

基于毫米波雷达的智能车辆主动避障控制系统设计

徐燕¹, 肖红², 袁新³

(1. 成都农业科技职业学院 机电信息学院, 成都 611130;

2. 四川城市职业学院 智能制造与交通学院, 成都 610101;

3. 四川工业科技学院 智能制造与车辆工程学院, 四川 德阳 618500)

摘要: 智能车辆所搭载监测设备对障碍物目标的识别准确性, 影响行驶车辆的避障能力; 为避免车辆与障碍物发生碰撞, 提升智能车辆的避障能力, 设计基于毫米波雷达的智能车辆主动避障控制系统; 在底层控制单元中, 按需连接纵向向导航控制元件与毫米波雷达摄像头, 完成智能车辆主动避障控制系统的部件结构设计; 利用毫米波雷达监测所得的车辆避障图像, 定义空间坐标系转换条件, 通过标定雷达相机参数的方式, 实现基于毫米波雷达的智能车辆避障路径规划; 建立车辆纵向运动模型, 根据避障安全距离计算结果, 完善具体控制流程, 联合各级硬件应用结构, 完成基于毫米波雷达的智能车辆纵向向主动避障控制系统的设计; 实验结果表明, 所设计系统可在智能车辆通过障碍物目标时, 保证车体与障碍物之间的距离大于 0.3 m, 能够有效避免碰撞行为发生, 对于车载监测设备而言, 其对于障碍物目标的准确识别能力得到了保障, 能够有效提升智能车辆避障能力。

关键词: 毫米波雷达; 智能车辆; 主动避障控制系统; 导航元件; 空间坐标系; 相机参数; 安全距离

Design of Intelligent Vehicle Active Obstacle Avoidance Control System Based on Millimeter Wave Radar

XU Yan¹, XIAO Hong², YUAN Xin³

(1. College of Mechanical and Electrical Information, Chengdu Agricultural College, Chengdu 611130, China;

2. College of Intelligent Manufacturing & Transportation, Urban Vocational College of Sichuan, Chengdu 610101, China;

3. College of Smart Manufacturing and Vehicle Engineering, Sichuan Institute of Industrial Technology, Deyang 618500, China)

Abstract: The accuracy of obstacle target recognition on monitoring devices carried on intelligent vehicles has a direct influence of the obstacle avoidance ability on vehicles. To avoid collisions between vehicles and obstacles and enhance the obstacle avoidance capability of intelligent vehicles, an intelligent vehicle active obstacle avoidance control system based on millimeter-wave radar is proposed. In the lower-level control unit, the navigation and control elements are connected to the millimeter-wave radar camera as needed to accomplish the component structure design of the intelligent vehicle active obstacle avoidance control system. The obstacle avoidance images obtained by the millimeter-wave radar are used to define the spatial coordinate system transformation conditions, the intelligent vehicle obstacle avoidance path planning based on millimeter-wave radar is achieved by calibrating the parameters of the radar camera. The longitudinal and lateral motion model of the vehicle is established, and the specific control procedure is developed based on the results of calculating safe distance on obstacle avoidance. The hardware application structure at all levels is combined to complete the design of the intelligent vehicle longitudinal and lateral active obstacle avoidance control system based on millimeter-wave radar. Experimental results demonstrate that the designed system can ensure a distance greater than 0.3 m between the vehicle and the obstacle when the intelligent vehicle passes through the obstacle, effectively avoiding collision incidents. It guarantees the accurate recognition ability of the monitoring device for obstacle targets, thereby improving the obstacle avoidance capability of intelligent vehicles.

Keywords: millimeter wave radar; intelligent vehicles; active obstacle avoidance control system; navigation elements; spatial coordinate system; camera parameters; safe distance

0 引言

智能车辆是集合多等级辅助驾驶、规划决策、环境感

知等应用功能于一体的综合系统, 集中运用了人工智能、自动化控制、计算机网络等多项控制技术。相较于一般车辆, 智能车辆搭载摄像头、雷达等先进传感器, 可以在执

收稿日期: 2023-06-20; 修回日期: 2023-07-24。

基金项目: 德阳市新能源专用车辆工程技术研究中心 2022 年度科研项目(XNYCL2202)。

作者简介: 徐燕(1987-), 女, 硕士, 副教授。

袁新(1987-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 徐燕, 肖红, 袁新. 基于毫米波雷达的智能车辆主动避障控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 78-84, 124.

