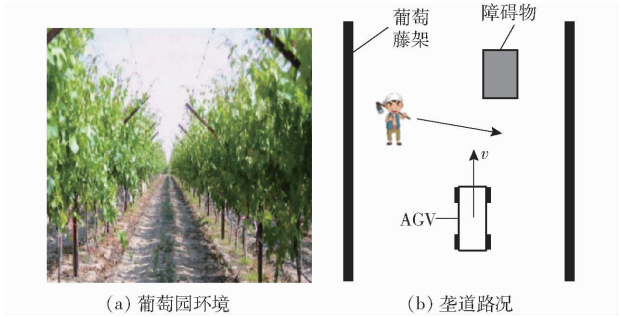


图 1 葡萄园环境描述
Fig. 1 Environment description sketches of vineyard

若垄道无障碍,AGV 沿垄道中线行驶,设定为预定轨迹。若垄道存在静态障碍物,则检测其与 AGV 运行轨迹的相对位置关系,判断是否执行避障策略。若垄道存在动态障碍物,任意相邻瞬间时间间隔内认为其以直线轨迹移动。由于 AGV 在果园环境下作业是一种慢动态场景,若能预测动态障碍物的当前时刻运行轨迹,找到预测碰撞点,则可引导 AGV 避让动态障碍物。

AGV 果园自主行驶分为 2 种模式:全局预设路径的纠偏行驶和局域轨迹下的防撞避障行驶模式。对于前者,AGV 保持在果园垄道匀速行驶,根据 AGV 右侧的测距传感器探测的距离和航向偏角纠偏行驶。对于后者,AGV 模拟驾驶员避障经验,分为调节 AGV 航向偏角的绕行静态障碍物避障和调节 AGV 车速的动态障碍物避让。

2 AGV 沿垄道行驶的运动学模型

对于前轮导向的轮式 AGV 纯滚动转向,左前轮转角 φ_L 与前轮期望导向角 φ 的关系^[18-20]为

$$\cot\varphi_L = \cot\varphi - \frac{w}{2L} \tag{1}$$

式中 L ——前、后轮轴距 w ——车体宽度
以 AGV 前进方向为计量基准,左转时 φ 为正值,右转时 φ 为负值。

左前轮转角 φ_L 与两后轮中点处转弯半径 R_0 满足^[18-20]

$$R_0 = L \cot\varphi_L + w/2 \tag{2}$$

右前轮转角 φ_R 与两后轮中点处转弯半径 R_0 满足^[18-20]

$$\cot\varphi_R = \frac{2R_0 + w}{2L} \tag{3}$$

前轮左转时,两后轮的转速比 k 为^[18-20]

$$k = \frac{R_R}{R_L} = \frac{2R_0 + w + 2e_R}{2R_0 - w - 2e_L} \tag{4}$$

式中 R_R ——右后轮转弯半径
 R_L ——左后轮转弯半径

e_L ——左后轮与车架距离
 e_R ——右后轮与车架距离
前轮右转时

$$k = \frac{2R_0 - w - 2e_R}{2R_0 + w + 2e_L} \tag{5}$$

设 AGV 运行速度为 v , 左、右后轮的转速 n_L 、 n_R 分别为^[18-20]

$$\begin{cases} n_L = \frac{v}{(1+k)\pi r_0} \\ n_R = \frac{vk}{(1+k)\pi r_0} \end{cases} \tag{6}$$

式中 r_0 ——车轮半径

AGV 路径跟踪过程中,由模糊控制器输出前轮期望导向角 φ ,由式(1)、(3)可确定左、右前轮转角 φ_L 、 φ_R ,由式(6)计算设定车速下左、右后轮转速 n_L 、 n_R ,实现 AGV 纯滚动转向与差速驱动的协同控制^[18]。

3 AGV 沿垄道行驶的防碰避障导航算法

滚动优化是预测控制基本原理之一^[15],将 AGV 自带传感器探测得到的有限局部信息看成一个滚动窗口,并在当前窗口内实施局部避障策略。在有限时域内每结束一个规划周期,AGV 将刷新窗口内的动态信息,并重复执行滚动过程,结合窗口滚动和反馈机制实现 AGV 全局路径规划。滚动优化原理具有实时性强、适用于静态和动态障碍物检测条件,其滚动窗口算法原理如图 2 所示。