行器与控制器元件的配合下, 感知车辆周围环境, 再借助信息终端体系, 实现人、车之间的信息交换。由于智能车辆具有自主感知外界环境的能力, 所以车载主机可以自动判断车辆所处行驶状态^[1]。对于智能化技术的研究, 可以大幅提高车辆的驾驶与控制水平, 从而保障车辆行驶过程中的安全性与高效性。此外, 智能车辆在技术性方面弥补了各项人为因素缺陷, 即便是在较为复杂的道路环境下, 控制主机也可以自动操纵车辆, 从而使其绕开障碍物对象, 可以沿着预定道路轨迹保持稳定的行驶状态。车辆通过障碍物目标时, 如果车体与障碍物之间的距离小于 0.3 m, 射频收发器元件所发出的毫米波就有可能被外部障碍结构所遮挡, 从而使得监控主机无法准确定位障碍物对象所处位置, 而这也是导致车辆碰撞问题的主要原因。

为避免上述情况的发生, 相关领域学者进行了研究, 文献 [2] 设计了基于图像和激光雷达的控制系统, 以 STM32 单片机为核心, 驱动智能车辆外部所负载的传感器元件, 借助数据融合子系统与输出控制子系统, 完成对障碍物监测信息的融合处理。文献 [3] 设计了基于自适应神经网络模糊系统 (ANFIS, adaptive network-based fuzzy inference system) 及模型预测控制 (MPC, model predictive control) 的控制系统, 在 Model Predictive Control 控制算法的基础上, 确定车辆换道路径与最小车距安全标准之间的数值关系, 由于监测主机能够准确记录智能车辆的横摆力矩, 所以即便是在避障过程中, 车辆也能保持较为稳定的行驶状态。然而随着障碍物目标数量的不断增大, 上述两种系统的应用, 并不能始终保证障碍物节点与智能车辆之间的行车距离, 故而不能完全避免车辆碰撞事件的发生。

毫米波雷达是指工作波段保持在 30~300 GHz 毫米波段内的雷达装置, 同时具有光电雷达与微波雷达的应用优势。相较于其他类型的雷达设备, 毫米波雷达的波导引头体积更小, 在外部图像像素水平相同的情况下, 应用该类型雷达所得光波图像的分辨率水平更高。毫米波能够穿透烟、雾、灰尘等介质, 且其抗干扰与反隐身的能力也更强, 既能够分辨出很小的识别目标, 也可以在识别任务过程中, 确保所得目标对象识别图像的绝对稳定性^[4]。对于车辆等运动对象而言, 毫米波雷达在其行驶过程中, 能够根据传感器元件中障碍物节点的显示图像, 调节车辆所处行进路径, 从而在避障过程中, 避免非稳定行驶行为的出现。利用毫米波雷达的应用特点, 设计一种新型的智能车辆主动避障控制系统, 并验证其在精准识别障碍物目标方面的应用能力。针对车辆避障效果差的问题, 基于 TAS 传感器、EUC 控制设备等, 设计主动线控转向结构和纵横向线控制动结构, 为了提高车辆的稳定性, 根据数据类型获取车辆纵横向导航控制元件参数, 设计毫米波雷达摄像头以准确定位障碍物节点信息, 根据上述内容完成硬件系统的设计。根据车辆轨迹毫米波雷达摄像头获取的结果, 对毫米波雷达图像进行空间坐标系的转换, 使各个元件之间的坐标保持一致, 在此前提下, 对雷达和相机的参数进行标定, 以

进一步补偿误差并提高系统的准确性, 并进一步设计避障路径, 确定纵横向线控制动结构连接模型, 对模型进行求解, 根据求解结果与障碍物保持安全距离, 完善控制流程实现软件系统的设计。

1 智能车辆主动避障控制系统的部件结构设计

智能车辆纵横向主动避障控制硬件系统的部件, 由主动线控转向结构、纵横向线控制动结构、导航控制元件、毫米波雷达摄像头四部分组成, 具体设计过程如下: 通过 TAS 传感器、EUC 控制设备、Motor 转角扭矩调节装置、继电感应装置、模式切换按钮设计主动线控转向结构, 设计纵横向线控制动结构连接车轮制动装置与 EMB 线控元件, 避免过度协调以实现整体避障控制, 根据数据类型设置车辆纵横向导航控制元件, 基于装车支架、金属底壳、电源板、金属框架、天线板和天线罩建立毫米波雷达摄像头, 确定节点对象的准确位置, 实现硬件系统的设计。

1.1 控制系统底层控制单元设计

控制系统底层控制单元负责处理毫米波雷达监测设备获取到的目标障碍物信息, 在智能车辆行驶过程中, 控制指令的执行需借助主动线控转向结构与纵横向线控制动结构。

1.1.1 主动线控转向结构

智能车辆主动避障控制系统的主动线控转向结构具有单信号模式、多信号模式两种执行状态。单信号模式下, 一个扭矩角度 (TAS, torque and angle sensor) 传感器、一个 EUC 控制设备、一个 Motor 转角扭矩调节装置参与主动线控转向结构的运行过程。其中, TAS 传感器可以在向外输出智能车辆纵横向主动运动信号的同时, 接收 EUC 控制设备反馈的电量信号, 从而使智能车辆保持较为稳定的运行状态。Motor 转角扭矩调节装置联合 EUC 控制设备, 感应外部障碍物节点所处位置, 并借助信道组织, 将所得数据信息传输至系统核心控制主机中^[5]。多信号模式下, TAS 传感器、MCU 控制设备、EUC 控制设备、Motor 转角扭矩调节装置、继电感应装置、模式切换按钮同时参与主动线控转向结构的运行过程。TAS 传感器输出的智能车辆纵横向主动运动信号在继电感应装置中大量聚集, 此时 MCU 控制设备、EUC 控制设备同时进入连接状态。主动线控转向结构连接模型如图 1 所示。