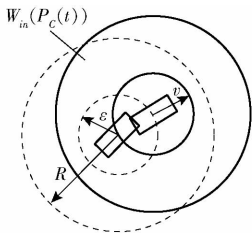


图 2 滚动窗口算法原理图

Fig. 2 Algorithm principle diagram of rolling windows

以传感器可以探测得到的最大距离 R 为半径的圆形区域作为窗口 $W_{in}(P_c(t))$, $P_c(t)$ 为 AGV 当前时刻所在位置。AGV 每次规划步长 ε (与运行速度和规划时长有关) 作为规划窗口的半径,其中 $0 < \varepsilon < R$, AGV 安全保护范围和障碍物膨胀半径为

$$r = 1.5 \sqrt{(l/2)^2 + (w/2)^2} \tag{7}$$

式中 l ——AGV 本体长度

3.1 超声波传感器检测障碍物的配置方案

如图 3 所示,8 路超声波传感器安装在距地高

500 mm 的 AGV 周边,探测范围 0.01 ~ 5 m,波束角 60° 。

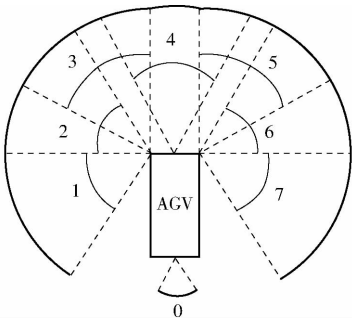


图 3 8 路超声波传感器配置方案

Fig. 3 Configuration scheme of 8-way ultrasonic sensors

单个超声波传感器在 60° 扇区内仅能获取障碍物距离信息而无法探测其方位角。为提高超声波传感器方位角测量分辨率,在 AGV 车头左、右角各交错布置 3 个超声波探头 1、2、3 和 5、6、7,AGV 车头正中水平布置超声波探头 4,AGV 车尾正中水平布置超声波探头 0,形成 AGV 车头 300° 范围测距、车尾 60° 测距。在 AGV 车头 180° 范围内形成交叉重叠的测距与方位角检测,超声波传感器对单个障碍物的方位角测量分辨率提高到 15° 或 30° ,测量空间划分为 9 个区间,取每个区间夹角平分线对应的角度作为障碍物方位角。考虑到障碍物大小,同一障碍物有可能被 2 个或 3 个区间的超声波传感器探测到。若探头 2、3、4 或 4、5、6 同时返回信号视为单探头 3 或 5 感应。若探头 3、4、5 同时返回信号,则认为该障碍物不可逾越,AGV 选择停车报警。若探头 0 检测到 AGV 后方障碍物距离车体小于 0.5 m 时,AGV 发出声音预警告防碰。这样,在超声波探头有限测量范围内的任意时刻,2 个或 2 个以上障碍物位于单探头或双探头交叉区间,将所有障碍物视作单个障碍物,单障碍物的方位角 θ 判定如表 1 所示。

表 1 单障碍物的方位角判定

Tab. 1 Azimuth determination of single obstacle ($^\circ$)

探头 型式	探头序号							
	0	1	2	3	4	5	6	7
单	180	120	75	30	0	330	285	240
双		90	45	15	345	315	270	

3.2 AGV 沿垄道行驶的前轮期望导向角获取

3.2.1 基于超声波测距的垄道边界探测

如图 4 所示,为使 AGV 能够沿距离右侧道路边缘为 d 的路径行走,采用右侧超声波传感器探测路径边界。超声波传感器与 AGV 车头水平面的安装夹角为 θ_R ,超声波沿扇形中线发送,可以保证 AGV