主动线控转向结构由单信号运行模式切换至多信号运行模式时, 模式切换按钮开始运行, 毫米波雷达摄像头采集到的智能车辆障碍物信息快速转存至系统核心控制主机中^[6]。当前情况下, 主动线控转向结构会自发与导航控制元件建立连接关系, 而导航控制元件中会生成大量的纵横向主动避障指令, 以供智能车辆机载设备的自由调取与利用。

1.1.2 纵横向线控制动结构

在控制系统底层控制单元中, 纵横向线控制动结构负责协调车轮制动装置与电子机械制动 (EMB, electromechanical brake) 线控元件之间的实时连接关系。智能车辆

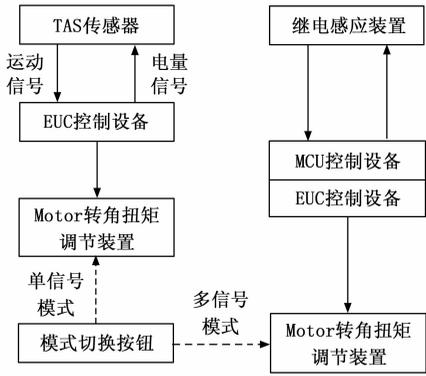


图 1 主动线控转向结构连接模型

通过障碍物目标时，车轮制动设备的连接状态发生改变，纵横向 EMB 线控元件就可以根据毫米波雷达摄像头所捕捉到的障碍物图像，来调节车辆与障碍物节点之间的物理距离，从而在实现整体避障控制的同时，避免导航控制元件中出现过度协调的情况^[7]。制动设备分别与智能车辆的车轮结构相连，且为对障碍物目标信息的准确记录，每一个车轮结构都必须配置一个独立的制动设备元件。纵横向 EMB 线控元件直接与制动踏板相连，踏板受力向下时，线控元件统计导航控制设备中累积的避障指令，当前情况下，制动设备受到系统控制主机的调节，其所表现出的行为状态也与 EMB 线控元件所要求的控制需求保持一致。纵横向线控制动结构连接模型如图 2 所示。

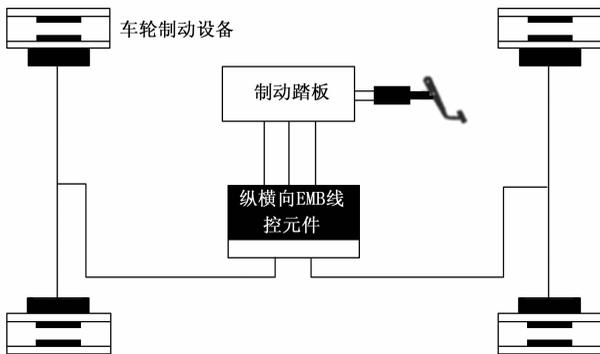


图 2 纵横向线控制动结构连接模型

车轮制动设备与纵横向 EMB 线控元件之间的连接借助双绞型线缆，后者输出的控制信号先经过主动线控转向结构的识别，才会被前者所接收，因此即便是线控元件出现非精准运行状态，制动设备对于车辆避障行为的调节能力也不会立刻发生变化^[8]。制动踏板与纵横向 EMB 线控元件之间的连接借助直流型线缆，这就表示只有在踏板设备输出直流指令信号的情况下，EMB 线控元件才会驱动纵横向线控制动结构。

1.2 车辆纵横向导航控制元件

在连接等级上，车辆纵横向导航控制元件比主动线控转向结构、纵横向线控制动结构的运行等级更高。在智能

车辆纵横向主动避障控制系统中，该元件可以根据障碍物节点所处位置，定义完整的避障控制指令，从而使得车辆在纵横方向上的稳定行驶能力得到保障^[9]。对于车辆纵横向导航控制元件的设置如表 1 所示。

表 1 车辆纵横向导航控制元件设置

序号	数据类型	数据名称	字节偏移	字节个数
1	Enum	位置类型	H+3	4
2	Enum	导航节点状态	H+4	4
3	Float	障碍物信息数据头	0	8
4	Double	东向速度/(m/s)	H+24	8
5	Double	西向速度/(m/s)	H+32	8
6	Double	南向速度/(m/s)	H+36	8
7	Double	北向速度/(m/s)	H+44	8
8	Hex	横滚角/(°)	H+60	4

位置类型、导航节点状态的定义，都只针对毫米波雷达摄像头所采集到的障碍物目标信息，由于避障信息在控制系统中的传输能力有限，因此这两类数据对象的定义类型只能是字节偏移量较小的“Enum”型节点。障碍物信息数据头决定了智能车辆障碍物节点所处位置，所以其字节偏移量必须为零^[10]。东、西、南、北 4 类速度数据的定义影响智能车辆避障过程中，与障碍物目标节点之间的距离，由于系统控制主机对于自主避障能力的要求较高，所以这些数据对象的定义类型必须是字节偏移量较大的“Double”型节点。智能车辆纵横向主动避障过程中，横滚角是普遍存在的变量指标，所以该类型节点在字节偏移量方面的要求更高。