当回归运动使横向位置偏差重新为零时,即为

回归运动的子目标点所在位置 P_{rec} , AGV 完成障碍物绕行的第 2 阶段, 结束避障, 再继续执行沿垄道预设轨迹行驶。

(4) 调节绕行偏角 $\Delta\theta$ 的绕行避障算法流程

根据上述避障策略, 调节绕行偏角 $\Delta\theta$ 的绕行避障算法流程, 如图 11 所示。

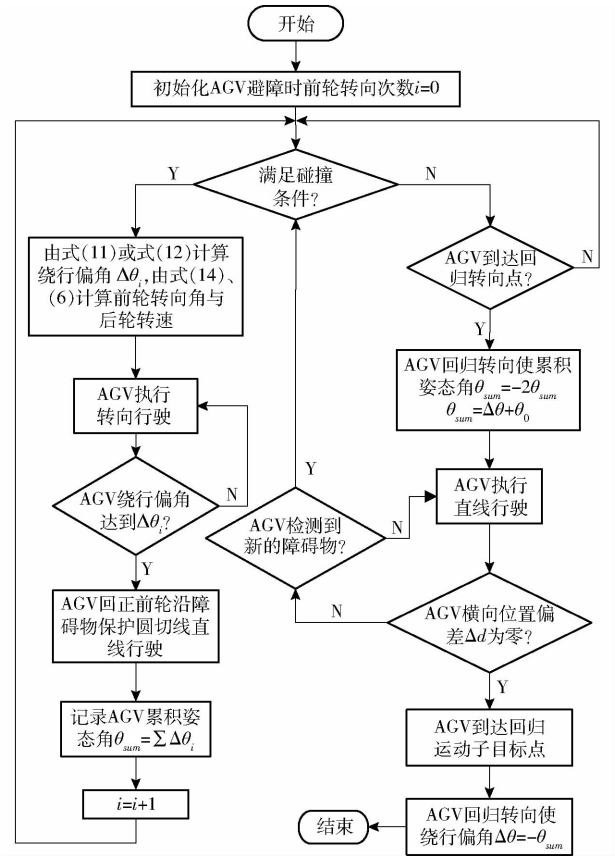


图 11 调节 $\Delta\theta$ 的避障算法流程图

Fig. 11 Flow chart of obstacles avoidance algorithm for adjusting $\Delta\theta$

3.4.2 调节 Δv 的动态障碍物避障策略

如图 7 所示, 直线 E_1E_2 为障碍物当前时刻预测轨迹, 由点到直线距离方程计算 AGV 质心与障碍物预测轨迹的垂直距离 D 为

$$D = \left| \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right| \tag{16}$$

当 $D \geq r$ 时, 说明动态障碍物运动路径在 AGV 膨胀保护圆以外, 对 AGV 无影响。

当 $D < r$ 时, 且 $\rho \sin\theta = 0$ 时, $\rho \cos\theta > 0$, 即预测轨迹与动坐标系 x 轴正半轴相交, 说明障碍物与 AGV 预测碰撞点在车身前侧, AGV 减速或停车, 待传感器测不到此障碍物再恢复设定速度。

当 $D < r$ 时, 且 $\rho \sin\theta = 0$ 时, $\rho \cos\theta < 0$, 说明预测碰撞点在 AGV 后侧, AGV 发出声音预警防碰。

3.4.3 避障优先级

AGV 默认以恒定速度沿垄道行驶, 采用滚动窗

口方式检测障碍物, 设定 AGV 循迹、调节 $\Delta\theta$ 避障和调节 Δv 避障的决策优先级为: 动态避障、静态避障、循迹, 规则制定如下:

(1) 无论 AGV 现阶段执行何种动作, 检测到动态障碍物进入滚动窗口, 碰撞预警程度最高, 优先采取减速或停车规避。

(2) AGV 预设行驶轨迹与滚动窗口中静态障碍物膨化边缘存在交集, 优先执行绕行避障策略, 忽略路径跟踪行驶的模糊控制器输出。

4 AGV 避障控制系统设计与试验

4.1 AGV 避障控制系统设计

如图 12 所示, 轮式 AGV 控制系统由控制器模块、驱动模块、电源模块、传感器模块、通信模块等组成。

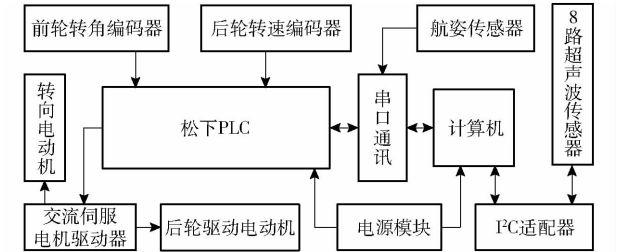


图 12 AGV 控制系统硬件组成

Fig. 12 Hardware composition of AGV control system

工控机作为主控制器, 主要完成传感器数据采集、存储和处理, 避障决策与导航; 松下 PLC 作为 AGV 转向与差速驱动的控制, 接收工控机避障算法的输出指令, 完成 AGV 前轮转向与后轮差速驱动的协同行驶控制。8 路 KS101B 型超声波传感器通过 I²C 适配器构建数据传输的总线子系统。AH100B 型航姿传感器 (方位角测量精度 0.1°) 用于检测 AGV 航向偏角。