1.3 毫米波雷达摄像头设计

毫米波雷达摄像头是智能车辆纵横向主动避障控制系统中唯一具有图像处理能力的部件，可以在监测设备的配合下，获得完整的障碍物节点信息，并能够按照车辆纵横向导航控制元件的实时避障需求，确定节点对象在毫米波雷达图像中所处的准确位置。车辆轨迹毫米波雷达摄像头结构如图 3 所示。

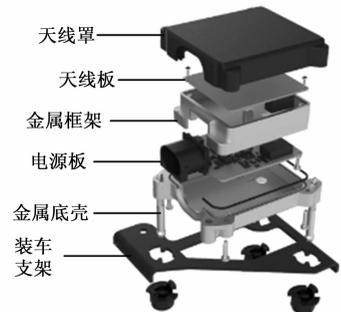


图 3 车辆轨迹毫米波雷达摄像头结构

装车支架是固定装载结构，可以将毫米波雷达摄像头固定在车轮制动设备上。金属底壳对毫米波雷达摄像头起到保护作用，可以避免外力冲击对摄像头结构造成损坏，从而使得摄像头部件对于障碍物节点信息的记录能力得到

了保障^[11]。电源板与控制系统的电源终端相连, 在控制系统运行过程中, 该元件内会聚集大量的电信号参量, 随着智能车辆运行状态的改变, 电信号的累积总量也会发生变化, 且障碍物节点布局密度较大情况下, 电信号对象的累积量也会明显增加。金属框架既具有一定的支撑作用, 也可以将毫米波雷达摄像头的上级应用结构与下级应用结构分隔开来。天线板是毫米波雷达光波的接入区域, 由于摄像头元件不具有产生光波信号的能力, 所以在智能车辆进行纵横向主动避障的过程中, 天线板元件必须保持连续接通状态^[12]。天线罩是过滤信号的装置, 可以避免毫米波雷达摄像头采集到干扰性信号参量, 从而使得系统主机能够对智能车辆纵横向主动避障行为进行有效控制。

2 基于毫米波雷达的智能车辆避障路径规划

对于智能车辆纵横向主动避障路径的规划, 需借助毫米波雷达监测所得障碍物节点信息, 完成雷达图像的空间坐标系转换, 再根据相机参数标定结果, 确定具体规划方案。

2.1 车辆避障毫米波雷达图像的空间坐标系转换

针对车辆避障毫米波雷达图像的空间坐标系转换, 就是同时在车辆运动平面、雷达信号传输回路、相机拍摄回路内建立空间直角坐标系, 统一各元件坐标, 再根据毫米波的传输特征, 将这些坐标系关联起来, 从而使得系统控制主机具有同时调节车辆运动平面、雷达信号传输回路与相机拍摄回路的能力。由于车辆运动平面、雷达信号传输回路、相机拍摄回路保持完全水平状态, 所以控制信号达到相机元件、雷达装置、车载监测设备所需的传输时长完全相等^[13-14]。车辆避障毫米波雷达图像的空间坐标系转换原则如图 4 所示。

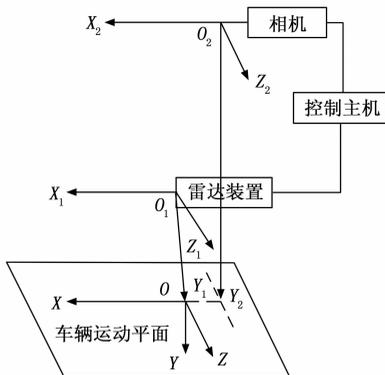


图 4 车辆避障毫米波雷达图像的空间坐标系转换原则

规定车辆运动平面内的坐标原点为 O 、横向坐标所在直线为 X 轴、纵向坐标所在直线为 Y 轴、空间坐标所在直线为 Z 轴, 雷达信号传输回路中的坐标原点为 O_1 、该平面内横向坐标所在直线为 X_1 轴、纵向坐标所在直线为 Y_1 轴、空间坐标所在直线为 Z_1 轴, 相机拍摄回路内的坐标原点为 O_2 、该平面内横向坐标所在直线为 X_2 轴、纵向坐标所在直线为 Y_2 轴、空间坐标所在直线为 Z_2 轴, 联立上述物理量, 可将车辆避障毫米波雷达图像的空间坐标系转换表达式定义为:

$$\chi = \begin{vmatrix} \mathbf{OO}_1 \\ \mathbf{OO}_2 \end{vmatrix} \begin{pmatrix} \delta_Y \delta_{Y_1} \delta_{Y_2} \\ \alpha_X \alpha_{X_1} \alpha_{X_2} \end{pmatrix} \times (\epsilon_Z \epsilon_{Z_1} \epsilon_{Z_2}) \quad (1)$$