为防止超声波串扰, 在每个规划周期以 10 ms 为间隔通过 I²C 总线顺序执行超声波距离数据的发送和接收指令。AGV 前方左、右角安装的超声波传感器探测的障碍物与车体距离实际为物体表面到传感器安装位置的距离。因此, AGV 质心与障碍物的相对距离 ρ 为实测值 ρ_i 加上补偿距离 $\Delta\rho$, 即

$$\rho = \rho_i + \Delta\rho$$

其中

$$\Delta\rho = \frac{w \sin\theta}{2}$$

利用 LabVIEW 平台编写 AGV 导航控制程序, 包括主程序、沿垄道直线行驶的模糊控制器以及防碰避障子程序, 主程序流程图如图 13 所示。

AGV 沿垄道行驶的导航主程序主要完成系统初始化, 在每个规划周期获取传感器信息, 刷新滚动窗口, 使 AGV 沿垄道纠偏行驶, 并判断是否执行调节 Δv 或 $\Delta\theta$ 的避障子程序。

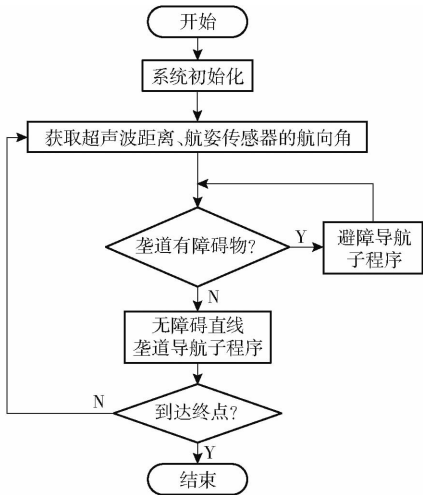


图 13 AGV 沿垄道行驶的导航主程序流程图

Fig. 13 Flow chart of main program for AGV navigating along ridge road

4.2 AGV 避障试验与分析

4.2.1 AGV 试验系统

为验证设计的 AGV 沿垄道行驶的避障导航算法的有效性,模拟葡萄园种植方式开展 AGV 导航试验。试验场地为宽 3.5 m、长 50 m 的平整道路。距 AGV 右侧 1.7 m 处有 0.8 m 高的路界,距 AGV 左侧 3.9 m 处为墙面。沿道路纵向布置多个方锥形路障模拟实际葡萄园环境中的静态障碍物,方锥底座宽 28 cm、高 65 cm。如图 14 所示,试验平台为前轮转向、后轮差速驱动 AGV,轴距 $L = 93.5\text{ cm}$,轮距 49 cm,AGV 总质量 200 kg,行驶速度 0.3 m/s。

4.2.2 AGV 沿垄道行驶的避障模拟试验

试验中以方锥形路障作为静态障碍物、行人作

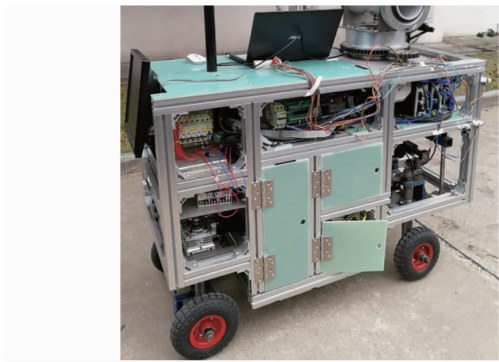


图 14 AGV 试验系统

Fig. 14 Test system of AGV

为动态障碍物,超声波传感器在 2 m 以内对障碍物探测稳定,以此设置滚动窗口半径为 2 m,大于 2 m 的数据设为空值。试验现场如图 15 ~ 17 所示,避障数据如图 18 ~ 20 所示。AGV 上的 8 路超声波传感器测距数据如图 18a、19a、20a 所示。记录 AGV 航向角随 AGV 沿垄道行驶时的采样数据,如图 18b、19b、20b 所示。根据测得的 AGV 航向角与后轮编码器记录数据,绘制的 AGV 实际运行轨迹如图 18c、19c、20c 所示,以 AGV 初始位置的质心 O 为原点建立静坐标系 XOY ,蓝色圆形为障碍物,黄色曲线为 AGV 质心每个规划周期的循迹与避障运行轨迹。

(1)AGV 依次绕行 2 个大间距障碍物试验

如图 15a 所示,AGV 从初始位置按预设航向角沿距离右侧边界 1.7 m 直线行驶,按照模糊控制器设计规则,此时以 AGV 与右侧边界横向偏差 Δd_r 作为模糊控制的输入。探头 6、7 检测的数据维持稳



图 15 AGV 依次绕行 2 个大间距静态障碍物的避障试验过程

Fig. 15 Obstacle avoidance test process when AGV detoured in turn two large space static obstacles

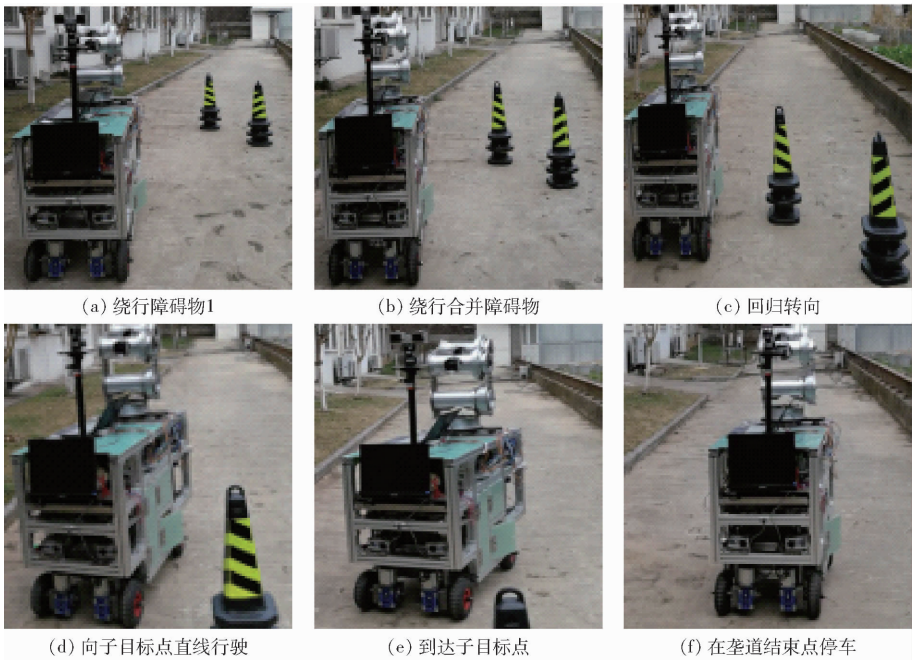


图 16 AGV 连续绕行 2 个小间距静态障碍物的避障试验过程

Fig. 16 Obstacle avoidance test process when AGV detoured continuously two small space static obstacles



图 17 AGV 绕行 1 个静态障碍物并躲避 1 个动态障碍物的避障试验过程

Fig. 17 Obstacle avoidance test process when AGV detoured a small static obstacle and avoided a dynamic obstacle

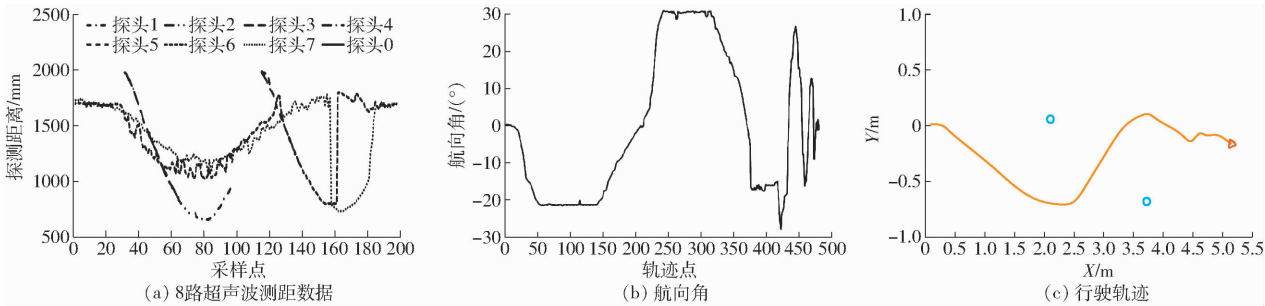


图 18 AGV 依次绕行 2 个大间距静态障碍物的避障数据

Fig. 18 Obstacle avoidance data when AGV detoured in turn two large space obstacles