式中, $\alpha_X, \alpha_{X_1}, \alpha_{X_2}$ 分别为车辆运动平面、雷达信号传输回路、相机拍摄回路内的横轴坐标标记项, $\delta_Y, \delta_{Y_1}, \delta_{Y_2}$ 分别为不同平面内的纵轴坐标标记项, $\epsilon_Z, \epsilon_{Z_1}, \epsilon_{Z_2}$ 为不同平面内的空间坐标标记项, \mathbf{OO}_1 为车辆运动平面与雷达信号传输回路坐标原点之间的连线向量, \mathbf{OO}_2 为车辆运动平面与相机拍摄回路坐标原点之间的连线向量。

毫米波雷达提取车辆行驶信息时, 只能对信号参量进行无差别提取, 所以为保证车辆避障毫米波雷达图像空间坐标系转换表达式的计算准确性, 要求控制主机在车辆运动平面、雷达信号传输回路、相机拍摄回路内提取所得的信号总量必须完全相等。

2.2 针对坐标系转换原则的雷达相机参数标定

雷达相机参数标定就是根据毫米波传输特征, 调节雷达相机设备对智能车辆的摄影能力, 从而在准确监测纵横向障碍物对象的同时, 确保空间坐标系能够适应行驶车辆的主动避障需求。虽然车辆避障毫米波雷达图像同时涉及车辆运动平面、雷达信号传输回路、相机拍摄回路 3 个平面内的空间坐标, 但由于雷达相机只控制车辆运动平面的避障行为, 所以在标记雷达相机参数时, 所选参数指标只属于车辆运动平面^[15-16]。

在车辆运动平面内, 分别取横向、纵向、空间向 3 个方向上的毫米波雷达相机摄像参数, 其定义为:

$$\begin{cases} m_X = \frac{b_X}{\chi} \cdot \vec{C}_X \\ m_Y = \frac{b_Y}{\chi} \cdot \vec{C}_Y \\ m_Z = \frac{b_Z}{\chi} \cdot \vec{C}_Z \end{cases} \quad (2)$$

式中, m_X 为横向毫米波雷达相机摄像参数, b_X 为雷达相机在横向运动方向上所捕获到的障碍物特征, \vec{C}_X 为横向运动方向上的主动避障行为向量, m_Y 为纵向毫米波雷达相机摄像参数, b_Y 为雷达相机在纵向横向运动方向上所捕获到的障碍物特征, \vec{C}_Y 为纵向运动方向上的主动避障行为向量, m_Z 为空间向毫米波雷达相机摄像参数, b_Z 为雷达相机在空间向运动方向上所捕获到的障碍物特征, \vec{C}_Z 为空间向运动方向上的主动避障行为向量。

利用式 (2), 推到毫米波雷达相机参数标定表达式为:

$$V = \beta \times \sqrt{\frac{m_X \cdot m_Y \cdot m_Z}{s_X \cdot s_Y \cdot s_Z}} \quad (3)$$

式中, s_X 为智能车辆的横向行驶特征, s_Y 为纵向行驶特征, s_Z 为空间纵向行驶特征, β 为基于坐标系转换原则的雷达相机标定阈值。由于系统控制主机对于智能车辆纵横向避障行为的调节属于一种主动执行指令, 所以毫米波雷达相机参数标定表达式的计算取值恒大于零。

2.3 面向相机参数的主动避障路径规划

主动避障路径是系统控制主机根据毫米波雷达捕捉到

障碍物信息所制定的行驶路线。在智能车辆行驶过程中，障碍物目标的存在位置并无明显规律性，所以控制主机规划避障路径时，会优先根据雷达相机参数标定条件，判断障碍物节点与车辆之间的物理距离。相机参数对于障碍物信息的取样无法分辨出两个障碍节点是否存在于同一车辆行驶轨迹之内，所以系统控制主机对于主动避障路径的规划必须适应整个车辆运动平面^[17-18]。

假设 k 为运动平面内的智能车辆纵横向行驶行为向量，其计算公式为：

$$k = \frac{(l^i - \tilde{j})^2}{V \times |\Delta H|} \quad (4)$$

式中， l^i 为基于毫米波雷达相机参数的障碍物对象捕获系数， ΔH 为障碍物节点标记参数， \tilde{j} 为车辆运动平面内的避障行为等级评价向量。

在式 (4) 的基础上，可将智能车辆纵横向主动避障路径规划表达式定义为：

$$S = k \left(\sum_{\gamma=1}^{\gamma} f_{\gamma} \cdot d \cdot a \cdot \left| \frac{\tilde{g}}{\tilde{A}} \right|^2 \right) \quad (5)$$

式中， γ 为障碍物目标信息取样参数， f_{γ} 为障碍物节点与车辆之间的物理距离定义系数， d 为智能车辆实时行驶参数， a 为行驶行为规划系数， \tilde{g} 为避障路径内的障碍物节点布局特征， \tilde{A} 为避障行为规划向量。单位控制周期内，毫米波雷达可以记录大量的障碍物目标信息，所以系统主机在一条行驶路径中，也可以对智能车辆纵横向主动避障行为进行多次控制。