定。当探头 3、4 检测到左前方路障满足碰撞条件后,AGV 实施右转绕行,如图 15b 所示,回正前轮转角后沿路障安全保护圆右侧切线直线行驶,此时探头 4、3、2、1 依次检测到障碍物,探头 1、2、3、4、6、7 距离数据逐渐减小,车体与障碍物及道路右侧边界的距离逐渐缩短。当探头 1 感测车体与障碍物距离数据增大,判断为 AGV 回归转向点,开始执行绕障碍物环形的回归转向运动,如图 15c 所示。当探头 4、5 检测到第 2 个障碍物,继续执行绕障程序,如图 15d ~ 15f 所示。当 AGV 绕过第 2 个障碍物后,

由模糊控制器纠偏行驶,由探头 6 判定车身和垄道右侧边界稳定保持 1.7 m 的设定距离后停车。

(2)AGV 连续绕行 2 个小间距静态障碍物试验

图 16 给出 AGV 连续绕行 2 个小间距障碍物时的避障结果。如图 16a 所示,探头 4、5 依次检测到偏于垄道右侧的障碍物 1,AGV 左转绕行。如图 16b 所示,障碍物 2 进入滚动窗口,位于单探头或双探头交叉区间,AGV 将 2 个小间距静态障碍物合并为同一障碍物继续左转绕行。障碍物 1 远离 AGV,第 45 个采样点后采样点依次从探头 5、6 探测

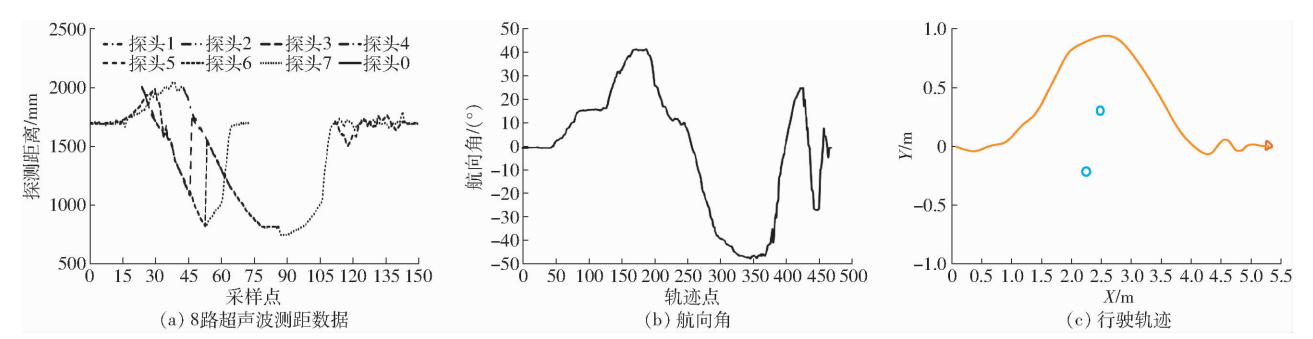


图 19 AGV 连续绕行 2 个小间距静态障碍物的避障数据

Fig. 19 Obstacle avoidance data when AGV detoured continuously two small space static obstacles

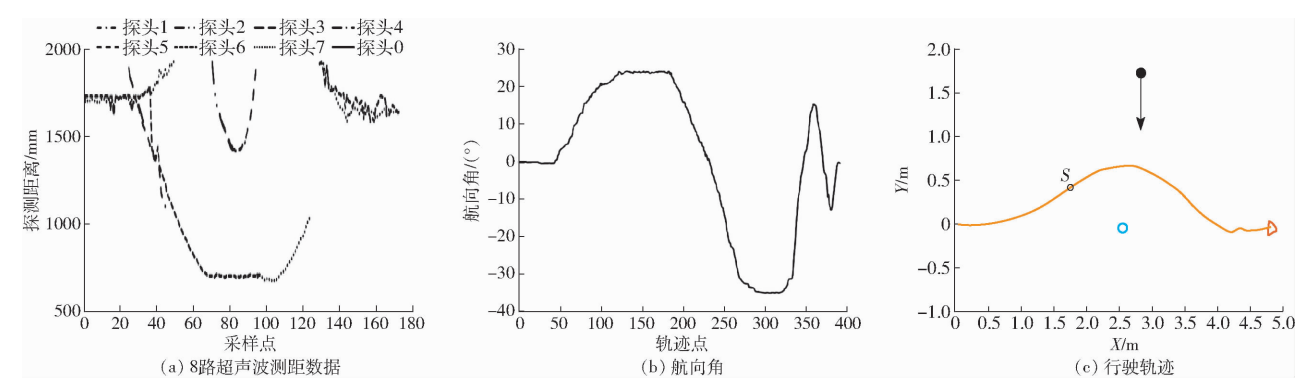


图 20 AGV 绕行 1 个静态障碍物并躲避 1 个动态障碍物的避障试验数据

Fig. 20 Obstacle avoidance test data when AGV detoured a small static obstacle and avoided a dynamic obstacle

区间消失,同时障碍物 2 进入 5、6 探测区间,并逐渐靠近 AGV。如图 16c ~ 16f 所示,AGV 由回归转向点直线行驶至回归子目标点,并纠正偏差,在垄道预设路径停车。

(3)AGV 绕行 1 个静态障碍物并躲避 1 个动态障碍物试验

图 17 给出 AGV 绕行静态障碍物时加入 1 个动态障碍物的避障结果,动态障碍物的起点坐标 (2.8,1.75),终点坐标 (2.8, - 1.75)。如图 17a、17b 所示,AGV 首先绕行垄道右前方静态障碍物,向回归转向点直线行驶过程中,以人为动态障碍物从 AGV 滚动窗口内横穿垄道。AGV 根据同一障碍物匹配和类型判别算法,判定动态障碍物预测碰撞点在车体前侧,选择减速停车让行的避障控制策略。在图 20c 中,S 点处停车避让,探头 2、3、4、5 依次检测到车体前侧的动态障碍物。如图 17c、17d 所示,

待动态障碍物远离,AGV 靠近静态障碍物,如图 20a 中的第 100 个采样点,判定合并为同一障碍物后,AGV 恢复设定速度继续绕行,回到预设路径。

由上述模拟试验可知,AGV 在避障行驶过程中可以局域寻找一条较优无碰路径,避障过程流畅,验证了本文提出的 AGV 避障导航算法的有效性。

5 结束语

针对轮式 AGV 沿葡萄园垄道直线行驶过程中可能存在障碍物阻碍,采用交叉布置的 8 路超声波传感器检测垄道边界与障碍物,提出了同一障碍物匹配与类型判据及动态障碍物轨迹预测模型。基于滚动优化原理提出 AGV 绕行静态障碍物、减速或停车避让动态障碍物的导航算法,模拟试验结果表明,该算法可导引 AGV 避免与垄道上的障碍物发生碰撞,验证了避障导航算法的有效性。

参 考 文 献

- 1 KEICHER R, SEUFERT H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1 - 2): 169 - 194.
- 2 王荣本, 张友坤, 王志中. 世界自动引导车辆系统 (AGVS) 的发展[J]. 农业工程学报, 1994, 10(2): 18 - 22. WANG Rongben, ZHANG Youkun, WANG Zhizhong. Development of AGVS in the world[J]. Transactions of the CSAE, 1994, 10(2): 18 - 22. (in Chinese)
- 3 姬长英, 周俊. 农业机械导航技术发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44 - 54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140908&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.008.
- JI Changying, ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44 - 54. (in Chinese)