3 利用避障路径的主动避障控制行为的实现

为实现系统主机对智能车辆纵横向主动避障行为的控制，还应求解车辆纵横向运动模型，并以此为基础，计算避障安全距离的具体数值，从而实现对控制指令执行流程的完善。

3.1 车辆纵横向运动模型求解

智能车辆纵横向运动模型同时在横向、纵向、空间向 3 个方向上存在数值分量，所以对于模型的求解，也必须从 3 个方向上进行。

1) 车辆纵横向运动模型的横向求解分量：

$$G_x = D_x + \varphi h_x \quad (6)$$

式中， D_x 为智能车辆的横向运动向量， φ 为横向避障系数， h_x 为车辆行驶行为的横向数值分量。

2) 车辆纵横向运动模型的纵向求解分量：

$$G_y = \frac{1}{\varphi} D_y \cdot h_y \quad (7)$$

式中， D_y 为智能车辆的纵向运动向量， φ 为纵向避障系数， h_y 为车辆行驶行为的纵向数值分量。

3) 车辆纵横向运动模型的空间向求解分量：

$$G_z = \frac{D_z \cdot h_z}{(\lambda - 1)^2} \quad (8)$$

式中， D_z 为智能车辆的空间向运动向量， λ 为空间向避障系数， h_z 为车辆行驶行为的空间向数值分量。

联立式 (5) ~ (8)，推导车辆纵横向运动模型表达式为：

$$G = S |L|^2 + \frac{\kappa}{G_x G_y G_z} \bar{E} \quad (9)$$

式中， L 为基于毫米波雷达图像的车辆纵横向行驶行为统计向量， κ 为避障路径内的车辆行驶偏移系数， \bar{E} 为避障路径内的纵横向坐标系定义项^[19-20]。由于毫米波雷达所采集到障碍物节点的图像域广度相对有限，所以车辆纵横向运动模型求解表达式只适合节点对象的当前取样路径。

3.2 利用运动模型的避障安全距离计算

避障安全距离就是指智能车辆通过障碍物目标时，车体与障碍物之间的最小间隔距离。该项物理量的计算数值越大，就表示车辆与障碍物之间的距离越远^[21-22]。纵横向毫米波雷达图像只能反映出智能车辆的平面避障状态，而真实车辆行驶状态却是一种空间性行为，所以为保障系统主机对车辆主动避障行为的精准控制能力，在求解安全距离时，必须考虑纵横向行驶路径的空间性程度。

对于智能车辆纵横向避障安全距离的计算满足如下表达式：

$$H_{\min} = \dot{q} \times \dot{\omega} + \frac{G}{2\mu} + \bar{R} \quad (10)$$

其中： \dot{q} 为纵横向避障路径内的智能车辆行驶速率特征， $\dot{\omega}$ 为非碰撞前提下的智能车辆纵横向行驶制动特征， μ 为智能车辆的匀速运动系数， \bar{R} 为主动避障路径内的车辆制动前移量均值。控制系统运行过程中，智能车辆纵横向运动行为满足制动性运动特征，所以系统主机对于主动避障行为的调节也具有制动控制的特点。

3.3 基于避障安全距离的控制流程完善

完善系统控制流程，就是指借助毫米波雷达所采集到障碍物节点信息，生成完整的控制指令程序。导航控制元件是系统中唯一具有生成程序指令能力的部件，所以在完成安全距离计算后，雷达摄像头会将采集到的数据信息自动传输至导航控制元件中^[23-24]。智能车辆纵横向主动避障控制流程如图 5 所示。

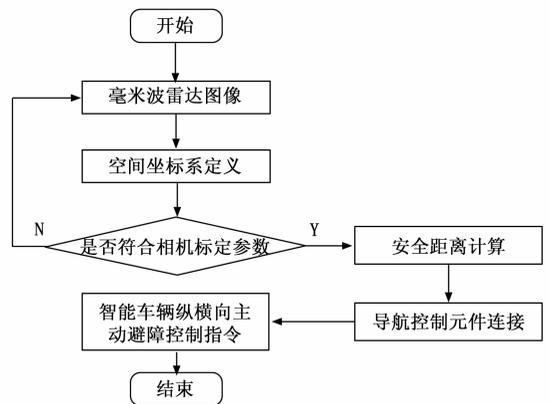


图 5 智能车辆纵横向主动避障控制流程图

假设 \bar{I} 为控制主机对车辆纵横向行驶路径的校正系数，

\tilde{O} 为避障轨迹内的智能车辆行驶校正系数, v 为主动避障控制权限, 联立式 (10), 可将智能车辆纵横向主动避障控制系统执行表达式定义为:

$$U = (\tilde{I} \cdot \tilde{O})^2 \times \sqrt{\frac{1}{v} H_{\min}} \quad (11)$$

如果智能车辆的行驶路径过于复杂, 在控制纵横向主动避障行为时, 为避免车体与障碍物发生碰撞, 可以将连贯的路径曲线分离出来, 再分别对每一路径内的避障行为进行控制。

根据上述内容可知, 基于车辆轨迹毫米波雷达摄像头获取的结果, 对毫米波雷达图像进行空间坐标系的转换, 使各个元件之间的坐标保持一致后, 标定雷达相机参数, 规划车辆的主动避障路径, 提高避障系统的准确性。根据规划的避障路径, 求解控制系统底层控制单元的纵横向线控制结构连接模型, 获取避障安全距离的具体数值, 完善控制流程, 实现基于毫米波雷达的智能车辆主动避障控制软件系统设计。