- 4 ISRAEL B, RAFAEL M C, RAUL M, et al. Maintaining strong mutual visibility of an evader moving over the reduced visibility graph[J]. *Autonomous Robots*, 2016, 40(2): 395–423.
- 5 PARENT M, SIMOND N. Obstacle detection from IPM and super-holography[C] // *IEEE International Conference on Intelligent Robots & Systems*, 2007:4283–4288.
- 6 PARK Joon-Young, CHANG Pyung-Hun, KIM Jin-Oh. A global optimal approach for robot kinematics design using the grid method[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2006, 4(5): 575–591.
- 7 方啸, 郑德忠. 移动机器人自主寻路避障启发式动态规划算法[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(7): 73–78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140712&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.012.
- FANG Xiao, ZHENG Dezhong. Goal seeking of autonomous mobile robot with obstacle avoidance using heuristic dynamic programming[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 73–78. (in Chinese)
- 8 张铁民, 李辉辉, 陈大为, 等. 多源传感器信息融合的农用小车路径跟踪导航系统[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 37–42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150306&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.006.
- ZHANG Tiemin, LI Huihui, CHEN Dawei, et al. Agricultural vehicle path tracking navigation system based on information fusion of multi source sensor[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 37–42. (in Chinese)
- 9 林桂潮, 邹湘军, 张青, 等. 基于主动轮廓模型的自动导引车视觉导航[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 20–26. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170203&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.003.
- LIN Guichao, ZOU Xiangjun, ZHANG Qing, et al. Visual navigation for automatic guided vehicles based on active contour model[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 20–26. (in Chinese)
- 10 邵俊恺, 赵翮, 杨珏, 等. 无人驾驶铰接式车辆强化学习路径跟踪控制算法[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 376–382. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170348&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.048.
- SHAO Junkai, ZHAO Xuan, YANG Jue, et al. Reinforcement learning algorithm for path following control of articulated vehicle[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 376–382. (in Chinese)
- 11 武星, 沈伟良, 楼佩煌, 等. 视觉导引 AGV 鲁棒特征识别与精确路径跟踪研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(7): 48–56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160708&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.008.
- WU Xing, SHEN Weiliang, LOU Peihuang, et al. Robust feature recognition and precise path tracking for vision-guided AGV[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(7): 48–56. (in Chinese)
- 12 刘建华, 杨建国, 刘华平, 等. 基于势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 18–27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150903&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.003.
- LIU Jianhua, YANG Jianguo, LIU Huaping, et al. Robot global path planning based on ant colony optimization with artificial potential field[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 18–27. (in Chinese)
- 13 MANIKAS T W, ASHENAYI K, WAINWRIGHT R L. Genetic algorithms for autonomous robot navigation[J]. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 2007, 10(6): 26–31.
- 14 周建军, 张漫, 汪懋华, 等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(4): 151–156.
- ZHOU Jianjun, ZHANG Man, WANG Maohua, et al. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(4): 151–156. (in Chinese)
- 15 席裕庚. 动态不确定环境下广义控制问题的预测控制[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(5): 665–670.
- XI Yugeng. Predictive control of general control problems under dynamic uncertain environment[J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(5): 665–670. (in Chinese)
- 16 张纯刚, 席裕庚. 动态未知环境中移动机器人的滚动路径规划及安全性分析[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(1): 37–44.
- ZHANG Chungang, XI Yugeng. Rolling path planning and safety analysis of mobile robot in dynamic uncertain environment[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(1): 37–44. (in Chinese)
- 17 席裕庚, 张纯刚. 一类动态不确定环境下机器人的滚动路径规划[J]. *自动化学报*, 2002, 28(2): 161–175.
- XI Yugeng, ZHANG Chungang. Rolling path planning of mobile robot in a kind of dynamic uncertain environment[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(2): 161–175. (in Chinese)
- 18 谢永良, 尹建军, 贺坤, 等. 轮式 AGV 纯滚动转向系统设计及无侧滑转向控制研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 27–35. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180403&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.003.
- XIE Yongliang, YIN Jianjun, HE Kun, et al. Pure rolling steering system design and research on non-sideslip steering control for wheeled AGV[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 27–35. (in Chinese)
- 19 任孝平, 蔡自兴. 基于阿克曼原理的车式移动机器人运动学建模[J]. *智能系统学报*, 2009, 4(6): 534–537.
- REN Xiaoping, CAI Zixing. Using the Ackerman principle for kinematic modeling of wheeled mobile robots[J]. *Transactions on Intelligent Systems*, 2009, 4(6): 534–537. (in Chinese)
- 20 毛英慧, 靳光盈, 李新伟, 等. 轮式电动车转向差速控制方法[J]. *电机与控制应用*, 2016, 43(3): 74–78.
- MAO Yinghui, JIN Guangying, LI Xinwei, et al. An electronic differential control method of in-wheel driven EV[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2016, 43(3): 74–78. (in Chinese)
- 21 谭志斌, 赵祚喜, 赵汝祺, 等. 非 360°探测范围四轮导航车辆的平滑路径避障算法[J]. *机器人*, 2013, 35(5): 527–534.
- TAN Zhibin, ZHAO Zuoxi, ZHAO Ruqi, et al. Smooth obstacle-avoidance by 4-wheel navigational vehicle using non-360° range sensors[J]. *Robot*, 2013, 35(5): 527–534. (in Chinese)