4 实验分析

为了验证设计基于毫米波雷达的智能车辆主动避障控制系统的有效性进行实验分析, 车载监测设备对障碍物目标的识别能力影响智能车辆的纵横向避障能力。采用多传感器数据融合算法将毫米波雷达与传感器数据进行融合, 以 ROS 作为仿真工具, 以城市道路场景作为实验测试场景, 将长度约 4~5 m, 宽度约 1.5~2 m 的汽车作为障碍物, 毫米波雷达的长度、宽度范围为 20~40 cm, 高度约 8 cm, 以此作为测试条件。本次实验根据监测设备对障碍物目标的识别准确性, 来判断车辆行驶过程中, 车体与障碍物之间是否会发生碰撞。

4.1 实验原理与步骤

选择智能车辆作为实验对象, 智能车辆避障实验如图 6 所示。



图 6 智能车辆避障实验

令其在包含 8 个障碍物对象的纵横向区域内自由行驶, 分别应用基于毫米波雷达的智能车辆主动避障控制系统(所设计系统)、基于图像和激光雷达的控制系统(文献 [2] 系统)、基于 ANFIS 及 MPC 的控制系统(文献 [3] 系统)对车辆行驶行为进行调节, 记录实验过程中车辆与

障碍物之间的物理距离, 并以此作为判断是否会发生碰撞行为的依据。

车载监测设备对于障碍物节点的捕捉图像如图 7 所示。

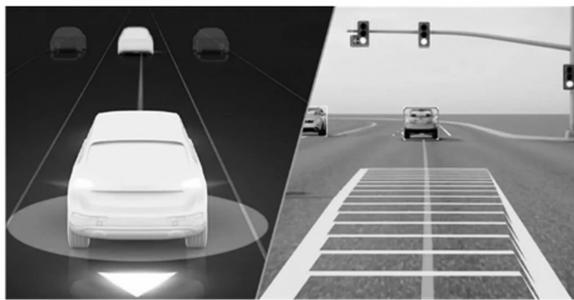


图 7 车载监控器对于障碍物节点的捕捉

DS-2CD3T20D-I3200 型监测设备放置在智能车辆机盖上, 其在监测过程中, 将每一个障碍物节点都识别为一个可能与之发生碰撞的车辆对象, 在车辆达到障碍物对象之前, 智能车辆主机会根据监测设备采集到的障碍物信息, 来判断车体与障碍物对象之间的碰撞概率, 并以此为依据, 调节车辆行驶行为, 从而实现对碰撞事件的有效控制。规定: 车体与障碍物之间的距离大于 0.3 m 时, 在行驶过程中, 车体与障碍物节点才不会发生碰撞。

本次实验的具体执行流程如下:

- 1) 应用基于毫米波雷达的智能车辆主动避障控制系统调节车辆行驶路线, 记录实验过程中, 车辆与各个障碍物节点之间的物理距离, 所得结果为实验组变量。
- 2) 应用基于图像和激光雷达的控制系统调节车辆行驶路线, 记录实验过程中, 车辆与各个障碍物节点之间的物理距离, 所得结果为第一对照组变量。
- 3) 应用基于 ANFIS 及 MPC 的控制系统调节车辆行驶路线, 记录实验过程中, 车辆与各个障碍物节点之间的物理距离, 所得结果为第二对照组变量。
- 4) 分别将实验组、第一对照组、第二对照组记录数值与 0.3 m 对比, 根据所得差值, 总结实验规律。

4.2 结果与结论

实验组、第一对照组、第二对照组控制系统作用下, 车体与障碍物之间的距离数值如图 8 所示。

分别统计图 8 中间隔距离与规定距离 (0.3 m) 之间的差值水平, 详情如表 2 所示。

表 2 间隔距离差值统计

障碍物目标编号	实验组/m	第一对照组/m	第二对照组/m
1	+0.29	-0.02	-0.19
2	+0.03	-0.14	-0.17
3	+0.27	-0.11	-0.06
4	+0.05	-0.43	-0.18
5	+0.30	+0.04	-0.15
6	+0.28	-0.15	-0.26
7	+0.30	+0.24	-0.12
8	+0.28	-0.18	-0.25

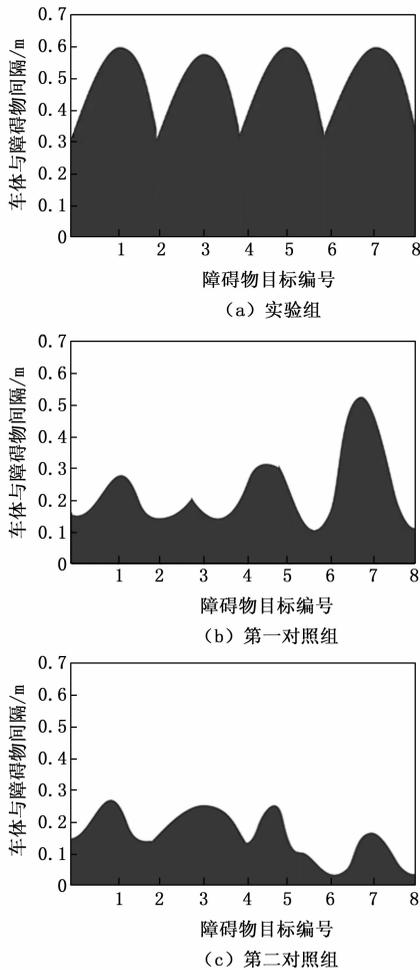


图 8 车体与障碍物的间隔距离

分析表 2 可知,在整个实验过程中,实验组间隔距离差值始终大于零,即实验组车体与障碍物的间隔距离始终大于 0.3 m。第 5 和第 7 障碍物目标处,第一对照组间隔距离差值大于零,其他差值均小于零,即第 5 和第 7 障碍物目标处,第一对照组车体与障碍物的间隔距离大于 0.3,其他障碍物目标处,该组间隔距离均小于 0.3 m。在整个实验过程中,第二对照组间隔距离差值始终小于零,即第二对照组车体与障碍物的间隔距离始终小于 0.3 m。

综上所述本次实验结论,基于毫米波雷达的智能车辆主动避障控制系统的应用,可以保证车体与障碍物之间的距离大于 0.3 m,有效避免了碰撞行为的发生,对于车载监测设备而言,其对于障碍物目标的准确识别能力得到了保障,符合提升智能车辆避障能力的实际应用需求。

5 结束语

本文设计了基于毫米波雷达的智能车辆主动避障控制系统,在主动线控转向结构、纵横向线控制动结构的支持下,调度导航控制元件,结合车辆轨迹的毫米波雷达摄像头,规划智能车辆避障路径。与其他两种控制系统相比,

所设计系统可以精准求解车辆纵横向运动模型,从而使避障安全距离保持在相对较高的数值水平状态,能够提升智能车辆所搭载监测设备对障碍物目标的识别准确性,增强了行驶车辆的避障能力,与实际应用需求相符合。

参考文献:

- [1] 郭戈, 张茜, 高振宇. 具有预设瞬稳态性能的有限时间智能车辆固定构型编队控制 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (3): 28-42.
- [2] 周棕凯, 胡佳宁, 张晨一, 等. 基于图像和激光雷达的避障割草机控制系统设计 [J]. 农机化研究, 2022, 44 (9): 80-84.
- [3] 石振新, 冯剑波, 王衍学. 基于 ANFIS 及 MPC 的车辆转向换道控制系统设计 [J]. 现代制造工程, 2022 (2): 70-78.
- [4] 李泽丕, 李春树, 李佳宁, 等. 基于压缩感知的自适应再选择毫米波信道估计 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (8): 222-225.
- [5] 王云龙, 王泽政, 王永富, 等. 带有干扰观测器的线控转向系统复合自适应神经网络控制 [J]. 控制理论与应用, 2021, 38 (4): 433-443.
- [6] 刘文通, 陈俐, 陈峻. 考虑延迟的汽车线控转向系统自适应内模控制 [J]. 上海交通大学学报, 2021, 55 (10): 1210-1218.
- [7] 初亮, 常城, 王旭, 等. 面向高级自动驾驶的线控系统压力控制算法研究 [J]. 汽车工程, 2022, 44 (3): 308-318.
- [8] 刘海超, 刘红旗, 冯明, 等. 智能汽车集成式线控制动系统传动机构优化设计 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (20): 399-409.
- [9] 伟利国, 袁玉龙, 董鑫, 等. 拖挂式大载荷特种车辆导航控制系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53 (s1): 324-331.
- [10] 胡子谦, 王登辉, 胡瑞, 等. 基于拟人驾驶模型的联合收获机导航控制器设计与试验 [J]. 华中农业大学学报, 2022, 41 (4): 248-258.
- [11] 蒋留兵, 汪林, 车俐. 获取俯仰信息的车载合成孔径雷达成像方法 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (15): 6337-6344.
- [12] 高继东, 焦鑫, 刘全周, 等. 机器视觉与毫米波雷达信息融合的车辆检测技术 [J]. 中国测试, 2021, 47 (10): 33-40.
- [13] 邱晓初, 赵英豪, 唐洪波, 等. 一种新型不对称三相准四电平四桥臂逆变器及 abc 坐标系下三维空间矢量脉宽调制算法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (8): 2844-2856.
- [14] 蒋莉, 谢伟, 孙国道, 等. 基于空间坐标系旋转的高效轨迹匹配算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2022, 34 (1): 44-53.
- [15] 于跃华, 王好臣, 赵锦泽, 等. 基于 DXF 的复杂工件标定及相机参数优化 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021 (10): 14-18.
- [16] 王云舒, 陈巨兵, 孙晨. 大视场双目投影条纹方法中的相机参数标定与优化研究 [J]. 实验力学, 2021, 36 (2): 175-184.

(下转第 124 页)